世界前沿技术发展报告 2023

版权信息

书名：世界前沿技术发展报告 2023

作者：国务院发展研究中心国际技术经济研究所

出版社：电子工业出版社

出版时间：2023-06-01

ISBN：9787121458231

品牌方：电子工业出版社有限公司内容简介

本书详细介绍了2022年世界前沿技术的重大进展和发展动向，并对影响前沿技术发展的重大问题进行了深入分析。全书共包括8个分报告，分别介绍了信息、生物、能源、新材料、智能制造、航天、航空、海洋技术领域的最新发展动态，包括重大技术进展及相关产业的发展、主要国家的战略举措等。

本书可供从事科技决策和管理的领导、工作人员及从事前沿技术研究的学者和专家参考。

《世界前沿技术发展报告 2023》编委会

主任　肖英峰

委员　宫晨光　卢伟

评审（按姓氏笔画排序）

王镇　王得金　方勇　祁峰　李大海

李宝山　李俊峰　杨卫丽　肖洋　张忠伦

张聚恩　周永春　徐鹏　高彬彬　梁巍

谢兵兵　谭茗洲　魏晓青

《世界前沿技术发展报告 2023》编写组

组长　卢伟

副组长　魏强　王冠宇　滕飞

报告执笔人

综述　侯晓轩　虢芳　杨金洁　白路　郑实

信息　包宏　唐乾琛　刘纪铖

生物　张芮晴　戴吉

能源　时璟丽　钟财富　张宇麒

新材料　宫学源　张亦凡　李维科

智能制造　吴桐　李晓红　李云翾　曾旻　贾建民 宋韦哲　董蓉

航天　张嘉毅　云仲伦

航空　赵群力　姜曙光　邓中卫　张嘉毅　云仲伦

海洋　李志　武志星　宗山雨

编辑　杜元清　李静　王敬涵　张嘉毅　刘发鹏

目　录

第一章 世界前沿技术发展报告综述 16
一、世界前沿技术发展趋势与特点 17
（一）前沿技术创新释放聚合效应 17
（二）科技创新成为解锁风险挑战的“金钥匙” 20
（三）全球创新投入持续加大，亚洲创新势头强劲 22
（四）全球科技竞争博弈加剧 25
（五）全球技术治理体系亟须变革 28
二、世界主要经济体科技战略与政策动态 30
（一）强化前沿技术的战略布局 30
（二）密集调整军事战略 32
（三）美西方构筑排华高科技供应链 35
（四）着力提升技术应用能力 37
三、重要前沿技术领域研究进展 40
（一）信息技术 40
（二）生物技术 45
（三）能源技术 52
（四）新材料技术 59
（五）智能制造技术 66
（六）航天技术 70
（七）航空技术 76

（八）海洋技术 82
第二章 世界信息技术发展报告 88
一、世界信息技术及产业发展重要动向 89
（一）半导体技术水平持续进步 89
（二）人工智能大模型加速行业变革 96
（三）网络安全政策聚焦关键基础设施网络防御 100
（四）量子技术热度与日俱增 104
（五）先进计算赋能算力增长 111
（六）各国加强加密市场监管 114
二、人工智能技术 120
（一）基础研究 120
（二）模式识别 124
（三）复杂系统控制与智能信息处理 126
三、量子信息技术 129
（一）量子计算 129
（二）量子通信 133
（三）量子传感 135
四、电子信息技术 139
（一）微电子技术 139
（二）光电子技术 148
五、先进计算技术 152
（一）超级计算机 152

（二）新型计算技术 154
六、网络与通信技术 157
（一）5G 与光通信 157
（二）6G 技术 161
七、网络与信息安全技术 163
（一）网络安全关键技术 163
（二）数据安全关键技术 166
（三）量子密码技术 168
第三章 世界生物技术发展报告 170
一、世界生物技术及产业发展重要动向 171
（一）生物经济时代加速到来 171
（二）全球粮食危机日益恶化 178
（三）人工智能与生物技术的日益融合 182
（四）加强生物安全领域的战略部署 189
（五）世界各国加速启动疫苗研发 200
二、合成生物学 206
（一）合成生物学产业发展概述 207
（二）合成生物学成为着重关注和发展的领域 208
（三）合成生物学研究进展 214
（四）合成生物学的双重用途风险 230
三、脑科学 231
（一）积极推动脑科学研究 232

（二）脑科学基础研究不断取得重要突破 234
（三）脑机接口与类脑智能逐步走向成熟 247
（四）脑科学研究的主要挑战及未来趋势 252
四、干细胞 254
（一）干细胞基础研究及产业发展 255
（二）干细胞研究频现重大突破 257
五、基因编辑 273
（一）基因编辑技术更加多样化 273
（二）基因编辑获得诸多新突破 280
（三）亟须加强全球治理和监督 289
第四章 世界能源技术发展报告 292
一、世界能源技术及产业发展重要动向 293
（一）全球能源供应格局正在改变 293
（二）能源短缺使核电迎来“复苏” 298
（三）欧盟影响全球可再生能源发展 302
（四）绿氢成为全球氢能战略和产业发展的热点 306
二、化石能源 312
（一）油气 312
（二）煤炭 315
（三）化石能源脱碳 318
三、可再生能源 321
（一）风力发电 322

（二）光伏发电 328
（三）光热发电 336
（四）其他技术 337
四、核能 340
（一）第三代核电技术及小型模块化反应堆 341
（二）第四代核电技术及先进核燃料 350
（三）聚变技术 354
五、氢能 356
（一）制氢技术和产业动态 357
（二）氢能加注、储运技术和产业动态 368
（三）氢能应用技术和产业化动态 372
第五章 世界新材料技术发展报告 383
一、世界新材料技术及产业发展重要动向 383
（一）科技强国重点关注新材料供应链安全 386
（二）发达国家抢占科技产业发展先机 393
（三）新材料研发为碳中和目标提供重要支撑 401
二、高性能结构材料 408
（一）金属结构材料 409
（二）无机非金属材料 413
（三）高分子材料 416
（四）复合材料 422
三、先进功能材料 426

（一）先进信息材料 427
（二）新能源材料 430
（三）生物医用材料 439
（四）节能环保材料 443
四、前沿新材料 449
（一）二维材料 449
（二）智能材料 453
（三）超材料 456
第六章 世界智能制造技术发展报告 460
一、世界智能制造技术及产业发展重要动向 460
（一）主要国家智能制造技术发展政策举措 461
（二）人工智能技术与先进制造业深入融合 468
（三）加速推动制造业数字化转型 473
（四）智能工厂建设稳步推进 482
二、机器人技术 487
（一）工业机器人走向智能化应用 487
（二）仿生机器人在特种机器人领域表现抢眼 496
（三）服务机器人在多个领域作用显著 503
三、增材制造技术 506
（一）增材制造技术取得诸多新突破 507
（二）3D 打印材料向着可持续化方向发展 510
（三）3D 打印技术在生物领域应用加快 512

（四）3D 打印技术在建筑领域应用逐渐增加 514
（五）3D 打印技术在国防领域备受瞩目 517
四、智能制造及赋能技术 519
（一）工业物联网实现跨界融合 520
（二）人工智能走向整体管控 523
（三）数字孪生技术加速打造工业元宇宙 526
五、工业控制平台、工业软件与智能工厂 528
（一）现场级工业控制平台强调开放性与网络化 529
（二）加速工业软件开发与应用转型 530
（三）智能工厂新方案 533
第七章 世界航天技术发展报告 537
一、世界航天技术发展重要动向 537
（一）中国航天事业硕果累累 538
（二）强化国防太空能力建设 543
（三）低轨星座布建规模持续增长 550
（四）商业卫星将成为军事介入新兴工具 556
（五）手机卫星直连技术有望引发全球通信变革 562
二 、卫星技术 568
（一）通信卫星 568
（二）侦察监视与遥感卫星 574
（三）导航卫星 578
（四）预警卫星 583

三、运载火箭技术 586
（一）一次性使用运载器 586
（二）可重复使用运载器 592
四、载人航天技术 599
（一）商业公司开展载人航天发射和测试任务 600
（二）俄罗斯航天局公布新太空站实体模型 602
（三）中国太空站梦天实验舱成功交会对接 603
五、太空探索技术 604
（一）月球探索规划和探索活动 605
（二）火星探索活动 612
（三）太阳探索活动 614
（四）其他深空探索活动 616
（五）深空探索前沿技术 618
第八章 世界航空技术发展报告 622
一、世界航空技术及产业发展重要动向 622
（一）世界航空产业继续保持回升态势 623
（二）俄乌冲突再次证明航空装备的重要性 626
（三）美欧积极建设新的航空科研生产设施 629
（四）美欧航空制造商并购重组提升运营效率 631
（五）高超声速技术竞争日趋激烈 633
（六）人工智能技术向空战领域拓展 636
（七）绿色航空成为多国关注的重点 639

二、军用飞机技术 641
（一）作战飞机 641
（二）支援飞机 645
三、民用飞机技术 648
（一）干线飞机 648
（二）支线飞机 652
（三）通用飞机 653
四、无人机技术 655
（一）无人作战飞机 655
（二）支援保障无人机 658
（三）微小型无人机 659
五、直升机技术 661
（一）常规直升机技术 661
（二）新概念直升机技术 664
六、航空动力技术 666
（一）军用航空动力技术 666
（二）民用航空动力技术 668
（三）新概念航空动力 670
七、机载系统与武器技术 672
（一）机载系统技术 672
（二）机载武器技术 678
第九章 世界海洋技术发展报告 682

一、世界海洋技术发展动向 682
（一）世界主要国家聚焦海洋科技与产业发展 683
（二）海上无人装备向着大型化实战化方向发展 688
（三）北极地区展开新一轮竞争 692
（四）深海资源开发热度持续高涨 698
（五）提升高技术船舶全球竞争力 701
二、海洋防务装备与技术 707
（一）航空母舰 708
（二）潜艇 710
（三）水面舰艇 716
（四）无人装备 720
（五）水中兵器 723
（六）舰载武器 726
三、极地考察与开发 727
（一）世界主要国家发布新版极地战略 728
（二）极地装备与技术成为极地战略重要依托 732
（三）俄罗斯加快开发北极航道 737
（四）围绕北极油气、矿产资源的竞争更加激烈 740
四、深海装备与技术 743
（一）深海探测装备与技术 743
（二）深海资源开发装备与技术 749
五、高技术船舶 753

（一）绿色船舶 754
（二）智能船舶 760
（三）特种船舶 764
六、海洋电子信息技术 768
（一）海洋观测探测覆盖更广更深海域 769
（二）水下导航定位技术精准度日益增高 775
（三）一体化海洋通信网络加速构建 778
致谢 782

第一章 世界前沿技术发展报告综述

2022 年，世界百年未有之大变局加速演进，新一轮科技革命和产业变革深入发展，科技创新在大国博弈中越发成为关键变量，前沿技术领域已成为大国竞争的重要战略阵地，科学技术在变局之中从来没有像今天这样深刻影响着国家的前途命运，指引着未来。全球新冠疫情反复延宕，未来仍存在一定的不确定性；乌克兰危机牵动世界，外溢效应引发全球政治、经济、安全局势和粮食、能源等多重危机；全球频现极端天气，应对解决气候问题迫在眉睫；国际主要经济体通胀高企，全球经济增长停滞甚至下行的趋势明显，在这样的背景下，世界各国更加重视科技创新，把科技创新作为发展的新引擎，不断加大前沿科技布局，寄希望于利用科技实力和创新能力，重塑经济结构，摆脱当前的困局。全球科技创新热情持续高涨，前沿技术迭代和新科技生态构建加速。在科技为世界各主要国家发展和安全提供战略支撑、激发经济和产业发展内生动力的同时，大国围绕未来科技发展主导权的争夺也越发激烈。

一、世界前沿技术发展趋势与特点

（一）前沿技术创新释放聚合效应，范式转换成为科技进步加速器

随着以新一代信息技术、新能源、新材料、生物医药、绿色低碳等技术的交叉融合为特征的新一轮科技革命和产业变革蓬勃发展，前沿技术深度交叉融合成为推动前沿科技发展的动力，正释放出更大的聚合效应。例如，人类的创造性与人工智能相互促进，正在深刻改变科技发展的进程，有望产生颠覆性技术。创新范式呈现发散式转换，科技领域出现多技术交叉融合、齐头并进的链式变革，前沿技术迭代周期明显缩短。

基础研究取得突破性进展。人工智能、先进计算、先进材料等新兴技术成果的应用，推动了基础科学研究取得更多突破性进展。例如，美国联合研究团队基于纳米柱镶嵌表面技术与光相互作用技术发明的“光镊”，首次成功捕获单个原子，为原子级科学实验带来了革命性进展；美国加利福尼亚理工学院(California Institute of Technology, Caltech)科学家使用谷歌量子计算机首次模拟出“全息虫洞”，或将解决现代物理学中关于量子力学与广义相对论的矛盾；美国能源部布鲁克

海文国家实验室(Brookhaven National Laboratory, BNL)利用人工智能驱动技术，发现了 3 种新的纳米结构；日本国家天文台(National Astronomical Observatory of Japan, NAOJ)计算天体物理中心使用超级计算机首次观测到中子星合并产生的稀土元素，将极大地推动关于宇宙产生大量重元素的研究；ESMFold、AlphaFold 等人工智能系统预测蛋白质构成的突破，大幅提高了人类分析地球生命起源与发展的进程，使人类对生物结构的理解进入全新时代，未来或可出现人造生物。

应用研究取得里程碑式成果。例如，美国国家点火装置(National Ignition Facility, NIF)有史以来第一次成功在核聚变反应中获得“净能量增益”，在实现人类获得零碳排放新型永续能源的进程中迈出关键一步；美国国家标准技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)研发出以 RNA 为核心的可长时间在细胞内存活的生物计算机，有望为人类治疗疾病带来划时代的改变；德国柏林工业大学(Technische Universität Berlin)研究团队使用多层前馈深度神经网络(DNN)完全折叠方法创建的人类神经“网络”，有望超越人脑，成为世界上最强大的神经网络；以芬兰为首的多国团队合作研制出新超导量子比特“独角兽”，以 99.9%的置信度实现了量子逻辑门，成为对构建商用量子计算机具有重大里程碑意义的成果；以色列魏茨曼科学研究所(Weizmann Institute of Science)使用干细胞在实验室里培育出

具有大脑雏形的胚胎，在培育合成器官上实现了重大飞跃；韩国成功开发出基于液态金属颗粒组装网络的复合电极，将极大地促进可穿戴和植入式电子设备的开发和商业化应用。

人工智能推动技术迭代提速。例如，美国开发的一种几何深度学习模型 EquiBind，计算速度较以往方式快 1200 倍，极大地提升了分析发现潜在新药分子的速度；Meta 公司研发的 ESMFold 模型能成功预测 6 亿多种蛋白质的结构，不仅种类远超 AlphaFold2，预测速度更是其 60 倍；Meta 公司发布多模态自监督学习框架 data2vec 2.0，可将传统训练效率提升 16 倍以上；欧洲物理学家应用人工智能成功将一个需要 10 万个方程的量子问题，压缩为只需 4 个方程的小任务。

技术革新产生新的发展方向。在半导体方面，美国 Zyvex Labs 公司宣布研发出一种新的光刻系统，采取新的电子束光刻(E-Beam Lithography, EBL)技术，制程精度远超 EUV 光刻机。在硬件架构方面，美国 Cerebras 公司发布了 Andromeda 超级计算机，采用了与通用 GPU 集群不同的特定架构，不仅降低了能耗且算力水平是目前最强超算 Frontier 系统的 1.6 倍。在碳捕集工艺方面，美国太平洋西北国家实验室(Pacific Northwest National Laboratory, PNNL)开辟了一个新的二氧化碳转化化学领域，推出迄今为止成本最低的碳捕获系统。在人工智能技术进步方面，OpenAI 开发的新一代人工智能绘画工具 DALL-E 2 可以将文本提示准确转化为逼真的可编辑图像；

OpenAI开发的第四代大型语言模型ChatGPT出现颠覆式的迭代，已具备基本的人类交流与理解能力，甚至比人类更强。在脑机接口方面，美国 Precision Neuroscience 公司研制出半侵入式脑机接口设备，厚度仅为发丝的五分之一，可贴合于大脑表面，成为大脑皮层“第七层”。

（二）全球性风险事件频发，科技创新成为解锁风险挑战的“金钥匙”

2022 年全球经济持续衰退，多个主要经济体通货膨胀恶化，经济增长乏力；地缘政治紧张形势加剧，俄乌冲突更引发全球大宗商品价格剧烈波动；全球供应链调整，中小企业经营压力加大。世界亟须找到新的增长引擎。面对风险挑战，前沿技术创新将成为解锁风险的“金钥匙”。

流行病阴霾未散。一方面，新冠疫情的破坏性虽然显著降低，但病毒仍在传播并不断出现新的变种，后续发展仍需持续关注；另一方面，2022 年部分地区暴发霍乱、埃博拉和猴痘等疫情，其他大流行病出现的可能性增加。纵观人类发展史，战胜疾病最有力的武器就是科学技术，在结束这场新冠疫情大流行的过程中，科学抗疫起到了关键作用。

极端天气出现频率增高。2022 年，温室气体浓度、海平面高

度、海洋热量和海洋酸化四个关键气候变化指标均创下了新纪录，世界各地频现极端天气。夏季，多国报告了超过 40 摄氏度的极端高温，巴基斯坦发生毁灭性的洪水灾害；冬季，北半球多地同步爆发寒潮，甚至极寒天气。世界气象组织指出，2022 年发生的极端气候和天气再次表明，人类应对气候问题的压力已经越来越大了。

当前，各种颠覆性技术处于多种技术路线齐头并进的态势，未来任一领域的突破都可能推动全球发展进入新的阶段。例如，2022 年核聚变领域的磁约束和激光惯性约束技术路线均出现里程碑式突破，一旦上亿摄氏度点火、稳定长时间约束控制等工程技术难题被攻克，将可永久性解决人类能源危机，并极大改善气候变化指标。

人工智能、生物技术、可再生能源等技术的发展正推动新一轮科技革命和产业革命的形成和持续深入发展，不仅能为人类当前危机提供解决方案，也可成为未来拉动经济增长的新引擎。日本、德国等许多国家将研发重点从“以科技领域为主”转变为“以解决问题”为目标，其中，人工智能等数字技术与实体经济深度融合，已经证明能带来强大创新动力和广阔市场空间。Web3.0 技术打造出新型网络空间，催生出新的元宇宙业态。氢能关键技术的突破将推动氢能在清洁能源转型中发挥更加重要的作用，可构建出新的氢产业。例如，韩国大力发展氢能车并加大氢能基础设施建设，把“氢经济”

设定为创新增长的三大战略投资领域之一；埃及借筹办 2022 年联合国气候变化大会(COP 27)的契机推进其氢能战略，当年就与世界各国签约了超过 500 亿美元的氢项目。

（三）全球创新投入持续加大，亚洲创新势头强劲

全球研发投入增长。根据美国《研发世界》（R&D WORLD）期刊“2022 全球研发资金展望”（2022 Global R&D Funding Forecast）公布的信息，2022 年全球研发投入达到 2.476 万亿美元（按购买力平价计算），同比增长 5.43%。虽然受新冠疫情反复、经济增长放缓等多重因素的影响，全球研发投入增长未恢复到疫情前水平，但已普遍高于预期，这主要得益于政府投资力度增加和亚洲地区国家研发投入的强势增长。具体来看，2022 年亚洲研发支出占全球份额的 41.8%；北美地区的研发支出占全球份额的 29.2%；欧洲地区的研发支出占全球份额缩减至 21.6%。亚洲地区的增长主要集中于中国、日本、韩国和印度，尤其是印度在科技研发上持续加大投入，已经成为全球科技发展不可小觑的力量。中国虽然在研发支出规模上排名世界第二，但研发强度仅为 2.55%，未达到经济合作与发展组织(Organization for Economic Co-operation and Development, OECD)的平均值，创新投入由

“大”到“强”仍有较大空间。此外，研发投入排名第一的美国拟将 2023 年联邦年度研发总额增至 2000 亿美元，相比 2019 年增长近 33%（见表 1-1）。

表 1-1 2022 年研发投入排名前 10 国家研发投入支出及研发强度情况

排名	国别	研发支出 / 亿美元	研发强度	全球份额	研发支出同比
1	美国	6794	3.07%	27.44%	5.53%
2	中国	4540	2.55%	22.26%	10.40%
3	日本	1822	3.30%	7.36%	3.17%
4	德国	1431	3.13%	5.78%	4.61%
5	韩国	1061	4.50%	4.29%	5.68%
6	法国	685	2.19%	2.77%	2.54%
7	印度	652	0.65%	2.63%	0.77%
8	英国	549	1.75%	2.22%	5.58%
9	俄罗斯	522	1.25%	2.11%	2.96%
10	巴西	370	1.16%	1.49%	1.37%

数据来源：R&D WORLD（按购买力平价计算，数据均为估算值）。

创新产出持续增长。2021 年全球创新者共提交了 340 万件专利申请，同比增长 3.6%，其中亚洲办事处受理了全球所有申请的 67.7%，占全球份额突破三分之二。从地区分布来看，中国增长 5.5%，韩国增长 2.5%，印度增长 5.5%，美国、日本和德国的本地专利申请均有所下降。从专利申请的技术分布来看，计算机技术占所有公开申请的十分之一，其后依次是数字通信、电机、医疗技术等。值得注意的是，电机、仪

器和能源领域专利申请量自 2020 年后重新超过医疗技术领域。世界主要经济体加大绿色产业和数字经济投资力度，使新能源和智能制造等领域研发成为全球科技创新的新焦点（见表 1-2）。

表 1-2 2019—2022 年部分技术领域 PCT 专利公开量对比（单位：件）

技术领域	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年	2022 年增长率
计算机技术	21496	24344	26109	28215	8.07%
数字通信	19049	22081	23610	25660	8.68%

续表

技术领域	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年	2022 年增长率
电机、仪器和能源	17195	17368	18229	19339	6.09%
医疗技术	16916	17499	18554	19008	2.45%
测量	11450	12703	12158	12642	3.98%
制药	9787	10766	12158	12544	3.17%
视听技术	8901	11533	10840	10158	6.29%
运输	11227	11290	10118	10050	0.67%
生物技术	7405	7985	8747	9330	6.67%
半导体	8049	8860	8347	8910	6.74%

数据来源：世界知识产权组织数据库。

亚洲科技创新势头发展强劲。根据 2022 年世界知识产权组织发布的《全球创新指数 2022》(Global Innovation Index 2022)，中国从 2017 年的排名第 22 名攀升至第 11 名，居中等收入经济体之首，是世界上进步最快的国家之一。除中国外，亚洲国家中，韩国、新加坡、日本分别位居全球创新指数第 6

名、第 7 名和第 13 名，亚洲继续缩小与北美和欧洲的创新指标差距。越南高科技进口指标排名全球第一；印度则超过越南成为中低收入经济体的第一名，并在通信技术服务出口领域领先世界；印度尼西亚在创业政策和文化方面排名全球第一，均显示出强劲的发展势头。2022 年全球科技产业集群前 100 名中，中国拥有 21 个，第一次与美国拥有同样多的科技产业集群。

2022 年，全球创新走过了一段艰难历程，一方面，全球经济发展进入下行周期，全球科研资金增加存在难度；另一方面，在新冠疫情反复无常、地缘政治危机持续、经济高通胀压力不减等负面因素的影响下，全球科技公司为应对营收不足，纷纷进行裁员。国际货币基金组织(International Monetary Fund, IMF)预测，全球 2023 年科研资金将下降至 2.7%。各国将在未来一年面对更加艰难的抉择：在财政预算普遍吃紧的态势下，是否为抢占新一轮科技革命和产业变革先发优势，而保证甚至加大科研投入。

（四）全球科技竞争博弈加剧，部分领域技术体系开始分化

科技成为政治博弈的重要战场，全球科技地缘格局与政治、军事的地缘格局部分高度重合，呈现出极大的不确定性和复

杂性。一是美西方高度重视对数字和低碳等影响未来世界经济发展的新型基础设施建设，加紧抢夺主导权。例如，美国、欧盟纷纷加快制定芯片领域相关法案，遏制对手并保护和推动本国芯片制造与下一代半导体技术的研究。二是关键矿产资源作为半导体和新能源供应链安全的生命线，成为大国博弈焦点。例如，美国与加拿大、澳大利亚等 7 个国家构建关键矿产伙伴关系，将在关键矿产领域开展合作勘探、开发，以及制定供应链标准；合计拥有全球过半锂矿储量的阿根廷、玻利维亚和智利则计划建立锂矿行业输出国组织“锂佩克”，试图掌控更多国际话语权。三是科技巨头正成为国家博弈中的重要一极，显露出巨大潜力。俄乌冲突中，科技巨头成为影响胜负走向的重要因素。例如，脸书(Facebook)、推特(Twitter)等社交媒体巨头运用平台权力，为美西方赢得认知战提供了重要支持；微软、谷歌、太空探索技术公司(SpaceX)等为美西方网络战和情报站提供技术支撑；美国政府使用 SpaceX 等商业太空公司的天基系统向乌克兰提供通信和情报援助。为塑造和控制未来全球科技地缘格局，美国及其西方盟国通过政治和商业手段携手本国科技巨头为其政治利益服务，使科技巨头展现出越来越重要的影响力。

各国纷纷出台政策抢夺人才，科技人才之争更趋激烈。美国为吸引全球人才赴美和留美，推出一系列“突破性”新政，例如，通过《2022 年美国竞争法案》(America Competes Act of

2022)大幅降低对理工科专业人才的引进门槛，进一步强化美国在科技创新领域的人才储备。英国政府支持“Growth Visa”增长签证政策，以弥补英国关键领域人才短缺，增强经济科技发展后劲。比利时、芬兰、希腊、新西兰等国家也纷纷放宽持学生或其他签证入境的外国人工作权利和机会，甚至无限期延长有科技背景外国人的临时工作签证。

在大国科技博弈不断强化的背景下，一些科技领域出现同一领域不同技术体系并行发展的态势，对相关研发、生产、应用和标准制定产生深刻影响。在 5G 方面，中国主要发展基于 Sub-6GHz 频段的 5G 网络，而美国则主推 5G 毫米波网络。在手机卫星直连方面，美国推出“苹果+Globalstar”的 iOS 紧急通信服务，并正在发展“高通+铱星”的安卓通信系统；中国推出“华为+北斗”的紧急通信服务，并将继续推进星地网络融合建设。在激光武器方面，中国采用相干合成路线，而美国采用非相干合束激光。在无人驾驶方面，中国选择的技术路线侧重车网协同，美国则采用单车智能，即一种完全不受道路基础设施限制的技术路线。在数据治理方面，各国更是依据国情采取不同的数据治理模式，美国支持开放性和数据自由流动，并积极与欧盟协调；欧洲国家优先考虑消费者数据隐私权保护；中国支持尊重各国在网络空间的国家主权。

（五）颠覆性技术引发新的安全挑战，全球技术治理体系亟须变革

2022 年，更多颠覆性技术发展已从实验阶段步入应用阶段，对传统业态带来颠覆性改变。市场研究机构 Gartner 公司发布的《2022 年技术成熟度曲线》(The 2022Gartner Hype Cycle)报告指出，沉浸式体验、人工智能自动化、云数据生态系统等新兴技术给产业带来深远影响。在下一代互联网方面，元宇宙、Web3.0 技术和产品将人类体验扩大到可集成数字货币的虚拟场所和生态系统。美军运用 VR/AR 打造军事元宇宙进行沉浸式训练；美国非同质化代币(Non-Fungible Token, NFT)画作成为新时尚，甚至出现自动贩卖机；苹果也即将推出 AR/VR 头显。在人工智能方面，自主系统应用加速，无人驾驶、无人机、无人艇等无人系统已广泛进入实际应用和实战运用。2022 年 2 月，俄乌冲突爆发后，俄罗斯和乌克兰都大规模使用了低成本无人机，传统战争形态产生颠覆性改变。美国打造了由 150 艘各式舰艇组成的无人舰队，中国百吨级无人艇也成功实现首航。在生物技术方面，美国 Synchron 公司开发的脑机接口植入式设备展开早期可行性临床试验；食品药品监督管理局(Food and Drug Administration, FDA)授予规律间隔成簇短回文重复序列(Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats, CRISPR)基因编辑疗法 exa-cel 滚动

审查，有望批准进入临床应用；以色列魏茨曼研究所研究团队首次培育出完全人工合成的小鼠胚胎，并发育出跳动的心脏。

新技术的快速发展与应用，正在打破传统的社会运行模式和规则治理架构，冲击传统科技生态与治理体系，产生监管与伦理困境，国家安全、社会治理的内涵和理论实践均发生重大变化，治理方式亟须改革甚至重塑。例如，无人驾驶、无人机、无人艇等无人智能系统进入实用，生产、生活和传统战争从指挥到实践、从法律到管理都产生了全新的变化。致命性自主武器系统(Lethal Autonomous Weapon Systems, LAWS)在无人类直接参与的情况下自动识别和摧毁敌方目标，大大减少己方人员伤亡，反而更易引发战争风险与伦理困境。美国前国务卿基辛格(Henry Alfred Kissinger)称人工智能已经成为军备控制新前沿。美国国防部(Department of Defense, DOD)正在更新 LAWS 指南，以适应人工智能的进步对军事的影响。脑机接口技术发展出“脑控”(Mind Manipulation)与“读心”(Mind Reading)等新兴功能，可对人类大脑的思维、记忆、情感进行“读取和操控”，进而触动人类社会的主体性，将极大考验人类当前的伦理与法理。对于快速发展的“合成胚胎”技术，CRISPR 基因编辑技术等目前尚无明确的法律和道德框架规制，监管与法律的滞后可能带来无法预见和控制的巨大风险。

对前沿科技飞速发展带来的诸多风险和挑战，全球任何一个国家都不可能独享好处而无视风险，而且任何一个国家都难以独善其身。各国亟须加强协作，对新兴科技带来的风险与挑战达成共识，共同推动全球治理体系变革，发挥国际多边机制防范与治理危机。

二、世界主要经济体科技战略与政策动态

（一）世界各主要经济体强化前沿技术的战略布局，系统性培育新兴技术生态

2022 年，世界各主要经济体将科技置于重要地位，加大战略部署，纷纷强化科技创新顶层设计，明确前沿技术研究方向。例如，美国发布新版《关键和新兴技术清单》(National Strategy for Critical and Emerging Technology)；宣布《净零游戏规则改变者倡议》(Net-Zero Game Changers Initiative)，公布五大领域共 37 项核心技术研究方向。德国发布《2022 年研究与创新报告》(2022 Bundesbericht Forschung und Innovation, BuFI 2022)，宣布未来 10 年德国将开展科技创新转型；公布《研究与创新未来战略》(Zukunftsstrategie Forschung Und

Innovation)草案，确定 6 个关键领域。英国发布 2022—2027 年战略《共同改变未来》(Transforming Tomorrow Together)，提出构建卓越科研体系的世界级战略目标；发布新版《英国数字战略》(UK Digital Strategy)，明确了六大支柱。俄罗斯发布《宣布俄罗斯联邦科学技术 2022—2031 年》(2022-2031 declared Decade of Science and Technology in Russia)总统令，确定未来十年俄罗斯科技发展的三大基本任务。日本发布《创新战略 2022》(Integrated Innovation Strategy 2022)。韩国发布《国家必备战略技术选定与培育保护战略》，将半导体、显示器、二次电池等技术指定为“十二大国家战略技术”。多国提高前沿科技研发资金投入。美国颁布《2022 年芯片与科学法案》(The CHIPS and Science Act of 2022)，投入 2800 亿美元支持芯片研发和科技创新；创建卫生高级研究计划局(Advanced Research Projects Agency for Health)，重点推动健康领域研究的前沿创新。英国政府公布有史以来最高的 398 亿英镑研发预算。德国拟每年投入 5000 万欧元资助人工智能项目，并将投资 7.4 亿欧元研发量子技术。韩国 2022 年为战略技术研发投资 4.12 万亿韩元，并将在 2023 年预算中为量子等技术研发单独拨款 2651 亿韩元。

世界各主要经济体强化芯片、清洁能源等关键供应链建设。美国通过《2022 年芯片与科学法案》《通胀削减法案》，打造国内芯片和清洁能源供应链。欧盟《欧洲芯片法案》(The

European Chips Act)计划提供超过 450 亿欧元公共和私有资金鼓励本土芯片产业发展；启动能源系统数字化行动计划，对欧盟的能源系统进行深度数字化改造。法国公布“电子 2030”计划。日本政府发布《全球变暖对策推进法》(Act on Promotion of Global Warming Countermeasures)修正案，旨在实现 2050 年去碳化社会目标。

（二）世界各主要经济体密集调整军事战略，大幅增加国防预算，将战略性技术威慑作为提升重点

随着全球地缘竞争加剧，世界主要经济体密集调整军事战略，大量前沿科技成果被应用于军事领域。例如，美国发布《国防战略》(National Defense Strategy)、《核态势评估》(Nuclear Posture Review)、《2022 年导弹防御评估》(2022 Missile Defense Review)，明确将核武器作为推进地缘政治目标的工具，提出战术性核武器的实战性运用。北约通过《北约 2022 战略概念》(NATO Strategic Concept 2022)，关注范围向亚太地区扩张。日本通过新版《国家安全保障战略》(National Security Strategy)、《国家防卫战略》(National Defense Strategy)、《防卫力量整备计划》(Defense Buildup Program)3 份安保政策文件，以发展所谓“反击能力”为名整军奋战，安保政策

出现第二次世界大战结束后的重大转变。

美西方各国大幅增加国防预算。美国 2023 财政年度国防预算达到 8580 亿美元，创历史新高，其中 1301 亿美元用于研究、开发、测试和评估科技，同比增加 9.5%。北约将各成员国国防支出占本国 GDP 2%作为目标底线。英国计划到 2030 年将国防预算增加至 1000 亿英镑；德国将从 2024 年起将每年国防预算占国内生产总值的比例提高到 2%以上。法国将 2023 财年国防预算增加到 439 亿欧元。日本未来 5 年国防开支为 43 万亿日元，比前五年（2017—2022 年）增加 56%。目前，世界主要经济体都在着力强化各自的军事能力建设，尤其重视新兴技术在国防领域的应用。一是大力推动人工智能应用。美国国防部签署“人工智能战略和实施途径”(Artificial Intelligence Strategy and Implementation Pathway)文件，明确制定和实施人工智能的基本战略。欧盟与美国共同发布人工智能路线图。英国发布《国防人工智能战略》(Defence Artificial Intelligence Strategy)，创建国防人工智能中心，支持军队使用和创新相关技术。德国特别国防基金将人工智能军事应用作为投资重点之一。俄罗斯成立人工智能技术发展部门，致力于开发人工智能武器，加强人工智能技术在制造军用和特种武器装备方面的应用。部分科技强国在无人机技术方面取得突破性进展。例如，美国在演习中展示的“狼群”无人机集群战术，承担不同任务的多个无人机集群

能够相互配合完成部署的各项任务。以色列首次展示的无人机群实战能力，其“蜂群”间可相互通信、精确定位目标，甚至能够指挥实施空袭。

二是快速发展跨领域集成作战能力。美国国防部持续提升“联合全域指挥与控制”(Joint All-Domain Command and Control, JADC2)系统的能力建设，进一步提高连接各军兵种的网络和数据链的实战能力。北约提出多域作战云是未来实现多域作战的重要手段，强调军队与工业界携手加强云技术为军所用。英国《国防能力框架》(The Defence Capability Framework)将发展多领域集成能力作为提升未来国防军事能力最重要的指导原则之一。日本提出强化卫星信息收集与分析能力，增强太空、网络、电磁波等新领域的“跨领域作战能力”。

三是推动高超声速与激光武器实际应用。美国陆军开展“远程高超声速武器”(Long Range Hypersonic Weapon, LRHW)飞行试验；空军 AGM-183A 高超声速导弹在几经挫折后终于试验成功，速度达到声速的 5 倍；海军也正在推进通用高超声速滑翔飞行器研发。洛克希德·马丁公司(Lockheed Martin Space Systems Company, LMT)向美军交付了 300 千瓦的高能激光器，并在以色列拉法尔公司(Rafael Advanced Defense Systems Ltd.)的“铁束”(IRONBEAM)100 千瓦激光武器系统基础上开发新的激光武器。俄罗斯在实战中首次应用“匕首”

(Kinzhal)高超声速空射型弹道导弹摧毁了乌克兰大型地下武器库。

（三）美西方发达经济体推行科技保护主义政策，强化盟友合作，构筑排华高科技供应链

2022 年，美西方发达经济体推行科技保护政策，泛化科技安全概念，推动全球高技术产业链供应链重塑。

一方面，美国将中国定位为主要竞争对手，积极推行谋求霸权的现实主义政策。拜登政府《2022 年度美国情报界威胁评估报告》(2022 Annual Threat Assessment of the U. S. Intelligence Community)将中国研发高精尖武器视为重要威胁，其《美国国家安全战略》将中国科技发展视为最大挑战，称遏制中国科技发展为美国的“全球优先事务”。另一方面，美国加强针对前沿技术的出口限制和保护措施，推出《保护美国知识产权法》(Protecting American Intellectual Property Act)，以制裁所谓“知识产权盗窃”为名，将知识产权违法行为认定及制裁权力单边归于美国政府，且赋予极大自由裁量权，使未来前沿技术对华市场化转让受到极大影响。美国更新《出口管制条例》(Export Administration Regulation, EAR)，纳入多项敏感技术，限制中国获取先进半导体，以遏阻中国

人工智能、超级计算机等高新科技的发展。

美国强化盟友联合，试图彻底将中国从其主导的科技生态中剔除。美国抢抓未来技术标准主导权，利用其科技领先优势，量身打造对中国不利的技术标准，千方百计限制中国发展。在太空标准领域，美国已拥有成熟的弹道导弹防御系统，并在反卫星武器方面具备单边优势。为独占优势地位，美国积极推动联合国通过其提出的“禁止动能反卫星试验决议草案”，阻止中国发展直升式反卫星系统。在 6G 领域，2022 年 1 月，美国和日本宣布就“6G”通信标准开始合作并共同建立国际标准，预期最快在 2024 年推出第一个 6G 标准。此外，美国通过美欧贸易和技术委员会(Trade and Technology Council, TTC)的协调，开展美欧新兴技术议题合作，制定全球规则，尤其强化与中国的科技竞争，构筑双边、小多边排华机制。在东亚，美日、美日韩加强经济安保合作，日本出台的《经济安全保障推进法案》，对重点技术领域民企和科研人员的国外合作采取严格限制，对敏感科技领域进行专利封锁；美国拉拢日本、韩国、中国台湾地区组建的“芯片四方联盟”(Chip 4)，后续或将扩容为“Chip X”，构建排华的芯片供应链。

（四）世界主要经济体强化战略新疆域的布局，着力提升技术应用能力

2022 年，战略新疆域在大国博弈和地缘竞争中的战略意义更加凸显。俄乌冲突显示，现代战争的疆域已完全包括空天和网络空间，不居其中者则居下风。自俄乌冲突爆发以来，美国及北约依靠强大的空基和天基能力为乌克兰提供信息支撑，使其在军事对抗中始终占据情报、监视、侦察、导航和精准打击优势。军事对抗之外，俄乌双方均不断遭受大规模的网络攻击，美国及北约网络攻防能力也为乌克兰进行网络战提供了强大助力。

现代化战争使世界各主要经济体愈加重视在战略新疆域的技术部署，积极提升在相关领域的能力建设。一是不断提升太空在国家安全中的地位，强化战略部署。美国国防部发布新版《太空政策》(Space Policy)文件，将太空视为“美国国家军事力量的优先领域”；发布《太空服务、组装与制造国家战略》(In-space Servicing, Assembly and Manufacturing, ISAM)，将太空纳入“国家基础设施保护规划”。英国发布《联合条令出版物 0-40——英国太空力量》(Joint Doctrine Publication 0-40: UK Space Power)；发布新版《国防太空战略》(Defence Space Strategy)和《英国太空力量》(UK Space Power)，拟通过提升太空力量，确保太空安全。澳大利亚发布《国防

太空战略》(National Defense Space Strategy)，并成立太空司令部。韩国制定了《太空经济路线图》(Space Economy Roadmap)，成立航天航空厅；设立军事太空分部，加强太空安全能力。

二是加大对海洋资源的控制。美国发布《美国专属经济区海洋勘探和观测的战略优先事项》(Strategic Priorities for Ocean Exploration and Characterization of theUnited States Exclusive Economic Zone)报告，宣布海洋探索、观测的高优先级事项。英国发布《国家海上安全战略》(New Maritime Security Strategy)和《英国海洋地理空间数据的未来》(The Future of UK Marine Geospatial Data Report)，明确英国要保持在海洋科学领域的世界领先地位。法国发布《海底控制战略》(Seabed Control Strategy)，旨在使法国海军获得潜入海底 6000 米的能力。

三是将网络空间视为作战域，着力提升攻防能力。美国将网络司令部提升为独立的作战司令部，统一全军的网战部队；发布《网络空间优势愿景》(Cyberspace Superiority Vision)，考虑签署更新《国家安全总统备忘录》(NSPM-13)，扩大国防部的网络战权力。美国国务院成立网络空间与数字政策局(Bureau of Cyberspace and Digital Policy, CDP)，强化美国在全球网络及新兴技术规范标准领域的话语权，首任巡回大使撒尼尔菲克称将把威慑扩展到网络空间。

四是美西方国家在新疆域的联合趋势日益加强。太空方面，美国、澳大利亚、加拿大、法国、德国、新西兰和英国共同发布《2031 联合太空作战愿景》(Combined Space Operations Vision 2031, CSPO)；美日签署《太空合作框架协议》(Framework Agreement for Cooperation in the Exploration and Use of Outer Space)；北约 2022 新版“战略概念”强调将共同加强核、常规、太空和网络等综合力量的威慑与共同防御。海洋方面，美国、日本、澳大利亚和印度同意启动一项基于卫星的海上监视倡议，共享成果；网络方面，美国与法国、德国、英国、日本等全球 60 个合作伙伴签署《互联网未来宣言》(Declaration for the Future of the Internet)；韩国、日本则正式加入北约网络防御中心，强化与北约各国之间的合作关系；英国、加拿大、澳大利亚、新西兰、韩国等 25 个国家参加美国主导的“网络旗帜 23”(Cyber Flag 23)多国联合演习，谋求加强盟国的国防网络空间合作。

新时期，网络、空天、深海等领域的技术能力已成为大国实力的重要组成部分，是塑造大国博弈格局的重要因素。美西方国家积极在战略新疆域的技术力量部署及合作，将对未来的全球科技安全和国家安全产生深远的影响。

三、重要前沿技术领域研究进展

（一）信息技术

2022 年，以人工智能技术、半导体技术、量子信息技术、通信技术等为代表的前沿信息技术持续推动社会生产力发展。量子计算、高频通信等技术不断取得新的突破，推进实用化迈入新阶段；生成式人工智能和先进制程半导体技术应用快速落地，加速行业创新。在基础研究和应用创新的强力推动下，信息技术持续与各行各业深度融合，促进生产力革新及生产生活方式变革。

1.重要趋势

(1)半导体先进制程技术进一步延续“摩尔定律”。全球知名企业进军 3 纳米以下制程，挑战物理极限，有望拓展超级计算、人工智能等前沿领域的应用。2022 年 5 月，比利时微电子研究中心(Interuniversity Microelectronics Centre, IMEC)发布《亚 1 纳米工艺和晶体管路线图》(Sub-1nm Silicon and Transistor Roadmap)，探讨全球半导体工艺与技术进一步发展的路线图，并认为互补场效应晶体管(Complementary Field-Effect Transistor, CFET)和 Atomic 原子通道是关键技术，有助于到 2036 年实现 0.2 纳米制程工艺。2022 年 6 月，中

国台湾积体电路制造股份有限公司（简称“台积电”）计划投资 340 亿美元研发 2 纳米制程工艺，并拟于 2025 年量产。2022 年 6 月，韩国三星公司(Samsung)3 纳米制程工艺正式量产，首次采用全环绕栅极晶体管(Gate-All-Around, GAA)技术，较 5 纳米工艺性能提高 23%、功耗降低 45%。2022 年 11 月，日本丰田汽车公司(Toyota Motor)、索尼(SONY)、日本电信电话公司(Nippon Telegraph and Telephone Corporation, NTT)等公司联合成立高端芯片公司 Rapidus，将与美国国际商业机器公司(International Business Machines Corporation, IBM)合作研发 2 纳米芯片，计划于 2025 年实现试产。2022 年 12 月，台积电在其晶圆 18 厂正式启动 3 纳米制程芯片的商业化量产。

(2)美国率先推动抗量子加密标准采用与推广。目前，美国已从联邦政府层面对抗量子加密标准的制定与实施进行规划与部署，计划到 2035 年在联邦机构和关键基础设施行业全面推行抗量子加密标准，以防御量子计算机日趋实用而对密码学和加密系统构成的安全威胁。2022 年 5 月，美国英特尔公司(Intel)计划在 2030 年推出抗量子安全中央处理器，将采用美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)的抗量子加密算法来实现其开发目标。2022 年 7 月，美国国家标准与技术研究院公布首批 4 个抗量子加密算法，分别为 CRYSTALS-Kyber、CRYSTALS-Dilithium、

FALCON 和 SPHINCS+，并邀请美国、法国、韩国的 12 家公司进行技术开发合作。2022 年 8 月，美国网络安全与基础设施安全局(Cybersecurity and Infrastructure Security Agency, CISA)发布《为抗量子密码学的关键基础设施做准备》(Preparing Critical Infrastructure for Post-Quantum Cryptography)指南文件，敦促美国的基础设施运营商尽早为抗量子密码安全做好准备。2022 年 8 月，日本凸版印刷株式会社(Toppan)与日本信息通信研究机构(National Institute of Information and Communications Technology, NICT)联合开发使用美国抗量子加密标准的 IC 卡，并计划在 2025 年实现商业化。2022 年 9 月，美国国家安全局(National Security Agency, NSA)发布《商业国家安全算法套件 2.0》(The Commercial National Security Algorithm Suite 2.0)指南文件，计划推动国家安全系统的管理者和运营商在 2035 年之前采用抗量子密码标准。

(3)电信强国加速布局 6G 技术，6G 技术竞争即将拉开序幕。美国、日本、韩国等国抢跑 6G 技术发展，力争在 6G 技术上实现弯道超车，夺回全球通信领域的主导权。2022 年 3 月，美国参议院(United States Senate)通过《下一代电信法案》(The Next Generation Telecommunications Act)，拟创建下一代通信委员会(The Next Generation Telecommunications Council)，统筹美国联邦下一代通信技术的投资和政策。2022 年 3 月，美国联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)

向是德科技公司(Keysight Technologies)颁发首个频谱实验许可证，用于开发亚太赫兹频段的 6G 技术。2022 年 3 月，日本总务省(Ministry of Internal Affairs and Communications)、多个学术机构和丰田汽车公司、日本电气公司(Nippon Electric Company, NEC)等企业组建了“超越 5G 推广联盟”(Beyond 5G Promotion Consortium)，制定了业内首个技术提案，以推动日本 6G 技术的发展。2022 年 4 月，韩国计划在 2026 年推出 6G 通信原型机，并在 2028—2030 年实现商用。2022 年 10 月，韩国三星公司表示将在三星英国研究院（Samsung Electronics Research&Development Institute UK，SRUK）成立 6G 研究小组，以开发 6G 网络和终端设备技术。

2.重大进展

(1)量子计算机理论性能大幅提升，实用化进程加速。量子计算机的量子比特数呈指数级增长，纠错能力不断提升，有助于通用量子计算机的实现。2022 年 8 月，奥地利维也纳大学(University of Vienna, UNIVIE)和德国杜伊斯堡-埃森大学(University of Duisburg-Essen, Uni DUE)的联合研究团队成功实现对真空中悬浮纳米粒子的精确操纵，使其发生相互作用。该研究结果为开发具有可调非互易相互作用的纳米粒子的完全可编程多体系统提供了一条有效途径。2022 年 11 月，IBM 公司发布具有 433 个量子位的量子计算机处理器 Osprey，量子比特数是上一代的 3 倍，对特定任务的处理性能远超任

何经典计算机。2022 年 11 月，IBM 公司在量子计算机上成功运行迄今为止最大的量子程序，可实现 127 个量子比特和 1700 多个单独量子的操作，并大幅提高了纠错能力。IBM 还计划于 2023 年发布具有 1121 量子位的 Condor 处理器，并于 2025 年演示可操作 4000 多个量子位的处理器硬件。

(2)人工智能大模型快速崛起，生成式人工智能应用爆发。2022 年 4 月，美国谷歌公司(Google)发布大型语言模型 PaLM，该模型在语言和推理类的测评中超过了人类水平。2022 年 9 月，美国英伟达公司(NVIDIA)发布大型语言模型 NVIDIA NeMo，帮助开发者定制人工智能应用程序，可用于内容生成、聊天机器人、蛋白质结构和生物分子特性预测等。2022 年 10 月，中国百度公司发布知识增强跨模态大模型 ERNIE-ViLG 2.0。该模型基于知识增强算法的混合降噪专家建模，是全球首个知识增强的 AI 作画大模型，在世界同类模型中表现最优。2022 年 11 月，美国人工智能研究实验室 OpenAI 推出超级对话模型 ChatGPT，可应用于代码开发、修改代码错误、翻译文献等一系列常见文本输出型任务。

(3)高频通信技术获得突破，促进 5G 落地与 6G 研发。高频器件关键技术在通信传输距离、稳定性和信号完整性等方面取得新进展，赋能 5G 和 6G 技术发展，助推通信产品创新。2022 年 6 月，日本东京工业大学(Tokyo Institute of Technology)推出一款新型高频收发器，可接入现有 5G 网络。该收发器在测

试中展现出较低的相邻信道泄露和传输误差，大大提高了 5G 的传输效率。2022 年 6 月，日本大阪公立大学(Osaka Metropolitan University, OMU)研究人员在一种手性自旋孤子晶格(Chiral soliton lattice, CSL)材料的磁性上层结构中检测到了前所未有的高频共振，这意味着 CSL 材料凭借其优异的结构可控性，可将谐振频率提高到亚太赫兹波段内。该研究表明承载 CSL 的手性螺旋磁体材料有望作为 6G 潜在关键技术，助推 6G 高频通信技术的开发。2022 年 9 月，美国弗劳恩霍夫海因里希赫兹研究所(Fraunhofer Heinrich Hertz Insitute, Fraunhofer HHI)和韩国 LG 电子(LG Electronics)研究人员成功将 6G 数据的传输距离提升至 320 米，将该团队一年前创下的纪录提升了两倍。该研究有望成为 6G 技术进步的重要里程碑，推进 6G 实用化进程。

（二）生物技术

2022 年，新冠病毒奥密克戎(Omicron)变异株不断在全球掀起感染浪潮，促使各国加紧开发更有效的病毒检测方法和新疫苗、药物等治疗手段。mRNA 疫苗作为目前抵御新冠病毒最有效的疫苗之一，其研发和商业化成为各国疫苗技术发展的重要方向。同时，生物技术与信息技术加速融合，人工智能、

机器学习、大数据、信息学等帮助扩大生物技术行业的视野，推动生物技术智能化发展。颠覆性生物技术频现重大突破，干细胞和类器官领域为疾病建模、药物测试提供强大平台，基因编辑技术更精准高效、更安全，脑科学和脑机接口、微生物组学等前沿交叉技术领域均取得新进展。此外，迫在眉睫的粮食危机和气候危机对农业生产方式提出新的挑战，气候智能型农业成为实现双赢的最佳选择。

1.重要趋势

(1)mRNA 疫苗技术成为各国技术研发的攻关重点，为传染病和癌症、艾滋病等非传染性疾病提供新的防治手段。2022 年 2 月，中国瑞吉生物科技有限公司联合武汉大学研发出全球首款冻干新冠 mRNA 疫苗，可在 25 摄氏度下长期保持稳定，有助于解决当前 mRNA 疫苗的储存和运输难题；2022 年 3 月，美国制药公司莫德纳(Moderna)启动 mRNA Access 计划，旨在开发针对基孔肯雅病、克里米亚-刚果出血热、登革热、埃博拉病毒病、疟疾、马尔堡病、拉沙热、中东呼吸综合征和新冠等 15 种潜在大流行病原体的 mRNA 疫苗。2022 年 10 月，流行病防范创新联盟(Coalition for Epidemic Preparedness Innovations, CEPI)与韩国创新疫苗公司 SK bioscience 签署价值 1.4 亿美元的合作协议，旨在开发 mRNA 疫苗平台，用于快速应对传染病传播。2022 年 11 月，德国生物技术公司 BioNTech 计划于 2023 年进行疟疾、结核病等 5 项传染病的

mRNA 疫苗临床试验。2022 年 11 月，日本政府提出将投资 20 亿美元开展疫苗研究，并启动生物医药先进疫苗研发战略中心，初步任务是使用 mRNA、病毒载体和重组蛋白等一系列疫苗输送技术，开展针对冠状病毒、猴痘病毒、登革病毒和寨卡病毒等 8 种病原体的疫苗研究。2022 年 12 月，美国宾夕法尼亚大学(Pennsylvania State University)开发出针对 20 种流感病毒已知亚型的实验性 mRNA 疫苗，或成为预防未来流感大流行的普遍措施。

(2)生物技术与信息技术加速融合，人工智能(AI)驱动生物技术创新。2022 年 3 月，中国浙江大学开发出便携式 AI 嗅觉系统，可通过皮肤散发的气味诊断受试者是否患有帕金森病，预测准确率为 70.8%，敏感性高达 91.7%。2022 年 7 月，日本理化学研究所(Institute of Physical and Chemical Research, RIKEN)利用 AI 机器人 MAHORO 成功培养出诱导多能干细胞，并使其高效分化为视网膜细胞，耗时仅为人工培养时间的三分之一。2022 年 8 月，美国卡内基 •梅隆大学(Carnegie Mellon University, CMU)开发出基于 AI 的新型动态脑成像技术，可高速、高分辨率和低成本地绘制出大脑中快速变化的电活动。2022 年 9 月，瑞士苏黎世联邦理工学院(Swiss Federal Institute of Technology in Zurich)研发出可预测未来可能出现的新冠病毒变体的 AI 模型，有助于促进下一代抗体疗法及疫苗的研发。2022 年 9 月，美国中佛罗里达大学(University of Central

Florida, UCF)创建出 AI 筛选模型 AttentionSiteDTI，可加快药物发现进程并在识别潜在候选药物方面具有 97%的准确性。2022 年 12 月，西湖大学、厦门大学和德睿智药开发出能够预测蛋白质构象变化与药物-靶点结合亲和力的 AI 模型 ProtMD，可精准筛选高活性小分子，加速推进临床前药物研发。

(3)粮食安全问题和气候危机日益严峻，气候智慧型农业和生物燃料将促进可持续发展。2022 年 5 月，韩国石油公司 Hyundai Oilbank 计划于 2023 年建设一座 13 万吨的生物柴油厂，以推进利用植物、霉菌和细菌等可再生资源生产化学材料和能源的白色生物技术业务。2022 年 7 月，欧盟研究和创新计划“地平线欧洲”(Horizon Europe)启动为期两年的 BEATLES 项目，旨在向气候智能农业粮食系统过渡，提高农业生产力和可持续性、韧性，增强对气候适应能力。2022 年 9 月，美国农业部(United States Department of Agriculture, USDA)拨款 1 亿美元用于生物燃料基础设施建设，并将在 2023 年进一步增加对气候智能农业和粮食系统创新的投资，以应对粮食安全和气候变化等危机。2022 年 9 月，美国能源部(Department of Energy, DOE)为生物能源研究项目拨款 1.78 亿美元，旨在推动可持续技术突破，以改善公共卫生，帮助应对气候变化，加强粮食农业生产并创造更具韧性的供应链。2022 年 10 月，美国国家科学基金会(National Science

Foundation, NSF)和美国能源部生物能源技术办公室(Bioenergy Technologies Office, BETO)合作资助6个研发项目，将有助于生产可再生生物化学品和生物燃料。2022年12月，美国生物燃料行业呼吁环境保护署(Environmental Protection Agency, EPA)宣布在2023年制定可再生燃料标准(Renewable Fuel Standard, RFS)，以推动生物燃料实现净零排放。

2.重大进展

(1)类器官技术为疾病建模、药物测试和个性化医疗及再生疗法提供强大平台，开创疾病研究与治疗、药物发现及可移植器官培育的新纪元。2022年5月，中国上海科技大学培育出血管化类脑器官模型，有助于进一步研究脑发育过程中神经、血管及免疫细胞之间的相互作用，也为人脑发育与进化、神经系统疾病机理研究及药物筛选提供了体外模型；2022年10月，美国斯坦福大学(Stanford University)将来自人的多能干细胞经诱导分化为大脑皮质类器官后原位移植于新生无胸腺大鼠的体感皮层中，构建出人鼠混合大脑类器官t-hCO，可在大鼠体内正常生长，展现正常的大脑生理结构，还能参与大脑控制行为的神经环路，为大脑神经退行性疾病研究、新药开发和治疗策略提供了新方法。2022年10月，瑞士苏黎世联邦理工学院使用干细胞培育的类脑组织，绘制出大脑不同区域的细胞类型及调节其发育的基因。2022年12月，澳大利亚昆士兰大学(University of Queensland)在培养皿中培

养出一个人造的微型大脑，并用其研究寨卡病毒对大脑的影响，使科学家对病毒进入发育中大脑的过程有了全新认识，有助于开发更有效的抗病毒药物。

(2)基因编辑技术更精准高效，新型基因编辑工具脱靶效应降低，安全性大幅提升。2022 年 1 月，西班牙庞培法布拉大学(Pompeu Fabra University)开发出高效精确的可编程基因书写技术 FiCAT，可将大片段的 DNA 精准插入基因组中，实现了 5%～22%的最小脱靶插入率，有望克服目前用于基因组编辑和基因疗法技术的限制，帮助开发更安全有效的遗传性疾病和肿瘤疾病疗法。2022 年 3 月，中国科学院遗传与发育生物学研究所开发出能够在植物中实现高效编辑的新型引导编辑系统 ePPE，编辑效率在碱基替换、小片段插入、删除及较大片段的插入和删除等多种编辑类型下平均提高 5.8 倍，且不会增加脱靶效应或产生副产物。2022 年 3 月，美国得克萨斯大学奥斯汀分校(University of Texas at Austin, UT-Austin)开发出新版本的基因编辑工具 SuperFi-Cas9，使靶向错误 DNA 片段的可能性比原始版本低 4000 倍，安全性大幅提升。2022 年 8 月，上海科技大学开发出一种简单、高效的基因编辑方法 Ted，实现细胞内大片段 DNA 的高效编辑，初步解决了传统 CRISPR-Cas9 介导的同源重组在大片段基因敲入效率低的问题。2022 年 9 月，美国宾夕法尼亚大学开发出一种基于修饰 mRNA 的 CRIPSR-Cas9 系统，将干细胞中的基因编辑效率

提高了 84%且减少了脱靶效应。

(3)脑机接口技术朝着更安全、佩戴更舒适的方向发展，为神经系统疾病的治疗和神经性假肢的开发提供重要帮助。2022 年 3 月，美国加利福尼亚大学圣地亚哥分校(University of California San Diego)开发出升级版的脑机接口阵列，能更好地适应大脑起伏的表面，从而在更大范围内实现更好的接触和信号记录，该技术将帮助改善脑机接口系统，提高用户控制轮椅、假肢等外部设备的能力。2022 年 6 月，美国约翰斯·霍普金斯大学(The Johns Hopkins University)对一名因脊髓损伤导致上半身瘫痪的患者植入脑机接口，使其通过脑机接口操纵机械臂使用刀叉独立完成进食，整个过程耗时不到 90 秒，实验成功率为 85%（20 次实验成功了 17 次）。2022 年 7 月，中国清华大学医学院和解放军总医院仅用 3 个颅内电极就实现了微创植入脑机接口打字，速度达每分钟 12 个字符，每个电极的等效信息传输率达 20 比特/分钟。该研究旨在探索最小化颅内脑电创伤的脑机接口方案，以最低代价帮助重度瘫痪患者恢复与外界沟通的能力。2022 年 7 月，美国莱斯大学(Rice University)、杜克大学(Duke University)、布朗大学(Brown University)和贝勒医学院(Baylor College of Medicine)开发出可在一秒钟内远程激活果蝇特定大脑回路的无线技术，其速度比之前对基因定义的神经元进行磁刺激的最佳技术快 50 倍，展现出的精准激活基因目标细胞的能力可成为

研究大脑、治疗疾病和开发直接的脑机通信技术的有力工具。2022年9月，南京邮电大学团队开发出可交互式人工神经元，实现了脑机接口之间模态匹配的双向交互，可解读神经递质中的化学信息。2022年10月，美国神经技术公司Axoft的脑机接口设备获得FDA授予的突破性医疗器械认定，有望对帕金森病、阿尔茨海默病、癫痫和运动障碍等神经退行性疾病产生巨大影响。

（三）能源技术

2022年，在后疫情时代经济复苏、俄乌冲突持续、全球极端气候频现等背景下，全球能源市场发生剧烈变化。为应对能源危机，全球多国重启煤电项目，加大油气开采，并加强化石能源清洁高效利用技术研发；主要国家增加太阳能、风能、氢能等清洁能源投资力度，加速新技术商用化；核电凭借稳定、清洁、高效等特性，在能源危机下供应了更多电能，得到更多国家认可，新技术、新项目涌现；中国、美国、英国加速聚变技术研发，相关技术取得新突破。

1.重要趋势

(1)能源短缺使核电迎来“复苏”，多国暂停核退役或重启核电计划。美国政府根据《降低通货膨胀法案》(Inflation

Reduction Act)向美国能源部爱达荷国家实验室(Idaho National Laboratory, INL)投入 1.5 亿美元，升级其核能基础设施，加强核能研发。美国与波兰建立核能战略伙伴关系，支持波兰建设首座核反应堆。法国总统马克龙强调核电是法国实现“能源独立”的关键，计划从 2028 年开始新建 6 个核电机组。英国在新版《英国能源安全战略》(British Energy Security Strategy)中强调核电的重要地位，将开发 8 个新的大型核电项目，并新建多座模块化小堆。德国延长原计划于 2022 年 12 月关闭的 3 座核电站运营时间。比利时政府将 2025 年废除核能的计划延后 10 年。韩国计划到 2030 年将核电在电力结构中的占比提高至 33%，发电量达到 2017 亿千瓦时。同时，韩国海外核电开发项目将与汽车、半导体和电动汽车电池等重点产业挂钩，增加其核电出口。日本首相岸田文雄加速推进核电重启进程，计划到 2023 年秋季使核电机组的重启数量从目前的 10 个增加到 17 个。

(2)主要国家清洁能源转型步伐加速。美国能源部宣布在《两党基础设施法案》(Bipartisan Infrastructure Law)框架下投入 3000 万美元用于发展风电技术，降低陆上风电和海上风电项目成本，使美国到 2030 年达到 30 吉瓦的海上风电装机规模；美国能源部、内政部、商务部和交通部联合启动了漂浮式海上风电行动计划(Floating Offshore Wind Shot)，推动美国漂浮式海上风电设计、开发和制造；美国能源部发布《推进聚光

太阳能热发电定日镜技术的路线图》(Roadmap to Advance Heliostat Technologies for Concentrating Solar-Thermal Power)，对聚光太阳能的重要部件定日镜的研究和部署进行了规划，目标是降低聚光太阳能发电系统成本，到 2030 年使其发电成本降到每千瓦时 0.05 美元；美国能源部还在《能源攻关计划》(Energy Earthshot)框架下相继部署 3 项领域攻关计划，加速推进增强型地热能、海上风能和工业供热领域的清洁转型，助力实现能源转型目标。欧洲国家加强能源安全合作，德国和丹麦在波罗的海投资 90 亿美元新建一个海上风力发电中心；德国、丹麦、瑞典、波兰、芬兰、爱沙尼亚、拉脱维亚、立陶宛八国签署《马林堡宣言》(Marienborg Declarations)，加强海上风电合作，计划在 2030 年将波罗的海地区海上风电装机容量从目前的 2.8 吉瓦提高至 19.6 吉瓦。韩国发布首个《氢经济发展基本规划》(Basic Hydrogen Economy Implement Plan)，拟到 2050 年在全国建立 2000 多处加氢站，并使氢能占最终能源消耗的 33%、发电量的 23.8%，成为超过石油的最大能源。澳大利亚启动建设全球首个“抽水蓄能+制氢”综合项目，其包括 600 兆瓦抽水蓄能、300 兆瓦制氢、50 兆瓦液化氢、50 兆瓦氢燃料电池和 1.8 吉瓦风力发电设备，预计到 2028 年投入使用。

(3)各国加大碳减排技术研发力度。美国能源部启动多个脱碳项目，包括为碳安全(CarbonSAFE)第二阶段储存综合体可行

性(Storage Complex Feasibility)资助计划提供 9300 万美元，为后续开发能够储存 5000 万吨以上二氧化碳的储存设施提供支持；为碳管理(Carbon Management)资助计划下 22 个项目提供 3800 万美元，加速实现“以低于每吨 100 美元的价格将碳捕获并储存”的目标；为从空气中捕集二氧化碳并进行结构储存计划(Harnessing Emissions into Structures Taking Inputs from the Atmosphere)提供 3900 万美元，开发利用纤维素与菌丝体制造的高性能生物基绝缘材料，开发具有钢铁强度、自我修复能力，以及结合了木材和微生物的储碳木材等。美国能源部化石能源和碳管理办公室(Office of Fossil Energy and Carbon Management)发布《战略愿景：化石能源和碳管理在实现温室气体净零排放中的作用》(Strategic Vision: The Role of FECM in Achieving Net-Zero Greenhouse Gas Emissions)报告，重点针对点源碳捕集、二氧化碳转化技术、二氧化碳去除技术等 7 项化石能源技术主题提出未来研发方向。意大利能源公司 Energy Dome 利用压缩二氧化碳储能技术，在意大利萨丁尼亚岛建造 20 兆瓦/200 兆瓦时㊟【20 兆瓦为储能功率，200 兆瓦时为储能容量。】 二氧化碳电池厂，建成后将是全球首个二氧化碳电池厂。日本新能源产业技术综合开发机构(New Energy and Industrial Technology Development Organization)多次资助开发二氧化碳循环转化利用技术，包括在碳循环利用、下一代火力发电等技术开发(Next-Generation

Thermal Power Plants and CCUS Technologies)项目中投入 25 亿日元（约 1924 万美元），发展利用常压等离子体开发新的二氧化碳分解/还原工艺、能够高效利用二氧化碳的藻类生物质生产和利用技术等 6 个项目；在绿色创新基金(Green Innovation Fund Projects)框架下投入 1145 亿日元（约合 8.8 亿美元）启动以二氧化碳为原料的燃料制造技术开发(Development of Technology for Producing Fuel Using Carbon Dioxide)项目，开发可持续航空燃料、不使用化石燃料的液化石油气绿色合成等技术。

2.重大进展

(1)核聚变技术取得新突破，商业化进程加速。美国能源部宣布劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL)的国家点火装置(NIF)于 2022 年 12 月 5 日的惯性约束聚变实验中实现了“聚变能量增益”，实验输出能量大于激光输入能量，能量输出与能量输入之比“聚变增益系数 Q 值”大于 1，而此前类似的实验无法产生正能量增益；美国麻省理工学院(Massachusetts Institute of Technology, MIT)和联邦聚变系统公司(Commonwealth Fusion Systems)的研究人员在材料、计算机建模和控制系统等领域取得了关键突破，正在通过磁约束开发聚变反应堆原型 SPARC；美国 Zap Energy 公司宣布其第四代 Z 箍缩(Z-pinch)设施 FuZE-Q 创造了第一个等离子体；美国通用原子能公司(General Atomics)推出一种使

用碳化硅基材料的新型模块化聚变包层概念 GAMBL，其可以使汽轮发电机能够在超过 1000 摄氏度的条件下工作，同时具有更高安全性。欧洲核聚变研发创新联盟(EURO fusion)、英国原子能管理局(UK Atomic Energy Authority)和国际热核聚变实验堆组织(International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER)宣布欧洲联合环状反应堆(Joint European Torus, JET)在 5 秒内产生了能量输出为 59 兆焦耳的稳定等离子体，打破了该装置在 1997 年创下的 22 兆焦耳核聚变能量的纪录，同时刷新了世界纪录。英国 First Light fusion 公司利用弹丸聚变(Projectile Fusion)技术首次成功实现核聚变，计划到 21 世纪 30 年代建设一座功率 15 万千瓦的试点聚变电厂。日本京都聚变工程公司(Kyoto Fusioneering)完成聚变电厂设备综合测试设施 UNITY 的初步设计，UNITY 是全球首个将聚变反应堆技术作为一个综合性系统进行测试的设施，可在一个设施中测试聚变电厂所需的多个系统，对推进聚变技术发展具有积极意义。

(2)多国推出新的氢能项目，新技术不断涌现。美国国家可再生能源实验室(National Renewable Energy Laboratory, NREL)开发出太阳能热化学制氢(Solar Thermochemical Hydrogen)技术，具备比常规电解水制氢更高的效率。英美资源公司(Anglo American)在位于南非的 Mogalakwena 铂金矿启用全球最大氢电混合动力矿山运输卡车，该卡车总功率为 2 兆瓦，可承

载 290 吨有效载荷；英国结合氢燃料锅炉、电空气源热泵和智能控制技术，开发出全球首个智能氢混合供热系统，提供了安全、廉价的供热方案。德国下萨克森州立市郊交通公司(LNVG)将阿尔斯通公司(Alstom)制造的氢动力支线列车 Coradia iLint 投入运营，开通全球首条纯氢动力客运铁路线路。加拿大 PyroGenesis 公司推出通过热等离子热解从碳氢化合物中生产氢的制氢技术，理论电力成本比水电解法低 1/3 倍；加拿大海洋技术公司 Cellula Robotics 开发出由氢燃料电池驱动的自主水下航行器 Solus-LR，扩展了氢能在军事领域的应用。日本川崎重工业株式会社(Kawasaki Heavy Industries)的全球第一艘液化氢运输船 Suiso Frontier 将澳大利亚生产的氢气成功运抵日本，完成全球首次液氢海上运输。

(3)新材料、新工艺加速碳减排技术商业化进程。美国能源部太平洋西北国家实验室(PNNL)开发出新的碳捕集溶剂，能够以较低的成本（每吨 39 美元）高效地将二氧化碳根据不同需求转化为具有多种工业用途的甲醇、甲酸盐或甲烷等物质。澳大利亚皇家墨尔本理工大学(Royal Melbourne Institute of Technology, RMIT)开发出新的碳捕集系统，通过将二氧化碳与被加热的共晶镓铟(EGaIn)合金混合，实现了快速将二氧化碳气体转化为固体碳片，便于对其收集或再利用。日本大阪大学(Osaka University)利用资源化技术将二氧化碳高速合成了多碳有机化合物，其过程中电流密度达到每平方厘米 1.8 安

培，实现了全球最快的合成速度。日本东京都立大学(Tokyo Metropolitan University)开发出一种新的直接空气碳捕获(Direct Air Capture, DAC)技术，研究人员通过使用异氟尔酮二胺(IPDA)化合物在低浓度二氧化碳（400 百万分比浓度）下将99%的二氧化碳转化为固体氨基甲酸沉淀物，且每摩尔化合物每小时可去除 201 毫摩尔的二氧化碳，创造了全球最快的二氧化碳去除效率。此外，在溶液中的固体只需加热到 60 摄氏度即可将捕获的二氧化碳完全释放，溶液可以被回收再利用。

（四）新材料技术

2022 年，世界经济从新冠疫情中逐步恢复，各主要经济体对于材料的需求进一步释放。随着半导体、5G 通信、人工智能、电动汽车、氢能等产业的快速发展，科技强国加紧布局关键矿产产业链、供应链，持续推动新材料技术与新能源、信息、生物等新兴产业的融合，加速前沿新材料技术的发展。主要国家在新能源材料、聚合物材料、生物材料等领域取得突破，同时加紧研发关键矿产提取、加工及回收技术，布局新能源矿产供应链，以期在全球能源转型变革中获得先发优势。

1.重要趋势

(1)发达国家为争夺关键矿产资源制定了一系列战略规划。2022 年 2 月，美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)发布更新版《2022 年关键矿产清单》(2022 Final List of Critical Minerals)，将锂、稀土等关键矿产纳入其中，并提出扩大国内关键矿产生产规模，以减少对中国和俄罗斯的进口依赖。2022 年 3 月，澳大利亚政府公布《2022 年关键矿产战略》(2022 Critical Minerals Strategy)，建议扩大本国矿产加工产业，并与其他国家合作建立更加多样化和安全的关键矿产供应链，为关键矿产制定国际标准体系。此外，澳大利亚政府在 2022—2023 年预算中，拟向《关键矿产加速器倡议》(Critical Minerals Accelerator Initiative)投入 2 亿澳元（约合 1.37 亿美元）用于关键矿产项目，并在 3 年内投入 5000 万澳元（约合 3400 万美元）建立虚拟的国家关键矿产研发中心，推动矿石加工、提纯和回收技术的合作研究。2022 年 7 月，英国政府发布首份《未来的复原力：英国关键矿产战略》(Resilience for the Future: The UK's Critical Minerals Strategy)，提出将通过提升国内生产能力、加强国际合作等方式，建立更安全、更有韧性的关键矿产供应链。2022 年 10 月，美国地质调查局与美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)联合绘制美国西南部部分地区的关键矿产潜力地图，寻找未来具有开采潜力的地区，以增加国内关键矿产产量。2022 年 12 月，加拿大自然资源部(Natural

Resources Canada)发布新版关键矿产战略《从探索到回收：为加拿大和世界的绿色和数字经济提供动力》(From Exploration to Recycling: Powering the Green and Digital Economy for Canada and the World)，旨在促进其国内电动汽车电池相关关键矿物的生产和加工。

(2)主要国家推动关键矿产提取、加工及回收技术的研发。2022 年 3 月，加拿大联邦政府为建造电动汽车电池材料生产设施和超级电池工厂提供财政支持，并计划投资至少 20 亿加元（约合 16 亿美元），用于促进电动汽车电池供应链所需的镍、锂、钴等关键矿产的生产和加工。2022 年 8 月，日本海洋地球科学技术机构(Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, JAMSTEC)在茨城县沿海成功测试海底开采技术，并计划在小笠原群岛和南鸟岛附近 6000 米深的海床中开采富含稀土的泥浆，以寻找稀土元素。2022 年 10 月，美国能源部从《基础设施投资和就业法案》(Infrastructure Investment and Jobs Act)中拨款 28 亿美元完善本土电池供应链，包括新建和扩建国内分离与加工锂、石墨等关键矿产的工厂，以及演示验证利用回收材料制造组件的工艺。2022 年 10 月，美国能源部为 12 个州的 16 个项目提供 3900 万美元的资金，用于开发可扩展的商业技术，以增加国内清洁能源转型所需的铜、镍、锂、钴、稀土等关键矿产供应。2022 年 10 月，美国白宫发起《美国电池材料倡议》

(American Battery Materials Initiative)，以确保用于电力、电气和电动汽车的关键矿产的稳定持续供应。2022 年 11 月，美国能源部先进材料和制造技术办公室公布一项价值 1200 万美元的融资项目，以研究和改进从地热盐水中安全、经济、高效地提取和精炼锂的技术。2022 年 11 月，英国计划在提兹港(Teesport)建设欧洲首个大型商业锂精炼厂，为电动汽车、可再生能源系统供应链提供电池级材料。

(3)跨国企业加紧布局新能源矿产和电池生产项目，对全球新能源矿产供应链带来新挑战。2022 年 4 月，美国通用汽车公司与嘉能可(Glencore)签订了钴供应协议，采购镍钴矿用于制造通用的 Ultium 电池正极。2022 年 8 月，美国福特汽车与必和必拓(BHP Billiton)签署了镍供应协议，必和必拓旗下的西部镍业公司(Nickel West)将为福特供应镍，同时福特将寻找其他关键矿产供应来源，以确保锂、镍、稀土、铜等电池关键原材料的供应。2022 年 9 月，韩国 SK 集团提出拟于 2023 年在本土投资 73 万亿韩元（约合 563 亿美元）提升芯片、绿色能源及生物制造的生产能力，其中 12.8 万亿韩元（约合 98 亿美元）投向电动汽车电池、氢能及其他可再生能源。2022 年 10 月，美国通用汽车计划投资约 6900 万美元入股澳大利亚昆士兰太平洋金属公司(Queensland Pacific Metals)，以获得用于制造电动车电池的镍和钴。2022 年 11 月，英国 Adamas Intelligence 公司发布的《充电状态：电动汽车、电池和电池

材料》(State of Charge: EVs, Batteries and Battery Materials)报告称，2022 年上半年全球电动汽车电池消耗的锂、钴、镍资源量同比大幅增加，预计 2023 年还将进一步增长。

2.重大进展

(1)主要经济体持续加大电池材料研发力度。2022 年 4 月，美国能源部西北太平洋国家实验室(Pacific Northwest National Laboratory, PNNL)开发出一种铝镍熔盐电池，其理论能量密度高于铅酸电池和液流电池，在热循环的情况下，12 周内可保持 92%的电池容量。2022 年 6 月，俄罗斯斯科尔科沃科技学院(Skoltech)开发出一种新的快速充电电池阳极材料 NiBTA，并揭示了该材料的电荷存储机制。2022 年 8 月，韩国电工技术研究院(Korea Electro-technology Research Institute, KERI)下一代电池研究中心开发出具有空心核的一维锂限制多孔碳结构，并在空心核中添加金纳米粒子，制造出具有更高倍率性能和稳定性的高容量锂金属电池。2022 年 9 月，美国能源部橡树岭国家实验室(Oak Ridge National Laboratory, ORNL)和田纳西大学诺克斯维尔分校(University of Tennessee, Knoxville)开发出快速充电锂离子电池所需的钼-钨-铌酸盐化合物(MWNO)材料，该材料具有充电速度快和效率高的特点，有望取代商业电池中的石墨。2022 年 10 月，中国合肥工业大学和美国得克萨斯大学奥斯汀分校合作开发出用于钠金属电池的基于聚（1，3-二氧戊环）的准固体电解质，改善了

全固态电池整体性能。

(2)聚合物材料领域取得多项技术进展。2022 年 1 月，英国伯明翰大学(University of Birmingham)从糖基原料中创造了一个新的聚合物系列，既保留了普通塑料的所有品质，也可进行降解和机械回收。2022 年 2 月，澳大利亚皇家墨尔本理工大学开发出一种坚固、可持续和可堆肥的自清洁生物塑料。2022 年 2 月，日本理化学研究所(RIKEN)开发出一种坚固、有弹性、可自我修复的聚合物材料，该材料在断裂前可以拉伸到原始长度的近 14 倍，切断后可在 5 分钟内自行愈合。2022 年 4 月，美国北卡罗来纳州立大学(North Carolina State University, NCSU)开发出一种新的聚合物膜技术，在现有膜表面接枝亲二氧化碳的化学活性聚合物链，可以大幅提高二氧化碳选择性。2022 年 7 月，美国得克萨斯大学奥斯汀分校将 256 位加密密钥编码在实验室合成的聚合物材料上，再将聚合物材料混合到墨水中书写成加密信件后通过液相色谱质谱仪进行提取和分析，未来将进一步探索该技术在数据存储和密码学领域的应用。2022 年 8 月，芬兰图尔库大学(University of Turku)采用液-液相分离法(Liquid-Liquid Phase Separation, LLPS)开发出一种超分子塑料，该材料具有良好的机械性能和高度可回收性，可通过吸水进行自我修复，未来可作为环保材料替代传统塑料。

(3)生物材料成为新材料领域研究热点。2022 年 3 月，巴西圣

保罗州立大学(São Paulo State University, UNESP)使用 B 型牛明胶制成了高拉伸强度、可食用、可生物降解的抗菌生物塑料薄膜，可保护包装食品免受病原体污染。2022 年 7 月，美国加利福尼亚大学洛杉矶分校(University of California, Los Angeles, UCLA)采用紫外线光固化工艺创造了一种改进的丙烯酸基材料，该材料柔韧性好、强度高、耐用性强，可像肌肉组织一样发挥作用，将用于软体机器人、具有触觉的新型可穿戴设备、触觉技术等领域。2022 年 7 月，西班牙从事塑料研发的 Andaltec 技术中心开发出一种可用于再生肌肉组织的形状记忆聚合物，可在医院内通过材料挤压打印工艺制作植入物、手术器械和假肢。2022 年 8 月，美国得克萨斯农工大学（Texas A&M University，TAMU）将二维纳米材料二硫化钼与改性明胶结合后开发出一种柔韧的水凝胶生物材料，可用于创建复杂的 3D 电路，为患者提供 3D 打印电子文身，监测患者的运动指标。2022 年 11 月，新加坡南洋理工大学(Nanyang Technological University, NTU)使用聚己内酯和明胶，采用静电纺丝方法制造聚己内酯/明胶纤维，再将 ε-聚赖氨酸掺入纤维支架制造出一种可加速伤口愈合过程的新型纳米纤维复合敷料，可促进细胞生长、增殖和迁移。

（五）智能制造技术

2022 年，新冠疫情和俄乌冲突对全球制造业造成了巨大冲击，但制造技术发展并没有因此停滞。智能制造的关键领域包括数字化、自动化和定制化均取得了长足的进步，相关技术包括 3D 打印、机器人和工业物联网(IoT)也取得了新的技术革新，这些技术使制造业企业能够以比以往更高的精度、更快的速度和更大的灵活性生产产品。同时，智能制造技术越来越关注环保与可持续问题，循环经济、减少废物和污染成为行业趋势。

1.重要趋势

(1)人工智能实效凸显，机器算法全面提升制造业水平。2022 年 1 月，美国马里兰大学(University of Maryland)利用机器学习促进预测模型的构建，加速软机器人设计流程。2022 年 6 月，中国上海科技大学开发出由人工智能驱动的人机界面系统 M-Bot，可以帮助机械手实现对触觉和温度的感知，并对有毒物进行现场采样和实时分析。2022 年 8 月，美国卡内基·梅隆大学(CMU)使用触觉传感器和机器学习改进了机器人操纵织物的方式。2022 年 10 月，美国太平洋西北国家实验室(PNNL)构建的机器学习工具可以预测制造过程中对材料产生的影响，加速先进制造技术的发展。2022 年 10 月，美国斯坦福大学开发出内设机器学习模型的新型外骨骼机器

人靴子，大幅提高了穿戴者的行走速度和穿戴舒适度。2022 年 10 月，美国加利福尼亚大学伯克利分校(University of California, Berkeley)等机构开发出的强化学习模型，提高了四足机器人守门员的技能水平。

(2)自然生物学助力先进制造创新，仿生机器人受到高度关注。2022 年 9 月，日本理化学研究所(RIKEN)开发出太阳能驱动的活体蟑螂机器人。2022 年 10 月，美国耶鲁大学(Yale University)模仿龟类运动形态，开发出具有自适应形态的四足两栖机器人。2022 年 10 月，美国加利福尼亚大学伯克利分校推出一种可垂直自我挖掘的仿鼹鼠蟹机器人。2022 年 10 月，韩国机械与材料研究所(Korea Institute of Machinery and Materials, KIMM)开发出世界首个能够进行所有抓取动作的仿象鼻夹吸式抓手。2022 年 10 月，英国萨里大学(University of Surrey)设计出一款可在水中收集塑料颗粒的仿生机器鱼。2022 年 11 月，韩国高丽大学(Korea University)等联合开发出由多孔水凝胶制成的微型水上昆虫型机器人。

(3)3D 打印技术持续取得突破，推动各行业科技进步。2022 年 9 月，德国波鸿鲁尔大学(Ruhr-Universität Bochum)的研究人员利用双光子聚合 3D 打印技术成功模拟出纳米尺度上的生物结构。2022 年 10 月，美国橡树岭国家实验室(ORNL)利用深度学习加速 3D 打印的 CT 扫描过程，同时可以提高结果准确性。2022 年 10 月，俄罗斯乌拉尔联邦大学(Ural Federal

University)和俄罗斯科学院乌拉尔分院(Ural Branch of the Russian Academy of Sciences)通过3D打印制造出微型永磁体。2022 年 10 月，中国科学院大连化学物理研究所开发出具有强大循环稳定性和超高面能量密度的全 3D 打印锂金属电池。2022 年 11 月，美国麻省理工学院(MIT)开发出一种新的热处理方法，可有效改善 3D 打印金属的微观结构，使 3D 打印发动机叶片成为可能。2022 年 11 月，美国得克萨斯农工大学(TAMU)使用食盐 3D 打印可降解聚合物。

2.重大进展

(1)增材制造技术在生物医药、航空航天、建筑等领域的应用得到进一步提高。2022 年 1 月，美国约翰斯·霍普金斯大学研究人员设计的智能组织自主机器人，在没有人类指导的情况下对猪的软组织进行了腹腔镜手术。2022 年 2 月，荷兰乌得勒支大学(Utrecht University)研究人员使用新开发的超快体积 3D 生物打印方法成功制造出功能性肝脏。2022 年 5 月，俄罗斯国家研究型技术大学(The National University of Science and Technology)研究人员利用 3D 打印技术开发出一种为航空航天工业生产复合材料部件的方法，该方法将成品的强度提高了 15%。2022 年 6 月，澳大利亚 SPEE3D 公司冷喷涂 3D 打印技术入选美国海军 MAINTENX 演习。2022 年 10 月，美国加利福尼亚建筑初创公司 Mighty Buildings 交付世界首个 3D 打印零净能耗住宅。

(2)技术融合加快，传感器性能得到大幅提升。2022 年 2 月，韩国国防技术规划与发展研究所授予韩国 LIG Nex1 公司一份超薄线性传感器合同，旨在提升韩国海军未来水下系统的生存能力和杀伤力。2022 年 9 月，美国国防部高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)推出革命性红外传感解决方案——“光机热成像”(OptTIm)计划，寻求在室温条件下实现量子级红外探测。2022 年 11 月，美国宾夕法尼亚州立大学研究人员利用机器学习开发出新的分析方法，能够使用单个传感器选择性地测量多个生物分子，显著提高生物传感器的分析性能。2022 年 11 月，美国宾夕法尼亚州立大学研究人员使用原子级薄材料发明出一种 900 像素的成像传感器。2022 年 11 月，中国深圳大学研究人员开发出可真空直接批量制造的富边缘碳基柔性传感器，即柔性石墨烯纳米晶体嵌入碳结构(Flexible Graphene Nanosheet-Embedded Carbon, F-GNEC)薄膜电子皮肤，大幅提升了对弯曲电、光电、热电信号的检测能力。2022 年 12 月，英国剑桥大学(University of Cambridge)科研团队开发出活体生物电传感器，该传感器对生物电传感体系进行大幅改进，可在三分钟内监测目标污染物并直接输出电传感信号。2022 年 12 月，美国空军研究实验室(Air Force Research Laboratory, AFRL)启动可穿戴生物分子传感器的新研发项目，以测量空军人员的生物标志物。

(3)机器人技术取得突破，人机交互、多机协同能力大幅增强。2022 年 3 月，美国麻省理工学院计算机科学与人工智能实验室(CSAIL)开发出使用电磁体重新配置的机器人立方体(ElectroVoxels)，可在微重力下运行，不需要电机或推进剂驱动。2022 年 4 月，日本北海道大学理学院(Hokkaido University of Science)开发出世界首个利用集群策略工作的微型机器人，证明分子机器人能够采用集群策略完成货物递送。2022 年 4 月，美国微软混合现实与人工智能实验室(Microsoft Mixed Reality and AI Lab)和苏黎世联邦理工学院研究人员开发出一个新框架，将混合现实和机器人技术相结合，增强人机交互，允许用户在查看周围环境的同时远程控制机器人。2022 年 11 月，美国科罗拉多州立大学(Colorado State University)研究人员创造了世界首个成功操纵单个液滴的软机器人抓手，该抓手采用新型超疏水涂层处理，可以像柔性固体一样抓住、运输和释放单个液滴，可以一次性使用并进行精确、无损的液体清理工作。

（六）航天技术

2022 年，世界航天活跃度依旧维持在较高水平，主要航天国家进一步突出太空在国家战略中的地位，加速推动航天技术

和装备发展。其中，低轨星座部署与应用、火箭发射和回收技术、太空站建设及深空探测等取得关键进展。此外，商业航天力量深度参与现代作战，在俄乌冲突中发挥关键作用，成为支持军事作战的重要力量。1.重要趋势

(1)主要航天国家、地区或组织强化航天战略部署，太空安全和太空探索成为关注重点。美国发布《国防战略》、《2022年导弹防御评估》、《国土安全部太空政策》(Department of Homeland Security Space Policy)、《国防部太空政策》、《太空服务、组装与制造国家战略》等文件，将太空视为“美国国家军事力量的优先领域”，并通过提升太空系统网络安全、增强太空系统韧性、加强与盟国和商业航天力量合作、发展在轨建造和维修技术等手段，维持美国在太空领域的战略竞争优势。英国发布新版《国防太空战略》和《英国太空力量》文件，拟通过提升太空防御能力、建立太空系统韧性、发挥太空科技优势、加强美英太空联盟等举措，激发太空产业活力，推进太空军事能力发展。澳大利亚发布《国防太空战略》，计划提升国防太空能力，强化太空联盟合作，确保其太空利益。北约发布《太空政策》(Space Policy)文件，把太空纳入集体防御体系，以捍卫其在太空领域的安全利益。欧盟发布《安全与防务战略指南》(Strategic Compass for Security and Defence)，提出应在太空中迅速采取行动以应对威胁。欧洲航天局发布《Terrae Novae 2030+战略路线图》(Terrae Novae

2030+Strategy Roadmap)，旨在为欧洲建立可行、有韧性的太空活动框架，并将近地轨道、月球和火星视为太空探索重点。美国、英国、法国、德国等七国发布《联合太空作战愿景 2031》倡议，将通过加强太空合作，发展太空军事联合作战能力，防止太空冲突。

(2)巨型星座布建规模进一步扩大，或成为重塑太空格局的关键力量。2022 年，美国 SpaceX 公司通过 34 次发射将 1732 颗“星链”(Starlink)卫星部署入轨，使“星链”星座在轨卫星总数突破 3600 颗；亚马逊公司与 3 家火箭公司签署 83 次发射协议，用于部署由 3236 颗卫星组网的“柯伊伯”(Kuiper)星座。俄罗斯成功发射“球体”(Sphere)星座首颗卫星“斯基泰人”-D(Skif-D)，对天基互联网接入技术开展在轨验证，未来将部署 388 颗卫星完成星座组网。英国 OneWeb 星座受俄乌冲突影响部署进度大幅放缓，截至 2022 年 12 月底，全年仅通过 3 次发射将 112 颗卫星送入轨道，将 OneWeb 星座规模扩大至 502 颗，完成初期计划 77%的部署任务。欧盟计划投资 24 亿欧元构建低轨星座，在弥补地面通信网络空白区域的同时，为欧洲提供更加安全的通信系统。

(3)商业星座应用范围不断扩大，首次深度参与现代作战。在商业通信星座方面，美国 SpaceX 公司相继推出车载、企业、海事及航空版“星链”终端，为客户提供多元化网络服务。据统计，“星链”星座正在为 41 个国家超过 60 万人提供天

基网络服务，覆盖范围涵盖全球七大洲。在俄乌冲突期间，“星链”星座在保障民用基础通信的基础上，为乌军战场情报支援、态势感知、导弹引导、无人机作战等提供关键通信链路保障，成为支持乌军作战的关键力量。在商业遥感星座方面，美国麦克萨(Maxar)、黑色天空(BlackSky)及芬兰冰眼(Iceye)等公司利用各自遥感星座为乌克兰和北约等提供遥感图像，为及时侦察俄军部署、跟踪俄军动向、评估战场态势等提供有力支持。鹰眼 360 公司(HawkEye 360)向美国和北约提供了乌克兰领土上的 GPS 干扰信号分析，并绘制了可能由俄军发射的 GPS 干扰信号地图。

2.重大进展

(1)中国太空站全面建成。2022 年 5 月，天舟四号货运飞船成功发射，中国太空站在轨建造阶段开启。2022 年 6 月，神舟十四号载人飞船发射成功，将航天员陈冬、刘洋、蔡旭哲送入天和核心舱。2022 年 7 月，中国首个科学实验舱问天实验舱发射成功。2022 年 11 月，中国太空站梦天实验舱顺利完成转位，中国太空站“T”字基本构型在轨组装完成。2022 年 11 月，天舟五号货运飞船成功发射，并顺利与太空站组合体完成自主快速交会对接。此次任务首次实现了两小时自主快速交会对接，创造了世界纪录。2022 年 11 月，神舟十五号载人飞船发射圆满成功，将航天员费俊龙、邓清明、张陆顺利送入中国太空站。至此中国太空站关键技术验证和建

造阶段 12 次发射任务全部完成。从 2021 年 4 月天和核心舱发射到神舟十五号任务顺利完成，中国载人航天在 19 个月内，密集实施 11 次发射、2 次飞船返回、7 次航天员出舱，4 个乘组 12 名航天员接续在轨工作，如期完成太空站“T”字基本构型组装建造，展现了中国载人航天 30 年发展的厚重积淀和强大实力。

(2)全球航天发射能力稳步提升，火箭发射和回收技术取得新突破。2022 年，美国太空发射系统(Space Launch System, SLS)重型运载火箭首次成功发射，将重约 26.5 吨的“猎户座”(Orion)飞船送入地月转移轨道；SpaceX 公司“猎鹰”-9(Falcon-9)火箭年内完成 61 次发射，实现平均约每 6 天发射 1 次的能力，并成功创造“一箭 14 飞”和“一箭 105 星”的新发射纪录；SpaceX 公司“重型猎鹰”(Falcon Heavy)火箭执行首个美国国家安全任务，完成第 4 次发射任务，将多颗军事卫星送入地球同步轨道；火箭实验室公司(Rocket Lab)首次利用改装直升机尝试抓捕执行轨道级发射任务的一级火箭，展现新型火箭回收方式；维珍轨道公司(Virgin Orbit)的小型空射火箭“运载器一号”(Launcher One)在 2022 年 1 月和 7 月由波音 747-400 载机携带到高空完成 2 次发射任务，继续引领空射火箭技术发展。蓝色起源公司(Blue Origin)“新谢泼德”(New Shepard)亚轨道火箭成功完成第 5 次亚轨道载人飞行任务。萤火虫航天公司(Firefly Aerospace)“阿尔法”(Alpha)火

箭首次发射成功，将 3 颗卫星送入轨道。俄罗斯“安加拉”(Angara)1.2 型火箭完成首次发射任务，将逐渐取代“质子”号(Proton)等旧型火箭，成为俄主力运载火箭。欧洲航天局(European Space Agency, ESA)新型“织女星”-C(Vega-C)火箭首飞成功，将 7 个有效载荷成功送入预定轨道。韩国成功发射“世界”号(Nuri)运载火箭，成为全球第 7 个拥有自主太空发射能力的国家。伊朗成功测试了其自主生产的新型运载火箭，将为其卫星部署提供支持。

(3)深空探索有序开展，取得诸多新成就。2022 年，美国成功发射月球自主定位系统技术操作和导航试验(Cislunar Autonomous Positioning System Technology Operations and Navigation Experiment, CAPSTONE)立方体卫星和“猎户座”飞船，探测月球轨道环境，测试载人飞船性能，正式拉开“阿尔忒弥斯”重返月球计划序幕；NASA 实施全球首次行星防御任务，利用“双小行星重定向测试”(Double Asteroid Redirection Test, DART)航天器撞击目标小行星，将小行星轨道周期缩短了 32 分钟，成功验证了小行星偏转技术。韩国发射首个月球探测器“赏月”号(Danuri)，成功与地面站实现通信，将开展为期 1 年的月球观测任务。日本成功发射“好客”号(Omotenashi)月球探测器，拟尝试完成月表着陆任务，但其升空后因太阳能电池失效，导致任务失败。中国成功发射综合性太阳探测卫星“夸父一号”，将对太阳磁场、太阳

耀斑和日冕物质抛射等开展观测，为空间灾害预报提供支持。

（七）航空技术

2022 年，世界主要国家围绕先进空中作战平台、有人/无人协同作战系统及高超声速武器系统等空战科技热点，持续推进新一代先进航空装备与关键技术的开发与试验，探索航空先进工业新技术应用，加快推出新型空战装备以提高作战能力。此外，电能、氢能和可持续燃料等新能源航空技术稳步发展，将引领航空技术向绿色、节能方向前进。

1.重要趋势

(1)主要航空国家推进先进空中作战平台研发、测试与升级，持续提升空中力量优势与战略威慑。美国对 608 架 F-16 战斗机进行了 22 项改装，旨在提高杀伤力，以有效应对当前与未来的威胁；美国空军首架 B-21“空袭者”(Raider)隐身轰炸机进入地面测试阶段；美国空军核武器中心(Air Force Nuclear Weapons Center)批准 F-35A 战斗机携载 B61-12 制导核航弹的初始设计方案；美国新型 KC-46A 加油机创造了 36 小时不间断飞行新纪录，为提升美国全球作战能力提供支持；美国空军对下一代 EC-37B“罗盘呼叫”(Compass Call)电子战飞机开展测试，进一步提升电子探测、定位及干扰能力。俄罗斯改

进型苏-57 战斗机首飞，对机载设备扩展功能、人工智能辅助设备及各种新型武器进行测试。法国、德国、西班牙共同开展新一代战斗机发动机原型机试验，并启动未来空中作战系统(Future Combat Air System, FCAS)新阶段研发工作。法国、德国、瑞典启动未来中型战术货运(Future Mid-Size Tactical Cargo, FMTC)项目，将联合开发一种新的固定翼中型运输机。法国、德国、希腊、意大利、荷兰和英国启动下一代旋翼机能力(Next Generation Rotorcraft Capability, NGRC)项目，共同探索未来直升机的创新方案。日本与英国、意大利共同开发新一代战机，预计在 2035 年前服役。韩国 KF-21“猎鹰”(Boramae)战斗机首架原型机成功完成首飞，使韩国成为世界上第 8 个成功研制超声速战斗机的国家。

(2)空中无人系统成为主要航空国家和地区发展重点。美国海军完成 MQ-8C 无人机首次舰载作战部署，进一步提升海军态势感知及情报、监视和侦察能力；美国空军使用 MQ-9“死神”(Reaper)无人机试射新型“地狱火”(Hellfire)导弹，以提升持续打击能力；美国陆军在会聚工程 2022(Project Convergence 2022)和实验示范网关(Experimental Demonstration Gateway Exercise, EDGE)演习中使用 K1000 ULE 和空射效应(Air Launched Effects, ALE)无人机集群，提升战场通信覆盖和侦察能力；DARPA 启动无基础设施发射和可回收先进 X 战机(AdvaNced airCraft Infrastructure-Less Launch And

RecoverY X-Plane, ANCILLARY)项目，推进新概念无人机技术研发。俄罗斯开发 LAOP-500 无人机，用于对抗敌方人员、重型装甲车辆等威胁目标。英国首架“守护者”(Protector)RG Mk1 无人机系统完成验收测试，将正式移交英国皇家空军；英国陆军开展蜂群无人机演示活动，对态势感知和人工智能等技术进行测试。欧洲空客公司(Airbus)利用 A400M 运输机进行投射无人机研究，验证空中发射无人机技术；欧洲中高空长航时远程无人机系统通过综合基线审查，将成为欧洲未来空战的重要组成系统。韩国国防科学研究院(Agency for Defense Development)计划与大韩航空公司(Korean Air Lines)合作实施隐身无人机开发(Stealth UAV Technology Development)项目，开展无人机设计工作。

(3)清洁航空受到更多关注，成为未来航空技术发展方向。美国波音公司(Boeing)发布《可持续发展报告》(Sustainability Report)，承诺到 2030 年交付可使用 100%可持续燃料飞行的民用飞机，并支持民航业于 2050 年实现全球民航运行净零碳排放的承诺；美国通用航空公司(General Electric, GE)的 Passport 发动机使用 100%可持续航空燃料完成了首次飞行测试。欧盟正式发布《航空绿色协议——欧洲可持续航空愿景》(Fly the Green Deal-Europe's Vision for Sustainable Aviation)，拟到 2050 年实现航班二氧化碳净零排放；欧盟委员会(European Commission)成立零排放航空联盟(Alliance for Zero

Emission Aviation)，呼吁航空界通过引进氢能和电动飞机来实现欧洲 2050 年的碳中和目标。英国发布《航空零排放》(Jet Zero)战略，提出 2040 年实现英国国内航空运输和机场净零排放的目标；英国皇家空军利用装备“遄达”700(Trent 700)发动机的军用改型 A330 运输机完成全球首次使用 100%可持续燃料的军用飞机飞行测试任务；英国罗尔斯·罗伊斯公司(Rolls-Royce)将开发涡轮发电机技术，扩大可持续航空燃料使用范围。欧洲空客公司 A400M 运输机首次使用部分可持续航空燃料开展飞行测试。德国汉莎集团(Lufthansa)与壳牌国际石油公司(Shell)达成有史以来规模最大的可持续航空燃料交易，推进实现航空碳中和目标。荷兰联盟组织开展氢能飞机动力总成和存储系统(Hydrogen Aircraft Powertrain and Storage System, HAPSS)计划，拟开发用于 40～80 座改装型支线涡桨飞机的氢电推进系统。

2.重大进展

(1)高超声速武器系统技术研发进程加速，部分装备投入实战。美国正在制定《国家高超声速倡议 2.0》(National Hypersonics Initiative 2.0, NHI2.0)，寻求发展颠覆性和先进性作战能力；美国对吸气式高超声速武器概念(Hypersonic Air-Breathing Weapon Concept, HAWC)、AGM-183A、“作战火力”(OpFires)等高超声速系统开展飞行测试，推进高超声速武器装备化研发；美国国防部与多元化行业团队合作，开发高超声速能力

测试设施多服务先进能力高超声速试验台(Multi-Service Advanced Capability Hypersonics Test Bed, MACH-TB)，以更快地验证和部署高超声速系统。美国平流层发射公司(Stratolaunch)Talon 高超声速飞行器原型机完成首次试飞，将为多类高超声速技术研究提供飞行试验支持；美国雷神公司(Raytheon)为美国空军设计、开发和生产高超声速攻击巡航导弹系统。俄罗斯利用“匕首”高超声速导弹摧毁乌克兰多个军事目标，首次展示高超声速武器实战打击能力；俄罗斯将批量生产“锆石”(Zircon)高超声速导弹，并将其装备俄海军舰队。英国计划实施高超声速飞行器试验(Hypersonic air Vehicle Experimental, HVX)计划，开发创新的高超声速技术；英国公布名为“概念 V”(Concept V)的军用高超声速飞机模型及其概念方案，推进可重复使用高超声速系统研发。澳大利亚设立高超声速研究中心，为澳大利亚国防部、工业界、大学和国际合作伙伴提供高超声速技术测试场所。伊朗称其研制出了首枚高超声速弹道导弹。

(2)航空有人/无人协同作战平台发展迅速。美国海军 F/A-18E/F“超级大黄蜂”舰载战斗机(Strike Fighter)展示有人/无人编队飞行能力，是美国海军实现分布式海上作战愿景迈出的重要一步；美国通用原子公司(General Atomics Aeronautical Systems)为 MQ-Next 无人机提出新型混合动力推进技术模块化概念，提高其隐身性能。美国通用原子公司公

布“开局”(Gambit)和“进化”(Evolution-class)两种无人机系统，前者将满足与有人驾驶飞机协同作战需求，后者可提升美军战场信息优势和空域主宰能力；美国空军推进新型无人驾驶型协同作战飞机(Collaborative Combat Aircraft, CCA)项目，并将进行重点投资，实现利用人工智能技术自主操控忠诚僚机。俄罗斯“格罗姆”(Grom)多用途高速无人机进入初步设计阶段，将可作为忠诚僚机协同有人驾驶飞机对敌方防空系统和沿海设施实施打击。芬兰和德国合作开展与有人/无人编组飞行(Manned-Unmanned Teaming, MUM-T)研究相关的测试和飞行演示。韩国着手研发基于人工智能技术的无尾翼“鳐鱼”-X(Kaori-X)隐形无人机，使其具备与载人战斗机系统协同作战的能力。土耳其首架国产“红苹果”（Kızılelma）隐身无人机成功进行地面测试，将与有人驾驶飞机协同执行战略进攻、近距离空中支援、导弹进攻等多种军事行动。

(3)多款反无人机系统研制和部署取得关键进展。美国莱特耶系统公司(Liteye)为美国陆军开发高能激光反小型无人机系统，利用多个效应器和战斗管理系统探测、跟踪、识别和应对小型无人机威胁。俄罗斯研发小型低成本反无人机地对空导弹，通过集成无源电子扫描阵列雷达，实现快速同时打击多个目标的能力。英国火星公司(Marss)推出用于反无人机任务的新型高速拦截器，可以亚声速攻击目标，并具有机器学习能力。德国海军“萨克森”号(Sachsen)护卫舰成功完成高

能激光武器在短距离和超短距离内的反无人机作战试验。澳大利亚无人机之盾(DroneShield)和操作员战术解决方案公司(Operator Tactical Solutions)合作推出基于虚拟现实技术的反无人机系统，将允许用户在同一场景下基于多视角反复演习反无人机技术、战术和模拟程序作战。韩国计划利用便携式无人机电磁干扰装置、激光、防空炮、导弹等反无人机打击系统，建立无人机信息整合体系。印度经济炸药公司(Economic Explosives, EEL)着手研发可对无人机实施软、硬杀伤的反无人机微型导弹，并将可在 2 千米距离范围内使用电子光学系统对空中目标进行识别。

（八）海洋技术

当前，海洋已成为全球战略竞争的焦点之一，而海洋技术对认识、开发和利用海洋的支撑作用也越发凸显。2022 年，世界主要经济体继续围绕海洋技术展开布局，加大海洋防务装备、极地、深海、高技术船舶等领域的技术研发力度，相关领域呈现出稳步发展趋势，同时部分关键装备与技术取得重大进展。

1.重要趋势

(1)世界主要国家持续推进海洋防务装备研建进程，谋求全面

提升海军实力。在航母方面，美国加速推进“福特”级(Gerald R. Ford)核动力航母的实战化应用进程；俄罗斯稳步推进“库兹涅佐夫海军元帅”号(Admiral Kuznetsov)航母的维修工作；印度正式接收首艘国产航母“维克兰特”号(Vikrant)；法国进一步完善新一代核动力航母技术细节。在潜艇方面，美国加快核潜艇研建步伐，下水或服役多艘核潜艇；俄罗斯推出新一代战略核潜艇设计概念，并开启核潜艇新型隐身技术的研发工作。在水面舰艇方面，美国为“阿利·伯克”级(Arleigh Burke)驱逐舰配备首套高能激光武器，并计划为“朱姆沃尔特”级(Zumwalt)驱逐舰配备高超声速武器；俄罗斯积极推进“纳希莫夫海军上将”号(Admiral Nakhimov)核动力巡洋舰等多艘海军主战舰艇的现代化升级工作。

(2)无人水面艇首次应用于大规模实战。2022 年，在俄乌冲突中，乌克兰使用无人水面艇袭击了驻扎在克里米亚地区塞瓦斯托波尔军港(Sevastopol)的俄罗斯黑海舰队。随着无人技术的快速发展，无人水面艇实战化能力逐步显现，其对主力舰艇的“非对称威胁”或已成为现实。与主力舰艇相比，无人水面艇建造周期短、成本低、隐蔽性好，可大量密集地部署于关键海域，形成类似“蜂群”无人机的水面“鱼群”作战力量，对主力舰艇进行饱和攻击。未来，随着无人水面艇自动化程度和协同作战能力的不断提升，其对主力舰艇构成的“非对称威胁”也将越发显著。

(3)世界主要国家加强北极谋篇布局，全方位提升北极事务参与度。在战略规划制定方面，美国发布新版《北极地区国家战略》(National Strategy for the Arctic Region)，阐明未来 10 年北极主要任务目标；法国发布《平衡极端：法国至 2030 年的极地战略》(Equilibrium in Extremes: France's 2030 Polar Strategy)，为南北极设定了到 2030 年前的地缘政治和环境目标；印度发布《印度与北极：建立可持续发展伙伴关系》(India's Arctic Policy: Building a Partnership for Sustainable Development)文件，明确了印度北极战略的六大目标。在军事能力建设方面，美国联合北约盟友举行了“冰原行动 2022”(Ice Exercise 2022)、“北极边缘 2022”(Arctic Edge 2022)、“寒冷反应 2022”(Cold Response 2022)等大规模北极军演；俄罗斯举行了多场北极防空、反潜演习，并测试了包括“匕首”高超声速导弹在内的多型先进武器。在北极装备研建方面，美国军方测试了商业卫星应用于军事通信的可能性，以增强北极通信能力；俄罗斯研建的 22220 型核动力破冰船“西伯利亚”号(Sibir)正式服役，可进一步提升北极航道的通航能力；加拿大政府开展北极监视项目，以升级北方预警系统(The North Warning System)并研发远程通信和超视距雷达系统。

(4)主要造船国家加大高技术船舶产业发展资金投入，进一步构建产业链优势。英国政府投入 2.06 亿英镑研发绿色船舶技术，并支持绿色航运技术创新企业发展，目的是在中国、日

本、韩国主导的造船市场中取得竞争优势。德国政府计划每年投入数千万欧元发展绿色船舶产业并支持造船业数字化转型，进一步提升德国绿色船舶在国际竞争中的创新能力。日本商船三井公司(Mitsui O. S. K. Lines, MOL)计划未来 3 年投入 17 亿美元助力航运业脱碳，并计划到 2035 年将绿色船舶数量扩大到 110 艘，使温室气体排放量较 2019 年降低 45%。韩国政府计划未来 10 年投入 2 亿美元开发以氢、氨为基础的零碳动力核心技术，为韩国主导全球绿色船舶市场提供重要技术支撑。

2.重大进展

(1)美国海军定向能武器研发取得重大进展。定向能武器是利用高能射束杀伤目标的新一代武器，主要包括高能激光、高功率微波和高能粒子束等类型。美国海军长期以来致力于定向能武器的研发，2022 年相关研究有所进展，尤其是高能激光武器和高功率微波武器的实用化进程取得进展。2022 年，美国洛克希德·马丁公司向美国海军交付高能激光武器系统(High Energy Laser with Integrated Optical-Dazzler and Surveillance, HELIOS)，该系统是第二款可集成到现有舰艇的战术激光武器系统，将极大提升美国海军的防空反导能力。此外，美国海军新一代微波武器——高功率微波武器(The High-Power Microwave, HPM)完成测试，未来或将集成到航母系统上对重要战略目标进行电磁打击。

(2)海上无人装备研建与部署取得阶段性进展。在无人潜航器方面，美国重点推进“虎鲸”(Orca)超大型无人潜航器的技术验证工作，并举行“国际海上演习 2022”(International Maritime Exercise 2022)等多场大规模海上无人系统演习，演示验证了多款先进无人装备；俄罗斯接收用于搭载“波塞冬”(Poseidon)核动力无人潜航器的潜艇，并持续推进相关装备的实战化应用进程；加拿大着手研建“海狼”(Seawolf)超大型无人潜航器。在无人水面艇方面，美国启动远征高速运输船自主性能验证、大型无人水面舰艇概念设计等前沿无人水面艇研发项目，并成立首支水面无人舰队，聚焦无人水面艇的战力生成；土耳其成功完成首次无人水面艇集群作战试验，并持续推进“乌拉克”(ULAQ)无人水面艇的技术升级工作；澳大利亚开展无人水面艇系统集成项目，寻求提升无人水面艇的任务执行能力。

(3)美国、欧洲推出多款新型深海装备，深海开发能力进一步提升。美国安杜里尔工业公司(Anduril Industries)研发出一款最大潜深为 6000 米的无人潜航器，可执行深海探测任务；美国伍兹霍尔海洋研究所(Woods Hole Oceanographic Institution, WHOI)研发出适用于无人潜水器的新型气体传感器，可用于探测和跟踪海底甲烷气体资源。英国国家海洋学中心(National Oceanography Centre, NOC)研发出一款新型传感器，可对各种海洋生物的地球化学参数进行实时高质量分

析。该中心还完成了多型无人装备、传感器与控制软件的深海测试工作。德国基尔亥姆霍兹海洋研究中心(Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel, GEOMAR)牵头研发出新型深海燃料电池，可大幅提升深海装备的续航能力。法国 iXblue 公司研发出专用于深海自主潜水器的合成孔径声呐，可提升法国海底测绘能力；法国发布深海新战略，聚焦深海装备技术发展，以维护其深海资源利益。(4)美国、欧洲、日本、韩国围绕高技术船舶展开技术攻关，并取得重要进展。在绿色船舶领域，美国开发出全球首艘采用甲醇制氢发电技术动力的拖船;欧洲 BEH2YDRO 公司推出 100%氢燃料大功率船用发动机。在智能船舶领域，由日本财团(Nippon Foundation)支持的“MEGURI 2040”智能船舶项目完成 6 个不同船型的实船测试，向 2025 年实现智能船舶商业化目标迈进了一步。在特种船舶领域，韩国现代重工交付了双燃料动力超大型液化石油气运输船(Liquefied Petroleum Gas, LPG)，该船是韩国首艘可以同时使用 LPG 和船用重、轻质油的船舶；日本川崎汽船(K Line)推出新型浮式液化天然气生产储卸装置(Floating Liquid Natural Gas, FLNG)设计概念，该设计通过重复使用现有液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG)船的 LNG 储罐，可使全球能建造 FLNG 的潜在船厂数量增加。

第二章 世界信息技术发展报告

2022 年，全球信息技术与产业保持高速发展，同时，各国开始突出强调安全和发展的双重重要性。一方面，信息化进入加快数字化发展、建设数字化社会的新阶段，技术进步、产业扩张仍是数字经济发展的主旋律。美国、欧洲分别出台芯片法案，鼓励半导体研发与扩产；超级对话人工智能模型 ChatGPT 走红，人工智能大模型在生成式人工智能领域落地应用；高频通信技术成果涌现，全球 6G 研发与合作进一步展开；量子计算与量子通信日趋实用化，商业化运行雏形初显；数字资产在推动金融创新、激发市场活力中发挥重要作用。另一方面，技术进步不可避免地对经济社会和国际关系产生负面溢出效应，数字空间成为国家利益的交汇点和国家冲突新的策源地，大国围绕信息和网络安全的博弈日趋激烈，各国对全球产业链供应链关注的重心从“效率”转向“安全”。在此背景下，安全成为数字经济稳健发展的压舱石，各国越发重视科技治理，加码网络安全、数据安全、人工智能和数字金融等方面的监管。在世界各国相继出台的各类法案、政策中，无一不将网络与信息安全置于战略地位。

一、世界信息技术及产业发展重要动向

2022 年，俄乌冲突、大国博弈、新冠疫情冲击加速百年变局的演进。国际格局激烈动荡加剧了国家间的竞争，信息技术作为新一轮科技革命和产业变革的关键力量，已成为世界主要经济体争夺的高地。人工智能、半导体、量子信息技术、通信、高性能计算等高新技术的不断进步，不仅推动着科技创新和产业升级，也为人类社会的创新发展注入了持续的动力。这些技术的广泛应用，将变革生产生活方式，促进人类社会繁荣发展。信息技术的持续创新，将成为促进经济社会发展、推动社会进步、增进人类福祉的重要力量。

（一）半导体技术水平持续进步，行业内部开始新一轮调整

半导体产业是 21 世纪人类科技领域的皇冠，其中芯片产业更是被誉为“皇冠上的明珠”。半导体产业的发展关乎汽车、消费电子乃至国防军工等行业的兴衰。2022 年，技术领域越发成为各国战略竞争的“角斗场”，促使半导体行业发生重要的变化。美国、欧盟等经济体出台刺激性法案促进行业增长；先进制程技术持续发展，延续“摩尔定律”；先进封装工艺热度高涨，推动半导体后道工艺价值链升级。半导体产业整体蓬勃发展，但不同类型半导体供需关系出现两极分化：

车用半导体供应持续紧张，厂商营收稳定增长；消费电子需求疲软，头部企业营收滑坡。不过，长期来看，先进技术进步和市场自我调节将不断推动行业在调整中发展。

1.全球主要经济体加强半导体技术能力建设，推动厂商扩产

为应对新一轮产业与技术竞争，提高国家和地区科技实力，全球主要经济体加大对半导体行业的补贴与投入，强化半导体行业的引领作用。美国为巩固半导体产业优势地位、加强自身能力建设，补贴本土研发制造并推进盟国合作。美国总统拜登正式签署《芯片与科学法案》，拨款 527 亿美元用于芯片生产与研发创新，并授权对美国本土芯片产业提供巨额补贴和减税优惠。同时，美国主导组建由日本、韩国与中国台湾地区共同参与的“芯片四方联盟”，加强对全球半导体供应链的控制。欧盟公布《欧洲芯片法案》，提供 430 亿欧元补贴以增进欧洲芯片产能。该法案通过制定欧洲芯片计划、设立芯片基金等方式，全面提升欧盟在芯片研发、设计、生产、封装等关键环节的能力，同时呼吁欧盟各成员国之间建立完善的芯片供应链预警机制，以降低芯片供应短缺的风险。日本政府加大对半导体企业的补贴，以重振半导体产业：为台积电设在日本的晶圆厂建设补贴 4760 亿日元（约合 37.1 亿美元）；补贴日本铠侠公司(KIOXIA)和美国西部数据公司(Western Digital)的合资企业 929 亿日元（约合 7.09 亿美元），用于提高该合资公司在日本工厂的闪存芯片产量；为美国美

光公司(Micron)广岛工厂补贴 465 亿日元（约合 3.2 亿美元），支持其扩大产能。

在各国政府的推动下，全球厂商扩大研发与生产规模。日本索尼公司在熊本市投资数千亿日元建设半导体工厂，拟于 2025 年投产；美国思科公司(Cisco)宣布获得欧盟补贴，将在西班牙巴塞罗那设立新的芯片设计中心；中国台积电在美国的首家工厂举办移机仪式，预计将于 2024 年开始生产 4 纳米制程芯片、2026 年开始生产 3 纳米制程芯片，建成后年营收将达 100 亿美元，终端产品价值超过 400 亿美元。

2.先进制程技术持续发展，先进封装技术崭露头角

先进制程仍在进一步发展，但随着尺寸微缩进一步逼近物理极限，研发进度有所放缓。台积电、三星等企业进军 3 纳米及以下制程，挑战物理极限。2022 年 6 月，韩国三星公司首次基于全环绕栅极晶体管技术正式量产 3 纳米制程工艺芯片，成为全球首家量产 3 纳米芯片的代工厂。与 5 纳米芯片相比，3 纳米芯片的性能提高了 23%、功耗降低了 45%、芯片面积减少了 16%。2022 年 8 月，日本丰田汽车、索尼、NTT 等公司成立高端芯片公司 Rapidus，与美国 IBM 公司合作开发用于人工智能与超级计算机的 2 纳米芯片，拟于 2025 年投产。2022 年 12 月，台积电在其晶圆 18 厂正式启动 3 纳米制程芯片的商业化量产，且良品率与 5 纳米量产同期相当。台积电称，2 纳米制程技术最早将于 2025 年在新竹与中部科学园区

工厂量产。

先进封装技术在 2022 年迎来爆发，以小芯片互连(Chiplet)、3D 封装、背面布线技术等为代表的先进封装技术有望提高芯片的集成度，促进设备小型化与性能提高。先进封装工艺提高了半导体后道工艺的附加值，将带动芯片测试技术升级，推动组装与封装供应链逐渐融合，促使设备转向专业化、自动化。预计到 2024 年先进封装市场产值将达到 482 亿美元，占封装市场总产值的 50%。主要国家与地区持续关注这一新兴领域，展开激烈竞争。2022 年 3 月，英特尔、微软(Microsoft)和台积电等头部企业宣布成立小芯片互连(Universal Chiplet Interconnect Express, UCIe)联盟，以建立小芯片生态系统、制定行业规范，这将有助于行业厂商实现高性能、低功耗的芯片设计。2022 年 6 月，美国安全与新兴技术中心(Center for Security and Emerging Technology, CSET)发布《先进半导体封装回流——维护美国半导体工业创新、供应链安全和领先地位》(Re-Shoring Advanced Semiductor Packing-Innovation, Supply Chain Security, and U. S. Leadership in the Semiconductor Industry)报告，建言美国政府大力加强先进封装技术研究与产业化。2022 年 6 月，英特尔公司开发出新型全集成电压控制器，可有效改善芯片 3D 封装，优化小芯片互连设计。2022 年 10 月，日本东京工业大学研究团队设计出小芯片硅桥互连结构，通过精细的“微柱”实现芯片之间

的宽带通信，可有效降低芯片集成复杂度。2022 年 10 月，韩国三星公司提出使用背面供电网络技术(Backside Power Delivery Network, BSPDN)研发 2 纳米芯片，通过在芯片背面布置电源线的方式提高芯片的晶体管集成度与密度。2022 年 12 月，中国首个由集成电路企业和专家共同主导制定的《小芯片接口总线技术要求》团体标准正式通过中国电子工业标准化技术协会的审定并发布。这是中国首个原生小芯片技术标准，描述了中央处理器(Central Processing Unit, CPU)、图形处理器(Graphics Processing Unit, GPU)、人工智能芯片、网络处理器和网络交换芯片等应用场景的小芯片接口总线技术要求，包括总体概述、接口要求、链路层、适配层、物理层和封装要求等。

3.消费电子半导体下行周期初显，车用半导体结构性缺芯仍存

2022 年，芯片产能逐步恢复与扩张，然而受地缘冲突、新冠疫情反复等不确定因素影响，全球范围内通胀飙升、利率走高，导致消费者和企业收紧支出，对消费电子产品的需求急剧减弱，进而影响消费电子行业公司营收。美国英特尔、英伟达、超微半导体(Advanced Micro Devices, AMD)、美光等公司在 2022 年年中时下调财务预期。2022 年 10 月，韩国存储芯片制造商 SK 海力士公司(SK Hynix)警告称，存储芯片需求出现“前所未有”的恶化，表示拟将 2023 年的投资削减 50%

以上，并暂缓清州工厂的扩产投资。根据美国英特尔公司公布的财报，该公司 2022 年全年营收为 631 亿美元，与 2021 年的 790 亿美元相比下降 20%；全年净利润为 80 亿美元，与 2021 年的 199 亿美元相比下降 60%。美国苹果公司(Apple)发布的财报显示，该公司截至 2022 年 12 月 31 日的 2023 财年首季度收入为 1172 亿美元，同比下降 5%，并承认主要是受供应链和经济环境的影响。美国高通公司(Qualcomm)公布截至 2022 年 12 月 25 日的 2023 财年首季度财报显示，该季度营收为 94.63 亿美元，同比下降 12%；净利润为 22.35 亿美元，同比下降 34%。

与消费电子行业厂商不同，智能汽车、数据中心等需求逐渐回暖，芯片代工商及车用半导体制造商的收入实现逆势增长。2022 年，台积电、格芯(Global Foundries)和联华电子等公司发布的季度财务报表中均报告了营收增长，这得益于高性能计算和强劲的汽车与工业应用需求。德国车用半导体大厂英飞凌公司(Infineon)2022 财年（截至 2022 年 9 月 30 日）营收达 142.18 亿欧元，同比增长 29%；营业利润达 33.78 亿欧元，同比增长 63%。欧洲芯片制造商意法半导体(STMicroelectronics)2022 年营收达到 161.3 亿美元，同比增长 26.4%；营业利润达 44.39 亿美元，同比增长 83.5%。

随着先进制程产能的进一步释放，芯片代工商将实现营收继续增长。从生产端视角看，根据国际半导体产业协会

(Semiconductor Equipment and Materials International, SEMI)发布的《至 2025 年的 200 毫米晶圆厂展望报告》(200mm Fab Outlook Report to 2025)，预计从 2021 年至 2025 年，全球 200 毫米（8 英寸）晶圆厂产能有望提高 20%，超过每月 700 万片，从而缓解部分行业的供需失衡。同时，SEMI 还测算，2022 年全球晶圆厂设备支出同比增长约 20%，达到 1090 亿美元，2023 年则基本持平。这标志着在总体需求放缓的情况下，前端设备的投资也将趋于平稳，但依旧有很高的需求。

4.对中国的影响与启示

半导体行业是一个强周期性行业，特别是在不确定的外部冲击下，行业周期正在缩短。短期来看，供需关系变化影响了消费电子领域的芯片库存和价格。而长期来看，人工智能、电动汽车和云计算等行业对芯片的需求仍在提升；加上出于供应链安全的政治考虑，各国倾向于鼓励芯片本土生产。因此，主要国家、厂商规划的产能将在未来几年逐渐释放，主要国家处于设备更新的高峰期，会产生较多固定资产投资，从而带动经济增长。芯片技术的创新，也将促进科技行业繁荣发展。

自特朗普上台后，中国半导体行业持续面临美国的围追堵截，到拜登上台后打压力度更是只增不减。2022 年 10 月，美国商务部工业与安全局(Bureau of Industry and Security, BIS)发布一系列出口管制措施，通过扩大实体清单，对先进计算芯

片、超算和半导体生产设备等先进技术实施点对点封杀，以及禁止美国国籍人士参与中国半导体研发制造等方式，对中国半导体行业全面施压。美国政府正笼络国内外力量，提升精准制裁能力，从资本、原材料、人才、工具等源头入手实施系统性制裁，阻断中国获取创新要素的渠道。

就半导体行业而言，这一领域关键环节仍被美国企业控制。面对半导体产业光明的长期发展前景，以及破除外部发展阻碍的现实需求，中国应加强技术攻关、充分开展合作，以增强半导体产业韧性，加速产业高端化进程。中国先进半导体设计制造面临的主要困难在于软件、设备和工艺被封锁。一方面，中国应发力高端制造装备与元器件的开发，加大半导体相关技术的研发投入、技术攻关和生产应用，尽快实现材料、设备和芯片设计及软件的国产替代。其中，应把握先进封装工艺发展的契机，扩大研发及标准制定的优势，塑造竞争力。另一方面，坚决反对将科技问题政治化、武器化和意识形态化，继续致力于深度参与全球半导体产业链，共同推进全球半导体产业发展。

（二）人工智能大模型加速行业变革，传统场景应用风险不可小觑

2022 年，人工智能多模态预训练大模型迅速崛起，加速渗入传统场景，引导行业变革，正不断展现出可观的商业价值和

巨大的发展潜力。人工智能作为新一代产业变革的核心驱动力之一，其发展已从“大炼模型”逐步迈向“炼大模型”的阶段，同时也为相关行业注入了新的活力。但是，随着大模型在传统场景的加速部署，人工智能在落地应用过程中出现的数据、隐私、知识产权和技术伦理等风险和挑战，引发了政界、业界和学界的高度关注。

1.人工智能大模型快速崛起，多模态应用加速落地

2022 年，人工智能大模型技术迅猛发展，并迅速激发了市场热度，其背后所代表的是人工智能大模型进入了一个新的技术范式。同时，这也是第三波人工智能浪潮经过十几年发展之后一个非常重要的拐点。2022 年 4 月，美国谷歌公司发布大型语言模型 PaLM，该模型在语言和推理类的测评中超过了人类。2022 年 9 月，美国英伟达公司发布大型语言模型 NVIDIA NeMo，以帮助开发者定制人工智能应用程序，可用于内容生成、聊天机器人、蛋白质结构和生物分子特性预测等。2022 年 11 月，美国人工智能研究实验室 OpenAI 推出超级对话模型 ChatGPT，可完成代码开发、修改代码错误、翻译文献等一系列常见文本输出型任务。ChatGPT 一经推出，在两个月内就积累了 1 亿用户，并引发全球科技企业跟进研发。2022 年 12 月，美国 Meta 公司发布多模态人工智能框架 data2vec 2.0，可实现更快、更高效的视觉、语音和文本的自监督学习。作为算力驱动下典型的重大创新，人工智能大模

型被认为是“通用智能”的雏形，是探索实现普惠人工智能的重要途径之一。随着人工智能迈向多模态、自监督学习的大模型时代，人工智能部署也将朝着多场景化、规模化、融合化等高应用阶段方向发展。

人工智能大模型技术具有广阔的应用前景，不断推动人工智能部署迈入高应用阶段，同时也为传统产业带来深刻的变革。人工智能大模型有望演化为类似于电网的基础设施，赋能产业体系。未来，人工智能将从以参数量和数据集的规模为研发重点，转向深度融合应用场景，聚焦大模型产业化。

2.人工智能加速嵌入传统应用场景，潜在安全风险问题陡增

人工智能正在快速走向场景化、实用化，以人工智能大模型为代表的多模态人工智能技术更是在传统场景应用中迈入新阶段。人工智能应用场景的日趋广泛，使得潜在风险会随着应用深度的增加而不断扩大、加剧。2022 年 8 月，美国国家标准与技术研究院(NIST)发布了《人工智能风险管理框架》(Artificial Intelligence Risk Management Framework)草案，旨在提高将可信性考虑因素纳入人工智能产品、服务及系统的设计、开发、使用及评估各阶段的能力。NIST 同时指出，人工智能系统有可能会延续或加剧不公平的结果。目前，驱动人工智能系统行为的数据交互数学表示尚不完全可知，这使目前衡量风险和驾驭风险收益权衡的方法不足。而在人工智能技术的部署过程中，也已经暴露出数据垄断、隐私损害、偏

见和侵犯知识产权等风险。

3.对中国的影响与启示

中国人工智能产业在政策和技术的双重驱动下呈现出高速发展的态势，在一些领域不断取得重大进展，人工智能领域的技术创新能力位居世界前列。荷兰学术信息企业爱思唯尔(Elsevier)进行的一项调查显示，中国在人工智能研究论文领域已成为全球领导者，在数量和质量上都已超过了美国。然而，在国际竞争日益激烈和国际封锁日趋加剧的背景下，中国人工智能的产业发展面临前所未有的复杂形势。

当前，中国正面临着经济转型升级过程中的产业智能化机遇：在人工智能与经济社会的融合发展过程中，跨产业和跨学科技术元素的重组和融合趋势不断增强；多元技术元素在不同应用场景中的重组和融合，引发了一系列互补性创新和专用性技术体系积累；在产业智能化的背景下，人工智能大模型、区块链、5G 等技术加速融合和应用，正在掀起新一轮人工智能技术创新潮，特别是以 ChatGPT 等为代表的人工智能大模型智能体相继面世，人工智能大模型应用方兴未艾。

同时，全球人工智能产业环境正在发生深刻的变化，国际竞争进一步加剧，美西方国家对中国的技术封锁持续升级。这些变化正对中国人工智能产业发展产生深远影响。对此，中国应按算力、算法和数据三大核心要素对中国人工智能产业进行全谱摸排，切实抓住短板，找出堵点，精准施策，全面

掌握人工智能领域产业链分工上游位置的关键技术，确保政策、资本、人才、技术等创新要素的有效供给和产业聚集。中国要以系统思维加快构建自主可控和开放协作的人工智能产业生态，加速形成新的全球产业生态系统，提升人工智能产业国际竞争力。面临新的竞争格局，中国应加强顶层设计，施行包容审慎监管，优化人工智能产业发展环境，提高原始创新能力，突破核心技术的堵点、卡点，实现高水平科技自立自强。

（三）网络安全政策聚焦关键基础设施网络防御，“零信任”安全框架受到高度重视

随着数字化、网络化进程加快，5G、云计算、数据中心、人工智能、物联网、区块链等网络基础设施日益发展，经济社会数字化转型步伐持续加速，互联网及基于网络技术应用创造的网络空间已经与现实空间深度整合、“泛在”存在。同时，互联网技术及其应用已从最初单纯的“技术问题”不断演进为具有高度整体性与独立性的安全问题，关键数字基础设施、政府平台、工业控制系统和金融信息系统等成为网络攻击的重点目标。主要国家为应对当今网络安全面临的新变化和日益复杂的网络威胁环境，聚焦关键基础设施，积极进行网络防御，推动零信任安全架构部署。

1.全球各国聚焦关键基础设施网络防御，增强跨部门协作能

力

关键基础设施是经济社会运行的神经中枢，发挥着基础性、全局性、支撑性作用，因此保护关键基础设施也成为各国网络安全建设的重中之重。2022 年 3 月，美国《2022 年关键基础设施网络事件报告法案》(The Cyber Incident Reporting for Critical Infrastructure Act of 2022)正式生效，该法案要求关键基础设施相关公司在发生网络事件后必须向美国国土安全部(Department of Homeland Security, DHS)上报。2022 年 7 月，美国司法部(Department of Justice, DOJ)发布《2022—2026 年战略规划》(2022-2026 Strategic Plan)，旨在将提升美国网络安全和打击勒索软件作为保护美国国家安全的战略目标。2022 年 9 月，美国网络安全与基础设施安全局(CISA)发布《2023—2025 年战略规划》(2023-2025 Strategic Plan)，其中确定了网络防御、减少风险和增强韧性、业务协作、统一机构四个网络安全目标，以及确保 CISA 实施该战略规划的组织地位。2022 年 10 月 31 日至 11 月 1 日，美国、澳大利亚、日本等 37 个国家和地区在美国首都华盛顿共同召开第二届国际反勒索软件倡议(Counter-Ransomware Initiative, CRI)峰会。与会各方同意组建国际反勒索软件特别工作组(International Counter Ransomware Task Force, ICRTF)来打击勒索软件犯罪活动，进行信息和能力共享，以及在建立韧性、抗击非法金融活动等涉勒索软件威胁的所有要素上持续开

展联合行动和国际合作。2022 年 11 月，七国集团(Group of Seven, G7) 发布《七国集团外长声明》(G7 Foreign Ministers'Statement)，指出 G7 国家将加强在基础设施网络安全方面的配合与防御，共同打击混合威胁、外国信息操纵和干扰，阻止外国的恶意投资和收购等。

2.推动网络安全现代化建设，“零信任”安全框架受到各国重视

在网络攻击的数量和复杂性持续加剧，关键资产运营模式上云的背景下，零信任安全架构在风险管理中正发挥关键作用，受到各国重视。零信任是在云计算、大数据等新型网络技术发展背景下诞生的新型安全架构，以“永不信任，始终验证”为核心思想，一旦部署成功，将大幅提高网络防御能力与安全水平。2022 年 1 月，美国白宫发布《联邦零信任战略》(Federal Zero Trust Strategy)，要求美国政府在未来两年内逐步采用零信任架构，满足必要网络安全标准，实现零信任防护体系，抵御现有威胁并增强整个政府层面的网络防御能力。2022 年 11 月，欧盟理事会(Council of the European Union)通过《关于在欧盟全境实现高度统一网络安全措施的指令》(Directive on Measures for a High Common level of Cybersecurity across the Union, NIS2 Directive)，该指令将零信任作为其基本要求，旨在进一步提高公共和私营部门以及整个欧盟的网络安全、韧性及事件响应能力。2022 年 11 月，

美国国防部公布《零信任战略》(Zero Trust Strategy)，概述了2027 财年前美国国防部全面实施零信任架构的规划及推进路径。

3.对中国的影响与启示

在世界格局加剧动荡的大背景下，大国在网络空间话语权的竞争更加激烈，加强网络安全成为维护国家安全的重要基石。随着网络安全形势的复杂化，网络空间安全正从概念上的主权化阶段过渡到军事化和国家安全化背景下实质性的主权化阶段，这不仅加剧了各方在网络空间的博弈，而且正在重新塑造网络空间秩序的未来。

网络空间军事化进程加快，网络安全在国家战略中的重要性凸显。伴随着地缘政治竞争和大国博弈的加剧，网络空间军事化进程明显加快。在俄乌冲突中，网络战从暗处走向台前，俄乌双方均遭受不同程度的网络攻击，一些国家更是公开招募网络雇佣军，使非国家行为体深度参与到冲突之中。具有国家背景的黑客活动陆续“浮出水面”，黑客组织发起的攻击活动由原有的利益驱动转向综合了政治、经济、军事、宗教等多个因素的复杂性网络攻击，带来了更多威胁。

新一代技术创新应用所引发的潜在网络安全风险上升。伴随着传统互联网应用和服务逐步向云端转移，以人工智能、量子技术和 Web3.0 等为代表的新一代技术正在引领科技创新，成为维护国家网络安全的关键技术力量。然而，由于一些颠

覆性技术理论尚不完善或技术本身存在安全缺陷，在应用过程中很容易引发新的安全风险，特别是当其被应用于军事领域时，其所蕴含的巨大破坏力必然会对人类的生存和发展带来新威胁。

在当前网络安全形势复杂多变的时代背景下，网络安全成为国家安全中的重要一环，中国应全面统筹网络安全工作，助力网络强国建设。于内，为了有效防范网络攻击、保护网络信息安全，中国需要从全局的视野出发，采取一系列措施。首先，应在网络安全法律法规制定方面下大力气，建立健全相关法律体系，强化网络安全监管和执法力度；其次，应紧跟技术与应用发展新动向，不断加大对网络安全技术和人才的投入，切实提升网络防御和应对能力；最后，应加强网络安全基础设施建设，完善网络安全保障体系，加强网络安全监测和预警体系建设。于外，中国应加强国际合作，参与国际网络安全规范标准制定，合理借鉴他国有益经验与措施。

（四）量子技术热度与日俱增，抗量子加密算法呼之欲出

量子技术在前沿科技中的热度日渐提升，也不断曝光于公众视野。2022 年诺贝尔物理学奖颁发给法国科学家阿兰·阿斯佩(Alain Aspect)、美国科学家约翰·克劳泽(John Clauser)和奥地利科学家安东·蔡林格(Anton Zeilinger)，以表彰他们在纠缠光子实验、证伪贝尔不等式和开创量子信息科学方面作出

的贡献。这是国际科学界对量子信息科学的认可，也将鼓舞全球研究机构进一步深入探究。随着研究的不断深入，量子计算、量子通信和量子传感等技术将逐步实用化，为科学技术发展注入新的动能，也成为各国科技竞争的新焦点。

1.各国不断加大量子技术政策扶持力度并加强研发合作

尽管量子技术距离实际应用尚待时日，各国现阶段已予以充分重视，逐步加大量子技术研发投入，扶持技术创新。各国政府与科研机构在战略制定、研发合作方面动作频频。2022 年 2 月，美国白宫科技政策办公室(The White House Office of Science and Technology Policy, OSTP)发布《量子信息科学和技术劳动力发展国家战略规划》(The National Strategic Plan for Quantum Information Science and Technology Workforce Development)，旨在促进先进技术教育和推广，培养下一代量子信息科学人才。2022 年 2 月，以色列国防研究与发展理事会（The Directorate of Defense Research and Development，DDR&D）和以色列创新局(Israel Innovation Authority)宣布投资 6200 万美元建造该国第一台量子计算机。2022 年 3 月，加拿大宣布将通过加拿大自然科学和工程研究委员会(The Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada, NSERC)的合作研究和经验培训(Collaborative Research and Training Experience, CREATE)项目拨款和联盟拨款对量子技术领域投资 1.379 亿美元，以推进加拿大国家量子战略的实施。

2022 年 4 月，日本岸田内阁发布《量子未来社会展望》(Quantum Future Society Vision)，提出建设首台日本国产量子计算机，以及到 2030 年量子技术使用者达到 1000 万人的目标。2022 年 5 月，美国总统拜登签署《关于加强国家量子倡议咨询委员会的行政命令》(Executive Order on Enhancing the National Quantum Initiative Advisory Committee)，旨在通过加强美国国家量子倡议咨询委员会(The National Quantum Initiative Advisory Committee)的领导力，确保美国联邦机构及时、准确地获得量子技术相关信息，以促进尖端科学技术的进步。2022 年 5 月，美国、法国、日本、荷兰等 12 国在美国华盛顿举行了一次关于量子技术合作的圆桌会议，强调了国际合作的重要性，以加速发现、共享资源并共同应对全球挑战；后续，上述 12 国推出了“纠缠交换”(Entanglement Exchange)项目，为量子技术领域研究人员创造国际交流机会。2022 年 10 月，英国国内一流研究与教育机构成立 UKQuantum 联盟，旨在确保英国在量子技术领域的领先地位，并与英国政府合作制定量子战略。2022 年 10 月，美国与瑞士签署了一项关于促进量子技术创新的联合声明，将促进美国和瑞士在量子计算、量子网络和量子传感等领域的研究与应用。2022 年 12 月，荷兰、法国与德国 3 国政府的代表签署了一份有关量子技术合作的联合声明，旨在加强量子生态系统间的协同作用，并培育欧洲人才、吸引国际人才。

2.量子技术投资火热，融资金额屡创新高

各国与商业机构对量子技术的投资持续增长，助推行业发展。根据中国信息通信研究院发布的《量子信息技术发展与应用研究报告（2022 年）》，截至 2022 年 9 月，全球量子信息领域的国家级规划与投资已达 160 亿美元以上。2022 年，全球量子企业新增 77 笔融资，合计 21.29 亿美元，超过了 2020 年和 2021 年相关投资金额的总和。美国全球数据公司(GlobalData)数据显示，2021 年 8 月至 2022 年 8 月间，约有 11 亿美元的资金投资于量子计算初创企业，投资额同比增长 13.5%。美国国际数据公司(International Data Corporation, IDC)预计，到 2027 年年底，全球对量子计算领域的投资将达到近 164 亿美元，而全球客户用于量子计算的支出将增长到 86 亿美元。

量子计算企业在商业化融资方面表现亮眼。2022 年 3 月，美国量子计算机开发商 Rigetti Computing 公司在美国纳斯达克证券交易所(The Nasdaq Stock Market)上市。2022 年 3 月，瑞士量子技术公司 Terra Quantum 宣布其 A 轮融资金额增长至 7500 万美元，相关资金将用于加强该公司在数据加密和网络安全方面的产品研发投入。2022 年 7 月，芬兰超导量子计算公司 IQM 获得世界基金(World Fund)领投的 1.28 亿欧元 A2 轮融资，刷新了欧洲量子计算公司单笔融资金额纪录。2022 年 7 月，中国本源量子公司完成近 10 亿元 B 轮融资，相关

资金将用于国产工程化量子计算机、全栈式软硬件系统、量子计算应用的落地推广，以及进行相关上下游产业生态建设等方面。2022 年 11 月，加拿大光量子计算公司 Xanadu 在 C 轮融资中获得 1 亿美元资金，其估值达到 10 亿美元。

3.抗量子密码算法引起重视，美国发布首批算法

量子计算技术是一项革命性的计算技术，通过利用量子力学的特性来实现更快、更强大的计算。然而，这也对密码安全构成风险。量子计算机具有高效破解常规密码系统的能力，因此目前的密码机制可能需要重新设计，以防御量子计算机的攻击。为防范量子计算对经典密码学带来的冲击，美国大力推动抗量子密码学算法的开发与推广。2022 年 3 月，《麻省理工科技评论》(MIT Technology Review)期刊与阿布扎比技术创新研究所(Abu Dhabi's Technology Innovation Institute, TII)合作发布《现在起面对明天的量子黑客》(Facing Tomorrow's Quantum Hackers Today)研究报告，认为在量子计算足以破解现在的加密技术前，各国需要进一步加强网络安全，以防御未来的量子黑客。2022 年 5 月，美国总统拜登签署《关于促进美国在量子计算领域的领导地位，同时降低易受攻击的密码系统风险的国家安全备忘录》(National Security Memorandum on Promoting United States Leadership in Quantum Computing While Mitigating Risks to Vulnerable Cryptographic Systems)，概述了若干关键步骤，旨在保持美

国在量子信息科学方面的竞争优势，同时降低量子计算机对美国的网络、经济等国家安全领域的风险。2022 年 7 月，美国国家标准与技术研究院(NIST)发布首批 4 种抗量子密码学算法标准，分别为 CRYSTALS-Kyber、CRYSTALS-Dilithium、FALCON 和 SPHINCS+，主要有两大用途：一是通用加密，用于保护通过公共网络交换的信息；二是数字签名，用于身份认证。2022 年 8 月，美国网络安全与基础设施安全局(CISA)发布《为抗量子密码学的关键基础设施做准备》指南文件，旨在帮助美国的基础设施运营商尽早为抗量子密码安全做好准备。该文件介绍了量子计算及其对公钥密码学的潜在威胁，认为其可能影响电力、交通、管道输运、水处理和制造等国家关键功能(National Critical Functions, NCF)安全。2022 年 9 月，美国国家安全局(NSA)发布《商业国家安全算法套件 2.0》指南文件，以推动国家安全系统的管理者和运营商在 2035 年之前采用抗量子密码标准。

4.对中国的影响与启示

在量子技术这一研究领域，中国、美国、欧洲、日本等主要经济体的研究机构持续取得进展，竞争者少但竞争烈度高。在量子技术的研究中，理论物理、实验物理、控制工程、计算科学及数学等学科高度交叉，中国在开展相关研究时，亟须加强研究项目与研究资源的统筹与规划。未来，基础研究取得的更多突破性成果将促进量子信息科学的进一步实用

化。目前，美国、欧洲量子技术行业已有较多公司开展商业化运营，这有利于企业进一步发展，推动技术应用落地。中国也应加快量子技术行业公司的孵化与商业化运作，促进现有研究成果向市场转化。

同时，在量子技术快速发展时，也应预判相关风险。例如，一旦量子计算机性能大幅提升、实用化进程加速，将对经典密码系统带来颠覆性冲击。恶意行为者在当下或已窃取加密数据，待量子计算机实用化后再实施破解，就能获取大量有价值信息。美国已将抗量子密码标准加入国家安全备忘录，并构建了抗量子密码标准的雏形，计划在 2024 年全面发布抗量子密码标准、到 2035 年使政府和企业机构全面实施抗量子密码标准，相关举措使美国初步占据了抗量子密码的先发优势。同时，日本、韩国企业与研究机构受邀参与了美国抗量子密码学的研究，这表明日本、韩国认可并将采用美国的抗量子密码标准。未来，美国抗量子加密标准的全球推广很可能对未来密码安全体系产生颠覆性影响，革新全球网信安全体系。

现阶段，清华大学与山东大学等研究机构在抗量子密码学领域的研究水平处于世界前沿。为应对潜在的量子攻击风险，中国应强化前瞻研究，加强统筹布局、研发应用和风险应对，防范网络安全风险和关键技术“卡脖子”风险。中国应积极抢夺抗量子密码技术话语权，增进国际合作和标准推广。一

旦美国主导了抗量子密码的国际标准，中国将面临采用美国标准带来的网络安全风险、巨额专利费用，以及丧失国际话语权等问题。为此，中国应尽早推出自主的抗量子密码学标准，并大力推进国际合作和相关标准的推广。

尽管量子科技距离量子技术成熟仍有一大段距离，但中国要充分认识到推动量子技术发展的重要性和紧迫性，找准量子技术发展的切入点和突破口，加快国家实验室等战略科技力量建设，抢占量子技术制高点，培育发展新优势。

（五）先进计算赋能算力增长，呈现多元融合发展态势

先进计算作为在计算理论、计算架构、计算系统等方面产生的新兴技术的统称，是指利用最新的计算机技术、算法和软件工具，解决复杂问题和挑战的一种先进计算方法，具有先进性、泛在性和多样性。以先进计算为代表的新一代信息技术，正成为推动经济社会发展的新引擎，引发产业模式、运营模式和思维模式发生深刻变革。2022 年 2 月，美国白宫发布新版《关键和新兴技术清单》，涵盖先进计算等 14 个关键技术和 5 个新兴技术领域，旨在巩固其在算力领域的全球领导地位。目前，先进计算已成为世界大国间科技竞争与产业革命的主战场，是重大科技创新领域的必争之地。

1.先进计算赋能经济增长，数据处理器、类脑芯片成为算力增长新引擎

算力作为数字经济时代的关键生产力要素，已成为推动数字经济发展的核心支撑力和驱动力。随着数字经济的蓬勃发展，数字化新事物、新业态、新模式正推动应用场景向多元化发展，算力规模不断扩大，算力需求持续攀升。数据处理器(Data Processing Unit, DPU)、类脑芯片等先进计算新一代硬件的快速发展，大幅提升了计算效率，成为数字经济时代的算力增长新引擎。2022 年 3 月，美国能源部主导的橡树岭领先计算设施(Oak Ridge Leadership Computing Facility, OLCF)下首台 E 级（百亿亿级）超级计算机 Crusher 已上线试运行，相比于美国在 2013 年推出的 Titan 超算，Crusher 只用百分之一的体积就得到了更好的性能。国际数据公司、浪潮信息、清华大学全球产业研究院联合发布的《2021—2022 年全球计算力指数评估报告》显示，计算力指数平均每提高 1%，数字经济和地区生产总值将分别增长 3.5‰和 1.8‰，预计该趋势在 2025 年前将继续保持。欧盟、日本等经济体也正在开发 E 级超级计算机，推动算力进一步升级，为金融、生命科学、物理学、化学等领域的研究提供更强有力的支持。

2.先进计算不断优化升级，呈现多元融合态势

在数据爆发式增长与算力单点性能极限之间的矛盾日益突出的背景下，先进计算架构不断迭代，呈现出多元融合的新态势。信息产业面对海量数据、实时响应、泛在多元、绿色安全等场景的信息处理需求，正通过计算理论、器件、部件、

系统平台等多元融合性创新和颠覆性重构，形成更高算力、更高能效、更加多样、更加灵活的先进计算体系，以突破单点计算性能提升的瓶颈。2022 年 11 月，中国信通院发布《中国算力发展指数白皮书（2022 年）》，其中指出需求多元化正加速多样化算力升级，新型计算系统结构与系统、新型存储系统、领域专用软硬协同计算系统等成为创新热点方向，华为等企业推出多样性计算融合架构，大大降低了多样性算力的开发部署难度，提升了多样性算力的应用效能。未来，随着传统产业的智能化转型逐渐深入，先进计算技术将会围绕应用场景需求进一步下沉，产业智能化重塑与实体经济深度融合将是大势所趋。

3.对中国的影响与启示

先进计算已成为世界主要国家科技竞争的前沿领域，是重大科技创新领域的必争之地。先进计算核心技术是高效处理海量数据资源的关键。在数据已成为重要生产要素及国家基础性战略资源的情况下，大力发展先进计算技术，对加快经济社会发展、重塑产业竞争优势，具有重要的战略意义。全球主要国家不断深化先进计算的发展路径，纷纷加快战略布局进度。同时，发展以先进计算为核心的算力基础设施逐渐成为各国抢占产业主导权的重要手段。目前，中国先进计算产业正处于一个破除短板、厚植基础、蓄力爆发的阶段。鉴于此，中国应从国情、发展阶段和资源禀赋出发，综合借鉴其

他国家的有益经验，科学认识先进计算的发展趋势，积极加强技术创新体系建设，在“东数西算”工程和多元化数字场景的牵引下，大力推进计算产业生态构建，抢占全球先进计算产业制高点。

（六）各国加强加密市场监管，并探索数字资产创新

2022 年，数字资产市场激烈动荡、风云迭起。一方面，加密货币市场自身崩溃产生了金融风险新一轮强力监管。以比特币(Bitcoin)为例，其价格在 2022 年曾屡屡跌破 1.6 万美元/枚，较 2022 年高点 4.8 万美元/枚下跌了近 70%。根据欧洲加密市场分析公司 Glassnode 的分析，2022 年剧烈波动的加密货币价格使大量投资者被迫退出长期头寸。美国、欧洲监管机构警告了加密市场的风险，并加紧制定监管措施。在风险尚未消除、市场前景不明的情况下，加密货币市场此前百花齐放、市值节节攀升的繁荣景象短期内恐难再现。另一方面，全球各国洞察到央行数字货币、数字债券有望在提高金融服务便捷性、丰富支付手段等方面发挥重要作用，开始探索数字资产创新。

1.加密货币市场波动剧烈，滋生金融风险

加密货币市场风险频发，坐实了各国监管部门此前对数字资产风险的担忧。首先，加密货币投资的不确定性造成机构和个人投资者的巨大损失，其中不乏热门加密货币及交易所

“爆雷”。2022 年 5 月，算法稳定币 TerraUSD 崩盘，与其相关联的 Luna 代币价值暴跌 99%，给投资者带来了数十亿美元的损失。2022 年 11 月，总部位于加勒比地区巴哈马的全球第二大加密货币交易所 FTX 在没有预警的情况下宣布破产，导致 900 万客户求偿无门。FTX 创始人山姆·班克曼-弗莱德(Sam Bankman-Fried)也被美国检方以欺诈罪名起诉。在 FTX 破产事件中，三星、淡马锡投资(Temasek)等多家公司损失金额超过 20 亿美元，美国投资者的损失超过 110 亿美元。其次，2022 年全球加密货币犯罪活动也有所加剧。根据美国区块链分析公司 Chainalysis 的统计数据，2022 年全球加密货币犯罪事件涉案金额激增，达到创纪录的 201 亿美元。尽管加密货币交易量整体下降，但与非法活动相关的加密货币交易数额连续第二年上升。美国在 2022 年扩大了经济制裁的范围，这使与受制裁实体相关的交易数额在 2022 年增长了超过 10 万倍，占 2022 年非法交易活动的 44%。此外，Chainalysis 公司还指出，2022 年是加密黑客活动规模最大的一年，被盗加密货币金额达到 38 亿美元，同比增长 15.15%；去中心化金融(DeFi)协议成为黑客攻击的主要目标，被盗金额达 31 亿美元，占比为 82.1%。

2.全球各国出台数字资产监管框架，规制行业发展

为应对行业波动，降低风险及保障投资者权益，各国纷纷构建数字资产监管框架，压实发行方与交易平台的责任。2022

年，美国国会(United States Congress)举行了超过 15 场听证会，重点关注加密货币和区块链政策。2022 年 3 月，美国总统拜登签署了《关于确保负责任地开发数字资产的行政命令》(Executive Order on Ensuring Responsible Development of Digital Assets)，发布了一套加密货币监管的综合性方法，希望在加密货币带来的机遇及风险之间取得平衡。2022 年 6 月，美国参议院推出《负责任金融创新法案》(The Responsible Financial Innovation Act)，旨在解决加密货币监管的多个方面问题，如数字资产、稳定币和机构管辖权的税收处理。该法案明确了商品期货交易委员会(Commodity Futures Trading Commission, CFTC)对数字资产现货市场的监管领导地位。2022 年 7 月，欧盟理事会和欧洲议会(European Parliament)就《加密资产市场框架》(Markets in Crypto-Assets, MiCA)达成一致，首次将加密资产、加密资产发行人和加密资产服务提供商纳入监管框架。该框架预计于 2024 年正式实施，将加强对数字资产发行方和交易方的规制，要求其在授权下运营并为用户提供保障。2022 年 8 月，美国参议员约翰·布兹曼(John Boozman)提出《2022 年数字商品消费者保护法案》(The Digital Commodities Consumer Protection Act, DCCPA)，旨在为数字资产建立一个全面的监管框架。2022 年 9 月，美国白宫发布首个加密货币联邦监管框架，其内容包括金融服务行业应该如何发展以促进跨国交易，以及如何打击数字资产中的

欺诈行为等，旨在推进投资者/消费者保护、金融稳定、反非法金融、全球金融系统和经济竞争中的美国领导力、金融包容性及负责任创新等 6 个优先事项。

3.央行数字货币实用化加速，数字金融创新多样化

多国央行联合推进中央银行数字货币跨区测试，央行数字货币外汇交易实用化加速推进。2022 年 1 月，瑞士国家银行(Swiss National Bank)、瑞士信贷银行(Credit Suisse Group AG)、美国高盛公司(The Goldman Sachs Group)及花旗银行(Citibank)等共同进行了将央行数字货币整合到支付系统的测试，试验项目涵盖银行同业业务、跨境交易系统、银行间清算系统及核心银行系统等交易测试，为央行数字货币的跨机构、跨境交易奠定了基础。2022 年 9 月，中国“工农中建交”五大国有银行参与的数字人民币跨境支付结算项目——“货币桥”(m-CBDC-Bridge)正式落地。该平台首次成功完成了基于 4 个国家或地区央行数字货币的真实交易试点测试，来自 4 地的 20 家商业银行基于该平台为客户完成了以跨境贸易为主的多场景支付结算业务。2022 年 9 月，瑞典中央银行(Riksbank)、挪威银行(Noregs Bank)和以色列银行(Bank of Israel)与国际清算银行(Bank for International Settlements, BIS)启动了央行数字货币测试项目，以测试使用央行数字货币进行的国际零售和汇款支付。2022 年 10 月，环球银行金融电信协会(Society for Worldwide Interbank Financial Telecommunication, SWIFT)

与法兰西银行(Bank of France)、德意志联邦银行(German Federal Bank)、汇丰银行、渣打银行(Standard Chartered)、瑞银集团(United Bank of Switzerland, UBS)、富国银行（Wells Fargo&Company）等 14 家中央银行和全球性商业银行进行央行数字货币跨境支付试验，并制定了全球央行数字货币网络规划。2022 年 10 月，法国、新加坡和瑞士进行了跨区域的央行数字货币首次联合测试，使用自动做市商机制进行虚拟的欧元、新加坡元和瑞士法郎数字货币跨境交易，这是央行数字货币外汇交易的一项前瞻性探索。预计 2023 年世界主要经济体的央行数字货币跨区、跨国测试将进一步展开，以加快部署进度。除央行数字货币外，数字债券也崭露头角。2022 年 10 月，以色列特拉维夫证券交易所(Tel Aviv Stock Exchange, TASE)表示，以色列政府正准备使用区块链平台发行政府债券，从而降低成本、缩短政府债券的发行和清算期限，提高透明度并降低风险。2022 年 11 月，瑞银集团上市首只基于区块链的数字债券，并在 SIX 数字交易所(SIX Digital Exchange, SDX)发行。该债券是首个银行机构在数字交易所上市、交易和结算的债券，可以实时、自动结算，并且与普通债券具有相同的结构、法律地位和评级。

4.对中国的影响与启示

金融基础设施是现代金融体系的关键，每次技术变革都会推动金融基础设施产生巨大飞跃。其中，广泛采用的区块链技

术是一种分布式账本技术，与传统技术相比，具有防止篡改、易于审计、透明度高、可靠性强、智能合约可自动执行等优势，被认为是新一代金融市场基础设施的技术雏形。未来，全球数字资产生态将继续朝着“央行数字货币+实体经济数字资产化”方向发展，基于区块链技术的新型金融基础设施将成为发展的核心。目前，多国已开始重视并发力建设新型金融基础设施，以期能够获得先发优势。在全球数字资产生态建设的竞赛中，中国应加强数字资产生态顶层设计，提高包容性，有序推进新型金融基础设施试点，打造数字资产与实体经济深度融合的新样板。为此，中国应不断探索数字人民币的底层技术创新，丰富数字人民币的落地场景。

另外，2022 年下半年以来，针对各国金融系统的网络攻击有抬头之势。随着网络金融业务的不断创新和拓展，金融机构和金融市场基础设施变得日渐庞大，网络节点众多、分支复杂，存在多种异构网络环境和平台。这些技术特征都为网络攻击提供了更多可选择的攻击节点和路径，造成潜在的网络攻击风险。为筑牢中国金融系统的网络安全屏障，中国应不断完善金融网络安全管理制度、加强网络安全能力建设，设计出适用于金融机构的安全管理战略、人员组织架构、文化与意识、流程与机制、架构与技术五位一体的网络信息安全监管合规路径。

二、人工智能技术

人工智能是引领未来的新兴战略技术，是驱动新一轮科技革命和产业变革的重要力量。全球各大国不断升级人工智能战略，纷纷抢抓人工智能的发展机遇。2022 年，人工智能生成内容(AI Generated Content, AIGC)技术取得了突破性进展，人工智能从学习走向创造，展现出在推理、科学、数学和编程等方面的创造力。由此，AIGC 成功入选《科学》(Science)期刊 2022 年度科学十大突破。

（一）基础研究

近年来，人工智能在算法、算力和数据的共同驱动下，取得了飞速发展。但目前世界人工智能发展水平仍处于“弱人工智能”阶段，世界主要经济体在人工智能领域的竞争主要集中于人工智能底层基础算法的研究和推广应用。

1.美国 OpenAI 公司发布 DALL-E 2 和 ChatGPT 模型，性能表现优异

2022 年 4 月，美国人工智能研究公司 OpenAI 发布 DALL-E 2 程序，可基于文本描述生成图像。相较于前序版本 DALL-E，DALL-E 2 具有更高分辨率和更低延迟，精确度提高了 71.7%，写实度提高了 88.8%，分辨率更是达到了前序版本的 4 倍，还可结合概念、属性及风格打造更生动的图像。DALL-E 的第一版于 2021 年 1 月首次亮相，基于具有 1750 亿个参数的

GPT-3 模型开发而来，但它仅使用了 120 亿个参数。为防止伦理问题，OpenAI 为 DALL-E 作出了 3 条限制：一是阻止生成有害内容；二是防止滥用；三是分阶段向不同权限用户开放。2022 年 12 月，OpenAI 公司发布超级对话人工智能模型 ChatGPT，可执行对话、生成代码和写作等复杂文字内容生成任务。ChatGPT 为 OpenAI 的 GPT 3.5 代模型，属于 GPT-3 模型的衍生产品，性能表现优异。ChatGPT 的发布也将人工智能在人机对话领域的应用推向新高度。

2.美国谷歌公司发布文字转图像模型 Imagen，效果超过 DALL-E 2

2022 年 5 月，美国谷歌公司发布文字转图像模型 Imagen，并称其效果超过 OpenAI 公司发布的 DALL-E 2 模型。Imagen 首先会基于文本描述生成一个 64 像素×64 像素的小图像，然后对其进行两次超分辨率处理，进而使其达到 1024 像素×1024 像素，在此过程中，程序不断丰富图像的细节。谷歌公司称，其将现有的文本模型用于计算机绘图过程中的文本编码部分，改善这部分工作的质量所带来的收益高于单纯提高视觉保真度。同时，谷歌公司还使用包含偏见的数据库对 Imagen 进行测试，以测试该模型在真实环境中的表现。鉴于存在潜在的道德风险，谷歌公司决定暂时不向公众开放 Imagen。

3.美国宾夕法尼亚大学开发出超高速光子深度神经网络

2022 年 6 月，美国宾夕法尼亚大学研究人员开发出超高速光子深度神经网络，每秒可对近 20 亿张图像进行分类。研究人员指出，传统计算机中主要存在 4 个消耗运算时间的因素：光信号到电信号的转换、数据向二进制编码的转换、大内存模块及基于时序的计算。为此，研究人员使用 9.3 平方毫米芯片上的光学深度神经网络直接处理光学信号，通过多个神经元组成的深层网络来模拟人脑运行，这跳过了光电信号转换的步骤，且消除了缓存单元，因此提高了处理速度。此外，研究人员还可以通过添加更多神经层来“放大”深度网络，从而使芯片能够以更高分辨率读取更复杂图像中的数据。在未来的工作中，研究人员将检查这一神经网络的可拓展性及对三维物体的分类能力。

4.英国 DeepMind 公司开发新的深度学习系统，尝试让机器了解基本物理规则

2022 年 7 月，英国 DeepMind 公司开发出深度学习系统 PLATO。该系统能以类似婴儿的方式学习物理世界的基本常识性规则“直观物理”。“直观物理”是体现智力的基础，使人们能够与物理世界进行真实的接触，这也是人类所谓常识的关键组成部分。长久以来，让机器学习算法来学习“直观物理”非常困难，尽管这些系统已经在许多其他任务上表现出超越人类的能力，如学习识别不同的物体。研究团队通过给 PLATO 观看许多描绘简单场景的视频对其进行训练，PLATO 只经过

28 小时的训练就获得了部分“直观物理”知识。该研究发表于《自然·人类行为》(Nature Human Behaviour)期刊。

5.加拿大高校研发出新型因果推理人工智能算法，可有效降低性别偏见并保留语义信息

2022 年 9 月，加拿大阿尔伯塔大学(University of Alberta)研究人员研发出新型因果推理人工智能算法，可有效降低性别偏见并保留语义信息。通常，在人工合成的语料库上训练人工智能具有很强的性别偏见，导致在下游任务部署中产生偏见结果。此次，阿尔伯塔大学研究人员提出了一种利用因果推理框架有效消除性别偏见的新算法，能够构建和分析促进性别信息流动的复杂因果机制，同时在词嵌入工作中保留语义信息。未来，该研究有望促进劳动力市场应用人工智能技术，以减少性别和种族歧视。

6.美国麻省理工学院开发出光深度学习技术

2022 年 10 月，美国麻省理工学院(MIT)研究人员开发出光深度学习(Deep Learning with Light)技术，可降低设备数据传输延迟的影响。这种技术将运行机器学习模型的内存密集型步骤转移到中央服务器。在中央服务器上，机器学习模型的组件被一个采用硅光子学的智能收发器编码到光波上，并通过光纤连接到边缘设备，使大量数据能够通过该网络高速发送。然后，边缘设备接收端使用一个简单的光学设备——马赫-曾德尔调制器，用这些光波携带的模型部分快速执行计算。

与其他方法相比，该技术无须将用户的数据传输到中心位置进行计算，可将能源效率提高 100 倍以上，并能提高安全性。该技术有望提高网络末端设备的性能，促进人工智能的部署。研究人员将继续迭代优化智能收发器芯片并实现边缘装置接收端的微小型化。

7.英国 DeepMind 公司研究人员研发出新型人工智能算法，可高效解决矩阵乘法问题

2022 年 10 月，英国 DeepMind 公司研究人员研发出新型人工智能算法，可高效解决矩阵乘法问题。研究人员受游戏系统的启发构建了用于矩阵乘法的强化学习系统，并将选择有效矩阵乘法的算法作为奖励信号。实验表明，该系统能够学习影响矩阵乘法的要素，并创建自己的算法以提高计算矩阵乘法的效率。相关成果有望在高性能计算方面取得应用。

（二）模式识别

模式识别以计算机为工具、以数据为信息来源，通过各种形式的信息计算和处理，对各种现象、事物、状态等进行准确的分析、判断识别和归类。随着人工智能的发展，人工智能在模式识别领域的应用已成为主要趋势。

1.欧盟首次批准 X 光片分析 AI 工具 ChestLink

2022 年 4 月，欧盟批准首个 X 光片分析 AI 工具 ChestLink。该工具由 Oxipit 公司开发，可以在没有放射科医生监督的情

况下读取胸部 X 光片，并可自动发送检测结果为健康、无异常的报告。这是完全自主的医疗成像人工智能工具首次在欧盟获得批准。

2.日本东京大学开发出一种准确率更高的深度伪造检测方法

2022 年 5 月，日本东京大学(The University of Tokyo)开发出一种有效提升深度伪造检测的准确率的新方法。研究人员通过使用以独特方式创建的新型合成图像，即利用自混合图像来训练算法，将检测准确率提升 5%～12%。研究人员表示，目前这种检测方法在静态图像的检测上效果更好，在视频画面的检测上仍有较大提升空间。

3.英国格拉斯哥大学开发出使用人工智能识别视线外物体的增强技术

2022 年 6 月，英国格拉斯哥大学(University of Glasgow)研究人员开发出一种增强技术，使用人工智能分析人眼接受漫反射光线后产生的脑电信号，可识别视线外的物体。此前，研究人员将激光束射到表面上、拐角处并返回到相机传感器，然后使用算法对散射的返回光进行解码以识别物体。在最新的实验中，研究人员使用人眼代替相机传感器，并采集被试者的脑电信号，来识别墙壁拐角后的物体。经过约 1 分钟的分析测试，系统能够准确地重建每个物体。这是第一次通过在实时调整成像过程的神经反馈回路中使用人类视觉系统来执行计算成像的实验，有助于研究人员探索人类机能增强

的方法。

4.中国网易公司首次将人脸表情拓展至 135 种类别，可助力情感计算研究

2022 年 9 月，中国网易公司在全球范围内首次将人脸表情拓展至 135 种类别，这一拓展将大幅提升人工智能在情感计算中对人脸表情识别的精度。情感计算是一种能感知、识别和理解人类情感的技术，有助于计算机系统针对人类的情感作出智能、灵敏和友好的反应，人脸情感识别是其中的一个细分方向。网易公司的研究有助于人工智能更准确地识别人类情绪，有望应用于人机交互、艺术表演、医疗诊断和刑侦测谎等领域。该成果发表于电气与电子工程师协会(IEEE)旗下情感计算领域顶级期刊 IEEE Transactions on Affective Computing。

（三）复杂系统控制与智能信息处理

复杂系统控制与智能信息处理是一个复杂而又相互关联的技术网络，是自动化领域的重要组成部分。目前，人工智能技术正在推动复杂系统控制与智能信息处理向智能化方向加速演进，可快速提升系统的自主决策、信息处理和执行操作能力，从而赋能现实场景。

1.美国 DARPA 新项目拟在军事决策过程中引入人工智能技术

2022 年 4 月，美国 DARPA 启动 In the Moment 项目，以在军事决策过程中引入人工智能技术。该项目的提出背景是美国

军方希望依靠技术减少人为失误。DARPA 认为，去除决策过程中人的偏见，将可以“拯救生命”。DARPA 称，训练新的人工智能系统需要两年时间，再经过 18 个月准备后，新系统将会投入使用。

2.美国亚马逊公司开发出新语音技术，可伪造人声

2022 年 6 月，美国亚马逊公司高级副总裁罗赫特·普拉萨德(Rohit Prasad)称，亚马逊正在研发一个系统，可使其人工智能语音数字助理 Alexa 在听到任何时长不超过 1 分钟的音频后，就可模仿其中的人声。该技术在互联网上的演示引发了隐私和安全相关的热烈讨论——人们对于可能出现伪造声音的情况表示担忧，如使用伪造录音实施绑架诈骗等。

3.美国微软公司亚洲研究院开发出图像生成人工智能软件

2022 年 7 月，美国微软公司亚洲研究院开发出一款名为“女娲·无限版”(NUWA-Infinity)的人工智能图像生成软件。该软件在一种基于自回归的生成模型上开发而来，能够实现 5 种高清视觉任务，分别为：让图像动起来(Image Animation)、根据文本生成视频(Text-to-Video)、根据文本生成图像(Text-to-Image)、图像补全(Image Outpainting)和图像生成(Image Generation)。研究人员只需导入图片，或是输入一段文字，该软件就能进行更细致的拓展，最终生成一幅完整的高清图像，甚至是一段视频。

4.美国加利福尼亚大学洛杉矶分校开发出一种新型“可解释

人工智能”范式，可增强人机协作

2022 年 8 月，美国加利福尼亚大学洛杉矶分校(UCLA)等机构组成的研究团队开发出一种新型可解释人工智能(Explainable Artificial Intelligence, XAI)范式，其系统可向人类用户解释其决策过程，并能主动接受用户的反馈对决策进行调整。过去，可解释人工智能主要关注“被动机器-主动用户”范式，在这个范式中，用户对人工智能过程的理解和对其预期的信任不会影响人工智能未来的决策过程。UCLA 研究团队在可解释人工智能中引入“主动机器-主动用户”范式，意味着人类和机器人可以实现某种“价值一致性”，这也是第三代人工智能的“情景适应”特征。未来，该新型人工智能范式有望用于增强人机协作，包括机器人、智能助理和游戏辅助等。

5.美国陆军开发“智能自动化平台”以取代其 14 个老旧系统

2022 年 10 月，美国人工智能分析和网络工程解决方案提供商 BigBear.ai 表示，该公司正为美国陆军开发全球部队信息管理(Global Force Information Management, GFIM)系统的智能自动化平台，以取代其 14 个老旧系统。该项目建立在 BigBear.ai 之前成功交付的 GFIM 系统第一阶段的原型机之上，合同期为 9 个月，价值 1480 万美元。GFIM 系统旨在为美国陆军提供军队数据的“整体视图”，通过自动化流程提高风险感知和战场决策能力。

三、量子信息技术

量子信息技术是在物理学和计算机科学研究基础上发展而来的一门新兴学科，涉及量子信息及其应用的研究，可能彻底改变科学和技术的许多领域，包括计算、通信、密码学和传感。量子信息是一种基于量子力学原理的信息，包括量子态，如单个粒子的极化或自旋，以及多个粒子的纠缠。中国科学院院士薛其坤指出，在众多科技领域中，包括量子计算在内的第二代量子技术作为一种颠覆性技术，一旦实现实用化，有可能会引发一场新的工业技术革命。当下，世界正处于第二次量子技术革命的前夜，量子计算、量子通信和量子传感三大技术方向在国防、金融、大数据、生物制药等领域的巨大潜在应用价值，引起了主要世界科技强国和高科技公司的高度重视。

（一）量子计算

量子计算机具有超高的运算速率，有可能解决经典计算机无法在短时间内完成的运算任务，包括多体问题求解、解决优化问题和破解经典加密密码。这些应用有可能在医学、金融和人工智能等领域产生重大影响，以及带来科学和技术的新突破和新发现。

1.阿里巴巴达摩院成功研制两比特量子芯片，单比特操控精度超 99.97%

2022 年 3 月，中国阿里巴巴公司达摩院量子实验室成功研制出两比特量子芯片。达摩院量子实验室的报告显示，该团队基于新型 Fluxonium 超导量子比特成功设计制造的两比特量子处理器，实现了单比特操控精度超 99.97%，两比特 iSWAP 门操控精度最高达 99.72%，取得此类比特全球最佳水平，性能逼近业界主流的 Transmon 比特。目前，两个 Transmon 比特门操控精度最高可达 99.85%～99.87%，该纪录由美国麻省理工学院(MIT)和 IBM 公司创造。在另一个芯片制备的课题上，达摩院量子实验室制备的基于氮化钛的超导量子比特，在相干时长这一最关键的性能指标上，可复现地达到 300 微秒，达到世界一流水平。

2.加拿大 Xanadu 公司开发出可编程光量子计算机

2022 年 6 月，加拿大初创公司 Xanadu 开发出名为 Borealis 的光量子计算机。Borealis 计算机可以通过测量多达 216 个纠缠光子的行为来进行计算，在 36 微秒内完成高斯玻色取样任务。此外，Borealis 也是世界上第一台能够通过云向公众提供服务的具有量子优越性(Quantum Supremacy)的计算机。Xanadu 公司介绍，Borealis 是可以编程和扩展的，有助于解决下一代电池开发、药物发现、金融和物流等领域的复杂问题。

3.美国英伟达公司为经典-量子混合计算推出开发架构

2022 年 7 月，美国英伟达公司发布名为量子优化设备架构

(Quantum Optimized Device Architecture, QODA)的编程开发架构，旨在为经典-量子混合计算创建单一编程环境。该开发架构与英伟达为并行计算开发推出的统一计算设备架构(Compute Unified Device Architecture, CUDA)平台相似，但结合了更多量子专业知识，并致力于让更多软件开发人员可以轻松使用。英伟达的图形处理器技术将在量子电路仿真中发挥重要作用，因为图形处理器可以实现状态向量和张量网络方法，从而加速量子电路仿真。QODA 架构将拥有通用编程语言（如 C++和 Python）的接口，以及同时兼容量子与经典计算指令的编译器。预计经典-量子混合计算架构将在药物发现、化学、金融和工程优化领域发挥重要作用。

4.日本国家自然科学研究所开发出运算速度最快的双量子比特门

2022 年 8 月，日本国家自然科学研究所(National Institute of Natural Sciences, NINS)研究人员利用两个单原子成功开发出目前运算速度最快的双量子比特门。研究人员使用光学镊子将两个超冷铷原子以微米级间隔排列，并使用特殊的激光操纵原子 10 皮秒，观察其发生的变化。分别被困在两个相邻原子最小轨道中的两个电子被撞入里德堡轨道。随后，这些铷原子间的相互作用导致轨道形状和电子能量的周期性来回交换，周期为 6.5 纳秒。在一次振荡后，量子物理定律决定了波函数的符号被翻转，从而实现了双量子比特门功能。

该研究有望促进冷原子量子硬件的开发。

5.全球量子计算专利百强公布，美国上榜公司占比达 40%

2022 年 10 月，中国知识产权服务商 IPRdaily 公布全球量子计算专利百强名单。该榜单对截至 2022 年 10 月 18 日在全球公开的量子计算领域发明专利申请数量进行统计排名。本排行榜中量子计算技术领域限制在量子计算处理系统及方法、量子线路的运行方法及装置、量子态层析方法及装置、量子程序的转化方法及装置、量子逻辑门的操作优化方法、超导量子处理器及量子测控等技术领域，未包含量子密钥加密、抗量子密码等技术领域。入榜前 100 名的企业主要来自 18 个国家和地区，美国占比达 40%，中国占比达 15%，日本占比达 11%。其中，美国 IBM 公司以 1323 件专利位列第一，谷歌和加拿大 D-Wave 公司分别以 762 件和 501 件专利排名第二位和第三位。本源量子、百度网讯、浪潮、腾讯科技、华为、阿里巴巴等 15 家中国企业入围。

6.美国 IBM 公司发布具有 433 个量子比特的量子计算机

2022 年 11 月，美国 IBM 公司发布具有 433 个量子比特的量子计算机 Osprey，其量子比特数是 2021 年推出的 127 量子比特的 Eagle 量子计算机的 3 倍以上。同时，IBM 高级副总裁达里奥·吉尔(Dario Gil)表示，IBM 将在此基础上继续扩大规模，最终推出拥有数百万个量子比特的量子系统。

（二）量子通信

2022 年，量子通信研究继续朝着远距离、高效率、高容量的方向发展，不断在传输速率、时延、传输距离、保真度等指标上再创新高。当前，量子通信技术接连取得新进展和新突破，潜在应用进一步扩展，有望深度变革全球通信方式。

1.中国高校研究人员实现高效率量子纠缠提纯，可用于量子通信

2022 年 1 月，中国科学技术大学与南京邮电大学联合研究团队首次在实验室中实现了确定的纠缠纯化。研究人员首先在实验室制备了空间-极化超纠缠，随后在极化纠缠上加上噪声，再经纯化操作后，将极化纠缠的保真度从 0.268 提高到 0.989。此次采用的新方法，仅需要一对超纠缠，即可实现纯化。从理论上估算，新方法的纯化效率可提高 10 亿倍，这对于提高量子中继速度十分有利，能为未来高效率量子中继实现长距离量子通信提供技术支撑。

2.中国清华大学打破量子安全直接通信距离纪录

2022 年 4 月，清华大学物理系龙桂鲁教授团队和电子系陆建华教授团队进行合作，首次实现通信距离达到 100 千米的相位量子态与时间戳量子态相混合编码的量子直接通信系统。这套新系统可以在 50 兆赫激光脉冲频率下，将最大可容忍损耗从 5.1 分贝提升到 18.4 分贝，在商用低损耗单模光纤中，最远的通信距离达到了 102.2 千米，直接突破了此前 18 千米

的最长距离。尽管该系统的传输速率仅为 0.54 比特每秒，但足以发送信息和语音数据。研究人员还表示，该系统可以与现有的互联网基础设施部分兼容。

3.荷兰代尔夫特理工大学在非相邻节点间实现了量子比特隐形传态

2022 年 5 月，荷兰代尔夫特理工大学(Delft University of Technology, TUD)研究人员在非相邻节点间实现了量子比特隐形传态(Quantum Teleportation)。研究人员使用氮空穴系统(Nitrogen Vacancy System)，通过合成钻石中的极小空间来捕获电子，成功在 3 个节点之间传送数据，实现了多个站点之间通信的量子比特隐形传态。此前研究人员只能在 2 个节点间进行同类通信。这项研究的突破有望推动大规模量子互联网的研发。

4.奥地利研究人员在 248 千米的跨国光纤链路上实现连续纠缠分发

2022 年 10 月，奥地利维也纳量子光学与量子信息研究所(Institute for Quantum Optics and Quantum Information-Vienna, IQOQI-Vienna)研究人员成功在从奥地利到斯洛伐克的 248 千米跨国电信光纤中直接分发偏振纠缠的光子对，刷新了基于实用化光纤的纠缠分发的最长距离。该研究团队以高效、非局域的方式主动稳定偏振，使通信链路连续运行了 110 小时，实现了 75%的占空比，考虑到有限密

钥效应，总密钥长度为 258 千比特。

5.美国宾夕法尼亚大学开发出新型量子通信芯片，使量子信息空间翻倍

2022 年 11 月，美国宾夕法尼亚大学研究团队研发出新型微型激光芯片，其安全性和鲁棒性超过了现有的量子通信硬件。该研究团队通过超维自旋轨道微激光器生成高维量子位，来升级激光器的能力，能操纵并耦合轨道角动量和自旋，从而生成四能级系统。该技术可通过拥有多个能级的“量子电码”进行通信，使激光器的量子信息空间翻倍。相关研究成果发表在《自然》(Nature)期刊。

（三）量子传感

量子传感器利用量子系统的独特属性，如叠加和纠缠，实现更高的精度和灵敏度，在物理量测量方面提供了前所未有的精度和灵敏度，可在原子和分子尺度上进行精确测量。量子传感的特性在使其精密测量、导航、材料科学、环境监测等领域具有广泛的应用潜力。

1.美国陆军研发新型量子传感器，可探测跨波段电磁辐射

2022 年 6 月，美国陆军指挥、控制、通信、计算机、网络、情报、监视和侦察中心(Command, Control, Communications, Computers, Cyber, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance Center, C5ISR Center)宣布正在开发一种里德

堡量子传感器(Rydberg Quantum Sensor)。该量子传感器能够探测长波段、短波段和传统波段间的信号，可进一步提升士兵的战场通信、频谱感知和电子战能力。研究人员首先使用激光束在微波电路的正上方产生里德堡原子，利用里德堡原子暴露于不同电磁场时的不同反应，确定原子周围的电场，进而灵敏探测零频率至 20 千兆赫的射频频谱广泛信号。该型传感器已在实验中证实了能够在宽频率范围内连续工作，有望突破传统电子器件在灵敏度、带宽和频率范围方面的限制，为美国陆军在频谱感知、电子战等方面带来突破创新。

2.美国麻省理工学院开发出可检测任何频率电磁信号的量子传感器

2022 年 6 月，美国麻省理工学院研究人员开发了一种新系统，使量子传感器可以检测任何频率的电磁信号，同时不损失其测量纳米级特征的能力。研究团队将新系统称为“量子混合器”(Quantum Mixer)，使用一束微波向探测器注入第二个频率，将探测目标的频率转换为“原始频率和新增信号的频率之差”。这个简单的过程使检测器能够对任何所需的频率进行调整，而不会损失传感器的纳米级空间分辨率。

3.日本东京工业大学开发出可精准检测电池电量的钻石量子传感器

2022 年 9 月，日本东京工业大学开发出一种基于钻石的量子传感器，可使大电流工况下估测电池电量的模糊性下降到 1%。

通常情况下，电动汽车电池的电流可达到数百安培，而能够检测到这种电流的商用传感器无法测量毫安级别电流的微小变化，导致电动汽车在估测电池电量时约有10%的模糊性。东京工业大学研究人员使用两个钻石量子传感器制作了一个原型传感器，利用差分检测技术，消除了两个传感器检测到的共同噪声，只保留了实际信号，从而能在-50 安至 130 安的范围内检测到 10 毫安的小电流。该研究有望在提高电池使用效率、降低能耗方面发挥作用，延长电动汽车续航里程。

4.美国芝加哥大学将量子传感器性能提升 100 倍

2022 年 9 月，美国芝加哥大学(University of Chicago)研究人员开发出一种新方法，可将固态量子传感器的灵敏度提升 100 倍。通常，固态量子传感器依赖量子效应来执行检测，容易受到外界干扰，尤其是量子比特在光子爆发中释放的能量可能会引入噪声，影响传感器的灵敏度。芝加哥大学研究人员发现，如果让光子爆发这种超辐射衰变现象仅在有限的时间内发生，则可以使一半数量的量子比特保持完整，同时显著放大其中的信号。研究人员指出，将微波或机械谐振器与氮空穴(Nitrogen Vacancy)中心量子传感器中的量子位耦合，可在执行读出操作之前实现超辐射放大，这将大大增加设备的灵敏度。目前，研究人员正努力提高该方法的可拓展性。

5.法国科学家研制出可以开展三维测量的量子加速计

2022 年 10 月，法国国家科学研究中心(French National Centre for Scientific Research, CNRS)研制出一种可以开展三维测量的量子加速计。该三维加速计的外壳是一个长 40 厘米的金属盒，装有 3 个激光器和 1 个装满铷原子的小玻璃盒。为了测量运动的变化，研究人员调控 3 束激光分别沿盒子的长度、宽度和高度方向照射原子，迫使原子发生碰撞，产生波纹，波纹的性质取决于加速计的运动。通过分析波纹图案，量子加速计可以计算激光器的加速度。未来，该成果有望帮助船只在无全球定位系统(Global Positioning System, GPS)信号的情况下导航，也可用于更精确绘制地球内部的情况。

6.美国科罗拉多大学博尔德分校研究团队在量子传感领域取得新突破

2022 年 11 月，美国科罗拉多大学博尔德分校(University of Colorado Boulder)研究团队利用新模型在量子传感领域取得了重大进展。该研究团队利用一种实用化的光纤源模拟了马赫-曾德尔干涉仪的内部损耗、外部相位噪声及低效率，并从双模压缩真空中产生了 Holland-Burnett 纠缠态。该研究方法显著降低了内部损耗和相位噪声，并证明了基于量子的灵敏度方法的潜在增益。该研究对于基于光纤的量子增强遥感和光敏材料探测方面具有重要意义。相关研究发表在《光学快报》(Optics Express)期刊。

四、电子信息技术

电子信息技术是现代信息技术的底层支持技术，在长期的发展过程中对计算、通信等技术的发展提供了重要支持。元器件和架构的不断创新推动各类实用设备的研发，以此开发的计算机、人工智能、机器人等技术正在彻底变革医疗保健、运输和制造等行业，并有助于提升流程效率；高速互联网和移动设备的可用性使人们能够随时随地访问丰富的信息，提升沟通与协作的效率，促进社会和文化交流。

（一）微电子技术

微电子技术在许多现代技术的发展和进步中起着至关重要的作用。这种技术旨在将电子元件和电路集成到小芯片或微处理器上，可用于各种设备和系统。将多个组件和电路集成到单个芯片上的能力大大提高了电子系统的性能和可靠性，同时还减小了系统的尺寸、重量和成本，且提高了性能和效率。这使复杂和精密系统的发展成为可能，不断拓展与丰富各类军事和民用信息系统的应用场景。

1.精细制程芯片

2022 年，韩国三星电子和中国台积电实现了 3 纳米制程工艺芯片量产，2 纳米制程工艺芯片也在加紧开发中。芯片制程的不断微缩使设备的运算性能和效率不断提升，且体积更小，有望在数据中心、消费电子、人工智能等行业场景中发挥更

大作用。

1）中国台积电发布 2 纳米制程工艺细节

台积电在北美技术论坛上公布其未来先进制程路线图，拟于 2025 年量产 2 纳米制程芯片。为此，台积电将于 2024 年引入荷兰阿斯麦公司(ASML)最先进、最新的高数值孔径极紫外光刻机，用于量产 2 纳米制程芯片。台积电的 2 纳米制程工艺将采用全环绕栅极场效应晶体管(Gate-All-Around Field Effect Transistors, GAAFET)架构。在相同功耗下，2 纳米芯片性能速度较 3 纳米提高 10%～15%；在相同速度下，功耗降低 25%～30%。台积电表示，2 纳米制程工艺平台将涵盖高效能版本及完备的小芯片整合解决方案。预计商用 2 纳米芯片将在 2025 年年底或 2026 年上市。

2）美国英特尔公司称 2030 年芯片晶体管密度将达到目前的 10 倍

2022 年 8 月，美国英特尔公司首席执行官帕特·基辛格(Pat Gelsinger)出席 Hotchips 2022 会议，就未来芯片技术进行展望。基辛格指出，先进封装技术将推动摩尔定律发展，将发展出先进的基于小芯片(Chiplet-Based)的系统封装模式(System on Package, SoP)，其内涵是芯片制造厂不再仅提供单一的晶圆生产，而是提供完整的系统级服务，包括晶圆生产、先进封装及整合在一起的软件技术等。基辛格指出，目前的芯片最多有约 1000 亿晶体管，而随着 SoP 技术的发展，到 2030 年，

芯片的密度将提升到 1 万亿晶体管，是目前的 10 倍。为实现这一目标，英特尔将会在 2024 年量产的 20A 工艺上放弃鳍式场效应晶体管(FinFET)技术，转向带状晶体管(RibbonFET)及 PowerVia 等下一代技术。PowerVia 是英特尔独有的、业界首个背面电能传输网络，通过消除晶圆正面供电布线需求来优化信号传输。

3）韩国三星电子率先实现 3 纳米制程芯片量产

2022 年 5 月，韩国三星电子宣布正式开始量产基于全环绕栅极晶体管(GAAFET)架构的 3 纳米芯片，成为全球首家量产 3 纳米芯片的公司。韩国三星电子表示，与 5 纳米芯片相比，3 纳米芯片的性能提高了 23%、功耗降低了 45%、芯片面积减少了 16%。该公司将于 2023 年推出第二代 3 纳米芯片，其功耗将降低 50%、性能将提升 30%、芯片面积将减少 35%。

4）日本丰田、索尼等 8 家公司合资成立高端芯片公司，生产 2 纳米及以下制程芯片

2022 年 8 月，日本丰田汽车、索尼、日本电信电话、日本电气、电装(Denso)、软银(Softbank)、铠侠和三菱日联银行(Bank of Tokyo-Mitsubishi UFJ, MUFG Bank)8 家公司合资成立 Rapidus 高端芯片公司，将在日本国内生产用于超级计算机和人工智能的下一代半导体芯片。该公司将依靠日本与美国的合作关系，借助 IBM 公司的技术，力争到 2025 年试产 2 纳米芯片，2027 年实现 2 纳米及以下制程的芯片大规模量产。

日本新能源和工业技术开发机构(New Energy and Industrial Technology Development Organization, NEDO)已委托 Rapidus 参与 5G 通信先进半导体制造项目。

5）中国台积电正式量产 3 纳米制程工艺

2022 年 12 月，台积电在其晶圆 18 厂启动 3 纳米制程芯片的正式商业化量产。台积电晶圆 18 厂一期于 2018 年开工建设，此前主要生产 5 纳米制程芯片。随着 3 纳米芯片的商业化量产，未来台积电晶圆 18 厂将成为其先进制程工艺的主要生产基地。在 3 纳米制程工艺上，中国台积电和韩国三星电子采用不同的路线，韩国三星电子采用全环绕栅极晶体管(GAAFEET)架构，而中国台积电则是采用鳍式场效应晶体管(FinFET)架构。

2.特殊工艺

数据中心和人工智能对算力的需求激增，对计算设备效率及能耗提出更高要求。为此，全球主要公司与研究机构不断探索新的技术与工艺，在材料、电路设计、制造工艺等方面寻求新的突破，追求更优化的系统集成、更高的效率和更低的能耗。

1）三星发布全球首款基于磁阻随机存取内存的计算机

2022 年 1 月，韩国三星电子发布世界首款基于磁阻随机存取内存(Magnetoresistive Random Access Memory, MRAM)的计算机，有望用于人工智能运算。目前的计算机大多采用独立

的内存芯片及独立的硬盘存储。为了提高运算效率，业界一直在开发包括 MRAM 在内的各种非易失内存(Non-Volatile Memory, NVM)，兼顾硬盘和内存的功能，支持内存计算(Computing in Memory, CIM)新范式，同时有助于大幅降低功耗。为了实现这一目标，研究人员开发了阻抗随机存取内存(Resistive Random Access Memory, RRAM)、相变随机存取内存(Phase-Change Random Access Memory, PRAM)等非易失内存，而三星独辟蹊径开发出 MRAM 内存计算芯片原型。三星的 MRAM 具有高速、耐用、容易量产等优点。

2）俄罗斯研发 X 射线光刻机

2022 年 4 月，俄罗斯莫斯科电子技术学院(National Research University of Electronic Technology, MIET)承接俄罗斯联邦工业和贸易部(Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation)派发的 X 射线光刻机研制项目。俄罗斯政府将向该项目投入 6.7 亿卢布资金（约合 916 万美元）的首期资金，该项目研发的光刻机将达到极紫外光刻级别，但技术原理完全不同。X 射线光刻机是基于同步加速器或等离子体源的无掩模 X 射线光刻机，所使用的 X 射线波长介于 0.01 纳米到 10 纳米之间，比极紫外光还要短，因此其光刻分辨率要高于 EUV 光刻机。此外，X 射线光刻机相比 EUV 光刻机，不需要光掩模板就可直接进行光刻作业，成本更低。全球范围内，中国、美国和欧洲都有 X 射线光刻的相关研究，但尚没有能

达到规模量产的 X 射线光刻机。俄罗斯在 X 射线及等离子之类的技术上有着深厚的基础，因此具备一定研发实力。

3）日本东京大学开发出三维垂直场效应晶体管，将催生更小、更环保的数据存储器

2022 年 6 月，日本东京大学工业科学研究所(Institute of Industrial Science, the University of Tokyo)的研究人员开发了一种基于铁电和反铁电场效应晶体管的概念验证 3D 堆叠存储单元。这种晶体管可以非易失方式存储 1 和 0 数据，这意味着其不需要一直供电；垂直设备结构则增加了信息密度并降低了运算能源需求。此外，通过使用反铁电体代替铁电体，该存储单元只需要很小的净电荷就能擦除数据，提高了写入的效率。研究证实，该器件在至少 1000 个使用周期内都可保持稳定。研究人员称，新技术或将大幅改善非易失存储器，同时有助于开发下一代消费电子产品。

4）中美研究人员实现亚 0.5 纳米电介质与二维半导体集成

2022 年 10 月，中国北京大学和美国得克萨斯大学奥斯汀分校(University of Texas at Austin, UT Austin)联合研究团队实现了亚 0.5 纳米电介质与二维半导体集成。研究人员使用一种名为紫外线辅助插层氧化的工艺来合成硒-铋氧化物二维材料，使其拥有高介电常数、超平坦的晶格匹配界面和出色的绝缘性。经测试，这种材料的等效氧化物厚度低至 0.41 纳米时，其在 1 伏特栅极电压下的漏电流仍处于超低水平，满足

下一代晶体管电介质的工业要求。该新型材料有望用于开发二维晶体管中的超薄高介电常数栅极电介质，帮助实现晶体管的小型化。

3.先进封装

随着半导体前端制造节点变得越来越精细，设计成本快速增加，先进封装及其 2.5D 和 3D 解决方案应运而生，在降低前端制造成本方面变得至关重要且有效。同时，先进封装解决方案在数据传输方面有新的高性能协议，有助于提高系统性能并提供更低的延迟、更高的带宽和电源效率。

1）英特尔、微软和台积电等 IT 巨头成立小芯片互连联盟

2022 年 3 月，英特尔、AMD、高通、三星、台积电、Meta 和微软等行业巨头成立小芯片互连(UCIe)标准联盟。UCIe 标准推出的初衷是通过开源设计实现芯片互连标准化，从而降低成本，促进形成更广泛的验证芯片的生态系统。这种新的互连标准将实现小芯片之间的标准化连接。UCIe 标准的目标是像 USB 等其他连接标准一样普遍和通用，同时为小芯片连接提供卓越的功率和性能指标，将覆盖 X86 和 ARM 生态。

2）英特尔 3D 封装技术取得新进展

2022 年 6 月，英特尔公司在封装设计中开发了一种嵌入式电感的全集成稳压器(Fully Integrated Voltage Regulators, FIVR)，用于控制芯片在 3D 硅通孔(3D Through Silicon Via, 3D-TSV)堆叠系统中的功率。电压控制器对于 3D 封装至关重要，有助

于基于工作负载的最优流程节点实现小芯片封装。FIVR 在基于 22 纳米工艺的裸片上实现，采用三种硅通孔(Through Silicon Via, TSV)友好型电感结构，具有多重关于面积与效率的折中选项。

3）韩国三星电子成立半导体封装事业部，以加强与大型代工客户的合作

2022 年 7 月，韩国三星电子成立半导体封装事业部，旨在加强与封装领域的大型代工客户的合作。该部门由三星设备解决方案事业部的测试封装工程师、半导体研发中心成员，以及内存和代工部门的人员组成，将开发先进的封装解决方案，以加强与广大代工客户合作的决心。随着前端工艺的电路小型化工作达到极限，各大芯片制造商将在各种先进封装工艺上展开更激烈的竞争。目前，英特尔和台积电等半导体巨头都在该领域大举投资，尤其是 3D 封装和小芯片技术。

4）英特尔公司发表论文展示 UCIe 标准技术细节

2022 年 10 月，英特尔公司发布《小芯片互联：封装级小芯片创新的开放行业标准》(UCIe: An Open Industry Standard for Innovations with Chiplets at Package Level)，对小芯片互联标准的技术细节进行了介绍。UCIe 是一种开放的行业标准互连，为异构芯片提供了芯片封装内连接，以满足整个计算系统的需求，使设计者能对不同种类、不同厂商的芯片进行封装，以实现高性能、灵活性和互操作性的目标。该论文从小芯片

分层设计、物理层架构、标准封装通道设计、先进封装通道设计等方面介绍了技术细节，并对 UCIe 封装通道性能测试结果进行了分析，表明该标准具有高带宽、低延迟、高电源效率和高性价比的特性。

5）日本东京工业大学研究团队研发出一种新型芯片封装技术，可有效降低集成复杂度

2022 年 10 月，日本东京工业大学研究团队研发出一种新型芯片封装技术，该技术满足宽带芯片间通信和可扩展的芯片集成的要求，并有效降低了集成的复杂度。该研究团队设计了小芯片硅桥互连结构，通过精细的“微柱”实现芯片之间的宽带通信，并采用后上芯(Chip-Last)工艺进行集成。该新型芯片封装结构可以提高芯片外部布线的高频特性和散热性能，而且在放大集成时没有良品率问题。未来，该技术有望加速半导体集成技术的演进，进一步推动芯片小型化发展。

6）韩国三星公司拟使用背面供电网络技术研发 2 纳米芯片，可在晶圆背面进行开发

2022 年 10 月，韩国三星公司拟使用背面供电网络(BSPDN)技术研发 2 纳米芯片。BSPDN 技术将芯片上的电源线转移到晶圆空置的背面，通过减薄的背面直接向高级微处理器核心芯片供电，从而增加芯片的晶体管集成度。开发晶圆背面成为继制程缩进、3D 封装后第三个提高芯片晶体管密度的思路。

（二）光电子技术

光电子技术涉及光的产生、控制和操纵，从而实现运算、通信和传感。光通信与光计算具有高速、低损耗的特性，允许更快速、更高效的数据传输与运算，且能耗更低。当下，光学器件推陈出新、光电平台集成度日渐提升，不断拓展在高速通信、光计算和医疗诊断等领域的应用。

1.美国 OpenLight 公司推出全球首个开放式硅光子平台

2022 年 6 月，美国新思科技(Synopsys)子公司 OpenLight 推出全球首个带集成激光器的开放式硅光子平台，以满足日益增长的硅光子市场对性能、功率和可靠性的要求。新思科技工程副总裁艾维克·萨卡(Aveek Sarkar)表示，OpenLight 正在通过实现激光器在可插拔和共封装光学元件中的可扩展集成，为新一代硅光子学铺平道路。新思科技的电子和光子设计解决方案与 OpenLight 创新型硅光子平台相结合，将显著加速光子集成电路的开发。

2.美国佐治亚理工学院开发出新的电调光子超表面平台

2022 年 5 月，美国佐治亚理工学院(Georgia Institute of Technology, Gatech)研究人员开发出一种新的电调光子超表面平台(Electrically Tunable Photonic Metasurface Platform)。超表面具有特殊的光学特性，可使光学系统变得轻薄。传统的超表面都是无源的，性能在制造后无法改变或调整。美国佐治亚理工学院基于一种名为特殊相变材料的纳米光子材料，

开发出新型电调光子超表面平台。研究人员通过局部加热的方式改变特殊相变材料的光学特性，使其能形成可重构的超表面平台。经测试，该平台反射特性变化范围达到 11 倍，且具有大范围的光谱调谐操作性能及更快的调谐速度。该技术将促进透镜技术的进步，预计会对激光雷达系统、成像、光谱学和传感等技术产生直接影响。

3.美国英特尔研究院光电集成技术取得重大进展

2022 年 7 月，美国英特尔研究院在硅晶圆上成功集成光学与电子设备。英特尔在 300 毫米晶圆上成功制造了具有 8 个微环调制器和光波导的 8 波长分布式反馈激光器阵列，其中每个微环调制器都被调节到特定的波长。利用多波长，每个微环都可单独调制光波，以实现独立通信。该光电共封装解决方案使用了密集波分复用技术，输出功率均匀性达到±0.25 分贝，波长间隔均匀性达到±6.5%，均优于行业水平，展现了在增加带宽的同时显著缩小光子芯片尺寸的前景。随着电气互连性能逐渐接近实际极限，将硅电路和光学器件并排集成在同一封装上，有望在未来提高输入/输出(Imput/Output, I/O)接口的能效，延长传输距离。

4.美国加利福尼亚理工大学研发出一种新型超快全光开关

2022 年 8 月，美国加利福尼亚理工大学(California Institute of Technology, Caltech)研究人员研发出一种新型全光开关，处理信息的速度可达 9 太比特每秒，且能耗更低，打破了集成光

学平台综合性能的纪录。研究人员利用薄膜铌酸锂平台较强的等效二阶非线性光学效应，通过对铌酸锂纳米波导进行巧妙设计，使不同波长的光脉冲能以相近的群速度传播，且不出现脉冲展宽，进而可精确地控制铌酸锂纳米波导的准相位匹配和色散。该成果未来有望应用于实现集成的非线性光学系统。

5.国际研究团队开发出一种新型磁光调制器，可用于超导计算机

2022 年 9 月，美国加利福尼亚大学圣巴巴拉分校(University of California, Santa Barbara, UCSB)、BBN 科技公司(BBN Technologies)、微软研究院(Microsoft Research, MSR)、意大利卡利亚里大学(University of Cagliari)和日本东京工业大学研究人员开发出一种磁光调制器，有助于实现基于超导体的大型电子设备和计算机。超导体仅在低温下正常工作，需要通过光纤来传输数据，避免受到温度的干扰。国际团队研究人员开发了一种通过磁场控制光束特性的装置，通过一种名为磁光效应的物理机制，将电磁体中的电流携带的信息转换为光。光可以通过光纤传播并将信息带出寒冷的环境，而不会对低温设备产生影响。这种磁光调制器能够实现每秒 2 吉比特的调制速率，传输信息的能耗低于每比特 4 皮焦耳。该设备是提高超导电路传输速率的关键组件。低温磁光材料领域是一个未开发的领域，相关研究未来有更广阔的空间。

6.丹麦技术大学开发出基于芯片的光束转向装置，可用于激光雷达

2022 年 8 月，丹麦技术大学(Technical University of Denmark, DTU)研究人员开发出一种基于芯片的光束转向技术，可用于制造尺寸更小、成本更低的激光雷达。光束转向是激光雷达系统的一项关键技术，但传统的机械光束转向系统体积庞大、价格昂贵、对振动敏感且速度有限。丹麦技术大学研究人员开发出一种基于芯片的光学相控阵装置，可以消除光学混叠，在大视野内实现光束转向，同时使光束保持高品质。该研究有望为小型、经济、高效和高性能的激光雷达铺平道路，在自动驾驶、自由空间光通信、3D 全息、生物医学传感和虚拟现实等领域得到广泛应用。

7.英国苏塞克斯大学研发出新型光子器件微梳，可用于下一代超精密原子钟

2022 年 8 月，英国苏塞克斯大学(University of Sussex)研究人员研发出新型光子器件微梳。该微梳可长期保持稳定性质，能够在被称为微谐振器的微小腔体上产生多种光频率，形成不同颜色的光。这些颜色是均匀分布的，因此微型梳子的行为就像“由光制成的尺子”，可用于以极高的精度测量或生成频率。苏塞克斯大学研究团队将微芯片嵌入标准激光器中，产生出新型的激光腔孤子，可保证微梳在所需的孤子状态下运行。该技术可用于下一代超精密原子钟、网络通信和激光

雷达等。

五、先进计算技术

全球的数字化转型已进入倍增创新阶段，各个国家数字经济占比持续提升。在此背景下，计算力成为数字化技术持续发展的重要动力，是数字经济时代的核心生产力。先进计算是多领域多技术融合的载体，是推动计算力持续高速增长的主要推动力。随着先进计算的不断发展，计算的效能与能效将迎来全新的突破，算力体系将得到颠覆性的变革。

（一）超级计算机

超级计算机是经典计算机中功能最强、运算速度最快、存储容量最大的一类计算机，多用于国家高科技领域和尖端技术研究，是国家科技发展水平和综合国力的重要标志。2022 年，世界主要经济体在超级计算机领域的争夺仍然激烈。同时，超级计算机的应用场景不断拓展、任务难度不断加大。

1.美国首台 E 级超级计算机 Crusher 上线试运行

2022 年 3 月，美国首台 E 级（百亿亿级）超级计算机 Crusher 上线试运行。Crusher 超算在美国能源部主导的橡树岭领先计算设施下运行，是 Frontier 超级计算机的缩小版本。Crusher 拥有 1082 万个 AMD 核心、总计 192 个节点，总面积不过 44 平方英尺（约合 4 平方米）。相比于美国在 2013 年推出的

Titan 超级计算机，Crusher 只用了百分之一的体积就得到了更优的性能。目前，美国在 E 级超级计算机的构建上有三条路线：AMD 处理器+AMD 加速卡的 Frontier；Intel 处理器+Intel 加速卡的 Aurora；AMD 处理器+NVIDIA 加速卡的 Polaris。Crusher 的推出被视为一次预演，供科研人员为更强大 E 级超级计算机的部署提前做好开发准备。

2.欧洲最强大的超级计算机落成

2022 年 6 月，欧洲高性能计算联合协会(The European High Performance Computing Joint Undertaking, EuroHPC JU)在芬兰建成欧洲最强大的超级计算机 LUMI，并于 2022 年 9 月向欧洲用户开放该系统的访问权限。该超级计算机由具有 2560 个子节点的 HPE Cray EX 节点组成，其中包括一个 64 核 AMD EPYC“Trento”中央处理器和四个 AMD Instinct MI250X 图形处理器。LUMI 建成时是世界上排名第三快的超级计算机，前两名为美国橡树岭国家实验室(ORNL)开发的 Frontier 和日本的“富岳”。

3.美国英伟达与微软公司联合开发人工智能超级计算机

2022 年 11 月，美国英伟达公司与微软达成合作，将共同开发人工智能超级计算机。该人工智能超级计算机基于数以万计的英伟达 H100、A100 等型号高性能芯片构建，并在微软的 Azure 云上运营。此外，英伟达还将与微软合作开发人工智能模型，并向客户提供人工智能服务。英伟达表示，Azure

将是第一个使用 Quantum-2 InfiniBand 网络技术的公共云，其处理速度可达 400 吉比特每秒。

（二）新型计算技术

人类社会的信息体量正呈爆发增长之势，冯·诺依曼(Von Neumann)架构计算机在某些特殊应用场景中的局限性也逐步凸显。类脑计算、概率计算等新兴计算模式和结构不断涌现，将满足人工智能、数据中心等应用对高负载、低能耗计算的需求，成为未来智能计算的突破口。

1.中国北京航空航天大学提出“混合概率逻辑计算”机制

2022 年 2 月，中国北京航空航天大学研究人员提出“混合概率逻辑计算”机制，并制造出原型样机。在概率计算机中，算术运算是借助于表示数据的逻辑电平的随机和不相关性来执行概率计算。二进制计算在硬件消耗上有巨大优势，但其基于脉冲频率表示概率数值的原理带来了较大的计算时延问题。基于此，北航研究团队提出了用混合概率逻辑计算取代原始单比特流概率计算的思想，解决了传统概率计算大时延问题，在未来的类脑计算、人工智能、深度学习和信息处理等场景中具有广泛应用前景。

2.奥地利格拉茨技术大学和英特尔公司证明神经形态芯片的优越性

2022 年 6 月，奥地利格拉茨技术大学(Graz University of

Technology)与美国英特尔公司研究人员进行的一项研究表明，受人脑结构和生物学启发的神经形态计算硬件在支持复杂的深度神经网络(Deep Neural Networks, DNN)方面更有优势。研究人员指出，深度神经网络对于机器实现更高层次的认知功能至关重要，如寻找句子之间的关联并回答问题。通过对比神经形态芯片和标准计算机芯片在执行同样任务时的功耗和效率，研究人员发现神经形态芯片运行大型深度神经网络的效率是传统计算硬件的 4～16 倍。

3.美国得克萨斯大学奥斯汀分校使用石墨烯制造类脑计算机晶体管

2022 年 8 月，美国得克萨斯大学奥斯汀分校研究人员使用石墨烯开发了用于类脑计算机的突触晶体管。研究人员将石墨烯和 Nafion 聚合物膜材料组合起来，构成了突触晶体管的骨架。这些材料共同展示了类似突触的行为，且随着时间的推移，系统的能力随着使用频率的增加而增强，展现出神经肌肉记忆。这意味着设备将能在识别和解释图像等任务上做得更好、更快。该研究有望促进类脑计算机的开发。

4.美国芝加哥大学使用弹性半导体制造可穿戴神经形态芯片

2022 年 8 月，美国芝加哥大学普利兹克分子工程学院研究人员开发了一种灵活、可拉伸的计算芯片，其功能类似人脑，能够以集成的方式存储和处理信息。研究人员使用可拉伸和弯曲的聚合物制造芯片设备，能够实现人体穿戴，并从多个

生物传感器收集数据。该芯片还能使用尖端的机器学习方法得出关于人体健康状况的结论。该研究发表于《物质》(Matter)期刊。

5.中美研究团队开发出新型用于边缘 AI 计算的新型神经形态芯片，可兼顾通用性和高效率

2022 年 8 月，中国清华大学、美国加利福尼亚大学圣地亚哥分校(University of California, San Diego)和斯坦福大学等组成的联合研究团队开发出一种用于边缘人工智能计算的神经形态阻抗随机存取内存芯片 NeuRRAM，兼具多功能、高效率和低能耗的优点。NeuRRAM 芯片使用了可以并行计算的 48 个内核。内核可以在不活跃使用时通过电源门控有选择地关闭，而模型参数由非易失性阻变式存储器设备保留。每个内核的核心是一个双向可转座神经突触阵列，这种阵列由 256×256 的 RRAM 单元和 256 个互补金属氧化物半导体神经元电路组成，用于实现模数转换器和激活功能。双向可转座神经突触阵列架构旨在提供对数据流方向的灵活控制，这对于启用具有不同数据流模式的不同模型架构至关重要。NeuRRAM 芯片支持多种神经网络模型和架构，可在计算机视觉、语音识别和自然语言处理等场景得到应用。

6.美国哈佛大学研究团队开发出一种可在水中进行神经网络计算的离子电路

2022 年 10 月，美国哈佛大学(Harvard University)工程与应用

科学学院研究团队开发出一种可在水中进行神经网络计算的离子电路，并执行了神经网络计算的核心过程。该团队受大脑的启发，构建了一种由醌(Quinone)分子的水溶液组成的新型离子晶体管，其中 2 个同心环形电极和 1 个中心圆盘电极连接在一起。研究人员设计了液体局部 PH 值门控离子晶体管，使圆盘电压与代表局部 PH 门控晶体管的“权重”参数的算术乘积恰好等于圆盘电流。未来，美国哈佛大学研究团队将使用更加多样化的离子种类来处理信息内容。相关成果发表在《先进材料》(Advanced Materials)期刊。

六、网络与通信技术

随着满足智慧交互、沉浸式拓展现实(Extended Reality, XR)全息通信、数字孪生等新兴技术的超高速率传输需求，新一代通信技术成为全球研究热点。伴随着 5G 在全球范围内的陆续应用，全球通信强国正开启对下一代网络技术 6G 的研发规划和技术探索。在各国政府的推动下，全球各主流运营商和科技公司纷纷投入开展 6G 技术与研究，目前已在频谱、空天地一体和芯片等技术领域取得了一定进展。

（一）5G 与光通信

5G 技术的兴起与发展是一个承前启后，不断演进的过程。伴随通信技术的进步与互联网的发展，催生出许多新的服务和

应用。在未来较长时期内，5G 和宽带通信仍将是主流的通信方式，其性能将不断优化、应用场景将不断增多、商业模式将不断创新。

1.美国研究人员利用电磁拓扑绝缘体使 5G 频谱带宽翻倍

2022 年 5 月，美国圣路易斯华盛顿大学(Washington University in St. Louis)、哥伦比亚大学(Columbia University in the City of New York)和纽约城市大学(The City University of New York)首次在集成芯片上使用电磁拓扑绝缘体，使 5G 频谱带宽翻倍。拓扑绝缘体是一种独特的物质状态，表面导电但整体不导电，可用于一系列技术，包括无线通信、雷达和量子信息处理。这种物质的非互易性确保了电磁波的单向传播，可用于全双工通信。这是一种允许以有效方式同时使用相同频率传输和接收数据的方法，可使频谱容量增加一倍。此外，如果波与介质内的任何畸形或不规则性接触，电磁拓扑绝缘体可防止反向散射而导致信号强度衰减。研究人员能够使用精确设计的晶体管开关时间调制在标准半导体集成电路上实现非互易性和拓扑绝缘特性，而无须特殊材料或极端条件。该研究有望用于新兴 5G 无线应用，如多天线全双工无线通信和多天线脉冲雷达。

2.日本东京工业大学推出可接入 5G 网络的高频收发器

2022 年 6 月，日本东京工业大学推出一款高频收发器，可接入现有 5G 网络。研究人员采用 Doherty 放大器和数字预失真

技术，来构建这种毫米波相控阵收发器。Doherty 放大器于 1936 年开发，具有高功率效率且适用于高峰均比(Peak to Average Power Ratio, PAPR)信号（如 5G 信号）传输场景。研究人员修改了传统的 Doherty 放大器设计并生产了一个双向放大器——同一电路既可以放大要发送的信号，也可以放大接收到的低噪声信号。同时，该收发器与晶圆级芯片级封装技术进行了协同设计，可以实现低插入损耗。在测试中，该收发器展现出较低的相邻信道泄露和传输误差，有望促进高频通信技术的发展。

3.美国得克萨斯农工大学通过波束管理改进 5G 毫米波通信

2022 年 7 月，美国得克萨斯农工大学（Texas A&M University，TAMU）通过波束管理改进 5G 毫米波通信。当前的毫米波通信设备使用窄定向波束来传输信号，这意味着发射器和接收器必须不断调整其波束方向，但人体会阻挡通信设备到基站的信号传输，可能会影响通信质量。为解决上述问题，得克萨斯农工大学研究人员开发出两种解决方案。第一种解决方案名为 BeamSurfer，通过持续对齐通信设备及基站，并采用不可见光线的反射来避开通信阻碍；另一种解决方案名为 Terra，专为户外毫米波通信而优化，利用地面作为反射介质，并允许通信设备在不同基站间无缝切换。相关研究有望应用于未来的定向通信系统架构。

4.联发科完成全球首次 5G NTN 卫星手机连线测试

2022 年 8 月，中国台湾地区联发科和德国罗德与施瓦茨公司（Rohde&Schwarz）合作完成了全球首次 5G 非地面网络(Non-Terrestrial Network, NTN)卫星手机连线测试，测试中智能手机直接通过卫星信号来实现上网功能。该项测试是在联发科实验室使用罗德与施瓦茨公司的测试设备完成的，模拟了 600 千米高度的真实低地轨道卫星群，其中每颗卫星都在轨道上以每小时近 27000 千米的速度快速移动。该测试芯片使用的是联发科搭载 5G 新空口非地面网络(5G New Radio Non-Terrestrial Network, 5G NR NTN)卫星网络功能的移动通信芯片，该芯片的设计符合国际标准组织第三代伙伴关系项目(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)第 17 版 5G 标准规定的频谱定义功能。

5.澳大利亚国际射电天文学研究中心成果有望促进无线光通信应用

2022 年 11 月，澳大利亚国际射电天文学研究中心(International Center for Radio Astronomy Research, ICRAR)研究人员的一项研究成果改善了无线光通信的稳定性，有望促进该技术的应用。目前广泛使用的无线电通信存在速率较慢的缺陷，无线光通信速率较快但因受大气湍流影响而不稳定。ICRAR 研究人员开发出一种方法，以不间断的高速信号锁定快速移动的目标，能以每秒数百次的频率矫正大气湍流影响。这意味着先进的光学无线传输可以在更多环境中使用，从而

减少对较慢无线电传输的依赖。目前，研究人员正在尝试将这项技术商业化，以拓展航天器通信、气象学、国防和灾害管理等多种应用。

（二）6G 技术

随着 5G 商用的大规模部署，世界主要经济体已开启对 6G 通信技术的探索研究。6G 具备更大信息容量、更低传输时延、更大设备连接数量、更高频谱效率和更高能量效率。6G 网络的探索将会带来更多发展机遇，同时也会涉及更多新的关键技术和挑战。

1.韩国三星电子举办首届 6G 论坛

2022 年 5 月，韩国三星电子举办首届 6G 论坛。该论坛以“下一代超连接体验”为主题，多位全球产业界与学术界的专家就 6G 空中接口和基于人工智能的 6G 智能网络进行了讨论，以求引领 6G 相关技术的研发及标准的制定。三星公司表示，6G 将通过下一代超连接能力，为用户带来全新体验。在举行首届 6G 论坛之前，三星电子已经发布了《6G 频谱白皮书》(6G Spectrum White Paper)，勾画了“超带宽、超低时延、超智能和超空间化”的 6G 愿景。

2.日本大阪公立大学将磁性超结构材料作为 6G 的潜在关键技术

2022 年 6 月，日本大阪公立大学研究人员在一种手性自旋孤

子晶格(CSL)材料的磁性上层结构中检测到了前所未有的高频共振，该研究预示着承载 CSL 的手性螺旋磁体材料有望作为 6G 潜在关键技术。研究人员通过磁场来调制 CSL 材料的振荡频率，并使用专用微波电路检测磁共振信号。研究发现，CSL 材料在基特尔模式共振(Kittel Mode Resonance)下的特性不同于传统铁磁材料，磁场减弱时其频率反而升高。这意味着 CSL 材料凭借其优异的结构可控性，可将谐振频率控制在高达亚太赫兹波段的宽带范围内，有助于 6G 高频通信技术的开发。

3.德韩研究人员将 6G 传输距离提高两倍

2022 年 9 月，德国弗劳恩霍夫海因里希赫兹研究所和韩国 LG 电子的研究人员成功将 6G 数据的传输距离提升至 320 米，较该团队一年前创下的纪录提升了两倍。研究人员在 155～175 吉赫兹间的频率完成了这次户外数据传输实验，在信号发射端和接收端使用了放大器来增强信号。发射机放大器的输出从前序测试中的 15 分贝毫瓦提升至 20 分贝毫瓦。接收器配备的放大器可降低噪声，从而实现更清晰的信号接收。该研究有望成为 6G 技术进步的里程碑，推动 6G 技术实用化。

4.美国市场研究机构预测到 2040 年 6G 市场规模将达到 3400 亿美元

2022 年 10 月，美国市场研究机构 Market Research 发布研究报告，对 6G 市场按组件、通信基础设施、设备使用、最终

用途和地区进行了全面研究，并预测该市场将在 2031—2040 年间以 58.1%的复合增长率增长，达到 3400 亿美元的规模。报告指出：按组件划分，基础设施/硬件将在预测期内引领市场；按通信基础设施划分，固定设施将主导市场；按设备使用情况划分，移动设备将引领市场；按最终用途划分，工业用途将占有最大份额。当前，全球近半数的 6G 专利申请来自中国。未来，亚太地区将在全球 6G 市场中拥有最大的收入份额。此外，Market Research 公司指出，6G 未来面临的主要挑战将是尺寸、成本和功耗。

七、网络与信息安全技术

2022 年，网络与信息安全技术持续进步，以应对网络安全形势的进一步恶化。加密技术持续升级，防火墙、入侵检测技术不断演进，人工智能与云安全技术进一步提高了网络安全防护的效率。未来，网络安全技术将继续演进，以适应网络安全领域更高、更复杂的要求。

（一）网络安全关键技术

随着互联网接口及应用程序数量爆炸式增长，网络安全受到了很大的影响，主要体现在以下三个方面：一是攻击面扩大，每个新的接口和应用都可能成为攻击者利用的漏洞；二是随着数据存储和流通的增加，枢纽数据泄露陡增；三是接口增

多使身份认证和授权流程变得更加复杂，更容易出现安全漏洞。网络安全形势趋于复杂，网络系统需要得到更好的管理和保护，以抵御攻击和防止数据泄露。

1.美国特种作战司令部举办网络挑战赛以寻找边缘安全技术

2022 年 4 月，美国特种作战司令部(United States Special Operations Command, SOCOM)举办边缘网络安全挑战赛，旨在确定能够提供边缘安全能力的技术。SOCOM 希望寻找能够提供边缘设备端点安全、保护边缘数据的云安全以及保护特种作战部队环境中的网络边缘安全(Network Edge Security)的技术。物联网设备的普及使边缘计算设备形式多样、端点到处都有，参赛者需要确保根据可信数据作出决策，并具有针对零日攻击的保护措施。在挑战赛的第二阶段，SOCOM 将基于参赛者的自身技术优势，独立于其他解决方案来进行评估。

2.英国卡迪夫大学开发出在 1 秒内阻止网络攻击的方法

2022 年 5 月，英国卡迪夫大学(Cardiff University)开发出一种可在 1 秒内阻止网络攻击的新方法。该方法基于人工智能和机器学习等技术，通过监控和预测恶意软件行为来实现防御，而非传统的基于代码分析。通过训练对特定的恶意软件操作模式进行仿真，计算机可以在 1 秒内预测恶意软件下一步的入侵方式，有效避免了攻击者更换恶意代码而导致的防御失效。该方法已被证明可以成功防止计算机上多达 92%的文件被损坏，平均只需 0.3 秒即可清除一个恶意软件。

3.韩国研究人员开发出检测恶意网页的新方法

2022 年 7 月，韩国远东大学(Far East University)和南首尔大学(Namseoul University)研究人员开发了一种检测恶意网页的新方法。与现有方法不同，新方法围绕识别和分析在网站中分发恶意代码期间使用的常见攻击模式来检测恶意网页。研究人员首先在 500 个恶意网站中收集数据，以分析这些网站中最常用于分发恶意代码的方法。随后，研究人员专注于这些恶意代码中使用的编程技术和脚本，并计算了每种技术在恶意网站中使用的次数。最后，研究人员开发了一个公式来确定给定网站的“风险评分”。该方法可以有效地检测基于脚本模式的恶意网站，而且算法复杂度和对内存的负载都很低。新方法将有助于加强网络用户的安全，同时通过收集有关恶意代码分布模式的信息服务于网络安全教育。

4.韩国仁川大学研发出一种基于 5G 的人工智能恶意软件分类系统，可用于下一代网络安全

2022 年 11 月，韩国仁川大学(Incheon National University)研究团队研发出一种基于 5G 的人工智能恶意软件分类系统，可用于下一代网络安全。该研究团队使用了一种名为灰度图像可视化的深度学习网络方法来分析恶意软件，并通过多级卷积神经网络架构将恶意软件攻击分为不同类型。同时，该研究团队还将该安全系统与 5G 进行集成，从而实现了实时数据高吞吐量传输和低延迟诊断。未来，该研究有望应用于

工业物联网、智能城市和自动驾驶等场景。

（二）数据安全关键技术

数据安全技术是指用来保护数据免受未经授权的访问、使用、更改、泄露、破坏等威胁的技术，主要包括身份验证、加密、防病毒软件、防火墙、访问控制、备份和恢复等方面的技术，旨在确保数据在传输、存储和处理期间的保密性、完整性和可用性。其作用包括：一是保护财务信息、个人信息、商业秘密等敏感信息，防止被泄露和滥用；二是提高数据完整性，确保数据不被更改或删除。在网络安全事件频发的形势下，数据安全技术越发成为信息安全的强有力保障。

1.瑞士苏黎世联邦理工大学发现一种推测执行攻击方法，可威胁英特尔和 AMD 处理器

2022 年 7 月，瑞士苏黎世联邦理工大学(Swiss Federal Institute of Technology Zurich, ETH)研究人员发现一种推测执行攻击方法，可对英特尔和 AMD 的微处理器产生影响。研究人员将这种推测执行攻击方法命名为 Retbleed。这种攻击方法利用了现代处理器的一个特性，即当处理器遇到直接或间接指令时，会预测将要接收的下一条指令的地址，并在预测得到确认之前自动执行。推测执行攻击通过诱使处理器执行指令来访问内存中的敏感数据。针对相关漏洞，两家公司均发布了相关指南，帮助其客户防范类似攻击。

2.美国哥伦比亚大学展示首个经过完全验证的 ARM 机密计算架构原型

2022 年 7 月，美国哥伦比亚大学研究人员展示了 ARM 机密计算架构(ARM Confidential Compute Architecture, ARM CCA)的关键验证技术，可以保护敏感的私人数据。ARM CCA 是 ARMv9-A 架构的新功能，依靠固件来管理硬件以执行其安全保证措施，因此固件的正确性和安全性至关重要。过去，工程团队依赖软件测试技术来测试固件的安全性。哥伦比亚大学的最新研究是通过数学模型来证明软件和硬件的绝对正确性，以提供最高水平的安全保证。当下，ARM 处理器已经部署在全球数十亿台设备上。随着 ARM CCA 越来越普遍地用于保护用户的私人数据，哥伦比亚大学研究人员展示的验证技术将显著改善数据保护和安全性。

3.美国麻省理工学院开发出新型联邦机器学习算法

2022 年 9 月，美国麻省理工学院研究人员开发出新型的联邦机器学习算法 FedLTN。联邦学习是一种分布式机器学习技术，可保护用户数据隐私。过去，联邦学习面临通信成本高、分布数据类型多和分布用户模型非个性化的问题，严重影响了模型的性能和部署。研究人员通过迭代修剪过程优化模型大小，并将修剪后的神经网络其余部分“倒回”其原始值的步骤来加速修剪，但在此过程中不会剪掉网络中捕获有关分布用户特定数据的重要信息层，以保证分布用户模型的个性化。

实验表明，FedLTN 将联邦学习模型的大小降低了近 1 个数量级，分布用户的通信成本降低了 4 到 6 倍，综合性能提高了约 10%。

（三）量子密码技术

量子密码技术利用量子力学的特性来确保通信通道传输信息的机密性，这意味着系统的安全性是由物理定律来保证的，而不依赖于数学算法的计算复杂性。因此，量子密码学被认为比经典密码学具有更高的安全性。随着量子技术的不断发展和对安全通信需求的不断增加，量子密码技术有望成为隐私与安全通信的重要支撑。

1.英国电信与日本东芝公司合作试用首个商用量子安全网络

2022 年 4 月，英国电信(British Telecom, BT)和日本东芝公司(Toshiba)在英国启动了量子安全网络的首次商业试验。英国电信在其 Openreach 专用光纤网络上提供端到端加密链路，东芝则提供量子加密硬件和密钥管理软件。英国咨询公司安永（Ernst&Young Global Limited，EY）使用该网络连接位于伦敦的伦敦塔桥(Tower Bridge)和金丝雀码头(Canary Wharf)两个站点。该网络旨在探索量子技术商用化的可能性。

2.中国科学家在量子密钥分发网络化研究方面取得新进展

2022 年 7 月，中国科学技术大学郭光灿院士团队在量子密钥分发网络化方面取得重要进展。该团队实现了抗环境干扰的

非可信节点量子密钥分发网络，全面提高了量子密钥分发网络的安全性、可用性和可靠性，向实现下一代量子网络迈出了重要的一步。

3.韩国科学技术研究院完成双场量子密钥分发演示实验

2022 年 7 月，韩国科学技术研究院(Korea Instituts of Science and Technology, KIST) 完成双场量子密钥分发 (Twin-Field Quantum Key Distribution, TF-QKD)演示实验。TF-QKD 是一种长距离通信协议，可以显著增加量子密钥分发的通信距离。在 TF-QKD 实验中，两个用户可以通过将量子信号传输给中间第三方进行测量，增加了通信距离。这是继加拿大多伦多大学(University of Toronto)之后，全球第二次 TF-QKD 网络的实验演示。与多伦多大学的基于环形网络结构的演示不同，KIST 团队提出的架构基于星形网络，该结构可扩展到基于偏振、时分和波分复用的二对多网络。该研究成果有望促进 QKD 的商业化进程。

第三章 世界生物技术发展报告

生物技术是 21 世纪最重要的创新技术集群之一，具有突破性、引领性等显著特点。2022 年，世界主要经济体积极制定相关战略，大力发展新兴生物技术，促进本国生物经济的发展。随着生物技术的飞速发展，科技突破不断涌现、产业创新持续活跃，合成生物学应用研究在多领域取得重大进展，推动各国围绕生物经济展开竞争；脑机接口技术向无线、微创等更安全的方向发展，类脑芯片技术展示出虚拟脑与生物脑相融合的前景；干细胞研究在类器官、组织修复、疾病建模等领域取得一系列重大进展，推动再生医学和抗衰老研究的发展；基因编辑技术助力农业育种，推动全球农业与生态可持续发展，或成为缓解粮食短缺的关键方案之一。人工智能基于大型生物数据集提供新见解的潜力正在改变生物技术行业，合成生物学、基因编辑等新兴生物技术与人工智能的结合在疫情监测、病毒检测、药物研发及疾病诊治方面发挥出巨大作用，大幅提升了监测和检测的准确性，以及研究和开发的效率。生物技术与人工智能的融合正在催生出生物革命的新浪潮。同时，生物技术发展带来的“双刃剑”效应越发突出，不但充分显示了其造福人类的功能，也逐渐暴露出对自然和社会的危害。生物安全风险和传统安全问题相互

叠加，生物安全风险格局加速演变，生物安全仍是世界各国关注的焦点，并成为影响和重塑世界格局的重要力量。

一、世界生物技术及产业发展重要动向

（一）生物经济时代加速到来，合成生物学相关产业高速发展

生物经济涵盖农业、医药、能源等诸多行业，是实现联合国可持续发展目标的重要工具，也是解决疫情、气候问题、自然资源和能源匮乏、粮食不安全等多重挑战的主要驱动力，且与人们的生活息息相关。

1.多个国家和地区推进生物经济发展战略，加强国际竞争力

2022 年 4 月，芬兰推出《2022—2035 年生物经济战略》(Bioeconomy Strategy 2022-2035)。该战略的主要目标包括：使芬兰生物经济增加值翻倍；为全球问题提出具有竞争力和创新性的生物经济解决方案；创造促进国内和国际市场的新业务，为芬兰整体带来福祉；增加资源的利用率和材料的循环利用；减少对化石燃料和其他不可再生原材料的依赖；确保生态可持续性和可再生自然资源的更新能力，并加强生物经济的广泛能力；改进和改革技术基础。

2022 年 5 月，中国国家发展和改革委员会公布《“十四五”生物经济发展规划》，这是中国首部生物经济五年规划。规划将生物经济作为今后一段时期中国科技经济战略的重要

内容，为应对生命健康、气候变化、资源能源安全、粮食安全等重大挑战提供新的解决方案。在加快提升生物技术创新能力方面，规划提出，加强原创性、引领性基础研究，瞄准临床医学与健康管理、新药创制、脑科学、合成生物学、生物育种、新发突发传染病防控和生物安全等前沿领域，实施国家重大科技项目和重点研发计划，同时开展生物领域关键核心技术攻关和前沿生物技术创新，加快发展高通量基因测序技术，加强微流控、高灵敏等生物检测技术研发，推动合成生物学技术创新，发展基因诊疗、干细胞治疗、免疫细胞治疗等新技术。

2022 年 7 月，印度生物技术产业研究援助委员会(The Biotechnology Industry Research Assistance Council, BIRAC)发布《2022 年印度生物经济报告》(India's Bioeconomy Report 2022)。印度联邦国务部长吉滕德拉·辛格(Jitendra Singh)表示，印度制定了生物经济的路线图和战略，到 2025 年，印度的生物经济规模可能达到 1500 亿美元。印度生物技术产业分为五大板块：生物制药、生物农业、生物工业、生物能源及生物服务，在过去 3 年发展迅速，到 2022 年，印度的生物技术产业已超过 801 亿美元。此战略将促进建设低碳生物基产品生物制造的基础设施。

2022 年 9 月，美国总统拜登签署“关于推进生物技术和生物制造创新，实现可持续、安全和可靠的美国生物经济”

(Executive Order on Advancing Biotechnology and Biomanufacturing Innovation for a Sustainable, Safe, and Secure American Bioeconomy)行政令，以实现可持续、安全和可靠的美国生物经济，保护其技术领先地位并提升技术竞争力。该行政令内容主要包括：加强和协调联邦对关键研发领域的投资；促进生物数据生态系统建设；扩大国内生物制造；积极主动地评估和预测威胁、风险，包括“外国对手的数字入侵、操纵和渗透”；加强生物技术研发国际合作等。2022 年 10 月，美国国家科学基金会(NSF)和美国能源部生物能源技术办公室(BETO)合作资助 6 个研发项目，以促进美国生物经济发展。合成生物学和工程生物学在推动美国生物经济方面发挥着关键作用，所有研发项目有助于生产可再生生物化学品和生物燃料，并开发对工业和运输部门脱碳至关重要的基础技术。

2022 年 10 月，欧盟生物经济会议发布《欧盟生物经济战略进展报告》(EU Bioeconomy Strategy Progress Report)。报告涵盖的主题集中在经济如何支持企业实现气候和生物多样性目标。会上详细介绍了 2022 年 6 月通过的《欧盟生物经济战略进展报告》的调查结果，分享了欧盟研究和创新的生物经济成功案例及相关要素。欧盟生物经济这一系列的政策有助于生物基解决方案的开发，从而实现欧洲绿色协议的目标。

2022 年 10 月，德国联邦政府发布《国家生物质能战略(NABIS)

的基石》，以确保德国的可持续生物质生产和使用，始终面向气候、环境和生物多样性目标。该报告针对可持续的生物质潜力、自然生态系统的保护和粮食安全优先原则，与各领域代表对话并制定战略，将在 2023 年执行。

2.合成生物学聚焦生物制造，已成为推动生物经济发展的主导技术

合成生物学作为一项底层技术，驱动生物医药、化工、材料、能源及农业食品等产业的颠覆性创制，已成为推动生物经济发展的创新平台，在创造可持续、有韧性和公平的生物经济方面发挥关键作用。据麦肯锡全球研究所(McKinsey)预测，生物经济在未来 10～20 年内每年将产生 2 万亿～4 万亿美元的年度直接经济效益，为全球经济提供 60%的物质投入，如木材、牲畜、塑料和燃料等，并解决全球目前 45%的疾病负担，其中高达 30%的私营部门研发支出集中于合成生物学相关产业。近年来，合成生物学理论基础和技术研发不断取得突破，为新材料及生物医药研发、农业改良、工业生产等提供了有力工具。利用合成生物学技术开发的定制化细胞工厂有望在医疗健康、工业化学品、食品饮料、生物燃料和科研等诸多领域高效、可持续地生产各类产品。面对肆虐全球的新冠大流行，合成生物学也展现出卓越的应用潜力，助力新冠药物及疫苗生产。

合成生物学是一项新兴产业。全球合成生物市场、初创公司

数量和投融资金额在各国政府和民间组织的增资及 DNA 测序和合成成本降低等因素的影响下，均呈高速增长态势。近年来，制药和生物技术行业对合成基因、蛋白质和其他生物分子的需求不断增加，Markets and Markets 报告显示，2021 年全球合成生物学市场规模达 95 亿美元；据 Nova One Advisor 的预测数据，到 2030 年，全球合成生物学市场规模预计将达到约 553.7 亿美元，预测期内复合年增长率为 19.7%。美国和加拿大成熟的合成生物学公司和研究机构数量及在研项目增加等因素使北美占据了合成生物学市场的最大份额，其次是欧洲和亚太地区。预计到 2025 年，欧洲合成生物学市场的复合年增长率最快将达 25%，医疗领域研发支出的增加和大量制药公司的存在将支持该地区的市场前景；印度和中国等发展中国家重视程度的提高及慢性病发病率的激增将促进合成生物市场的发展。到 2027 年，亚太地区合成生物学市场规模或将达 48.5 亿美元。未来，对具有更高营养价值、更长保质期且不含有害过敏原的食品的需求，以及使用工程微生物原料提高以动植物为基础的食品质量的需求日益增加，很可能推动区域市场增长。

推动合成生物学市场增长的“主力军”主要包括以下 3 项技术因素：一是 DNA 测序、合成和编辑技术的不断进步、DNA 测序时间和成本的持续降低等多种方式驱动着合成生物学的发展；二是基因关键原材料（即寡核苷酸）的成本降低推

动了市场对合成生物产品的需求；三是生物铸造厂（平台型生产公司）设计、制造、测试新型微生物的技术水平不断提升。由于生物合成的现有市场渗透率较低，上升空间明显，以及在农业、化工、食品和医疗行业的产品赋能水平增长较快，合成生物产业中许多细分领域的市场份额正以高复合年增长率的水平增长。合成生物学市场可分为医疗应用、工业应用、食品和农业应用及环境应用，资本和市场的目光也正在向这些应用层面聚集。合成生物学在医药领域的应用包括开发人工减毒或无毒活疫苗、合成噬菌体设计进行噬菌体治疗、工程化微生物量产小分子化合物、开发新型药物传递系统等，这些应用为生产用于疾病鉴定的抗原和诊断试剂、加快疫苗开发速度及提高疫苗的总体性能和产量提供了关键优势。支持疫苗研究的政府和私人资金及临床试验中合成生物制品管线是医药领域合成生物学市场增长的关键驱动因素。未来，医疗健康领域产生的直接经济效益预计将占合成生物学经济效益的 35%。随着人口增长、气候变化和环境压力的增加，人们对粮食安全的重视将推动合成生物学在食品领域的应用，资本市场开始陆续关注合成生物学食品开发领域，市场上替代肉类、食品原料的产品陆续上市。美国 Impossible Foods 公司利用小麦和土豆蛋白、向日葵油和椰子油、甲基纤维素、食品淀粉及一种实验室设计的非肉基血红素分子制作了牛肉汉堡馅饼。根据独立审计机构 Quantis 对

其汉堡进行的环境生命周期分析，制作一个 Impossible Foods 的肉饼比真正的牛肉饼少 96%的土地消耗和 87%的水消耗，碳排放也减少 89%。全球人造肉市场将在 2026 年达到 5.72 亿美元的市场规模，预测期内复合年增长率为 15%。波士顿咨询集团(Boston Consulting Group, BCG)指出，若按照当前趋势继续发展下去，到 2040 年，美国传统肉类消费可能会下降 33%。

3.对中国的影响与启示

近年来，生物经济的重要性在全球范围内显著增加，而其发展成为一种新的经济形态是大势所趋。生物经济将帮助确保粮食和营养安全；可持续地管理自然资源，减少对不可再生或不可持续资源的依赖；适应和制约气候变化；加强国家竞争力，创造就业机会；为监测、检测和应对大流行病，以及开发更好的预防工具提供最佳资源。

中国在政策支持、技术进步和产业结构调整的驱动下，生物产业规模逐年扩大，产业结构进一步优化调整，形成集聚化发展态势，并在持续进步积累，向下一代生物经济迈进。此外，“双碳”目标和生态文明建设目标的引导，将带来价值观、生产生活方式、消费和流通方式及创新方式等一系列重大转变，为中国生物经济发展提供良好机遇和巨大空间。当前，生物经济在国民经济和社会可持续发展中占据愈加重要的地位。中国应加强战略规划布局，构建未来生物经济研发

创新体系，推进生物经济平台建设；着力培育新兴产业，积极推进生物基产业发展，提高产业核心竞争力水平；促进国内国际产业双循环，深化国际交流合作，加快迈向全球价值链中高端；完善伦理、法律、社会和安全监管体系，促进生物经济协调发展，从而推动生物经济高质量发展。

（二）全球粮食危机日益恶化，基因编辑技术或成为有效解决方案

冲突、极端气候和经济衰退是导致饥饿和粮食不安全的主要因素。从 2014 年至今，全球中度或重度粮食不安全状况持续恶化，影响到世界 30%以上的人口。当前，俄乌冲突和气候变化正在加剧粮食安全问题，全球饥饿和营养不良人口增长迅速，世界卫生组织组织(World Health Organization, WHO)、粮农组织(Food and Agriculture Organization, FAO)等国际组织两度敲响粮食不安全警钟。近年来，基因编辑技术发展势头迅猛，在作物育种等农业领域展现出极大应用潜力，或对全球农业和粮食安全问题产生重大影响。

1.新冠疫情、冲突和气候变化加剧粮食安全问题，粮食危机迫在眉睫

2022 年是前所未有的饥饿之年。世界粮食计划署(World Food Programme, WFP)的报告显示，2022 年全球共有多达 8.28 亿饥饿人口，面临严重粮食不安全的人数从 2019 年的 1.35 亿

猛增至 3.45 亿。根据粮农组织全球信息和预警系统(Global Information and Early Warning System, GIEWS)2022 年 7 月发布的《作物前景与粮食形势》(Crop Prospects and Food Situation)报告显示，当前有 46 个国家需要粮食外援，其中非洲国家 33 个、亚洲国家 10 个、拉丁美洲及加勒比国家 2 个、欧洲国家 1 个。

新冠疫情给世界经济带来毁灭性打击，干扰了全球粮食供应链的稳定和畅通，对可用食品的数量、质量、新鲜度、安全性、市场准入和可承受性产生不利影响，极大推升了全球粮食价格，削弱了脆弱国家和人群获取粮食的能力，是导致数十年来世界饥饿人数大幅增长的主要消极因素之一，影响到几乎所有中低收入国家，威胁着包括儿童在内的数百万人的粮食安全和营养状况。俄罗斯和乌克兰均为全球粮食生产和出口大国，俄乌冲突加剧了全球粮食供应短缺，导致粮价上涨，同时改变了全球商品贸易、生产和消费模式，将在 2024 年年底前使粮食价格维持在高位，加剧粮食不安全和通货膨胀。气候变化可能引发各种灾害，影响粮食生产和粮食系统的供应、获取、质量、利用和稳定性等各个方面，降低农作物产量，增加粮食不安全和水资源短缺的风险，冲击着岌岌可危的粮食系统。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)预测，气温每升高一度，小麦、水稻和玉米的产量将下降 10%～25%。

目前，全球升温 1.2 摄氏度，已使世界平均农业产量下降了至少 21%，导致非洲、中美洲和南美洲等极易受极端气候影响的中低收入国家的粮食不安全和营养不良现象急剧增加。预计到 21 世纪中叶，将有 10%的现有粮食生产区域不再适合种植作物和饲养牲畜。此外，影响全球气温并加剧干旱和洪水的“三重”拉尼娜现象(La Nina climate)可能会持续到 2023 年，将极大影响全球农作物播种和生产。

2.基因编辑技术在作物育种方面展现出极大潜力，有望缓解粮食不安全状况

基因编辑作为下一代作物育种技术，具有改善全球粮食生产和转变粮食系统的巨大潜力，其主要优势在于能够快速提高作物的产量、营养价值和环境适应性，可在更快的时间尺度上创造出对新兴病原体和环境压力具有内置抗性的作物，促进气候适应型农业的发展，并能显著减少试错过程中的资源浪费。第一，基因编辑可以提高育种效率，降低育种成本。基因编辑扩展了传统的作物育种工具，通过更快、更准确地将新性状引入作物内部，可在创新育种方面帮助研究人员节省数年甚至数十年的时间。而且，基因编辑作物的平均成本为 1330 万美元，而转基因作物的平均成本为 8070 万美元。第二，基因编辑可以增强作物的耐受性和抗逆性，以更好地应对极端环境和疾病。基因控制着生物体的形状、外观及其在环境中的行为，基因编辑技术通过在特定 DNA 序列上找到

对应位置进行切割，并用所需 DNA 去除或替换不需要的 DNA，以此改变生物体特征。基因编辑是扩大作物耐受性的有效工具，为应对气候变化对全球农业生产力造成的当前和新兴的威胁提供了解决方案。第三，基因编辑可以提高作物产量，优化作物质量。基因编辑技术通过改进或调节作物的关键基因，改变作物的物理性状，以抵御生物及非生物胁迫的影响，从而提高作物产量。第四，基因编辑可以减少农业化学品造成的不良影响，提升环境效益，促进农业可持续发展。

未来，基因编辑还将为建立更具韧性和可持续性的农业食品系统、稳定粮食供应、解决粮食不安全问题及实现可持续发展目标提供新的路径，基因编辑作物也将继续加速作物种植现代化，推动联合国可持续发展目标所倡导的零饥饿和气候行动愿景的实现，成为缓解粮食危机、实现粮食安全的有效解决方案。

3.对中国的影响与启示

2022 年 6 月，习近平总书记在金砖国家工商论坛开幕式上指出，全球近 70 个国家的 12 亿人口面临疫情、粮食、能源、债务危机，全球过去数十年减贫成果可能付诸东流。自 2018 年以来，粮食不安全状况持续上升，根据联合国的数据，到 2050 年，全球人口估计将达到 90 亿，这将要求粮食生产增加 50%。当前，新冠疫情带来的负面影响进一步恶化脆弱群体的粮食安全和营养状况；俄乌冲突暴露了全球粮食系统的

关联性和脆弱性，严重冲击全球粮食供应链；加之人口增长、气候变化等因素，世界正处于粮食不安全的紧要关头。一场新的全球粮食危机正在形成，亟须通过科学和创新帮助实现农业粮食系统的转型，促进农业可持续发展。

当前，中国粮食供应稳定，国内粮食市场相对独立于国际市场，粮食自给率较高、粮价高于国际粮价，且国内粮价波动低于国际粮价。全球粮食危机对中国粮食市场的影响主要体现在贸易冲击和成本传导两个方面：一是粮食进口价格升高，自给率低的品种受冲击较大，玉米进口直接受地缘冲突影响；二是油价带动农资价格上涨，抬高粮食生产成本，饲料成本上升加大下游养殖业波动。面对全球粮食安全形势的不确定性，中国应全力守住粮食安全底线，重视国内的农业长期稳定发展，强化现代农业基础支撑，包括通过耕地保护、高标准农田建设、种业翻身仗、农机装备、设施农业等方法立足国内资源，来确保谷物基本自给、口粮绝对安全；聚焦农业农村基础设施等领域，扩大农业农村投资，鼓励农业“走出去”，提高中国国际影响力的同时拓宽农产品进口渠道，提高国内粮食安全水平。

（三）人工智能与生物技术的日益融合为生命科学研究带来范式转变

人工智能在医疗保健中有多种用途，从分子和遗传学测试到

医学成像、诊断代码分析，以及传染病暴发预测，可作为紧急卫生保护计划的一部分，帮助管理、筛选和分析生物过程、药物生产和处理生物技术领域的数据，建立并优化研发流程及操作，提高速度和准确性，使医疗决策或研发成果更具效率。

1.美欧加强人工智能在医疗领域的应用，加快医疗诊断的智能化、数字化进程

2022 年 1 月，美国卫生与公众服务部(Health and Human Services, HHS)首席人工智能官办公室(Office of the Chief Artificial Intelligence Officer, OCAIO)提出发展医疗 AI 的重点领域和战略方针：使 HHS 对 AI 技术及其潜力具有广泛的熟悉度、舒适度和流畅度;通过将最佳实践和经验教训应用于 HHS 的其他领域，促进 AI 扩展；通过提高 HHS 采用和扩展 AI 和机器学习(Machine Learning, ML)的速度刺激 AI 加速。2022 年 9 月，美国国家卫生研究院(National Institutes of Health, NIH)启动通往人工智能的桥梁(Bridge2AI)计划，将在 4 年内投资 1.3 亿美元，扩大 AI 在生物医学和行为研究中的应用。

2022 年 5 月，欧盟委员会启动欧洲卫生数据空间(European Health Data Space, EHDS)。这是建立强大的欧洲卫生联盟的核心组成部分之一，是欧盟数字卫生政策的新起点。EHDS 提供了一个一致、可靠和高效的框架，在确保完全符合欧盟高数据保护标准的前提下，将卫生数据用于研究、创新、决策和

监管活动，使人们能控制和利用本国或其他成员国的健康数据。EHDS 将利用欧盟正在和即将部署的公共数字产品，如 AI、高性能计算、云和智能中间件。此外，AI、电子身份和网络安全框架也将支持 EHDS。

2.人工智能推进生物基础研究，精准预测蛋白质结构和作用

了解所有蛋白质的结构有望彻底改变生物学的各个领域，从了解疾病到理解已知生命进化中所涉及的酶。AI 根据氨基酸序列准确预测蛋白质结构，开启发现与功能导向的结构生物学新时代。2022 年 1 月，美国能源部橡树岭国家实验室(ORNL)和佐治亚理工学院(Gatech)利用 ORNL 的 Summit 超级计算机、谷歌的 AlphaFold 和佐治亚理工学院的 SAdLSA 计算工具，预测数千种功能未知的蛋白质结构和作用。这种深度学习驱动方法通过 DNA 序列推断蛋白质结构和功能，为生物技术、生物安全、生物能源和气候变化等提供更加丰富的解决方案。2022 年 3 月，美国华盛顿大学(University of Washington, UW)科研人员开发出一种能根据氨基酸序列预测蛋白质结构的软件，可设计针对体内重要蛋白质的小分子结合蛋白，有助于开发攻克癌症、糖尿病、新冠等疾病的新疗法。2022 年 7 月，英国人工智能公司 DeepMind 与欧洲生物信息研究所(European Molecular Biology Laboratory-European Bioinformatics Institute, EMBL-EBI)的研究团队利用 AlphaFold 预测出超 100 万个物种的 2.14 亿个蛋白质结构，几乎涵盖了

地球上所有已知蛋白质，其中，约 35%的结构具有高精度，达到了实验手段获取的结构精度；80%的结构可靠性足以用于多项后续分析。该数据库涵盖了整个蛋白质宇宙，使数字生物学迈入新时代，这一突破将加速新药开发，并为基础科学带来全新革命。

3.人工智能加速药物研发进程，改善制药领域的高投入、长周期等痛点

传统的药物研发过程复杂且耗时，需经过大量筛选来确定能达到预期效果的化合物，而人工智能在药物发现中具有 3 个关键优势：一是可用于准确预测潜在化合物的性质，减少资源和时间的浪费；二是可通过创造具有预期成功特性的分子来帮助开发新化合物，改进有效新药的研发；三是在药物发现过程中简化评估药物有效性时的重复任务，将成为未来药物研发的关键核心技术之一。2022 年 1 月，法国制药公司赛诺菲(Sanofi)与英国人工智能公司 Exscientia 合作，通过将其 AI 个性化医疗平台与 Exscientia 公司的 CentaurAI 系统相结合，开发了多达 15 种治疗癌症和免疫疾病的新型小分子候选药物。2022 年 8 月，美国华盛顿大学研究团队利用 AI 从头设计出能够穿过细胞膜的大环多肽分子，开辟了设计全新口服药物的新途径。2022 年 9 月，美国中佛罗里达大学(UCF)的研究人员创建出基于 AI 的筛选模型 AttentionSiteDTI，可加快药物发现进程，并在识别有希望的候选药物方面具有 97%的

准确性。2022 年 10 月，美国英矽智能(Insilico Medicine)与赛诺菲达成战略合作协议。赛诺菲将利用英矽智能 AI 驱动的 Pharma.AI 药物发现平台，识别、合成和推进高质量先导化合物的研究，使其达到临床开发候选阶段。该合作将推进基于不超过 6 个创新靶点的候选药物研发，有助于加速创新治疗药物研发，以尽快满足未来医疗需求。2022 年 11 月，瑞典查尔姆斯理工大学(Chalmers University of Technology)研究人员利用 AI 开发出控制细胞蛋白质生产的合成 DNA，其中包含控制特定蛋白质数量的精确指令，有助于更经济、有效地开发和生产疫苗、治疗严重疾病的药物及替代食品蛋白。

4.人工智能在预测和识别传染病和非传染性疾病方面展现出极大应用前景

人工智能的进步为监测健康和防治传染病及非传染性疾病开辟了新的机遇。人工智能驱动的监测和信息数据系统可比传统公共卫生监测系统更早地检测到严重疫情的信号，能够在疫情开始前或在疫情早期发出预警信号，优化医疗资源配置，使公共卫生人员及时采取行动遏制疫情继续传播。此外，人工智能还可以提高临床诊断的准确性，预测和发现慢性非传染性疾病的早期迹象，改善干预措施，降低疾病进一步恶化的风险。2022 年 3 月，浙江大学等机构的研究人员开发出一种便携式人工智能嗅觉(AIO)系统，可通过皮肤散发的气味诊断受试者是否患有帕金森病，其准确率为 70.8%，敏感性

高达 91.7%，但特异性仅为 50%，表明假阳性率很高，在进入临床应用前还需进行更多实验来提高准确率。2022 年 8 月，英国伦敦大学学院(University College London, UCL)领导的研究团队开发出一种人工智能算法 MELD，可检测出导致癫痫发作的细微大脑异常。2022 年 9 月，荷兰马斯特里赫特大学(Maastricht University)科研人员开发出可通过手机应用程序从人声中检测新冠病毒感染的 AI 模型，其总体准确率为 89%，正确检测阳性病例的能力为 89%，正确识别阴性病例的能力为 83%，比快速抗原测试更准确且成本更低、更易使用。此外，该模型还支持远程虚拟测试，可在一分钟内出结果。2022 年 9 月，瑞士苏黎世联邦理工学院研究团队开发出预测未来可能出现的新冠病毒变体的 AI 模型，可帮助识别能够逃避免疫的变体，支持公共卫生快速决策，并将有助于开发下一代抗体疗法和新冠疫苗。2022 年 10 月，美国布莱根妇女医院(Brigham and Women's Hospital, BWH)等机构的研究团队基于自监督深度学习开发出快速和可扩展的病理图像搜索工具 SISH，有望改善病理学的训练、疾病亚型划分、肿瘤的鉴定及罕见形态学的鉴定，为疾病诊断、预后和分析提供帮助。2022 年 11 月，美国约翰斯·霍普金斯大学团队开发出新型 AI 血液检测技术 DELFI，可检测到 80%以上的肝癌。经验证，该技术总体灵敏度为 88%，特异性为 98%，实现了肝癌早期阶段的检测，为肝硬化、病毒性肝炎等高风险个体提高生存

率提供了新途径。

5.对中国的影响与启示

生物技术和信息技术的不断融合深刻影响了生物医学的基础研究、药物开发、临床诊疗、健康管理等环节。人工智能正在推动生物医学从以实验为主向以数据驱动为主、实验为辅转变，临床数据采集、储存、管理及应用等有关的医疗信息技术发展迅速，用于健康管理和监测的移动医疗应用日益广泛。AI 使生物医药领域更经济、更普惠，通过整合和解释个体医疗数据，促进精准医疗；通过快速解析蛋白质结构，加速药物研发的同时降低成本和时间；通过自动识别并帮助修复供应链缺陷，增强供应链韧性；通过预测未来需求，更好地做好药物准备。此外，AI 还可用于大流行病的预测、早期监测和预警。AI 在为生命科学研究带来新方法的同时，有望开启生物医药产业新时代。中国要实现 AI 对生物医药行业的充分赋能，亟须国家、企业、医疗/科研机构的共同努力。一是强化交叉人才培养、吸引跨国人才，需打破计算机和生物医药专业的人才壁垒，重点培养复合型人才。二是加速前瞻性监管审批。中国药监局等监管部门在加快引进有临床价值的创新药的基础上，继续科学评估国外监管机构最新监管措施，并结合国内实际情况，制定前瞻性政策法规。三是推动跨学科产业园建设。由政府主导建设的人工智能、生物制药等跨学科孵化园区可以将产业上下游联合起来，形成良好

产业生态圈。四是加强数据和隐私管理。采用新兴 AI 算法首要考量因素应是数据安全和隐私保护，制药领域数据的保密性和 AI 领域对数据的依赖性之间存在矛盾，需要新的加密技术、行业合作机制、创新的数据资产商业管理机制来解决。未来，AI 将推动医疗智能的更广泛应用，为公众提供优质便捷、智能高效的健康医疗服务。

（四）世界主要经济体加强生物安全领域的战略部署

当前，气候变化愈演愈烈，导致冰川融化、极地冰冻圈加剧退缩，大量病原微生物“解冻”，而大多数致病性微生物不为人类所知，增加了新发突发传染病暴发的风险；抗生素耐药性的不断蔓延或将带来一场新的“无声”的大流行病。2022 年 3 月，俄罗斯国防部发现美国在乌克兰建立了 15 个生物实验室，并找到了这些实验室进行危险疾病病原体试验以探究对人和动物影响的相关文件。可见，传统生物安全问题和新型生物安全风险相互叠加，境外生物威胁和内部生物风险交织并存，是当前全球生物安全风险的新特点。

1.面对日益严峻的生物安全形势，越来越多的国家加紧制定生物安全战略政策

2022 年 2 月，英国政府要求更新其生物安全战略，并指出更新的战略中需考虑的关键领域包括：重大健康危机，如大流行性流感、非流感传染病暴发或新发传染病；抗生素耐药性；

国家或非国家行为体的蓄意生物攻击；可能对人类健康构成威胁的动植物疾病；实验室意外释放，如天花和口蹄疫从不安全的实验室逃逸和被用于造成伤害的双重用途研究。2022 年 2 月，尼日利亚正式启动 2022—2026 年国家生物安全政策和行动计划（National Biosecurity Policy and Action Plan，NBP&AP），以保护公民健康及其周围环境免受生物威胁并维持社会经济发展。该计划旨在通过提升科技和行政能力、维持功能性基础设施和整合信息交流系统，提升国家各项任务的功能，确保国家的生物安全；通过将专业知识、基础设施、技术和宣传视为重点，改进国家系统，确保预防和应对生物威胁。2022 年 3 月，美国政府和国家卫生研究院(NIH)启动对国内管理潜在大流行病病原体研究的生物安全政策范围和有效性的全面审查，旨在确保生物安全对策与科学研究的进展保持同步。2022 年 8 月，澳大利亚发布首个国家生物安全战略计划，以保护其农业和环境免受病虫害的影响。该战略指出，气候变化、贸易和旅行的增长，以及土地使用的不断变化等因素加剧了动物疾病的风险。该战略有助于使现有的州和地区计划同步化，以阻止潜在动物疾病的入侵。2022 年 10 月，沙特阿拉伯王国投资部(The Ministry of Investment of Saudi Arabia, MISA)与美国生物技术公司 Ginkgo Bioworks 共同签署了一份为沙特阿拉伯王国部署新的公共卫生举措的备忘录，以开发生物技术，提高其生物安全能力。

2.世界主要经济体和国际组织细化生物防御能力建设，以更好地应对生物威胁

2022 年 2 月，美国农业部动植物健康检查局(Animal and Plant Health Inspection Service, APHIS)推进对新冠病毒和其他新兴人畜共患病监测的最终战略框架，旨在对动物体内具有人畜共患潜力的病原体建立健全的监测、检测系统，提早预防和控制全球疫情暴发。2022 年 8 月，美国国家科学、工程与医学院(National Academy of Sciences, NAS)发布《减少传染病跨境传播》(Slowing the Cross-Border Spread of Infectious Disease)报告，建议美国疾病预防与控制中心(Centers for Disease Control and Prevention, CDC)下属的全球移民和防疫司(Division of Global Migration and Quarantine, DGMQ)的检疫站为各种可传播疾病威胁制定详细的行动计划和战略规划，特别是针对高危和潜在传染病威胁，并改进其疫情检测技术，建立预备役部队，以在公共卫生紧急情况下提供帮助。2022 年 10 月，拜登政府发布《国家生物防御战略与实施计划》(National Biodefense Strategy and Implementation Plan)，提出拨款 880 亿美元，在未来 5 年内通过资助传染性疾病研究项目等措施，提升美国防范及应对新疫情的能力，并要求各联邦机构将生物防御及战略落实作为科技优先事项。该战略主要包括：对疫情及其他生物威胁的预警；防范传染病暴发及生物事故；明确时间目标，即在疫情发生后的 12 小时内开

展检测、90 天内推出快速诊断方法、100 天内开发疫苗、90 天内基于现有药物研发和验证新疗法，或在 180 天内研发新疗法；快速响应疾病暴发并迅速从疫情及生物事件中恢复等。

2022 年 4 月，国际货币基金组织发布《管理新冠长期风险的全球战略》(A Global Strategy to Manage the Long-Term Risks of COVID-19)。该战略侧重于 4 个关键方面：一是广泛的医疗保健公平；二是加强疾病监测，监控不断演变的病毒；三是从应急反应向可持续和长期反应的转变；四是建立应对未来疾病威胁的统一风险缓解方法。该战略指出，国际社会应认识到流行病融资解决的是全球经济的系统性风险，因此，应拨出更多资金来抗击流行病，加强国内外的卫生系统。2022 年需要 150 亿美元的拨款，此后每年将需要 100 亿美元。

2022 年 6 月，英国前首相鲍里斯·约翰逊(Boris Johnson)宣布为世界银行金融调节基金(Financial Intermediary Fund)提供 2500 万英镑，以帮助全球预防和应对未来大流行病，提升国家、区域和全球层面卫生系统的疾病监控与准备能力。2022 年 8 月，英国政府发布野生鸟类禽流感的缓解策略。该策略是英国环境、食品和乡村事务部(Department for Environment, Food and Rural Affairs, DEFRA)和威尔士政府及动植物卫生局(Animal and Plant Health Agency, APHA)、威尔士自然资源局(Natural Resources Wales, NRW)在国家法律范围内对英国野生鸟类的禽流感采取的政策和方法，并为公众和非政府组织

列出了有关野生鸟类禽流感的问题与预防和解决方案的指南。APHA 还发起了一个由 8 人组成的研究团队，并资助其 150 万英镑，用于开发控制禽流感暴发的新方法和战略。

2022 年 6 月，欧洲议会和理事会就《严重跨境健康威胁条例》(Regulation on Serious Cross-Border Threats to Health)达成政治协议。该条例加强了准备和应对规划，并为灵活、综合的监测系统制定了规则，提高了欧盟及其成员国进行准确风险评估和采取有针对性的应对行动的能力，包括联合采购疫苗和治疗剂等医疗对策。该条例为欧盟提供了一个全面的卫生安全框架，以管理在准备、监测、风险评估、预警和应对方面的联合行动，将使欧盟能够更好地检测、准备和应对未来大流行病或其他严重的健康威胁。

2022 年 9 月，世界卫生组织发布《负责任地使用生命科学的全球指导框架》(Global Guidance Framework for the Responsible Use of the Life Sciences)，呼吁各国领导人和其他利益攸关方减轻生物风险，安全地监管和治理两用研究。这是首个全球性的技术和规范框架，重点考虑生物安全、实验室生物安保和两用研究监督三个加强生物风险管理的核心支柱，为减少生物风险和管理两用研究的国家框架和方法的制定提供了信息，有助于指导生命科学和相关技术在改善全球健康方面发挥安全、有益的作用。

2022 年 11 月，拜登政府宣布促进全球卫生安全的新行动，

加快实施《国家生物防御战略》和《应对生物威胁、加强流行病防备和实现全球卫生安全实施计划》，以防自然、意外和蓄意的传染病威胁。根据新行动，美国将扩大全球卫生安全伙伴关系和双边伙伴关系，继续与西半球的合作伙伴合作，并将在北美和南美地区开展工作，建设覆盖更广泛的卫生安全能力。

3.抗生素耐药性对人类健康的威胁日益严峻，迫使全球各国陆续推出更实质性的应对举措

抗生素耐药性是对全球公共卫生和现代医疗保健最严重的威胁之一，对人类、动植物和环境健康构成严峻挑战和根本性威胁，破坏农业粮食系统的可持续性，甚至被称为无声的大流行病。近年来，世界卫生组织将抗生素耐药性确定为人类面临的十大全球公共卫生威胁之一，并预测到 2050 年抗生素耐药性每年可能导致 1000 万人死亡，比癌症引起的死亡人数还要多。

2022 年 1 月，《柳叶刀》(The Lancet)期刊发表《2019 年细菌耐药性负担：跨国系统分析》(The Burden of Bacterial Antimicrobial Resistance in the WHO European Region in 2019: A Cross-Country Systematic Analysis)报告，提供了最全面的抗生素耐药性统计数据，并指出，2019 年有 495 万人死于抗生素失效。

2022 年 4 月，世界卫生组织、粮农组织、世界动物卫生组织

(World Organisation for Animal Health, OIE)和环境规划署(United Nations Environment Programme, UNEP)制定抗生素耐药性合作战略框架，概述了以上 4 个组织为在全球、区域和国家层面推进针对抗生素耐药性的健康一体化(One Health)应对措施而开展的联合工作，并支持实施《全球抗生素耐药性行动计划》(Global Action Plan on AMR)的五大支柱，以及加强全球抗生素耐药性治理。

2022 年 4 月，新加坡卫生部(Ministry of Health, MOH)、农业食品和兽医局(Agri-Food and Veterinary Authority, AVA)、国家环境局(National Environment Agency, NEA)和新加坡公用事业局(Public Utilities Board, PUB)组成的健康一体化抗微生物耐药工作组制定了一项国家抗微生物耐药战略行动计划。该计划旨在通过教育、监督和风险评估、研究、防控感染和优化抗生素的使用 5 项核心战略，强化抗击抗生素耐药性的行动，优先考虑未来的干预措施，以减少耐药微生物的出现并防止其传播。

2022 年 7 月，美国疾病控制和预防中心在《2022 年特别报告：新冠对美国抗菌药物耐药性的影响》(COVID-19: U. S. Impact on Antimicrobial Resistance, Special Report 2022)报告中得出结论，新冠大流行减缓了美国多年来在抗击抗生素耐药性方面取得的进展，抗生素耐药性的感染率和死亡率较新冠大流行第一年增加了至少 15%。CDC 的首要目标是预防和

准备，其将根据《美国国家应对抗生素耐药细菌行动计划》(U. S. National Action Plan for Combating Antibiotic-Resistant Bacteria, CARB)，通过加强数据系统和共享、继续向医疗人员和机构提供高质量的预防和控制感染培训、优化抗生素的使用和获取、扩大国家废水监测系统的能力，以及加速开发新抗生素和抗真菌药物及治疗学研究五个关键领域来继续引领抗击抗生素耐药性的进展。

2022 年 10 月，世界卫生组织发布全球首份优先真菌病原体清单(Fungal Priority Pathogens List, FPPL)，列出了对公共卫生构成最大威胁的 19 种真菌，旨在进一步推动研究和政策干预，以加强全球对真菌感染和抗生素耐药性的反应。FPPL 清单根据真菌对公共健康的影响和耐药性风险分为关键、高优先级和中等优先级三个等级。世界卫生组织提出需改善对这些优先真菌病原体的反应，防止抗生素耐药性的发展，重点包括加强实验室能力和监测，维持对研究、开发和创新的投资，加强预防和控制公共卫生干预措施。

2022 年 11 月，欧洲疾病预防控制中心(European Centre for Disease Prevention and Control, ECDC)报告表明，欧盟每年有多达 35000 人死于抗菌素耐药性引起的并发症。日益增长的威胁表明，应对抗生素耐药性需要通过“健康一体化”方法，承认人类健康、动物健康和环境之间的相互联系。欧盟委员会计划在 2023 年上半年在拟议的理事会上提出相关建议，

并在欧盟制药立法修订案中加强对抗生素耐药性的行动；2023 年晚些时候，欧盟将根据欧盟健康计划(EU4Health)，与成员国、挪威、冰岛和乌克兰发起 5000 万欧元的抗生素耐药性联合行动。

2022 年 11 月，第三届全球抗菌药物耐药性高级别部长级会议首次讨论了应对全球抗菌药物耐药挑战的目标，将为 2024 年的联合国大会抗生素耐药性高级别会议上的政治承诺铺平道路。会议商定了《马斯喀特部长宣言》(The Muscat Ministerial Declaration)，提出了 3 项全球目标：一是到 2030 年，将农业粮食系统中使用的抗菌剂总量至少减少 30%～50%；二是保存人类医学中极为重要的抗菌药物，停止使用医学上重要的抗菌剂促进动物生长；三是确保到 2030 年，“可及”类抗生素（价格合理、安全且耐药性风险低的抗生素）至少占人类抗生素总消费量的 60%。

4.新兴生物技术帮助监测和检测潜在生物风险

基因编辑、分子生物学等新兴生物技术在检测传染病方面具有极大的应用前景。2022 年 2 月，美国麻省理工学院博德研究所(Broad Institute of MIT)、哈佛大学和普林斯顿大学(Princeton University)的研究人员开发出一种基于 CRISPR 的技术平台 mCARMEN，可以发现样本中的病毒并测量其数量及患者感染他人的能力，其准确度与病毒测序一样。该平台能够区分包括 Delta 和 Omicron 在内的 6 种新冠病毒变体谱系，

还能检测和区分多种人类呼吸道病毒、细菌感染及监测抗生素耐药性。

2022 年 6 月，美国莱斯大学开发出可被蓝光激活的下一代分子钻头，或将彻底改变与超级细菌斗争的局面。研究人员将分子设计成移动的转子，其被蓝光激活时每秒可旋转 200 万～300 万次，再通过对细菌膜的负电荷进行定位来更好地将钻头引向细菌。这些钻头还能有效击穿细菌在其菌落周围建立的保护罩，杀死持久性细胞，延长现有抗生素的使用寿命。

2022 年 9 月，上海同济大学开发出一种能够检测空气飞沫或气溶胶中流感、冠状病毒等常见呼吸道病毒的面罩。该面罩包含一个带有适配体的小型传感器，适配体是一种合成分子，可像抗体一样识别病原体的独特蛋白质。该团队用三种适配体修改了多通道传感器，可同时识别 SARS-CoV-2、H5N1 和 H1N1 上的表面蛋白。当适配体与空气中的目标蛋白结合，高度敏感的离子门控晶体管可在 10 分钟内通过手机提醒佩戴者。

2022 年 11 月，美国科罗拉多州立大学和加利福尼亚州立大学(California State University)开发出一种可插入荧光染料或合成 DNA 的标记颗粒。给蚊子幼虫摄入装载了 DNA 晶体的颗粒，随着蚊子成长，DNA 晶体在其肠道中保持完整，并产生一种可通过实验室技术读取的代码，使研究人员能够对蚊

子进行实时追踪监测和溯源，分析其移动轨迹，控制其行动，对未来的疾病监测应用至关重要，并有可能彻底改变蚊媒疾病的研究方式。

5.对中国的影响与启示

全球生物安全风险演化发展迅速，传统生物安全战略已不能适应新兴生物威胁。生物安全战略升级完善是提高国家安全，促进科学创新，推动经济增长和保障公共利益的基本要求。近年来，美国、英国、澳大利亚、俄罗斯等国对生物技术的重视程度大幅提升并加强了在该领域的战略规划和能力建设，同时快速加强生物安全措施和方法的研究与部署，将生物安全建设和管理体系纳入国家安全战略并加以落实。党的十八大以来，特别是《中华人民共和国生物安全法》颁布以来，中国生物安全防治能力不断增强，维护生物安全基础不断巩固，生物安全建设取得历史性成就。但我们要清醒地看到，加强生物安全建设是一项长期而艰巨的任务，需要把加强生物安全建设摆在更加突出的位置，以总体国家安全观为指导，提高生物安全治理能力。党的二十大报告中明确指出“加强生物安全管理”，要以“十四五”生物经济发展规划颁布的契机，把生物经济特别是生物医药、生物农业、生物制造、生物环保等领域作为“十四五”规划中战略性新兴产业的主攻方向和推进健康中国建设的重要支撑点，通过加快生物技术创新，尽快改善中国原始创新能力较为薄弱，基础

生命科学理论、底层关键共性技术、高端仪器和试剂、生物信息资源等积累不够的不利局面，发展壮大生物企业，大力促进自主创新，力争在部分领域实现“并跑”乃至“领跑”，打造产业链、创新链、价值链、供应链深度融合的生物产业创新生态体系。

中国现有的生物安全风险防治体系仍存在短板弱项，为有效预防生物安全风险和遏制危害，中国应在制定未来的生物安全框架时将重点转向基于风险的态势感知和战略预警；持续推进生物安全领域科技自主化建设，紧跟世界前沿生物安全技术发展，瞄准新一轮世界生物科技前沿，加强监测、分析和预警能力建设。在网络生物安全技术、基因编辑、传染病、神经科学、合成生物学等新兴生物技术领域和重大生物医疗装备方面加大创新投入，建立稳健的技术制高点；加强生物实验室的风险管理，对实验室人员进行定期的安全技能培训，为维护和塑造国家生物安全提供有力保障。

（五）重大新发突发传染病疫情叠加，世界各国加速启动疫苗研发

2022 年，多国相继取消防疫限制，世界进入后疫情时代。然而，在新冠疫情反复延宕的大背景下，新冠变异株追踪、新冠口服药、新冠疫苗等生物技术加速创新，成为引领新一轮生物产业革命的绝对主角。同时，越来越多的病毒、细菌和

疾病加速“越界”侵袭，猴痘、脊髓灰质炎、埃博拉、禽流感、登革热、霍乱等重大新发突发传染性疾病在全球范围内频繁出现，严重扰乱国际秩序，威胁人类健康和安全。在此背景下，可以有效针对某一类病毒家族的通用疫苗或提供一种有效的防护策略，成为下一阶段的技术攻关重点。

1.多种传染病疫情频发，威胁人类和动物健康

新冠变异株 Omicron 取代 Delta 成为全球主流毒株并仍在持续变异，BA.5、BA.4.6、BQ.1.1、BQ.1、BF.7、BA.2.75.2、BA.2.75、BA.4 等主要的奥密克戎变异毒株在全球范围内加速传播，引起世界卫生组织关注。2023 年年初，一种名为 XBB.1.5 的奥密克戎新亚变体在美国兴起，至 2023 年 1 月已占该国所有新冠病例的 43%，且传播迅速。新冠大流行扰乱了部分常规的免疫接种，使公共卫生风险急剧上升。伴随着新冠病毒的传播，脊髓灰质炎、霍乱、疟疾等人类疾病和非洲猪瘟、口蹄疫等动物疫病猖獗；多种人畜共患病的出现更是为疫情防控阻击战增添新的难度。根据世界卫生组织的数据，人畜共患病占过去 40 年人类新发疾病的 75%，而在人际传播的所有病原体中，有三分之二是人畜共患的。2022 年 5 月，Mpox（旧称猴痘）于英国暴发，随后，世界卫生组织宣布 Mpox 构成国际关注的突发公共卫生事件(Public Health Emergency of International Concern, PHEIC)。截至 2022 年 12 月，全球已经有 110 多个国家和地区报告了超 8.3 万例 Mpox 确诊病例，

66 例死亡病例。2022 年 2 月，美国检测出高致病性禽流感病毒 H5N1。除北美外，此次禽流感疫情还袭击了英国、法国、德国、日本等欧亚多国。欧洲疾病预防和控制中心的数据显示，这是欧洲有史以来经历的最大规模的禽流感疫情。2022 年 4 月起，刚果（金）、加纳和乌干达接连宣布暴发埃博拉疫情，其中乌干达的埃博拉疫情由相对罕见的苏丹埃博拉病毒株造成，病死率为 33%且目前尚无获批疫苗。2022 年 9 月，尼泊尔遭受迄今最严重的登革热疫情，感染和死亡风险仍在不断升级。

2.通用冠状病毒疫苗成为研发新趋势，mRNA 疫苗技术颠覆全球疫苗产业格局

疫苗是有效预防高致死率和缺乏治疗方案的传染病的必要手段，被视为公共卫生领域最伟大的成就之一。根据世界卫生组织的统计，截至 2022 年 12 月，全球共开展了 375 款新冠病毒疫苗研发，其中处于临床试验阶段的疫苗有 176 款，另外 199 款疫苗尚处于临床前开发阶段。处于临床试验阶段的疫苗以核酸疫苗（RNA 疫苗和 DNA 疫苗）居多，占总数的 33%；其次是蛋白亚单位疫苗(Protein Subunit, PS)，占总数的 32%。新冠疫苗的未来研发技术路径，主要还是聚焦于核酸疫苗和蛋白亚单位疫苗两大领域。

当前，新冠病毒的不断变异冲击着现有疫苗的有效性，使疫苗研发更加复杂。同时其他未知冠状病毒也可能随时出现，

为更好地应对这些威胁，通用冠状病毒疫苗已经成为各政府机构和疫苗制造商的研究重点。世界卫生组织总干事谭德塞(Tedros Adhanom Ghebreyesus)称，开发第二代疫苗来阻止或减少感染将成为下一步疫苗研发重点，而最理想的解决方案是研发出一种覆盖现有的及未来可能出现的所有变种的通用冠状病毒疫苗。美国总统首席医疗顾问安东尼·福奇(Anthony Fauci)在白宫发表关于下一代疫苗研发方向的演讲时也提倡使用通用冠状病毒疫苗。2022 年 1 月，美国沃尔特·里德国家军事医疗中心(Walter Reed National Military Medical Center, WRNMMC)开始对通用冠状病毒疫苗进行人体临床试验。2022 年 7 月，美国流行病防备创新联盟(Coalition for Epidemic Preparedness Innovations, CEPI)拟投资 3000 万美元，用于开展一种新型纳米颗粒疫苗的临床试验，而该疫苗或可提供针对一系列冠状病毒的保护；2022 年 10 月，日本政府拟为生物医药先进疫苗研发战略中心(Strategic Center of Biomedical Advanced Vaccine Research and Development for Preparedness and Response, SCARDA)投资 20 亿美元，以期实现在发现潜在大流行病原体的 100 天内开发出可供大规模生产的诊断测试、治疗方法和疫苗。该中心首批获批的两个项目为开发通用冠状病毒疫苗和针对与 SARS 相关的疫苗。2022 年 11 月，美国宾夕法尼亚大学佩雷尔曼医学院(Perelman School of Medicine at the University of Pennsylvania)研究团队

开发出针对所有 20 种已知流感病毒亚型的实验性 mRNA 疫苗，可提供对其他致命性流感病毒毒株的广泛保护，或成为预防冠状病毒等具有大流行潜力的病毒的普遍措施。

随着疫苗研究与开发的持续进步，疫苗不仅能够用于预防传染病，还可以预防甚至治疗癌症等非传染性疾病，且这一作用日益明显。mRNA 疫苗技术对免疫功能受损的患者来说更安全且这种疫苗可以快速制造，更具成本效益，已被证明是在新冠大流行期间开发高效疫苗的最快途径之一。据美国食品药品监督管理局分析，mRNA 疫苗的效力高达 95%。2022 年 2 月，深圳市瑞吉生物科技有限公司联合武汉大学开发出冻干脂质纳米颗粒(LNP)mRNA 新冠疫苗，在 4 摄氏度和 25 摄氏度下均表现出长期储存稳定性，有助于解决当前 mRNA 疫苗的储存和运输难题。这是全球首款冻干 mRNA-LNP 新冠疫苗，具有很好的免疫原性和可及性。瑞吉生物正积极推进其临床试验。2022 年 6 月，美国制药公司莫德纳计划在英国开设 mRNA 创新和技术中心，开发针对多种呼吸道疾病的尖端 mRNA 疫苗，包括可预防多种变体的新冠疫苗，帮助英国应对未来潜在的新兴健康威胁。2022 年 7 月，美国国家过敏和传染病研究所(National Institute of Allergy and Infectious Diseases, NIAID)启动了一项评估预防尼帕病毒感染的实验性疫苗效果的早期临床试验。该试验疫苗使用原型病原体，基于 mRNA 平台，由美国制药公司莫德纳与 NIAID 疫苗研究中

心合作研发。2022年7月，美国陆军传染病医学研究所(United States Army Medical Research Institute of Infectious Diseases, USAMRIID)与生物制药公司CureVac合作验证了mRNA抗体用于开发传染病疗法的能力，有助于研发下一代用于预防和治疗致病性痘病毒感染疾病的对策。此外，mRNA疫苗技术还有可能为治疗癌症、流感、痴呆症和心脏病等诸多疾病带来革命性突破，一些世界领先的生物技术公司已经开始探索利用mRNA技术开发新型疫苗和免疫疗法。2022年8月，美国Gritstone Bio公司研发出一款以异源黑猩猩腺病毒(ChAd68)和自扩增mRNA(samRNA)为基础的新抗原疫苗，可诱导强烈、持久且有效的肿瘤新抗原特异性CD4+和CD8+T细胞应答，增强免疫检查点抑制剂的疗效。该疫苗安全性和耐受性均良好，为提高癌症疫苗的有效性指明了前进方向。2022年11月，默沙东与莫德纳计划共同开发和商业化mRNA-4157/V940。该疫苗是莫德纳开发的个性化癌症疫苗，目前正在与默沙东的抗PD-1疗法KEYTRUDA联用进行2期KEYNOTE-942临床试验，用于高危黑色素瘤患者的辅助治疗。

3.对中国的影响与启示

未来，重大新发突发传染病疫情和动物疫病仍将呈多发性态势，危害人民健康，造成巨大经济损失。在所有病毒家族中，冠状病毒具有极高的流行风险。SARS-CoV、MERS-CoV和SARS-CoV-2三种冠状病毒的出现在过去二十年中导致了3次

严重的人类疫情。未来，冠状病毒家族引发大流行病的可能性极大。因此，开发有效的泛冠状病毒疫苗和药物成为全球的重要需求及抗击未来大流行病的关键。

中国应进一步加强病毒研究，了解潜在的高危病原体的发病机制、传播途径和可能的进化路径；优先考虑具有大流行潜力的病原体，改善疫苗研发战略决策，将资源集中于开发最有效的关键技术和方法；加强在疫情防备研发方面的投资力度，促进更有效的广谱疫苗策略和诊疗方法的开发，为公众提供及时的保护；开展务实有效的国际合作，加快疫苗研发和生产进程，增强国家应对高优先级传染病的能力，促进生物科技的和平利用和普惠共享。

二、合成生物学

2022 年，合成生物学产业快速增长，技术进步、政府投资力度加大等因素推动合成生物学产业发展，有利于市场规模的进一步扩大。合成生物学理论基础和技术研发不断取得突破性进展，在医药、能源、环保和食品等诸多领域展现出极大的应用价值，为农业带来变革性技术，为生物医学带来范式转变，为工程化的新生物系统或为实用目的重新设计现有生物系统提供了先进方法，有助于加速绿色生物制造，开启新造物时代。然而，合成生物学在带来经济和社会效益的同时也带来两用风险，威胁全球的生物安全和生物安保，亟须完

善的监管政策或制度加以约束和规范。

（一）合成生物学产业发展概述

合成生物学是一个新兴的科学领域，涉及用于各种应用的人工生物系统的设计和构建。合成生物学帮助革新现有技术，涉及生物计算、多重诊断、基因组编辑、活体疗法和生物基化学品等多个领域，且具有开发粮食作物和绿色能源来源的潜力。合成生物学的巨大潜力促使世界各国的制药和生物技术行业投资于合成基因、蛋白质和其他生物分子等方面，以开发高性能和可持续的合成生物学解决方案，从而推动着合成生物学市场的快速增长。

根据全球市场情报和咨询机构一致的市场洞察力(Coherent Market Insights)发布的《2022 年合成生物学市场趋势分析》(Synthetic Biology Market 2022 Analysis by Market Trends)报告显示，2022 年全球合成生物学市场的价值为 139 亿美元，预计到 2030 年将达到 1004 亿美元，2022 年至 2030 年的复合增长率为 28.0%。驱动合成生物学市场呈指数增长的因素主要有 3 点：一是疫苗开发。合成生物学极大增加了新冠疫苗的研发速度，许多其他候选疫苗也正处于研发状态。二是技术整合。AI 等技术与合成生物学的整合为整个市场带来巨大的增长机会，市场参与者正利用 AI 寻找设计基因电路等方面的新方法，在合成生物学市场的增长中发挥了关键作用。三

是食品改良。糖尿病、癌症和其他健康疾病发病率的增加提高了消费者的健康意识，使植物性肉类和代替肉类的需求急剧上升，为合成生物学市场带来有利增长。

北美和欧洲的合成生物学市场增速明显。北美拥有全球最大的合成生物学市场份额，以及高度先进的基因组研究中心和大量的合成生物学公司，其合成生物学市场正加速进入工业、食品和农业以及环境领域。根据美国国家生物技术信息中心(National Center for Biotechnology Information, NCBI)的报告，美国政府每年提供约 2.2 亿美元用于合成生物学的研究和开发。预计到 2030 年，北美地区仍将是合成生物学的主导市场。欧洲各国也在合成生物学领域开展了多个研究项目，市场参与者专注于研发投资。欧洲在基因组测序领域的研发投入仅次于北美地区，排名第二。根据市场数据预测公司(Market Data Forecast)的数据，2022 年亚太地区合成生物学市场规模为 14.8 亿美元，预计将以 26.8%的复合年增长率增长，到 2027 年将达到 48.6 亿美元。随着政府支持和资金投入的增多，亚太地区的合成生物学初创企业正在兴起，其合成生物学市场将拥有丰厚的增长机会。此外，DNA 测序和合成成本的下降也将推动合成生物学市场增长。预计到 2030 年，亚太地区将成为全球合成生物学市场增长最快的地区。

（二）合成生物学成为世界主要经济体着重关注和发展的领域

1.各国家和地区加大对合成生物学的政策支持力度

合成生物学正在推动制造业、医疗保健、信息存储、环境修复、材料等方面的创新，被认为是正在进行的第四次工业革命中的十大突破性技术之一，且最有可能改变世界。美国生物技术利益共同体(The Biotechnology Community of Interest)提出合成生物学等先进生物技术或在未来 30 年从根本上改变经济运行与国家防御方式。

2022 年 2 月，印度政府科技部生物技术司（Department of Biotechnology Ministry Of Science&Technology，DBT）发布关于合成生物学的前瞻性文件草案，对合成生物学及其知识产权将如何适用于生产过程和产品作出定义，并提出政府应制定一项合成生物学国家政策。

2022 年 4 月，美国情报高级研究计划局(Intelligence Advanced Research Projects Activity, IARPA)正在寻找有关表征生物制造材料的结构、功能和合成管道的方法、数据库、途径和适当指标的信息，以助力生物制造业的发展。生物制造业可以生产多种类型的材料，展示出前所未有的灵活性。到 2050 年，生物材料有可能取代多达 60%传统衍生材料的投入和 50%支持美国国防需求的工业化学品的原料。生物制造的替代供应来源可使制药、工业化学品、能源、石油和石油副产品及生

物材料的生产成本更低、效率更高。此外，随着生物制造作用和影响力的扩大，新方法和预测能力对于确保国家安全利益也越发重要。

2022 年 5 月，中国国家发展和改革委员会公布《“十四五”生物经济发展规划》，提出加强原创性、引领性基础研究，瞄准合成生物学等前沿领域，实施国家重大科技项目和重点研发计划；开展生物领域关键核心技术攻关和前沿生物技术创新，加快发展高通量基因测序技术，加强微流控、高灵敏等生物检测技术研发，推动合成生物学技术创新。

2022 年 7 月，美国通过《2022 年芯片和科学法案》(CHIPS and Science Act of 2022)，指出美国国家科学基金会将在未来 5 年获得 810 亿美元，其中一部分资金将用于建立和支持国家科学基金会技术创新理事会。该理事会将负责每年审查和更新战略挑战和关键技术重点领域两大名录，其更新的最新十大关键技术重点领域中包含合成生物学。2022 年 9 月，美国总统拜登签署“关于推进生物技术和生物制造创新以实现可持续、安全和可靠的美国生物经济”的行政命令，并启动了《国家生物技术和生物制造计划》(National Biotechnology and Biomanufacturing Initiative)。

2022 年 8 月，欧洲食品安全局(European Food Safety Authority, EFSA)发布评价报告，评估了通过合成生物学获得的微生物用于食品和饲用的风险，以及现有安全评价指南的适用性，并

对指南提出了更新建议。EFSA 转基因生物专家组建议，未来应制定国际公认的指南和协调框架；继续对风险评估方法进行研究；鼓励在整个合成生物设计过程中适当考虑食用和饲用安全，以加强其风险评估并减少所需数据量。

2.各国加紧对合成生物学的研发投入

据麦肯锡研究显示，未来全球物质投入中的 60%和全球疾病总负担的 45%可通过合成生物学技术解决。未来 10～20 年，合成生物学领域每年带来的直接经济效益将达到 1.8 万亿～3.6 万亿美元。合成生物学正在改变多个行业，并帮助解决紧迫的社会挑战。澳大利亚联邦科学与工业研究组织(Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, CSIRO)在《我们的未来世界》(Our Future World)报告中确定了 7 个全球大趋势，指出合成生物学可帮助实现第二个大趋势，即更精简、更清洁和更环保。新美国安全中心(Center for a New American Security, CNAS)在《重振：生物技术和美国产业政策》(Regenerate: Biotechnology and U. S. Industrial Policy)报告中指出，合成生物学和农业交叉领域的新技术有望重振美国的经济增长引擎。

2022 年 4 月，澳大利亚联邦科学与工业研究组织计划在未来 5 年内投资 5000 万美元用于先进工程生物学等 4 个新项目。先进工程生物学项目旨在开发强大的生物设计和原型制作新工具，有助于实现 CSIRO 合成生物学路线图中确定的每年

提供 5 万个工作岗位和创造 300 亿美元收入的目标，并帮助确保澳大利亚成为工程生物学的世界领导者。

2022 年 6 月，英国国防部启动国防科学与技术组合(The Defence Science and Technology Portfolio)项目，计划在 2022—2026 年期间投资 20 亿英镑用于合成生物学和工程生物学等项目，以加快下一代军事能力的尖端研究和开发（R&D），为英国国防和安全提供新的能力，解决历史上难以解决的国防问题。

2022 年 7 月，英国国家合成生物学工业转化中心(The UK's National Centre for the Industrial Translation of Synthetic Biology, SynbiCITE)收到来自英国风险投资公司 SynBioVen 的 550 万英镑资助承诺。这笔资金将使该中心能够继续支持合成生物学初创企业和中小企业，加强英国新兴的生物经济，并帮助释放合成生物学的社会效益。2022 年 7 月，英国国防科学与技术实验室(Defence Science and Technology Laboratory, DSTL)发起国防和安全加速器(Defence and Security Accelerator, DASA)竞赛，寻求通过合成生物学解决一系列国防和安全挑战，以提高相关能力。该竞赛也接受美国国防部管辖。

2022 年 9 月，澳大利亚新南威尔士州政府为一项新的合成生物学和生物制造发展计划投资 600 万澳元（约合 390 万美元），旨在支持合成生物学和生物制造研究的基础设施、设备和计

划共享，以实现研究转化和小规模制造。该计划有助于创造就业机会，并为工业提供动力。2022 年 9 月，澳大利亚研究理事会合成生物学卓越中心(The ARC Centre of Excellence in Synthetic Biology, ARC CoESB)与美国生物技术公司 Twist Bioscience 建立伙伴关系。Twist Bioscience 专有的 DNA 制造工艺、质量控制和规模可协助开发新型生物体，并为 CoESB 提供行业领先的 DNA 合成产品，提高其塑造新产品的能力。2022 年 9 月，美国启动国家生物经济和生物制造计划(National Biotechnology and Biomanufacturing Initiative, NBBI)。根据该计划，美国卫生与公共服务部将与国防部合作，在五年内对生物工业国内制造基础设施投资 10 亿美元，使私营和公共部门的合作伙伴能够扩大对国防供应链重要产品的制造能力，如关键化学品；通过弗雷德里克国家实验室(Frederick National Laboratory)的生物制药开发计划(Biopharmaceutical Development Program)等项目，扩大细胞工程能力和平台，并建立合成生物学方法，以开发一种治疗急性骨髓性白血病的新细胞系。2022 年 9 月，美国能源部(DOE)为生物能源研究拨款 1.78 亿美元，以推动可持续技术的突破，从而改善公众健康，帮助应对气候变化，改善食品和农业生产，并创造更具韧性的供应链。其中 9970 万美元用于可再生生物能源和生物材料生产的研究，以开发新的生物生产平台，包括合成生物学研究和关于生物能源作物、工

业微生物和藻类及微生物群落的计算模型。

（三）合成生物学研究进展

合成生物学是工程和科学交叉的领域，旨在将工程原理应用于生命系统的设计和修改中，开发出用于设计生命组成部分的工具和框架，使生物体获得新的能力。这种合成生物系统的能力正在为制造业、医疗保健、能源生产、信息存储、环境修复、材料等方面的创新应用提供新方法，有望彻底改变经济和社会，帮助克服全球挑战，造福人类和地球。

1.合成生物学与基础元件

2022 年 1 月，美国哈佛大学韦斯生物启发工程研究所(Wyss Institute)和麻省理工学院(MIT)的研究团队开发出内置于 RNA 中的新型无细胞蛋白质表达平台 eToeholds，仅当存在细胞特异性或病毒 RNA 时，才能表达连接的蛋白质编码序列。该设备是一种工程控制元件，为更具针对性的 RNA 治疗、体外细胞和组织工程方法，以及对人类和其他高等生物体中各种生物威胁的感知提供了多种机会。相关研究成果发表于《自然·生物技术》(Nature Biotechnology)期刊。

2022 年 1 月，美国明尼苏达大学(University of Minnesota System, UMN)研究人员揭示出融合与分化是合成细胞的关键功能，并为在合成细胞中工程组合基因线路提供了一套新工具。该研究为生物工程和自然途径研究提供了工具，同时为

构建活的人工细胞铺平道路。

2022 年 3 月，美国科学家基于酿酒酵母生物模式建立了启动子深度神经网络模型。研究人员通过观察数百万个随机取样的启动子序列及其在酵母中的测量表达水平，发现其设计的卷积神经网络模型具有良好的预测性能，可用于基因表达工程的序列设计。研究团队利用该模型评估了不同场景下基因表达进化的适应性，为表达调控序列的设计和表达调控基本问题提供了通用框架，可促进合成生物学、细胞和基因治疗及代谢工程进一步发展。相关研究成果发表于《自然》期刊。

2022 年 7 月，美国华盛顿大学麦凯尔维工程学院(The McKelvey School of Engineering at Washington University)研究团队开发出一个合成生物学平台，从基因工程细菌中生产强壮、坚韧并能吸收能量的合成肌肉纤维，其方式与实物非常相似。该团队接受了来自美国国家科学基金会提供的约 46 万美元资助，将继续探索可能改善材料性能的基因变化。

2022 年 9 月，英国布里斯托大学(University of Bristol)开发出可执行活细胞能量产生和基因表达等关键功能的系统。该团队将大肠杆菌和铜绿假单胞菌浸泡在由溶菌酶和蜜蜂素混合的黏液中，使菌落的细胞膜破裂，内容物溢出并被液滴捕获产生膜包被的原始细胞。该细胞能够通过糖酵解产生能量储存分子 ATP，实现基因的转录和翻译等复杂过程。该活性物质组装方法为自下而上的共生生物、合成细胞结构的构建

提供了机会，以便在合成生物学的诊治领域，以及生物制造和生物技术中进行开发，未来还可改善用于生物燃料和食品加工的乙醇生产。相关研究成果发表于《自然》期刊。

2022 年 9 月，中国科学院深圳先进技术研究院团队基于细菌迁移过程中噬菌体感染宿主的进化动力学，通过对噬菌体复制包装及诱导突变等关键功能模块的设计和改造，构建出空间噬菌体辅助连续定向进化系统(SPACE)。该系统简便、高效、效果可视化，具有大规模优化改造生物元件的平台性能力。该研究是通过理性设计和构建生命体系，最终延伸到工程应用的定量合成生物学研究的例子。未来，研究团队将利用 SPACE 平台性技术，进化一系列应用于医药、农业、化工等领域的重要生物大分子，力求解决科研和产业中的实际问题。相关研究成果发表于《分子系统生物学》(Molecular Systems Biology)期刊。

2022 年 9 月，中国科学院深圳先进技术研究院的科研团队开发出可有效提高人工细胞工厂合成效率的 mPKSeal 策略。该研究通过模拟天然模块聚酮合酶(PKS)高度有序的组装方式，利用其中研究较多的Ⅰ型 cis-AT 聚酮合酶对接域，开发出 mPKSeal 多酶组装策略，并用于虾青素合成途径酶的组装，使虾青素的产量最高提高了 2.4 倍。mPKSeal 策略不局限于两种酶的组装，而是可拓展为同一体系中的多种酶有序组装，且潜在的组装元件达到上万个，可为生物催化、代谢工程及

合成生物学等相关领域提供更广泛有效提高合成效率的解决方案。相关研究成果发表于《自然·通讯》(Nature Communications)期刊。

2.合成生物学与医药研发

2022 年 1 月，美国纪念斯隆·凯特琳癌症中心(Memorial Sloan Kettering Cancer Center)开发出一种新型 CAR-T 细胞，可表达一种酶，这种酶能在肿瘤部位原位激活系统给药的小分子前药。这些合成的酶武装的杀伤细胞通过小分子前药表现出增强的抗癌活性。该模块化平台可结合靶向细胞和小分子疗法来治疗癌症和潜在的各种其他疾病。

2022 年 1 月，日本理化学研究所(RIKEN)开创性研究集群(Cluster for Pioneer Research, CPR)领导的国际研究团队使用过渡金属催化剂在癌细胞附近高效制造出抗癌药物所需的苯环，通过使用无毒物质，只在肿瘤部位将苯环结合在一起形成活性抗癌药物，这些药物的抗癌活性增加了 1000 倍。这是首个使用治疗性体内合成化学来制造抗癌物质的研究，是制药和药物研发的范式转变。该技术还有望在体内合成各种其他分子，将成为未来癌症治疗的强大平台。相关研究成果发表于《自然·通讯》期刊。

2022 年 3 月，德国马克斯·普朗克医学研究所(Max Planck Institutes)和英国布里斯托大学开发出不包含任何遗传信息的人工新冠病毒粒子，并发现了刺突蛋白转换机制。该研究

有助于全面了解新冠病毒的发病机制和感染背后的分子机制，可促进靶向疗法、疫苗或其他预防措施的开发。

2022 年 4 月，美国耶鲁大学的科学家开发出一种新的合成生物学技术，可追踪不同生物体中以前未被探知的基因和个体代谢。该团队利用计算生物学和 DNA 合成创建出合成遗传元素，并用其重新设计了控制不同生物体功能的基因序列及其启动子，以便在各种宿主生物体中激活遗传途径，使研究人员能确定其分子功能。该团队正尝试利用该工具探索数千种以前未知的遗传途径，为使用全新的合成生物学发现引擎来识别新的天然产物奠定基础。相关研究成果发表于《细胞》(Cell)期刊。

2022 年 4 月，加拿大多伦多大学的研究团队开发出无细胞合成生物学寨卡病毒检测平台 PLUM。该平台结合了一种无细胞、基于纸张的测试和一种可用于现场的配套设备，允许使用基于图像的颜色分析（紫色为阳性，黄色为阴性）收集数据，并能显示多达 384 个样品的结果，诊断准确率为 98.5%。该平台可以运输并准确检测患者样本中的寨卡病毒，是在创建更方便和分散的检测方面迈出的重要一步。相关研究成果发表于《自然 •生物医学工程》(Nature Biomedical Engineering)期刊。

2022 年 6 月，英国伦敦帝国理工学院(Imperial College London)开发出模仿生物细胞自然特征的人工细胞。生物细胞是高度

动态和反应性的，可根据不同环境改变其内部材料的排列方式。研究人员使用“自下而上的组装”方法来开发带有子区的人造细胞，这些细胞可以通过改变其内部组织来应对环境中的化学刺激。生产这种细胞结构一直是合成生物学的最终目标之一，或对理解生物学、治疗疾病和药物输送有重大意义。相关研究成果发表于《美国化学学会——纳米》(ACS Nano)期刊。

2022 年 7 月，美国洛克菲勒大学(The Rockefeller University)利用细菌基因产物的计算模型开发出一种全新的抗生素 cilagicin，可杀死对其他抗生素有耐药性的细菌。研究人员在基因序列数据库中搜索有希望杀死其他细菌的细菌基因，cil 基因簇与其他参与制造抗生素的基因接近，研究人员适时地将其相关序列输入一个算法，该算法提出了一些可能产生的 cil 化合物，其中合成化合物 cilagicin 被证明是一种有效的抗生素。该研究是计算生物学、基因测序和合成化学共同解开细菌进化秘密的一个例子。相关研究成果发表于《科学》期刊。

2022 年 7 月，德国法兰克福大学(Goethe University Frankfurt)、美国密歇根大学(University of Michigan, UM)和马里兰大学研究团队开发出更环保、有效的下一代抗生素生产方法。研究人员对可产生抗生素红霉素的微生物进行基因改造，用一个额外的氟原子组装抗生素，以改善药物特性，再利用蛋白质

工程制造具有氟原子的新化合物。该研究为开发新抗生素及抗病毒和抗癌药物提供了更有效的前进道路。相关研究成果发表于《自然·化学》期刊。

2022 年 8 月，英国布里斯托大学的研究团队开发出新型 DNA 修复试剂盒，在来自患者的肾细胞中修复了导致儿童和年轻人衰弱性遗传性肾病的基因突变。位于特殊肾脏细胞表面的蛋白质 podocin 对肾功能至关重要，但有缺陷的 podocin 会滞留在细胞内，最终破坏足细胞，且这种疾病无法通过药物治愈。研究人员利用合成生物学技术重新设计了杆状病毒，并在其表面修饰蛋白质，使其能有效地进入人类细胞。经改造的杆状病毒可传递比以前更大的 DNA 片段，并将其构建到一系列人类细胞的基因组中。通过 DNA 修复试剂盒，该团队通过 CRISPR-Cas 系统向一个单一的工程杆状病毒的基因组中插入了健康的 podocin 基因副本，以逆转致病表型，恢复细胞表面的 podocin。相关研究成果发表于《核酸研究》(Nucleic Acids Research)期刊。

2022 年 8 月，以色列魏茨曼科学研究所科研团队首次在子宫外培育出完全人工合成的小鼠胚胎。这些胚胎并不是精子和卵子的产物，而是完全由培养在培养皿中的干细胞发育而来，且其在一个体外构建的“人造子宫”中生长。这些“合成胚胎”可在“人造子宫”中生长到第 8.5 天，并成功发育出形态良好的大脑、神经管、肠道及正常跳动的心脏等组织，且

合成胚胎和天然胚胎的基因表达模式的相似度高达 95%。该研究为发育生物学的基础研究打开新大门。相关研究成果发表于《细胞》期刊。

2022 年 9 月，美国斯坦福大学微生物组治疗计划(The Microbiome Therapies Initiative, MITI)团队通过单种细菌体外培养，首次合成了名为 hCom1 的人类肠道微生物组。在此基础上，研究人员又合成了定植抗力显著高于 hCom1，且在菌群组成上更加接近人类肠道微生物组的 hCom2，可初步作为人类肠道微生物组模型。该研究通过合成人工微生物组，可研究特定菌群对肠道菌群系统的作用，还能以工程微生物组的疗法治疗相关肠道疾病，进一步探究肠道菌群在人体疾病当中的功能，未来应用于临床的前景巨大。相关研究成果发表于《细胞》期刊。

2022 年 11 月，英国剑桥治疗免疫学与传染病研究所(Cambridge Institute of Therapeutic Immunology and Infectious Disease, CITIID)使用新的人工酶成功杀死活新冠病毒。研究人员设计、合成和筛选出一系列人工酶 XNAzymes，能够分别靶向新冠病毒的 ORF1ab、ORF7b、刺突和核衣壳的 RNA 序列。其中三种人工酶经过进一步设计，可自组装成具有增强生物稳定性的催化纳米结构，能在生理条件下切割基因组 SARS-CoV-2 RNA，当转染到细胞中时，可抑制真正的新冠病毒的感染。同时，XNAzymes 具有高度特异性，可防止类似

的、不太准确的分子疗法可能引起的一些“脱靶”副作用，如肝毒性等。该研究证明了 XNAzymes 为快速生成抗病毒试剂提供平台的潜力。相关研究成果发表于《自然•通讯》期刊。

3.合成生物学与农业和食品

2022 年 8 月，德国 Bluu Seafood 公司对鱼进行“一次性”鱼体活检，再利用干细胞技术在实验室环境中开发出完整的鱼种细胞系。该公司推出了其第一批成品，即由实验室培养的鱼细胞制成的鱼条和鱼丸，均富含动物蛋白。“永生”细胞是创造可持续合成海产品的真正推动力，一旦使用真正的鱼细胞创造了最初的生物量，后续便可自给自足，且这个过程中没有使用真正的鱼或转基因生物。目前，该公司正在准备为亚洲、欧洲和北美主要市场监管审批程序做准备。

2022 年 9 月，华中农业大学研究团队利用已获得的第一代杂合体（F0 代）少刺鱼，经过雌雄交配繁育出完全没有肌间刺的武昌鱼（团头鲂）苗种（F1 代）。该团队预计于 2023 年进一步开展无刺鱼遗传稳定繁育工作，新种质性状稳定并取得国家相关认证后可以大规模推广。

4.合成生物学与工业生产

2022 年 1 月，美国加利福尼亚大学伯克利分校和明尼苏达大学的研究人员通过改造细菌，使其能通过葡萄糖代谢工程产生易于脱氧为碳氢化合物的化工前体，且所需能量更少。这

种化工前体可作为化石燃料的可持续替代“生物石油”，用于聚合成塑料、制造柴油等产品。相关研究成果发表于《自然·化学》(Nature Chemistry)期刊。

2022 年 2 月，美国西北大学(Northwestern University)和兰扎科技公司(LanzaTech)研究人员成功利用细菌分解废弃的二氧化碳，制造出有价值的工业化学品。研究人员开发出一种新的气体发酵工艺，并使用合成生物学工具对一种细菌菌株进行基因改造，成功证明了该细菌将二氧化碳转化为丙酮和异丙醇的能力。该成果不仅能从大气中清除温室气体，还能减少因生产丙酮和异丙醇使用的化石燃料。与传统工艺相比，该工艺可减少 160%的温室气体排放。该方法有望用于创造更多有价值的化学品。相关研究成果发表于《自然·生物技术》期刊。2022 年 6 月，德国德累斯顿工业大学(Dresden University of Technology, TUD)和莱比锡大学(Leipzig University)的科学家通过研究，首次阐明了蓝藻菌素的生物合成途径，还发现了一种新的呋喃内酯合成酶，该酶有望作为一种催化工具用于该类化合物的生物合成。相关研究成果发表于《自然·化学生物学》(Nature Chemical Biology)期刊。

2022 年 9 月，丹麦技术大学(DTU)和美国加利福尼亚大学伯克利分校的研究团队对酵母菌进行基因编辑，以生产并提纯文多林(Vindoline)和长春花碱(Catharanthine)，再通过偶联生成抗癌药物长春碱(Vinblastine)。该研究是有史以来在微生物

中重编程最长的生物合成途径，显示出合成生物学在药物生产方面的潜力，有望开创一个更经济、可持续且不依赖养殖/种植的药物生产新途径。相关研究成果发表于《自然》期刊。

2022 年 9 月，华中科技大学和西北大学的研究团队通过合成生物学开发出一类全新人工酶生物催化剂“三重态光酶”。该团队将合成化学发展的二苯甲酮类优异光敏剂通过基因密码子拓展技术定点插入到选定蛋白的手性空腔中，构建含非天然催化活性中心的人工光酶 TPe，并通过光酶的定向进化获得突变体 TPe4.0。该成果融合了化学合成的天然反应性和生物合成的精准高效性两方面优势，将助力绿色生物制造，推动传统化学化工生产向生物化工生产演进。相关研究成果发表于《自然》期刊。

2022 年 9 月，中国农业科学院和中国科学院的研究团队揭示了几丁质生物合成的完整过程，并阐明了尼克霉素抑制几丁质生物合成的机制。该团队确定了几丁质生物合成的关键步骤：几丁质合成酶(PsChs1)与底物结合、新生成的几丁质链延伸、产物通过跨膜转运通道释放至细胞外。该研究为靶向几丁质精准设计的绿色农药开发提供了基础性、关键性信息。相关研究成果发表于《自然》期刊。

5.合成生物学与新材料

2022 年 7 月，英国朴茨茅斯大学(University of Portsmouth)团队受帽贝启发培育出具有极高强度的复合生物材料。帽贝是

小型水生软体动物，其牙齿中含有一种坚硬而柔韧的纤维组织甲壳素，强度与碳纤维等人造物质相当。该团队成功在实验室中模拟了牙齿的形成，并生产出半厘米宽的生物材料样品，或能进一步提升材质。该生物材料可与合成材料的强度和灵活性相媲美，但在制造时不会像合成材料一样产生有害废物。相关研究成果发表于《自然·通讯》期刊。

2022 年 7 月，荷兰埃因霍芬理工大学(Eindhoven University of Technology)科学家创建出可通过生物力学线索控制和完善类器官的成熟度的人工纳米环境。研究人员将含有超分子的尿素-嘧啶酮的分子构件设计到人工纳米环境中，用于封装肾脏器官。这些尿素-嘧啶酮分子相互识别并自我组装成纤维状的超级结构，类似于天然组织的纤维状成分。通过编码从溶液到凝胶状态的延迟转换，人工纳米环境有可能在溶液状态下以纤维状的超结构进入肾脏器官。该研究为调控肾脏器官的专业化和成熟度提供了新机会，或使肾脏器官离临床更进一步。

2022 年 8 月，美国约翰斯·霍普金斯大学研究团队设计出能模仿自然基因网络复杂行为的合成化学系统。该简化基因系统通过使用 DNA、RNA、一种聚合酶及一种降解 RNA 的 RNA 酶，随环境变化而适应和重置，就像体内的自然基因一样。科学家还通过修改单链 DNA 来抑制不需要的反应。研究人员计划用该系统控制纳米结构、纳米颗粒和水凝胶的行为，这

些都可以用于先进的诊断。相关研究成果发表于《自然·化学》期刊。

6.合成生物学与生物存储和生物计算

2022 年 3 月，美国西北大学的合成生物学家开发出一种可在几分钟内评估水质的手持 DNA 计算设备。该设备基于强大的可编程基因网络，可模拟电子电路执行一系列功能。研究人员将无细胞分子设计成几乎所有电子设备中都存在的模拟-数字转换器，以处理模拟输入（污染物），并生成数字输出（通知用户的视觉信号）。该设备配备了 8 个小试管，当检测到污染物时发出绿光，且水污染浓度越高，发光试管的数量越多。这种构建电路和可编程 DNA 计算的方法为其他类型的智能诊断提供了更多可能性。相关研究成果发表于《自然·化学生物学》期刊。

2022 年 8 月，美国格莱斯顿研究所(Gladstone Institutes)科研团队开发出一个生物记录器 Retro-Cascorder，可在 DNA 上捕捉细胞的基因表达历史，一次可记录数天。研究人员再利用 CRISPR 基因编辑技术将 DNA 标签整合到细胞基因组中，以便日后读取。DNA 记录器有助于跟踪迷你大脑和其他器官的发育轨迹，研究癌细胞的演变，监测细胞中的环境污染物，且不会危及生命。

2022 年 9 月，天津大学研究团队创新 DNA 存储算法，使用基于德布莱英图理论的序列重建算法解决了 DNA 断裂等问

题。结合该序列重建算法与喷泉码算法，研究人员编码了6.8MB 敦煌壁画，合成了承载图片信息的 DNA 片段 21 万条，将十幅精选敦煌壁画存入 DNA 中。通过加速老化实验验证壁画信息在实验室常温下可保存千年，在 9.4 摄氏度下可保存两万年。该算法支持 DNA 分子成为世界上最可靠的数据存储介质之一，可使面临老化破损危机的人类文化遗产信息保存成千上万年。相关研究成果发表于《自然 • 通讯》期刊。

2022 年 9 月，南方科技大学科学家开发出一个与人工染色体结合的芽孢杆菌底盘，用于长期存储 DNA 数据。研究人员将数据库整合到由三个功能诱导系统和两个抗生素抗性基因组成的芽孢杆菌人工存储染色体中。经过高温和氧化应激处理后，数据准确性仍保持在 99%以上；在紫外线照射处理后，数据的准确性则保持在 96%以上。通过使用携带该载体的芽孢杆菌孢子，研究人员能直接从发芽的孢子中检索数据，其错误率低于 5%，胜过其他已有的 DNA 数据存储方法。相关研究成果发表于《ACS 合成生物学》(ACS Synthetic Biology)期刊。

7.合成生物学与可再生能源

2022 年 3 月，英国国防科学与技术实验室(Dstl)开发出新型 DNA 生物电池，可用于社会和军事领域。电池是军事防御的重要部分之一，新型生物电池由 DNA、酶、乳酸和水组成，便于携带，降低了在战场上使用时被击中而爆炸的风险，为

发电提供更安全、环保的解决方案。该项目参与方还包括英国基因公司 Touchlight、美国国防部全球海军研究办公室(Office of Naval Research Global, ONRG)和犹他大学(The University of Utah)。

2022 年 6 月，美国劳伦斯伯克利国家实验室科研团队在链霉菌中合成出新型能量密集的生物燃料聚环丙烷化脂肪酸甲酯(POP-FAME)，能量密度高于 50 MJ/L，比当今使用的最先进的重型燃料包括美国宇航局使用的火箭喷气燃料更大。这种生物合成途径为生产多种高能量密度燃料提供了一条清洁的途径，且相较于石油生产燃料显著降低了温室气体排放量。未来可针对航空火箭等实际应用来调整分子链的长度定制生物燃料分子。相关研究成果发表于《焦耳》期刊。

2022 年 9 月，英国布里斯托大学研究团队创造出可实现活细胞能量产生、基因表达等关键功能的活体合成细胞。研究人员将大肠杆菌和铜绿假单胞菌浸泡在溶菌酶和蜜蜂素的混合黏液中，使菌落的细胞膜破裂，内容物溢出产生膜包被的原始细胞。该细胞能够通过糖酵解产生能量储存分子 ATP，实现基因的转录和翻译等复杂过程。该研究有助于生物燃料、食品加工的乙醇生产，并应用于合成生物学诊疗等多种生物制造和生物技术中。相关研究成果发表于《自然》期刊。

8.合成生物学与其他研究

2022 年 5 月，英国伦敦帝国理工学院研究人员开发出一种通

过提供和移除电子，精确改变基因表达的新方法。研究人员重新设计了 PsoxS 启动子，以对电子传递提供的电刺激作出更强的反应，并能激活和抑制基因表达。研究人员从水母中提取了“发光”蛋白质，并使用新的启动子和电子来诱导其在细菌中的表达，使细胞只在系统“打开”时发光。该研究有助于控制体内的生物医学植入物。相关研究成果发表于《科学进展》(Science Advances)期刊。

2022 年 8 月，中国科学院动物研究所、北京干细胞与再生医学研究院的研究团队首次在哺乳动物中实现了完整染色体的可编程连接。合成生物学的目标之一是利用设计的 DNA 序列产生复杂的多细胞生命。研究人员利用小鼠单倍体干细胞和基因编辑工具，建立了哺乳动物染色体可编程连接技术，并在小鼠中实现了完整染色体连接，成功产生出具有 19 对染色体的小鼠，比天然小鼠染色体少 1 对。该研究是哺乳动物合成生物学研究中里程碑式的进展，为哺乳动物合成生物学增添了新的研究工具。

2022 年 10 月，美国国防高级研究计划局(DARPA)启动为期四年半的新 Ceres 计划，旨在通过对植物及其相关微生物群落进行工程设计，去除土壤中的污染物，即溢出的喷气式推进剂 8(JP-8)和三硝基甲苯(TNT)。该计划最终开发的生物修复平台应能实现自动去污和污染物跟踪，而无须常规添加电源或人工干预。该计划的关键是为引入的生物建立多层控制，意

味着既使用已在开发中的合成生物学策略对生物体内部进行控制，又利用合成生态学的进步对生物体外部进行全新的控制。

（四）合成生物学的双重用途风险

合成生物学的迅速发展无疑将为医学、制造业和农业等诸多领域带来具有突破性的解决方案。但是，合成生物学也存在极高的双重用途研究风险。利用合成生物学技术有可能构建出危险病毒或细菌，或被生物恐怖主义用于制造生物武器，导致新的国家安全威胁出现。对这类潜在风险必须要高度警惕和有效监管。

2022 年 1 月，英国《国家安全和投资法》(The National Security and Investment Act, NSI)正式生效，强制性要求将 17 个敏感领域的收购情况告知政府，其中包含合成生物学。根据该法案，合成生物学主要包括：设计和工程化基于生物的酶、基因电路和细胞的部件及新型装置和系统；重新设计现有的自然生物系统；使用微生物作为模板材料；无细胞系统；基因编辑和基因治疗；使用 DNA 进行数据存储、加密和生物计算。该法案豁免了基因治疗、细胞治疗、诊断和工业生物技术研发和生产。对于开发标准的单克隆抗体疗法因其不存在双重用途的潜力可以得到豁免，但是，抗体-药物结合物的研发却不属于豁免范围，因为这些产品使用一种连接剂技术，使抗

体能够将毒素输送到人体内的特定组织。

2022 年 5 月，美国情报高级研究计划局计划开发“收集、检测、分析和预防传统生物威胁”的新方法，以应对生物情报和生物安全威胁，解决生物技术和合成生物学相关的挑战。

2022 年 9 月，世界卫生组织发布《负责任地使用生命科学的全球指导框架》(Global Guidance Framework for the Responsible Use of the Life Sciences)报告，指出生命科学领域正在与化学、人工智能、纳米技术和神经科学等领域融合，导致风险格局逐渐变化，可能带来传统生物风险框架中没有涵盖的威胁。因此，在生物融合的背景下，生物风险治理体系需要一个全面、有预见性、灵活、持久和反应及时的新指导框架。该框架应以生物风险治理的三个核心支柱为基础，即实验室生物安全、生物安保和对双重用途生命科学研究的监督，涵盖合成生物学、神经科学、基因驱动、生物调节器、基因组编辑和生物信息学等领域可能产生的风险，还需包括由事故和无意及故意滥用引起的、可能对人类和非人类动物及环境造成伤害的全部风险。

三、脑科学

脑科学是生物医学研究中最活跃的领域之一。近年来，脑科学已成为世界主要经济体积极抢占的科技制高点，美国、英国、澳大利亚、日本、中国等纷纷展开布局，推动脑科学的

技术研发和成果转化。2022 年，美欧启动新项目，持续关注脑疾病的发病机制、开发更有效的诊治手段。此外，生物技术和信息技术的交叉融合推进脑机接口技术不断精进，正在向无线、微创、非侵入及更安全的方向进步；类脑计算和类脑芯片等类脑人工智能技术也受到越来越多的青睐，未来将有巨大的应用前景。

（一）世界主要经济体积极推动脑科学研究，强化脑科学研究战略顶层设计

人脑是已知的最复杂的系统之一，其许多最基本的功能仍未完全了解。脑科学和基础神经科学研究的发展将推动人类对大脑复杂性及其工作机制更深入地了解，以更好地针对精神和神经系统疾病等脑部疾病开发更有效的疗法，并为人工智能、认知计算、人工神经元网络和神经机器人技术等的进步提供关键驱动力。

2022 年 3 月，印度政府批准印度理工学院马德拉斯分校(Indian Institute of Technology-Madras, IIT-Madras)建立大脑研究中心。该中心计划采用工程和技术方法创建最高分辨率的人脑地图，并为未来的大脑相关研究作出贡献。

2022 年 5 月，英国医学研究委员会(Medical Research Council)资助卡迪夫大学约 100 万英镑，以研究帮助发现大脑疾病迹象的成像技术。研究人员使用最新的磁共振成像(Magnetic

Resonance Imaging, MRI)扫描仪技术分析癫痫患者的大脑，以及使用迄今最先进的显微镜观察手术切除的相同患者的脑组织。该技术有助于检测多种皮层疾病并确定其特征，帮助更多患者免于癫痫发作。该项目是英国 7 个复杂人类疾病研究项目（包括癌症和神经变性）的一部分。

2022 年 5 月，荷兰启动荷兰大脑接口倡议(The Dutch Brain Interfaces Initiative)。该项目是平台与计算机、软件和硬件元素的结合，旨在促进长期闭环操作，并在自然环境中进行大脑监测，其神经科学研究计划有 3 个主要目标：增加对大脑动力学一般原理的理解；制定策略来影响、恢复或改善这些动力及其支持的认知功能；理解自然条件下行为的神经基础。该项目将在未来 10 年内获得来自荷兰科学研究组织(Netherlands Organization for Scientific Research, NWO)万有引力计划(Gravitation Programme)2190 万欧元的资助。

2022 年 9 月，美国国家卫生研究院启动由“通过推进创新神经技术进行脑研究”计划支持的两个新的变革性项目：细胞图谱网络(BRAIN Initiative Cell Census Network, BICAN)和精确脑细胞接入设备。BICAN 项目将在 5 年内获得约 5 亿美元资金，用于绘制整个人脑神经和非神经细胞的地图，并描述各类脑部疾病细胞的作用机制；精确脑细胞接入设备项目将在三年内获得 3600 万美元资金，旨在利用新的脑细胞普查数据和先进技术支持使用高精度分子探针靶向特定的脑细胞

和脑回路，揭示复杂行为背后细胞和电路特异性活动，为未来的精确基因疗法奠定基础。

2022 年 10 月，澳大利亚政府为 3 个开创性的脑癌研究项目拨款超 540 万美元。这些项目将改善近 2000 名澳大利亚人的健康和福祉,其中包括每年被诊断患有脑癌的 200 名儿童。其中一项研究是由沃尔特和伊丽莎霍尔医学研究所(Walter and Eliza Hall Institute of Medical Research, WEHI)领导的 GLIMMER(Glioma Liquid Biopsy and Multiomic-Monitoring Enabled Research)项目，旨在解决当前胶质母细胞瘤缺乏有效治疗方案的问题，提高脑癌患者的生存率和生活质量，避免带来不必要的健康负担。

（二）脑科学基础研究不断取得重要突破

2022 年，脑科学领域的基础研究不断取得重大突破。大脑图谱、新兴成像技术、光遗传学技术、人工智能和机器学习等信息技术的进步为脑科学的基础研究提供了关键驱动力，持续推进研究人员在探索脑认知功能、疾病诊治和构建脑研究的动物模型等方面取得重要进展。

1.脑认知功能的神经基础研究获得新进展

2022 年 1 月，美国斯克里普斯研究所(The Scripps Research Institute)和杜克大学医学院(The Duke University School of Medicine)研究人员证实了健康大脑中新的细胞通信方式。研

究人员将用来标记蛋白质的生物素分子标签引入大鼠视网膜神经节细胞，11 天后在与该细胞有一定距离的视觉皮层神经回路中发现约 200 种被标记的蛋白质。这些蛋白质为经神经元转运蛋白，其中大多数存在于神经元外泌体中。该研究证明了健康完整大脑中神经元之间通过外泌体转运大量内源性蛋白质，有助于更好地了解阿尔茨海默病、帕金森病等神经系统疾病。相关研究成果发表于《细胞报告》(Cell Reports)期刊。

2022 年 2 月，德国弗莱堡大学(University of Freiburg)等机构的科学家开发出一种名为 FFLEXR 的新方法，能同时对大脑进行层状记录、多纤维刺激、三维光遗传学刺激、连接性推理和行为量化分析等。FFLEXR 能保留神经元的灵活性，通过外部可更换光源应用任何需要的波长，在脑组织的不同深度实现光遗传学刺激。该研究结果或为大规模的照片记录和任何大脑区域组合的快速神经通信控制铺平道路，有望帮助研究人员揭开维持大脑功能的神经元之间的快速和多层面对话。相关研究成果发表于《自然 • 通讯》期刊。

2022 年 2 月，美国麻省理工学院的研究人员创建出全面的脑血管系统细胞类型图谱。研究人员对超过 16000 个脑血管细胞进行单细胞 RNA 测序，并利用细胞的基因表达模式将其分为 11 种不同的亚型，从而绘制出新的脑血管图谱，促进对大脑所有功能的理解。研究人员使用新血管图谱分析了一组

来自疾病患者的死后脑组织样本，揭示了亨廷顿病患者脑血管细胞的异常特征，或可为治疗亨廷顿病的潜在方法提供新靶点。相关研究成果发表于《自然》期刊。

2022年3月，中国科学院脑科学与智能技术卓越创新中心（神经科学研究所）、神经科学国家重点实验室等研究机构合作，在国际介观图谱领域率先重构了小鼠前额叶皮层6357个单神经元全脑投射图谱，建立了国际上最大的小鼠单神经元投射图谱数据库。该研究还首次发现小鼠前额叶皮层中存在64类神经元投射亚型，揭示了其空间分布规律及前额叶皮层内部连接和外部投射的规律，并提出了前额叶皮层可能的工作模型。该研究为深入研究高级认知功能的神经机制奠定了结构基础，也为研究全脑介观神经联结图谱提供了重要的技术支撑。相关研究成果发表于《自然·神经科学》(Nature Neuroscience)期刊。

2022年4月，英国剑桥大学和美国宾夕法尼亚大学科学家绘制出覆盖人类整个生命周期的大脑发育标准参考图。这些参考图根据逾10万名研究对象的约12万张核磁共振脑扫描图像分析绘制而成，研究对象的年龄跨度为受孕后115天到100岁。该图表预测能力稳定，可用于检测与疾病相关的脑解剖结构变化模式，比如预测个体从轻微认知障碍到阿尔茨海默病，未来或可用于全年龄段的脑健康数字化评估和疾病诊断。相关研究成果发表于《自然》期刊。

2022 年 6 月，英国巴斯大学(University of Bath)揭示了编码长链非编码 RNA 子集的基因与邻近基因相互作用以调节必需神经细胞发育和功能的机制。此前，非编码 RNA 基因的重要性因其不参与蛋白质编码而长期被忽视。该研究显示，非编码 RNA 基因可参与调节基本神经细胞的发育和功能，特别是在胚胎发育和生命早期的大脑中，并在恢复遭受严重神经损伤的人的身体功能方面发挥关键作用。该研究有助于科学家，尤其是神经功能学家更好地了解神经细胞的基本生物学信息及其产生方式。

2022 年 9 月，华大生命科学研究院联合广东省人民医院与武汉大学等多个科研团队绘制出首个蝾螈脑再生时空图谱，这也是全球首个脑再生时空图谱。该团队基于华大时空组学 Stereo-seq 技术，系统地解析并比较了墨西哥钝口螈脑发育和再生过程，找到了蝾螈脑再生过程中的关键神经干细胞亚群，描绘了此类干细胞亚群重构损伤神经元的过程，同时也发现脑再生与发育过程具有一定的相似性，可为认知脑结构和发育过程提供帮助，并为神经系统的再生医学研究和治疗提供新方向。相关研究成果发表于《科学》期刊。

2022 年 9 月，瑞士苏黎世联邦理工学院和奥地利维也纳生物中心分子病理学研究所(Institute of Molecular Pathology at the Vienna Biocentre)科学家通过绘制蝾螈端脑在动态平衡和脑再生期间细胞基因组图谱，从分子水平表征了蝾螈端脑细

胞类型、神经发生和进化保守程度，包括将一个大脑区域连接到另一个大脑区域的连接部分，揭示了蝾螈脑再生方式和跨物种脑区域的细胞类型多样性及进化关系。这项对蝾螈大脑再生方式的探索有望支持其他生物的大脑再生研究，并为未来对人脑损伤及相关修复药物的开发提供很高的参考价值。相关研究成果发表于《科学》期刊。

2022 年 10 月，加拿大蒙特利尔神经学研究所(Montreal Neurological Institute-Hospital)的科研团队汇集了 40 多张现有的大脑图谱，形成神经图谱数据库，可访问、转换和分析大脑结构和功能注释，有助于标准化跨图谱的代码，以提高结果的可重复性。该数据库包括参考图谱和人脑的生物本体论，如分子、微观结构、电生理、发育和功能本体论，以及一套空间自相关保留零模型。神经图谱用于标准化和比较大脑图谱，为人类大脑的全面结构和功能注释丰富分析提供了系统的工作流程，有望帮助科学家发现不同大脑区域、空间尺度、模式和大脑功能之间的关系。相关研究成果发表于《自然 •方法》(Nature Methods)期刊。

2022 年 11 月，欧洲人脑计划团队基于微体系结构映射开发出多层次于利希人脑图谱，可帮助研究精神疾病和衰老障碍。该图谱包括神经系统细胞结构图及调节大脑活动的神经递质受体分布图，其中大脑皮层区域间的细胞结构差异与大脑功能和功能障碍有重要关联，神经递质与调节大脑活动有关。

该图谱可与活人大脑纤维束研究等图谱相关联，并能链接到来自艾伦人脑图谱的基因表达数据，为研究人员提供重度抑郁症、痴呆症等疾病的诊断工具。相关研究成果发表于《生物精神病学》(Biological Psychiatry)期刊。

2.脑科学研究工具持续更新

2022 年 1 月，美国医疗技术公司 Kernel 开发出一款可穿戴头盔 Kernel Flow，可对大脑进行时域功能性近红外光谱成像。与台式功能性近红外光谱系统相比，该系统具有相似的成像性能，但占地面积更小、成本和复杂性更低，可测量特定大脑区域的血氧水平变化，从而评估有关大脑活动的信息。该可穿戴技术使功能性近红外光谱成像方式更友好，具有巨大的神经学研究潜力。

2022 年 1 月，美国加利福尼亚大学圣迭戈分校(University of California San Diego)研究人员开发出新型皮质脑电图(Electrocorticography, ECoG)传感器，能生产具有 1024 个或 2048 个传感器的 ECoG 网格，可实现 100 倍的空间分辨率。这种薄度和灵活性使传感器网格能在运动中更好地附着在大脑上，使连接更紧密，读数更清晰。该设备能以破纪录的分辨率记录大脑表面的电信号，可帮助医生更好地区分健康和病变神经组织，加深科学家对人类大脑功能的理解，有望将癌症和癫痫治疗的安全性和效率提升到新高度。相关研究成果发表于《科学转化医学》(Science Translational Medicine)

期刊。

2022 年 3 月，新加坡南洋理工大学(NTU)和美国斯坦福大学的研究团队合作开发出一种能穿过完整头皮和头骨的近红外深脑神经调控技术。该团队利用近红外光在生物组织中较深的穿透深度来无损地穿透脑组织并达到目标脑区，随后利用纳米传感器 MINDS 将进入深脑的近红外光转化为热，由此产生的局域热效应会激发热通道蛋白 TRPV1，从而选择性地调控深脑中表达 TRPV1 的神经元的活动。相较于现有的光学神经刺激方法，这种近红外神经调控技术消除了侵入式大脑植入物带来的脑组织损伤和物理束缚，为实验中的神经调控提供新可能。相关研究成果发表于《自然·生物医学工程》期刊。

2022 年 6 月，美国斯坦福大学的研究团队设计出一种基于石墨烯的神经化学生物传感器 NeuroString，可与中枢神经系统和胃肠道组织无缝连接，可同时实时监测两个组织中的神经递质动力学。植入大脑的传感器由超薄、柔软且有弹性的三通道“神经弦”组成，可最大程度减少组织损伤；植入肠道的传感器建立在单个有弹性的薄膜上，其移动距离更远，运动幅度更大，易拉伸、扭曲、打结，便于操作和测量。该传感器具有优越的长期神经化学检测稳定性，可监测小鼠神经递质信号长达 16 周，且能用于研究大型动物的神经递质动力学，或可成为在灵长动物体内研究各种电生理信号的有力

工具。相关研究成果发表于《自然》期刊。

2022 年 6 月，香港科技大学的研究团队开发出一种结合全新自适应光学技术和三光子显微成像的新型活体自适应光学三光子显微成像系统，实现了穿过活体小鼠完整头骨在大脑深层的高分辨率大视场成像。该技术能够获得更高的空间分辨率，大幅提升了非侵入式活体成像的图像质量，为无损研究大脑结构和功能提供了又一强有力的工具，在促进活体大脑无创、高分辨成像研究方面具有巨大潜力。相关研究成果发表于《自然·生物技术》期刊。

2022 年 7 月，美国明尼苏达大学双子城分校(University of Minnesota, Twin Cities)研究团队首次开发出可视化活鼠大脑中 mRNA 分子的新技术。Arc 是被神经元活动快速转录的基因之一，研究人员先对小鼠进行基因改造，使其产生绿色荧光蛋白标记的 mRNA，从而能够看到小鼠大脑中何时何地生成 Arc mRNA，并能实时观察到当小鼠产生和存储记忆时神经元或神经细胞的活动。在小鼠产生记忆后的几天内，研究人员在其大脑的脾后皮质区域定位了一小部分重叠或每天持续产生 Arc mRNA 的细胞，并认为该区域负责记忆的长期储存。该研究提供了关于记忆在大脑中形成和存储方式的新见解，有望为阿尔茨海默病等疾病提供新信息。

2022 年 8 月，美国卡内基·梅隆大学(CMU)的研究人员开发出一种基于人工智能的新型动态脑成像技术，可高速、高分

辨率和低成本地绘制出大脑中快速变化的电活动。这种新的AI 方法优于传统的源成像方法，可在临床或研究环境中收集数据，远程提交给经过良好训练的集中式深度神经网络，并快速收到准确的分析结果。该技术具有精确和快速成像神经电路动力学的潜力，可加快诊断速度，有助于神经学家和医生更好更快地制定手术计划。相关研究成果发表于《美国国家科学院院刊》(Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America)。

2022 年 8 月，美国约翰斯•霍普金斯大学的研究人员为微型大脑开发出微型脑电图电极帽。微型大脑指实验室培养的模拟大脑结构和功能的人类细胞球，有助于解释脑疾病发展过程。受用于检测脑肿瘤的电极点状颅骨帽的启发，该团队利用带有导电聚合物涂层的金属电极的自折叠聚合物小叶，为大脑类器官创建了微型脑电图帽，可包裹大脑类器官的整个球形，从整个表面进行 3D 记录，还可以在药物测试期间检测神经元的自发电通信。该工具扩展了科学家对大脑类器官的研究和测试，可更好地理解神经紊乱及潜在危险化学物质影响大脑的方式。

2022 年 10 月，韩国成均馆大学(Sungkyunkwan University)研究团队通过对功能性核磁共振成像(fMRI)进行软件优化开发出神经活动直接成像(DIANA)技术，实现前所未有的毫秒级别分辨率的神经活动直接成像。该团队将超高场 fMRI 每隔几秒

“拍摄”一张脑区横截面图像，改进为每隔几毫秒“拍摄”多张局部图像后进行拼接，从而获得高分辨率的大脑横截面完整图像，且图像获取速度相当于现有技术的 8 倍。这项革命性的成果打破了目前 fMRI 在时间分辨率上的限制，为理解大脑的机制及疾病提供前所未有的工具，未来或在神经科学领域开辟一条全新的道路。相关研究成果发表于《科学》期刊。

3.脑疾病的发病机制及诊治方法的研究得到提升

2022 年 2 月，美国耶鲁大学研究人员开发出正电子发射断层扫描(Positron Emission Tomography, PET)先进成像技术，并借助该技术证实了导致阿尔茨海默病认知衰退的根源，即大脑突触的损坏。研究人员分别建立了五个与认知表现相匹配的模型，并对 64 名受试者开展测试。测试结果显示，突触密度在被阿尔茨海默病所影响的大脑区域及海马体区域中均明显较低，而突触密度与前额叶、颞叶、顶叶和枕叶皮质区域的整体认知呈正相关。该技术有助于追踪患者随时间推移逐渐丧失突触的情况，帮助科学家更好地了解阿尔茨海默病发生的过程。

2022 年 2 月，英国伦敦大学科学家开发了磁力学刺激技术，可利用微观磁性粒子远程激活脑细胞。该技术允许使用体外的磁性设备刺激脑胶质细胞（星形细胞）。该微观磁性粒子在核磁共振扫描中会发光，能帮助研究人员更好地追踪粒子

的位置并实现对大脑功能的精确控制。该技术为研究人员提供了一种研究细胞在健康和疾病中功能的新工具，或将带来一种常见神经系统疾病的全新非侵入性疗法。

2022 年 3 月，德国蒂宾根大学(University of Tübingen)的研究人员将两枚微芯片植入肌萎缩性侧索硬化症患者大脑，使其恢复交流能力。研究人员在患者的运动皮层植入两枚约 0.1 平方英寸的微芯片，每枚微芯片都有 64 个探测神经信号的针状电极。该芯片可接收患者通过意识产生的大脑活动，并将其作为“是/否”信号输入计算机中。患者通过脑电波选择特定字母，约 1 分钟可拼凑出一个字母再组成单词，从而得以恢复患者与他人的一些简单沟通和交流。这项研究展示了未来治疗肌萎缩性侧索硬化症的希望。

2022 年 6 月，美国路易斯维尔大学(University of Louisville, UofL)科研团队针对与大脑认知功能随年龄增长而下降有关的细菌代谢物，开发出帮助逆转记忆丧失的寡核苷酸疗法。健康人和小鼠肠道中常见的瘤胃球菌科细菌在老年人或小鼠体内增多，其释放的代谢物异戊胺在体内富集，促使大脑中的小胶质细胞凋亡。食用过异戊胺的年轻小鼠的认知能力也显著下降，表明过量的细菌代谢物异戊胺是认知能力随年龄增长而衰退的因素之一。研究人员使用寡核苷酸分子阻断异戊胺的作用后，老年小鼠在认知测试中的分数提高了，证明其记忆和空间学习能力得到了改善。这种寡核苷酸疗法可

用于认知障碍和神经退行性疾病，以及在不同类型的细胞中阻断炎症反应。

2022 年 7 月，中国科学技术大学、安徽医科大学与美国国家卫生研究院的科研团队发现声音镇痛的关键因素及神经机制。研究人员给爪子发炎的小鼠播放了 3 种不同类型的声音：舒缓音乐、不协调的音乐和白噪声，发现这 3 种声音在耳语水平低强度播放时可有效缓解小鼠疼痛，在高强度播放时则无明显镇痛效果。此外，高出环境噪声约 5 分贝的声音能有效缓解小鼠的疼痛。至此，研究人员建立了声音镇痛的小鼠模型，并利用病毒作为神经示踪剂，对小鼠的听皮层输出进行了全脑追踪。研究发现，低强度的声音通过抑制听皮层到躯体感觉丘脑的神经投射，起到缓解疼痛的作用。该研究为声音诱导镇痛的研究开辟了新方向，为开发更安全的疼痛疗法提供了依据。相关研究成果发表于《科学》期刊。

2022 年 7 月，美国斯坦福大学医学院的研究团队开发出一种可递送和电刺激干细胞以改善中风大鼠功能性恢复的大脑植入物。该植入物是一套微小的导电聚合物植入系统，长约 3 毫米，宽 1 毫米，厚度约为信用卡的四分之一，可按预期设定工作，并帮助大鼠在中风后更快更好地恢复功能。研究人员将该系统植入远端大脑中动脉闭塞引起的中风大鼠模型中，显著增强了移植细胞治疗效果，恢复率高达 90%，并以此确定了一种可促进大脑愈合的蛋白质 STC2。该系统有望

使干细胞的电刺激调节成为一种提高中风恢复率和确定重要治疗靶点的潜在方法。相关研究成果发表于《自然·通讯》期刊。

2022 年 8 月，英国伦敦大学学院领导的研究团队开发出一种人工智能算法 MELD，可检测出导致癫痫发作的细微大脑异常。耐药局灶性皮质发育不良是大脑中发育异常的区域，通常会导致抗药性癫痫，但在 MRI 扫描中难以被识别。研究人员从 1000 多名患者的 MRI 扫描中量化了皮质特征，并使用健康大脑和患有局灶性皮质发育不良的示例来训练该算法，最终能在 63%的病例中检测到这种病变。该技术有助于在癫痫患者中发现隐藏病变，以及识别目前被遗漏的引起癫痫的异常情况，使更多癫痫患者通过脑部手术得到治愈。相关研究成果发表于《大脑》期刊。

2022 年 9 月，瑞士洛桑联邦理工学院(École Polytechnique Fédérale de Lausanne)研究团队构建出一个神经机器人系统，揭示了丘脑下核动力学编码行走的关键原理。该团队构建的椅子状神经机器人平台可全面监测帕金森病患者腿部肌肉的激活情况，并结合脑电极的测量来跟踪丘脑下核区域的活动。当患者移动腿部时，该平台将跟踪显示丘脑下核控制其腿部肌肉活动启动和终止的信号。同时，研究人员还提出了可区分患者“冻结”状态和其他常规步态的算法。该成果开辟了利用丘脑下核信号操作神经假体系统以改善帕金森病

患者行走的可能性。相关研究成果发表于《科学转化医学》期刊。

（三）脑机接口与类脑智能逐步走向成熟并已实现商业化

神经科学与智能革命密不可分，生物技术和信息技术的融合正在推进人脑与机器的结合。当前，脑机接口和类脑智能已经成为脑科学和人工智能领域的重要研究方向，对从医疗保健到国家安全的诸多领域产生重大影响。世界各国在脑机接口和类脑计算方面加大资助力度，促进了相关技术的日益成熟和相关产业的加速落地。

1.脑机接口将引领下一代神经科学革命

2022 年 3 月，美国加利福尼亚大学圣地亚哥分校的研究人员开发出一种升级版的脑电脑接口阵列，能更好地适应大脑起伏的表面，从而在大范围内实现更好的接触和信号记录。该技术改进了基于微针的传统脑机接口刚性阵列，将微针附在软背衬上，使阵列贴合大脑。此外，新阵列使用的微针数量是现有技术的 10 倍，可覆盖更多的大脑区域。研究人员已在啮齿类动物身上测试了该阵列，并获得植入物 196 天寿命的纪录，这表明该技术适合长期植入。该技术将帮助改善脑机接口系统，提高用户控制轮椅、假肢等外部设备的能力。

2022 年 6 月，美国约翰斯·霍普金斯大学的研究团队为一名因脊髓损伤导致上半身瘫痪的男性患者大脑植入脑机接口，

使其通过脑机接口操纵机械臂使用刀叉独立完成进食。研究人员向患者大脑的运动和体感皮层中植入了 6 个由 Blackrock Neurotech 公司开发的 NeuroPort 电极阵列，患者以此控制两只机械手臂使用刀叉切下一小块甜点并用叉子送到嘴边进食。该技术的最大进步之一是将机器人的自主性和人类有限的输入信息相结合，由机器人完成大部分工作，同时用户还能根据自身情况或喜好自定义机器人的行为。相关研究成果发表于《神经机器人学前沿》(Frontiers in Neurorobotics)期刊。

2022 年 6 月，南开大学和上海心玮医疗科技股份有限公司联合研发的首款介入式脑机接口成功完成动物试验。该团队采用治疗中风的神经介入技术，通过静脉将脑电传感器植入大脑运动皮层、视觉皮层等脑区后，神经支架膨胀，将电极挤压在靠近大脑的血管壁上，从而获取相应脑区信号。介入式脑机接口技术无须颅骨钻孔或开颅手术，仅通过类似心脏搭桥的微创手术便可实现脑机连接，并能在两小时内完成植入。该试验是中国首次在羊脑内实现介入式脑机接口并成功采集到脑电信号，对推动中国脑科学领域发展，以及治疗神经疾病、改善因脑和脊髓问题引起严重瘫痪患者的功能独立性方面具有重要意义，未来市场前景广阔。

2022 年 7 月，美国莱斯大学、杜克大学、布朗大学和贝勒医学院的研究人员开发出可在一秒钟内远程激活果蝇特定大脑回路的无线技术。研究人员利用基因工程技术在神经元中

表达一种特殊的热敏离子通道，再使用磁信号对其进行激活，以此通过磁信号来控制自由移动的果蝇，使其作出特定的行为。这项新技术激活神经回路的速度比之前对基因定义的神经元进行磁刺激的最佳技术快 50 倍，且在精确的时间激活基因目标细胞的能力可成为研究大脑、治疗疾病和开发直接的脑机通信技术的有力工具。相关研究成果发表于《自然 •材料》(Nature Materials)期刊。2022 年 7 月，清华大学医学院和解放军总医院的科研团队通过手术前的功能磁共振影像精准定位目标脑区，仅用 3 个颅内电极就实现了微创植入脑机接口打字，速度达每分钟 12 个字符，每个电极的等效信息传输率达 20 比特/分钟。该设备的体内机嵌在颅骨中采集和处理脑电信号，电极可伸展到颅内任何脑区；体内机无须电池，隔着皮肤与体外机耦合供电并无线通信，实现脑电信号读取和刺激信号写入的双向脑机接口通信，且能避免感染，不破坏脑内环境，在信号质量和侵入性之间达到了很好的平衡。该研究旨在探索最小化颅内脑电创伤的脑机接口方案，以帮助重度瘫痪患者恢复与外界沟通的能力。相关研究成果发表于《神经影像学》(Neuro Image)期刊。

2022 年 9 月，美国 Meta AI 研究团队开发出一个对比学习模型，可以根据大脑活动的无创记录解码语音。该研究通过非侵入性技术获取了 169 名志愿者的开源录音，并将其作为训练数据集对该团队先前研发的开源自监督学习模型

wave2vec 2.0 进行训练，同时该非侵入性大脑信号还会输入到一个由带有残差连接的标准深度卷积网络组成的“大脑”模型中。该团队通过对齐语音及其相应的大脑活动，找出“大脑”模型输出所对应的语音，实现从大脑信号中解码语音。该研究有助于 AI 在了解人类大脑方面的应用，未来或可能创造与计算机交互的新方式。

2022 年 11 月，瑞士威斯生物和神经工程中心(Wyss Center for Bio and Neuroengineering)公布 ABILITY 脑机接口系统所获最新临床前神经数据，其设备性能和数据质量证明了该系统的安全性、有效性和连接不同电极的灵活性。ABILITY 是一种无线植入式医疗设备，配有两个比豌豆还小的微电极阵列，可通过非常小的大脑区域高精度解码精细运动意图，高频率记录 128 个神经数据通道，以观察和记录单个神经元的活动。该设备通过皮肤无线传输数据，并以感应方式通过皮肤无线供电，旨在长期植入和家庭使用，可用于帮助因肌萎缩侧索硬化症、脑干中风或脊髓损伤导致的严重瘫痪患者恢复沟通和运动能力。该研究强调了突破性植入技术的临床需求，以提高患者和护理人员的易用性。

2.类脑智能为未来智能系统和机器人技术奠基

2022 年 5 月，韩国科学技术高等研究院(Korea Advanced Institute of Science and Technology, KAIST)科研团队开发出一种纳米级的神经形态存储设备，可在单位细胞中同时模拟神

经元和突触，其中短期和长期记忆共存。该设备实现了神经形态记忆中神经元和突触的功能适应性，以及神经元和突触之间的相互作用，用生物神经网络的工作机制代替了传统的电连接人工神经元和突触装置的方法。此外，该神经形态器件可用单个器件取代复杂的互补金属氧化物半导体神经元电路，具有很高的可扩展性和成本效率。该研究是朝着用半导体设备模拟人脑神经形态计算目标迈出的又一步。相关研究成果发表于《自然·通讯》期刊。

2022 年 8 月，中国科学院自动化研究所发布全脉冲神经网络的类脑认知智能引擎“智脉”。该平台是一个基于类脑脉冲神经网络的人工智能与脑模拟计算平台，以多尺度生物可塑性原理为基础，支持全脉冲神经网络建模，具备脑启发的人工智能模型及脑功能和结构模拟能力，用于在多个尺度上建模、模拟不同物种的认知大脑，并受此启发实现了类脑人工智能，或可提供一个全面的理论和系统来解码人类智能及其进化的机制与原理，并可为未来人与人工智能的共生社会中受脑启发的、有意识的、有生命的智能体研制人工智能大脑。

2022 年 10 月，澳大利亚生物技术初创公司 Cortical Labs 和莫纳什大学(Monash University)等机构的研究团队开发出一种合成生物智能的新装置 DishBrain 模型，已显示出基本的智力迹象。研究团队将 80 万个来自人类的干细胞或小鼠的脑细胞聚集在一个培养皿中的微电极阵列上，通过电信号刺激这

些细胞并读取神经活动。在向脑细胞施加电刺激信号后，该模型学会了玩一项名为 Pong 的电子游戏。与人工智能相比，该模型的行为更接近真实大脑。该装置可更便捷地检测大脑运作方式，促进对癫痫、痴呆等症状的理解，还可提供动物试验的替代方法，助力相关药物、疗法的开发。相关研究成果发表于《神经元》期刊。

2022 年 10 月，美国哈佛大学与生物技术初创公司 DNA Script 合作开发出一个由数百个离子晶体管组成的离子电路，并在水中执行了神经网络计算的核心过程。人脑中有一个通过控制液体中的离子来处理信息的独特机制，受此启发，研究人员构建出一种由醌分子水溶液组成的新型离子晶体管，并与两个同心环形电极和一个中心圆盘电极相连，接着又设计了 pH 门控离子晶体管。研究人员将这些晶体管组织成 16×16 阵列，以将单个晶体管的模拟算术乘法扩展为模拟矩阵乘法。矩阵乘法是人工智能神经网络中最普遍的计算，该离子电路以完全基于电化学机制的模拟方式在水中执行矩阵乘法，且显示出节能潜力。该研究发表于《先进材料》期刊。

（四）脑科学研究的主要挑战及未来趋势

脑科学研究是 21 世纪人类面临的重大挑战，已成为国际竞争中的技术制高点。世界主要经济体相继启动了各有侧重的脑科学计划，推动对大脑的理解，脑疾病的治疗及脑机交互、

脑机接口和类脑技术的发展。但是，由于大脑构造极其复杂，人类对大脑生理机制的理解只是沧海一粟，对脑疾病的发病机制也知之甚少，不足以支持能够有效根治脑疾病的药物或疗法的研发，脑科学仍是需要长期、持续投入的重要研究领域。

旨在理解大脑功能和运行机制的脑基础研究是脑科学持续进步的基础。了解大脑认知功能，需要绘制大脑结构图谱。脑成像技术的升级换代对脑科学的发展功不可没。通过使用更高精度的神经成像技术，在分子和神经元电路层面捕获大脑大数据，从而绘制出人脑宏观神经网络结构和功能的全景图，有助于解释大脑构造，帮助治疗疾病，并有利于进一步研究和开发大脑启发的技术。此外，还要建立最佳的动物模型，基于动物（小鼠、猕猴）模型深入探究脑认知功能的神经基础。

脑疾病的预防和诊治是未来脑科学发展的重要方向。脑疾病是最大的健康挑战之一，脑科学研究对保持和恢复大脑健康，以及确保思考、行动和生活能力至关重要。老龄化问题成为中国近年来持续面临的挑战，阿尔茨海默病、帕金森病等神经退行性疾病越来越普遍，但目前仍无法根治，威胁着数千万人的生活质量，给患者和社会均造成巨大的经济负担，构成了重大的社会和医疗卫生问题。因此，亟须研究脑疾病早期干预措施，开发创新的诊治方法和有效的药物，更好地攻

克脑疾病，造福人类。

连接人脑与机器的脑机智能和以模拟大脑为基础的类脑智能仍是未来脑科学研究的热点。人工智能和脑科学是当今最热门的两个技术领域，创造出可像人类一样思考的机器是人工智能的终极目标，使类脑智能成为人工智能领域的新竞争点。类脑研究旨在学习人脑处理信息的方式，模拟大脑的神经系统，构建基于数值计算的虚拟超级大脑；或者通过脑机交互，建立一种新型的计算结构和智能形态。随着脑成像、脑机交互、生物传感和大数据处理等新技术的不断迭代，未来脑机接口和类脑智能技术将更加成熟，或将为人们的生活提供更大的便利。

四、干细胞

2022 年，干细胞在类器官、组织修复、疾病建模等领域取得一系列重大进展，推动了再生医学和抗衰老研究的发展。干细胞治疗经过多年的探索和研究已经逐渐成熟，应用领域进一步拓展，可覆盖上百种疾病，且其所能治疗的疾病目录仍在不断扩增，或将开启全新的医学时代，为更多难以治愈的疾病带来新的希望。随着全球干细胞治疗临床研究的进一步增加，全球范围内的干细胞研发及转化应用持续增加，干细胞产业将迎来爆发期，但安全和伦理问题也随之而来。中国干细胞治疗发展前景较好，在部分干细胞基础研究和技术进

展方面正在跻身世界前列，并牵头制定和发布了全球首个干细胞国际标准。但是，中国在干细胞疗法研发领域的进展较少，与欧盟等发达国家和地区相比仍有一定差距。

（一）干细胞基础研究及产业发展

1.干细胞临床研究现状

干细胞具有独特的自我更新能力，可被诱导分化成各种细胞类型，其灵活性和适应性使其成为治疗的新选择，既可用于重建受损脑组织，也可用于抗击癌症。根据美国国家卫生研究院国家医学图书馆(National Library of Medicine)运营的临床试验研究阶段系统(ClinicalTrials.gov)，截至 2022 年 12 月，全球登记注册的干细胞临床研究项目已超 6300 项，其中完成的项目超 2700 项。随着全球人口老龄化的速度加快，癌症、阿尔茨海默病等慢性疾病和与衰老相关疾病的发病率上升，成为推动干细胞临床研究的引擎。在干细胞临床试验的发展下，目前已有更多疾病拥有新的治疗思路，现已登记注册的疾病适应证涉及血液病、神经系统疾病、心脏疾病、肿瘤及免疫系统疾病等。从干细胞治疗的细胞种类来看，造血干细胞的临床研究数量最多，约占干细胞临床研究总数的 53.7%；其次为间充质干细胞，占比约 18%，其增殖能力和多向分化潜能已被不断发掘，研究数量将持续增多。此外，诱导多能干细胞进入临床研究的项目有所增加，主要用于疾

病建模、再生医学和药物发现等领域。例如，日本启动了全球首例诱导多能干细胞治疗脊髓损伤的临床试验。

2.干细胞治疗产业发展迅速

干细胞临床研究持续增加，干细胞疗法继续获得全世界的认可，使全球干细胞产业进入高速发展期，产业规模不断扩大。人口老龄化加剧、慢性疾病发病率上升及对传统药物副作用的认识不断提高推动着全球干细胞治疗市场持续增长。根据 Reports and Data 的报告，预计 2028 年全球干细胞市场规模将达到 191.3 亿美元，在预测期内复合年增长率为 8.4%。从全球市场来看，北美和西欧是最大的两个干细胞市场，分别占据 44%和 38%的市场份额;亚太地区是第三大干细胞市场，占据 17%的市场份额，未来或成为干细胞市场增长最快的地区。根据 Reportlinker 的预测，2022 年至 2030 年期间，亚太地区干细胞市场的复合年增长率为 9.16%，到 2030 年将获得 44.4 亿美元的收入份额。

目前，全球已有 21 种干细胞产品获批上市，分布于美国、欧盟、韩国、加拿大、澳大利亚和日本等地。其中 12 种获得美国食品药品监督管理局或欧洲药品管理局(European Medicines Agency, EMA)的批准，其余 9 种产品主要在亚洲获得批准。获批产品主要是由造血干细胞或间充质干细胞组成另外还有一个角膜缘干细胞产品。这些干细胞产品主要涉及的适应证有阿尔茨海默病、急性心梗、血栓闭塞性动脉炎、

迟行性关节炎等。目前，中国尚未有成熟的干细胞药物获批上市。根据中国国家药品监督管理局药品审评中心的数据，截至 2022 年 9 月，该中心已受理 48 个干细胞相关新药申报项目，其中 2022 年新增 9 个间充质干细胞新药申报项目。当前共有 28 个干细胞新药项目获得国家临床默示许可。

未来，干细胞市场将受到肿瘤治疗、皮肤病、再生医学、转基因干细胞、疾病建模、生物打印等多种驱动力的影响，加速激发出更大的市场潜力。

（二）干细胞研究频现重大突破

1.干细胞推动类器官和器官芯片发展及功能完善

2022 年 1 月，美国加利福尼亚大学旧金山分校(University of California, San Francisco)研究人员利用新型成纤维细胞 hAEC2 类器官平台，模拟严重肺泡损伤中出现的干细胞化生性病变或异常干细胞分化，首次观察到人类的肺泡驻留干细胞(Human Alveolar Type 2 Cells, hAEC2s)分化为基底细胞的过程。在 hAEC2 衍生的类器官及 hAEC2 异种移植和纤维化肺的组织学分析中普遍发现移行细胞，表明 hAEC2s 是严重肺泡损伤疾病中化生基底细胞的主要来源。该研究为确定可能预防或逆转严重肺损伤中化生分化治疗靶点的研究奠定基础。相关研究成果发表于《自然·细胞生物学》(Nature Cell Biology)期刊。

2022 年 2 月，澳大利亚彼得·多尔蒂感染与免疫研究所(The Peter Doherty Institute for Infection and Immunity)和墨尔本大学(The University of Melbourne)科研人员利用人体干细胞在实验室培育出鼻黏膜类器官，以模拟和研究新冠病毒感染人体后造成的影响。研究发现，德尔塔变异毒株对鼻黏膜上皮细胞的损害明显大于早期没有变异的新冠病毒；感染德尔塔毒株的鼻黏膜类器官上皮细胞更脆弱。类器官研究无须侵入性的组织样本收集，是很好的临床前研究模型。相关研究成果发表于《国际分子科学期刊》(International Journal of Molecular Sciences)。

2022 年 2 月，德国弗赖堡大学(University Freiburg)研究团队开发出一种器官芯片系统，可通过微传感器实时测量和控制细胞的培养条件及代谢率，精确监测体外 3D 肿瘤组织。该平台能实现肿瘤类器官的动态 3D 培养及检测药物对细胞代谢的影响，使利用患者自身干细胞在体外复制原始肿瘤成为可能。该系统为个性化治疗提供新机会，未来有望在器官芯片系统中对药物进行有效性和副作用的初步测试。相关研究成果发表于《芯片实验室》(Lab on a Chip)期刊。

2022 年 3 月，芬兰赫尔辛基大学(University of Helsinki, UH)研究团队成功使用干细胞培养出功能齐全的胰岛。该团队对干细胞分化胰岛的细胞结构进行深度重组，使通过葡萄糖刺激的胰岛素分泌达到与原代成年胰岛相似的成熟水平。经验

证，由干细胞产生的胰岛β细胞能在葡萄糖升高的条件下触发胰岛素分泌。细胞移植后，小鼠的血糖水平由原来的约 8～10 毫摩下降并保持在约 4～5 毫摩。该研究证明干细胞分化产生的胰岛移植后能调节小鼠的血糖水平，或有助于进一步提高干细胞胰岛的产量，以便在疾病建模和细胞治疗中广泛使用，为糖尿病的细胞疗法铺平道路。相关研究成果发表于《自然·生物技术》期刊。

2022 年 4 月，美国波士顿大学(Boston University)领导的研发团队构建出新型微型心脏“微型泵”(miniPUMP)。该设备仅 3 平方厘米，由干细胞生长的活体心脏组织驱动，无须弹簧或外部电源就能自行跳动，其定制部件安装在一块 3D 打印的薄塑料上，可像人的心室一样工作，可使研究人员更准确地了解器官的工作原理、跟踪心脏在胚胎中的生长过程、测试新疗法的潜在有效性和副作用，或将加快药物开发过程，降低药物研发的成本，在帮助开发个性化药物方面具有巨大潜力，并为构建从肺到肾的其他器官的实验室版本铺平道路。相关研究成果发表于《科学进展》期刊。

2022 年 5 月，美国哥伦比亚大学研究人员开发出一种用于个性化医疗的先进器官芯片系统。该芯片约为显微镜载玻片大小，包含骨骼、皮肤、心脏和肝脏组织，可测试患者对癌症治疗的方法是否耐受。该系统使用患者自身的组织模型，通过血管循环连接各个组织，保留维持其生物保真度所必需的

组织生态位，从而模拟人体器官在体内连接的方式。该系统代表了器官芯片系统的进步，首次允许同时研究药物干预对多个器官的影响。此外，由于使用源自患者血液样本的诱导多能干细胞创建工程组织，患者可以实现个性化医疗。相关研究成果发表于《自然·生物医学工程》期刊。

2022 年 5 月，上海科技大学研究人员成功培育出血管化类脑器官。研究人员建立了由人胚胎干细胞向中胚层诱导产生血管类器官模型的方法，并在培养后期加入神经营养因子，使其具有脑血管的特征；同时，将人胚胎干细胞向神经外胚层方向诱导产生类脑器官模型；最后，在其分别发育至血管前体细胞和神经前体细胞阶段时将两部分融合，培养在神经营养性的成熟培养基中，40 天后，形成完整的血管类器官。该模型提供了人脑发育与进化、神经系统疾病机理研究及药物筛选的体外模型，可用于研究脑发育过程中神经、血管及免疫细胞之间的相互作用。

2022 年 6 月，德国德累斯顿大学(TUD)研究团队在实验室培养皿中使用人诱导多能干细胞培养视网膜类器官，并开发出一种新的携带绿色荧光蛋白的 hiPSC 干细胞系，以从类器官中高效分离所需的感光细胞。研究人员将培养分离纯化的感光细胞移植给视锥细胞受损的小鼠，发现其成功整合到小鼠视网膜并发育为功能正常的光感受器，可正常地向视网膜下游神经细胞传递信号，使小鼠恢复感光能力。这是首次将移

植的感光细胞大规模地整合到视网膜中，代表了通过移植感光细胞治疗致盲疾病的新突破。相关研究成果发表于《临床研究期刊》(Journal of Clinical Investigation)。

2022 年 7 月，丹麦哥本哈根大学(University of Copenhagen)研究人员利用老鼠模型发现了一种新型干细胞，可作为在培养皿中制造器官的替代途径。该研究利用充当关键的支持细胞来帮助胃肠道器官提供膜、膜的营养和其他功能的内胚层胚胎外干细胞，可用作在胚胎中制造肠道器官的替代途径。研究人员取出胚胎外内胚层干细胞，在培养皿中将其发育成了肠道器官样结构。使用替代途径可能有助于实验室培养的细胞形成功能细胞，并用于研究和治疗疾病。相关研究成果发表于《自然·细胞生物学》期刊。

2022 年 8 月，美国布莱根妇女医院研究团队开发出一种利用多能干细胞生成肾脏组织关键成分“输尿管芽”的方法。研究人员将多能干细胞以 90%的效率诱导到前颅祖细胞中，聚集成具有类似肾导管分子特征的球体，该球体将在三维基质中形成输尿管芽类器官。该研究可帮助研究遗传性和获得性肾脏疾病，推动医学治疗和新药发展，是实验室培育人类肾脏的关键一步。相关研究成果发表于《自然·生物技术》期刊。

2022 年 8 月，以色列魏茨曼科学研究所的科研人员在没有精子、卵子及子宫的情况下，使用在培养皿中培育多年的小鼠

干细胞培育出小鼠早期胚胎模型。胚胎模型存活了 8.5 天，接近小鼠 20 天妊娠期的一半，许多器官都形成了早期模样，包括跳动的心脏、褶皱良好的大脑、神经管和肠道等。与天然小鼠胚胎相比，该胚胎模型在内部结构形状和细胞基因表达模式上有 95%的相似性，胚胎模型中的各种器官具备相关标志，表明其具有功能性。未来研究人员有望在该研究的基础上进一步培养人造人类胚胎样结构，从而提供可用于移植的组织、器官等。

2022 年 10 月，瑞士苏黎世联邦理工学院研究人员使用干细胞培育的类脑组织绘制出大脑不同区域的细胞类型及调节其发育的基因。研究人员对干细胞进行编程，最终形成具有复杂组织结构的三维大脑器官，并借助机器学习技术和基因编辑技术分析类器官细胞中的基因，预测基因调控机制，再将这些数据表示为一种地图，显示了类器官内每个细胞的分子指纹。类器官可用于研究基础发育生物学及基因在疾病或发育性大脑障碍中的作用，还可用于测试药物，并有望用于培养可移植器官或器官部分。

2.干细胞助力组织修复及人造组织，促进再生医学进步

2022 年 2 月，日本东京医科齿科大学(Tokyo Medical and Dental University)研究人员成功利用人类干细胞创建出人工肌腱样组织。研究人员将表达转录因子 Mohawk 的干细胞放入专门的 3D 培养系统，并在细胞生长时对其施加机械力，

以模拟肌腱发育的条件，增强细胞排列和组织，使其能建立肌腱样组织。将该人工肌腱植入肌腱断裂的小鼠模型，6 周后，人工肌腱的力学性能达到与未受损小鼠肌腱相似的水平。该方法为肌腱修复和再生提供了新策略，未来有望应用于临床。相关研究成果发表于《组织工程期刊》(Journal of Tissue Engineering)。

2022 年 2 月，以色列特拉维夫大学(Tel Aviv University, TAU)萨戈尔再生生物技术中心(Sagol Center for Regenerative Biotechnology)研究人员首次设计出一种功能性 3D 人类脊髓组织。研究人员从患者腹部采集脂肪组织，并对细胞进行重新编程，将其恢复至类似胚胎干细胞的状态，再利用细胞外基质创造出植入后不会引起免疫或排斥反应的个性化水凝胶。封装在水凝胶中的干细胞在模仿脊髓胚胎发育的过程中将细胞转化为包含运动神经元的 3D 神经网络植入物，可使 80%的测试对象恢复行走能力。这种工程化组织有望使瘫痪患者重新站立行走。

2022 年 2 月，澳大利亚皇家墨尔本理工大学研究人员利用高频声波诱导干细胞快速、有效地转化为骨细胞。该团队使用一个能产生兆赫范围内声波的微芯片，将其指向培养板上硅油中的间充质干细胞。研究人员每天将这些细胞暴露在 10 兆赫的信号下 10 分钟，持续 5 天后发现，某些标记物的水平有所提高，干细胞正在转化为骨细胞。干细胞开始分化成

骨细胞时可注射到受伤或患有疾病的部位或涂在植入物上，以生长新骨骼。该方法对患者的创伤性小，成本低且使用简单，可处理大量细胞，对有效的组织工程至关重要。相关研究成果发表于《微小》(Small)期刊。

2022 年 3 月，西班牙巴塞罗那基因组调控中心(The Centre for Genomic Regulation, CRG)团队创造出杂交细胞，可恢复人类视网膜的再生能力。人类视网膜中的 Müller 胶质细胞通过分化成神经元来取代或替补受损的神经元，具备再生神经元的潜力。该团队将 Müller 胶质细胞与来自人类脂肪组织或骨髓的、具有分化能力的成体干细胞融合在一起，产生杂交细胞，并将其注射到视网膜类器官中。这些杂交细胞可成功植入组织，分化后表现出与神经节细胞极其相似的电生理特征，而神经节细胞正是一类对视觉功能至关重要的神经元。该研究表明将人类视网膜细胞与成体干细胞融合或成为视网膜损伤和视力障碍的潜在治疗策略。相关研究成果发表于《E 生物医学》(eBioMedicine)期刊。

2022 年 4 月，美国约翰斯·霍普金斯大学医学院(The Johns Hopkins University School of Medicine)团队成功培养出能自我更新和修复小鼠肌肉组织损伤的人类肌肉干细胞。研究人员利用营养丰富的肉汤将诱导多能干细胞转化为肌肉干细胞，再将其移植到没有免疫系统的转基因小鼠体内，并暴露于肌肉降解毒素和辐射中，以消除小鼠体内已经存在的肌肉干细

胞。移植的人类肌肉干细胞在肌肉组织中被毒素和辐射损伤的部位发育为成肌细胞，并通过融合形成正常肌肉特有的微纤维来修复损伤。该研究或推动人类肌肉损伤和肌肉萎缩疾病疗法的开发。相关研究成果发表于《细胞干细胞》(Cell Stem Cell)期刊。

2022 年 4 月，日本大阪大学的研究团队在全球范围内首次使用诱导多能干细胞制成与泪腺相似的立体组织。由于成人的泪腺难以再生，目前尚无根治干眼症的方法。该团队用人的诱导性多能干细胞制成可以形成泪腺的细胞，并在一种特殊凝胶中培养，得到几毫米大小的微型立体泪腺组织。该组织在移植给免疫受限的实验鼠后进一步成熟，产生了管状组织及与泪液相关的蛋白质。该成果有望带动对重症干眼症疗法和药物的研发。相关研究成果发表于《自然》期刊。

2022 年 6 月，美国纽约大学(New York University)研究人员利用新的合成 DNA 技术和干细胞基因组工程，创造了人工 Hox 基因，可计划和指导组织或器官发育。Hox 基因可确保器官和组织在正确的位置发育，若其调节错误或突变，会导致出生缺陷和流产。该研究有助于研究人员更好地理解 Hox 基因的作用机理和工作模式，为未来研究动物发育和人类疾病铺平道路。相关研究成果发表于《科学》期刊。

2022 年 6 月，美国得克萨斯大学奥斯汀分校的研究人员创建出一种递送干细胞因子的纳米载体，有助于释放其再生治疗

的潜力。干细胞因子可以刺激干细胞生长，帮助血管再生，恢复缺血组织的血流，是促血管再生治疗的首选，但其存在刺激肥大细胞生长、导致严重过敏反应等副作用。跨膜形式的干细胞因子通常固定在细胞膜上，不会激活免疫系统或引起过敏反应、研究人员使用脂质纳米盘传递该干细胞因子，以阻止其聚集在一起，有助于将其完整传递到体内。

2022 年 7 月，沙特阿拉伯阿卜杜拉国王科技大学(King Abdullah University of Science and Technology, KAUST)科学家开发出一种治疗退行性骨病的创新纳米技术平台。该技术利用能对磁场作出反应的铁纳米线，生长在这些线网中的成骨干细胞成长为成人骨的速度比传统培养环境快得多，分化只持续几天，且低频磁场可极大加速骨骼发育过程。纳米线支架植入损伤部位可促进组织修复，外部磁场将加速愈合过程。该方法可在更短时间内实现高效的骨细胞形成，有可能为更有效的骨再生铺平道路。

2022 年 9 月，浙江大学研究团队 3D 打印出含人骨髓间充质干细胞的 GelMA 水凝胶微球，可促进骨再生。该团队提出的基于水凝胶微球的 3D 培养系统具有出色的充质干细胞(Bone Marrow Stromal Cells, BMSC)体外软骨分化能力，可实现载有 BMSC 的水凝胶微球的高效生产，以及 BMSC 在微球中的聚集凝结。载有人骨髓间充质干细胞的水凝胶微球在诱导过程中表现出软骨内成骨阶段特异性基因表达模式，软骨诱导 21

天的水凝胶微球被称为骨痂类器官，可高效实现快速骨修复。该研究表明基于发育工程的骨痂类器官仿生策略是提升骨再生质量和速度的有效方法。相关研究成果发表于《科学 •转化医学》期刊。

3.干细胞为难以治愈或尚无有效疗法的顽疾带来新希望

2022 年 1 月，美国国家眼科研究所(National Eye Institute, NEI)研究人员开发出首个源自患者的干细胞模型，用于研究与眼皮肤白化病(Oculocutaneous Albinism, OCA)相关的眼部疾病。该干细胞模型有助于了解白化病中色素的缺乏如何导致视网膜、视神经纤维和其他对中心视力至关重要的眼部结构的异常发育。相关研究成果发表于《干细胞报告》(Stem Cell Reports)期刊。

2022 年 1 月，日本庆应义塾大学(Keio University)成功将诱导多能干细胞(Induced Pluripotent Stem Cells, iPS cells)移植到一名脊髓损伤患者的体内，这是首个此类人体临床试验，也是干细胞治疗的突破性进展。严重脊髓损伤造成的瘫痪目前尚无有效的治疗方法。研究人员向该脊髓损伤患者的脊髓内移植了 200 多万个 iPS 来源的神经干细胞，患者术后情况良好。研究人员将对其进行约 1 年的研究，以分析移植的安全性和有效性。

2022 年 1 月，美国斯坦福大学科学家使用基因工程技术在动物身上培养出人类毛细胞。研究人员将形成毛囊的干细胞移

植到一只无毛老鼠体内，老鼠长出了一簇人类头发。通过对血液或脂肪细胞等普通细胞进行基因“重编程”来生产毛囊的组成部分，研究人员改变了干细胞中活跃的基因模式，可将任何细胞直接转换成头发干细胞。该技术有望解释脱发的根本原因并开发出有针对性的治疗方法。

2022 年 2 月，日本京都大学 iPS 细胞研究所(Center for iPS Cell Research and Application, Kyoto University)的科学家利用诱导性多能干细胞产生出心外膜细胞。研究人员将人类 iPS 细胞分化为心外膜细胞后发现，发育和维持神经系统轴突的钙黏蛋白 18(CDH18)只在胎儿型中表达，其缺失会导致心外膜细胞失去增殖能力，并引起心外膜向间质转化，从而产生心脏平滑肌细胞，为损伤后激活心外膜、促进心脏再生提供新见解。该发现为实验室产生具有心脏再生能力的细胞提供了有效手段，也为在体内开启和关闭心脏再生提供了线索。相关研究成果发表于《npj 再生医学》(npj Regenerative Medicine)期刊。

2022 年 2 月，美国加利福尼亚大学洛杉矶分校(UCLA)研究人员利用脐带血干细胞疗法，成功治愈了全球首位女性艾滋病患者，也是第三位已知艾滋病功能性治愈的病例。与该患者配型成功的亲属为其提供了血液及一个能产生白细胞的脐带干细胞，以增强其免疫系统。此外，患者接受的脐带血干细胞移植中含有基因突变 CCR5，能阻止艾滋病毒进入细胞。

移植后约三个月，病人的白细胞和髓样细胞并非来自其旧骨髓或亲属血液，而是来自脐带血中的干细胞。此后，患者停止所有抗逆转录病毒药物治疗长达 14 个月，其体内依然没有检测到 HIV 病毒。干细胞移植实现了艾滋病的长期缓解。

2022 年 3 月，澳大利亚墨尔本大学的研究人员成功利用人体多能干细胞重建中脑多巴胺通路，可以有效治疗帕金森病。此次，研究人员利用病毒传递胶质细胞源性神经营养因子，并通过原位移植人类多能干细胞分化的中脑多巴胺神经元，重建全脑中脑多巴胺神经通路，从而有望纠正帕金森病患者的运动功能。相关研究成果发表于《细胞干细胞》期刊。

2022 年 8 月，美国头脑风暴细胞疗法公司(BrainStorm Cell Therapeutics)开发出一款干细胞疗法 NurOwn。该公司从肌萎缩侧索硬化(Amyotrophic Lateral Sclerosis, ALS)患者骨髓中获取充质干细胞进行体外扩增和分化，并刺激其分泌高水平的多种神经营养因子，再输回患者体内激活神经保护和免疫调节信号通路，从而减轻 ALS 患者的症状。在 3 期临床试验中，NurOwn 对较轻的 ALS 症状有显著改善，且患者的神经营养因子水平显著增加，神经退行性和神经炎症生物标志物减少。

2022 年 9 月，美国西达赛奈医学中心(Cedars-Sinai Medical Center)研究团队开发出一种联合干细胞治疗和基因治疗的渐冻症新疗法，已在人体临床试验中验证了安全性和有效性。该团队将基因工程改造后可以稳定产生胶质细胞源性神经

营养因子 GDNF 的神经祖细胞 hNPC 进行移植，使其能够穿过血脑屏障，并分化形成星形胶质细胞，实现 GDNF 的稳定表达，从而保护渐冻症的运动神经元。临床试验证明移植细胞可长期存活且在患者体内是安全的。相关研究成果发表于《自然·医学》(Nature Medicine)期刊。

2022 年 9 月，美国波士顿大学医学院(Boston University Medical Campus, BUMC)和国家新发传染病实验室(The National Emerging Infectious Diseases Laboratories, NEIDL)的研究人员利用诱导多能干细胞研究埃博拉病毒(Ebola Virus)感染和损害肝脏的机制。研究表明，主要的肝细胞功能因埃博拉病毒感染而受损，且该病毒进化出一种阻止被感染机体早期抗病毒反应的机制。这是首次利用干细胞研究埃博拉病毒感染，有助于设计出埃博拉新型治疗或干预措施。相关研究成果发表于《干细胞报告》期刊。

4.干细胞推进抗衰老研究

2022 年 3 月，中国科学院动物研究所揭示了核心节律蛋白 BMAL1 拮抗灵长类组织和细胞衰老的新型功能。BMAL1 在维持细胞分子生物钟和个体节律方面发挥着重要作用。科研人员结合 CRISPR-Cas9 基因编辑技术和干细胞定向分化技术获得了敲除 BMAL1 的人间充质干细胞，发现 BMAL1 蛋白缺失会引起人间充质干细胞的加速衰老，且抑制了转座子 LINE1 活化。该研究首次揭示了核心节律蛋白调控灵长类衰老的新

功能及新机制，为延缓灵长类衰老和防治衰老相关疾病开拓了新思路。相关研究成果发表于《核酸研究》期刊。

2022 年 9 月，美国纽约州立大学布法罗分校(State University of New York at Buffalo, UB)发现在衰老的人类肌细胞中过度表达 NANOG 蛋白质，可以逆转与年龄相关的细胞退化，并增加其 DNA 修复机制。此外，在动物实验中，在过早衰老的小鼠中过量表达 NANOG 蛋白可以增加肌肉干细胞的数量，表明 NANOG 可能具有恢复活力的特性，或能帮助逆转衰老过程。相关研究成果发表于《科学》期刊。

5.干细胞深入探索人造生殖细胞和嵌合体胚胎

2022 年 4 月，日本东京大学干细胞与再生医学研究中心科研团队成功利用大鼠多能干细胞诱导产生功能性的原始生殖细胞样细胞，将其移植到无生殖细胞大鼠的输精管中，产生了有功能的精子细胞。研究人员将诱导产生的圆形精子细胞和成熟精子分别注射到未受精的大鼠卵母细胞中，足月移植，分别有 18 只和 6 只健康大鼠出生，并可发育成具有生育能力的正常成年大鼠。该研究表明，体外诱导的原始生殖细胞样细胞具有产生功能完全的成熟配子的能力，为在试管中产生雄性生殖细胞提供了范例和模型。相关研究成果发表于《科学》期刊。2022 年 6 月，清华大学研究团队采用三种化学分子 TTNPB、1-Azakenpaullone、WS6(TAW)组成的“鸡尾酒”药物，将小鼠多能干细胞诱导成具备转变为完整有机体

潜能的全能干细胞，且能在实验室中保持这些诱导的细胞的全能型（胚内和胚外分化潜力）。这意味着，这类细胞可以发育为完整的生命个体，或定向发育为各种器官和组织，如肝脏、骨骼、神经等。该研究有助于解决供体器官短缺的问题，开启了全新的生命创造研究领域。相关研究成果发表于《自然》期刊。

2022 年 8 月，瑞士苏黎世联邦理工学院的研究人员使用囊胚互补技术将大鼠多能干细胞注射到小鼠胚胎中，其中小鼠囊胚中产生精子的一个关键基因发生突变，大鼠干细胞与小鼠细胞一同发育，从而产生了由两个物种的基因型组成的嵌合动物。基因突变使嵌合体睾丸内形成了一个空的生态位，使大鼠细胞能在其中定植，并在嵌合体中只产生大鼠精子。基因突变导致小鼠宿主环境没有生育能力，但仍能支持来自不同物种的高效精子细胞的产生。该研究证明，通过将一种动物和另一种动物混合在嵌合体中，可以在另一种动物中产生精子细胞。相关研究成果发表于《干细胞报告》期刊。

2022 年 8 月，美国加利福尼亚理工学院和英国剑桥大学研究团队利用小鼠干细胞培育出具有完整大脑结构、神经管、心脏和身体所有其他基础器官的小鼠胚胎模型。研究团队将小鼠胚胎干细胞与两种类型的小鼠胚胎外干细胞按正常比例组合置于模拟环境中，使其产生卵黄囊、胎盘、神经管，实现自我组成胚胎。该成果为研究影响哺乳动物胚胎发育和疾

病的因素提供了可参考的模型系统，并为指导开发合成移植器官提供了可能性。相关研究成果发表于《自然》期刊。

五、基因编辑

基因编辑技术被视为当代生物学领域最具影响力的颠覆性技术。自 2012 年 CRISPR-Cas9 系统创建以来，基因编辑就成了全球关注的热点，2022 年被《自然》期刊列为未来可能对科学领域产生重大影响的 7 项技术之一。2022 年，基因编辑工具更加丰富多样，编辑效率和精准度逐步提升，减少了脱靶率，极大提高了技术安全性。基因编辑技术的应用范围也在持续扩展，在人类健康、农业和食品等领域的研究和应用如火如荼，不断深入在遗传病和癌症等疾病的诊治、药物研发、农作物育种、病原体检测、传染病预防和生态环境保护等方面的价值探索和挖掘。但是，基因编辑技术带来的潜在风险及伦理和社会问题一直备受关注，引发了广泛争议和讨论，亟须推进尽快建立基因编辑技术的安全评估监督机制和法规，严防安全风险。

（一）基因编辑技术更加多样化，工具箱不断扩充

随着基因编辑技术的日益进步，基因编辑工具逐渐优化，变得更多样化，编辑效率、可编辑范围和安全性稳步提升。2022 年 1 月，美国威尔康奈尔医学院(Weill Cornell Medicine)

研究团队成功构建出针对非模式肠道细菌的基因编辑工具。该研究选择了在健康人肠道中常见的梭菌纲和拟杆菌纲两类菌株的质粒，并通过 CRISPRi-dCpf1 和 Group II intron 两种基因编辑技术，确定引入外源质粒菌株的基因编辑可行性。该研究可指导用同样策略开发其他肠道细菌的基因编辑方法，有助于从分子水平了解肠道细菌基因-代谢物-宿主之间的关系，并极大拓展了可研究的肠道细菌对象。相关研究成果发表于《细胞》期刊。

2022 年 1 月，德国蒂宾根大学的研究团队开发出无须外源蛋白实现精准高效 RNA 编辑的方法 CLUSTER gRNAs。该方法可通过病毒载体进行基因编码和传递，以多价方式结合其目标 mRNA，实现高精度的高效编辑，并能靶向以前无法访问的序列。在细胞培养中，该方法可实现内源性转录本的靶向编辑，效率高达 45%；在体内，编辑效率高达 10%。该方法为 RNA 碱基编辑领域的药物开发开辟了新道路。相关研究成果发表于《自然 • 生物技术》期刊。

2022 年 1 月，西班牙庞培法布拉大学(UPF)等机构的科学家开发出可编程基因书写技术 FiCAT，可将大片段的 DNA 精准插入基因组中。该技术结合了 CRISPR-Cas9 的精度和工程 piggyBac 转座酶的有效载荷转移效率，实现了 5%～22%的最小脱靶插入率，可在没有任何尺寸限制的情况下有效转移治疗性的基因，有望克服目前用于基因编辑和基因疗法技术的

限制，帮助开发更安全有效的遗传性疾病和肿瘤疾病疗法。

2022 年 2 月，美国能源部资助的生物能源研究中心(Bioenergy Research Centers, BRC)开发出第一个用于 CRISPR 实验的全基因组设计和 gRNA 序列评估的开源软件工具 CROPSR。该方法显著缩短了设计 CRISPR 实验所需的时间，加速了 gRNA 序列的设计、评估和验证，为科学界提供了执行 CRISPR-Cas9 敲除实验的新方法和新工作流程，可加速农作物基因发现，并可为整个作物基因组生成可用的 CRISPRgRNA 数据库。

2022 年 2 月，芬兰赫尔辛基大学(UH)的研究人员开发出可使人类细胞返回多能性干细胞状态的 CRISPRa 技术。研究人员使用 CRISPRa 技术加速细胞重编程过程，即将分化细胞逆向转化为多能性干细胞/诱导性多能干细胞，并显著提高了重编程的准确性和可靠性。高质量 ips 细胞可特化为人类身体中的所有细胞和组织类型，在生物医学应用中的利用效率越来越高，可用于模拟神经退行性疾病、糖尿病和各种眼部疾病，以及开发针对这些疾病的治疗方法。该成果极大促进了生物医学研究。相关研究结果发表于《干细胞报告》期刊。

2022 年 3 月，中国科学院遗传与发育生物学研究所的科研人员开发出能在植物中实现高效编辑的新型引导编辑系统 ePPE。研究人员在适用于植物的 PPE 引导编辑器的基础上，建立了更高效、广适的 ePPE 系统，使编辑效率在碱基替换、小片段插入、删除及较大片段插入和删除等多种编辑类型下

平均提高 5.8 倍，且不会增加脱靶效应。该系统或推动引导编辑在农业育种、作物改良等方面的应用。相关研究成果发表于《自然·生物技术》期刊。

2022 年 3 月，美国得克萨斯大学奥斯汀分校的科学家重新设计了 Cas9，开发出新版本的基因编辑工具 SuperFi-Cas9。该版本保持了与原始版本相同的速度和效率，但切割位点脱靶的可能性降低了 4000 倍。相关研究成果发表于《自然》期刊。

2022 年 4 月，德国卡尔斯鲁厄理工学院(Karlsruhe Institute of Technology, KIT)科学家开发出针对植物的 CRISPR-Kill 技术，可“剪除”花瓣或次生根等植物特定的细胞类型，从而阻止植物在发育过程中形成这些器官。CRISPR-Kill 可针对相应细胞类型进行多次切割，使细胞无法修复并最终死亡。该研究可帮助科学家更深入地理解植物发育机制，使植物无法形成产生毒素的细胞，从而使食品生产和制药领域受益。相关研究成果发表于《自然·通讯》期刊。

2022 年 4 月，韩国基础科学研究所(Institute for Basic Science, IBS)基因编辑中心的研究团队开发出一款全新的碱基编辑器 TALED。该平台由 3 个功能各异的主要部分组成：转录激活因子样效应物 TALE，可靶向特异 DNA 序列并与特定的线粒体 DNA 序列结合；帮助实现 A-G 碱基转换的腺嘌呤脱氢酶 TadA8e；胞嘧啶脱氢酶 DddAtox，可帮助 TadA8e 在人类细胞

的线粒体中高效催化 A-G 碱基的转换，编辑频率可达 49%。该碱基编辑器极大拓展了线粒体 DNA 编辑的范围，有助于构建疾病模型、开发新疗法，进一步提升了编辑效率与特异性，可为修正胚胎、新生儿与成年患者体内致病的线粒体突变带来新希望。相关研究成果发表于《细胞》期刊。

2022 年 7 月，美国博德研究所的科学家开发出一套紧凑型腺嘌呤碱基编辑器，可使用单腺相关病毒(Adeno-Associated Virus, AAV)载体递送并在肝脏、心脏和肌肉组织中实现高达 66%、33%、22%的碱基编辑效率，优于双 AAV 载体。当与双 AAV 载体同剂量时，单 AAV 载体递送的编辑效率在心脏中增加 2.1 倍，在肌肉中增加 2.5 倍。该编辑器提高了碱基编辑的治疗潜力，确立了单 AAV 碱基编辑器系统的优势。相关研究成果发表于《自然 • 生物医学工程》期刊。

2022 年 8 月，上海科技大学研究团队开发出一种简单、高效的基因编辑方法。该团队通过在传统 HR-供体上引入转录过程，改变了 DNA 修复过程中的供体染色质结构状态，促进同源重组的发生，从而实现细胞内大片段 DNA 的高效编辑，初步解决了传统 CRISPR-Cas9 介导的同源重组在大片段基因敲入时效率低的问题。此外，该方法在基因删除、取代、点突变等方面较传统方法都有显著提高，为其将来在临床治疗方面的应用奠定了基础。相关研究成果发表于《核酸研究》期刊。

2022 年 8 月，荷兰代尔夫特理工大学和美国康奈尔大学(Cornell University)研究团队开发出一个 gRNA 引导靶向的 CRISPR 偶联的蛋白酶新系统 Craspase，为后续开发及优化 gRAMP 介导的 RNA 编辑工具和 Craspase 介导的可调控、选择性激活的蛋白酶系统提供了理论依据。该工具有望引领全新的精准医疗思路。相关研究成果发表于《科学》期刊。

2022 年 9 月，美国宾夕法尼亚州立大学的研究团队开发出一种基于修饰 mRNA 的 CRIPSR-Cas9 系统，其在干细胞中的编辑效率提高了 84%，且减少了脱靶效应。该团队改变了基因编辑工具递送到干细胞的方式，使用经过修饰的 mRNA(Nucleoside-modified messenger RNA, modRNA)，比质粒 DNA 更高效。此外，研究人员还添加了一种小蛋白来帮助编辑后的细胞生长，解决了 modRNA Cas9 成功递送到靶基因后在基因组中产生双链断裂的问题。将人类多能干细胞与 CRISPR-Cas9 基因编辑技术相结合，可加速各种人类疾病建模和创新药物筛选进程。相关研究成果发表于《细胞报告方法》(Cell Reports Methods)期刊。

2022 年 9 月，美国加利福尼亚大学欧文分校(University of California, Irvine)研究人员开发出精准基因组编辑试剂，可精确进行靶基因矫正。研究人员开发的精准基因组编辑试剂，包括碱基编辑器和先导编辑，在遗传性视网膜疾病小鼠模型等多种治疗环境中，实现了精确高效的靶基因校正而非基因

破坏，极大扩展了基因编辑技术的潜在治疗应用。利用体内基因编辑来治疗遗传性视网膜疾病的初步临床试验结果将为未来精准基因编辑疗法的设计和转化提供重要信息。相关研究成果发表于《美国国家科学院院刊》期刊。

2022 年 10 月，美国加利福尼亚大学伯克利分校和斯坦福大学的研究团队开发出一种能将大型 DNA 片段添加到人类基因组中的简单工具，无须依靠 DNA 修复机制或产生 DNA 双链断裂。该团队发现大丝氨酸重组酶无须任何宿主细胞内蛋白的参与或 gRNA 的引导，就可以 40%～75%的效率将超过 7kb 的 DNA 片段整合到细胞基因组中，且其平均分子量只有 Cas9 酶的一半，更易递送进细胞。未来或将在此基础上开发一种 DNA 整合平台，将任何基因安全、高效地整合到人类基因组中一个独特的位点。相关研究成果发表于《自然·化学生物学》期刊。

2022 年 10 月，美国杜克大学的研究人员开发出一种基于 RNA 的编辑工具。该工具针对单个细胞而非基因，能精确瞄准任何类型的细胞，有选择地添加蛋白质。该团队使用 RNA 探针在细胞中引入荧光标记来标记特定类型的脑组织，并用光敏开关沉默或激活被选择的神经元，自毁酶可精确清除特定细胞。该工具可通过修改特定细胞和细胞功能来管理疾病，有望提高对脑回路和其中细胞接线图的理解，并在此过程中推进神经疾病的新疗法。相关研究成果发表于《自然》期刊。

（二）基因编辑在疾病诊治、药物研发、农业和传染病检测方面获得诸多新突破

1.基因编辑技术在疾病诊治领域持续发力，在治疗遗传性疾病、癌症和抗衰老方面表现出色

2022 年 1 月，美国罗格斯医学院(Rutgers University)科学家采用基因疗法将哺乳动物寿命延长了 41.4%。研究人员采用鼻腔吸入和腹腔注射两种方式，以不会对人产生伤害的高容量巨细胞病毒作为载体，将端粒酶逆转录酶基因和卵泡抑素基因注入 18 个月大的小鼠体内。每月注射一次，持续半年。两种方法分别将小鼠寿命延长了 41.4%和 32.5%，超过了当前主流的瑞维拓β-烟酰胺单核苷酸技术的数据，得到了学术界的重视和支持。此外，采用基因技术延长寿命的小鼠器官出现“年轻化”现象，毛发较之前更加茂盛。

2022 年 3 月，德国柏林联合机构实验和临床研究中心(Experimental and Clinical Research Center, ECRC)研究人员通过使用 mRNA 介导的 CRISPR-Cas9 修复了小鼠肌肉萎缩。研究人员利用 mRNA 将 CRISPR-Cas9 引入人类干细胞，精确对 DNA 进行调整，纠正了有缺陷的基因，再将处理过的细胞注入肌肉中，使其能够增殖并形成新的肌肉组织，从而达到改善肌肉萎缩的目的。相关研究成果发表在《分子疗法——核酸》(Molecular Therapy-Nucleic Acids)期刊。

2022 年 3 月，以色列特拉维夫大学的研究人员通过基因改造

人工心脏瓣膜中的生物成分，使其免受免疫攻击和钙化风险，从而提供下一代耐用的生物人工心脏瓣膜。研究人员在类人动物模型中发现，即使存在抗糖抗体，缺乏外源糖的工程组织仍能显著减少钙化，可提升由此类组织制成的生物人工心脏瓣膜的耐久性。该研究标志着生物人工心脏瓣膜领域的突破性进展，可显著改善心脏病患者的生活质量。相关研究成果发表于《自然·医学》期刊。

2022 年 7 月，美国杜克大学医学院和俄亥俄州立大学(The Ohio State University, OSU)研究团队首次证明 CRISPR 可用于对抗新冠病毒。研究人员使用 CRISPR-Cas13d RNA 靶向系统暂时性敲除新冠病毒进入人体所需的组织蛋白酶 CTSL 的 mRNA，再利用肺选择性脂质纳米颗粒作为 Cas13d RNA 靶向系统的递送载体，以降低肺 CTSL 的表达。该方法安全有效地阻止了新冠病毒进入小鼠细胞，并迅速阻断了受感染小鼠体内病毒的进一步复制。该方法有望用于人类，以对抗多种冠状病毒。相关研究成果发表于《自然·生物科学》(Nature Biological Sciences)期刊。

2022 年 7 月，以色列特拉维夫大学的研究人员研制出基于 CRISPR-Cas 检测方法的相关试剂盒并带入国际太空站进行实验。基于 CRISPR-Cas 系统的基因技术能够在太空中准确识别目标 DNA，提示特定病毒或细菌的存在，可帮助宇航员快速诊断疾病。这证明即使在几乎没有重力的环境中，也能精确

灵敏地完成基于 CRISPR 的诊断。未来，这种检测方法有望用于月球和火星探索等长期太空任务。

2022 年 8 月，英国伦敦大学研究团队证实基因疗法能成功激活视网膜和大脑之间休眠的视锥细胞通路并唤起新的视觉功能。该研究与一项针对全色盲儿童的 1/2 期临床试验同时进行，并分别靶向不同的基因（CNGA3 或 CNGB3），同时使用功能性磁共振成像方法，将治疗后视觉功能的所有变化直接指向目标视锥光感受器系统，结果表明部分病例治疗诱导的视锥细胞功能出现改善。该研究可加速对一系列眼科疾病基因疗法的发展。相关研究成果发表于《大脑》(Brain)期刊。

2022 年 9 月，德国波恩大学(University of Bonn)研究人员将苔藓的 RNA 编辑机器转移到标准的人类细胞系中。陆生植物通过 RNA 编辑在每个 DNA 转录本中清理 DNA 错误来获得功能完善的蛋白质。只在苔藓线粒体中起作用的 RNA 编辑机器 PPR56 和 PPR65 也在人类细胞核的 RNA 转录本中引入核苷酸变化，其中 PPR56 能在人类细胞目标的 900 多个位点上作出改变，而在苔藓中只负责两个校正点。这种 RNA 编辑方法可纠正遗传密码中的错误位点，或为治疗遗传性疾病提供新起点。相关研究成果发表于《核酸研究》期刊。

2022 年 10 月，英国伦敦大学学院研究团队利用 CRISPR-Cas 系统成功在患者来源细胞系和小鼠模型中纠正 CTLA-4 功能不全导致的免疫缺陷。CTLA-4 帮助控制免疫系统活性，目前

CTLA-4 功能不全的标准治疗方法是骨髓移植，但具有较高风险。该团队利用 CRISPR-Cas9 基因编辑技术定位并“剪切”有缺陷的 CTLA-4 基因，再使用腺相关病毒载体递送修正过的 CTLA-4 的 cDNA 序列，通过同源重组修复的细胞 DNA 修复机制将其“粘贴”到特定位置。该方法通过直接纠正患者的 T 细胞，改善 CTLA-4 功能不全的许多临床症状，比骨髓移植的毒性小且更简单，也适用于其他遗传疾病。相关研究成果发表于《科学转化医学》期刊。

2022 年 10 月，美国坦普尔大学路易斯 •卡茨医学院(Lewis Katz School of Medicine at Temple University)和美国生物治疗公司 Excision 联合开展一项针对艾滋病的新型基因编辑疗法的全球首次人体试验，旨在评估 EBT-101 基因编辑疗法的安全性和有效性。第一位试验参与者已完成单次静脉给药，目前研究人员正在观察 EBT-101 的安全性、耐受性和有效性。若临床试验结果良好，意味着艾滋病或可实现“一次治疗，终身治愈”。EBT-101 基因编辑疗法是有望改变未来艾滋病疗法的重要里程碑。

2.基因编辑技术为药物研发提供合适且理想的创新动物模型和生物反应器

2022 年 8 月，中国华南农业大学和国家生猪种业工程技术研究中心的科研团队利用转基因猪的唾液腺作为生物反应器，合成出一种对神经性疾病具有良好治疗作用的人神经生长

因子(Nerve Growth Factor, NGF)。研究人员利用 piggyBac 转座系统结合体细胞克隆法制备了在唾液腺中特异高效表达人源 NGF 蛋白的转基因猪，并从中纯化获得对神经细胞的增殖和分化具有良好生物活性的人源 NGF 蛋白。为防止该过程中被猪源 NGF 蛋白“污染”，科学家利用 CRISPR-Cas9 系统对转基因猪内源的猪源 NGF 基因进行了替换和克隆。该研究为生产高活性的人类药用蛋白提供了新技术，拓展了畜牧动物在人类医学中的应用范围。相关研究成果发表于《细胞》期刊。

2022 年 9 月，丹麦奥胡斯大学(Aarhus University)研究团队利用基因编辑技术培育出携带阿尔茨海默病致病基因的克隆猪，可用于新药开发。该团队通过 CRISPR-Cas9 基因编辑破坏小猪皮肤细胞中的 SORL1 基因，使具有该基因缺陷的小猪在 3 岁前表现出阿尔茨海默病迹象。该动物模型使研究人员有机会跟踪疾病的早期迹象，并进行早期药物的研发和测试工作，有助于未来疗法的开发。相关研究成果发表于《细胞报告医学》期刊。

2022 年 9 月，美国哈佛医学院(Harvard Medical School, HMS)和德国马克斯·普朗克研究所的科研团队首次在昆虫细胞上利用 CRISPR-Cas9 筛选技术，找到一种特异针对昆虫的细菌蛋白毒素的受体。该研究在分子水平上揭示了毒素的作用机理和对不同昆虫的特异性，建立了对这类毒素在自然界的功

能的深刻理解，有助于未来进一步发展高效特异的生物杀虫剂，用于控制农业害虫和其他传播疾病的昆虫。相关研究成果发表于《自然》期刊。

3.基因编辑技术改善作物育种，有助于缓解全球粮食问题

2022 年 2 月，中国科学院微生物研究所研究人员开发出一种对白粉病具有较强抗性且无任何生长或产量缺陷的小麦新突变体 Tamlo-R32。研究人员使用传统育种方法将 Tamlo-R32 突变体与优良小麦品种杂交，成功将抗病性状引入优良品种，并使用多重 CRISPR 基因组编辑技术直接在优质小麦品种中创建相应遗传扰动，从而在 2～3 个月内获得广谱抗白粉病小麦。该研究为培育抗病高产作物品种提供了新的思路和技术路线。相关研究成果发表于《自然》期刊。

2022 年 5 月，美国马里兰大学开发出可同时编辑作物中多个基因并激活其他基因的 CRISPR-Combo 系统。使用该系统后，拟南芥在一年内产生了八代植株，是以往产量的两倍。将该技术与基因工程结合可增强新作物的功能，与组织培养技术结合可提高育种效率。相关研究成果发表于《自然·植物》(Nature Plants)期刊。

2022 年 8 月，澳大利亚阿德莱德大学(University of Adelaide)和英国约翰·英尼斯中心(John Innes Centre, JIC)团队发现一种可以提高小麦产量的基因，同时该基因还能将小麦蛋白质含量提升 25%。对控制这两种性状的基因进行修改，有可能产

生更高质量的新小麦品种。

2022 年 7 月，中国农业科学院的研究团队发现了水稻高产基因，能在提高光合作用效率和氮素利用效率的同时，将作物产量提高三成以上。通过调整作物的天然 DNA 来改变其蕴含的营养物质，以生产脂肪含量较低或维生素、氨基酸含量较高的作物，更贴合消费市场需求，具有科学价值和应用前景。

2022 年 8 月，美国伊利诺伊大学(University of Illinois)研究团队证明光合作用的多基因生物工程可以增加重要粮食作物的产量。该团队对大豆植物内的 VPZ 结构进行基因改造，当叶子从光过渡到阴影时，VPZ 构建体中三个光保护相关的基因能够加速关闭光保护机制，从而延长光合作用时长，增加总光合作用速率。该技术能使产量提高 20%以上且种子蛋白质含量保持不变。该研究通过改善光合作用提升了单位土地面积产量，是获得产量潜力跃升的重要机会，也是确保未来粮食安全迫切需要的一种手段。相关研究成果发表于《科学》期刊。

4.基因编辑技术在传染病检测和预防方面展现出极大应用前景，在对抗新冠病毒中发挥巨大作用

2022 年 2 月，美国博德研究所、哈佛大学和普林斯顿大学研究人员开发出一种基于 CRISPR 的技术平台，可快速检测奥密克戎、德尔塔和其他新冠变体。该平台可以发现病毒的存在，并测量样本中的病毒数量，显示患者感染他人的能力。该平

台能够区分包括德尔塔和奥密克戎在内的六种新冠病毒变体谱系，其准确度与病毒测序相同；还能检测和区分多种人类呼吸道病毒、细菌感染及监测抗生素耐药性，具有广阔的应用前景。

2022 年 2 月，美国内华达大学(University of Nevada)、马里兰大学和宾夕法尼亚州立大学的科研团队首次使用 CRISPR-Cas9 基因编辑技术成功改变了黑腿蜱的基因组，并使其孵化出基因变异的幼虫。通过向蜱虫卵子注射 CRISPR-Cas9 复合物，使其携带的酶在基因组的特定位置切割 DNA，成功删除两个不同基因，蜱虫卵存活率为 10%。接着利用 CRISPR-Cas9 将一种肽注射到怀孕的雌蜱体内，将复合物输送到发育中的卵巢，以编辑蜱虫后代的基因组，所有注射的蜱虫全部存活。该突破使科学家可以开始编辑蜱虫基因组，防止莱姆病等 20 多种蜱传疾病的传播。相关研究结果发表于《交叉科学》(iScience)期刊。

2022 年 8 月，美国华盛顿大学研究人员开发出实验性疟疾疫苗 PfGAP3KO。研究人员使用基因编辑技术敲除了疟原虫中对其建立感染能力至关重要的 3 个基因 P52、P36 和 SAP1，并将其作为一种减毒疫苗帮助人体免疫系统抵御疟疾。该疫苗的接种方式是直接让携带了这种基因敲除疟原虫的蚊子叮咬皮肤，每次约叮咬 200 次，接种 3～5 次，再评估对受控人类疟疾感染的保护作用。结果显示，接种疫苗的人有一半

没有发生可检测到的疟疾感染。该结果支持了进一步开发基于基因工程的减毒疟疾疫苗。相关研究成果发表于《科学转化医学》期刊。

2022 年 9 月，英国伦敦帝国理工学院研究团队开发出一种携带基因修饰的蚊子，可减缓肠道中引起疟疾的寄生虫的生长。该团队对寄生虫的传播媒介蚊子进行抗寄生虫基因的修饰，使蚊子在肠道中产生两种抗菌肽，可阻碍卵囊中发生的寄生虫孢子发育，延迟传染性孢子体的出现，阻止两种最致命的人类寄生虫恶性疟原虫和啮齿动物寄生虫的传播。该研究突破了正常杂交修饰特性自然淘汰的难点，即使在传播率很高的地方也可成为减少疟疾病例的强大工具。相关研究成果发表于《科学进展》期刊。

2022 年 9 月，美国莱斯大学和康涅狄格大学(University of Connecticut)的研究人员改进了 RNA 编辑 CRISPR-Cas13 系统，以提高其检测生物样本中微量新冠病毒的能力。研究人员将 7 个不同的 RNA 结合结构域融合到环路上，当发现目标时，蛋白质会发出荧光，显示出病毒的存在。经改造的工程 Cas13 变体稳定性高，且灵敏度比野生型蛋白高 5 个数量级，可在半小时内完成工作。基于 CRISPR 的工程化方法可找到新冠病毒 RNA，有望使对该疾病和其他疾病的检测更快速、简便。研究人员还在研究改进寨卡、登革热和埃博拉病毒的检测，以及心血管疾病的预测性生物标志物。相关研究成果发表于

《自然·化学生物学》期刊。

（三）基因编辑技术潜在安全风险和伦理问题日益凸显，亟须加强全球治理和监督

当前，新兴生物技术呈现出技术风险与伦理风险并存的发展态势。基因编辑技术引发的科技伦理风险正在重塑传统社会秩序，亟须推进治理体系和治理能力现代化，以有效的制度规范予以精准治理。

一方面，基因编辑技术本身仍存在尚未突破的技术瓶颈，存在脱靶效应、致癌风险等局限性，安全性有待进一步提升。此外，基因编辑技术在非传统安全领域也可能存在巨大风险。2022 年 2 月，瑞典乌普萨拉大学(Uppsala University)研究人员对斑马鱼受精卵进行基因编辑，并对两代共 1100 多条斑马鱼进行基因组测序后发现，CRISPR-Cas9 基因编辑会导致 DNA 发生不可预见的结构突变，且能被下一代遗传。经过基因编辑的第一代斑马鱼中约 6%出现了基因结构变异并遗传给了后代，使第二代斑马鱼中有 26%携带脱靶突变，9%携带结构突变。因此，将 CRISPR-Cas9 技术应用于临床治疗前需谨慎验证。2022 年 7 月，以色列特拉维夫大学科学家警告，CRISPR 基因编辑技术在治疗癌症等疾病方面虽然有效但并非绝对安全。通过观测 CRISPR 疗法对 T 细胞的影响，研究者发现有相当一部分 T 细胞的遗传物质受损，且受损比例高达

10%。遗传物质受损将降低基因组稳定性，进而可能引发癌症。研究人员建议，在使用 CRISPR 基因编辑疗法时应注意安全隐患，并提议进一步研究两种潜在解决方案：减少受损细胞产生；或识别遗传物质受损的细胞并在植入患者体内之前将其移除。另一方面，与技术风险相比，基因编辑引发的伦理和社会等衍生性风险亦不容小觑。基因编辑技术不断挑战人类的伦理底线和价值尺度，给社会带来新的风险和不确定性，其治理框架的建立依赖于医学、伦理学和法学等多个领域的交叉研究，需要科学界和全球政府共同探索解决方案。从伦理后果层面看，基因编辑技术通过修改人体胚胎、精子或卵细胞细胞核中的 DNA，并将改变的细胞传递给下一代，涉及下一代生命体的自主性、个体权利等代际公平问题。同时，基因编辑技术涉及的隐私问题也较为突出。一旦个体基因隐私得不到有效保护，其相关利益将难以得到保障，可能引发个体的心理健康受损、遭受社会歧视等问题。从伦理态度和治理层面看，大多数国家对基因编辑技术相对开放，并已针对基因编辑技术进行立法。尽管不同国家对基因编辑技术持有不同的治理态度和实践方案，但基本遵循以国家为主导的治理模式，有以美国为代表的部分允许模式、以英国为代表的审查批准模式和以加拿大为代表的禁止模式 3 种治理模式。美国对基因编辑技术的发展持较为开放的态度，政府在一定程度上允许该技术在有限条件下使用，形成了以生物

安全促进法为导向，联邦法律和各州法律共同规约的伦理治理格局。2022 年 3 月，美国食品药品监督管理局批准首个基因编辑肉牛产品进入市场。欧洲及加拿大对基因编辑技术的态度相对审慎，其中，欧洲的法律规制以生物技术潜在危险性为基础，注重外源基因转入的风险评估和风险控制，并通过法律保护基因隐私；加拿大颁布法律阻止人类生殖材料的商品化，禁止基因编辑技术用于克隆技术和调节辅助生殖技术。

中国对基因编辑技术研发高度重视，已将其列为“十四五”时期重点攻关目标。2022 年 1 月，农业农村部出台《农业用基因编辑植物安全评价指南（试行）》，正式拉开了中国基因编辑技术立法的序幕。2022 年 3 月，中国共产党中央委员会办公厅、中华人民共和国国务院办公厅印发《关于加强科技伦理治理的意见》，这是中国首个国家层面的科技伦理治理指导性文件，提出研究内容涉及科技伦理敏感领域的，应设立科技伦理（审查）委员会进行科技伦理风险评估或审查，完善科技伦理风险监测预警机制等，并要求重点加强生命科学、医学、人工智能等领域的科技伦理立法研究，尤其是涉及人、实验动物的科技活动。

第四章 世界能源技术发展报告

能源是现代社会发展的基础、国家经济发展的命脉，也是维护国家安全的重要保障。2021 年以来，全球爆发了两轮能源危机。其一是 2021 年下半年因经济加速复苏，但供给受限，叠加极端天气等因素导致的全球能源危机。其二是 2022 年俄乌冲突爆发后，美西方国家不断加码制裁，俄罗斯将能源作为反制裁“武器”，全球能源市场剧烈震荡，使 2021 年下半年以来的全球能源危机进一步恶化。在此背景下，主要国家，尤其是欧洲国家的能源政策更多关注能源安全，在能源技术方面体现为更加关注技术的稳定性、可负担性和可持续性。化石能源方面，主要国家在重启煤电、加大油气开采的同时，加速化石能源清洁高效利用技术的研发和部署；清洁能源方面，主要国家增加太阳能、风能、氢能等清洁能源投资力度，新技术加速进入商用阶段；核电凭借其稳定、清洁、高效等特性，在能源危机下供应了更多电能，得到更多国家认可；中国、美国、英国加速聚变技术研发，相关技术取得新突破；氢能，尤其是绿氢成为全球氢能战略和产业发展的热点，新技术、新项目涌现。

一、世界能源技术及产业发展重要动向

俄乌冲突爆发后，以美国为首的西方国家和俄罗斯间制裁与反制裁不断，能源武器化趋势加剧，全球能源供应格局正在改变。世界主要国家（经济体）加速能源战略调整。其中，欧洲为摆脱对俄能源依赖，推行“能源独立”战略，法国重启核能战略，德国暂停煤电和核电“退役”，英国、德国、丹麦、波兰等欧洲国家加强海上风电建设；美国加强对欧能源出口，以期实现对欧能源控制。欧洲“能源独立”战略为全球清洁能源产业发展提供了新动能，将促进氢能、核能、先进储能等前沿领域技术发展。

（一）俄乌冲突下能源武器化趋势加剧，全球能源供应格局正在改变

1.全球能源供应格局发生变化

俄乌冲突爆发后，以美国为首的西方国家对俄实施多轮制裁，尤其是在能源领域。美国参众两院通过禁止从俄罗斯进口石油、天然气、煤炭和其他能源产品的法案。美欧将俄罗斯外贸银行(Vneshtorgbank)、俄罗斯国有开发银行(Vnesheconombank)等 7 个俄罗斯银行排除出环球银行金融电信协会(SWIFT)支付系统，切断俄罗斯能源等关键战略资源的国际贸易。欧盟决定到 2022 年年底将俄罗斯石油进口减

少 90%、大幅减少俄罗斯天然气进口，并不再与俄罗斯签订新的煤炭供应合同。2022 年 12 月，欧盟决定对俄罗斯石油设定 60 美元每桶的价格上限和禁止进口俄罗斯海运石油。英国停止从俄罗斯进口石油、煤炭和天然气。俄罗斯则要求向不友好国家和地区供应天然气时将改用卢布结算。2022 年下半年，“北溪”(Nord Stream)天然气管道泄漏更加剧了欧洲能源紧张局势。

在此背景下，俄罗斯对欧洲的天然气供应锐减。根据欧盟理事会数据，俄罗斯天然气占欧盟天然气进口量的比重已从 2021 年 1 月的 53.8%降至 2022 年 11 月的 12.9%。此外，英国石油公司(BP plc)、挪威国家石油公司(Equinor)、荷兰皇家壳牌公司(Royal Dutch Shell)、美国埃克森美孚公司(Exxon Mobil)等先后宣布退出与俄罗斯相关能源企业的合作，法国道达尔公司(Total)等宣布不再参与俄罗斯新项目融资。同时，欧洲不断加大从美国进口液化天然气(LNG)力度，从 2021 年 1 月的 6.5 亿立方米一度增加到 2022 年 5 月的 57.8 亿立方米。美国也加快 LNG 出口终端建设，随着路易斯安那州(State of Louisiana)的萨宾帕斯(Sabine Pass)和卡尔克苏帕斯(Calcasieu Pass)等新的 LNG 项目投入运营，根据美国能源信息署(Energy Information Administration, EIA)数据，截至 2022 年年底，美国共有 44 套装置组成的 7 个 LNG 出口终端，出口 LNG 液化能力达到 114 亿立方英尺/天（约合 3.23 亿立方米/天），超

过卡塔尔成为全球最大的 LNG 出口国。而且，卡塔尔、澳大利亚等LNG出口国的货源主要以长协形式被亚洲买家提前锁定，加上短时间增产能力有限，美国 LNG 成为俄乌冲突爆发后欧洲地区弥补供气缺口的主要现货来源。目前，美国 LNG 出口量 1137 亿立方米的 2/3 以上流向欧洲市场，也成为仅次于挪威的欧盟第二大天然气供应国。此外，欧洲各国调整了能源政策，加强了与中东、非洲等地区国家的能源合作，并建立了新的能源供应关系，如意大利与阿尔及利亚签订新协议，每年增供 90 亿立方米天然气；卡塔尔将从 2026 年起每年向德国供应超 200 万吨 LNG 等。

俄罗斯则加大能源供应东移，并积极推进能源出口多样化。2022 年 2 月，俄罗斯总统普京访华，期间中国石油天然气集团公司与俄罗斯石油公司(Rosneft Oil)签署了一份关于原油购销的新协议。根据协议，俄罗斯将在未来 10 年内途经哈萨克斯坦向中国供应 1 亿吨原油。2022 年 2 月，中国石油天然气集团公司和俄罗斯天然气工业股份公司(Gazprom)签署了一项关于从俄罗斯远东地区购买和销售天然气的协议，俄罗斯将通过远东天然气管道向中国增供管道天然气。预计远东天然气管道将在 2024—2025 年投运，于 2026 年达到输气能力峰值。该路线达产后，俄罗斯每年输往中国的管道天然气将增加 100 亿立方米。中俄还计划建设一条新的长达 6700 千米的干线天然气管道，将西伯利亚生产的天然气输往中国

新疆，同时这条管道还将连接中国的西气东输管道，从而使远东的天然气直达上海。印度加强与俄罗斯的能源合作，包括增购俄罗斯石油、煤炭。俄罗斯天然气工业股份公司和俄罗斯石油公司加强与印度石油天然气公司(Oil and Natural Gas Corporation)等印度合作伙伴在北极 LNG 2 号(Arctic LNG 2)和萨哈林 1 号(Sakhalin 1)等项目的合作。此外，印度还计划与俄罗斯建立印度卢比与俄罗斯卢布的结算机制。

2.对中国的影响与启示

中国是世界第一大能源进口国和消费国。在俄乌冲突背景下，全球能源市场剧烈震荡，中国能源安全风险陡增。根据中国海洋石油集团 2022 年 12 月发布的《中国海洋能源发展报告 2022》和中国海关总署数据，2022 年中国原油进口量为 5.01 亿吨，对外依存度为 70.9%；天然气进口总量 10924.8 万吨，对外依存度为 42.5%，其中进口 LNG 量 6344.2 万吨。虽然近年来从整体看，中国能源对外依存度处于下降趋势，但仍表现为依赖能源进口。2022 年，国际石油价格出现“过山车”式的走势。2022 年首个交易日，布伦特原油(Brent oil)和美国西得克萨斯中间基原油(West Texas Intermediate, WTI)的开盘价都低于每桶 80 美元；俄乌冲突爆发后，WTI 于 2022 年 3 月 1 日达到每桶 103.41 美元，这是继 2008 年 2 月 28 日和 2011 年 1 月 31 日之后，国际石油价格历史性地第 3 次站上每桶 100 美元的水平；2022 年 3 月 7 日，国际石油价格创下

2022 年的最高价，其中布伦特原油为 139.13 美元/桶，WTI 为 130.5 美元/桶。从全年平均收盘价格看，2022 年，布伦特原油期货均价为 98.86 美元/桶，WTI 期货均价为 94.33 美元/桶，与 2021 年相比，分别高出 27.91 美元/桶和 26.32 美元/桶，涨幅分别高达 39.34%和 38.7%。天然气也涨出历史最高价。荷兰的产权转让设施基准(the Title Transfer Facility, TTF)LNG 价格于 2022 年 3 月 7 日涨到了历史最高价格水平，达到 345 欧元/兆瓦时，这也是国际天然气市场出现的最高价格水平；从全年平均收盘价来看，2022 年 TTF 均价为 133.312 欧元/兆瓦时，是 2021 年的 47.846 欧元/兆瓦时均价的 2.786 倍。煤炭在 2022 年全年保持持续上涨态势，不断创出新的价格纪录。亚太地区煤炭贸易的价格标杆——澳大利亚纽卡斯尔煤炭期货交易价格(Newcastle Coal Futures Price)从 2022 年 1 月 3 日的 157.5 美元/吨，一路涨至 2022 年 12 月 30 日的 404.15 美元/吨，涨幅高达 156.6%；全年均价达到 357.896 美元/吨，是 2021 年均价 136.68 美元/吨的 2.62 倍。

全球能源市场油气价格飙升大幅增加了中国能源进口的成本和经济负担。根据中国海关总署数据，2022 年原油进口成本为 4817.1 元/吨，同比上涨 50.3%；LNG 进口成本为 5498 元/吨，同比上涨 52.4%。为保障能源稳定供应，中国应进一步加强煤电油气产供储销体系建设，保障能源安全稳定供应。同时，中国应继续加大油气资源勘探开发和增储上产力度，

提高国内资源保供能力。此外，俄乌冲突也给中国敲响了警钟。俄乌冲突下，能源成为强有力的制裁武器，中国与欧洲类似，同样依赖能源进口，进口集中度较高，欧洲在俄乌冲突下暴露出的种种问题一定程度上在中国也存在。若未来中美博弈进一步升级，能源或成为美西方国家打击中国的重要手段。对此，中国应与能源出口国保持良好关系，将进口来源多元化、分散化，同时做好危机应急管理，增加能源储备或库存，确保能源供应安全。

（二）能源短缺使核电迎来“复苏”

1.全球核电发展现状

近年来，核电在全球能源市场的份额持续回升。根据国际能源署(International Energy Agency, IEA)和世界核协会(World Nuclear Association)的报告，2011 年日本福岛第一核电站事故破坏了公众对核电的信心，随后全球核电机组发电量锐减，直到 2018 年才恢复至 2011 年的水平（2563 太瓦时）。2021 年全球核电机组发电量达到 2653 太瓦时，约占全球发电量的 10%。截至 2022 年年底，全球 32 个国家运行着共 411 座核反应堆，其中美国 92 座、法国 56 座、中国 55 座。中国方面，2022 年运行核电机组累计发电量达 417.79 太瓦时，同比上升 2.52%。相比 2013 年核电发电量 105 太瓦时，中国的核电发电量在 10 年内增长了近 3 倍。根据国际能源署 2022

年 6 月发布的《核电与保障能源转型：从今日的挑战到明日的清洁能源体系》(Nuclear Power and Secure Energy Transitions: From Today's Challenges to Tomorrow's Clean Energy Systems)报告，尽管发达国家拥有的核电装机容量占全球近 70%，但相关投资已现停滞，且新项目预算和进度都与预期目标相距甚远，发达国家已失去核电市场领先地位。自 2017 年至今，全球建设的 31 个反应堆中有 27 个是中国或俄罗斯建设的。随着全球对于核电在减少化石燃料方面发挥重要作用的共识不断加强，加之气候危机日益严峻、可再生能源尚无法成为能源供应的“主力军”，以及 2021 年至今爆发的多轮能源危机，世界多国开始重新审视核电的作用，核电发展正迎来新曙光。

2.核电作为一种稳定、清洁、高效的能源备受关注

2022 年，俄乌冲突爆发，美西方国家联合对俄罗斯发起以能源为主的多项制裁，俄罗斯将石油、天然气等能源“武器化”，进行反制，这使冷战后建立起来的俄欧能源合作关系急转直下。在此背景下，核电作为一种稳定、清洁、高效的能源备受关注，多国暂停核电退役或重启核电计划。国际能源署表示，核电是仅次于水电的第二大低碳电力来源，可以减少对进口化石燃料的依赖，帮助各国转型为以可再生能源为主的能源系统。

2022 年，美国在世界多地挑起地缘政治矛盾的同时，强调国

防和科技政策并行，启动了重塑核能供应链计划。美国拜登政府通过《通胀削减法案》向美国能源部(DOE)爱达荷国家实验室(INL)投入 1.5 亿美元，升级其核能基础设施，加强核能研发。美国能源高级研究计划局(Advanced Research Projects Agency-Energy, ARPA-E)多次向优化核废料和先进反应堆处置系统(Optimizing Nuclear Waste and Advanced Reactor Disposal Systems)和将乏燃料放射性同位素转化为能量(Converting UNF Radioisotopes Into Energy)等计划提供资金，支持先进核技术研发。2022 年 2 月，法国总统马克龙公布核电复兴计划，内容包括新建 6 台第二代欧洲压水反应堆(EPR-2)，在保证安全的前提下对运行超过 50 年的反应堆进行延寿，以及提供能源政策、资金和技术支持等。2022 年 4 月，英国发布旨在保障能源安全独立的《英国能源安全战略》，该战略的核心是发展核能，包括在未来 10 年内以每年大约 1 个新核电项目的速度推进核电的开发，到 2050 年使英国核电发电量满足英国电力需求的 25%以上。2022 年 6 月，韩国政府取消“去核”政策，重启核电发展，计划到 2030 年将核电在电力结构中的占比提高至 33%，发电量达到 2.017×10 5 吉瓦时，同时大力推动核电出口，将海外核电项目与汽车、半导体和电动汽车电池等重点产业挂钩，使项目更具针对性和有效性。2022 年 8 月，日本首相岸田文雄表示，将继续推进核电重启进程，计划到 2023 年秋季使核电机组的重启数量从目前的

10 个增加到 17 个，同时延长核电机组运行寿期、研发和建设新一代核电反应堆。德国延长原计划 2022 年 12 月关闭的 3 座核电站运营时间。比利时政府宣布将 2025 年废除核能的计划延后 10 年。波兰、哈萨克斯坦、沙特阿拉伯、约旦等多个无核电国家已宣布在本国发展核电。

此外，核能制氢、供热等为核电发展创造新机遇。氢能被视为未来能源系统的关键组成部分，当前主流制氢方法是通过天然气水蒸气重整制氢和煤气化制氢，两者制氢过程会排放二氧化碳，而未来氢能的发展方向为零碳制氢。核能制氢可充分利用核的热能或电能，提高核能利用的效率和应用范围，是在目前经济和技术条件下可行的零碳制氢方式。核能供热相比传统的化石能源供热，更清洁、更经济。

3.对中国的影响与启示

当前，俄乌冲突仍在持续，加之国际形势错综复杂，将继续影响全球能源价格。中国能源对外依赖程度较高，而且中国的电力消费需求量仍在不断提高，因此，发展核电可以为中国能源安全提供有力保障。福岛核事故已过去 12 年，世界核电发展态势基本稳定。同时，在全球核电“复苏”的背景下，中国核电“走出去”面临着机遇。中国正在从核电大国向核电强国转化，高效建设和低成本供应链的中国核电，正成为世界核电发展的一种可行选择。2021 年 5 月，中国“华龙一号”海外首堆工程项目建成；2022 年 2 月，中国“华龙

一号”核电技术通过英国通用设计审查(Generic Design Assessment, GDA)，获得了设计认可确认(Design Acceptance Confirmation, DAC)和设计可接受性声明(Statement of Design Acceptability, SoDA)证书，提升了“华龙一号”在国际市场的影响力和竞争力。中国应进一步加强核电领域“卡脖子”技术研发，推动第三代核电设备批量化生产和出口，加速第四代核电技术商业化进程，实现核电强国目标。

（三）欧盟强化能源转型雄心影响全球可再生能源发展

1.欧洲实施 REPowerEU 能源转型新战略

俄乌冲突让 2021 年下半年以来已处于高位的欧洲能源价格进一步攀升，加剧了欧盟能源安全供应的紧张局势，欧盟考虑加快应对气候变化和保障能源安全的能源转型步伐。2022 年 5 月，欧盟公布了预期投资 2100 亿欧元的 REPowerEU 能源转型新战略，这是在 2021 年推出的“减碳 55%”(Fit for 55)一揽子计划基础上进一步强化的欧盟能源转型行动纲领。新战略的总体目标是在 2027 年前摆脱对俄罗斯化石能源的依赖。REPowerEU 提出将欧盟 Fit for 55 一揽子计划中的 2030 年可再生能源占比目标从之前的 40%提高到 45%；大幅度提高风光开发规模，2025 年光伏发电量在 2021 年基础上翻倍，可再生能源装机容量从 2021 年的 511 吉瓦增加到 2030 年的 1200 吉瓦；为实现工业领域降碳，欧盟计划对工业用能进行

可适用氢原料和燃料改造，将欧盟制氢目标提高一倍，2030年生产、运输和进口可再生能源制氢量达到2000万吨；能效方面，欧盟将2030年能源消费总量较2020年降低9%的目标，扩大到13%。

部分国家采取相应行动。2022年5月，丹麦、德国、比利时与荷兰在北海海上风电领导人峰会(The Leaders'Summit on Offshore Wind in the North Sea)上签署联合声明文件，提出将北海打造成欧洲的绿电中心，到2050年将4国的海上风电装机增加10倍，即从目前的16吉瓦提高至150吉瓦，其中2030年达到65吉瓦。为更好地连接海上风电和陆地电网，四个国家承诺将共同新建海上能源岛。2022年8月，德国、丹麦、瑞典、波兰、芬兰、爱沙尼亚、拉脱维亚、立陶宛八国签署《马林堡宣言》，加强海上风电合作，计划在2030年将波罗的海地区海上风电装机容量从目前的2.8吉瓦提高至19.6吉瓦。此外，2022年德国经济部提出一揽子能源措施，尚待立法确认的一项是将100%可再生能源供电目标从原来的2050年提前至2035年,具体分技术目标则已经确定：陆上风电到2027年新增装机达到10吉瓦；光伏2028年新增装机达到20吉瓦，2030年累计装机达到215吉瓦；海上风电到2030年和2045年累计装机分别达到30吉瓦和70吉瓦。

2.欧洲碳边境调节机制完整方案确定

近两年，欧盟重点推进碳边境调节机制(Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM)。经过几轮的调整和谈判后，2022 年 12 月，欧盟理事会和欧洲议会就欧盟碳排放交易体系(EU Emissions Trading System, EU ETS)改革方案和社会气候基金(Social Climate Fund)达成了协议，确定了碳边境调节机制的完整方案。核心点主要是：(1)CBAM 的产品范围为钢铁、水泥、铝、化肥、电力和氢；(2)覆盖的排放范围为直接排放（在某些例外情况下，也覆盖间接排放，如在生产过程中使用外购电力产生的碳排放）；(3)2023 年 10 月 1 日至 2025 年 12 月 31 日为只报告、不征收的过渡期，即从 2026 年开始正式征收 CBAM；(4)削减欧盟企业免费配额的时间表为 2026 年到 2034 年，逐年削减比例为 2.5%、5%、10%、22.5%、48.5%、61%、73.5%、86%、100%；(5)对欧盟出口产品的碳成本补贴到 2025 年再进行研究。对于进口到欧盟的相关产品，实施 CBAM 后，意味着进口商需自行申报进口产品的隐含碳排放量，单位碳排放量征收标准为 EU ETS 周度碳价，如生产国有碳价相关机制，可予以抵扣。由于 CBAM 影响面较大，其方案的确定将对全球的经济生产和消费模式产生影响，虽然目前只限于 6 个直接排放领域，但后续存在扩大间接排放范围的可能性，且如果领域和范围扩大，必将更大范围影响全球可再生能源等低碳能源的生产和消费格局。

3.对中国的影响与启示

近年来美欧在清洁能源发展和气候变化问题上动作频频，一方面是出于其能源转型和保供安全需要，另一方面更有回流产业推进经济发展的需求。欧盟在强化能源转型雄心的同时，还加强了与美国清洁能源领域的贸易与技术同盟。2022 年，美国和欧盟等都重点强调了对中国风光等可再生能源产业的依赖所面临的威胁，提出重建各自的可再生能源制造业，并通过贸易战等手段继续打压中国可再生能源产业，因此中国风光等制造业进一步巩固优势仍面临持续性的挑战。对此，中国需要注重技术创新，强化产品的可持续指标，补短板延长板，同时进一步培育可再生能源等绿色产品认证、碳足迹核算等，完善相关标准规范，提升行业软实力。此外，中国还要创造良好的政策环境，降低制造企业负担，提升相对竞争力；要统筹产业布局，注重上游产品产能协调，形成具有竞争力的产业集群。对外合作上，中国应引导可再生能源制造和开发企业加强与欧洲上下游企业的合作，形成多环节的利益绑定。

按照此次公布的完整方案，CBAM 对中国制造业的影响较为有限，但仍需要提前布局，防止生变。中国应重视碳市场及相关机制建设，提前做好应对相关国际贸易影响的准备。中国全国碳市场建设刚起步，且目前仅将发电企业被纳入，与可再生能源绿色电力交易、绿色证书认购之间的机制还没有衔接，与其他国家和地区的碳市场运行机制也存在差异。政

府部门应重视和加快相关制度建设，完善机制，做好衔接，掌握主动权和提升话语权。

（四）绿氢成为全球氢能战略和产业发展的热点

1.绿氢在主要国家氢能战略中的地位越发重要

美欧等主要发达国家和地区继续推进以绿氢为核心的氢能战略。美国在《通胀削减法案》中对包括氢能在内的新能源提供高达 3690 亿美元的资金支持。在需求端的政策是对新能源车（包括燃料电池车）和以前拥有新能源车的补贴，在生产端的政策包括将投资税收抵免政策延期 10 年、抵免比例由现阶段的 26%提高至 30%，10 年后逐渐退出。对于制氢端，根据对氢的整个生命周期温室气体排放量核算结果，《通胀削减法案》为每千克氢气提供了最高 3 美元的税收抵免。通过税收抵免政策及美国能源部氢计划中正在进行的研究、开发和示范，美国能源部将加速绿色制氢技术进步和扩大规模，力争在未来 10 年内将每千克清洁氢的成本降至 1 美元。欧盟 REPowerEU 提出要大幅提高可再生能源装机量，并在氢能领域追加投资 270 亿欧元，到 2030 年实现可再生制氢产量 1000 万吨和进口 1000 万吨的目标（2020 年的氢能战略中只提到 2030 年生产 1000 万吨绿氢），以替代难脱碳工业和交通部门的化石燃料。为支持欧盟的战略，欧盟主要国家设定了 2030 年电解槽安装容量目标，如丹麦（4～6 吉瓦）、

法国（6.5 吉瓦）、意大利（5 吉瓦）、德国（5 吉瓦）和西班牙（4 吉瓦）。此外，英国也于 2022 年 4 月发布计划，到 2030 年将国内低碳氢产能目标从安装 5 吉瓦电解槽提高到 10 吉瓦。

日本氢能战略面临氢供应挑战。日本于 2017 年制定了国家氢战略规划，力求在所有部门推行采用氢能，打造世界上第一个“氢能社会”。2021 年 10 月，日本公布的第六版能源战略计划，将气候变化和脱碳置于首位，到 2030 年氢能在能源结构中的占比要达到 11%；尤其强化氢能在汽车、家庭、工业等领域的应用。然而，由于日本缺乏部署足够装机容量的风能或太阳能所需的自然资源和幅员条件，使得大规模生产“绿氢”步履维艰。加之从海外进口氢气的长协成本也日渐走高，氢能战略推行并不顺利，日本正在面临制氢成本和购氢价格双双高企的挑战。

韩国新政府持续推进氢能战略。韩国新政府成立后于 2022 年 11 月召开首次氢经济委员会(Hydrogen Economy Commission)会议，公布新的氢经济政策方向。韩国氢经济委员会认为原有氢经济政策在竞争力、温室气体减排效果方面存在局限，新政策主要由发展相关氢能基础设施和产业等内容组成。韩国政府将扩大氢能公共汽车和货车的购买补贴，延长购置税、通行费减免等措施，创造氢能需求，到 2030 年实现普及 3 万辆氢能商用车的目标。韩国还将建造年产量

达 4 万吨的全球最大规模液氢成套设备、年进口量达 400 万吨的氨进口终端等基础设施。在生产领域，韩国政府将构建清洁氢能生产体系，争取可再生氢的年产量在 2030 年和 2050 年分别达到 100 万吨和 500 万吨，并将氢气自给率提升至 50%。2023 年 1 月，韩国政府提供 2400 亿韩元（1.927 亿美元）资金，创建 6 个“氢城市”（平泽、南杨州、唐津、保宁、光阳和浦项）。根据计划，平泽将建设一个新的氢气港口和蓝色制氢特别综合设施；南杨州将在公共住房、公共办公室、体育和文化中心、公共交通，以及基于垃圾和沼气制氢的工厂等安装燃料电池，从而成为一个“以氢经济为中心的自给自足城市”；唐津、保宁和光阳也将大量应用氢能，并建造利用牲畜粪便等有机垃圾生产氢气的工厂，以及开展氢动力拖拉机和无人机示范。

其他地区也开始更多地关注氢气生产和交易。包括澳大利亚、拉丁美洲、北美、北非和中东在内的几个地区都将自身定位为可再生能源或低碳能源的出口国。这些地区可再生资源和土地均非常丰富，具备打造绿氢生产中心的优异条件。埃及在 2022 年联合国气候变化大会(The 27th Conference of the Parties of the UNFCCC, COP27)宣布和挪威在红海西海岸的艾因苏赫纳港口(Ain Sokhna Port)建设一个大型绿色氢气工厂；2022 年 3 月，埃及政府和马士基(Maersk)签署合作协议，探讨在埃及建立大规模绿色燃料生产。阿曼的目标是成为全球

最大的绿氢生产商之一，到 2030 年可生产 100 万吨绿氢，为发展绿色制氢成立了阿曼能源发展公司(Energy Development Oman)的全资子公司 Hydrom。沙特阿拉伯开始在建设中的未来新城 Neom 建造一个大型绿色氢能设施。澳大利亚 Fortescue Future Industries 公司计划利用澳大利亚丰富的太阳能和风能，建立大规模生产绿氢的北昆士兰超级枢纽(North Queensland Super Hub)。欧洲和日本正在考虑从中东、北非和其他地区的几个潜在出口国进口氢气，新加坡也正在考虑从澳大利亚进口氢气。

为了推动全球氢供应链的形成，主要经济体和组织不断加强双边及多边合作。2022 年 12 月，沙特阿拉伯与日本在循环碳经济、碳回收、清洁氢和燃料氨等领域签署合作备忘录；2022 年 2 月，沙特阿拉伯与中国在利雅得交换了氢能领域合作文件文本。欧盟和日本于 2022 年 12 月签署氢能合作谅解备忘录，旨在刺激创新并开拓国际氢能市场，共同致力于打造可持续和负担得起的低碳/零碳氢产业链。在 2022 年 12 月的欧盟-地中海国家集团领导人会议(EU-Med9)期间，西班牙、法国和葡萄牙三国领导人宣布欧盟首条大型绿氢输送走廊的建设计划。该绿氢输送走廊计划起自葡萄牙，穿过地中海，连接西班牙、法国等多个欧洲国家，是欧盟首条大型绿氢输送管道。世界银行在 COP27 宣布创建“氢能发展伙伴关系”(Hydrogen for Development Partnership, H4D)，旨在促进

发展中国家使用低碳氢能，这将有助于催化未来几年氢能投资的重大融资，包括来自公共和私人来源的融资。2.对中国的影响与启示

中国氢能顶层设计框架落地。2022 年 3 月，国家发展和改革委员会和国家能源局联合印发《氢能产业发展中长期规划（2021—2035 年）》，提出未来要构建清洁化、低碳化、低成本的多元制氢体系，重点发展可再生能源制氢，严格控制化石能源制氢。规划提出的各阶段发展目标包括：到 2025 年，基本掌握核心技术和制造工艺，燃料电池车辆保有量约 5 万辆，部署建设一批加氢站，可再生能源制氢量达到每年 10 万至 20 万吨；到 2035 年，构建多元氢能应用生态，可再生能源制氢在终端能源消费中的比重明显提升。在地方层面，中国已形成北京、上海、广东、河南和河北五大示范城市群，长三角、珠三角、环渤海三大区域氢能产业呈现集群化发展态势。

中国是世界最大的制氢国，在氢能制备、储运、加氢和燃料电池等领域产业链已初具规模，但对照世界主要国家氢能产业发展和政策支持力度，中国在绿氢产业化上仍面临巨大挑战，包括绿氢的经济性不足、大规模低成本绿氢技术路线尚不明确、技术装备水平有待提高等，需要进一步加强政策支持，加快技术创新，稳步构建绿氢产业体系。首先，需要给予绿氢充分的政策支持。例如，对电解制氢项目给予电价支

持，研究出台绿氢生产的专用电价，允许可再生能源电力直接交易并给予过网费优惠；鼓励发展配置一定比例制氢装置的可再生能源项目等。在消费端，政府部门应强化绿色氢能消费引导，探索构建绿氢与碳市场衔接机制，有条件的地区也可对绿氢消费进行一定程度的补贴。其次，推动企业积极开展项目示范，探索可行的商业模式，降低制氢成本。例如，开展风光互补制氢，或者新能源电力+谷电制氢等多种模式，在不增加用电成本的同时提高制氢设备的利用率，从而降低制氢的成本。在满足安全标准的条件下，政府部门可鼓励发展加氢站内电解制氢。最后，建议发挥新型举国体制优势和企业创新主体地位，设立国家重点技术研发实验室、创新联合体等加强绿色制氢技术、催化剂、双极板、膜电极、质子交换膜、密封件等短板领域核心技术和关键装备开发，加速国产装备的商业化应用，加快形成具有完全自主知识产权的制氢技术，通过技术进步和规模效应不断降低制氢设备及储运装备成本，为绿色制氢产业实现规模推广打好基础。

此外，随着能源绿色转型步伐加快，新能源装机数量日益提升，光伏、风电等存在波动性、间歇性难题凸显，抽水储能和新型储能为新能源大规模发展提供了重要支撑。目前，中国储能市场已位居世界第一，在新型储能装机中，锂离子电池储能占比 94.5%、压缩空气储能 2.0%、液流电池储能 1.6%、铅酸（炭）电池储能 1.7%。此外，飞轮、重力、钠离子等储

能技术加速进入示范阶段。

二、化石能源

当前，能源领域正在经历深刻变革，化石能源的发展既要符合全球绿色低碳转型大趋势，又要能够应对能源供应危机带来的新挑战，发挥“压舱石”的作用。新的油气项目更加环境友好、节能减排；深层、深水、非常规领域的油气资源拥有巨大的发展潜力，新技术、新装备助力深层、深水、非常规油气勘探开发；油气巨头在稳步推动转型发展的同时加速新能源布局，实现新旧能源协同发展；煤炭开采更加安全、高效，煤炭利用更加清洁、高效、低碳，煤化工技术快速发展，煤炭作为工业原料的属性越来越突出；化石能源脱碳技术研发不断。

（一）油气

1.中国深层油气资源勘探开发取得新突破

油气资源勘探开发不断向深层、超深层迈进，对于超深井电动钻机、全过程精细控压钻完井等技术和装备提出了越来越高的要求。2022 年 6 月，中国石油川庆钻探工程公司在西南油气田双鱼 001-H6 井安全钻至 9010 米井深完钻。这是中国石油第一口超 9000 米的水平井。其中，川庆钻探采用了自主研发的“CQ-IGS 水平井一体化地质导向技术”，控制实时

钻井轨迹在地下近 8000 米处的储层中，稳定高效穿行超过 1 千米，解决了水平段井眼轨迹控制的难题。川庆钻探采用了自主研发的抗高温强封堵的油基钻井液体系，在水平井段钻井中实现井壁稳定无垮塌、最大井斜 92.16 度，最高井温 180 摄氏度起下钻通畅无阻卡。川庆钻探还利用抗高温强封堵的油基钻井液体系加固体润滑剂玻璃微珠等方式，解决了超深井定向脱压问题，为该井的顺利钻探提供了支撑。2022 年 8 月，中国石化在位于塔里木盆地中西部的顺北 803 斜井测试获高产工业油气流，折算日产原油 244.3 吨、天然气 97 万立方米，油气当量达到 1017 吨，完钻井深 8110 米，这是中国第一个以“深地工程”命名的油气项目。2023 年 2 月，中国石油西南油气田公司位于蓬莱气区的蓬深 6 井顺利完钻并成功固井，井深最深达到 9026 米，再次刷新亚洲最深直井纪录。蓬深 6 井于 2021 年 7 月 5 日开钻，原设计井深 7990 米，为进一步探索灯影组深部地层含油气性，最终加深钻进至井深 9026 米完钻。

2.中国首座海上可移动自升式井口平台在广西油田投产

2022 年 4 月，中国自主设计制造的首座海上可移动自升式井口平台“海洋石油 163”在北部湾海域正式投产。与传统的固定式导管架井口平台相比，“海洋石油 163”平台具有可升降、可移动、可重复利用的特点，被业内称为“小蜜蜂”。在完成当前开发生产任务后，“海洋石油 163”平台可通过

升降系统降至海面，用拖轮拖至新的作业地点继续使用，以提高装备利用率，降低油田开发成本，更好地开发边际油田（地处边远、开发成本高、投入产出比低）。

3.中国首套自主研发深水水下生产系统正式投用

2022 年 9 月，中国南海莺歌海东方 1-1 气田东南区乐东块开发项目投入生产，中国自主研发的首套深水水下生产系统正式投入使用。该项目主要生产设施包括 2 套水下生产系统、2 条油气混输海管和 2 条复合脐带缆，计划投产 4 口开发井，高峰日产天然气超 120 万立方米。深水水下生产系统由水下井口、水下采油树、水下控制系统、水下多功能管汇等多种复杂系统组成，是开发海洋油气资源的重要技术装备。该项目投入生产标志着中国深水油气开发关键技术装备研制取得重大突破，对打造自主可控的海洋油气装备体系、保障国家能源安全具有重要意义。

4.中国首口全国产化重建井筒重复压裂井获高产

重建井筒重复压裂技术起源于北美，是在气井原套管内下入更小尺寸的套管，然后在小套管内进行分段压裂施工，对储层进行再次改造，以达到提高储量动用率和气藏采收率的目的。2020 年年初，涪陵页岩气田在国内率先开展页岩气井重建井筒重复压裂探索和试验。2023 年 2 月，中国首口采用全国产化工艺技术和工具材料的重建井筒重复压裂气井——焦页 5-1HF 井圆满完成各项施工任务，试获 14.2 万立方米/

天高产工业气流，施工成本较初期降低 28.9%，标志着中国在页岩气重建井筒重复压裂领域打破国外制约。

5.美国 BJ Energy Solutions 公司推进下一代压裂平台部署

2021 年年底，美国 BJ Energy Solutions 公司宣布在加拿大推广其研发的下一代压裂平台 TITAN。该压裂平台的核心是 BJ Energy Solutions 公司研发的 TITAN Fleet 泵。TITAN Fleet 由 5000 马力直接驱动天然气涡轮机提供动力，可使用气态天然气、液化天然气、压缩天然气等多种燃料，并在天然气不可用时可使用柴油。TITAN Fleet 能够以低碳排放、低成本、高可靠性和高效率运行。此外，BJ Energy Solutions 公司还为该压裂平台设计了支持机器学习的 FACTS 操作系统和 ThinFrac 系列减摩剂。2022 年 10 月，BJ Energy Solutions 公司的 TITAN 直接驱动涡轮技术获得《世界石油》(World Oil)期刊的 2022 年最佳完井技术奖(Best Completion Technology Award)。

（二）煤炭

1.中国自主研制的大型煤制天然气甲烷化技术取得突破

2022 年 7 月，中国自主研制的甲烷化催化剂在新疆庆华能源集团大型煤制天然气项目中一次性开车成功，标志着中国自主研制的大型煤制天然气甲烷化技术取得突破。其中，中国中化旗下西南化工研究设计院有限公司自主研制的煤制天然气甲烷化催化剂起到了关键作用。该催化剂具有耐高温、

高活性、高稳定性和抗积炭等优点，能完全满足大型煤制天然气工业生产要求，在新疆庆华能源集团大型煤制天然气项目中首次实现 110%负荷平稳运行，获得的甲烷浓度为 61.7%，高于国外引进技术近 3%。

2.中国煤气化制氢技术应用获突破

2022 年 5 月，中海石油炼化有限责任公司宣布中国首套采用 E-Gas 技术煤制氢联合装置已连续平稳运行超 270 天，累计生产氢气超 5.5 万吨。目前，全球仅有两套在运行的 E-Gas 煤制氢联合装置。E-Gas 煤制氢联合装置以煤炭为还原剂，水蒸气为氧化剂，在高温下将碳转化为一氧化碳和氢气为主的合成气，经过净化、一氧化碳转化、提纯等环节，生产出氢气和合成气，具有碳转化率高、热利用效率高、耗氧少等特点。与传统天然气制氢工艺相比，可降低成本 20%～25%。中海石油炼化有限责任公司所生产的氢气主要用于炼油的加氢装置和化工的丁辛醇装置，以生产出高质量的清洁油品和化工品。

3.全球规模最大煤基乙醇工业化项目在陕西正式建成

2022 年 6 月，由陕建北油工程公司 EPC 总承包的陕西延长石油榆神能化 50 万吨/年煤基乙醇项目完成中期交工，标志着目前全球首套规模最大合成气制乙醇工业化装置由建设阶段全面转入试车准备阶段。该项目采用了中科院大连化物所与延长石油集团共同开发的二甲醚羰基化制乙醇技术，以煤

为原料代替粮食等生物质原料生产无水乙醇及其他化工产品，既为煤炭清洁利用开辟了新途径，也缓解了乙醇对粮食原料的依赖。按照 3 吨粮食原料生产 1 吨乙醇测算，榆神 50 万吨/年煤基乙醇项目建成投产后，每年可节约粮食原料 150 万吨。

4.美国能源部开发煤炭废料转化建筑材料技术

2022 年 3 月，美国能源部化石能源和碳管理办公室(FECM)宣布在“含碳矿石加工计划”(Carbon Ore Processing)框架下，投入 220 万美元支持一个将煤炭废料转化为高强度建筑材料项目，旨在开发新型碳基转化技术，以开辟煤炭利用新用途。此次选定的项目由美国 X-MAT Carbon Core Composites 公司承担，该公司将建造一个原型结构以测试煤基建筑材料，包括屋顶瓦片、壁板、砖块和砌块等。

5.美国能源部开发煤基资源提取稀土和关键矿物

2022 年 10 月，美国能源部提供 3200 万美元支持前端工程设计(Front-End Engineering Design)研究，加速矿物开采和加工技术的应用，以从美国国内煤炭资源中提取稀土元素和其他关键矿物。稀土元素和其他关键矿物是美国清洁能源技术，如太阳能电池板、风力涡轮机、电动汽车和氢燃料电池制造的关键。全美范围内有数十亿吨的煤炭废物和灰烬、酸性矿山废水等废物流，这些来自采矿和能源生产相关活动的废物流中含有各种有价值的稀土元素和其他关键矿物。美国目前

80%以上的稀土元素从海外供应商进口，用来生产清洁能源技术及日常其他不可或缺的产品，如手机、计算机、医疗设备等。

（三）化石能源脱碳

1.美国加大脱碳技术研发

2022 年 2 月，FECM 计划投资 9600 万美元开发点源碳捕集技术，旨在推进天然气发电和工业领域二氧化碳捕集，使碳捕集效率达到 95%以上。该计划将支持开发和测试用于天然气联合循环发电(Natural Gas Combined Cycle)和工业部门的碳捕集技术，包括在真实的烟气条件下，在工业设施中开发 95%或更高捕集效率的碳捕集技术；在精炼厂、化工生产（氨和石化）、矿物生产（水泥和石灰）、天然气加工和钢铁生产等工业部门进行碳捕集系统前端工程设计研究等。

2022 年 4 月，FECM 发布《战略愿景：化石能源和碳管理在实现温室气体净零排放中的作用》报告，重点针对点源碳捕集（天然气发电厂点源碳捕集技术和工业应用点源碳捕集技术）、二氧化碳转化技术（藻类转化、催化转化、矿化技术）、二氧化碳去除技术、可靠的碳封存和运输技术、碳管理技术与制氢技术融合、甲烷减排等 7 项化石能源技术主题提出了未来研发方向。

2022 年 8 月，FECM 宣布为 10 个项目投资 3100 万美元，开

发在天然气发电、垃圾发电、水泥和钢铁生产等电力和工业部门应用的碳捕集技术。FECM 表示，美国需要在电力和工业部门商业部署碳捕集技术，减少这些部门 95%的二氧化碳排放，从而实现 2036 年电力部门脱碳和 2050 年碳中和目标。这 10 个项目包括：开发和测试用于天然气联合循环的转型碳捕获材料、设备和工艺，在天然气发电厂、垃圾焚烧发电厂、水泥制造厂等工业部门厂区进行碳管理系统的前端工程设计等。

2022 年 9 月，美国能源部发布《脱碳工业路线图》(Industrial Decarbonization Roadmap)，确定了减少美国制造业工业排放的 4 个关键途径，包括提高能效，工业电气化，低碳燃料、原料和能源替代，以及碳捕集、利用和封存(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS)。通过上述关键途径，到 2050 年共可使钢铁、化工、食品、炼油和水泥这 5 个重点行业的碳排放减少 87%。其中，钢铁行业研发与示范优先事项包括：炉气回收、大规模使用低碳氢直接还原炼铁、加热炉电气化、电解炼钢、氢等离子熔炼还原和顶气回收；为钢铁设施开发成熟的能源管理系统；加速向低碳燃料和过程热解决方案过渡等。化工行业优先事项包括：从传统的氨、甲醇和乙烯生产路线转变为使用以低碳能源、CCUS、甲烷蒸汽重整制取氢气作为原料的工艺；研发、改进化学转化过程的催化剂，在提高产量的同时降低碳足迹等。炼油行业优先事项包括：开

发利用低净碳原料生产低净碳排放液体运输燃料的技术；开发使用氢燃烧提供高温工艺热的技术等。

此外，美国也加大对甲烷减排技术的投资力度。甲烷作为排放量仅次于二氧化碳第二大的温室气体，其破坏程度却是二氧化碳的 25 倍。拜登政府设定了 2030 年甲烷排放比 2020 年减少 30%的国家目标。美国希望通过开发、部署新的甲烷减排技术，实现上述目标，缓解全球变暖。2021 年 12 月，美国能源部资助 3500 万美元开发甲烷减排技术，以减少石油、天然气和煤炭行业的甲烷排放，包括开发新型燃气发动机、新型点火燃烧装置，以及开发煤矿开采过程中的甲烷减排新技术。2022 年 8 月，美国能源部拨款 3200 万美元，研发减少石油和天然气行业甲烷排放的技术。美国能源部表示，美国拥有超过 200 万个油井、天然气管道网络、天然气压缩站，以及其他石油和天然气基础设施，这些设施每年排放约 800 万吨甲烷，对于气候的影响相当于排放 2 亿吨二氧化碳。对此，美国能源部将投资新的检测、量化和缓解技术，推进构建地基甲烷传感器技术网络，减少石油和天然气生产过程中的甲烷排放。

2.日本启动全球首个煤气化燃料电池联合循环发电示范项目第三阶段验证试验

2022 年 4 月，日本新能源产业技术综合开发机构(NEDO)启动整体煤气化燃料电池联合循环发电(Integrated Coal

Gasification Fuel Cell Combined Cycle, IGFC)示范项目“二氧化碳分离/回收型吹氧 IGFC 示范”第三阶段验证试验，以开发低碳燃煤发电技术。该项目第一阶段于 2017 年启动，实现了 170 兆瓦规模 IGFC 示范电站 40.8%的全球最高送电端效率；2019 年开始第二阶段验证试验，实现了二氧化碳分离/回收设备的二氧化碳回收率超过 90%、回收纯度超过 99%。第三阶段验证试验将示范从煤气化装置中分离回收二氧化碳，将产生的高浓度氢气输送至固态氧化物燃料电池用于发电等，目标是在 90%二氧化碳回收率的条件下送电端效率达到 47%。

3.中国首个百万吨级 CCUS 项目建成

2022 年 1 月，中国首个百万吨级 CCUS 项目“齐鲁石化-胜利油田百万吨级 CCUS 项目”全面建成。2022 年 8 月，该项目投产，每年可减排二氧化碳 100 万吨，相当于植树近 900 万棵、近 60 万辆经济型轿车停开一年。齐鲁石化捕集的二氧化碳通过绿色运输方式送至胜利油田进行驱油封存。项目实现了二氧化碳捕集、驱油与封存一体化应用。

三、可再生能源

尽管面临地缘局势紧张、供应链紊乱、原材料价格上涨等不利因素，可再生能源依旧保持蓬勃发展的势头。据彭博新能源财经(BloombergNEF)数据，2022 年全球用于能源转型的投资达 1.1 万亿美元，同比增加 31%，首次与化石燃料投资持

平。海上风电开发热度高，新技术涌现；风电制氢潜力巨大，未来或成为大规模绿氢生产最主要的方式；新型光伏电池技术备受关注，投资规模持续增加；光热发电技术取得新进展，具有广阔的应用前景。2022 年，中国可再生能源国际竞争力不断增强，技术的进步推动了成本大幅下降。中国生产的光伏组件、风力发电机、齿轮箱等关键零部件占全球市场份额 70%，在可再生能源领域继续保持全球领先地位，为全球减碳作出积极贡献。

（一）风力发电

1.更多国家和地区推动风电项目建设，海上风电开发热度高

根据 2022 年前三季度全球风电发展情况，预计 2022 年全球风电新增装机继续保持较高水平，全球风能理事会(Global Wind Energy Council, GWEC)、彭博新能源财经、伍德麦肯兹(Wood Mackenzie)预期 2022 年新增风电装机将接近 100 吉瓦，即略超过 2021 年的 93 吉瓦的新增装机。如果扣除中国市场的影响（预计 2022 年将同比略有下降），2022 年其他国家和地区的风电市场规模将继续增加。

亚洲仍将是第一大风电市场。2022 年中国陆上和海上风电均实现全面平价。由于风机价格持续维持低位，初始投资降低，风电开发企业建设项目的积极性高，开展前期工作的项目数量和装机规模大。但同时，因为没有并网时间带来的抢装压

力及 2022 年 12 月的新冠疫情蔓延，影响了许多地区的风光等新能源项目的并网进程，风电新增装机同比 2021 年下降 21%，但仍达到 37.63 吉瓦，继续在新增和累计装机中保持全球第一，并且由于储备和在建项目多，后续市场规模大，2023 年新增装机有望在 60 吉瓦左右。越南 2022 年风电装机继续增加，且预计未来几年内都将是亚太区域内的重要风电市场。2022 年越南海上风电项目开始规模化发展和招标，如 2022 年 7 月中国金风科技公司中标了越南东部近海的 80 兆瓦风电项目。菲律宾将海上风电作为未来清洁和可持续能源的主要来源，于 2022 年 4 月发布了《菲律宾海上风电路线图》(A Roadmap for Offshore Wind in the Philippines)，提出了到 2050 年海上风电应用潜力达到 40 吉瓦，且将以漂浮式风电技术为主。

2022 年欧洲风电新增装机预期在 15 吉瓦左右，市场主要在西欧（英国、德国、法国、意大利等）、北欧（挪威、瑞典），而 2021 年风光招标规模较大的土耳其在 2022 年前三季度没有开展项目招标。2022 年欧洲海上风电预计新增 4.2 吉瓦，将创新高。法国在 2022 年启动了两个海上风电项目招标。英国计划精简行政审批流程，推进海上风电项目发展，到 2030 年海上风电装机容量达到 50 吉瓦，其中漂浮式海上风电装机容量达到 5 吉瓦。2022 年 8 月，德国、丹麦、瑞典、波兰、芬兰、爱沙尼亚、拉脱维亚、立陶宛八国签署“马林

堡宣言”，加强海上风电合作，计划在 2030 年将波罗的海地区海上风电装机容量从目前的 2.8 吉瓦提高至 19.6 吉瓦。美国由于生产税返还政策得以延期，且度电税收返还额度下降，使风电也进入了又一轮增长阶段，2022 年前三季度新增风电 4.1 吉瓦，且有 22.54 吉瓦风电项目在建，预计近期美国风电将保持较高的装机水平。

风电在其他地区和国家也实现了规模化发展。新兴市场主要有非洲、中东和南美，如巴西和哥伦比亚分别在 2020 年和 2022 年规划了海上风电市场（见表 4-1）。

表 4-1 世界风电累计装机容量（单位：吉瓦）

国家/地区	2001 年	2005 年	2010 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年（预计）
世界	23.90	59.09	197.04	432.68	487.32	539.12	591.00	651.40	742.69	837.00	930.00
欧洲	17.30	40.50	86.65	143.01	155.76	170.62	181.74	196.13	207.84	220.76	235.00
美国	4.25	9.15	40.30	72.57	81.29	87.60	94.52	104.05	118.73	132.74	143.00
印度	1.63	5.34	13.07	25.09	28.70	32.85	35.29	37.51	38.56	40.07	43.00
日本	0.31	1.08	2.33	2.81	3.25	3.48	3.50	3.95	4.37	4.47	4.70
中国	0.40	1.26	44.73/31.00	145.04/129.34	168.73/148.64	188.39/163.67	209.53/184.30	236.32/210.05	288.32/281.72	328.48	365.44

注：中国装机容量 2001—2008 年指“吊装容量”，2009—2020 年指“吊装容量/并网容量”，2021 年及之后指并网容量。资料来源：2001—2021 年数据来源于全球风能理事会、国际可再生能源署(International Renewable Energy Agency)报告；2022 年数据为作者整理。

2.中国风电机组制造和施工装备大型化进程提速

2022 年全球风电机组继续保持大型化、定制化和智能化的发展态势，中国在风电机组大型化研发和生产方面提速，有望实现弯道超车。近两年来，国际海上超大型机组的研发和生产企业主要是德国西门子歌美飒(Siemens Gamesa Renewable Energy S. A.)、美国通用电气(GE)、丹麦维斯塔斯(Vestas)等巨头，分别推出了 12～15 兆瓦的单机产品，中标了一些大型海上风电项目，如西门子歌美飒的 14 兆瓦风电机组在 2022 年中标了英国苏格兰东海岸 840 兆瓦海上风电项目和波兰首个海上风电项目（350 兆瓦）。2022 年在海上风电开始全面平价的情况下，中国海上风电机组价格也大幅度下降，整机企业开始推出超大型机组，如 2022 年 10 月中国金风科技公司和长江三峡集团开发的 13.6 兆瓦海上风电机组在福建正式下线，是亚洲单机容量最大的风电机组，2022 年 11 月双方共同研制的 16 兆瓦单机又在福建下线；明阳智能正在研发 16 兆瓦机组，并于 2022 年 12 月推出海上抗台风型叶片，轮毂长度达到 260 米；中国海装于 2022 年 12 月推出单机容量 18 兆瓦的海上风电机组(H260-18.0)，该机型采用双轴承支撑，在提升承重能力的同时减少风电机组附加载荷对齿轮箱的影响，其配置的 19 兆瓦半直驱永磁风电机，为国内中船电气瞄向 20 兆瓦超大型风机的配套产品。在施工装备方面，挪威海上风电企业 Havfram 将建造 4 艘 NG20000X 型设计的

风电安装船，配备 3250 吨起重机和电池混合驱动系统技术，作业水深 70 米，能够安装高度超过 300 米的海上风机，安装船委托中国中集来福士海洋工程有限公司建造。施工方面，中国大金重工公司在 2022 年 6 月获得了英国 Moray West 项目的 48 套大直径单桩基础订单。对于中国企业短时间内集中开发超大容量单机，业内也存在着争议和疑虑，尤其是相对于欧洲等海上风电场，中国还面临超大机组抗台风等问题，产品性能和可靠性尚待市场检验。

3.风电快速迈进低上网电价时代

2022 年，由于市场竞争激烈，中国陆上风电机组价格持续保持低位，不含塔筒的机头价格降至 2000 元/千瓦以内；海上风电机组价格大幅度下降，大容量新机型的机头招标价格也在 4000 元/千瓦以内，这使风电度电成本大幅度下降，如果不考虑系统消纳成本和强制配置电化学储能带来成本增加的因素，中国风电已具备低价上网的能力。2022 年 7 月福建招标出 0.2 元/千瓦时左右的海上风电上网电价，引起业内热议。许多企业认为无论是从 2022 年风机制造的原材料价格，还是从度电成本的合理性上，风电尚不具备使中国近海风电达到过低上网电价的能力，过低电价的主要原因在于开发企业竞争项目激烈。2022 年，低招标电价问题不仅在中国，在国际上也呈现出这一趋势，如荷兰提出将原计划于 2023—2025 年招标的 4 吉瓦海上风电项目统一在 2023 年四季度招

标，并将引入“负补贴”机制；德国于 2022 年 7 月通过了最新一版《海上风电法案》(Gesetz zur Entwicklung und Förderung der Windenergie auf See)，新增加了一类海上风电项目开发，前期工作将全部由开发企业完成，且电价为唯一竞标因素，并鼓励负补贴电价。国际风电开发和风机制造企业则担忧这些政策将加剧风电的过度竞争，对风电的技术研发和行业长期发展不利。

4.制氢成为风电新的应用方向

随着氢能利用成为热点，越来越多的企业提出海上风电制氢应用的方向并付诸实践。德国莱茵集团(RWE AG)、挪威国家石油公司、荷兰皇家壳牌集团、荷兰天然气网运营商 Gasunie、荷兰大型商业集团 Groningen Seaports、荷兰能源公司 Eneco 等企业正联合开发建设 NortH2 海上风电制氢项目。瑞典大瀑布公司(Vattenfall)于 2022 年 5 月获得英国政府 930 万英镑的资助，将在苏格兰阿伯丁海上风电场建设全球首台就地制氢海上风电设施，德国莱茵集团、西门子歌美飒、西门子能源集团(Siemens Energy)、荷兰皇家壳牌集团也计划在德国北海海上风电基安装一套海上风电制氢系统，这两个项目均预期于 2025 年建成。智利在 2021 年年底公布了一个大型“风电-氢-氨”项目，风电装机规模为 10 吉瓦，用于在南部地区生产制造绿色氢气及氨气，项目将于 2025 年开始建设，计划 2027 年正式投产用于生产氢和氨。

5.风机叶片可回收技术取得进展

风机退役和叶片可回收技术取得进展。2022 年 8 月，西门子歌美飒开发的由嵌入树脂的多种材料组合而成的 100%可回收叶片首次实现了安装应用，叶片长 81 米，配置在德国 Kaskasi 海上风电场。全球知名叶片制造企业艾尔姆(LM Windpower)于 2022 年 3 月推出 100%可回收叶片原型，长度 62 米，由一种热塑性树脂 Elium 和玻璃纤维制成。美国通用电气也提出了 100%可回收叶片计划。维斯塔斯也在 2021 年公布了热固性环氧树脂复合材料叶片回收技术的方案，但认为真正应用于成品风机还需要 6～7 年的时间，比西门子歌美飒等企业进展落后。此外，欧洲海上风机“以大换小”开始规模推进，2022 年瑞典大瀑布公司决定拆除其在荷兰建设的首座海上风电场（16.8 兆瓦，已运行 25 年），并在场址内重新建设一座 132 兆瓦的海上风电场。该公司希望将拆除风机完全回收，但也表示塔筒、机舱相对容易处理，叶片尚在寻找解决方案和合作企业。从未来方向看，可回收叶片将成为新一代风机叶片产品。

（二）光伏发电

1.光伏发电市场规模和产品价格呈现双高，2022 年年底价格走低态势出现但下降速度和时间点难以判断

2022 年全球多晶硅价格居高不下，使光伏组件价格和光伏发

电投资水平维持高位，尽管如此，全球光伏发电市场依然火爆，国际能源署、彭博新能源财经、中国光伏行业协会等预期，2022 年光伏市场装机量将达到 200～240 吉瓦的历史新高。光伏市场火爆的主要原因是国际化石能源价格也处于高位，而光伏发电虽然投资水平增加，但相比之下仍是应用限制因素少、度电成本有竞争力的本土电源，得到许多国家政策的支持。2022 年下半年，多晶硅价格普遍在 300 元/千克左右，最高为 330 元/千克，是 2020 年历史最低价格（低于 60 元/千克）的 5 倍多。由于中国多晶硅产能的扩大（根据中国主要企业公布的数据初步统计，中国多晶硅产能由 2022 年年初的 62 万吨增加到 2022 年年底的 120 万吨，2023 年将继续扩大到 150 万吨），2022 年 12 月多晶硅价格开始呈现走低态势（270 元/千克左右）。业内预期 2023 年多晶硅价格将下降，并带来全球光伏发电投资水平的下降，但具体下降速度和时间点受短期市场供需和上下游之间、同类企业之间博弈的影响大，难以判断。总体上近中期全球光伏发电市场将继续走高，如国际能源署预计 2027 年全球光伏新增装机将为 2021 年的 4 倍左右，达到 650 吉瓦。

从 2022 年预期市场的分布看，亚太地区中国、印度、澳大利亚是主要增量市场。其中，中国为全球最大，2022 年新增装机为 87.41 吉瓦；印度 2022 年前三个季度新增装机容量 11.70 吉瓦，预期 2022 年全年在 16 吉瓦左右；越南、韩国、

日本市场规模比较平稳；澳大利亚主要是“绿氢+储能”带动光伏装机量增长。欧洲主要是受俄乌冲突影响推动了可再生能源发展，2022 年光伏装机量将大大超过既往，有望达到 49 吉瓦，德国、西班牙、葡萄牙、英国、荷兰、意大利、希腊、波兰等市场都将增加。在美洲，美国、巴西、智利占据前三大市场位置，加拿大和哥伦比亚增速较快。中东的沙特阿拉伯和阿联酋在良好的光照资源和政策支持加持下，光伏发电市场发展动力充足（见表 4-2）。

表 4-2 世界光伏系统累计安装容量（单位：万千瓦）

国家/地区	2001 年	2005 年	2010 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年（预期）
世界	175	532	3953	22710	29523	39020	48299	58462	71070	84841	107000
欧洲	29	230	2925	9460	10386	10999	11928	13996	16043	18504	23400
德国	20	143	1719	3970	4068	4229	4516	4891	5372	5873	6600
英国			9.1	880	1191	1276	1306	1322	1346	1380	1700
美国	17	48	253	2560	3296	4136	4981	5907	7381	9371	11300
日本	45	142	362	3440	4204	4950	5616	6319	6976	7419	8000
澳大利亚					669	735	862	1297	1798	2287	2800
韩国					450	584	810	1195	1458	1861	2100
越南							10	499	1666	2400	3000
印度				300	965	1792	2712	3486	3904	4934	6500
中国	2	6.8	86	4318	7742	13048	17400	20470	25340	30640	39204

数据来源：2001—2015 年数据来源于欧洲光伏协会 2015 光伏年度报告；2016—2021 年数据来源于国际可再生能源署报告；2022 年预期数据为作者整理。

2.光伏发电应用继续得到多个国家政策的支持，美欧支持发

展本土光伏制造业

虽然光伏发电在度电成本上已经成为具有竞争力的电力来源，但各国仍给予其很多政策支持。2022 年 8 月，美国通过《通胀削减法案》为光伏发电和储能提供税收抵扣(Investment Tax Credit, ITC)政策支持。德国和英国在 2022 年取消了对户用屋顶光伏系统的增值税，其中德国设定了 30 千瓦单个系统的上限要求。波兰提高了分布式光伏+储能的退税标准，单个光伏系统的退税额从原来的 885 美元提升至 1328 美元。印度于 2022 年 9 月公布的国家电力计划草案(National Electricity Plan 2022)中提出了 2027 年和 2032 年光伏累计装机分别达到 186 吉瓦和 333 吉瓦的目标，并大力支持发展本地光伏产品产能，近期选择先扩展光伏组件产能并购买光伏电池以支撑本土需求，作为支持产业发展行动的一项；印度于 2022 年 11 月取消了针对中国、越南及泰国等地进口的光伏电池及组件所做的反倾销调查。

2022 年光伏国际竞争呈现加剧态势。2022 年 3 月美国启动了对柬埔寨、马来西亚、泰国、越南四个国家光伏产品出口的反规避调查。虽然后续美国拜登政府豁免了这 4 个国家 24 个月的进口关税，但与双玻组件豁免一样仍存在较大的不确定性。此外，2022 年 6 月美国海关和边境保护局(U. S. Customs and Border Protection)将新疆光伏产品作为强制劳动产品而禁止入境，欧洲议会也在 2022 年 6 月跟进。在打压竞争对

手的同时，美欧积极支持发展光伏本土制造业。美国太阳能行业协会(Solar Energy Industries Association)在 2022 年 8 月发布的《催化美国太阳能制造业白皮书》(Catalyzing American Solar Manufacturing)提出 2030 年美国实现 50 吉瓦的光伏本土制造规模；韩国韩华集团(Hanwha Group)、第一太阳能(First Solar)、瑞士梅耶博格(Meyer Burger)等多家企业在 2022 年增加了在美光伏胶膜、异质结组件、碲化镉薄膜组件等产线；2022 年 10 月，欧盟批准了一个光伏产业联盟，希望助力欧盟在 2025 年达到 30 吉瓦的光伏产能配套；梅耶博格、REC solar、Agora 等企业也在欧洲建立了新的异质结(HIT)或隧穿氧化层钝化接触(Topcon)等电池和组件产线。除美欧外，印度于 2021 年 5 月启动第三次针对中国、越南和泰国光伏产品的反倾销调查，2022 年 11 月，印度无措施终止了调查，但预计中印在光伏领域的矛盾仍将持续。叠加贸易争端的不确定性，未来全球光伏制造业竞争将进一步加剧。

3.光伏行业看好 N 型晶硅电池市场前景

2022 年被国内外众多光伏企业认为是 N 型晶硅电池市场发展元年，中国生产的光伏电池中 N 型电池占比从 2021 年的 4%增加到 2022 年的 12%。N 型电池优势包括转换效率高、双面率高、温度系数低、无光衰、弱光效应好、载流子寿命更长等。从目前技术水平看，根据测试机构德国哈梅林太阳能研究所(Institute for Solar Energy Research in Hamelin, ISFH)

测算，P 型 PERC 电池理论转换效率极限为 24.5%，已接近转换效率天花板，近两年降本速度也有所放缓，而 N 型电池效率上限相对高，电池工艺和效率提升明显加快，未来转换效率提升空间更大。2022 年业内量产 N 型电池平均效率已超过 25%（如中国晶科能源研发的 182 N 型电池效率达到了 25.7%），更高效能的 26%的 N 型电池很快会实现量产。在美欧印等国家和地区新布局的光伏电池和组件产线中，N 型 HIT、TopCon 等产线为主流。Topcon 电池的理论转换效率为 28.7%，工业化生产技术路线主要有三种，分别为本征+扩磷、原位掺杂和离子注入，其中本征+扩磷应用普遍，Topcon 的产业化优势使其与市场主流的 PERC 电池技术和产线设备有极高的兼容性，可以从 PERC 产线升级得到 TopCon 产线，这也将为中国下一代光伏产业升级创造了良好条件（2022 年中国 Topcon 产能已超过 40 吉瓦，规划产能超过 100 吉瓦）。HIT 电池的理论转换效率为 28.5%，2022 年 11 月，中国隆基绿能宣布收到 ISFH 的最新认证报告，其自主研发的 HIT 电池转换效率达 26.81%，创造了最新世界纪录；2022 年年底中国企业规划的 HIT 电池产能已超过 80 吉瓦。从 2022 年的市场价格看，N 型光伏组件价格要高出 P 型 PERC 组件价格约 5%，但其效率优势和降本潜力将使行业看好其市场前景。

4.钙钛矿电池的商业化应用进展有限

钙钛矿(Perovskite)电池以钙钛矿结构卤化物作为光吸收层材

料，具有带隙可调、吸光系数高、温度系数低、轻薄柔性等特点，是当前最具大规模推广应用前景的一类新型太阳能电池。自 2009 年面世以来，经过十余年研究，钙钛矿电池的基本原理、材料配方、性能优化路径等方面已逐步成型，光电转换效率已从 3.8%提升到了 25.7%。单结的钙钛矿电池的理论效率极限为 31%，钙钛矿与硅基叠层电池的理论效率达到 40%以上，远高于单纯硅基电池 29.4%的理论效率极限，行业预计未来钙钛矿硅基叠层电池产业化效率可以达到 30%以上。钙钛矿电池技术每年均在持续进步。2022 年 7 月，中国科学院半导体研究所研发的钙钛矿电池获得了 25.6%的认证效率，仅次于韩国蔚山国家科学技术研究院(Ulsan National Institute of Science and Technology)于 2021 年创造的 25.7%的世界最高效率纪录。钙钛矿电池的光谱响应范围在 300～800 纳米，而晶硅电池、铜铟镓硒电池(Copper Indium Gallium Selenide Solar Cell)等可以吸收利用红外光，将钙钛矿电池和晶硅、铜铟镓硒等电池组成叠层电池，能够充分利用各波段的光照，获得更高的光电转换效率。2021 年年底，中国长江三峡集团与杭州纤纳光电公司联合开发的钙钛矿-晶硅四端子叠层组件，经中国泰尔实验室测试认证，在面积约为 20 平方厘米的组件上获得了 26.63%的转换效率。2022 年 6 月，南京大学研发出效率为 28.0%的钙钛矿/钙钛矿叠层电池，刷新了世界纪录。适用于建筑物、便携式设备、消费品等应用

场景的柔性钙钛矿电池和室内钙钛矿电池也是当前的研究热点。2022 年 9 月，清华大学易陈谊团队研发的柔性钙钛矿电池最高效率为 23.6%，刷新了世界纪录。2022 年 11 月，中国暨南大学研究团队获得了独立第三方大面积钙钛矿室内光伏组件转换效率认证，效率超过了 36%。

5.海上光伏发电成为新热点

2022 年 1 月，中国海洋石油集团宣布，中国首个海上油田群光伏电站——涠洲油田群光伏电站正式投运。该电站总装机容量 4.5 兆瓦，平均每年可向涠洲油田群及涠洲岛居民提供绿色清洁电力 5.17 吉瓦时。中国海洋石油集团还计划在涠洲油田群打造中国首个集风光储一体的综合能源示范海上油田，到 2025 年实现“海上风场+光伏+储能+岸电”的全新供电模式，建成国内外首个海上“零碳”供电示范油田，同时使涠洲岛全面用上绿色清洁电力。2022 年 10 月，国家电投山东半岛南 3 号海上风电场 20 兆瓦深远海漂浮式光伏 500 千瓦实证项目成功发电，成为全球首个投用的深远海风光同场漂浮式光伏实证项目。不同于现有的遮蔽海区和近海区域的海上光伏，该实证项目是全球首个在离岸 30 千米、水深 30 米、极端浪高 10 米的“双 30”海洋环境下，研究和建设的漂浮式海上光伏工程实证项目，实现了深远海风光同场漂浮式光伏项目研究的重大突破，验证了浮体、锚固、发电组件抗风浪能力和海洋环境耐候性。

（三）光热发电

1.主要国家光热发电项目建设如期开展

相比于光伏发电和风电，光热发电项目建设周期长，近年来新增装机规模有限，2021 年新增装机仅有智利并网了一个光热发电项目。但自 2021 年以来，一些国家光热发电进入了新一轮布局期，且新布局的光热发电项目建设更多的是与光伏和风电等配套展开，发挥其储热和可调节优势，这将支撑未来几年光热发电市场，并建立光热发电项目成本回收和商业新模式。2022 年，主要国家光热发电项目基本按照计划建设。迪拜 950 兆瓦槽式光热光伏混合项目（其中槽式光热发电 600 兆瓦，塔式光热发电 100 兆瓦）是世界上已建和在建项目中装机容量、投资规模、熔盐储备热量最大的光热发电项目。迪拜于 2022 年 10 月完成了太阳岛设施建设、塔式蒸汽发生系统注盐、疏盐调试工作及槽式部分的蒸汽、空冷岛热态冲洗等工作。南非 100 兆瓦 Redstone 塔式光热项目的光热塔于 2022 年 10 月顺利结顶。这两个项目的工程承包单位分别为上海电气和中国电建，中国工程公司在国际光热发电项目建设竞争中呈现优势。中国继 2021 年提出在沙漠、戈壁、荒漠地区加快规划建设大型风光基地，并在首批基地项目中布局 1.01 吉瓦长时储热型光热发电项目后，2022 年继续这一发展思路，如新疆在 2022 年 7 月发布的新能源项目清单中，包含了 13 个光热发电项目，装机 1.35 吉瓦，储能

时长在 8～12 小时之间。大型风光基地的商业模式是通过综合基地开发，由低价上网的风电和光伏发电来负担光热发电的高度电成本，使基地项目的综合电价具有竞争力。2022 年首批沙漠戈壁荒漠大型风光基地的光热发电项目大都进入了设备招标阶段，并网时间按计划大多在 2023 年和 2024 年。

2.光热发电熔盐储热或可实现兼顾短时储热和长时储热

光热发电配套的储热时长呈现逐渐增加态势，熔盐储热等既是解决短时储热的主要技术手段，未来也可在长时储热方面发挥一定的作用。2022 年 5 月，山西常晟公司推出了“低熔点、低成本、更低氯离子”的新一代熔盐储能新材料，推荐使用温度范围 185～445 摄氏度，使用温差达到 260 摄氏度，产品的分解温度 545 摄氏度左右。这一熔盐储能材料不仅可以用在光热发电上，还可在火电厂深度调峰熔盐储能项目中应用，满足热电联供特别是具备工业蒸汽负荷的项目匹配性。此外，美国光热发电技术提供商 Hyperlight Energ 于 2022 年 3 月推出了 Tectonic Sun 技术，并在加利福尼亚州贝克斯菲尔德建造其首个试点装置——Tectonic Sun Alpha，该装置的核心是将光热发电技术与地热储能(GeoTES)技术相结合，将现有油井打造为清洁发电系统。

（四）其他技术

1.美国大力推动增强型地热系统发展

地热资源以其蕴含丰富、高清洁性、运行稳定和空间分布广泛而受到越来越多的关注。美国是全球最先提出运用增强型地热技术发电的国家，也是全球开展增强型地热系统(Enhanced Geothermal Systems, EGS)工程数量最多的国家。2022 年 4 月，美国能源部发布信息，请求为拜登政府《基础设施投资和就业法案》投资 8400 万美元建设 4 个 EGS 项目提供支持。2022 年 7 月，美国能源部启动石油和天然气示范工程下的地热能源(Geothermal Energy from Oil and gas Demonstrated Engineering, GEODE)计划，拟投资 1.65 亿美元推动地热能发电项目。美国能源部希望利用石油和天然气行业的专业知识解决开发地热能的困难，使美国摆脱对化石燃料的依赖，到 2050 年使地热能发电装机量达 60 吉瓦、占美国总发电量 8.5%以上。美国能源部还提供 1000 万美元组建一个研究地热能问题的专家联盟，并在此后四年再提供 1.55 亿美元用于地热能发电的研究。2022 年 8 月，美国能源部在地热能研究前沿观测站(Frontier Observatory for Research in Geothermal Energy)计划下，向 EGS 及相关 5 个领域的 17 项技术提供 4400 万美元支持，推进相关技术创新。其中 5 个领域分别是：地震活动监测、新型储层增产技术、EGS 排热效率实验、维持 EGS 储层中流动的介质，以及可在隔离井筒内区域承受高温的工具。2022 年 9 月，美国能源部宣布启动新的能源攻关计划(Energy Earthshots)，大力推动 EGS 发展，

计划到 2035 年使其发电成本降低 90%，达到每兆瓦时 45 美元。美国能源部表示，美国拥有 5 太瓦的地热能资源，可满足全球电力需求，只是受技术和成本等限制，目前地热能仅生产了 3.7 吉瓦电力。除发电外，EGS 还可广泛应用于地热供暖和制冷等。能源攻关计划是美国能源部重要的创新计划，后续还将推出一系列新计划，实现“能源攻关计划”设立的目标。2.美国能源部投入 2500 万美元研发先进波浪能技术 2022 年 1 月，美国能源部宣布投入 2500 万美元支持 8 个先进波浪能发电项目。这些项目包括：为美国 Columbia Power Technologies 公司和 CalWave Power Technologies 公司投资约 1170 万美元，开发用于偏远地区或小型本地能源电网的波浪能转换器；为美国 Dehlsen Associates 公司和 Oscilla Power 公司投资 360 万美元，开发可连接或断开电网的波浪能转换器；为华盛顿大学、波特兰州立大学(Portland State University)、Integral Consulting 公司和 Littoral Power Systems 公司投资约 620 万美元，开发用于控制波浪能转换器的仪器系统及相关技术。美国能源部长詹妮弗·格兰霍姆(Jennifer Granholm)表示，波浪能是一种无碳和可持续的能源，可为受气候变化影响严重的沿海社区提供有效电力补充，这些项目将加速波浪能商业化进程。

3.生物质能作为重要的可再生能源，在全球能源结构中发挥着重要作用

目前，中国生物质能技术研发水平与国外发达国家总体相近，在生物质气化及燃烧利用技术、生物质发电、垃圾发电等方面处于世界领先水平，但还存在生物质能产业结构不均衡、生物质成型燃料缺乏核心技术、燃料乙醇关键技术有待突破等问题。中国作为农业大国、人口大国，生物质能储备资源丰富，发展潜力巨大。根据中国产业发展促进会生物质能产业分会发布的《3060 零碳生物质能发展潜力蓝皮书》，预计到 2030 年各类生物质能利用将为中国减碳超 9 亿吨，到 2060 年将实现减碳超 20 亿吨。

四、核能

在后疫情时代经济复苏、俄乌冲突持续、全球极端气候频现等背景下，核电充分发挥了清洁、高效、稳定的特性，在全球能源市场的剧烈变化中保持了稳定上升的态势。从主要国家和地区看，中国和俄罗斯保持着全球核电建设主力的地位，中国在建核电机组居世界首位；美国则在先进核电技术上不断探索，推出多型新设计并进入部署阶段；德国、比利时等欧洲国家纷纷暂停去核步伐，法国、韩国、日本等国重新拥抱核电，推出一系列新规划。从核电技术看，第三代核电技术加速部署；第四代核电技术及先进核燃料等正从设计阶段加速进入前期准备阶段；聚变技术取得新突破，备受关注。

（一）第三代核电技术及小型模块化反应堆

1.第三代核电技术加速部署

第三代核电技术指满足美国《先进轻水堆型用户要求文件》(Utility Requirements Document, URD)或《欧洲用户对轻水堆核电站的要求》(European Utility Requirements Document, EUR)的压水堆型技术核电机组，是相比第二代核电技术具有更高安全性、更高功率，在经济上能与联合循环的天然气机组发电厂相竞争的核电技术。典型代表包括：中国 CAP1400 和“华龙一号”、美国西屋电气公司的先进非能动压水堆(AP1000)、美国通用电气公司的先进沸水堆(ABWR)和经济简化型沸水堆(ESBWR)、法国阿海珐公司的欧洲压水堆(EPR)、日本三菱公司的先进压水堆(APWR)及韩国电力工程公司的韩国先进压水堆(APR1400)等。2022 年，主要国家加速第三代核电部署。根据国际原子能机构(International Atomic Energy Agency)和中核战略规划研究总院规划研究所统计，中国在运核电机组 54 台，总装机容量 55.81 吉瓦，仅次于美国的 92 台 94.72 吉瓦和法国的 56 台 61.37 吉瓦，核电机组数量和总装机容量继续位居世界第三位。全球在建核电机组共 53 台，总装机容量约 54.38 吉瓦，中国、印度、俄罗斯、韩国、土耳其居前位。其中，中国在建核电机组 20 台，总装机容量高达 21.64 吉瓦，居世界第一位。

2022 年 1 月，中国自主研发的第三代核电机组“华龙一号”

中核集团福清核电 6 号机组首次并网成功，开始向电网送出第一度电，成为全球第三台、中国第二台“华龙一号”并网发电机组。2022 年 2 月，该机组首次达到 100%满功率运行，这是“华龙一号”全面投入商业运行的一个重要里程碑。2022 年 2 月，“华龙一号”通过英国通用设计审查(GDA)，证明了“华龙一号”的安全可靠。2022 年 2 月，中国核工业集团公司与阿根廷核电公司签署阿根廷阿图查三号核电站项目设计采购和施工合同，这是中阿核能合作的重要里程碑。2022 年 4 月，中国自主第三代核电“华龙一号”全球第四台、海外第二台机组——巴基斯坦卡拉奇 K3 机组商业运行。至此，“华龙一号”福清 5、6 号机组，巴基斯坦卡拉奇 2、3 号机组均全面建成投产。这对于提升“一带一路”沿线国家对“华龙一号”的信心、巩固中巴经济走廊成果，以及未来实现批量化、规模化建设具有重要意义。2022 年 11 月，中国核工业集团公司发布《中国先进压水堆用户要求文件》(CUR)，这是中国首部具有完整自主知识产权的先进压水堆用户要求文件，标志着中国在核电标准化建设方面取得新突破。在核能综合利用方面，2022 年 5 月，田湾核电蒸汽供能项目启动建设，这是中国首个工业用途核能供汽工程；2022 年 11 月，辽宁红沿河核电站核能供暖项目投运，这是中国东北地区首个核能供暖项目；2022 年 12 月，浙江海盐核能工业供热项目投运，这是中国首个投运的核能工业供热项目。这些项目

成功证明了核能综合利用的可行性，将促进核能从单一发电向综合利用发展。

韩国方面，尹锡悦政府上台后提出“成为核电强国”的口号，加快本国核电部署，同时加强与美国、英国、波兰、捷克、沙特阿拉伯、阿拉伯联合酋长国和哈萨克斯坦等国家的合作，扩大韩国核电出口。2022 年 6 月，韩国政府组建并启动提升核电竞争力的特别工作组，研究提高核电产业竞争力的方案。2022 年 8 月，韩国政府成立核电站出口工作组，并宣布韩国海外核电开发项目将与汽车、半导体和电动汽车电池等重点产业挂钩，从而使项目更具针对性和有效性。该工作组成员包括韩国财政部、外交部、国土资源部等 9 个政府部门及核电相关企业，这是韩国自 1978 年发展商业核电以来成立的第一个此类机构。2022 年 8 月，韩国产业通商资源部(Ministry of Trade, Industry and Energy, MOTIE)与韩国水电核电公司(KHNP)、斗山能源(Doosan Enerbility)及多家核级设备和材料制造商签署谅解备忘录，旨在通过各方努力研发新技术和扩大核出口，振兴韩国核工业。2022 年 9 月，韩国产业通商资源部宣布，韩国政府设定了到 2030 年将核发电量在电力结构中的占比从目前的 27.4%提升至 33%的目标，届时发电量将达到 2.017×10 5 吉瓦时。在项目方面，韩国新韩蔚核电厂(Shin Hanul)1 号机组于 2022 年 5 月首次实现临界，于 2022 年 12 月正式投入商业运行。该机组采用 APR-1400 设计，这

是韩国工程公司(Korea Engineering Company)在美国“System 80+”的设计基础上研发的一种先进压水堆，装机容量 1.4 吉瓦，设计运行寿期 60 年。同时，这也是韩国首台实现技术独立的核电机组，其冷却剂泵和仪控系统等关键设备均实现了国产化。2022 年 10 月，由韩国电力公司(KEPCO)牵头建设的阿联酋巴拉卡 3 号机组首次并网发电，此前建造的巴拉卡 1 号和 2 号机组已投运，4 号机组即将并网发电。这 4 台机组采用了 APR-1400 设计，全部投运后能满足阿联酋四分之一的电力需求，每年减排超过 2100 万吨二氧化碳。2022 年 8 月，韩国水电与核电公司(KHNP)与俄罗斯国家原子能集团公司(Rosatom)旗下子公司 ASE JSC 签署 22.5 亿美元的建设供货合同。这是韩国继 2009 年阿联酋巴拉卡核电项目之后，时隔 13 年再次拿下核电大单，也是尹锡悦政府成立后首次承揽的海外核电项目。KHNP 将于 2023 年 8 月至 2029 年期间与 Rosatom 合作建设埃及埃尔达巴核电站，包括建造 80 余个建筑物、建筑构件及相关器材。根据韩国电力公司公布的数据，韩国 2022 年 1—12 月核电发电量首超 17 万吉瓦时，达到 17.6054 万吉瓦时，同比（15.8 万吉瓦时）增长 11.4%，刷新历史纪录，核能发电占全国累计发电的 29.6%，为 2016 年(30%)以后的最高值。

欧洲方面，能源短缺使得核电迎来“复苏”，多国暂停核退役或重启核电计划。2022 年 2 月，法国总统马克龙强调核电

是法国实现“能源独立”的关键，计划从 2028 年开始新建 6 个核电机组。2022 年 3 月，比利时政府宣布将 2025 年废除核能的计划延后 10 年。2022 年 4 月，英国在新版《英国能源安全战略》中强调核电重要地位，计划在 2030 年前新建 8 个新的大型核电项目，并新建多座模块化小堆。2022 年 9 月，德国延长原计划 2022 年 12 月关闭的 3 座核电站运营时间，以防止冬季电力供应不足。2022 年 12 月，荷兰政府计划在泽兰省博尔瑟勒采用第三代+核电技术建设 2 台核电机组。2022 年 3 月，位于芬兰的奥尔基洛托 3 号机组(Olkiluoto 3)并网发电，这是芬兰近 40 年来建成投运的首台核电机组，也是欧洲建成的第一座欧洲压水堆(EPR)。

俄罗斯方面，2022 年 6 月，俄罗斯政府批准到 2035 年新建 16 台核电机组计划，包括库尔斯克核电厂 1 号至 4 号机组、列宁格勒核电厂 3 号和 4 号机组、用于拜姆斯基采矿加工厂的 4 台浮动式核电机组等，到 2045 年，核电在俄罗斯电力结构中的占比将达到 25%。项目方面，2022 年下半年，俄罗斯“乌拉尔”号和“雅库特”号核动力破冰船相继建成，这是俄罗斯 22220 型破冰船项目的最新进展。这两艘核动力破冰船均配备了两座 RITM-200 反应堆，拥有破超 3 米厚冰层的能力，将有力支持俄罗斯的北极战略。2022 年 12 月，Rosatom 在位于俄罗斯北极地区的科拉核电厂(Kola)成功生产纯度达 99.999%的氢气，证明了俄罗斯核能制氢技术的可

行性。

2.能源危机加速小型模块化反应堆技术研发和部署

小型模块化反应堆(SMR)是国际上重点研发的新一代反应堆，主要指电功率低于 300 兆瓦的反应堆。目前大多数的 SMR 是以第三代核电技术为基础研发的，设计上具有固有安全性、模块化、可制造性好、灵活性强等特点。小型模块化反应堆主要分为以下 5 种类型：(1)单机组轻水型小堆，设计基于大型轻水堆技术，可建设在一个厂区内，替代厂区内小型煤电厂；(2)多模块轻水型小堆，在一个厂区建设多个小堆模块，可以替代中等规模的燃煤电厂；(3)移动式小堆（可运输小堆），采用的是轻水堆技术，方便运输和转移，可以设计成浮动式反应堆；(4)模块化微堆，设计装机容量小于 10 兆瓦，可移动性更强；(5)四代小堆（采用第四代核电技术的小堆），以液态金属、气体或熔融盐等为冷却剂。国际能源署在 2022 年 6 月发布的《核电与保障能源转型：从今日的挑战到明日的清洁能源体系》指出，小型模块化反应堆投资较低、项目风险较小，且可以重复利用退役化石燃料发电厂的场地，将在能源转型中发挥重要作用。2022 年 9 月，美国能源部发布《研究将退役燃煤电厂改建核电厂的益处和挑战》(Investigating Benefits and Challenges of Converting Retiring Coal Plants into Nuclear Plants)报告，将 157 座退役燃煤电厂和 237 座在运燃煤电厂确定为潜在的核电厂候选场址。报告

指出，美国 80%的燃煤电厂场址适于用作建设先进小型反应堆的候选场址，将燃煤电厂改建为核电厂可以为电网增加大量清洁电力，帮助美国实现 2050 年净零排放目标。报告估计，使用核电厂取代燃煤电厂，可以降低该区域 86%的温室气体排放量；使用先进反应堆重复利用燃煤电厂基础设施，可以降低核电厂 15%～35%的建设成本。

美国拥有较多的小型模块化反应堆开发商，技术上处于领先地位。2022 年，小堆开发商们加大投资力度，加速小堆从技术研发转向交付阶段。2022 年 7 月，美国纽斯凯尔电力公司(NuScale Power)的 50 兆瓦小堆设计获得美国核能管理委员会(U. S. Nuclear Regulatory Commission)的设计认证，2023 年 1 月，美国核能管理委员会又发布纽斯凯尔电力 50 兆瓦小堆设计的最终规则(Final Rule)，使该设计成为美国监管机构批准在美国使用的第七个反应堆设计，同时该设计也是美国通过的首个小堆设计。纽斯凯尔电力公司还在研究 77 兆瓦小堆设计。此外，纽斯凯尔电力公司加速小堆的全球部署，已与罗马尼亚国家核电公司(Nuclearelectrica)、捷克国家能源集团（ČEZ）等签署合作备忘录。纽斯凯尔电力公司将于 2028 年前在罗马尼亚多伊切什蒂（Doiceşti）部署第一座由 6 座小堆组成的、总装机容量为 462 兆瓦的电厂；将于 2035 年前在捷克泰梅林(Temelin)部署该国第一座小堆。2022 年 8 月，美国 X 能源公司(X-energy)与陶氏材料科学公司(Dow)在陶氏

位于墨西哥湾的一座工厂部署 Xe-100 小堆，帮助该工厂实现减排目标。2022 年 8 月，美国 Last Energy 公司与波兰莱格尼卡经济特区(LSSE)达成协议，在该地区部署一种正在开发的 20 兆瓦小堆，提高该地区电力稳定性、降低二氧化碳排放。2022 年 12 月，美国超安全核公司(Ultra Safe Nuclear)与芬兰拉彭兰塔工业大学(Lappeenranta-Lahti University of Technology)签署谅解备忘录，将在芬兰拉彭兰塔市部署热功率 15 兆瓦、电功率 5 兆瓦的微型模块化高温气冷堆，并开展热电联产测试。美国超安全核公司还与韩国现代工程公司（Hyundai Engineering&Construction）合作，推进微型模块化反应堆的全球部署。总部位于美国的通用日立核能公司(GE-Hitachi Nuclear Energy)先后与加拿大、捷克、波兰、英国、美国和瑞典等国的公司签订了谅解备忘录或其他协议，支持 BWRX-300 的全球部署。目前，通用日立核能公司正在接受加拿大核安全委员会(Canadian Nuclear Safety Commission)的预许可供应商设计审查(Vendor Design Review)和美国核能管理委员会的预申请设计审查(Design Certification Applications)。泰拉能源(Terra Power)与韩国 SK 集团(SK Group)也签署了谅解备忘录，将共同开发小堆技术。

此外，美国还积极推进小堆的军事应用。2022 年 4 月，美国国防部战略能力办公室(Strategic Capability Office)宣布，将重新推动微型核反应堆开发计划“贝利项目”(Pele Project)，旨

在解决恶劣环境下美军基地的供电问题，降低碳排放及产油国家的地缘政治风险。根据该计划，美军将设计出发电量为1～5 兆瓦、总重量在 40 吨内、可用 20 英尺标准货柜装载，并用 C-17 战略运输机运送到环境恶劣或发电不易的前线基地的微型核反应堆。该办公室主任、海军少校戈尔曼(Timothy Gorman)表示，该反应堆将先在艾尔森空军基地(Eielson Air Force Base)等环境恶劣但较不受敌火威胁的地区使用，而后考虑在西太平洋岛屿等前线基地使用。

2021 年年底，英国商业、能源和工业战略部（Department for Business，Energy&Industrial Strategy，BEIS）在先进核能基金(Advanced Nuclear Fund)框架下投入 2.1 亿英镑，支持罗尔斯·罗伊斯小堆公司(Rolls-Royce SMR)低成本 SMR 项目的第二阶段研发工作。2022 年 3 月，罗尔斯·罗伊斯小堆公司的小堆设计开始进行通用设计审查评审。该小堆基于小型压水反应堆设计，预期发电能力为 470 兆瓦，寿命为 60 年。罗尔斯·罗伊斯小堆公司希望英国监管部门于 2024 年年中前批准其小堆设计，并计划于 2029 年前投运首座小堆。罗尔斯·罗伊斯小堆公司还与荷兰 ULC 能源公司(ULC-Energy)、波兰 Industria 集团等签署了协议，未来将在荷兰和波兰部署小堆。英国 Holtec 公司准备于 2023 年年初启动 SMR-160 的通用设计审查监管程序，并于 2028 年开始在英国建造第一台 SMR-160 机组。SMR-160 使用完全由重力驱动的反应堆冷却

剂系统，以及其他非能动安全系统，具有很高的安全性。Holtec 公司已与英国保富集团(Balfour Beatty)、韩国现代工程建设公司签订了一份联合谅解备忘录，三方将根据英国的监管和工业惯例，制定英国 SMR-160 工厂的采购、建设和调试的责任分工。此外，英国核能开发公司 Cwmni Egino 也在开发新的小堆设计。

2022 年 3 月，加拿大创新、科学和经济发展部(Innovation, Science and Economic Development)通过战略创新基金向西屋电气加拿大公司(Westinghouse Electric Canada)提供 2720 万加元（约合 2160 万美元），支持其开发下一代 eVinci 微堆。

2022 年 12 月，由中国核工业第五建设有限公司承建的全球首个陆上商用小堆“玲龙一号”核岛安装工程正式开工。“玲龙一号”是由中核集团研发并具有自主知识产权的多功能模块化小型压水堆，具有安全性高、建造周期短、部署灵活等特点，可作为分布式能源，供电的同时还可满足海水淡化、区域供暖、工业供热等多种用途。

（二）第四代核电技术及先进核燃料

第四代核电技术尚无确切定义，但在设计上需满足更安全、大幅减少核废料、更充分利用铀资源、降低核电站建造和运营成本，以及更好控制核扩散等要求。第四代核能系统国际

论坛（Generation Ⅳ International Forum）以中子能量作区分，确定了 6 种第四代反应堆堆型：超临界水堆(SCWR)、超高温气冷堆(VHTR)、钠冷快堆(SFR)、气冷快堆(GFR)、铅冷快堆(LFR)和熔盐堆(MSR)。在能源短缺的背景下，主要国家正在加速第四代核电技术的研发与部署。

美国在第四代核电技术方面保持领先地位。2022 年 7 月，美国能源部计划在爱达荷国家实验室建设一座高通量多用途钠冷快中子试验堆(Versatile Test Reactor)。这是美国近 30 年来首座新建的快中子试验堆，将用于测试先进民用核能反应堆使用的燃料和材料，对美国的核电技术发展有重要意义。2022 年 7 月，美国国家技术系统公司(NTS)与纽斯凯尔电力公司合作建设全球领先的冷却剂丧失事故实验室(LOCA)，支持纽斯凯尔电力公司的小型模块化反应堆(SMR)测试。2022 年 8 月，美国阿比林基督教大学(ACU)向美国核管理委员会申请了熔盐研究反应堆(MSRR)的建造许可证，这是美国首次由大学申请建设先进研究堆。该反应堆是一座热功率高达 1 兆瓦的熔盐研究堆，用于支持美国熔盐堆的设计、开发、部署和市场拓展。2022 年 10 月，美国南方公司(Southern Company)和泰拉能源公司在位于华盛顿州的泰拉能源实验室建成综合效应测试设施(IET)，该设施是全球最大的氯化物熔盐系统，将为开发熔盐实验快堆(MCRE)及更具挑战的氯化物熔盐快堆(MCFR)提供重要支持。2022 年 8 月，美国 Curio 公司开发

了一种将核废料转化为可用产品的化学工艺-NuCycle。Curio 表示，NuCycle 工艺可减少 96%的放射性废物数量，同时经过处理后的废料只需要封存大约 300 年。Curio 公司正计划建造一个试点设施，并于 2035 年之前运行一个容量达 4000 吨的商业核废料后处理设施。

2022 年 3 月，美国超安全核能公司(USNC)利用桌面金属公司(Desktop Metal)生产的两台 X 系列黏结剂喷射系统 3D 打印机制造了核级碳化硅全陶瓷微封装(FCM)燃料。与传统三元结构各向同性(TRISO)燃料相比，利用 3D 技术生产的 FCM 燃料更安全、可以承受更高的温度和更强的辐射。2022 年 4 月，美国 X 能源公司(X-energy)计划在田纳西州橡树岭地平线中心工业园区建设美国首座商业化高丰度低浓铀燃料制造厂。该燃料厂将使用高丰度低浓铀来生产三元结构各向同性(TRISO)燃料，将为各种先进反应堆、SMR，以及美国太空核推进项目等提供燃料。2022 年 12 月，美国 BWXT 公司已经开始为美国国防部“贝利项目”可运输型微堆生产三层各向同性包覆颗粒(Triso)燃料。2022 年 12 月，美国卡伊洛斯电力公司(Kairos Power)与洛斯·阿拉莫斯国家实验室(Los Alamos National Laboratory)签署合作协议，将在该实验室的低浓铀燃料制造设施(LEFFF)生产供赫尔墨斯(Hermes)示范堆使用的 TRISO 燃料颗粒。

2022 年 2 月，俄罗斯副总理亚历山大·诺瓦克表示，俄罗斯

将在 2030 年前开始建设首座具有中子能谱控制功能的 VVER-S 型创新压水堆。VVER-S 压水堆由 Rosatom 下属俄罗斯水压试验设计院(OKB Gidropress)研发，与传统 VVER 压水堆相比，VVER-S 的本质区别在于具有中子能谱调节功能，即通过改变堆芯中的水-铀比以代替液态硼调节，并实现反应堆控制。2022 年 2 月，俄罗斯核燃料产供集团博奇瓦尔无机材料研究所(VNIINM)成功开发并制造出用于轻水堆的二硅化铀实验燃料芯块。二硅化铀燃料拥有铀密度高、高导热系数和低热容，以及可以在不提高铀-235 丰度的情况下延长燃料循环周期等优点，同时它比二氧化铀的工作温度更低。2022 年 9 月，俄罗斯别洛雅尔斯克核电厂(Beloyarsk)4 号机组 BN-800 快堆首次全堆芯装填铀钚混合氧化物(MOX)燃料并实现满功率运行，这是全球首个全堆芯装填 MOX 燃料的反应堆，是闭式燃料循环里程碑式的突破。

2022 年 3 月，印度快中子增殖堆(FBTR)首次实现满功率运行，达到了设计功率——40 兆瓦热功率。FBTR 是印度英迪拉 •甘地原子研究中心(IGCAR)两座民用研究堆之一，其设计以法国 Rapsodie 反应堆技术为基础，采用钠作为冷却剂。

2022 年 7 月，加拿大陆地能源(Terrestrial Energy)与韩国 DL E&C 公司签署合作备忘录，共同开发第四代小型模块化熔盐堆(IMSR)。这种反应堆使用标准浓缩核燃料，是目前唯一使用此类燃料的第四代小堆设计。

（三）聚变技术

聚变技术具有来源丰富、释放能量大等优势，被认为是解决人类能源短缺问题的终极方案。2022 年，聚变领域取得多个突破性进展，引起全球关注。

2022 年 10 月，中国新一代“人造太阳”托卡马克装置(HL-2M)等离子体电流突破 100 万安培（1 兆安），创造了中国可控聚变装置运行新纪录。等离子体电流达到 100 万安培是托卡马克装置实现聚变能源的必要条件，此次突破标志着中国距离聚变点火更近了一步。

2022 年 12 月，美国能源部宣布劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(LLNL)的国家点火装置(NIF)在惯性约束聚变实验中实现了“聚变能量增益”。在实验中，LLNL 将氘氚核材料做成一个直径约 1 毫米的燃料球，将其放入环空器内，然后用 192 路高功率激光束同时打在环空器内壁上，激发环空器内壁射出 X 射线，这些 X 射线把燃料球瞬间加热到 300 万摄氏度，引发速度达到 400 千米/秒的内爆，诱发球内氘氚聚变。实验输出能量（3.15 兆焦耳）大于激光输入能量（2.05 兆焦耳），能量输出与能量输入之比“聚变增益系数 Q 值”大于 1，而此前类似的实验无法产生正能量增益，该实验实现了“从 0 到 1”的突破。

2022 年 6 月，美国 Zap Energy 公司宣布其第四代 Z 箍缩(Z-pinch)设施——FuZE-Q 创造了第一个等离子体。Z-箍缩聚

变技术的难点在于设施部件如何设计以承受大电流（500 千安培），以及等离子体“隆起不稳定性”和“扭曲不稳定性”导致聚变过程中止等。Zap Energy 公司利用流体力学中的剪切轴流稳定技术(Sheared-Flow-Stabilized)保持等离子体稳定。2022 年 2 月，欧洲核聚变研发创新联盟、英国原子能管理局(UKAEA)和国际热核聚变实验堆召开联合新闻发布会称，欧洲联合环状反应堆(JET)在 5 秒内产生了能量输出为 59 兆焦耳的稳定等离子体，打破了该装置在 1997 年创下的 22 兆焦耳核聚变能量的纪录，同时刷新了世界纪录。该实验的意义在于证明燃料能够以可持续的方式燃烧。同时，该实验也为国际热核聚变实验堆项目提供了重要支持。

2022 年 4 月，英国 First Light Fusion 公司宣布利用弹丸聚变(Projectile Fusion)技术首次成功实现聚变，英国原子能管理局独立验证了这一成果。弹丸聚变技术是一种新的惯性约束聚变技术，具体而言，该公司使用两级超高速气枪向其开发的独特靶材发射一枚重 100 克的射弹，射弹在撞击含有聚变燃料的靶材前达到每秒 6.5 千米的速度，燃料被压缩到 1 亿个大气压，以实现聚变所需的温度和密度。燃料在内爆时的速度达到每秒 70 千米以上，从而诱发聚变。靶材释放出的聚变能量脉冲被反应室内流动的锂吸收，热交换器将锂的热量传递到水中，产生蒸汽，使涡轮机转动并产生电力。根据该公司的构想，在未来的弹丸聚变发电厂中，弹丸聚变过程每

30 秒就可重复一次，每个靶材释放的能量可为一个普通英国家庭供电超过 2 年，发电成本也将低于 50 美元/兆瓦，可与其他可再生能源在成本上竞争。

2022 年 7 月，日本京都聚变工程公司完成聚变电厂设备综合测试设施的初步设计，并启动设施建设，计划于 2024 年示范使用聚变相关技术发电。该设施名为“独特的综合测试设施”(UNITY)，是世界上建设的首座此类设施。UNITY 将通过工程模拟聚变动力核心内的热和电磁环境，在不使用核反应的情况下对聚变发电厂中的一套能量转换设备进行集成测试。此外，UNITY 还配备了氚回收系统、测试毯模块、液态金属和熔盐的主要冷却回路、热交换器等，可以模拟等离子加热、等离子排气、氢氚泵和聚变燃料循环演示等。

五、氢能

氢能来源丰富、绿色低碳，被视为 21 世纪最具发展潜力的清洁能源。国际能源署《2022 年全球氢能回顾》(Global Hydrogen Review 2022)报告预测，到 2030 年，氢能可以帮助减少约 140 亿立方米/年的天然气使用量、2000 万吨/年的煤炭使用量和 36 万吨/年的石油使用量。全球能源危机背景下，氢能发展迎来新机遇，氢能领域关键技术取得一系列突破。在制氢方面，绿色制氢技术备受关注，光伏、风能结合电解制氢等绿色制氢项目发展迅速；在储运氢方面，全球积极开

展氢气长距离运输模式和技术探索，日本完成全球首次液氢海上运输实践；在氢能应用方面，交通领域燃料电池汽车产量进一步提高，氢燃料列车投运、氢燃料船舶成功交付、氢燃料飞机进入测试，工业领域积极开展示范项目，使用氢能替代化石燃料。

（一）制氢技术和产业动态

1.制氢产业动态

近年来，全球范围内对绿氢的支持力度不断加大，绿氢项目数量不断增长，尤其是规划的电解制氢项目规模快速增长。全球已公布的氢能项目电解槽容量达 300 吉瓦，但几乎都没有作出最终投资决定。这主要是因为开发商及潜在客户正在等待可能的补贴，以确保氢能项目具备经济性。任何确定对绿氢进行补贴的国家很容易吸引到项目开发商及设备生产商。美国《通胀削减法案》中的氢能税收抵免不仅是首批实施的支持计划之一，也是迄今最为“慷慨”的政策。根据该政策，如果生产商在特定时间段内开始建造新设施并且满足项目的特定工资和劳动力要求，就能触发乘数机制。满足这些要求的项目最高可获得 5 倍乘数，即 60 美分/千克至 3 美元/千克的税收抵免，而那些不符合条件的项目则可以根据碳排放水平获得 12 美分/千克至 60 美分/千克的税收抵免。与 2021 年的《重建更好未来法案》(Build Back Better Act)类似，

具体的抵免标准将通过对氢的整个生命周期温室气体排放量核算来确定。该排放测量方案将基于阿贡国家实验室(Argonne National Laboratory, ANL)的温室气体、管制排放和能源使用技术模型见表 4-3。除了美国，只有英国公布了针对清洁氢的国家补贴。欧盟委员会也宣布了类似计划，但该计划还需要 27 个国家和欧洲议会批准。

表 4-3 美国《通胀削减法案》中的氢气税收抵免标准

每千克氢气全周期碳排放强度水平/二氧化碳当量	税收抵免金额/美元	5 倍乘数/美元
4 千克	0	0
2.5～4 千克	0.12	0.6
1.5～2.5 千克	0.15	0.75
0.45～1.5 千克	0.2	1
0.45 千克	0.6	3

数据来源：美国《通胀削减法案》。

中国也在快速推进绿氢项目。据不完全统计，2022 年前三季度，中国各地上马绿氢项目达 40 多个，主要分布在内蒙古、河北、宁夏、甘肃、新疆等风、光资源丰富的地区。例如，2022 年 9 月，内蒙古自治区能源局发布 2022 年度风光制氢一体化 7 个示范项目，这些项目投产后可年产 6.3 万吨绿氢；宁夏宁东 2022 年拟开工新建绿氢制备和应用项目 4 个，绿氢产能将达到每年 3.6 万吨。2022 年 10 月，新疆广汇能源公司表示拟投资 1.34 亿元，在新疆建设绿电制氢及氢能一体

化示范项目；“氢动吉林”行动暨大安风光制绿氢合成氨一体化示范项目启动活动在吉林西部（大安）清洁能源化工产业园举行，新建制氢、储氢及 18 万吨合成氨装置。2022 年 11 月，青海省首个绿电制氢项目“华电德令哈 3 兆瓦光伏制氢项目”正式开工建设；由国核电力院 EPC 总承包（工程总承包模式之一）的吉电股份中韩示范区“可再生能源+质子交换膜(Proton Exchange Membrane, PEM)电解制氢+加氢”一体化项目完成试运，具备对外加氢能力。

在绿氢项目的带动下，电解制氢的核心设备电解槽的技术和产能也取得明显发展。目前，碱式电解槽购置成本较低，技术成熟度较高，同时没有贵金属作为设备生产原料，因此单价相对较低，但由于要保证电解槽两侧氢氧平衡，碱式电解槽需在额定功率的 20%以上才可以工作，且效率不如质子交换膜电解槽。质子交换膜成本较高，中国也尚未实现大功率规模化应用。据国际能源署预测，2021 年全球电解槽出货量达到 250 兆瓦，预计 2022 年全球电解槽出货量约为 1 吉瓦。电解水制氢行业未来较好的预期吸引了很多外部企业从事电解水制氢设备开发。中国目前大范围使用的是碱性电解槽设备，派瑞氢能（所属中船 718 所）、考克利尔竞立（前身为苏州竞立）、天津大陆制氢是中国最早开发电解槽技术的一批企业。在双碳政策和氢能中长期规划的指引下，众多新兴企业开始进入电解水制氢设备领域，其中以隆基、阳光为

代表的光伏企业和以明阳智能为代表的风电企业依托其主营的风光业务及资金支持，进入电解水制氢设备市场。此外，众多主营为电气设备的企业也开始进军和布局电解槽。在国际上，电解水制氢设备商业化进程早。由于国外两种电解槽的购置成本相近，因此以开发质子交换膜电解槽为主，目前挪威 NEL 公司、英国 ITM power 公司、加拿大 Hydrogenics 公司和德国西门子公司的质子交换膜电解制氢设备在世界产能中占比较高。

为了降低电解槽成本，提高单槽的规模、降低电耗仍然是当前重点发展方向。中国碱性电解槽单槽规模仍在不断加大，2020 年以前国内单槽最大一般在每小时制氢 1000 标立方(Nm 3 /h)水平，2021 年已经有部分企业的样机提高到约 1300 标立方水平。到了 2022 年，不断有单槽制氢能力超过 1500 标立方甚至 2000 标立方水平的电解槽样机推出。例如，2022 年 12 月，中船（邯郸）派瑞氢能单台 2000 标立方制氢设备下线，电解槽单槽标准产氢量为 2000 标立方，可扩容 3000 标立方，具备 10%～120%的动态调节能力。不过，目前市场上主流产品单槽制氢能力仍以每小时 1000 标立方为主。以中国最大的电解制氢项目中石化新星新疆库车绿氢示范项目为例，该公司公示的电解水制氢成套装置评标结果，选中的 52 台均为 1000 标立方碱性电解槽，考克利尔竞立、隆基氢能和中船 718 研究所 3 家企业入围中标。此外，中国包括

华电、国电投、阳光电源等正在推进兆瓦级质子交换膜电解槽（每小时制氢 200 标立方）的开发。对于质子交换膜电解槽，国外兆瓦级别的产品已经较为成熟，挪威 NEL 公司发布的新一代质子交换膜电解槽产品 MC250 和 MC500，氢气产能分别约为每小时 250 标立方和 500 标立方（分别约为 1.25 兆瓦和 2.5 兆瓦）；NEL 公司还正式推出世界上第一个全自动电解槽生产设备，希望规模化和自动化降低制氢单位成本（见表 4-4）。

表 4-4 国内外主要企业批量化电解槽（单槽）产品

企业名称	碱性槽系列		质子交换膜电解槽	
	单产/标立方	电耗/（千瓦时/立方）	单产/标立方	电耗/（千瓦时/立方）
派瑞氢能	>1000		1～100	≤5.4
考克利尔竞立	>1000	≤5		
天津大陆制氢	>1000	≤4.4		
隆基绿能	1000	3.9～4.4		
阳光电源	1000	≤4.3	200	≤4.0
华电重工	1200	≤4.6		
NEL			1～500	4.53
西门子			225	5～5.4

数据来源：企业公开资料。

2.制氢前沿技术进展

在制氢技术方面，2022 年 1 月，美国 Monolith Materials 公司开发了一种新的甲烷热解工艺，通过热解将甲烷转化为“蓝绿”氢和炭黑。“蓝绿”氢指该工艺将碳排放物固化成

炭黑，每生产 1 吨氢气仅排放 0.45 吨二氧化碳，比“蓝氢”更环保，炭黑则可用于汽车轮胎和油墨等产品。2022 年 5 月，美国华盛顿州立大学(Washington State University)研究人员开发出一种从乙醇和水中生产氢气的方法。研究人员创建了一个新型电极转化系统，当在乙醇和水的混合物中通入少量的电时，电极表面就会发生催化反应产生纯压缩氢气，且这种方法与传统电解水制氢相比耗电更少、不需要使用贵金属的膜。2022 年 1 月，加拿大 PyroGenesis 公司推出将甲烷和其他轻烃转化为零碳排放氢气(Zero-Carbon Emission Hydrogen)的制氢技术。该技术通过热等离子热解从碳氢化合物中生产氢气，其中利用的热等离子体温度高达 5500 摄氏度。2023 年 1 月，中国、美国和澳大利亚科学家组成的研究团队开发出一种可直接从未处理（未碱化或酸化）的海水中制氢的技术。与通常需要贵金属催化剂的制氢技术不同，研究团队使用涂有一层氧化铬的过渡金属作为催化剂，在实验中成功制取氢气。该技术的制氢能力接近于需要贵金属催化剂的制氢技术。

光合作用制氢因其能量来源丰富（太阳能）且无污染而备受关注。光合作用制氢原理与太阳能电池相近，利用半导体吸收太阳光催化分解水制氢，是一种通过化学反应将太阳能转化为氢能的途径。2021 年年底，由日本新能源产业技术综合开发机构、东京都立大学、信州大学(Shinshu University)等组

成的研究团队成功利用阳光照射从水中分解出氧气与氢气的“光触媒”作用，在 100 平方米的大范围试验中，成功分离出高纯度氢气，实现了全球首例太阳能大规模制氢。2022 年 2 月，瑞士洛桑联邦理工学院的研究人员开发出一种人工光合作用制氢的方法。研究人员使用四硫代富勒烯(TTF)组成的微棒捕捉可见光，再将其与油包水乳状液结合，从油相中提取水氧化产生的氢气。2022 年 5 月，美国国家可再生能源实验室(NREL)开发了新的太阳能热化学制氢(Solar Thermochemical Hydrogen Production)技术。该技术通过先将钙钛矿金属氧化物暴露在超过 1400 摄氏度的温度下，而后在较低的温度下将金属氧化物用蒸汽再氧化产生氢气。2022 年 6 月，中国石河子大学、武汉地质大学和俄罗斯托木斯克理工大学(Tomsk Polytechnic University)合作，开发出改变氮化碳（一种重要的光催化材料）微观结构的方法，从而大幅提高了利用阳光制氢的效率。

在制氢系统方面，2022 年 3 月，美国能源企业 Green Hydrogen International 在得克萨斯州南部建造大型绿氢项目，未来将为 SpaceX 公司提供燃料。该项目计划使用总计 60 吉瓦的太阳能、风能和盐穴储能等可再生能源系统制造绿色氢气，项目完全建成后预计将年产绿氢 25 亿千克，并拥有超过 50 个总容量达 60 太瓦时的盐穴储能设施。2023 年 1 月，美国 Natural Hydrogen Energy 公司与澳大利亚 HyTerra 公司合作，

计划在美国内布拉斯加利福尼亚开发全球第一口商业化天然氢井。目前，该项目已经完成了钻井、完井和抽汲测试，将开始扩展试井，确定可采资源的大小、范围、气体组成及其商业潜力等信息。Natural Hydrogen Energy 公司预计开采 1 千克天然氢的成本比人工制氢低 2～10 倍。

2022 年 2 月，澳大利亚 Sunshine Hydro 公司计划在昆士兰州中部建设全球首个超级混合能源项目(SuperHybrid Project)。该项目包括 600 兆瓦抽水蓄能、300 兆瓦制氢、50 兆瓦液化氢、50 兆瓦氢燃料电池和 1.8 吉瓦风力发电设备，预计于 2028 年投入使用。2022 年 4 月，澳大利亚 Aqua Aerem 公司正在将一个大型太阳能发电厂与模块化制氢装置 Desert Bloom 结合生产绿氢。其中，制氢装置能够从大气中提取水，不需要消耗河流等其他水源，预计到 2027 年制氢成本将低于每千克 2 澳元（约合 1.33 美元）。

2022 年 5 月，德国 H-TEC SYSTEMS 公司发布了模块化氢立方系统(Hydrogen Cube System)。该系统功率为 2 兆瓦，其模块化设计可组合扩展为多兆瓦的系统，从而应用于不同工业领域，且可实现 74%的系统效率，一个 10 兆瓦的氢立方系统每天可以生产 4500 千克的氢气。2022 年 6 月，德国可持续发展解决方案公司 Graforce 利用等离子电解制氢技术开发出制氢设备 Plasmalyzers。该设备利用高频电压场（等离子体）将废水、甲烷或其他原料中的氮和碳氢化合物分解成原子，

再在等离子体场中重新组合，产生的氢气和其他气体在膜中被分离。

2022 年 9 月，瑞典大瀑布公司正在阿伯丁海上风电场(Aberdeen Offshore Wind Farm)的导管架平台上安装质子交换膜电解水制氢设备，测试其海上风电就地制氢方案的可行性。产生的氢气拟通过海底管道输送至阿伯丁港(Aberdeen Bay)。

2022 年 11 月，比利时鲁汶大学(Catholic University of Louvain)研究团队开发出 Solhyd 氢气面板。该设备顶部装有太阳能板，内部装有从空气中捕集水的设备和分解水的设备。该设备每天可以产出 250 升氢气，效率为 15%，且可与大多数商业太阳能板兼容。

2022 年 8 月，中国首套自主研发的橇装天然气制氢装置在佛燃能源明城综合能源站正式投用。该套装置在满负荷条件下可用 4.8 立方米天然气制取约 11 立方米氢气，氢气纯度达到 99.999%，单位产品消耗、装置紧凑度等指标达到国际先进水平。2022 年 12 月，中国南京工业大学和深圳大学的研究人员制造出可以直接分离海水产生氢燃料的系统。研究人员重新设计了电解系统，包括一种富含氟的多孔膜，使海水中的离子和其他杂质远离电极，从而使该系统比传统电解系统拥有更长使用寿命和更高电解效率。该系统每小时可生产 386 升氢气，工作 130 余天没有出现故障，且长期运行后没

有发现电解系统中的杂质明显增加。

氨分解制氢是氢能发展的重要方向。氢化学性质活泼，对储存材料要求严格，与空气混合易发生爆炸，对安全性要求高，且长距离运输氢需要将其液化，此过程能耗较高，这些缺点限制了氢能大规模发展。而氨具有高储氢密度、易液化储运、安全性高、无碳排放等优点，且可在温和条件下通过电催化分解氨制氢，被认为是最合适的储氢介质之一，具有广泛的应用前景。近年来，美国、德国、日本、韩国、加拿大、挪威等国纷纷加快部署氨能。在技术进展方面，韩国现代工程公司正在开发氨分解制氢系统。该系统通过自发的电化学反应分解水溶液状态下的氨生产氢气，一个集装箱大小的氨分解制氢系统每天可以生产 300 千克氢气。与现有氨分解制氢系统相比，该系统生产的氢气纯度更高(99.99%)，且不需要单独的氢气分离过程。

多国正在探索垃圾制氢产业化之路。传统的垃圾处理方式主要是填埋或者焚烧发电，会对环境造成二次污染。热化学垃圾制氢是将有机物分解为以氢气、一氧化碳、甲烷为主的合成气，再通过吸附剂或其他特殊材料将氢气分离出来，从而得到纯净的氢气；生物化学垃圾制氢则是利用微生物分解垃圾中的有机物以产生氢气。在技术进展方面，2021 年年底，英国 Powerhouse 公司开发出 DMG 气化技术，将塑料转换成合成气并提取氢气。该技术每天可将多达 40 吨的塑料垃圾

转化为 58 兆瓦时的可再生电力和 2.7 吨清洁氢气，且具备经济效益。Powerhouse 公司计划在波兰中部地区建设第一座垃圾制氢厂，投入使用后，生产的氢气将为城市公共汽车、其他重型车辆和客车提供燃料。德国林德公司(Linde)与 Hydrogen Utopia International 公司合作，计划在保加利亚和其他东欧国家建设垃圾制氢厂，为这些国家提供不可回收塑料可持续处理的解决方案。2022 年 3 月，美国可再生燃料公司 Raven SR 计划在西班牙阿拉贡建造一座垃圾制氢厂。该项目建成后每天将处理 75 吨有机固体垃圾并生产 4.4 吨氢气。2022 年 4 月，韩国 Plagen 公司与首尔水循环公司(The Seoul Water Recycling Corporation)合作开发一种气化污泥制备绿氢的技术。首尔南部的一个水循环中心每天可产生约 900 吨污泥，Plagen 公司开发的设备可以将污泥气化、热解，并提取其中的氢气和氨气。2022 年 4 月，中国城康氢碳新材料科技有限公司宣布正在湖北省襄阳市建造“垃圾制氢+碳资源化”绿氢绿炭工厂，这是全球首个采用城市垃圾资源化制沼气（垃圾固废无害化）—沼气资源化制氢固碳（垃圾固废无害化）—加氢站（制氢加氢一体化）工艺建造的绿氢绿炭工厂，形成可复制的基于城市垃圾的绿氢制、加、用一体化联产联供的全产业链模式。

（二）氢能加注、储运技术和产业动态

氢气储运技术主要包括高压气态输送、管道输氢和液态氢输送，由于涉及庞大的基础设施投资，发展相对缓慢。目前中国氢气储运仍以高压气态氢气输送技术为主，20 兆帕管束车仍然是中国氢气运输的主要方式。每辆长管拖车的载运氢气量约 300～500 千克，只占运输总重量的 1%～2%，运输效率低，但受制于技术、安全标准等方面的原因，预计短期内这种运输方式仍难以改变。

除了以高压气氢为主的短距离运输方式外，全球正在积极开展氢气长距离运输模式和技术探索。全球海运氢贸易正在缓慢发展，已经有用船运送小规模的清洁氢。由于对海外氢气需求大，日本需要从澳大利亚等国远距离进口氢气，因此在积极探索通过液氢运输船实现长距离输运。2022 年年初，日本千代田化工建设株式会社(Chiyoda Corporation)完成全球首次甲基环己烷(MCH)运输，证明了以甲基环己烷的形式长期储存和运输氢气的可行性。2022 年 3 月，日本川崎重工研发的液化氢运输船 Suiso Frontier 在经过了约三个半星期的航行后，将第一批来自澳大利亚的氢气成功运抵日本神户，这批氢气用于日本神户码头液氢发电站，这是全球首次以液化氢为载体的大型海上氢气运输项目。2022 年 12 月，川崎重工又启动了从澳大利亚向本国运输液氢的项目。川崎重工还在神户机场建成了全球首个液化氢卸载基地“Hytouch 神户”。

此外，2023 年 1 月，日本 Biocoke 技研株式会社和株式会社德山(Tokuyama)开发出将氢气与镁高效制成氢化镁的设备，氢化镁作为储氢介质，可以安全、便捷地运输，并易于转换成氢气。

欧洲部分国家在积极推进绿氢管道项目。2022 年 5 月，英力士(INEOS)与英国天然气网络运营商 SGN 合作，改造位于格兰杰默斯(Grangemouth)和格兰顿(Granton)之间的一段 29 千米长的退役天然气管道，用于运输氢气。该项目将验证利用现有天然气管网输送氢气的可行性，支持英国实现“建设覆盖全国的氢气运输网络”的目标。2022 年 6 月，荷兰政府计划在 2031 年前投入 7.5 亿欧元建立一个全国性的氢运输网络。荷兰政府已选择该国天然气网络运营商 Gasunie 管理和运营该网络，第一阶段氢运输网络将在 2026 年前完成，将穿越主要产业集群。Gasunie 将改造现有天然气管道，使其可以安全运输氢气。2022 年 12 月，法国、西班牙和葡萄牙三国首脑在欧盟地中海国家集团领导人会议期间宣布，启动欧盟首条海陆绿氢管道。该输送管道陆上部分自葡萄牙东北部塞洛里库(Celorico)至西班牙西北部萨莫拉(Zamora)，全长 248 千米，修建费用预计为 3.5 亿欧元；海上部分起自西班牙巴塞罗那，沿地中海海底铺设至法国马赛，全长 455 千米，然后连接欧洲其他国家，修建成本约 25 亿欧元。这是欧盟首条大型绿氢输送管道，旨在取代原先走陆路从西班牙巴塞罗

那翻越比利牛斯山脉修到法国的天然气管道项目。该项目预计将于 2030 年前投入使用，每年输送绿氢 200 万吨，约占欧盟绿氢消费量的 10%。2023 年 1 月，德国副总理兼经济和环境保护部部长哈贝克(Habeck)与挪威首相斯特勒(Støre)签署协议，两国将建立能源合作伙伴关系，并于 2030 年之前修建一条连接两国的氢气输送管道。管道建成后，挪威每年可向德国输送约 400 万吨氢气。

在储氢方面，2022 年 11 月，英国商业、能源和产业战略部(BEIS)通过净零创新投资组合(Net Zero Innovation Portfolio)框架向法国电力公司英国研发部(EDF UK)、布里斯托大学、英国原子能管理局和核燃料商 Urenco 等组成的技术联盟提供 770 万英镑，推动贫铀材料储氢(Hydrogen in Depleted Uranium Storage)计划。该联盟将共同开发贫铀材料氢能储存示范装置。贫铀材料可从回收中获得，其储存密度是液态氢的两倍。使用该装置储氢时，氢以稳定但可逆的金属氢化物形式被吸收在“贫铀床”(Uranium Bed)上，在需要氢气时可通过加热“贫铀床”将其释放。

加氢站建设是氢能产业基础设施的重要环节。根据 H2 stations 的报告 ㊟【由于统计口径不同，该机构报告对于中国加氢站数量统计不全面，与中国统计的数据有出入。】，截至 2021 年年底全球正在运行的加氢站数量接近 700 座，其中亚洲占比最高，达到 53%，欧洲和北美分别占约 33%和

13%。从 2021 年新增来看，2021 年全球有 142 个新建加氢站投入运营，再次刷新历史纪录（2020 年新增 107 个加氢站投入运营），其中欧洲新增 37 座；亚洲新增 89 座；北美新增 13 座。截至 2021 年年底，亚洲共有加氢站 363 座投运，集中在中日韩三国，其中日本 159 座、中国 105 座、韩国 95 座，且多数是公共汽车或卡车的专用加氢站。欧洲共有 228 座加氢站投运，德国拥有 101 座，总数最多，但当年新增只有 1 个（2020 年新增 14 个，2019 年新增 27 个），建设速度明显放缓；法国以 41 座运营站位居欧洲第二；随后是英国 19 座、瑞士 12 座和荷兰 11 座（见图 4-1）。

中国不断推进加氢站建设。到 2021 年年末，中国已建成加氢站 218 座，较 2020 年新增 100 座。截至 2022 年 6 月底，中国已建成加氢站超 270 座。从加氢站类型来看，中国的加氢站以纯加氢站和油氢合建站为主，其中，纯加氢站超过 100 座，油氢合建站约 50 座，其他为气氢合建站、氢电合建站等。按省份看，广东、山东、江苏位列前三，排名前十的省份加氢站累计约 200 座，有 50%位于 5 大示范城市群。从加注能力来看，已建成加注能力为 500 千克/天的加氢站约 100 座，1000 千克/天的约 60 座，剩余多为钢铁、化工园区自用加氢站。通过统计各地现有氢能产业加氢站的发展规划，到 2025 年，各地方规划建设加氢站超 1000 座，其中最多为广东（200 座），其次是河北、河南和山东（均为 100 座），

随后是内蒙古 94 座。

图 4-1 全球在营加氢站数量

数据来源：H2stations.org。

（三）氢能应用技术和产业化动态

1.交通领域

氢燃料电池汽车销量保持平稳增长。根据 SNE Research 公布的数据显示，2022 年前 11 个月全球注册的氢动力汽车销量为 18457 辆，较去年同期增长了 14.2%。韩国现代(Hyundai)的氢燃料电池汽车 Nexo 连续 4 年力压日本丰田(Toyota)成为销量冠军。由于韩国氢能燃料电池车能获得比纯电动汽车更高的补贴，现代 Nexo 销量多年来持续稳步增长，2018 年推

出时销量 727 辆，2019 年销量为 4194 辆，2020 年销量为 5786 辆，2021 年销量为 8502 辆，2022 年前 11 个月销量为 1.07 万辆，为该款乘用车推出以来年销量首次突破万辆大关。2022 年，Nexo 氢燃料电池乘用车全球市场份额为 58.0%，较 2021 年提高 3.5 个百分点。其次是日本丰田的 Mirai（3238 辆），同比下降了约 40%。中国上汽大通的 EUNIQ7 和日本本田(Honda)的 Clarity 销量分别为 204 辆和 209 辆。从国家来看，韩国氢燃料电池车销量遥遥领先其他国家，其中 Nexo 在韩国销售 9718 辆，同比上升 18%；美国 2022 年前 10 个月的氢燃料电池汽车销量为 2163 辆，与 2021 年同期相比下降 31%，其中日本丰田的氢燃料电池汽车累计在美国销量占比达 73%（见图 4-2）。

图 4-2 全球燃料电池汽车销量

资料来源：SNE Research。

燃料电池商用车领域，中国仍是全球范围内主要推广力量。随着燃料电池示范城市群政策落地，燃料电池销量同比实现较大增长。2022 年 1—11 月燃料电池汽车产销累计分别达到 2973 辆和 2760 辆，同比分别增长 159%和 151%，恢复并超过最高年份 2019 年的水平。增长的主要原因是示范城市群政策落地后，政策迎来相对稳定期，五大示范城市群有较为明确的年度推广目标，整个示范期将推广超过 30000 辆燃料电池汽车，年度销量有政策保底；同时 2022 年以来越来越多的地方出台的相关氢能产业规划及补贴政策落地，示范城市群城市国补指标之外的车辆和非示范城市群城市也都有一些氢能车辆投运。从结构上来看，燃料电池货车，尤其是燃料电池重卡呈现出强劲的发展势头。2022 年前 10 个月，燃料电池重卡终端市场累计销售 1274 辆，在燃料电池商用车总销量中占比 50%，与 2021 年同期的 435 辆相比，增长了近两倍，为燃料电池汽车的增长提供了有力的支持。从性能上来看，中国燃料电池系统继续朝大功率方向发展。2022 年 1—11 月燃料电池系统累计装机量中，高功率系统（70 千瓦以上）占比达 83%，其中 2022 年 11 月当月高功率系统装车比例已经高达 91%，中等功率（40～70 千瓦）系统占比不到 10%，40 千瓦以下系统已经基本退出市场，符合氢能中长期规划中燃料电池汽车向高功率发展的定位（见图 4-3）。

图 4-3 中国燃料电池汽车产量和销量

资料来源：中国汽车工业协会。

燃料电池系统在特种车辆方面也取得了进展，氢燃料电池在采矿、建筑或铁路等行业的重型、长期使用的特种机械中也开始发挥作用。全球多个项目已经用燃料电池改造了采矿卡车，而主机厂开发了以氢为动力的履带式挖掘机。欧洲和亚洲的几个国家都部署了氢燃料列车，目前全球运营的列车（火车）超过 10 列，另有超过 60 列的订单已到位。2022 年 2 月，日本东日本旅客铁路公司(East Japan Railway Company)展示了搭载以氢燃料电池和蓄电池为电源的混合动力系统试验列车“云雀”(HYBARI)，该列车最高时速可达每小时 100 千米，补充一次氢能源可行驶 140 千米。东日本旅客铁路公司正在日本南武线的川崎至登户等区段进行试验，后续计划

逐步替代东日本旅客铁路公司的柴油列车。此外，东日本旅客铁路公司、丰田汽车和日立株式会社(Hitachi)还发布了氢燃料轨道车 FV-E991 系列。2022 年 8 月，德国首条运行氢能列车的铁路线路在北部下萨克森州正式启用，该线路长约 100 千米，运行由法国阿尔斯通公司设计、在德国组装的 14 辆氢能载客列车。该机车采用美国康明斯(Cummins)的混合电池模块，可存储 89 千克氢气。德国其他几家铁路运营商和公共交通当局正在考虑部署燃料电池列车，以取代柴油列车。2022 年 12 月，由中车长客股份公司联合成都轨道集团共同研制的全球首列氢能源市域列车在成都中车长客生产基地下线。该列车采用“复兴号”关键核心技术，四辆编组，最大载客量将达到 1502 人，动力方面采用氢燃料电池和超级电容相结合的能源供应方式，时速可达 160 千米/小时，续航达到 600 千米。由于摆脱了接触网运行条件的束缚，该列车可广泛应用于非电气化线路区段，大幅提升市域车辆的应用范围，降低了列车基建的投入和维护成本。美欧持续开展燃料电池船舶开发。2021 年年底，美国 ABB 船舶与港口事业部（ABB Marine&Ports）、Maritime Partners 公司、Elliott Bay Design 集团和 e1 Marine 公司签署谅解备忘录，共同开发氢动力内河拖船 Hydrogen One 号，并计划在新奥尔良港到密西西比河的航道网络运营。该拖船输出功率高达 2700 马力，其中 1700 马力来自燃料电池，其余 1000 马力由蓄电池提供，

注满燃料后能够以约 10 千米/小时的航速运行 4 天、共 885 千米。2022 年 4 月，美国斯维奇海事公司(Switch Maritime)推出世界首艘完全由氢燃料电池驱动的商用渡轮“海洋变革号”(Sea Change)。该渡轮全长 21 米，可搭载 75 名乘客。2022 年 4 月，法国 Helion Hydrogen Power 公司和法国船厂 Piriou 宣布建造全球首艘氢混合动力挖泥船。2022 年 5 月，美国 H2 Industries 公司和德国船舶建造公司 TECHNOLOG Services GmbH 开发收集海洋塑料垃圾并将其转化为氢气的船舶。该船舶上配备了由 H2 Industries 公司开发的热解设备，预计每收集 600 千克塑料垃圾可生产 100 千克氢气，生产的氢气被储存在液态有机氢载体中。2022 年 11 月，意大利造船集团 Fincantieri 交付了维京游轮(Viking)首艘配备氢燃料电池的远洋邮轮“维京海王星”(Viking Neptune)号。该邮轮是一艘 47800 吨的小型邮轮，能够搭载 930 名乘客，配备了功率为 100 千瓦的氢燃料电池。这是维京游轮大规模氢应用开发测试的第一步。维京游轮和 Fincantieri 还设计了一个新的大型氢燃料电池船舶，将配备氢燃料发电系统总功率为 6～7 兆瓦的发电系统和更大尺寸的氢气储罐。此外，Fincantieri 还计划改装现有船舶并安装氢燃料电池系统。

氢燃料飞机方面，2022 年 1 月，哈工大重庆研究院氢动力及低碳能源研究中心完成“青鸥 30”氢动力垂直起降固定翼无人机首飞。该氢动力无人机最大起飞重量可达 30 千克，飞

行巡航速度 18～25 米/秒，最长巡航时间 9 小时，续航里程可达 800 千米。2022 年 4 月，德国 H2FLY 公司研制的 HY4 四座氢燃料电池技术验证机飞行高度达到 7230 英尺（约合 2190 米），创造了氢燃料电池飞机飞行高度的新纪录。

此外，多国正积极扩展氢能在军事领域的应用。以色列等国家积极发展军用氢燃料电池无人机。目前，以色列无人机制造商海文公司(Heven)已拥有续航时间分别为 50 分钟、40 分钟和 30 分钟，载重分别为 10 千克、45 千克和 120 千克的 3 种型号氢燃料电池无人机。海文公司正与普拉格能源公司(Plug Power)合作，设计并制造大载荷氢燃料电池无人机，打造“下一代无人机编队”。2022 年 8 月，加拿大海洋技术公司 Cellula Robotics 开发出由氢燃料电池驱动的自主水下航行器 Solus-LR，并在加拿大温哥华的 Indian Arm 完成演示。该项目属于加拿大国防研究发展部(Defence Research and Development)基于全域态势感知科学和技术研发项目(Evaluation of the All Domain Situational Awareness Program, ADSA)的一部分。Cellula Robotics 公司在 ADSA 项目的基础上增强了氢燃料电池的性能，使其适用于 2000 千米级别的水下任务。在演示中，Solus-LR 通过铱星通信系统(Iridium Satellite Communications)向指挥和控制中心发送状态信息，实现全球首次氢能自主水下航行器的近实时超视距通信。

2.发电领域和工业领域

在发电领域，以韩美为代表的大功率系统与日本的小功率燃料电池发电系统相比，市场进展相对更好。2021 年固定式燃料电池在出货数量上比 2020 年有所减少，但出货总功率更高，主要是由于日本 Ene-Farm 小功率系统出货量相对萎靡，而韩国斗山(Doosan)和美国布鲁姆能源(Bloom Energy)推出的更大的燃料电池开始更多地出货。按数量来算，世界上最多的燃料电池系统部署仍然是日本的 Ene-Farm 项目，累计已有 42.4 万台使用质子交换膜燃料电池和固体氧化物燃料电池(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)技术的热电联产机组在日本部署。该项目始于 2009 年，系统采用热电联产模式，松下(Panasonic)的第 6 代 700 瓦系统热电联产模式效率已经高达 97%，机组体积相比 2009 年刚推出时减少了一半，寿命增加了一倍多，达到 9 万小时。在机组实现不断降价和提高性能后，日本政府对质子交换膜燃料电池和固体氧化物燃料电池系统的补贴也随之结束，但是预期的销量并没有实现，日本制造商的数量现在已经减少到只有松下和爱新精机(Aisin Seiki)两家。松下逐渐开始向功率更大的系统发展，于 2021 年年中宣布推出 5 千瓦燃料电池系统，采用质子交换膜燃料电池堆叠技术和模块化系统设计，在纯氢气运行时可提供 56%的电效率，并可将目标系统扩展至 1 兆瓦。

大功率燃料电池发电系统不断进步。与日本自主开发技术不同，韩国大功率固定式燃料电池主要是通过引进美国技术并

进行改造。斗山引进了美国联合技术公司(United Technologies Corporation)的磷酸燃料电池(PAFC)技术，韩国SK集团则是与布鲁姆合作开发固体氧化物燃料电池。韩国斗山占据了本国固定式燃料电池系统市场的三分之二，截至2021年年底，斗山已经在韩国销售了1156套、总容量为508兆瓦的燃料电池发电系统，并已经实现433兆瓦在运营，169套、共76兆瓦容量的系统在建。SK持续加大和布鲁姆的合作，2021年布鲁姆向韩国SK交付的系统占其全部收入的38%。2021年，Bloom SK燃料电池在龟尾工厂开始运营，初始产能为每年50兆瓦，计划到2027年增长到400兆瓦。2021年10月，SK承诺订购500兆瓦的Bloom系统，并向布鲁姆投资5亿美元。美国是第一个在全球范围内大规模部署固定燃料电池发电系统的国家，并多年来拥有世界最大的550～600兆瓦燃料电池发电装机，主要由100多千瓦和低兆瓦规模的机组构成，直到2020年年底总容量才被韩国超越。总部位于加利福尼亚州的布鲁姆公司是在美国推动固定燃料电池系统部署的主要企业，主要为用户提供200千瓦至兆瓦级固体氧化物燃料电池分布式供电系统。同时，加利福尼亚州也是美国燃料电池市场的主要地区，估计大约有550个固定机组总计320兆瓦装机，遥遥领先于其他任何地区。除了这些专注于发电的燃料电池企业外，长期以车用燃料电池开发为主的加拿大巴拉德动力公司(Ballard Power)也开始开发燃料

电池发电系统业务。2022 年年初，巴拉德动力宣布了两个基于质子交换膜燃料电池的 1.5 兆瓦发电系统，开始向兆瓦级固定发电机组进军。

在工业领域，推动可再生能源制氢对灰氢的替代，是工业领域的重点。工业仍是目前氢气消费的最主要领域，当前工业领域用氢基本来自于使用煤和天然气等化石能源方式生产的氢气。目前绿氢替代虽然热度很高，但由于经济性问题，尚未建成大规模的工厂。目前有大约 27 个可再生能源制氢项目已经达到最终投资决定(FID)阶段，其中约 20 个在欧洲。这些项目中用于合成清洁氨数量最多，有 7 个项目已达到最终投资决定阶段，有 3 个已投产项目（高达 20 兆瓦电解槽）。同时，用绿氢合成清洁甲醇生产项目正在逐渐成熟，有 7 个项目处于最终投资决定阶段，最大的运营工厂拥有一个 10 兆瓦的电解槽。其他可再生氢燃料炼油、炼钢或生产合成燃料的项目还没有达到最终投资决定阶段。

在前沿技术方面，2022 年 1 月，日本新能源产业技术综合开发机构宣布在绿色创新基金(Green Innovation)框架下启动钢铁行业利用氢能(Hydrogen Utilization in Iron and Steelmaking Processes)项目，预计该项目总投资将达到 1935 亿日元（约合 14.8 亿美元）。日本将开发高炉氢还原技术和氢直接还原低品位铁矿石技术，降低钢铁行业的二氧化碳排放量，其目标是到 2030 年实现钢铁行业减少 50%碳排放。2022 年 2 月，

英国 Passiv UK 公司、威尔士与西部公用事业公司（Wales&West Utilities）、Kiwa UK 公司等在彭布罗克郡(Pembrokeshire)演示了全球首个智能氢混合供热系统，提供了一种安全、廉价的供热方案，从而替代典型的锅炉系统。该项目通过将氢燃料锅炉、电空气源热泵及智能控制技术结合在一起，可在空气源热泵和氢锅炉之间自动切换，如在可再生电力无法驱动热泵或需要温度提升时，系统将自动切换为氢动力供热。2022 年 6 月，三菱电力美国公司(Mitsubishi Power Americas)和乔治亚电力公司(Georgia Power)使用 M501G 天然气涡轮机进行 80%天然气-20%氢气发电试验，与使用纯天然气相比，该试验减少了约 7%的碳排放。2022 年 12 月，由西门子能源集团、德国航空航天中心(Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt e.V.)、ENGIE Solutions 公司、Centrax 公司、ARTTIC 公司等组成的联合项目团队宣布 Hyflexpower 项目成功完成第一阶段试运行，这是全球首个集成了高比例掺氢先进燃机的电能多元化转换(Power-to-Hydrogen-to-Power)工业级规模示范项目，证明了绿氢不但是一种灵活的储能方式，还可以成为工业型燃气轮机的燃料。2022 年 12 月，奥地利 INNIO 公司宣布，该公司的 Jenbacher 氢能发电机将为荷兰埃因霍温的 NorthC 数据中心提供应急备用电源。

第五章 世界新材料技术发展报告

的关键领域和主战场之一，尤其是应用于半导体、新能源等关键战略技术领域的新材料受到各国的高度关注。虽然在国际地缘政治博弈加剧、地区冲突频发的背景下，新材料领域的国际科研合作受到一定影响，但新材料产业在政策和技术的双重驱动下仍保持快速发展态势。从科技政策角度看，各国针对新材料的研发布局和产业政策布局不断加码，新材料供应链本土化逐渐成为世界科技强国的广泛共识，提升新材料技术本土竞争力日益受到重视。从技术发展趋势看，新材料对电子信息、新能源、生物医药等战略性新兴产业的支撑性、引领性和颠覆性作用更加凸显，低维纳米技术、电磁超材料、超导材料、超宽禁带半导体等前沿新材料发展迅猛，加速推动高性能器件和相关应用的发展；新材料与量子计算、机器学习、合成生物学等学科的交叉融合进一步加深，有望大幅加速新材料技术的研发和产业化进程。

一、世界新材料技术及产业发展重要动向

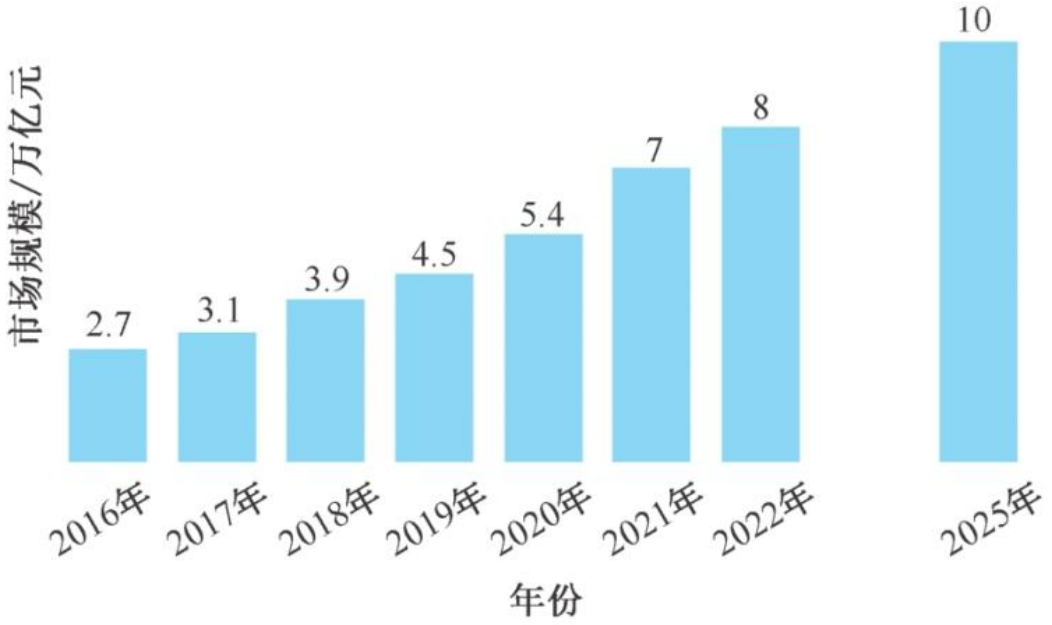
新材料研发涉及凝聚态物理、化学化工、合成生物学、微电子及计算科学等领域，具有学科高度交叉、创新高度集中等特点，是未来产业发展的重要支撑点。因此，新材料领域一

旦出现科学理论突破和工程应用创新，往往会带动电子信息、新能源、航空航天及生物医药等高新技术产业的创新发展，进而增强国家和地区的科技竞争力。

近年来，随着新一轮科技革命和产业变革不断深入，新材料作为支撑现代制造业的“底盘技术”，在创新能力、产业规模、集聚效应等方面取得了长足进步，在科技与经济发展中的支撑引领作用更加显现。世界主要经济体继续提高新材料研发相关投入，持续强化科技政策中新材料产业布局。全球新材料产业发展的引擎主要包含三大部分：一是政策驱动，如碳达峰碳中和、新能源经济给新材料研发和产业化带来了系统性机会，科技竞争态势加剧促使科技强国强化本土供应链的建设；二是市场驱动，消费电子、新能源汽车、5G 通信等产业的发展带动了先进电子材料、封装材料、新能源材料、纳米材料等新材料技术的快速发展；三是技术驱动，在合成生物学、量子计算、机器学习等“使能技术”的交叉促进下，新材料研发的速度呈现爆发式增长，未来有望给新材料产业带来新的变革。在上述引擎的作用下，世界新材料产业尤其是中国新材料产业保持快速增长态势。根据中商产业研究院和智研咨询数据显示，2022 年中国新材料产业总产值达到 8 万亿元，规模体系优势愈加明显，创新能力明显增强，预计到 2025 年有望突破 10 万亿元（见图 5-1）。从材料分类来看，中国在先进基础材料领域，如先进纺织材料、有色金属

材料、先进钢铁材料等领域已经具备竞争优势，产量和规模基本位居全球前列；在关键战略材料领域，复合材料主结构件应用于天和太空站核心舱，C919 大飞机使用的铝合金厚板、特种工程塑料、电子化学品、碳纤维复合材料等一批新材料实现突破，超导材料领域具备全球唯一的全流程生产能力，超纯净、超均匀集成电路材料取得突破。先进半导体材料、新型显示材料、生物医用材料等领域虽然发展迅速，但整体上与美国、日本、欧盟等材料强国（地区）尚存在一定差距，半导体关键材料仍高度依赖进口，显示产业全球市场规模虽然占据半壁江山，但大量显示材料依然需要进口；在前沿新材料领域，如低维纳米材料、超材料等领域已取得海量的科研成果和知识产权，但产业化水平离发达国家还存在不小差距。

图 5-1 2016—2025 年中国新材料产业规模



数据来源：智研咨询、中商产业研究院

2022 年，美国、欧盟、中国、日本、俄罗斯等主要经济体持续加大新材料领域的投入力度，新材料技术与产业发展迅速，其发展态势主要包括：一是全球科技竞争态势进一步加剧，新材料本土供应链建设成为重要议题；二是新材料对关键科技产业的支撑作用成为各国广泛共识，美欧持续出台新材料政策，加大资金投入；三是新材料研发为碳达峰碳中和目标推进提供重要支撑，绿色智能水平稳步提升。

（一）全球科技竞争加剧，科技强国重点关注新材料供应链安全

2022 年，全球科技大国围绕新材料关键技术领域竞争进一步加剧。德国、美国等传统材料强国更加重视提升新材料技术

竞争力，加强新材料供应链本土化建设；美国、澳大利亚、英国、加拿大发布或更新关键矿产战略文件，密切关注关键矿产供应链安全问题。

1.德美两国更加重视提升本土新材料技术竞争力

2022 年 2 月，德国联邦教育与研究部(Bundesministerium für Bildung und Forschung, BMBF)发布《材料研究资助重点文件》(Eckpunktepapier zur Förderung der Materialforschung)，对材料研究资助进行战略性调整，旨在确保在当前技术发展趋势下德国材料研究的国际竞争力和技术主权。BMBF 计划从 10 个方面调整和优化材料研究资助：(1)提高资助的灵活性，使材料研究随着应用成熟度的提高与特定工业问题保持一致；(2)创造共同价值，通过引入“材料平台”和“材料中心”两个新的转化资助工具，加速知识和技术转移；(3)加快材料研究数字化，加强数字化材料研究的工业应用，并加速与“工业 4.0”(Industry 4.0)的联系；(4)加强生物技术应用，将生物学原理和方法转移到材料研究和技术应用中，以创造新的材料特性和更加可持续的材料系统；(5)将可持续性和资源自主确定为材料研究长期主题，提高资源和材料效率，减少温室气体排放，利用基于材料的创新技术，为重要工业部门和社会领域的产品开发创造先决条件；(6)提高研究基础设施使用效率，加强科研机构、大学和企业在共享使用现有研究基础设施方面的合作，并简化共享使用流程；(7)培养青年人才，

即资助本国和国外优秀的年轻科研人员建立自己的工作组，开启独立的科学生涯；(8)确保新材料安全性，研究材料对人类和环境的影响，在充分挖掘新材料应用潜力的同时使其不对人和环境产生危害；(9)开展公众对话，建立新的对话形式，使公众了解当前新材料的研究方向，贡献创造性想法；(10)加强合作能力，制定贯穿所有利益相关方的国家路线图，以释放协同效应。

2022 年 8 月，美国能源部(DOE)出资 6.75 亿美元开展关键材料研究、开发、示范和商业化应用计划（Critical Materials Research，Development，Demonstration，and Commercialization Program，RDD&CA）。该计划将在《基础设施投资和就业法案》资助下，通过扩大关键材料供应、开发替代品、提升材料使用和处理效率、推动循环经济和跨领域活动等方式，弥补美国本土关键材料供应链漏洞，支持清洁能源转型和能源、工业、制造业、运输等部门脱碳。该计划拟加强能源部在关键材料供应链上的投资，包括材料科学、分离科学和地球科学等基础研究，强化公私伙伴关系，并通过示范项目推动技术验证和商业化。根据此前的调查评估结果，能源部为该计划初步确定的关键原材料包括：用于风力发电机、电动汽车和燃料电池汽车发动机等高效电机的钕、镨、镝；用于锂电池的锂、钴、一级镍、石墨和锰；用于催化转化、石油化工、燃料电池和绿色制氢催化的铂族金属；

用于发光二极管和宽禁带功率电子器件的镓；用于制造智能传感器、芯片所需的锗等。

2.美国、澳大利亚、英国、加拿大关注关键矿产供应链安全问题

2022 年 2 月，美国地质调查局(USGS)发布更新版《2022 年关键矿产清单》，将锂、稀土等对美国经济和国家安全至关重要的 50 种矿物产品列入清单。与 2018 年发布的关键矿产清单相比，2022 版清单包含的关键矿产增加了 15 种，这主要是由于新清单将稀土元素和铂族元素拆分为单独的条目，而不是将其作为“矿物群”。此外，2022 版清单增加了镍和锌，同时去除了氦、钾、铼和锶。美国政府将根据新版清单制定关键矿产政策，以扩大国内关键矿产生产规模，减少对中国和俄罗斯的进口依赖。

2022 年 3 月，澳大利亚工业、科学、能源和资源部(Department of Industry, Science, Energy and Resources)发布《2022 年关键矿产战略》。该战略是对 2019 年澳大利亚发布的首个关键矿产战略的更新，愿景是使澳大利亚成为全球关键矿产供应中心。该战略同时更新了澳大利亚关键矿产清单，新增高纯氧化铝和硅两种矿产。澳大利亚将通过 3 项行动来应对相关挑战：一是降低项目风险，主要内容包括加大政府投资，建立关键矿产基金，推动关键矿产加速器倡议(Critical Minerals Accelerator Initiative, CMAI)和现代制造业倡议(Modern

Manufacturing Initiative, MMI)，吸引各方投资；二是营造有利环境，主要内容包括促进研究和开发，打造区域枢纽，制定澳大利亚的环境、社会和治理绩效评估标准，并参与制定国际标准；三是加强国际合作，未来澳大利亚将加强与美国、日本、韩国、英国、印度和欧盟成员国等国家之间的合作，以创建更加多样化、更安全的关键矿产供应链。

2022 年 8 月，英国发布首个关键矿产战略《未来的复原力：英国关键矿产战略》，旨在提高关键矿产供应链安全。战略提出将最大限度地提高英国在关键矿产价值链上的生产能力，加强与国际合作伙伴的合作，创建清洁、安全和繁荣的未来及更安全、更有韧性的关键矿产供应链，具体目标与行动包括：(1)最大限度提升英国国内的关键矿产生产能力；(2)重建英国在采矿和矿产加工方面的能力；(3)开展前沿技术研发，解决建立关键矿产供应链所面临的挑战；(4)通过加速关键矿产循环经济，提高矿产回收、再利用和再循环效率；(5)在全球范围内实现矿产供应渠道多样化；(6)支持英国企业参与海外多元化、负责任、透明的矿产供应链建设；(7)加强国际合作，发展英国与其他国家的外交及贸易关系，拓展国际市场；(8)提高全球环境、社会和治理绩效标准；(9)通过改善数据和可追溯性，发展运作良好和透明的市场；(10)维持伦敦作为全球关键矿产负责任金融之都的地位。

2022 年 12 月，加拿大自然资源部发布新版关键矿产战略《从

探索到回收：为加拿大和世界的绿色和数字经济提供动力》，以促进国内电动汽车电池相关关键矿物的生产和加工。战略提出，加拿大关键矿产战略涉及 5 个核心目标：支持经济增长、提高竞争力和创造就业机会；促进气候行动和环境保护；降低矿业生产对当地居民的影响；培养多元化和包容性的劳动力和社区；加强全球安全及与盟国的伙伴关系。这些目标将通过推动 6 个重点领域的研究和发展来实现：推动研究、创新和探索；加快项目开发；建设可持续的基础设施；降低矿业生产对当地居民的影响；培养多样化的劳动力和繁荣的社区；加强全球领导和安全水平。

3.对中国的影响与启示

2022 年，主要经济体强化新兴技术部署，加大新兴技术投资力度，进一步构建新兴技术竞争壁垒，部分战略文件涉及新材料研发。美国白宫发布更新版《关键和新兴技术清单》，涉及先进计算、先进工程材料、人工智能、先进制造、半导体和微电子技术等 19 类新兴技术；美国众议院通过《2022 年美国竞争法案》，批准 1600 亿美元用于量子、人工智能、纳米技术等前沿技术研究；美国总统拜登签署《2022 年芯片与科学法案》，向半导体行业提供约 527 亿美元的补贴和税收减免；日本发布《量子未来社会愿景》，提出在量子计算机、量子软件、量子安全网络、量子测量和传感及量子材料等技术领域进行研究和产业开发；欧洲议会工业和能源委员

会(Industry and Energy Committee)通过《欧洲芯片法案》，强调加强半导体生态系统，提高供应链韧性和安全，并减少外部依赖的紧迫性。在上述竞争性的法案或者战略中，主要经济体均将新材料作为支撑性技术之一予以高度关注，甚至将新材料供应链安全作为重要议题。

在可预见的未来，美欧日等新材料强国（地区）将加强本土新材料供应链建设，提升本国技术竞争力的同时，通过封锁核心技术、禁运先进新材料等限制手段，阻碍中国高端新材料的自主研发，并降低对中国关键矿产和材料的依赖，这将对中国新材料产业的自主可控和产业升级带来重大挑战。针对这一趋势，中国可从供应链安全评估、促进新材料国内大循环、扩大开放力度等方面加以应对。一是系统评估关键矿产和新材料供应链安全问题。尤其是新能源汽车、半导体和生物医药等关键科技产业，一旦面临地区冲突或国际贸易摩擦等“黑天鹅”事件，往往会面临延迟交货甚至断供的风险，有可能对产业发展造成毁灭性打击。做好关键科技产业所需关键矿产和新材料产品的系统性评估，有助于确定集中攻关、自主研发和对外合作的优先级顺序，做到有的放矢，确保战略性矿产资源和关键新材料产业发展安全稳定。二是在国内大循环的战略下促进新材料产业升级。从价值链出发，加强顶层设计，鼓励下游关键科技产业的技术升级和消费升级，进而提升对上游优质新材料产品的需求水平。针对“卡脖子”

的关键核心技术，有关部门还可通过军民融合、政府采购等措施支持国内新材料产品的首次应用与快速迭代，帮助国内企业跨过产品验证与迭代的“死亡之谷”。三是加大对外开放力度，主动寻求新材料研发的国际交流合作。支持新材料企业在境外设立研发平台和研发中心，促进高校和科研机构进行国际学术交流，加快融入全球新材料市场与创新网络；结合“一带一路”建设，促进新材料产业技术、人才、标准、管理等创新要素的国际交流合作；鼓励国外新材料企业在中国建立研发中心和研发平台，努力将中国纳入全球新材料供应链体系。四是牢牢把握科技革命和产业变革机遇期，推动新材料产业主动融合 5G、工业互联网、人工智能等新一代信息通信技术，加快新材料领域智能化转型步伐。

（二）发达国家出台新材料政策，抢占科技产业发展先机

21 世纪以来，美国、日本、欧盟相继发布材料基因组计划(Materials Genome Initiative)、《日本产业结构展望 2010》(The Industrial Structure Vision 2010)、石墨烯旗舰项目(Graphene Flagship)等重大科技战略和项目规划，视新材料为关键使能技术之一，通过新材料研发推动科技产业的发展，提升本土科技竞争力和产业链话语权。为保持在纳米技术、半导体材料、生物医用材料和精细化工等领域的技术竞争优势，提高产业链话语权，抢占未来科技产业发展先机，2022 年发达国

家持续出台新材料政策并加大资金投入，持续拉动清洁能源、生物医疗、先进电子及航空航天等前沿技术产业发展。

1.美国国家纳米技术计划加大 2022 年度资金支持力度

2022 年 3 月，美国国家纳米技术计划(National Nanotechnology Initiative, NNI)公布了 2022 财年预算，预算金额为 19.8 亿美元，比 2021 财年增长了 2.6 亿美元，支持 11 个机构的纳米科学、工程和技术研发。NNI 共有 5 个项目构成领域(Program Component Area, PCA)，包括：基础研究；纳米技术使能的应用、器件和系统；研究基础设施和仪器；教育和劳动力发展；负责任地发展纳米技术。NNI 旨在实现 5 个目标：确保美国纳米技术研发水平保持世界领先地位；促进纳米技术商业化；提供基础设施，为纳米技术研究、开发和利用提供可持续的支持；促进公众参与，增加纳米技术劳动力；确保负责任地发展纳米技术。其中，基础研究仍然是最大的受资助领域，占 2022 财年预算总额的 47%。美国国家科学基金会(NSF)、能源部和国防部在该领域的资助分别占其总资助的 65%、55%和 54%。

(1)美国国家科学基金会支持物理、生物和工程科学中与纳米尺度上出现的新现象有关的基础研究。具体包括：了解与纳米系统、结构、工艺和机制相关的科学和工程原理；发现和合成新型纳米结构材料，包括生物材料和模块化结构；推进先进纳米电子学研发。NSF 在 2022 财年增加了对合成生物学

和合成细胞相关的纳米生物技术的资助，以实现纳米技术的新应用。

(2)美国国家卫生研究院(NIH)支持多个研究机构的纳米科学基础研究。具体包括：支持美国国家过敏症和传染病研究所(NIAID)在纳米颗粒技术方面的研究，重点支持用于人类免疫缺陷病毒(HIV)疫苗的蛋白质纳米颗粒和信使 RNA(mRNA)研究；支持美国国家癌症研究所(National Cancer Institute, NCI)对癌症纳米技术的基础、应用和转化研究；支持美国国家牙科和颅面研究所(National Institute of Dental and Craniofacial Research, NIDCR)对牙齿、口腔和颅面组织的再生和重建研究，重点推进口腔环境中基于纳米材料的复合材料和基于纳米技术的生物传感测量。

(3)美国国防部支持能提升国防和军民两用能力的纳米科学和工程研究。具体包括：支持美国海军研究办公室(Office of Naval Research, ONR)在生物纳米技术领域的研究，重点支持分层生物材料的制造技术、DNA 纳米技术和应用、微生物材料的合成和图案化、生物启发与仿生材料及器件、纳米电子学领域的纳米科学研究等；支持美国海军研究实验室(Naval Research Laboratory, NRL)在材料及组装、相互作用和纳米系统等 3 个领域的研究。

(4)美国能源部基础能源科学办公室(Office of Basic Energy Sciences, BES)支持材料科学、化学科学、地球科学和生物科

学领域的基础纳米科学研究，目标是在电子、原子和分子水平上理解、预测并最终控制物质和能量，重点支持清洁能源技术的基础研究。

(5)美国国家标准与技术研究院(NIST)支持开发前沿方法，以设计和准确测量各种环境中纳米颗粒、纳米薄膜和纳米复合材料的尺寸、形状、数量和复杂的物理化学性质。

(6)美国国家航空航天局(NASA)支持纳米技术研发，以推进太空探索和航空研究。NASA 正在研究纳米材料在极端环境下的耐久性和系统性能增强，以及使用计算驱动的方法开发用于太空探索的超高强度轻质碳纳米管结构材料。

2.欧洲多家机构联合发布《材料 2030 路线图》

2022 年 7 月，欧洲技术平台(European Technology Platform, ETP)、能源材料工业研发倡议(Energy Materials Industrial Research Innitiative, EMIRI)和材料 2030 宣言(Materials 2030 Manifesto)等机构联合发布《材料 2030 路线图》(Materials 2030 Roadmap)草案，旨在通过一项针对所有价值链和创新市场的多维度倡议，为所有先进材料利益相关者的参与铺平道路，以实现透明性、包容性和创新能力的提升。该路线图分析了 9 个与创新市场中各种先进材料相关的优先领域：健康和医药、可持续建筑、新能源、可持续运输、家庭和个人护理、可持续包装、可持续农业、可持续织物、电子应用。

(1)健康和医药市场材料的优先领域：一是应用于健康和医疗

领域的先进表面(Advanced Surfaces)材料；二是医疗应用中可采用增材制造技术制备的先进材料；三是应用于健康领域的功能材料。

(2)可持续建筑市场材料的优先领域：一是提高能源效率的材料；二是提高可持续性和循环性的材料；三是可以改进产品性能和降低整体碳足迹的材料；四是具有新功能的材料及智能材料。

(3)新能源市场材料的优先领域：一是用于可再生能源和低温室气体排放能源生产技术的先进材料；二是促进可再生能源整合的先进储能材料；三是用于能源密集型工业流程可持续转型的先进材料。

(4)可持续运输市场材料的优先领域：一是零排放车辆；二是车辆、船舶和飞机轻量化；三是电力电子相关材料（如碳化硅和氮化镓等新型宽带隙材料）以及用于交通电气化、连接、智能移动、控制的智能设备的开发。

(5)家庭和个人护理创新市场材料的优先领域：一是基于自然和可持续平台开发、可替代传统材料、具有活性和非活性成分的先进材料；二是可循环和重复使用的材料及其设计；三是可再生材料和生物技术产品的生产方法，需要利用第二代（废物流）生物质和第三代（藻类）生物质或直接从大气中捕获碳的方式获得新的原料；四是多功能表面(Multi-Functional Surfaces)和涂层，如设计合适的表面纳米结

构和涂层（从单层到复杂的干扰系统）。

(6)可持续包装市场材料的优先领域：一是新的可再生和可回收材料，以及用于特定应用的可生物降解和可堆肥材料；二是用于监控产品质量和延长保质期的智能解决方案；三是包装配方（如催化剂、添加剂、增塑剂）中含有的致癌、致畸、生殖毒性物质的替代品研发；四是减少材料用量、实现材料再利用和再循环的设计，可以是材料和产品层面的物理设计或分子层面的化学设计。

(7)可持续农业市场材料的优先领域：一是开发用于测量农产品成熟度和碳耕作的高效传感器；二是开发可持续、高效的基于生物技术或可进行生物降解的聚合物，以促进农业发展和土壤保护；三是开发用于水和空气净化的先进表面和过滤器。

(8)可持续织物市场材料的优先领域：一是面向功能性和技术应用的生物基、可再生的先进纤维和纺织品；二是可持续和资源高效的多功能纺织表面工程，如纤维和纺织品定向（多）功能化的创新工艺和技术；三是用于智能可穿戴设备和大面积表面的智能电子纺织品及其高效集成、制造和回收，如电子元件的小型化，低成本智能无线传感器网络的集成等。

(9)电子应用市场材料的优先领域：一是 5G 网络、可穿戴设备、传感器、半导体等电子市场中用于环保、散热、射频透明和小型化的先进多功能材料；二是用于柔性电子产品、后

硅电子产品(Post Silicon Electronics)、光纤应用等电子产品的先进涂层和基材；三是电子设备中可以避免使用关键原材料的技术，以及可以实现关键原材料的有效更换、回收、循环设计及使用的相关技术和工艺。

3.对中国的影响与启示

近年来，美国、欧盟、日本等国家和地区纷纷制定各自的新材料发展规划或组建政府、研究机构、企业等多方参与的研究平台。美国国家纳米技术计划由美国时任总统克林顿于2000年在美国加利福尼亚理工大学宣布启动，2003年通过的《21世纪纳米技术研究与发展法案》(21st Century Nanotechnology Research and Development Act)明确对相关联邦政府部门或机构授予纳米技术研发领域的拨款权。截至2022年年底，该计划已成为一个横跨20个联邦部门的大型政府投资计划，在纳米电子、药物递送系统、催化剂、显示材料等领域孵化了大量的科技成果，对于维护美国的科技领先优势及国家安全起到了支撑作用。2022年，美国继续加大纳米技术的资金支持力度，进一步拓展纳米技术的研发与应用范畴，凸显美国引领前沿技术、维持技术竞争优势地位的决心。此外，2022年9月，美国总统拜登签署行政令启动《国家生物技术和生物制造计划》，投资20亿美元加速生物技术创新，促进生物基材料、生物制药、再生医学等生物制造技术发展。

欧洲技术平台(ETP)由欧洲议会于 2003 年提出，旨在联合高校、科研机构、企业、政府和金融机构共同为关键核心技术发展制定战略优先事项，其在能源、环境、生产与工艺、运输、信息和通信技术、生物基经济大类下划分有 40 个子技术平台；欧洲“能源材料工业研发倡议”(EMIRI)成立于 2012 年，由 60 多家活跃在清洁可持续能源和交通先进材料技术领域的会员单位组成，在欧洲“地平线 2020”(Horizon 2020)计划框架下与欧盟委员会展开密切合作。值得关注的是，ETP、EMIRI 的发展模式都是由龙头企业牵引，并由“政产学研金介用”的广泛利益相关方组成。2022 年，ETP、EMIRI 在“材料 2030 宣言”的框架下发布《材料 2030 路线图》，表明通过新材料技术研发带动关键科技产业发展已经成为欧洲社会各界的广泛共识。

《日本产业结构展望 2010》是日本经济产业省(Ministry of Economy, Trade and Industry)于 2010 年公布的产业政策纲领性文件，旨在对日本未来的产业发展进行总体规划。文件将包括高温超导、纳米技术、功能化学、碳纤维等新材料技术在内的十大尖端技术产业确定为日本未来产业发展的主要战略领域，分析了相关领域的发展现状和存在问题及未来发展方向，并提出了相应的行动计划。

美国、欧盟、日本等主要经济体在新材料创新突破模式上均有各自的特点，都取得了突出的成就。例如，美国新材料政

策一般由政府引导，国防部门、新材料企业、国家实验室、高校和风险投资机构形成多主体协同的新材料创新突破模式，自下而上推动新材料产业发展。欧盟新材料政策主要由政府、龙头企业、创业企业和高校等多主体共同商讨制定，由产业链下游企业引领拉动，形成了“政产学研用”协同配合的新材料创新体系。日本新材料政策则一般由政府来主导，龙头企业与科研机构协同配合，自上而下实现新材料产业的技术升级。中国可借鉴发达国家的成功经验并参考国内科技创新生态现状，发挥举国体制的优势，在政府层面加强新材料战略顶层设计，不断增强“十四五”及今后一个时期中国新材料产业发展规划的系统性、整体性、协同性，集中新材料领域企业、高校、科研院所等多主体力量，在中国超大规模市场的优势下，突出问题导向，强化政策支持，联合攻关新材料关键核心技术，形成多主体协同的新材料创新突破模式，促进行业耦合发展。

（三）新材料研发为推进碳达峰、碳中和目标提供重要支撑

化石燃料消耗所排放的二氧化碳等温室气体导致温室效应、极端天气等气候问题，对人类社会的可持续发展造成严重威胁。为应对全球性气候问题，国际社会相继通过了《京都议定书》（Kyoto Protocol，1997 年）、《哥本哈根协议》（Copenhagen Accord，2009 年）、《巴黎协定》（Paris

Agreement，2015 年）等，旨在通过节能减排、发展清洁能源等手段，最终实现碳排放与碳吸收的平衡，即碳中和发展目标。作为能源高效生产与利用的重要组成部分，新材料的发展与应用在实现碳达峰、碳中和的进程中起到至关重要的作用。2022 年，日本、英国、韩国等国大力资助碳中和相关新材料技术研发项目，加速推进本土经济绿色、可持续化发展。

1.日本大力资助碳中和相关新材料技术研发

2022 年 1 月，日本新能源产业技术综合开发机构(NEDO)在绿色创新基金(Green Innovation Fund)框架下，投入 550 亿日元（约合 4.2 亿美元）启动利用二氧化碳制造混凝土的技术开发 (Development of Technology for Producing Concrete and Cement Using CO2)项目。该项目旨在开发混凝土生产过程中减少碳排放的技术及高效二氧化碳分离/回收技术，以推进水泥行业大规模固碳技术的早期部署，助力实现碳中和目标。该项目的实施期为 2021—2030 年，目前已确定资助 4 个主题：一是创新负碳混凝土材料和施工技术及质量评估技术的开发，内容包括开发减少碳排放并使固碳效果最大化的混凝土制造工艺，以及混凝土质量管理及定量评估相关方法；二是高二氧化碳利用率的混凝土开发及其在路面和建筑物中的应用，内容包括将水泥烧制过程中产生的二氧化碳固定在工业废物中用于生产混凝土材料，以及构建生命周期碳排放、

生命周期评估、生命周期成本的综合评价体系；三是混凝土固碳评估的标准化研究与开发，内容包括基于实验事实和科学理论依据开发固碳定量评估方法和质量控制方法；四是二氧化碳回收型水泥制造工艺的开发，内容包括开发水泥制造过程碳捕集系统，以及使用各种钙源生产水泥的技术。

2022 年 2 月，日本新能源产业技术综合开发机构(NEDO)在绿色创新基金框架下，投入 1234 亿日元（约合 9.4 亿美元）启动新项目利用二氧化碳和其他资源生产塑料原材料的技术开发(Development of Technology for Producing Raw Materials for Plastics Using CO2and Other Sources)，旨在开发有效利用二氧化碳等碳原料生产塑料及高价值化学产品的技术，以推进碳循环产业发展，助力实现碳中和目标。该项目实施期为 2021—2030 年，目前已确定资助 4 个主题：一是开发石脑油分解炉先进技术；二是开发废塑料、废橡胶化学品制造技术；三是开发利用二氧化碳制造功能性化学品的技术；四是开发醇类化学品制造技术。

2022 年 4 月，日本新能源产业技术综合开发机构(NEDO)在绿色创新基金框架下，投入 1510 亿日元（约合 11.5 亿美元）启动下一代储能电池和电机开发(Next-generation Storage Battery and Motor Development)项目，旨在推进汽车产业向电气化发展，降低全产业链碳排放，实现碳中和目标。该项目的实施期为 2022—2030 年，目前已确定资助 3 个主题：

一是高性能电池及材料研发，将开发高容量电池（如全固态电池）及其材料，使其能量密度提升至当前水平两倍以上，即超过 700～800 瓦时每升，同时开发钴、石墨等新能源材料的替代材料和低碳制造工艺；二是开发电池回收利用技术，将开发可回收至少 70%锂、95%镍、95%钴的回收技术；三是开发高效、高功率密度电机系统，将开发创新的材料、电机结构、逆变器及冷却技术，提高电机系统效率（系统平均效率达到 85%），减小尺寸和重量，提高功率（系统输出功率密度达到 3 千瓦每千克）。

2.英国资助颠覆性清洁技术开发

2022 年 3 月，英国国家科研与创新署(UK Research and Innovation, UKRI)计划投入 250 万英镑资助 10 个颠覆性清洁技术开发项目，旨在利用化学工程、材料科学的前沿技术成果，推进清洁技术可持续、低成本转型以实现净零排放目标。这些项目重点关注农业、交通及能源系统的绿色转型，具体包括：(1)基于粒子稳定乳液和氢载体的新型混合氧化还原液流电池，即开发可重复使用氢载体的氧化还原液流电池，替代有毒或昂贵组件；(2)将绿氨用作未来交通燃料，即开发一种与氢混合的新型液氨，可直接用于现有发动机，显著提高发动机性能并减少排放；(3)用于储能的等离子体电催化技术，即探索利用等离子体电催化工艺将二氧化碳转化为碳氢化合物，并建成原型设备；(4)直接空气捕集合成负碳化学品，

即直接从空气中捕集二氧化碳或氮，并与催化过程结合合成负碳排放的甲醇；(5)零碳制热和储热技术，即探索通过铝、铁等金属粉末的燃烧和再生来提供零碳热量，并将其作为储能技术；(6)无过渡金属和无负极的钾金属电池，即开发基于钾和硫等廉价材料的无负极电池，可减少对碱金属的使用，提高电池能量密度；(7)将二氧化碳还原为化学品和燃料的零间隙双极膜电解槽，即通过创新电极设计、低能耗设计等改进现有二氧化碳电催化还原技术；(8)海水电解可持续制氢技术，即克服海水电解制氢的技术挑战，利用可再生能源电力生产氢气；(9)可持续净零农业脱碳固氮技术，即开发使用超声波固氮的可持续新方法，该方法仅需消耗水、空气和电能，可大幅降低肥料生产过程中的碳排放；(10)利用离子热电技术回收低品位余热，即开发利用离子和带电荷原子的新型发电装置，以实现工业过程低品位热回收，从而减少碳排放。

3.韩国提出面向碳中和的 10 项新兴技术

2022 年 6 月，韩国科技评估与规划研究院（Korea Institute of S&T Evaluation and Planning，KISTEP）以碳中和为目标，确定了 10 项新兴技术研发项目。每项新兴技术都与其他技术形成互补关系，产生积极的协同效应，促进韩国 2030 国家自主贡献(Nationally Determined Contributions, NDCs)减排目标的实现。在这 10 项技术中有 6 项技术与新材料息息相关，具体包括：

(1)碳捕集与利用技术。预计到 2030 年，韩国将捕集 100 万吨燃煤后排放的二氧化碳，二氧化碳向燃料的转化率达到 30%，通过矿物碳化转化为建筑材料的二氧化碳达到 10 万吨。将碳捕集与利用技术和低碳钢生产相结合，有助于钢铁行业的碳减排。

(2)生物基原材料及产品制造技术。预计到 2030 年，作为韩国主要出口产业的石油化工产业将向脱碳和环保的生物基原材料、生物基应用原材料和生物塑料转变，以奠定韩国在石化技术方面的全球领先地位。

(3)钢铁低碳生产技术。目前，韩国钢铁低碳生产技术处于商用化阶段，正在推进“COOLSTAR 炼钢二氧化碳低排放技术及减氢过程（2017—2025 年）”(COOLSTAR CO2Low Emission Technology of Steelmaking and Hydrogen Reduction Project 2017-2025)计划，开发的低碳技术将比现有炼钢工艺减少 15%的碳排放。预计到 2030 年，韩国将完成高炉用碳基燃料和原材料的替代技术及转炉中大量使用废钢的冶炼技术的完全开发和示范，到 2040 年实现商业化应用。

(4)高容量和长寿命二次电池技术。该技术项目包括开发锂离子电池、固态电池、金属-空气电池、锂硫电池、氧化还原液流电池、钠离子电池、多价离子电池的相关材料、零部件和全电池技术。预计到 2030 年，随着可再生能源、能源存储系统、电动汽车的广泛应用，二次电池将发挥重要作用。

(5)高效晶体硅太阳能电池技术。预计到 2030 年，化石燃料使用量将大幅减少，可再生能源特别是太阳能和风能的比例将大幅增加。此外，虽然目前常规晶体硅太阳能电池装机规模在全球市场处于领先地位，但由于其效率提升空间有限，预计未来其市场份额将大幅下降；而 TOPCon 太阳能电池（一种基于选择性载流子原理的隧穿氧化层钝化接触太阳能电池技术）、晶体硅异质结太阳电池和高效晶体硅太阳能电池市场份额有望增加。

(6)稀土元素回收技术。稀土元素回收技术分为可持续、环保的资源循环利用技术，高附加值材料开发技术，产业生态系统恢复技术等。目前韩国国内稀土完全依赖进口，亟须制定稳定稀土供应链的相关政策，以应对国内不断增加的稀土需求。预计到 2030 年，韩国有望开发出稀土矿产高效回收技术和从“城市矿山”中回收利用稀土材料的技术。

4.对中国的影响与启示

新材料技术作为一种引领性、支撑性的“使能技术”，可以提供源源不断的原始创新能力，促进关键科技产业的集成创新与应用拓展，在碳中和目标实现的过程中起着关键支撑作用。新能源产业的发展离不开新材料技术的研发与产业化，如光伏、风电等可再生能源的开发，化学储能、燃料电池、氢能等清洁能源的存储利用，生物质储碳、无机化合物储碳等碳存储的应用等。新材料技术已经成为碳中和战略中的关

键核心技术之一。近年来，美国、欧盟、日本、韩国等主要经济体积极从新材料技术的角度布局碳中和新兴技术，已经在高效太阳能电池、钢铁低碳生产、混凝土储碳、二氧化碳捕集与封存、生物质材料等领域取得一系列技术成果，有效推进全球碳达峰、碳中和目标的实现。

中国可借鉴发达国家的成功经验，科学制定行动路线，有序推进“双碳”工作。一是从新材料技术的角度统筹支持碳中和技术开发。中国相关科技主管部门可在碳达峰、碳中和整体目标之下，借鉴美国能源部、日本新能源产业技术综合开发机构、英国国家科研与创新署和韩国科技评估与规划研究院的相关科技政策及项目设计，制定符合各部门核心目标的新材料技术开发计划，统筹协调，通过新材料技术的原始创新加速推动碳达峰、碳中和目标的实现。二是多主体协同制定碳中和新材料技术路线图。清晰的技术路线图有助于各创新主体统一思想、形成合力，有助于科技主管部门进行统筹规划及合理评价，有助于联盟协会制定行业标准、促进行业交流。科技主管部门可联合科技巨头、初创企业、高校、科研机构及其他利益相关方共同制定一系列技术路线图，为碳中和技术研发与应用提供有力支撑。三是加大新材料低碳技术推广力度，实施绿色低碳技术改造，推进超低排放改造和清洁生产，提升资源综合利用水平。

二、高性能结构材料

高性能结构材料具有高比强度、高比刚度、耐高温、耐磨损及耐腐蚀等优异性能，对交通运输、能源动力、资源环境、航空航天、国防军工及国家重大工程等领域的可持续发展起着关键性作用。主要国家在制定关键技术发展规划时，均将高性能结构材料列为新材料领域的重点发展项目之一。目前，高性能结构材料的主要发展方向为轻量化、可塑性、结构功能一体化。

（一）金属结构材料

金属结构材料具有高韧性、高强度、高延展性及优良导电性等特性，主要包括钢、钛合金、镁合金、铝合金、超硬合金、超塑性合金和超低温材料等。各国加速研发纳米合金、粉末冶金等新型金属材料及制备工艺，取得了多项突破。2022 年，高性能金属结构材料领域取得的主要进展有以下几个方面。

1.金属 3D 打印及粉末冶金材料技术持续取得突破

1）德国研究人员利用超高速激光熔覆技术开发新合金

2022 年 2 月，德国亚琛工业大学(RWTH Aachen University)数字增材生产学院的研究人员使用超高速激光熔覆(Extreme High Speed Laser Cladding, EHLA)3D 打印技术开发用于粉末床熔融(Powder Bed Fusion, PBF)工艺的新合金。该技术具有原位单粉末供应和冷却速率快等优势。研究人员的目标是比较打

印样品集的化学成分，并检查其他工艺参数（如颗粒速度和粉末质量流）。此外，由于不同工艺之间能量输入的差异，研究人员对于各种合金的蒸发行为也将进行进一步研究和比较。

2）韩国研究人员发现新型金属 3D 打印结合机制

2022 年 3 月，韩国延世大学(Yonsei University)的研究人员发现黏合剂喷射金属 3D 打印(Binder Jetting Metal 3D Printing, BJM3DP)的结合机制，该机制使用果酸盐螯合剂作为 3D 打印黏合剂。常见果酸盐螯合剂在金属颗粒之间形成稳定的金属螯合物桥，可对强度更高的金属进行精细 3D 打印，且通过后处理可以进一步降低金属颗粒之间的孔隙率。研究人员对金属-有机物络合机理进行深入分析，并对 3D 打印的金属物体进行压缩测试，以确定其机械强度与螯合剂类型的依赖关系。测试结果表明，螯合剂辅助 BJM3DP 技术不仅有助于制造复杂的结构，而且也适用于多种金属粉末。相关研究成果发表在《自然 • 通讯》期刊上。

3）俄罗斯研究人员开发出廉价且高效的超硬硼化钨合成方法

2022 年 5 月，俄罗斯斯科尔科沃科技学院的研究人员开发出一种有效且廉价的超硬硼化钨合成方法。硼化钨可应用于钻井和其他工业技术领域。现有的硼化钨合成方法需要真空或高压下的惰性气氛，这不仅增加了生产成本而且还限制了产

量及其可扩展性。研究人员采用坩埚形式的石墨阴极和可以放入内部的棒状石墨阳极，先将粉末状钨和硼的初始混合物压实并放置在坩埚底部，然后在正常空气气氛下在阳极和阴极之间引发电弧放电，随着电弧推动温度升高生成硼化钨。该方法不需要真空环境，适用于大规模工业生产。相关研究成果发表在《无机化学》(Inorganic Chemistry)期刊上。

4）美国研究人员通过 3D 打印制造出高性能纳米片层共晶高熵合金

2022 年 8 月，美国马萨诸塞大学阿默斯特分校(University of Massachusetts Amherst, UMass Amherst)和佐治亚理工学院(Gatech)的研究人员利用激光粉末床熔融技术(Laser Powder Bed Fusion, L-PBF)制备出具有高强韧力学性能及各向同性特征的双相纳米片层 AlCoCrFeNi2.1 共晶高熵合金，该材料展示出优异的强塑性匹配能力。研究人员通过三维原子探针、原位中子衍射、晶体塑性有限元模拟等表征手段揭示了合金的强韧化机理。该研究成果可为高性能铝合金及钛合金多相片层结构设计提供参考。相关研究成果发表在《自然》期刊上。

5）法国研究人员开发出安全且廉价的热电材料

2022 年 11 月，法国 CRISMAT 实验室的研究人员开发出安全且廉价的热电材料，该材料由铜、锰、锗和硫组成，生产过程较为简单。研究人员先使用球磨机将铜、锰、锗、硫粉末机械合金化，形成一个预结晶相，然后在 600 摄氏度下烧结

使其致密化，生成的新型热电材料可将热能转化为电能且在400 摄氏度下仍能保持稳定。研究人员发现，用铜代替一小部分锰会产生复杂的微结构，该结构具有相互连接的纳米域、缺陷和相干界面，会影响材料的电子和热传输特性。研究人员将进一步改进这种新型无毒热电材料，使其可以替代传统含铅、碲等有毒元素的材料。相关研究成果发表在《德国应用化学》(Angewandte Chemie)期刊上。

2.中澳研究人员开发出新型超高强塑性纳米合金

2022 年 4 月，由中国吉林大学、西安交通大学、南京理工大学及澳大利亚悉尼大学(University of Sydney)等机构研究人员组成的研究团队，提出了超高强纳米金属的应变硬化新机制，并根据该机制开发出新型超高强塑性纳米合金。研究人员以镍钴合金作为模型材料，利用脉冲电沉积工艺，在面心立方单相双主元固溶体合金中构筑出了由纳米晶粒（晶粒尺寸 26 纳米）及其内部多尺度成分起伏（1～10 纳米）组成的复合纳米结构。该材料的屈服强度达到 1.6 吉帕，最高拉伸强度接近 2.3 吉帕，拉伸断裂应变可达 16%。相关研究成果发表在《自然》期刊上。

3.日本和德国研究人员开发出新型高强度汽车钢板

2022 年 6 月，日本钢铁工程控股公司(JFE Holdings)与德国蒂森克虏伯钢铁欧洲公司(Thyssen-Krupp Steel Europe AG, TKSE)的研究人员利用淬火配分（Quenching and Partitioning，Q&P）

工艺，共同开发出一种适用于冷加工的980～1180兆帕级新型高强度钢板。与常规通用高强度钢相比，该钢板具有更高的屈服强度和更高的延展性，特别是局部延展性能优异。这些特性有助于进一步减轻汽车车身的重量和提高碰撞安全性能，并且在不使用热成型工艺的情况下通过传统的冷加工（冲压成型/辊压成型）就能够进行难成型零件的制造，可提高生产效率并降低制造成本。

（二）无机非金属材料

无机非金属材料是以某些元素的氧化物、碳化物、氮化物、卤素化合物、硼化物及硅酸盐、铝酸盐、磷酸盐、硼酸盐等物质组成的材料，具有高熔点、高硬度、耐腐蚀、耐磨损、高强度、良好的抗氧化性等特性。无机非金属材料是现代工业、传统工业技术改造、国防和生物医学等领域不可缺少的基础材料，主要包括陶瓷、玻璃、搪瓷、水泥、多孔材料、耐火材料、碳素材料等种类。近年来，中国、美国、英国、俄罗斯等主要国家开发出多种性能优异的陶瓷、玻璃、超硬材料等无机非金属材料。2022年，无机非金属材料领域取得的主要进展有以下几个方面。

1.美国研究人员通过近红外荧光发现混凝土微裂纹

2022年1月，美国莱斯大学的研究人员发现，普通的波特兰水泥（即硅酸盐水泥）含有微小的硅晶体，这些晶体在可见

光照射下会发出近红外荧光。研究人员在新混凝土上涂上一层薄薄的不透明涂料，将光线照射到关键结构上，并使用近红外相机和窄带光谱滤光片对其进行拍摄。在近红外扫描中，完整的混凝土呈现黑色，而发光的光线则显示出最微小的裂缝。未来这一技术可应用于桥梁、建筑物、核电站安全壳、管道内部的微裂纹检测。相关研究成果发表在《科学报告》(Scientific Reports)上。

2.俄罗斯研究人员开发能自我修复缺陷的陶瓷材料

2022 年 4 月，俄罗斯科学院西伯利亚分院(Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences)强度物理学与材料科学研究所的研究人员开发出一种能自我修复缺陷的陶瓷材料。该材料的硬度与金刚石相近，可以承受 2700 摄氏度的高温，在高温下材料表面形成的玻璃层可以阻断氧气的影响，从而对材料损坏部位进行“修复”，只需 10 分钟就可恢复材料性能。该材料可应用于航天器发动机、高超声速飞行器等领域。

3.中国研究人员制备出新型低熔点含氮氯磷酸亚锡玻璃

2022 年 7 月，中国科学院上海光学精密机械研究所的研究人员在 350 摄氏度下制备出含氮氯磷酸亚锡玻璃（P-Sn-O-Cl-N 玻璃体系），并探索了其结构特性。氯磷酸盐玻璃具有磷酸盐和卤化物玻璃的综合优点，如热膨胀系数高、抗失透性强、声子能量低。研究人员用传统的熔体萃取冷却方法制备 P-Sn-O-Cl-N 无色透明玻璃体系，通过对比不同温度下制备的

样品，发现在较低温度下制备的玻璃透明度、成分和结构与高于 500 摄氏度的玻璃存在显著差异。该项研究为制备非球面异形玻璃、钙钛矿量子点基体玻璃和低熔点功能材料掺杂玻璃提供了新思路。相关研究成果发表在《非晶态固体期刊》(Journal of Non-Crystalline Solids)上。

4.俄罗斯研究人员开发出廉价合成高熔点碳化物材料的方法

2022 年 7 月，俄罗斯斯科尔科沃科技学院和托木斯克理工大学的研究人员开发出一种廉价合成高熔点碳化物材料碳化铪钽的方法。研究人员使用等离子体动态合成技术，先将碳粉及铪和钽的氧化物放入同轴磁等离子体加速器中，再将大量能量泵入存储电容器使电容器放电产生电弧，由此生成高质量的铪、钽、碳化合物粉末，这些粉末可沉积在不同的基材上形成涂层。这种硬质合金涂层可用于热绝缘、电绝缘及防止机械损伤。相关研究成果发表在《先进功能材料》(Advanced Functional Materials)期刊上。

5.英国研究人员通过机器学习确定γ-氧化镓的关键特性

2022 年 8 月，英国利物浦大学(University of Liverpool)、布里斯托大学、伦敦大学学院(UCL)的研究人员将机器学习、理论计算与实验结果相结合，确定了γ-氧化镓的关键特性。研究人员将机器学习与原理计算、实验数据相结合，详细了解结构无序对γ-氧化镓电子结构的影响。该项研究有助于发挥γ-氧化镓在电力电子技术和日盲光电探测器等领域中的应用

潜力。相关研究成果发表在《先进材料》期刊上。

6.奥地利研究人员使用辐射辅助烧结技术快速烧结氧化铝陶瓷

2022 年 9 月，奥地利莱奥本矿业大学(Montanuniversitaet Leoben)的研究人员使用辐射辅助烧结(Radiation-Assisted Sintering, RAS)技术在几分钟内快速烧结（约 300～450 摄氏度每分钟）具有复杂几何形状的 3D 打印氧化铝陶瓷。研究人员使用放电等离子烧结(Spark Plasma Sintering, SPS)装置，通过快速辐射传热促进陶瓷致密化，并通过控制保压烧结时间调整晶粒尺寸，获得了高密度、细晶粒的微观结构。该技术还可应用于其他 3D 打印陶瓷材料。

7.美国研究人员开发出可热成型的新型陶瓷材料

2022 年 10 月，美国东北大学(Northeastern University)的研究人员开发出一种可热成型并用于制造复杂部件的新型陶瓷材料。当陶瓷承受极端的热变化和机械负载时，往往会因热冲击而破裂，而研究人员发现的新型陶瓷发生了变形却并未破裂。该材料可在加热后进行压缩成型，并在室温下表现出优异的机械强度和导热性，可作为冷却高密度电子产品的导热体。热成型陶瓷可以直接与任何形状的电子元件贴合，比目前使用的金属更薄、更轻、更高效。相关研究成果发表在《先进材料》期刊上。

（三）高分子材料

高分子材料主要包括橡胶、塑料、纤维、高分子涂料、高分子胶黏剂及聚合物薄膜等种类，广泛应用于农业、建筑、医疗、电子工业、航空航天、交通运输及国防军工等领域。为实现可持续发展目标，主要国家加快研发可回收、可降解的新型环保塑料，生物基高分子材料等新型高分子材料受到关注。2022 年，高分子材料领域取得的主要进展有以下几个方面。

1.各国加快研发可回收、可降解的新型塑料

1）美国和英国研究人员开发出糖基可回收塑料

2022 年 1 月，美国杜克大学和英国伯明翰大学的研究人员从糖基原料中创造了一个新的聚合物系列，既保留了普通塑料的所有品质，也可进行降解和机械回收。研究人员使用由糖醇制成的 isoidide 和 isomannide 作为构建单元制造了新的聚合物。该聚合物显示出与普通塑料相似的刚度和延展性，以及与尼龙 6(Nylon-6)等高级工程塑料相似的强度，且经过粉碎和热处理后的再生塑料仍保持了原始材料优异的机械性能。相关研究结果发表在《美国化学会期刊》(Journal of the American Chemical Society, JACS)上。

2）巴西研究人员开发出高拉伸强度、可生物降解的抗菌生物塑料

2022 年 3 月，巴西圣保罗州立大学(UNESP)复合材料和混合

纳米复合材料小组(Composites and Hybrid Nanocomposites Group)的研究人员开发出高拉伸强度、可食用、可生物降解的抗菌生物塑料。研究人员用 B 型牛明胶制成了生物塑料薄膜，并添加 cloisite Na + 纳米黏土使薄膜更加均匀，将其拉伸强度提高到 70 兆帕。该生物塑料可更好地保护包装食品免受病原体污染，在食品、药品和化妆品行业中具有应用潜力。相关研究成果发表在《聚合物》(Polymers)期刊上。

3）芬兰研究人员开发出可降解回收的新型超分子塑料

2022 年 8 月，芬兰图尔库大学的研究人员开发出一种超分子塑料，该材料的机械性能与传统聚合物塑料相近，但更容易分解和重复使用。研究人员发现，液-液相分离法(Liquid-Liquid Phase Separation, LLPS)可以隔离和浓缩溶质，增强小分子之间的结合力，推动宏观材料的制备。研究人员采用液-液相分离法制造的材料不仅具有强大的机械性能和黏性，而且还具有高度可回收性，可通过吸水进行自我修复。未来该材料可作为环保材料替代传统的聚合物塑料。相关研究成果发表在《德国应用化学》期刊上。

4）日本研究人员采用人工光合作用技术合成可生物降解的塑料

2022 年 10 月，日本大阪市立大学(Osaka City University, OCU)的研究人员采用人工光合作用技术，利用阳光和二氧化碳合成可生物降解的塑料。研究人员模仿自然光合作用，人工复

制了涉及阳光的光反应和固定二氧化碳的暗反应，利用丙酮和二氧化碳生产可生物降解的塑料 3-羟基丁酸，实现了约 80%的产率。3-羟基丁酸可作为用于包装材料的不溶性聚酯聚-3-羟基丁酸酯(Poly-3-hydroxybutyrate, PHB)的原料。未来，研究人员的目标是通过人工光合作用，利用工厂排放的二氧化碳生产 3-羟基丁酸。相关研究成果发表在《化学通讯》(Chemical Communications)期刊上。

5）比利时研究人员开发出具有可持续性和可回收性的聚氨酯泡沫

2022 年 11 月，比利时列日大学(University of Liege)的研究人员开发出具有可持续性和可回收性的聚氨酯泡沫。研究人员开发了一种创新工艺，可与现有的工业发泡基础设施兼容，在不使用剧毒试剂异氰酸酯的情况下，使用水产生发泡剂来制备无异氰酸酯和可回收的聚氨酯泡沫。该技术使用水和催化剂将部分环状碳酸酯转化为二氧化碳气体吹入基体，而另一部分环状碳酸酯则与胺反应固化泡沫，制造出低密度、具有规则孔隙的固体材料。该技术为生产具有可持续性的聚氨酯泡沫提供了新途径。相关研究成果发表在《德国应用化学》期刊上。

2.生物基高分子材料成为各国研究热点

1）澳大利亚研究人员开发出自清洁生物塑料

2022 年 2 月，澳大利亚皇家墨尔本理工大学(RMIT)的研究人

员受到荷叶启发，开发出一种坚固、可持续和可堆肥的自清洁生物塑料。研究人员首先合成设计了一种由淀粉和纤维素纳米粒子制成的塑料，在塑料表面印上模仿荷叶结构的图案，再涂上一层聚二甲基硅氧烷(Polydimethylsiloxane, PDMS)保护层。测试表明，这种生物塑料不仅能有效排斥液体和污垢，而且在被磨料划伤并暴露于热、酸和乙醇中仍能保持其自清洁性能。相关研究成果发表在《整体环境科学》(Science of the Total Environment)期刊上。

2）瑞士研究人员利用废弃生物质制成类 PET 塑料

2022 年 6 月，瑞士洛桑联邦理工学院的研究人员开发出一种类似于 PET 塑料的生物质衍生塑料，该材料符合替代多种现有塑料的标准，同时也更加环保。研究人员向非食用生物质的半纤维素部分（如农业废料）中添加乙醛酸，可将 25%的农业废料或 95%的精制糖转化为类 PET 塑料。研究人员利用该塑料制造了包装薄膜、可以纺成衣服或其他纺织品的纤维以及用于 3D 打印的细丝。未来该塑料可用于包装、纺织品、医药、电子产品等领域。相关研究成果发表在《自然·化学》期刊上。

3）芬兰研究人员开发出可替代木结构中有害黏合剂的生态胶

2022 年 8 月，芬兰阿尔托大学(Aalto University)的研究人员开发出一种生物基黏合剂，其主要原料是木质素，可以替代木

结构中的含甲醛黏合剂。研究人员使用纯化的牛皮纸木质素制造黏合剂，该化学反应过程仅需几分钟且无须对原材料进行额外加热，有效降低了能耗。该黏合剂的木质素含量超过90%，具有强度高、无毒的特性，可用作阻燃剂保护表面免受火灾侵害，还可用作涂料和复合材料等的原材料。相关研究成果发表在《绿色化学》(Green Chemistry)期刊上。

3.日本研究人员开发出可自我修复的聚合物材料

2022 年 2 月，日本理化学研究所(RIKEN)的研究人员开发出一种坚固、有弹性、可自我修复的聚合物。研究人员开发了一种可控的催化方法，用于将非极性和极性烯烃单体组合成单一聚合物。研究人员证实，由乙烯和两种不同的官能化丙烯组成的三元共聚物，可以表现出良好的机械和自愈性能。该材料在断裂前可以拉伸到原始长度的近 14 倍，被切成两半后可在 5 分钟内自行愈合，并恢复 99%的韧性和 97%的拉伸强度。相关研究成果发表在《德国应用化学国际版》(Angewandte Chemie International Edition)期刊上。

2022 年 12 月，日本理化学研究所的研究人员使用普通异戊二烯和稀土催化剂制造出两种不同微观结构的聚异戊二烯的混合物，其中一种聚异戊二烯相对较硬，而另一种则较软，混合比例约为 7:3。研究人员将一块聚合物切成两半，再将两块材料压在一起 15 秒，然后将两块材料在室温下放置 1 分钟，愈合后的样本可以承受高达 2.5 千克的重量，并且不

会被撕裂。该材料在现实环境中遭受机械损坏时能够在没有任何外部输入的情况下自发修复，具有广泛的应用前景。相关研究成果发表在《德国应用化学国际版》期刊上。

4.美国研究人员开发出可提高二氧化碳捕集效率的聚合物膜技术

2022 年 4 月，美国北卡罗来纳州立大学(NCSU)的研究人员开发出一种新的聚合物膜技术，可以更有效地从混合气体（如电厂排放物）中去除二氧化碳。膜过滤器的工作原理是让二氧化碳比混合气体中的其他成分更快地通过膜，提高流出气体的二氧化碳浓度。膜的选择性越高，气体流过膜的速度就越慢（渗透性降低）。研究人员开发的高渗透性薄膜，在现有膜表面接枝既亲水又亲二氧化碳的化学活性聚合物链，在渗透性几乎没有变化的情况下将选择性提高 150 倍。相关研究成果发表在《科学》期刊上。

（四）复合材料

复合材料在航空航天、汽车、船舶、机械制造及医疗等领域发挥着重要作用，可部分替代传统材料。复合材料中以纤维增强材料的应用最为广泛，其特点是比重小、比强度大、比模量大，主要包括碳纤维、硼纤维、芳纶纤维、玻璃纤维及碳化硅纤维等。中国、美国、英国等科技强国将复合材料与生物技术相结合，开发出基于仿生生物技术的生物基复合材

料，拓展了复合材料的应用空间。同时，欧美国家对复合材料回收技术开展研究，解决报废复合材料难以循环利用的问题，加速复合材料的大规模商用。2022 年，复合材料领域取得的主要进展有以下几个方面。

1.主要国家开展对生物衍生复合材料及仿生复合材料的研究

1）美国研究人员开发出高有机晶体含量的植物衍生复合材料

2022 年 2 月，美国麻省理工学院(MIT)的研究人员设计了一种主要由纤维素纳米晶体(Cellulose Nanocrystals, CNC)和一些合成聚合物混合而成的复合材料，其中有机晶体约占材料的 60%～90%，是目前 CNC 占比最高的复合材料。在纳米尺度上，CNC 比凯夫拉更坚韧、更坚硬，可以大量加工成材料，或将成为制造更坚固、更可持续的天然塑料的途径。研究人员将合成聚合物溶液与市售的 CNC 粉末混合并确定了将溶液变成凝胶的 CNC 和聚合物的比例，其稠度既可以通过 3D 打印机的喷嘴送入，也可以倒入模具中进行浇注。该复合材料具备优良的机械性能，未来可部分代替石油基塑料。相关研究成果发表在《纤维素》(Cellulose)期刊上。

2）中国研究人员开发出基于氧化石墨烯的仿贝壳复合材料

2022 年 7 月，北京航空航天大学的研究人员受贝壳珍珠层内异相的无定形/结晶特征的启发，开发出一种基于氧化石墨烯(GO)的块状材料。该材料由氧化石墨烯、无定形/结晶叶状二

氧化锰(MnO2)六边形纳米片的构建块与基于聚合物的交联剂黏附在一起组成。研究人员将这些结构单元堆叠并热压，层与层之间进一步交联以形成层状 GO/MnO2(GML)块体材料。该材料不仅重量轻，还表现出足够的断裂韧性和较强的抗冲击性能，其弯曲强度为 231.2 兆帕。这一研究成果有助于新结构材料的设计，以及开发高性能氧化石墨烯基块体材料在航空航天、生物医学和电子领域的潜在应用。相关研究成果发表在《自然·材料》期刊上。

3）英国研究人员受帽贝启发开发出新型生物复合材料

2022 年 7 月，英国朴次茅斯大学(University of Portsmouth)的研究人员研究了帽贝(Limpet)牙齿材料并在原子水平上对其进行了分析，发现其抗拉强度高达 3～6.5 吉帕，远高于钢的拉伸强度。研究人员创建了一个系统用于模仿帽贝生长，将血清涂层玻璃、甲壳质和氧化铁沉积在顶部形成齿舌，再利用静电纺丝技术将分离的齿舌细胞、组织样本、矿化甲壳质合成出仿生帽贝牙齿材料。该新型生物复合材料具有极高强度，有望替代凯夫拉、塑料等材料。相关研究成果发表在《自然·通讯》期刊上。

4）美国研究人员开发出一种具有天然组织基本特征的生物混合复合材料

2022 年 7 月，美国康奈尔大学研究人员设计了一种具有天然组织基本特征的生物混合复合材料。该材料由赋予材料柔软

性和生物相容性的胶原蛋白及合成的两性离子水凝胶组成。两性离子水凝胶中的电荷基团与胶原蛋白中的正负电荷基团相互作用，使材料能够耗散能量并获得极高的韧性。该生物混合复合材料接近关节软骨和其他生物组织的性能，其弹性比合成前的两性离子材料高 40%，断裂能量（耐久性衡量标准）是两性离子材料的 11 倍。该材料非常适合进行生物打印，可作为 3D 打印材料。相关研究成果发表在《美国国家科学院院刊》上。

2.美国研究人员为电动汽车和航天器设计储能复合材料

2022 年 3 月，美国中佛罗里达大学(UCF)的研究人员开发出一种可作为储能超级电容器-电池混合装置的层状碳复合材料，并为电动汽车开发了一种动力套装，有助于提高车辆的动力容量。研究人员制造了带正电和负电的碳纤维层，并将其以交替模式堆叠和连接，形成了一种强大的储能复合材料。该复合材料轻便、坚固且可作为超级电容器，可应用于一系列需要轻量级电源的技术场景，如电动汽车、航天器、飞机、无人机、便携式设备和可穿戴技术等。相关研究成果发表在 Small 期刊上。

3.英国研究人员从复合压力罐中回收再生连续碳纤维

2022 年 5 月，英国国家复合材料中心(National Composites Centre, NCC)的研究人员与合作伙伴 B&M Longworth 和 Cygnet Texkimp 公司合作，实现了碳纤维的连续回收。研究

人员采用 B&M Longworth 公司的 DEECOM 工艺从报废复合材料压力罐中回收了连续碳纤维。该工艺利用加压过热蒸汽穿透复合材料聚合物中的微观裂缝，并在裂缝中冷凝。在减压时蒸汽沸腾并膨胀，使聚合物破裂并带走破碎的颗粒。该工艺可使主要部件材料完好无损，允许保留任何长度，回收的连续碳纤维可用于制造采用纤维缠绕的新压力容器。

4.俄罗斯研究人员合成新型超硬材料

2022 年 5 月，俄罗斯国家研究型技术大学的研究人员合成了一种由聚合的富勒烯分子组成、内部含有钪和碳原子的新型超硬材料 Sc2C2@C82。研究人员使用高频电弧放电等离子体从碳凝聚物中获得含钪富勒烯后，将其放置在金刚石砧座中，发现钪原子通过碳键的极化显著促进了富勒烯的聚合过程，在高压下生成高刚性材料。这种富勒烯基超硬材料可应用于光伏和光学器件、纳米电子和光电子元件、高性能造影剂等领域。相关研究成果发表在《碳》(Carbon)期刊上。

5.西班牙研究人员利用热场和磁场远程操纵复合材料移动和变形

2022 年 12 月，西班牙纳瓦拉公立大学(Universidad Pública de Navarra, UPNA)的研究人员利用热场和磁场远程操纵一种由热塑性塑料和铁粉制成的复合材料实现移动和变形，使该材料实现了“前所未有的控制程度”。研究人员使用光、热和磁铁对复合材料进行了多次远程操作，使复合材料实现移动、

旋转、弯曲、拉伸、收缩、分裂、融合、凸起、熔化或雕刻成图形及类似于盲文图案的凸点。该复合材料被归类为可编程物质，可以在空气、水中或生物组织内部进行远程操作，可用于生物医学设备、触觉显示器和物体操纵器的开发。相关研究成果发表在《科学报告》期刊上。

三、先进功能材料

功能材料是指通过光、电、磁、热、化学、生化等作用后具有特定功能的材料，主要包括先进信息材料、新能源材料、生物医用材料及节能环保材料等。近年来，形状记忆合金、电池材料、生物基功能材料等先进功能材料的制备工艺与产业化应用纷纷取得新进展，成为各国重点关注的研究领域。随着全球产业转型的不断深入，先进功能材料在信息、医疗、国防、环保、航空航天、交通运输等领域中的作用越发凸显，成为新材料领域的重要支柱之一。

（一）先进信息材料

信息材料是为实现信息探测、传输、存储、显示和处理等功能而使用的材料，可用于制造信息处理器、集成电路等电子元器件。随着 5G、人工智能、大数据等信息技术的发展，信息材料的技术迭代速度明显加快。二维材料、纳米材料、聚合物材料、硅光芯片、立方砷化硼等前沿新材料被用于信息

技术领域，替代了传统的硅基、镓基材料，改进了信息材料性能。2022 年，先进信息材料领域取得的主要进展有以下几个方面。

1.瑞典和美国研究人员利用二维材料 MXene 制造计算机组件

2022 年 1 月，瑞典皇家理工学院(KTH Royal Institute of Technology, KTH)和美国斯坦福大学的研究人员利用二维材料 MXene 制造计算机组件，使模拟人脑的计算机具有商业可行性。由二维碳化钛制成的电化学随机存取存储器(Electrochemical Random Access Memory, ECRAM)组件在补充经典晶体管技术方面显示出巨大的潜力，并有助于推动以大脑神经网络为模型的强大计算机的商业化。研究人员利用 MXene 制造 ECRAM 单元，结合了速度、线性度、写入噪声、开关能量和耐力指标。这些指标对于人工神经网络的并行加速至关重要，使便携式设备能够执行更繁重的计算任务。相关研究成果发表在《先进功能材料》期刊上。

2.澳大利亚研究人员开发出一种可用于电子设备的新型层状混合材料

2022 年 3 月，澳大利亚皇家墨尔本理工大学的研究人员将两种不同类型的二维铁电材料薄膜和磁性材料薄膜堆叠在一起，创造出一种提供增强特性的层状混合材料 In2Se3/Fe3GeTe2。该材料结合了铁电材料和铁磁材料的独特特性，可通过固有的铁电特性来调整其异质结构的肖特基势

垒高度(Schottky Barrier Height)，无须外部应变即可控制新堆叠结构的电子特性。该材料未来可用于存储器和电子设备，如电视、计算机和电话。相关研究成果发表在《纳米尺度》(Nanoscale)期刊上。

3.美国研究人员开发出可用于节能微芯片的新型超薄电容器

2022 年 6 月，美国劳伦斯·伯克利国家实验室(Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL)和加利福尼亚大学伯克利分校的研究人员开发出一种厚度仅为 25 纳米的钛酸钡(BaTiO3)薄膜，该薄膜用于代替硅材料制造微型电容器。研究人员采用脉冲激光沉积工艺，将紫外激光束发射到钛酸钡陶瓷靶材上，使材料转化为等离子体，再通过等离子体将原子从靶材传输到表面上以生长薄膜，最后将一层钛酸钡薄膜放置在两个金属层之间来制造微型电容器。未来研究人员计划进一步减小材料厚度，使新型超薄电容器与计算机中的真实设备兼容，并测试基于该电容器开发电子设备的可行性。相关研究成果发表在《自然·材料》期刊上。

4.英国研究人员开发出可制造更强大计算机芯片的纳米线组装工艺

2022 年 9 月，英国牛津大学(University of Oxford)的研究人员开发出一种以亚微米精度精确操纵和放置纳米线的技术，可用于开发更小、更强大的计算机芯片。研究人员使用聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)超细丝从生长衬底中拾取单根纳米线，

使细丝尖端与纳米线因范德华力作用而粘连，再将纳米线转移到安装在载玻片上的透明圆顶形聚二甲基硅氧烷基片(PDMS Stamp)上，并将该基片倒置与设备芯片对齐，最后将纳米线轻轻地印刷到表面上。研究人员使用该技术构建了一个光机械传感器。未来该技术可以实现完全自动化，用于制造高质量的纳米线集成芯片。相关研究成果发表在 Small 期刊上。

5.韩国研究人员利用液态金属粒子网络开发出可伸缩印刷电路板

2022 年 11 月，韩国科学技术院(Korea Advanced Institute of Science and Technology, KAIST)的研究人员开发出一种在聚合物中制造导电液态金属粒子网络的方法，并利用该方法制造出具有类似橡胶伸缩特性的可伸缩印刷电路板。研究人员利用超声波在高分子支撑体内组装液态金属粒子，使其在液态金属粒子/聚合物/液体金属粒子界面上形成导电网络，再将导电网络图案化在可拉伸聚合物基板上制成印刷电路板。该电路板具有低电阻和优异的机械性能，可抵抗外部物理冲击，甚至拉伸至原长度的 10 倍，其电阻也几乎没有变化。研究人员基于该电路板制造出可拉伸显示器和光学血流测量传感器，将进一步开发基于液态金属粒子组装网络的复合电极，促进可穿戴和植入式电子设备的研发和商业化。相关研究成果发表在《科学》期刊上。

（二）新能源材料

新能源材料是指实现新能源转化利用及新能源技术发展所用的材料，主要包括太阳能电池材料、动力电池材料、储氢材料、生物质能材料、核能材料、其他替代能源材料（风能、海洋能、地热能）等。当前，全球能源结构发生变化，主要国家纷纷布局净零低碳产业，太阳能、水能、生物质能、核能等可再生能源逐步替代传统的化石能源，推动新能源材料不断更新，涌现出诸多技术成果，如柔性钙钛矿太阳能电池和热光伏(Thermophotovoltaic, TPV)电池效率再创新高、钠离子电池有望实现产业化等。2022 年，新能源材料领域取得的主要进展有以下几个方面。

1.主要国家积极参与电池传输机制、材料改性等方面研究，提升电池效率

1）瑞士和韩国研究人员发现量子点使钙钛矿太阳能电池更稳定、更高效

2022 年 1 月，瑞士洛桑联邦理工学院和韩国能源研究所(Korea Institute of Energy Research, KIER)的研究人员在钙钛矿太阳能电池中添加了一层量子点，从而制备出性能更稳定的太阳能电池，电池效率接近创纪录的水平。研究人员使用由氧化锡制成的量子点作为设备的电子传输层，量子点提高了设备捕获光的能力，并减少了两层之间降低效率的效应。该钙钛矿太阳能电池的效率高达 25.7%，仅比目前太阳能电池

效率最高纪录低 0.1%。相关研究结果发表在《科学》期刊上。

2）美国研究人员开发出提升氢燃料电池阳极效率的氮掺杂碳涂层

2022 年 3 月，美国康奈尔大学的研究人员发现，氮掺杂碳涂层涂覆的镍阳极可以催化氢燃料电池中的基本反应，其成本大幅低于目前使用的贵金属。研究人员设计了一种由被氮掺杂碳外壳包围的实心镍核制造的镍基阳极，发现当该阳极材料与钴锰阴极配对时，其输出功率超过 200 毫瓦每平方厘米。氮掺杂碳涂层作为保护层可增强氢氧化反应动力学，使反应更快、更有效，可以加速氢燃料电池的广泛使用。相关研究成果发表在《美国国家科学院院刊》上。

3）澳大利亚研究人员开发出纳米涂层可延长锂电池使用寿命

2022 年 4 月，澳大利亚昆士兰大学的研究人员开发出一种新型纳米涂层，旨在延长锂电池的使用寿命，并降低废电池的环境危害。通常情况下，金属钴作为锂电池的正极材料存在价格昂贵、毒性强的缺点。为此，研究人员给锂电池的正极“加装”了一层原子厚度的新涂层。该涂层中加入了镍和镁材料，不仅坚固耐用，而且镍和镁价格便宜，释放的有毒物质也更少，可防止电池材料随时间推移而分解，大幅延长电池寿命。

4）韩国研究人员开发出可用于电解水制氢的新型异质结构

催化剂

2022 年 6 月，韩国中央大学(Chung-Ang University)的研究人员开发出一种新型异质结构催化剂，该催化剂由空心硫化钴(CoSx)和镍铁(NiFe)层状双氢氧化物(Layered Double Hydroxide, LDH)纳米片组成，可同时促进析氢反应(Hydrogen Evolution Reaction, HER)和析氧反应(Oxygen Evolution Reaction, OER)，可用于电解水制氢。研究人员以可控的方式将镍铁层状双氢氧化物纳米片电化学沉积在由镍泡沫支撑的空心硫化钴纳米阵列的表面上。使用该催化剂制造的电解槽在低电池电压下表现出 300 毫安每平方厘米的高电流密度和 100 小时的整体水分解耐久性，表明该催化剂在工业规模水分解应用中的可行性。相关研究成果发表在 Small 期刊上。

5）沙特阿拉伯研究人员发现添加金属氟化物可提高太阳能电池的性能

2022 年 7 月，沙特阿拉伯阿卜杜拉国王科技大学(KAUST)研究人员发现，在多层钙钛矿-硅串联太阳能电池中插入金属氟化物层可以阻止电荷复合并提高电池性能。当阳光照射钙钛矿电池时，产生的电子对和带正电的空穴会在钙钛矿和电子传输层之间的界面重新结合，降低了串联电池的性能。这一问题虽然可通过在钙钛矿和电子传输层之间引入氟化锂层（包含电子受体富勒烯）来部分解决，但锂盐很容易液化并通过表面扩散造成设备不稳定。研究人员用氟化镁作为串联

电池界面的中间层材料，在添加富勒烯和顶部接触组件之前热蒸发钙钛矿层上的金属氟化物，形成厚度可控的超薄均匀薄膜。串联太阳能电池改造后的开路电流电压增加了 50 毫伏，稳定功率转换效率为 29.3%。相关研究成果发表在《科学》期刊上。

6）中美研究人员开发出高性能钾长石太阳能电池

2022 年 10 月，中国科学院、中国南京邮电大学、中国复旦大学和美国华盛顿大学的研究人员通过低温退火技术提升了钾长石(Cu2ZnSnS4, CZTS)/硫化镉(CdS)界面的性能，制造出效率达到 13%的太阳能电池。钾长石是一种具有独特晶格结构的硫化物矿物，该矿物及其衍生物 Cu2ZnSnS4/Cu2ZnSnSe4(CZTSSe)的毒性较小且在自然界中含量丰富，可用于制造低成本、可持续的太阳能电池。测试结果表明，研究人员采用低温退火技术显著提高了钾长石太阳能电池器件的开路电压和填充因子，使电池在小面积（0.11 平方厘米）上实现了 12.96%的认证效率，在大面积（1.1 平方厘米）上实现了 11.7%的效率。研究人员计划研发吸收膜更均匀的钾长石/硫化镉界面，用于制造性能更好的钾长石太阳能电池。相关研究成果发表在《自然 •能源》(Nature Energy)期刊上。

2.主要国家开发出多种新型电池材料及生产技术

1）中国研究人员开发出用于燃料电池的新型二茂铁阴离子

交换膜

2022 年 3 月，中国天津大学的研究人员开发出基于二茂铁材料的新型阴离子交换膜(Anion Exchange Membrane, AEM)。研究人员发现一些含铁的材料可以提高燃料电池的稳定性。新型二茂铁基阴离子交换膜具有磁场定向和导电结构，且具有强大的耐用性，在电流密度 500 毫安每平方厘米、温度 120 摄氏度及 40%的相对湿度下，500 小时内的电压损失为 3.9%，高频电阻增加了 2.2%。未来，这种新型阴离子交换膜可用于开发稳定、耐用和高性能的燃料电池，为电池在高温下长时间运行提供支持。相关研究成果发表在《自然·能源》期刊上。

2）俄罗斯研究人员开发出一种快速充电电池阳极材料

2022 年 6 月，俄罗斯斯科尔科沃科技学院的研究人员开发出一种新的快速充电电池阳极材料 NiBTA，并揭示了该材料的电荷存储机制。NiBTA 是一种衍生自苯四胺的镍基配位聚合物，具有高容量、可快速充放电、高循环稳定性及可与多种阳离子结合的特性。研究人员采用 X 射线衍射和拉曼光谱法跟踪电池内部的结构变化，探索 NiBTA 在锂基、钠基和钾基电池中的行为。研究发现，NiBTA 可作为一种安全快速充电锂离子（钠离子、钾离子）电池阳极材料。相关研究成果发表在《化学科学》(Chemical Science)期刊上。

3）韩国研究人员开发出具有更高倍率性能和稳定性的高容

量锂金属电池

2022 年 8 月，韩国电工技术研究院(KERI)下一代电池研究中心的研究人员开发出具有更高倍率性能和稳定性的高容量锂金属电池。研究人员合成出具有空心核的一维锂限制多孔碳结构，并在空心核中添加了少量具有锂亲和力的金纳米粒子，再利用金优先与锂反应的特性来控制锂的生长方向，从而诱导锂在核内沉积。锂金属电池使用金属锂作为负极，由于金属锂的理论容量（3860 毫安时每克）是石墨（372 毫安时每克）的 10 倍，因此锂金属电池比锂离子电池的容量更高。研究人员在外壳中引入了许多纳米级的孔隙，使电池在 5 毫安每平方厘米的大电流测试条件下未产生锂枝晶，显著提高了电池的库仑效率。测试结果表明，研究人员利用具有大规模生产优势的静电纺丝技术合成的锂主体在 4C 倍率的高电流密度（82.5%的容量保持率）下表现出超过 500 次循环的优异循环性能，具有实用前景。相关研究成果发表在《美国化学学会-纳米》期刊上。

4）美国研究人员开发出一种用于锂离子电池的无钴阴极材料

2022 年 9 月，美国加利福尼亚大学尔湾分校(University of California, Irvine)、布鲁克海文国家实验室(BNL)等机构的研究人员开发出一种不含钴的锂离子电池阴极材料 HE-LMNO。锂离子电池中的钴阴极在高压下会释放氧气导致电池损坏，而

其常见替代品镍基阴极也存在耐热性差等问题，容易导致电池材料氧化、热失控甚至爆炸。研究人员使用高熵掺杂技术制造出一种含有镁、钛、锰、钼、铌的无钴层状阴极材料，使阴极在反复充放电循环中仍具有极高的耐热性和稳定性。研究人员通过同步加速 X 射线衍射、透射电子显微镜和 3D 纳米断层成像仪器对该材料进行观察分析。分析结果表明，该材料具有高热稳定性和零体积变化特性，可显著提高电池的容量保持率和循环寿命，未来可用于开发高容量锂离子电池。相关研究成果发表在《自然》期刊上。

5）中美研究人员开发出用于钠金属电池的准固体电解质

2022 年 10 月，中国合肥工业大学和美国得克萨斯大学奥斯汀分校的研究人员通过原位聚合工艺，制备了一种用于钠金属电池的聚（1，3-二氧戊环）(PDOL)基准固体电解质，并证明了氟代碳酸亚乙酯(FEC)对形成稳定的固体电解质界面(SEI)和防止界面副反应的关键作用。固态电池具有高安全性和高能量密度的特点，但全固态电池存在固-固界面接触差、离子电导率低等缺点，阻碍了其商业应用。研究人员采用原位聚合法制备了 PDOL-FEC 准固体电解质，并将其成功应用于钠金属电池，有效提高了电池的整体性能。相关研究成果发表在《能源化学期刊》(Journal of Energy Chemistry)上。

6）韩国研究人员开发出具有较强大气稳定性的固体电解质材料

2022 年 12 月，韩国大邱庆北科学技术院（Daegu Gyeongbuk Institute of Science&Technology，DGIST）的研究人员开发出具有较强大气稳定性的固体电解质材料。锂离子电池被广泛用作电子产品和电动汽车的储能系统，但由于其主要由易燃的有机液体电解质制成，存在安全隐患。替代液体电解质的氧化物基固体电解质暴露在大气中会在表面形成碳酸锂并渗透到电解质内部，降低固体电解质的锂离子电导率。研究人员在纯锂镧锆氧化物(LLZO)电解质中加入镓和钽，使其在空气中长时间存放或反复进行锂电沉积/脱附的情况下也能保持性能稳定。相关研究成果发表在《储能材料》(Energy Storage Materials)期刊上。

3.澳大利亚研究人员使用建筑设计和结构工程方法改进储能材料

2022 年 2 月，澳大利亚新南威尔士大学(The University of New South Wales, UNSW)的研究人员使用受控建筑设计和结构工程方法来改进储能材料，使其同时具有高功率和高能量密度，以便用于便携式设备中的电化学存储。研究人员通过在泡沫镍基材上制造出 12 纳米薄的富含缺陷的氧化铈二维纳米薄片，对过渡金属氧化物进行了结构修改。研究人员使用 Sirius 加速器将钼的低能离子(Mo 6+)注入二维材料中产生电子，促进电荷转移，提高整体导电性。钼离子注入和还原工艺大幅提高了材料的比电容和电容保持率。相关研究成果发表在

《ACS 应用材料与界面》(ACS Applied Materials and Interfaces)期刊上。

4.瑞典研究人员开发出制造五氧化二铌薄膜储能材料的方法

2022 年 9 月，瑞典于默奥大学(Umeå University)的研究人员开发出一种从含有纳米级聚氧铌酸盐的水溶液中生产固体材料（金属氧化物薄膜）的方法。聚氧铌酸盐可作为分子结构单元用于设计电化学储能材料。研究人员使用微波辐射合成聚氧铌酸盐，采用旋涂法沉积制备五氧化二铌薄膜。当该薄膜被加热到 200～1200 摄氏度时，可以获得具有不同耐腐蚀性能和电化学性能的表面。五氧化二铌晶体结构具有独特的原子排列方式，形成供锂离子进行十万次以上储存和释放循环的通道，有望作为超级电容器取代典型的锂离子电池。

（三）生物医用材料

生物医用材料是研究组织培养、医疗器械、生物医药等领域的物质基础，是新材料领域的重要分支。近年来，制药、酶工程、基因编辑、器官移植、脑机接口等前沿生物技术呈现突飞猛进的发展态势，生物医用材料进入快速发展期，广泛应用于组织修复、药物输送、智能可穿戴设备等应用场景。2022 年，生物医用材料领域取得的主要进展有以下几个方面。

1.发达国家加快研发促进骨骼、关节、肌肉等生物组织修复的材料

1）美国研究人员开发出可生物降解压电材料，有助于膝关节软骨再生

2022 年 1 月，美国康涅狄格大学的研究人员开发出由聚乳酸(PLLA)的纳米纤维制成的组织支架。该聚乳酸组织支架具有类似支架的三维内部结构，可以作为相邻细胞迁移和繁殖的“栖息地”，逐渐溶解后被细胞完全取代，形成一块固体生物组织，加速骨折愈合。聚乳酸聚合物不仅具有生物相容性，还是一种压电材料，在行走等活动中受到挤压时不断产生促进软骨再生的电流，且不含任何可能导致不良副作用的化学生长因子。

2）日本研究人员开发出坚韧的超弹性金属合金生物材料

2022 年 5 月，日本东北大学(Tohoku University)的研究人员开发出一种钴铬基生物材料。该材料可以模仿人体骨骼的柔韧性并具有出色的耐磨性，可用作髋关节或膝关节置换物及骨板等植入物。研究人员开发的钴铬铝硅(Co-Cr-Al-Si, CCAS)合金的杨氏模量为 10～30 吉帕，与人体骨骼相近，同时具有较高的耐磨性、耐腐蚀性和弹性，其应变恢复率高达 17%，是商用钛镍形状记忆合金的两倍。相关研究成果发表在《先进材料》期刊上。

3）美国研究人员开发出用于柔性人造肌肉的耐用材料

2022 年 7 月，美国加利福尼亚大学洛杉矶分校(UCLA)和非营利性科学研究机构 SRI International 的研究人员开发出一种

新的耐用材料及其制造工艺，用于制造比生物肌肉更强壮、更灵活的人造肌肉。研究人员采用紫外线光固化工艺创造了一种改进的丙烯酸基材料，使材料更柔韧、可调节且更易于扩展，且不会失去其强度和耐用性。研究人员调整了聚合物链之间的交联，制造出 35 微米厚的高性能介电弹性体薄膜，将多层薄膜堆叠在一起时可作为微型电动机，可以像肌肉组织一样发挥作用，同时产生足够的能量来为小型运动执行器提供动力。未来该材料可用于软体机器人、具有触觉的新型可穿戴设备、触觉技术等领域。相关研究成果发表在《科学》期刊上。

4）新加坡研究人员开发出可加速伤口愈合的新型纳米纤维材料

2022 年 11 月，新加坡南洋理工大学(NTU)的研究人员开发出一种可加速伤口愈合过程的新型纳米纤维复合敷料。研究人员使用了聚己内酯(PCL)和明胶作为基本成分，采用静电纺丝方法制造 PCL/明胶纤维，再将可与皮肤相容的天然聚合物（ε-聚赖氨酸）掺入到纤维支架中，以起到抗感染和增强皮肤细胞运动性的作用，并可防止细菌在受伤部位繁殖。此外，为了进一步提高支架的机械强度、坚固性和耐用性，研究人员使用多巴胺盐酸盐将纤维支架交联，调整纤维排列，提高了敷料的拉伸强度并赋予其亲水性，使敷料可以吸收伤口渗出的液体，促进细胞生长、增殖和迁移。相关研究成果发表

在《先进纤维材料》(Advanced Fiber Materials)上。

2.瑞典研究人员开发出利用电信号捕获和释放生物分子的材料

2022 年 6 月，瑞典查尔姆斯理工大学的研究人员开发出一种利用电信号捕获和释放生物分子的材料。该材料是一种聚合物表面，在电脉冲下会改变从捕获到释放生物分子的状态，可利用电信号来控制生物分子与聚合物表面的结合和释放方式，同时不影响蛋白质的结构。该材料还可在具有缓冲能力的生物流体中起作用，可作为电子药片和药物植入物，将药物送入所需组织或器官中，再通过远程控制信号激活药物，将其释放出来。相关研究成果发表在《德国应用化学》期刊上。

3.日本研究人员基于天然蜘蛛丝的特性开发出生物基纤维

2022 年 6 月，日本信州大学的研究人员研究了天然蜘蛛丝的细胞黏附行为，旨在为促进蜘蛛丝在医学领域的应用提供支持。通过重组蛋白表达系统和化学合成生产的蜘蛛丝已被证明具有医疗应用潜力，可防止血栓形成，并具有出色的结节强度(Knot Strength)以承受重复加载和卸载。研究人员将三种天然蜘蛛丝分别卷绕在纤维、薄膜和纳米纤维（无纺布）上，发现细胞黏附行为很大程度上受表面微（纳）米结构的影响，未来基于天然蜘蛛丝开发出的生物基纤维有望应用于医疗领域。相关研究成果发表在《朗缪尔》(Langmuir)期刊上。

4.美国研究人员开发出用于 3D 打印可穿戴设备的新型生物材料

2022 年 8 月，美国得克萨斯农工大学(TAMU)的研究人员开发出一种可模仿人体组织的新型生物材料。研究人员将新型二维纳米材料二硫化钼(MoS2)与改性明胶结合后获得柔韧、具有化学活性的水凝胶生物材料。研究人员使用该生物材料创建复杂的 3D 电路，并可根据患者的具体要求 3D 打印出可拉伸、具有电活性的可穿戴电子设备以监测患者的运动指标。相关研究成果发表在《ACS 纳米》期刊上。

5.美国研究人员开发出模拟生物结构特性的“智能塑料”

2022 年 10 月，美国得克萨斯大学奥斯汀分校的研究人员受到树木、贝类等生物的启发，开发出一种结合了强度和柔韧性的智能塑料。传统合成材料模拟皮肤和肌肉等生物结构的特性时，材料通常会失效，在不同材料之间的接合处发生分裂和撕裂。研究人员使用了一种双催化剂系统，在黑暗区域形成柔软、富有弹性的顺式聚环辛烯，但在光照区域形成坚硬的反式聚环辛烯。新材料的韧性是天然橡胶的 10 倍，可用于更灵活的电子产品、医疗设备和机器人领域。相关研究成果发表在《科学》期刊上。

（四）节能环保材料

节能环保材料是指应用于节能环保产业的相关材料，主要用

于能源转化、污染物去除、节能减排、保温隔热等领域。近年来，工业领域节能环保技术不断进步，对于节能环保材料的需求进一步提升。2022 年，节能环保材料领域取得的主要进展有以下几个方面。

1.主要国家开发出多种催化剂，可促进能源转化、废物回收及碳捕获过程

1）韩国研究人员开发出从沼气中生产乙烯的催化剂

2022 年 3 月，韩国科学技术研究院(KIST)的研究人员开发出从厨余垃圾、污水污泥等产生的沼气（主要成分为甲烷）中生产乙烯并脱除有毒物质硫化氢的催化剂。该催化剂对硫化氢有很强的抵抗力，因此不需要预先从沼气中去除硫化氢，且将乙烯工业生产温度从 800 摄氏度降低到 700 摄氏度。研究人员还将进一步改进该催化剂，使其可利用塑料等各种废物产生的甲烷生产乙烯。相关研究成果发表在《应用催化 B：环境》(Applied Catalysis B: Environmental)期刊上。

2）日本研究人员开发出将二氧化碳转化为甲酸的铁基催化剂

2022 年 5 月，日本东京工业大学的研究人员开发出一种可有效将二氧化碳转化为甲酸（选择性约为 90%）的铁基催化剂。研究人员开发出一个由吸光底物（钌基光敏剂）和 α -铁（Ⅲ）羟基氧化物催化剂（一种氧化铝负载的铁基催化剂）组成的光催化系统，可以利用阳光将二氧化碳转化为甲酸，减少二

氧化碳排放。该系统在可见光下对主要产物甲酸的选择性为80%～90%，量子产率为 4.3%。相关研究成果发表在《德国应用化学》期刊上。

3）澳大利亚研究人员开发出液态铂催化剂

2022 年 6 月，澳大利亚新南威尔士大学和皇家墨尔本理工大学的研究人员使用微量的液态铂作为催化剂，在低温下产生廉价且高效的化学反应，从而为关键行业的大幅减排开辟了新途径。研究人员将铂与液态镓结合在一起（镓的熔点仅为29.8 摄氏度），仅需在反应初始阶段保持 300 摄氏度的高温条件，铂即可溶解在镓中以形成催化系统，催化系统形成后无须再次加热。相较于固态铂催化系统，该液态催化系统具有更高的效率（仅需 0.01%的铂即可工作，固态系统约为 10%）和可靠性（液态不会堵塞系统），且无须保持高温反应条件，可大幅降低能源成本并减少排放。相关研究成果发表在《自然·化学》期刊上。4）俄罗斯研究人员开发出用于二氧化碳处理的工业钴镍催化剂

2022 年 9 月，俄罗斯国家研究型技术大学、莫斯科罗蒙诺索夫国家大学(Lomonosov Moscow State University)、泽林斯基有机化学研究所(Zelinsky Institute of Organic Chemistry)的研究人员开发出一种新的简化方法，制备用于处理二氧化碳的工业钴镍催化剂。该催化剂是一种具有多孔表面和纳米级晶粒的块状合金，可形成泡沫状高活性颗粒，多孔结构和钴镍

的协同作用使其与二氧化碳分子的相互作用更强烈并且具有高活性。该催化剂由金属合金组成，与陶瓷载体相比具有更高的导热性，提高了长期使用过程中的稳定性，且制备工艺无须经过熔化、喷涂、清洁、在结构形成载体上应用活性成分等阶段，显著降低了催化剂生产和使用中的能源成本。相关研究成果发表在《材料》(Materials)期刊上。

5）中国研究人员开发出新型超稳定制氢催化剂

2022 年 12 月，中国香港城市大学的研究人员开发出一种基于二维矿物凝胶纳米片的新型超稳定析氢反应电催化剂。该催化剂可以实现大规模生产且不含任何贵金属，有助于降低氢气价格。研究人员先将多金属氧酸盐(PMo)和铁离子(Fe 3+)的溶液在室温下混合形成新型二维铁-磷钼酸纳米片，再通过离心技术去除多余的水形成不含任何有机分子的矿物水凝胶，最后进行磷化处理（500 摄氏度），形成单铁原子分散的多相纳米片催化剂。实验结果表明，该催化剂表现出优异的电催化活性和长期耐久性，在 10 毫安每平方厘米时过电位仅为 38.5 毫伏，且在 200 毫安每平方厘米下使用超过 600 小时性能未下降。该催化剂表现出比商业铂基电催化剂更好的电催化性能，且成本低于贵金属催化剂，具有良好的商业前景。相关研究成果发表在《科学・进展》期刊上。

2.美国研究人员发现沸石可能有助于抑制甲烷排放

2022 年 1 月，美国麻省理工学院的研究人员提出一种使用沸

石来控制甲烷排放并将其从空气中去除的方法。研究人员发现，用少量铜处理的沸石可有效从空气中吸收甲烷，即使在极低浓度下也可进行。催化反应过程在大约 300 摄氏度时达到峰值效率，低于其他甲烷捕获过程所需的温度，且还可以在极低的甲烷浓度(1%)下工作。相关研究成果发表在 ACS Environment Au 期刊上。

3.德国研究人员开发出稳定、高效、环保的蓄热材料

2022 年 3 月，德国马丁路德·哈勒-维腾贝格大学(Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, MLU)和莱比锡大学的研究人员开发出一种有助于显著提高建筑物能源效率的新型蓄热材料。该材料通过将其物理状态从固态变为液态来吸收大量热量，而当材料变硬时，储存的热量会重新释放。在适当的条件下，该材料加热后可比传统的混凝土或墙板每 10 摄氏度多储存 24 倍的热量。相关研究成果发表在《储能期刊》(Journal of Energy Storage)上。

4.中国研究人员制备出轻质超柔韧陶瓷气凝胶隔热材料

2022 年 6 月，中国哈尔滨工业大学的研究人员制备出一种轻质超柔韧陶瓷气凝胶材料。该材料的可恢复压缩应变高达 95%，兼具优异的拉伸（断裂应变大于 40%）和弯曲（弯曲应变大于 90%）变形能力，且在 1 万次高频剧烈热震（约 200 摄氏度每秒）及长时高温（大于 1000 摄氏度）有氧暴露环境下的强度损失及体积收缩几乎为零。研究人员创新地提出

“气体湍流”辅助静电纺丝直接制备三维纳米纤维陶瓷气凝胶的方法，采用半晶质(Hypocrystalline)陶瓷材料结合 zig-zag 宏观结构设计，赋予陶瓷气凝胶近零泊松比(3.3×10-4)和近零热膨胀系数（1.2×10-7 每摄氏度）的“双零”反常规物理性质，实现了轻质超柔韧、高热稳定性及超高温隔热等特性。该制备方法为实现材料的多尺度超结构设计、高性能、大规模及低成本制备提供了新思路。相关研究成果发表在《自然》期刊上。

5.美国研究人员开发出可去除水中染料的聚合物

2022 年 8 月，美国北卡罗来纳州立大学(NCSU)的研究人员开发出可以从水中去除某些染料的合成聚合物，并使该聚合物可以回收和重复使用。研究人员制造出合成聚合物——聚碳二亚胺，并将其溶解在溶剂中，再将其与被染料污染的水混合来测试该聚合物清洁废水的能力。测试结果表明，该聚合物溶液可以从受污染的水中去除染料，回收后可再次使用。该聚合物为处理纺织品、化妆品或其他行业排放的废水提供了一种新的潜在方法。相关研究成果发表在《ACS 应用聚合物材料》(ACS Applied Polymer Materials)期刊上。

6.韩国研究人员开发出能够净化水的多孔聚合物环保材料

2022 年 12 月，韩国大邱庆北科学技术院的研究人员开发出一种非典型多孔聚合物材料，利用该材料可以去除水中99.9%以上的酚类微塑料，还可以基于光热效应去除非常小

的挥发性有机化合物(VOC)。研究人员合成了具有优异吸附性能和光热性能的多孔聚合物，并通过额外的氧化反应引入了亲水性官能团，使该材料能够快速吸附水生环境中的微污染物。此外，研究人员利用该材料广泛吸收光并将吸收的光转化为热量，从而制造出一种能够利用太阳能作为驱动力蒸发水的水处理膜，并进一步验证了涂有氧化聚合物的水处理膜可以通过阳光净化酚类污染物。未来有望利用该材料在没有电力供应的地区净化受污染的水。相关研究成果发表在《先进材料》期刊上。

四、前沿新材料

前沿新材料主要包括智能与仿生材料、石墨烯及类石墨烯等二维材料、超材料、纳米材料等新型材料。近年来，前沿新材料与 5G、量子计算、机器人、智能可穿戴设备、医疗器械及智能服装等新兴产业深度融合，跨学科领域的新技术、新材料不断涌现，前沿新材料技术加速突破。科技强国将人工智能技术融入前沿新材料的研发和实验过程，可从海量数据库中迅速找到因果关系并筛选出可能的成分配比方案，再经过机器学习框架模拟实验过程，得出最优方案，极大缩短了新材料研发周期。

（一）二维材料

二维材料包括石墨烯、氮化硼、二硫化钼、二硫化钨、二硒化钼及 MXene 材料等种类，由于材料中的电子仅可在二维纳米尺度(1～100nm)上自由运动（平面运动），因此其具有特殊的电学、热学、光学和力学等性能。二维材料带隙可调的特性及其电学和光学特性的各向异性，在场效应管、光电器件、热电器件、仿生器件和偏振光探测等领域有较大的发展潜力。2022 年，二维材料领域取得的主要进展有以下几个方面。

1.石墨烯成为各主要国家研究热点

1）美国研究人员发现“魔角”石墨烯可同时具备超导性和铁磁性

2022 年 1 月，美国布朗大学的研究人员表明，通过诱发自旋轨道耦合，“魔角”石墨烯(“Magic-Angle”Graphene)可成为一种强大的铁磁体。研究人员将“魔角”石墨烯与二硒化钨块结合，对齐堆栈精确地诱导石墨烯中的自旋轨道耦合。实验表明，在存在外部磁场的情况下，沿一个方向流过材料的电流会产生霍尔效应，可以通过外部磁场控制“魔角”石墨烯的磁性，使其成为磁存储设备的理想候选材料。研究人员正致力于利用“魔角”石墨烯原子界面同时实现稳定超导性和铁磁性，未来可将该材料应用于量子计算机。相关研究成果发表在《科学》期刊上。

2）英国研究人员发现石墨烯可替代有机发光二极管中使用的稀有金属

2022 年 1 月，英国伦敦玛丽女王大学(Queen Mary University of London)和 Paragraf 公司的研究人员利用单层石墨烯阳极成功制造了有机发光二极管(OLED)，取代了 OLED 中的氧化铟锡(ITO)。研究人员已经证明石墨烯 OLED 与氧化铟锡 OLED 具有相同的性能。这项研究由 Innovate UK 资助，去除了 OLED 中的限制性成分铟，扩展了未来高科技设备的材料来源。相关研究成果发表在《先进光学材料》(Advanced Optical Materials)期刊上。

3）美国研究人员创造出γ-石墨炔材料

2022 年 5 月，美国科罗拉多大学博尔德分校的研究人员创造出一种导电性近似于石墨烯的γ-石墨炔(γ-Graphyne)材料。研究人员通过炔基取代(Alkynyl-substituted)苯单体的可逆动态炔烃，易位合成了周期性的 sp-sp 2 杂化碳同素异形体γ-石墨炔。同时，研究人员使用两种不同的六炔基取代(Hexa-Alkynyl-Substituted)苯作为共聚单体来生成晶体γ-石墨炔，实现了动力学和热力学控制之间的平衡。研究人员将继续探索石墨炔材料的电子传导、机械和光学特性。相关研究成果发表在《自然·合成》(Nature Synthesis)期刊上。

4）美国研究人员开发出将石油焦转化为石墨烯的新方法

2022 年 6 月，美国得克萨斯农工大学(TAMU)和埃克森美孚公

司的研究人员开发出一种方法，可将石油焦（炼油原油的副产品）再加工成可持续的石墨烯材料。研究人员将焦炭放入带有工作电极和对电极的电解质溶液中，并对工作电极施加电压，使来自电解质的离子迁移到石墨烯片之间，当焦炭膨胀时，石墨烯就会分离。这种由焦炭制成的石墨烯的电导率为 50 西门子每米，而典型的锂离子电池的电导率约为 150～160 西门子每米。未来研究人员将通过退火工艺进一步提高石墨烯的导电性，使其与锂离子电池中的电极相媲美。相关研究成果发表在《二维材料与应用》(npj 2D Materials and Applications)期刊上。

2.美国研究人员制备出一种比钢更坚固的新型二维轻质材料

2022 年 2 月，美国麻省理工学院的研究人员使用新聚合工艺，制备出一种比钢更坚固、像塑料一样轻且易于大量制造的二维轻质材料。研究人员通过一种新的聚合工艺生成聚芳酰胺二维片材，其密度只有钢的六分之一，但屈服强度是钢的两倍。该材料是一种二维聚合物，可以自组装成薄片，未来可用作汽车零件或手机的轻质耐用涂层，也可以用作桥梁或其他结构的建筑材料。相关研究成果发表在《自然》期刊上。

3.国际研究团队开发出一种可检测水中抗生素的新型强弹性二维纳米膜

2022 年 8 月，由芬兰坦佩雷大学(University of Tampere)、芬兰阿尔托大学、印度马德拉斯理工学院(Indian Institute of

Technology Madras)、德国萨尔大学(Saarland University)的研究人员组成的国际研究团队，开发出一种新型强弹性二维纳米膜，可用于检测水中的抗生素残留物。研究人员使用对巯基苯甲酸配体包裹的银纳米簇在空气-溶剂界面的瞬态溶剂层中自组装形成大面积新型二维纳米膜。该纳米膜可用于可穿戴电子产品和显示器中的柔性晶体管及存储设备，还可用于检测水中的抗生素。未来研究人员将专注于使膜制造方法适应其他类型的纳米粒子，以此制造柔性存储设备和智能电子皮肤应用的组件。相关研究成果发表在 Small 期刊上。

4.瑞士研究人员利用机器学习预测金属有机框架的热容量

2022 年 10 月，瑞士洛桑联邦理工学院的研究人员开发了一个机器学习模型，可以预测金属有机框架(Metal-Organic Frameworks, MOFs)的热容量。该模型可以预测局部化学环境如何改变 MOFs 分子中每个原子的振动。研究人员选取 200 个关于原子振动的数据点，再通过 200 次计算，获得 40000 个数据点来训练模型，模型预测的热容量与实验数据相吻合。研究人员模拟碳捕获工厂中 MOFs 的性能，在过程模拟中使用了量子分子模拟、机器学习和化学工程，结果表明使用正确的 MOFs 热容值可降低碳捕获过程的总体能源成本。相关研究成果发表在《自然·材料》期刊上。

（二）智能材料

智能材料是继天然材料、合成高分子材料、人工设计材料之后的第四代材料，是新材料技术发展的重要方向之一。智能材料实现了结构功能化、功能多样化，具有传感功能、反馈功能、信息识别与积累功能、响应功能、自诊断能力、自修复能力和自适应能力等功能。2022 年，智能材料领域取得的主要进展有以下几个方面。

1.中国研究人员开发出一种可以模仿海洋软体动物伪装能力的材料

2022 年 1 月，中国东南大学的研究人员开发出一种可以模仿海洋软体动物伪装能力的材料，并创造了一个海星形状的软机器人。该机器人可以通过变形、运动和颜色变化来响应热和压力。研究人员选择了一种可在不同温度下发生相变的液晶弹性体，加热时弹性体的取向液晶分子失去有序性，导致材料部分收缩，利用这种收缩效应使软机器人能够“爬行”。研究人员还在材料中集成了一种连接聚合物链的分子染料，在加热和加压过程中，黄色染料分子会变成红色。这种具有热和机械变色特性的仿生软材料可应用于仿生机器人、传感器和人工伪装等领域。相关研究成果发表在《德国应用化学》期刊上。

2.奥地利研究人员开发出可探测微生物的智能皮肤

2022 年 6 月，奥地利格拉茨技术大学的研究人员开发出一种

三合一混合材料——智能皮肤。该材料每平方毫米包含 2000 个独立传感器，其灵敏度是真实皮肤的 1000 倍，能探测触觉、温度、水分甚至微生物，有助于促进灵敏机器人和智能假肢的研发。研究人员将压电氧化锌(ZnO)和以水凝胶形式存在的智能聚合物结合成核-壳纳米结构，由此制造的传感器可对力、湿度和温度进行快速响应。研究人员正在优化该材料的特性，扩大材料反应的温度范围，提高其柔韧性。相关研究成果发表在《先进材料技术》(Advanced Materials Technologies)期刊上。

3.美国研究人员开发出一种纳米结构水凝胶纤维材料

2022 年 6 月，美国宾夕法尼亚州立大学的研究人员受肌肉结构的启发，开发出一种自组装的纳米结构水凝胶材料，并将其制成纤维。这种纤维材料在水合时可以拉伸到原始长度的数倍，且在拉伸状态下干燥后会硬化并锁定拉伸的形状，再次加水或加热后可以恢复到原始长度。研究人员开发了一个两步工艺，利用水凝胶纤维材料制造模拟肌肉纤维结构的纤维执行器。该执行器具有更好的效率、致动应变和机械性能，未来可应用于机器人、假肢、智能服装等领域。相关研究成果发表在《自然 •纳米技术》(Nature Nanotechnology)期刊上。

4.日本研究人员开发出可以响应温度变化的织物

2022 年 10 月，日本信州大学的研究人员开发出一种由超细纳米线编织而成、可以响应温度变化的织物，该织物可以根

据穿着者需要实现加热和冷却功能。该材料的核心是含有一种相变材料(PCM)，当材料从液态变为固态时，可以储存和释放大量热量。研究人员采用同轴静电纺丝的方法，将 PCM 封装在电纺纳米纤维的中心，再将 PCM 纳米线与增强热调节精度及范围的电热传导涂层和光响应材料相结合，实现各个组件之间的协同合作，并可根据各种环境温度变化按需进行热调节。研究人员将继续改善织物的相变特性，开发实用的可穿戴应用设备。相关研究成果发表在《ACS 纳米》期刊上。

（三）超材料

超材料是一类具有特殊性质的人造材料，涉及众多学科领域，是全球最前沿、最具有战略意义的研究课题之一。超材料体现了材料设计思想的重大创新，实现了全新的物理现象，具有重大的军用、民用价值，广泛应用于信息技术、国防工业、航空航天、新能源、光电子学及灾难预警等领域。2022 年，超材料领域取得的主要进展有以下几个方面。

1.美国研究人员开发出由“纳米纤维垫”制成的轻质装甲材料

2022 年 2 月，美国威斯康星大学麦迪逊分校(University of Wisconsin-Madison)的研究人员开发出一种被称为纳米纤维垫(Nanofiber Mat)的新型超轻装甲材料。研究人员首先合成了凯夫拉纳米纤维，再将少量凯夫拉纳米纤维掺入由碳纳米

管组成的“垫子”中，通过调节两者之间的比例，使纤维之间产生氢键。微弹冲击测试结果表明，这种新型材料比凯夫拉织物和钢板更能抵御高速冲击且重量更轻。相关研究成果发表在《ACS 纳米》期刊上。

2.中德研究人员开发出基于齿轮的机械超材料

2022 年 7 月，中国国防科技大学、中国香港理工大学和德国卡尔斯鲁厄理工学院(KIT)的研究人员开发出一系列基于齿轮的机械超材料。研究人员将太极齿轮(Taiji Gears)和行星齿轮以矩阵的形式彼此相邻地固定在面板上，其中太极齿轮几乎是二维的并具有独特的弯曲中心，可允许使用不同的方向，而行星齿轮也是二维的但具有多孔中心，可允许压缩载荷。研究人员通过改变所用齿轮的尺寸和配置方式能够制造出多种具有不同弹性度的片材，实现不同的柔韧性、拉伸或弯曲性能。未来该材料可用于制造机器部件、机器人附肢等。相关研究成果发表在《自然·材料》期刊上。

3.中国研究人员开发出可在极端温度下保持性能的聚合物气凝胶材料

2022 年 7 月，中国四川大学的研究人员开发出能够在极端温度下保持其功能性和超弹性的新型聚合物气凝胶材料。该聚合物气凝胶可在零下 196 到零上 500 摄氏度的温度范围内发挥作用，制造工艺可扩展且实用。气凝胶材料作为许多领域所需的防护材料发挥着至关重要的作用，如 5G 技术的电磁

干扰屏蔽材料、高层建筑的隔热材料和军事应用的红外隐身材料。研究人员利用双向取向的碳气凝胶复合多壁碳纳米管，开发出所需微结构的可扩展制备方法。该材料将在 5G、高层建筑、军事等方面发挥作用。相关研究成果发表在《纳米研究》(Nano Research)期刊上。

4.韩国研究人员开发出可自愈的透明保护涂层材料

2022 年 8 月，韩国化学技术研究所(Korea Research Institute of Chemical Technology, KRICT)的研究人员开发出一种可自愈的透明保护涂层材料。研究人员在可以吸收近红外光的透明有机光热染料中添加了一种动态化学键（受阻脲键），该化学键可以重复聚合物结构的分解和重组，将其与透明的光热染料混合，可在阳光照射下主动诱导动态化学键合。测试结果表明，当模型车暴露在正午的阳光下约 30 分钟时，涂层材料表面划痕完全消失。未来，该材料可用作交通运输、电子设备及建筑材料的涂层材料。相关研究成果发表在《ACS 应用聚合物材料》期刊上。

5.韩国研究人员开发出具有超高折射率的超材料

2022 年 9 月，韩国浦项科技大学(Pohang University of Science and Technology, POSTECH)的研究人员开发出一种具有超高折射率的超材料，以及将超材料与聚合物结合的反射器。研究人员通过组装球形金纳米粒子，开发出一种以纳米级间隙均匀排列的超材料。该材料最大限度地提高了光与物质的相互

作用，在可见光和近红外区域记录了最高的折射率。研究人员将该材料和低折射率聚合物层堆叠制成分布式布拉格反射器(Distributed Bragg Reflector, DBR)，该反射器可强烈反射特定波长。相关研究成果发表在《先进材料》期刊上。

6.英国研究人员开发出基于蛋白质的新型减震材料

2022 年 12 月，英国肯特大学(University of Kent)的研究人员开发出一种基于蛋白质的新型减震材料 TSAM。该材料可吸收超声速射弹冲击，可用于开发下一代防弹装甲和弹丸捕获材料。目前的防弹衣由陶瓷面和纤维增强复合材料组成，笨重且无法阻挡可能导致装甲后方钝伤的冲击。研究人员发现，talin 蛋白分子包含一系列二元开关结构域，可在张力下打开并在张力下降后再次折叠，具有减震特性，将 talin 蛋白聚合成 TSAM 后展现出优异的减震特性。测试结果表明，TSAM 可经受 1.5 千米每秒的超声速射弹撞击，不仅可以吸收玄武岩颗粒（直径约 60 微米）和较大铝弹片的冲击，还可以在受到冲击后捕获这些弹丸。该材料可用于制造新型装甲或作为能量耗散材料来有效收集空间碎片、空间尘埃和微流星体，在国防和航空航天领域具有巨大应用前景。

第六章 世界智能制造技术发展报告

随着新一代信息通信、生物、新材料、新能源等技术的迅猛发展，及其与先进制造技术的加速融合，制造业智能化迎来了历史机遇。同时，全球科技和产业竞争更趋激烈，世界主要国家纷纷将智能制造作为稳定产业链的主要举措和大国战略博弈的重要抓手，以此抢占全球制造业新一轮竞争制高点。2022 年，智能制造技术推动产业技术变革和优化升级，助力工业 4.0 发展。更多工厂紧扣智能特征，以数据为基础，建设一批智能制造创新载体和公共服务平台，推动制造业实现数字化转型、网络化协同、智能化变革。数字孪生、深度学习、增材制造等新兴技术越来越多地应用于智能制造中，推动制造业向着高效、灵活、低成本的方向发展。

一、世界智能制造技术及产业发展重要动向

2022 年，世界主要国家纷纷出台与智能制造相关的战略规划与发展技术，将智能制造作为推动本国制造业转型升级的关键力量和解决技术工人短缺、制造业地点分散的有效措施。在智能制造技术发展方面，人工智能技术、自动化技术、网络技术、现代传感技术与先进制造产业的深度融合提升了复杂产品的制造能力；云计算、大数据、数字孪生等多样化数

字化解决方案的开发与实践加速制造业数字化、智能化转型；大型企业新建智能工厂投入运行，全球“灯塔工厂”持续增加。

（一）主要国家智能制造技术发展政策举措

2022 年世界多国提出重点发展智能制造业战略发展规划，涌现出离散型智能制造、流程型智能制造、网络协同制造、大规模个性化定制、远程运维服务等新模式、新业态。力求通过系统创新和多场景、全链条、多层次推广应用，在制造业转型升级中抢占新一轮工业革命的“风口”。

1.美国多措并举推动智能制造相关技术及产业发展

推出国家先进制造业战略，明确未来 4 年智能制造发展重点。2022 年 10 月，美国白宫发布《国家先进制造业战略》(National Strategy for Advanced Manufacturing)。该战略报告延续了特朗普政府提出的先进制造技术、劳动力、供应链三大战略目标，并明确了未来 4 年推动国家制造业发展的 11 项战略子目标及 37 项详细建议。其中，智能制造仍被列为战略子目标之一。战略针对“引领智能制造未来”目标，提出以下建议：一是推进数字化制造，实现先进传感、机器学习和数字孪生等技术在制造业中的应用，并制定数据兼容标准；二是通过数据访问和保密研发、生产数据货币化、知识产权利益平衡等，加速人工智能在制造业中的应用；三是通过安全高

效的人机交互，实现以人为本的技术应用原则；四是重视制造业网络安全。

发布新版战略投资规划，提出全新的数字技术战略。2022 年 4 月，美国数字制造创新机构(Manufacturing times Digital, MxD)发布《2022—2024 年战略投资规划》(2022-2024 Strategic Investment Plan)，首次提出数字技术战略，主要包括数字工业技术、网络安全、数字现代化政府、劳动力发展四大战略。数字工业技术战略方面，明确以市场为导向，促进整个美国工业基础采用数字工业技术；网络安全战略方面，基于国防部对所有项目强制实施网络安全成熟度模型认证，要推出实用网络安全解决方案和评估或自评估工具；数字现代化政府战略方面，要优先考虑美国国防战略的核心要素和国防现代化优先事项，在面对来自中国和其他国家日益激烈的经济和技术竞争时保持技术优势。

多机构联合成立智能制造执行委员会，加速智能制造落地实施。2022 年 10 月，美国清洁能源智能制造创新机构(Clean Energy Smart Manufacturing Innovation Institute, CESMII)和制造工程师协会(Society of Manufacturing Engineers, SME)正式成立智能制造执行委员会(Smart Manufacturing Executive Council)，旨在吸引倡导美国制造业生态系统转型的商业和技术高管、思想领袖，加速智能制造在美国的发展应用。该委员会将重点关注以下方面：一是构建生态系统，通过工厂与

企业的供应链互联，实现实时数据驱动的业务协调；二是加速数字化系统平台的升级换代，实现互操作性，以消除数据孤岛、烟囱式架构等问题；三是结合教育、培训和持续改进战略，培养具备加速智能制造和创建数据驱动文化所需的技能人才。

启动增材制造促进计划。2022 年 5 月，美国拜登政府启动《增材制造促进计划》(AM Forward)，这是美国设立国家增材制造创新机构 10 年后，针对增材制造发展的进一步刺激计划，旨在通过推动增材制造技术的应用来提高本国中小企业的竞争力，创造和维持高薪制造业工作岗位，增强供应链韧性。该计划包括 3 项关键目标：一是通过投资和扶持中小型制造企业，打造更具韧性和创新性的供应链；二是发展未来产业，克服限制增材制造技术应用的挑战；三是加强对区域制造业生态系统的投资，支持在美国本土进行更多的发明和制造。

2.德国提出新的数字化战略，加大人工智能、6G 技术的研发投入

2022 年 8 月，德国提出新的《数字化战略》(Digital Strategy)，指出全面建立互联、可持续的数据文化将成为未来几年德国科研领域的关键任务，具体包括：“国家研究数据基础设施”数据库建设；欧洲云计划盖亚-X 和数据空间的互联互通；加强科研领域数据资助计划；扩大超级计算中心的数字化基础设施，提高数据加工能力等。在人工智能领域，德国政府决

定每年资助柏林学习与数据基础研究所(BIFOLD-Berlin Institute for the Foundations of Learning and Data)、慕尼黑机器学习中心(MCML-Munich Center for Machine Learning)等 5 个人工智能能力中心各 5000 万欧元，以确保德国在人工智能领域的技术主权。欧洲高性能计算联合体决定在德国于利希研究中心(Jülich Research Centre)建造欧洲第一台百亿亿级超级计算机，德国政府将为这台超级计算机提供 5 亿欧元的资助。德国也成立了 6G 研发行业联盟，29 家企业和研究机构将研究 6G 技术的潜力，到 2025 年，德国 6G 研究计划将共获得 7 亿欧元的资金。

3.英国提出新的数字化战略，旨在巩固其科技大国地位

2022 年 6 月，英国政府发布新版《数字战略》，旨在使英国成为全球开展数字创新的最佳地点，巩固英国作为全球科技超级大国的地位。战略明确了 6 大支柱：数字基础、创意和知识产权、数字技能和人才、资金、提升数字化水平、提高英国国际地位。在人工智能方面，英国国防部 2022 年 6 月发布《国防人工智能战略》，旨在通过新兴技术的使用和创新支持创建新的国防人工智能中心，力争实现英国到 2030 年成为科技超级大国的雄心。2022 年 12 月，英国政府称将投资 1.1 亿英镑用于研发包括 6G 在内的下一代技术的计划，以增强英国在电信研究领域的领先地位。

4.日本积极布局人工智能、6G 技术，促进人工智能与制造业

融合

2022 年 4 月，日本政府发布《人工智能战略 2022》(Artificial Intelligence Strategy 2022)，作为指导其未来人工智能(AI)技术发展的宏观战略，明确了 4 大战略目标：构建符合时代需求的人才培养体系，培养 AI 时代各类人才；运用 AI 技术强化产业竞争力，使日本成为全球产业的领跑者；确立一体化的 AI 技术体系，实现多样性、可持续发展的社会；发挥引领作用，构建国际化的 AI 研究教育、社会基础网络。

2022 年 4 月，日本 6G 标准推进组织——Beyond 5G 促进联盟公布了日本向国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)提交的 6G(Beyond 5G)技术愿景需求草案，对 15 个垂直行业细分应用场景及其对 6G 技术指标的要求进行了细致阐述。该草案显示，日本在 6G 技术标准方面开展了充分和扎实的基础研究，对于后续技术标准研发和提前培育 6G 应用具有促进作用。日本围绕 6G 发展目标，在国内扩大自身技术优势，促进政产学研用合作，同时加强与国际合作，加快技术发展和产业布局。

5.韩国大力推进智能机器人计划，明确国家战略技术培育方案

2022 年 3 月，韩国产业通商资源部(Ministry of Trade, Industry and Energy)审议通过了《2022 年智能机器人实行计划》(Implementation Plan for Intelligent Robots 2022)。韩国政府拟

通过该计划对工业和服务机器人进行持续投资，并放宽限制打造促进机器人产业发展的环境。该计划指出，2022 年韩政府将投入 2440 亿韩元（约合 1.97 亿美元）开展工业及服务机器人研发和普及，较 2021 年增长 10%。

2022 年 10 月，韩国政府发布《国家战略技术培育方案》(National Strategic Technology Nurture Plan)，明确 12 项国家战略技术，具体包括半导体和显示器、二次电池、高科技出行、新一代核能、高科技生物、宇宙太空及海洋、氢能源、网络安全、人工智能、新一代通信、高科技机器人和其制造技术、量子技术。方案还提出了将在这些领域着力推进的 50 项重点技术。预算方面，韩政府将把相应技术的研发投资额从 2022 年的 3.74 万亿韩元（约合 30 亿美元）增加至 4.12 万亿韩元（约合 33 亿美元），并拟在 2023 年的预算中为系统半导体、小型模块化反应堆、5G 开放式无线接入网络、量子计算与传感器等技术研发划拨 2651 亿韩元（约合 2.15 亿美元）。

6.印度发布增材制造国家战略，旨在成为增材制造的全球创新中心

2022 年 2 月，印度电子和信息技术部(Ministry of Electronics and Information Technology, MeitY)发布《增材制造国家战略》(National Strategy on Additive Manufacturing)，旨在到 2025 年将印度增材制造市场份额提高到全球市场的 5%。印度政府

表示，该战略体现了印度制造(Make in India)计划和自力更生的印度(Atma Nirbhar Bharat Abhiyan)的原则，这些原则提倡和促进通过技术创新和转型实现自力更生，旨在从未来的增长机会中激发最大的经济利益，同时最大限度地降低风险。通过该战略，印度政府希望实现将印度定位为增材制造开发和部署的全球中心、将印度定位为增材制造的全球创新和研究中心和创建和保护印度AM知识产权的完整性等7项目标。

7.对中国的影响与启示

美国政府和创新机构通过出台制造业战略、扶持计划、成立制造业委员会等措施，加速推进美国智能制造产业发展；英国、德国提出新的数字化战略；日本、韩国、印度等国也在加紧人工智能、机器人、6G、增材制造等技术领域布局，这些举措对中国智能制造发展规划及未来技术方向布局具有借鉴意义。一是要从国家层面继续抓好《“十四五”智能制造发展规划》的贯彻落实，同时，根据竞争环境变化健全完善和动态调整。二是要以工艺、装备为核心，以数据为基础，加快攻克基础技术、先进工艺技术、共性技术及人工智能等在工业领域的适用关键技术，突破生产过程数据集成和跨平台、跨领域业务互联，跨企业信息交互和协同优化，以及仿真优化等系统集成技术，积极构建智能装备系统技术平台。三是要深化推广应用，建设更多智能制造示范工厂，培育更多专精特新“小巨人”，开辟企业转型升级新路径、新模式，

壮大制造业新优势。四是要聚焦航空发动机和燃气轮机、医疗影像设备、重型机床、油气装备等具有重要战略作用和巨大经济带动潜力的关键装备领域，持续开展以高技术性、高可靠性、高附加值为核心的高端智能再制造，促进高端智能制造产业不断发展壮大。五是要加强国际合作，参与构建国际标准体系，提升在智能制造领域的国际话语权。

（二）人工智能技术与先进制造业深入融合

人工智能在制造业的融合应用是促进实体经济发展的重点方向，是制造业数字化、网络化、智能化转型发展的关键。根据 Martkets and Markets 机构 2022 年 4 月发布的数据显示，2022 年人工智能制造业市场规模预计为 23 亿美元，2022—2027 全球年复合增长率高达 47%，预计 2027 年将达到 163 亿美元。2022 年，人工智能技术与先进制造业融合继续深入，在提升产品质量、提高制造车间管控能力等方面取得诸多新成果。

1.人工智能技术助力提升复杂产品制造效率和质量

2022 年 1 月，美国阿贡国家实验室与通用电气全球研发中心(GE Global Research)、爱迪生焊接研究所(Edison Welding Institute)、GKN 航空航天公司(GKN Aerospace)合作，针对喷气式飞机零部件焊接需求，开发出 Deep Hyper 机器学习算法，利用基于机器学习的预测模型智能化优选搅拌摩擦焊工艺

参数。通过该算法，研究人员可使用各种焊接条件和参数的训练数据集，对大量可能的输入信息进行即时分析和排序，确定哪种输入信息组合可以产出最优的零件，减少实验成本，缩短模拟过程，实现飞机零部件高效高质量焊接。

2022 年 4 月，美国佛罗里达州立大学(Florida State University, FSU)研究人员通过开发机器学习算法构建模型帮助预测 3D 打印过程可能发生的缺陷，并利用云数据进行参数调整补偿来减少可能产生的缺陷。该技术可以减少测试数量，提高 3D 打印结构件质量控制优化效率，特别适用于定制化产品的大规模生产。

2022 年 5 月，美国《陆军小企业创新研究计划》(Army Small Business Innovation Research Program)提出，将人工智能/机器学习技术与弹药装药在线监控系统相结合，用于识别弹药含能材料装填物的缺陷（裂纹、空隙、异物或化学试剂泄漏等），提高弹药装药质量一致性。该项目将开发一种可扩展的高精度视觉处理控制系统，对从子弹底火、小口径弹药到 155 毫米大口径火炮炮弹等各类型的含能材料装填物进行高清晰成像。将人工智能与视觉处理系统相结合，能够有效识别弹药装药过程中存在的各类缺陷，及时从生产流程中剔除缺陷产品，减少在交付使用后发生事故的风险。

2022 年 8 月，英国剑桥大学开发出一种基于多头神经网络的通用 3D 打印缺陷检测与控制方法，可以自动实时检测和纠

正多种不同零件、材料和系统的 3D 打印缺陷，比人工更高效、更可靠，可有效提升零部件质量控制水平。

2022 年 10 月，美国橡树岭国家实验室(ORNL)采用生成对抗网络机器学习方法，创建了真实的 X 射线计算机断层扫描训练数据，用于检测 3D 打印金属部件。该方法将成像时间缩短至原来的六分之一，小缺陷检测准确性提高 4 倍以上，3D 打印样品分析时间由 6～8 周缩短至 1 天，有效降低了时间、人力和能源成本，提高了准确性。

2.人工智能技术辅助制造车间提升管控能力

2022 年 5 月，美国 SymphonyAI 工业公司推出嵌入人工智能算法的 MOM360 制造运营管理解决方案。该解决方案预先构建了大量代码库，包含数千个流程、数百个连接器和制造运营管理应用程序，具有集成制造执行系统、企业级治理和基于人工智能的流程优化等功能，可减少用户编程，实现企业规模的数据驱动流程优化，帮助企业实现工业 4.0 智能制造目标。

2022 年 9 月，美国航空航天零部件制造商 Kanfit 公司，采用 Plataine 公司的基于人工智能与工业物联网的软件解决方案，优化了原材料跟踪、管理和规划，减少了浪费和生产延迟，提高了复合材料结构件产能。Plataine 公司的人工智能软件解决方案与 Kanfit 公司现有 ERP 系统可以无缝集成，充分考虑了物料齐套的复杂性，在材料利用率和简化物料齐套之间

找到了最佳平衡点，自动创建并优化复合材料生产计划，将材料利用率提高了 3%。借助 Plataine 公司的时间敏感材料管理解决方案，材料信息从工厂的传感器自动收集，并在整个制造过程中进行自动记录，操作人员可以准确跟踪材料位置和状况，以及材料在各个生产领域的剩余保质期，防止使用过期的材料。

2022 年 9 月，美国 SymphonyAI 工业公司提出两款新的基于人工智能的流程和性能软件解决方案，使用下一代预测智能帮助制造商提高从单台设备到装配线工艺的准确性和效率，提高制造产量和质量。第一款为工艺性能和优化解决方案 Batch 360，通过人工智能驱动的多元模型，分析所有可用的制造数据，提供可实操方案，提升各生产批次的质量，降低生产成本。第二款为计算机视觉解决方案 Vision 360，将基于图像的人工智能与深度学习模型相结合，借助图形处理器计算、分析视觉数据流、检测异常、提供趋势预测等功能，制造商可以根据预测数据优化产品产量和质量。这两款解决方案应用范围广泛，既适用于离散制造业，也适用于流程工业。

2022 年 11 月，宝马集团率先在中国部署了代号为“灯塔”的人工智能平台，提供 AI 应用创新相关的开发、部署、集成与运行服务的平台化环境，加速实现多业务场景数字化。“灯塔”平台目前包括人工智能算法、计算机视觉、对象识别、

自然语言等主要技术模块，融合了人工智能和工业物联网的优势，让人工智能赋能多个技术应用层，为企业的生产和运营配置“超级大脑”，有效地解决传统人工智能散点应用面临的门槛高、成本高、效率低等问题。“灯塔”平台还具有强大的通用性和可扩展性，如为某些生产场景开发的自然语言处理算法，有可能用于支持车内语音识别产品的开发，甚至会用来开发公司内部视频会议的人工智能字幕生成程序。“灯塔”平台还将加入更多的技术模块，其中区块链、量子计算、多模态融合已成为端到端重点关注的技术方向。

3.对中国的影响与启示

当前，人工智能技术与制造领域的融合愈加深入，对制造业整体发展的支撑效应显现，形成了一系列融合创新的新技术、新产品和新模式。但当前产业界对人工智能的融合应用大多数还处于探索阶段，在技术架构、实施路径、行业标准及产业生态等方面均存在一定的发展瓶颈，多数企业仍处于观望状态，距全行业普及应用还有较大距离。

中国推进人工智能与制造业的融合发展尚需政府和产业界多方发力。一是要培育产业发展环境。政府和行业协会需要通过培育解决方案服务机构、开展试点示范等方式，在轻量化设计、工艺优化、质量提升、运行维护等当前人工智能已经涉足的领域培养一批成熟的解决方案。二是通过合作的方式加快推进构建行业标准。产业界需要通过组织联盟等形式

开展多方合作，面向各工业分类的人工智能应用对数据采集、应用部署等方面的需求，联合制定机器设备、工控系统、工业互联网平台的标准化数据接口及应用参考架构，确保支撑人工智能应用的工业数据能快速有效地得到应用。三是要加强人才队伍建设。针对系统开发、现场操作、管理规划等不同层面的需求，分类型、分等级推进人工智能阶梯形人才队伍的培育，加强企业员工的再培训。

（三）数字化解决方案开发与实践加速推动制造业数字化转型

全球制造业顺应新一轮科技革命和产业变革趋势，推行数字化转型，不断深化云计算、大数据、物联网、人工智能等新一代信息技术应用，激发数据要素创新驱动潜能，为智能制造的顺利实施奠定坚实基础。2022 年，世界主要国家推出适用于制造业的云计算、大数据、数字孪生等多样化数字化解决方案，对于加速复杂产品设计、制造、维修保障等各阶段的数字化转型发挥重要作用。此外，美军方开始依托数字孪生技术向全面的数字工程迈进，数字工程技术开始在复杂装备建设中取得应用实效。

1.大数据技术与云平台结合应用，提升制造车间管理效率

2022 年 5 月，谷歌云推出制造数据引擎和制造连接两种新的解决方案，使制造商能够连接孤立的资产、工艺流程和标准

化数据，提高数据从工厂车间到云端的可见性。制造数据引擎是一个端到端解决方案，可以在谷歌云数据平台上存储、关联、处理工厂数据，为工厂数据的采集、转换、存储和访问提供一个可配置和可定制的蓝图。制造连接是一个工厂边缘平台，包含 250 多个机器协议的数据库，可以快速连接到任何制造资产和工业系统，将数据传输到谷歌云。一旦数据通过制造数据引擎和制造连接进行集中和协调后，可以用于实现制造过程分析和洞察、预测性维护和机器异常检测等基于人工智能的制造场景分析。

2022 年 6 月，奥迪(Audi)汽车公司推出全新本地服务器解决方案——边缘云智能制造(Edge Cloud 4 Production)，重新定义自动化技术在汽车产业制造应用范式，使生产流程更安全、维护成本更低。该解决方案在奥迪生产实验室测试成功后，将在奥迪运动产品生产基地 Böllinger Höfe 工厂进行量产试点，3 台本地服务器将替代人工负责工厂调度。若服务器基础设施持续稳定运行，奥迪将在大众汽车集团推广这项创新的自动化技术，用于未来大规模生产。

2022 年 8 月，以色列初创公司 Run：AI 发布首个能够管控人工智能工作负载的混合云软件解决方案——Atlas 平台。该平台支持混合云和多云人工智能基础设施，通过集中监控和控制面板提供一致的用户体验，可以管理在不同位置（包括本地或云中）运行的资源。借助该平台，用户可以轻松利用多

云战略的优势，避免意外停机、提高计算可用性。

2022 年 11 月，美国罗克韦尔自动化公司(Rockwell Automation)依托边缘应用生态系统，推出智能边缘管理和协调平台——FactoryTalk Edge。该平台基于零信任安全和行业开放标准，旨在加速工业客户的数字化转型，具有以下特点：支持随时随地访问；可以通过一个单一管理平台来管理边缘设备和应用部署；能灵活应对复杂情况，满足各个硬件或云供应商的需求。平台搭载的 FactoryTalk Edge Gateway 边缘应用程序使客户能够将工业数据快速融入应用场景并打包到灵活的信息模型中，可有效解决数字化转型中存在的应用延迟、设备管理等方面的问题。

2022 年 11 月，罗克韦尔自动化公司和 Cognite 公司合作创建了一个从设备边缘到云端的工业数据中心，使用云计算扩展数据来提高工厂效率。该数据中心主要是将罗克韦尔公司的 FactoryTalk 软件与 Cognite 公司的工业 DataOps 平台结合起来，创建一个更容易进行数据扩展的系统。该系统可连接所有公司资产，并将设备的原始数据转化为对工厂流程有用的数据。通过正确使用原始数据和云技术，该系统有望提高公司工作流程的安全性和效率，改善运营效能。

2022 年 12 月，德国 ISRA VISION 公司推出 Cloud Xperience 创新平台，将云计算的优势与智能分析工具结合在一起，把数据存储在云端，可以对生产过程和检测系统状态进行持续监

控。该平台具有自学习、基于人工智能的聚类和缺陷分类功能，可以在云端收集、保存、排序和自动分类图像文件。平台提供了一个位置和系统相互独立的环境，可以在其中访问和编辑关键流程数据。平台还提供了大量软件工具，用于持续监控过程和检查系统状态。利用该平台，企业可显著缩短检测系统设计时间、简化设计过程，显著缩短生产调试时间。

2.根据不同制造场景需求推出各具特色的数字孪生解决方案

2022 年 3 月，加拿大西斯班船厂(Seaspan)开发出一种具备数字孪生功能的沉浸式可视化平台 HoloShip，可通过虚拟现实环境进行舰船开发、集成与测试，有望改变现有的舰船建造与维护模式。通过显示屏宽达 5.6 米的可视化平台，工程师、生产人员和用户都能够虚拟体验舰船的三维数字模型，并与 3D 舰船模型中的设备、系统、子系统、组件等进行交互，对各种用途和场景进行评估和评价，也可通过远程网络访问该平台。西斯班船厂将率先利用该平台进行加拿大皇家海军和海岸警卫队非战斗船只的研发生产，提升加拿大造船业数字化水平。

2022 年 6 月，法国施耐德电气公司(Schneider Electric SA)推出 EcoStruxure 机器专家数字孪生软件，作为可扩展的数字孪生软件解决方案，用于机器设备的全生命周期管理。该软件可帮助原始设备制造商在机器制造前创建机器的数字模型并开展虚拟设计与调试，还可帮助原始设备制造商改善机器设

计流程和质量，实现调试成本最低化，更快地将产品推向市场，规避故障风险，助力打造真正适用的机器，将运维灵活性及效率提升至全新的水平。利用该软件可将调试时间缩短60%，生产周期缩短 50%，生产成本节省 20%。

2022 年 6 月，英国原子能管理局(UKAEA)通过曼彻斯特大学(The University of Manchester)的一个评估项目，研究采用基于英伟达(Nvidia Corporation)Omniverse 模拟平台打造功能齐全的发电厂数字孪生模型，加速设计建造一个核聚变发电厂。Omniverse 平台可连接所有工具和应用，使从事发电厂设计的工程师能够使用统一的数据来源，借助人工智能、百万兆级 GPU 计算和精确的模拟软件，辅助构建能够准确反映所有发电厂的组件、等离子体及控制和维护系统的数字孪生模型，加速发电厂的设计建造。除了用于设计、操作和控制发电厂之外，传感器可以向 Omniverse 数字孪生模型实时传输数据，保持虚拟的数字孪生与发电厂的真实状态同步，通过在虚拟的数字孪生中进行测试并对真实发电厂作出调整，不断优化发电厂运营。

2022 年 10 月，美国 Altair 公司推出一款全面的、不受供应商限制的开放式数字孪生解决方案，具有强大的连接及跨职能的能力，可部署在产品全生命周期的各个阶段。在研发阶段，Altair 公司可提供“按指定要求”设计的数字孪生工具集，涵盖系统要求、开发、验证、实际性能预测、简化的机电一

体化产品开发等各个方面，使研发团队能够在统一的环境下实现多物理场仿真与先进的高性能计算、人工智能和数据分析的融合。在生产阶段，Altair 公司可提供“按实际要求”和“按生产要求”设计的数字孪生工具集，能够帮助团队对现实和非预期事件进行仿真，改善可操作性和操作窗口，并在交互式环境及实际环境中生成高保真的创新展示成果。在使用维护阶段，Altair 公司可提供“按可持续性要求”设计的数字孪生工具集，实现在服役产品的预测性分析和预测性维护。用户能够灵活地在本地、云端、混合环境或即插即用式环境中运行 Altair 数字孪生解决方案，可通过一种极具成本效益、基于点数的许可模式(Altair Unit)，从丰富全面的工具组合中自由选择工具。3.数字工程技术在复杂装备研制各阶段应用取得实效

提升复杂装备研制效率。2022 年 4 月，美国空军首架生产型 T-7A“红鹰”高级教练机正式下线。T-7A 由波音公司和瑞典萨博公司(Saab Automobile AB)联合研制，是美国空军首架采用基于模型的系统工程、3D 建模等数字工程技术设计的飞机，从项目启动到首飞仅耗时 36 个月。2022 年 4 月，诺斯罗普·格鲁曼公司(Northrop Grumman)指出正在采用数字工程、开放式体系架构等技术进行“灰狼”巡航导弹的设计，以满足武器系统生产成本降低 80%～90%的目标。诺斯洛普·格鲁曼公司构建了“灰狼”巡航导弹数字工程模型，并基于数字化

多学科设计、分析与优化技术对“灰狼”进行设计优化，与美国空军签订合同后仅用 10 个月就完成了系统最终设计审查。

变革复杂装备研发生产模式。2022 年 9 月，美国雷神技术公司(Raytheon Technologies Corporation)导弹与防御业务部正采用数字工程技术改变美国海军 SPY-6 舰载雷达的研发和生产模式。该业务部构建了贯穿雷达从设计、部署、训练、维修、维护等整个产品周期的数字线索；开发出先进可视化软件，可帮助技术人员对产品及产品部件、系统及分系统细节进行图像渲染；利用沉浸式虚拟设计中心进行 SPY-6 雷达的协同研发；利用集成了大量数字技术的“互联工厂”提高雷达生产效率；利用云计算架构，采用敏捷软件开发方法和 DevSecOps 等新兴软件开发模式促进雷达探测软件不断更新迭代。SPY-6 雷达是为美国海军研制的新型舰载有源相控阵雷达，能够同时探测、识别海空威胁目标，作用距离更远、响应速度更快。

保障复杂装备预测性维护。2022 年 2 月，围绕美国陆军“下一代战车”项目对地面车辆维修维护的需求，美国制造科学国家中心(The National Center for Manufacturing Sciences)联合微软公司启动“利用基于云的数字工程工具改进军用车辆预测性维修”项目，旨在利用安全的云平台推动地面车辆智能化预测性维修。该项目将使用人工智能、数字线索、大数

据分析、物联网等数字工程技术，构建车辆三维模型及实际工作环境的三维模型，并模拟仿真真实工况，使士兵通过可视化平台直观观察车辆在运行过程中关键零部件的变化，提升士兵快速分析车辆状态、进行更快更明智决策的能力，缩短车辆停车检修时间，降低维修维护成本，提升部队的战备能力。

4.对中国的影响与启示

世界主要国家均将数字化转型作为制造业提质增效和创新发展的重要途径。目前，全球制造业数字化已取得一定成就，美欧等国均作出布局规划，但在工业大数据、云平台、数字孪生和数字工程等数字化解决方案的价值创造过程中仍面临许多困难。

中国制造业应抓住转型机遇，探索出数字科技与工业制造知识融合的新路径，实现制造业“由大变强”的历史性跨越。政府和制造企业要多方发力，一是政府要制定相关研发计划、提供资金支持，搭建创新协作平台，构建良好的数字化解决方案开发环境，加速相关软件平台的开发，摆脱依赖进口局面，并制定配套的扶持计划，加速其成熟及推广应用。二是推动数字孪生、人工智能、边缘计算、大数据、区块链、虚拟现实、增强现实、混合现实等新技术在制造环节的应用；支持企业开展装备联网、关键工序数控化、业务系统云化等改造，推进中国企业数字化转型。三是制造企业在具体实施

过程中，要深刻认识到数字化转型是一把手工程，领导者要成为数字转型的策划者、组织者和实施者；要结合业务实际，开发或优选制造工厂/车间数字化管控方案，建立大数据管理平台，建立提升数据质量的制度和流程，推动“场景—车间—工厂—供应链”的智能化改造，探索智能制造最佳实践的示范路径。

此外，传感器作为物理世界和数字世界信息传递的桥梁和增强数字化竞争力的关键产品，在推进中国智能制造建设中具有极为重要的作用。目前，中国很多领域传感器核心部件和高端感测芯片严重依赖进口，要加快智能制造建设，在传感器领域就必须突破一批“卡脖子”基础零部件和装置。其中，要重点研发微纳米位移传感器、柔性触觉传感器、高分辨率视觉传感器、成分在线检测仪器、先进控制器、高性能高可靠减速器、可穿戴人机交互设备、智能数控系统等。在微机电系统(Microelectro Mechanical Systems, MEMS)传感器领域，要重点突破硅基 MEMS 加工、MEMS 与互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)工艺集成、非硅模块化集成等技术，围绕智能终端、高端装备等重点领域应用传感器需求，持续推进智能传感器配套软件算法、芯片材料、先进封装、高性能电池等关键技术攻关。

（四）智能工厂建设稳步推进

作为智能制造重要载体的智能工厂建设需求持续扩大。根据Markets and Markets 在 2022 年 9 月发布的数据，2022 年全球智能工厂市场规模预计达到 862 亿美元，2022—2027 全球智能工厂年复合增长率达到 10.3%，2027 年将达到 1409 亿美元。2022 年，全球“灯塔工厂”持续增加，中国数量最多，多家大型企业新建的智能工厂开始投入运行，智能制造解决方案提供商推出功能更为丰富的智能制造系统平台。

1.全球“灯塔工厂”持续增加，中国数量最多

2022 年 3 月和 10 月，世界经济论坛(World Economic Forum)发布两期全球制造业领域“灯塔工厂”名单，分别有 13 家和 11 家新工厂被评为“灯塔工厂”，其中中国工厂分别为 6 家和 5 家。至此，全球已有 114 家“灯塔工厂”，其中 42 家位于中国，数量占比接近四成，中国已成为世界上拥有最多“灯塔工厂”的国家。这些新加入的灯塔企业验证了早期灯塔的成功经验，同时也为灯塔网络注入了新的力量，向全球展现了大规模数字化转型的潜力。“灯塔工厂”被世界经济论坛认为是制造业升级转型的典范。“灯塔工厂”最大的特点是智能化、数字化与自动化等技术的集成与综合运用，评价标准主要看是否大量采用自动化、5G、工业互联网、云计算、大数据、人工智能等工业 4.0 新技术。

世界经济论坛官网认为，目前大多数制造业企业面临衰退危

机，但仍有部分企业脱颖而出，实现了规模化发展，这些“灯塔工厂”为制造业树立了榜样。在此次新加入“灯塔”网络的企业中，有 20 到 40 家工厂开展了大规模数字化转型项目，涉及数千名员工，实施了专业化治理。其中宁德时代宜宾工厂深入应用人工智能、物联网和柔性自动化技术，将生产线速度提高 17%，产量损失减少 14%，实现了零碳排放。

2.多家大型企业新建智能工厂投入运行

2022 年 1 月，洛克希德·马丁公司在拉夫金工厂建成首个基于工业物联网的超安全智能工厂。该工厂使用国际电子工业联接协会互联工厂数据交换标准连接了所有关键表面贴装设备，为该工厂内的 Aegis FactoryLogix MES 平台提供了单一标准语言的工业物联网数据，提升了制造和产品数据的保护能力。

2022 年 6 月，华晨宝马生产基地大规模升级项目——里达工厂正式开业。这是宝马集团第一座完全在虚拟环境中进行规划和模拟的工厂，从厂区规划一直到设备调试都建立了数字孪生模型并进行模拟，构建了真正的“工业元宇宙”工厂。在工厂建设方面，员工可在工厂完工前率先在虚拟空间中进行全方位体验，以提前发现设计和系统运行中存在的问题，可帮助企业及时进行调整，缩短建造工期。在流程管理方面，宝马集团率先应用的堆场管理系统将实时物流数据与 3D 模型相结合，可以模拟出各种物流场景，支持安全、高效和精

确的集装箱管理。另外，工业物联网将每一件产品、每一个流程和每一位员工连接起来，可以在车辆装配过程中提供即时、透明的信息，并通过移动终端和智能程序实时呈现给工人。在质量检验方面，人工智能、数据分析和算法的广泛使用，将决策从“经验驱动”转换为“数据驱动”。目前宝马集团正在与英伟达合作，开发新的虚拟化工具，建设全面的数字孪生，不仅是在规划阶段，投产之后也可以用数字孪生来引导厂内的流程和工艺，赋能日常生产，将“元宇宙式”造车进行到底。

2022 年 6 月，德国西门子公司(Siemens)全球首座原生数字化工厂在中国南京西门子数控（南京）有限公司正式投运。新工厂全面展示了西门子的先进数字化企业理念与技术的切实价值。在工厂虚拟建设阶段，西门子凭借覆盖工厂需求分析、布局设计、生产流程仿真及虚拟调试等环节的数字孪生技术，完成了工厂在软件系统中的虚拟建设。在实体建设及运营阶段，基于西门子工业云的大数据分析及其与工业物联网系统的有机结合，进一步优化生产流程，为实际生产提供实时可靠的数据支撑，实现数字制造和管理。新工厂投产之后，产能将提高近两倍，生产效率提升 20%，柔性生产能力提升 30%，产品上市时间缩短近 20%，空间利用率提升 40%，物料流转效率提升 50%。新工厂可同时生产电子和电机制造两大类从原材料、生产设备到工艺流程均截然不同的产品。

2022 年 12 月，瑞士 ABB 集团(Asea Brown Boveri Ltd)全球最大机器人超级工厂在中国上海投产运行。该工厂占地 6.7 万平方米，投资总额 1.5 亿美元，集生产与研发为一体，将现实世界与数字世界相连接，创建了数字化制造生态系统，利用虚拟计划与生产管理系统收集并分析数据，提高了性能和生产效率。新工厂摒弃了传统的、固定的装配线，采用灵活、模块化生产单元，并实现了数字互联，由智能的自主移动机器人提供服务。人工智能机器人系统可以执行诸如拧紧螺丝、装配和搬运物料等任务，将工人从这些任务中解放出来，从事更有价值的工作。超级工厂还成立了研发中心，将加速人工智能、数字化和软件方面的创新，着力于自主移动、数字孪生、机器视觉和低代码编程软件等领域，使机器人更智能、更灵活、更安全、更易于使用。

3.新推出的智能制造系统平台功能更加丰富

2022 年 6 月，瑞典海克斯康公司(Hexagon)发布智能制造开放平台 Nexus，将直接改变专业技术人员的协作与创新方式。Nexus 平台将连接不同的应用程序，实现不同设计、仿真和生产软件之间的实时数据共享，并结合各种技术能力形成从概念到交付中工程和制造问题的独特解决方案。基于 Nexus 平台的可见性与连接性，制造商可以创建更快的产品开发路径，建立更加敏捷和灵活的流程，积极应对变化的产品需求。2022 年 7 月，德国安美特公司(Atotech)推出数字化工厂套件

平台，集成了一组新的数据驱动的应用程序，具有系统集成功能和远程服务功能，可帮助用户更高效地运营、预测和安排维护、消除意外停机、提高产量，并尽可能地监控和自动化生产。该平台可连接现场生产设备，在制造过程中不断收集工艺和设备数据。使用高级分析和平台应用程序，工程师能够直接在其工作场所执行监督、维护、质量检查等活动。实时状态监控和移动警报程序可防止缺陷和警报被忽视，从而降低意外停机的风险。在远程服务方面，该平台还具有远程浏览平台，用户借助增强现实技术可进行远程交互。可视化控制系统与新的数字工厂套件相结合，将协助客户在工厂运营中释放工业物联网和数据驱动应用程序的优势。

4.对中国的影响与启示

从世界主要国家的智能工厂建设实践来看，智能工厂的建设充分融合了信息技术、先进制造技术、自动化技术、通信技术和人工智能技术。每个企业在建设智能工厂时，都应该考虑有效融合这些领域的新兴技术，与企业的产品特点和制造工艺紧密结合，确定自身的智能工厂推进方案。

中国制造企业在推进智能工厂建设方面，还存在诸多问题与误区，如尚未实现设备数据的自动采集和车间联网、工厂运营方面还缺乏信息系统支撑、设备运行效能不高、依然存在大量信息化孤岛和自动化孤岛。中国制造企业建设智能工厂，一是要围绕企业的中长期发展战略，根据自身产品、工艺、

设备和订单等特点，合理进行智能工厂整体规划，构建建设蓝图，明确建设目标和重点，从最紧迫需要解决的问题入手，务实推进智能工厂的建设；二是支持基础条件好的企业，围绕设计、生产、管理、服务等制造全过程开展智能化升级，强化精益生产，推动跨业务流动的数据共享和深度挖掘，实现对核心业务的精准预测、智能优化和自主决策；三是要重视智能加工单元建设，利用智能技术将数控机床、工业机器人、加工中心及自动化程度较低的设备集成起来，建设基于精益生产、柔性生产的智能工厂和车间，提高生产效率，更好地满足产品可靠性和高端化发展的需要。

二、机器人技术

2022 年，工业机器人通过硬件智能化和软件智能化的融合，实现面向不同作业场景、作业任务、作业工艺的智能化应用，加快制造业的转型升级进程。其中，仿人机器人的应用及商业推广得到广泛关注，医疗服务机器人的应用发展迅速。同时，中国机器人产业也取得了长足进步，市场需求持续旺盛，机器人密度首次超过美国，位居世界第五，显示出良好的发展势头。

（一）工业机器人走向智能化应用

在网络化制造的背景下，仓储物流需求旺盛，物流机器人快

速发展，出现了针对不同需求的新品。协作机器人安全性和负载能力又有新的提高，在制造业的应用不断扩大。工业机器人与人工智能技术及工业软件相融合，通过互联网平台助力智能制造是各厂商竞争的焦点。目前，中国已开发出弧焊、点焊、码垛、装配、搬运、注塑、冲压、喷漆等工业机器人，工业机器人关键零部件研制和集成应用能力明显提升，整机产品智能化示范应用稳步推进，但控制系统、伺服电机、减速器等关键部件仍依赖进口。由于核心技术缺失，六轴及以上机器人是国产工业机器人的难关。

1.借助人工智能技术探索自动化应用更多可能

2022 年 7 月，中国极智嘉发布全新机器人 MATRIX 软硬件一体化技术平台，打通各产品线信息和技术壁垒，实现核心算法和功能模块的平台化共用。MATRIX 平台主要分为软件算法、硬件模块和机械组件三个层次。该平台集成了众多关键技术，实现了产品业务流程的全覆盖，可以灵活组合各种模块，针对不同行业及场景快速生成相匹配的整体解决方案，是机器人的 AI 核心技术支撑。目前，MATRIX 平台在订单到人机器人、搬运机器人、智能叉车机器人等产品上已经实现落地应用。

2022 年 7 月，德国库卡公司(KUKA)在 2022 慕尼黑自动化展中推出中央工业物联网平台 iiQoT。该平台利用工业物联网的优势将整个机器人团队的状态数据（涵盖硬件、软件、控制

器），透明而清晰地汇集在一个平台上。KUKA iiQoT 不仅能对原始数据进行可视化显示，还能提供补充性的姿态参数，以便解释提示信息并且高效排除故障，为智能工厂的发展铺平道路。其重要功能包括设备管理、保养、故障识别和状态监控，用户可以不受地点限制地登录到所选生产线和加工单元，查看所有的实时参数。

2022 年 9 月，瑞士 ABB 集团在世界人工智能大会展出双臂 YuMi 书法演示单元。作为 ABB 在 AI 视觉上的一项开拓性创新技术，YuMi 通过融合路径、速度和加速度等方面的信息来学习此项特别的人类技能。通过深度学习，YuMi 能够识别字符并优化其书写，如调节落笔角度、书写速度、加速节点和下笔力度。该项技术能够被应用在涉及专业技能的产线中，利用融合数据，机器人无须编程，便能快速、精确地重复人类的动作。

2022 年 10 月，德国库卡公司推出市场上第一台智能箱中取物机器人。机器人配备了 KUKA.Smart Bin Picking 软件和相关组件。基于人工智能的工件识别功能搭配同时进行的精确轨迹规划，为集成商或最终用户提供了简单、快速、高效、智能的自动化解决方案。

2.平台企业赋能机器人产业

2022 年 6 月，德国倍福公司(Beckhoff)在慕尼黑国际机器人及自动化技术博览会上推出一款模块化的工业机器人系统

ATRO。ATRO 是一款模块化的机器人系统，可以根据不同的应用需求灵活组合，组装成造型最为匹配的机器人。该系统深度集成了 TwinCAT 自动化软件，具有图像处理、机器学习和云计算等功能。

作为半导体行业和计算创新领域的全球领先厂商，英特尔凭借在硬件、平台软件、性能优化、技术预演和机器人开源项目等领域的先进产品和技术，助力机器人产业发展。基于英特尔酷睿处理器、英特尔 FPGA、英特尔 OpenVINO 工具套件和英特尔 oneAPI，英特尔在机器人视觉工程领域展开布局；在物流机器人领域，英特尔酷睿处理器、英特尔 RealSense 摄像头的赋能也满足了 AMR、AGV 对复杂环境高速处理、平稳运行的需求，以及高性能视觉传感器为物流机器人提供物体深度信息。

3.针对细分领域和特定场景，开发新产品

2022 年 3 月，德国库卡公司发布 KUKA Sunrise.OS Med 2.6，这是 KUKA LBR Med 机器人的最新软件版本。开发和改进软件是为了满足在医疗应用中医疗设备和系统制造商不断增长的需求。最新的 Sunrise.OS Med 2.6 提高了系统的响应速度；改进了编程接口；增加了制动测试的灵活性；优化了手动引导功能；改进了状态监听器，方便与客户特定的软件集成。通过这些更改及 Sunrise.OS Med 2.6 中提供的新功能，医疗设备制造商和医生的医疗系统的整体体验和响应将得到极大

改善。

2022 年 10 月，瑞士 ABB 推出其最小工业机器人 IRB 1010，相较于同类产品，其负载提升了 50%，达到 5 千克，能耗降低了 20%，可以有效提高生产能效、降低生产成本。全新 IRB 1010 机器人的推出旨在满足消费者对可穿戴智能设备日益增长的购买需求，助力电子领域的更多应用场景实现自动化升级，包括薄膜剥离、材料处理、组装、涂胶、检测等。

2022 年 11 月，德国费舍尔(Fischer)公司推出建筑行业紧固件机器人 BauBot。该机器人可以协助施工现场的日常工作，接管钻孔和完成费舍尔紧固解决方案的安装工作。与数字施工计划相结合，BauBot 提高了大型施工现场的生产率和精度，保护了用户的健康。创新的传感器技术使机器人能够检测到任何偏离标准钻孔和设置过程的情况并作出反应。每个单独步骤的过程参数都可以被记录下来，并存储在建筑信息模型（BIM 模型）中。借助集成的力和力矩传感器，BauBot 可以监控和记录所有钻孔和设置数据，以便提供所有安装参数的详细文档。数据存储在 BIM 模型中以供以后追溯。

4.国外机器人厂商继续扩大在中国的产能

2022 年 8 月，捷克史陶比尔公司(Staubli)在中国的首条产线在杭州落成。该工厂将成为史陶比尔在全球第二大机器人生产基地。该产线现阶段主要用于生产史陶比尔 TS2 SCARA 系列四轴机器人，预计产能每年可达 2500 台以上，在对标总

部的生产工艺和质量体系、满足全球统一质量标准的同时，提高本土交付能力，响应中国市场需求。

2022 年 12 月，瑞士 ABB 集团投资 1.5 亿美元建成的位于上海浦东康桥机器人超级工厂正式开业，占地 6.7 万平方米，结合了先进制造工艺、人工智能学习技术及数字化协作解决方案。该工厂将生产 ABB 全系列的机器人产品。

5.物流机器人市场需求旺盛

2022 年 5 月，德国库卡公司发布新一代平台型自主移动机器人产品 KMP 1500I，可适用于更多的工业制造场景，满足重载物料及货品搬运的需求。KMP 1500I 基于 KUKA Navigation Solution 导航解决方案，可应对复杂多变的工业制造场景需求，实现机器人的实时定位、智能感知、安全防护及精准对接的能力。KMP 1500I 可以轻松应对工厂中光线不足或太强、粉尘多水汽多、人机混杂等恶劣特殊情况，能实现实时动态地图更新，智能环境感知，及时避障绕障，让机器人安全、稳定、可靠地运行。

2022 年 5 月，中国深圳优艾智合机器人科技有限公司的高原科考机器人 ARIS-8848 助力珠峰科考登顶。ARIS-8848 针对青藏高原的高海拔、超低温、复杂地形全面升级其移动平台，根据高原科考工作要求集成了多种专业传感器，具有高灵活性、高可靠性。ARIS-8848 驻守在珠峰大本营的最高点，利用快速移动能力和超高清视频监控能力，在复杂的气象变化中

实时关注位于海拔 8000 米以上的科考队员动向，为科考指挥团队提供稳定的实时信息。ARIS-8848 还将挂载冰川探测雷达，继续助力冰川科考工作。

2022 年 6 月，美国亚马逊集团推出旗下首款完全自主移动仓库机器人 Proteus。Proteus 采用了全新设计理念，在性能上更智能、更安全、更自主。这款机器人能自动执行工作，并可在员工之间穿梭移动，不需要被限制在特定区域内。该机器人的操作方式可以增强技术和人之间简单、安全的互动，为员工提供更广泛的用途。

2022 年 10 月，瑞士 ABB 推出了全新品牌形象的自主移动机器人系列(AMR)。自此，ABB 成为业界能够完整提供机器人技术、自主移动机器人和机械自动化解决方案的公司。首批发布的 AMR 型号是 Flexley Tug 和 Flexley Mover，涵盖的应用包括牵引、2000 千克以下的小车运输，以及 1500 千克以下的货架、货箱和托盘的抬升和运输。

2022 年 12 月，中国极智嘉联合香港大学(The University of Hong Kong)提出全新适用工业场景的多机器人路径规划算法。该创新算法侧重考虑机器人运动不确定性的多机器人路径规划问题，并提出相应的最优算法决策，这使算法更加适配实际工业应用场景，为学术研究与工业应用之间搭建起桥梁，推动人工智能领域朝实用方向发展。算法具备普适性，可并行，且可解释性强，更加适用于工业现场，已经成功应用于

极智嘉全柔性仓储物流及工业搬运解决方案。

6.协作机器人不断满足制造业工艺需求

2022 年 2 月，中国节卡机器人公司在中国市场推出节卡 Pro 系列协作机器人。该系列机器人拥有目前行业最高的 IP68 防护等级，可在高油污、高湿度、高粉尘环境下稳定工作，并具备水下运行能力，能适应各类复杂工业作业环境，以及室外、野外作业环境，极大地拓展了协作机器人的应用场景。

2022 年 10 月，节卡机器人面向海外市场正式推出节卡 Pro 系列机器人，将国内经验完美复制到全球众多项目，致力于在解放人类双手的同时，赋能客户提质增效。

2022 年 3 月，日本发那科公司(FANUC)发布了多款 CRX 协作机器人，包括 CRX-10iA、CRX-10iA/L、CRX-20iA、CRX-20iA/L 和 CRX-25iA，最大负载从 10 千克到 25 千克不等，工作半径从 1.2 米到 1.4 米不等，最高运动速度达到 1 米/秒。发那科表示，这些新型协作机器人具备高安全性、高可靠性、使用便捷三大特点，适用于检查、装载/卸载、包装、码垛、打磨、焊接等多种应用场景。CRX 协作机器人还可以检测工作空间中的外力，在与人或物体接触时具备安全停止能力。

2022 年 7 月，德国库卡公司在慕尼黑自动化展上展示了 LBR iisy 系列的新成员——LBR iisy 11 R1300 和 LBR iisy 15 R930。这两款新型协作机器人的有效载荷分别为 11 千克和 15 千克，工作范围分别为 1.3 米和 0.93 米，防护等级为 IP54。库卡表

示，这些新型协作机器人具备高安全性、高可靠性、使用便捷三大特点，适用于装载/卸载、拾放、包装、测试等多种应用场景。LBR iisy 系列还是第一批搭载了全新的 iiQKA.OS 操作系统的机器人，该系统可以让用户在几分钟内完成调试，即使没有编程知识也可以轻松操作。

7.机器人试水工业元宇宙

2022 年 8 月，在中国国际服务贸易交易会上，中国联想集团首次公布了自主研发的“远程替身”机器人——联想晨星机器人 S1。联想晨星机器人 S1 创新性地将元宇宙与工业机器人进行融合，戴上晨星 AR 眼镜后，联想晨星机器人 S1 采集的画面直接浮现在用户眼前，可以让用户获得身临其境的远程主动观测体验。联想晨星机器人 S1 的外壳材料采用可回收塑料和低碳铝，在提高性能和耐用性的同时也更加低碳环保。联想晨星机器人 S1 高度为 142 厘米，与人类视觉高度相似，采用四轮独立悬架设计，能够增强其行走过程中的稳定程度，加上两轴高性能云台，可让传回的画面抖动更少，更加稳定清晰，从而降低了用户远程观看时的眩晕感。目前，联想晨星机器人 S1 已用于世界大型化工厂区园区的远程巡视，为提升企业经济效能，降低生产成本提供了智能化解决路径。

2022 年 9 月，在世界人工智能大会上，中国节卡机器人公司发布了“节卡元宇宙共融交互系统”，它可以利用场景相机

把现场环境实时传输到元宇宙设备中。用户可在虚拟数字空间看到工作现场实况，通过 VR 手柄及手势识别远程操控物理世界的机器人同步作业。该系统有望在工业、建筑、医疗等领域获得应用，尤其是针对一些特殊场景，比如较为危险、难以到达的区域，或者企业招工较难的岗位。

（二）仿生机器人在特种机器人领域表现抢眼

由于应用场景的多样性，特种机器人对机器人运动机构的要求也非常多样与复杂，因此近年来对于仿生运动机构的研究非常活跃。仿生技术的深入发展使特种机器人对环境的适应程度不断增强，能够有效地在复杂的环境中作出相应的改变。其中，特斯拉的人形机器人商业化进展值得关注。

1.多种仿生机器人将代替人类探索更多样化的自然环境

2022 年 2 月，德国人工智能研究中心(Deutsches Forschungszentrum für Kü nstliche Intelligenz, DFKI)研究人员推出了名为“乌贼”的水下自主机器人(Cuttlefish AUV)。这款水下机器人的最大特点是支持水平和垂直工作模式的自由切换，从而让折叠收纳于腹部的两条机械臂发挥更大的作用。这款机器人采用了电池供电方案，长度为 2.8 米，在陆地上的重量为 1200 千克，最深可在水深 1500 米的地方运行。2022 年 3 月，美国匹兹堡大学(University of Pittsburgh)的研究人员受昆虫启发，设计了一种类似蟋蟀大小的微型机器人，

可以用于监测复杂和狭窄的环境，比如灾难现场或人体内部。这些微型机器人的特点是它们可以利用分子力来锁定自己的形状，并利用化学反应来产生冲击力，从而实现跳跃、滚动和爬行等运动方式。这些微型机器人还可以通过无线电波与外部通信，从而传输数据或接收指令。

2022 年 3 月，美国布朗大学和墨西哥国家自治大学(University ofnational Autonoma de Mexico)研究人员开发出一种仿生机器虾(RoboKrill)，可以模仿磷虾(Euphausia superba)等甲壳类动物的游泳方式。RoboKrill 只有一个腿部附属物，可以通过改变角度和频率来产生不同的推力和扭矩，从而实现前进、后退、转向和悬停等运动。RoboKrill 的目标是用于海洋探索和生物学研究，比如观察磷虾等重要海洋食物链成员的行为和分布。

2022 年 5 月，挪威科技大学(Norwegian University of Science and Technology)和瑞士苏黎世联邦理工学院研究人员开发出一种有袋动物机器人系统。该机器人系统包括一个腿机器人和一个空中机器人，可以利用这两个系统的异质性进行协作测绘和探索路径规划。

2022 年 7 月，美国斯坦福大学研究人员开发出名为 OceanOneK 的人形潜水机器人。在人的远程操控下，人形机器人可以以最接近真人潜水的方式在水下 1600 米处进行探索，最大程度地实现了人机交互。研究人员称，该机器人可

以传递触觉反馈和高清视频，让操作者感觉像是在水下探险。

2022 年 9 月，美国佐治亚理工学院(Gatech)研究人员根据弹尾虫可以利用身体进行受控起飞和降落的机制，复制了一个具有同样能力的跳跃机器人。该机器人仅重 86 毫克，身高只有 2 厘米，但跳跃高度可达半米，落地成功率达 75%（弹尾虫的落地成功率为 85%）。

2022 年 10 月，美国耶鲁大学研究人员开发出一种名为“两栖机器龟”(Amphibious Robotic Turtle, ART)的两栖机器人。该机器人通过结合刚性和软性材料，能够适应不同的环境。当从一个环境过渡到另一个环境时，A RT 的四肢可以自动调整形状、刚度和运动形态。该机器人在沿海生态系统监测、潜水支持、海洋水产养殖及研究复杂冲浪区等方面具有应用潜力。

2022 年 11 月，美国普渡大学(Purdue University West Lafayette)开发出一种先进的新型水下滑翔机器人。滑翔机器人是一种能在水下灵活移动的机器人，可执行海洋监测任务。滑翔机器人的组件和传感器可以根据不同的任务需求进行更换或添加，从而收集海洋中的温度、压力和电导率等数据。

2.微型机器人将更多用于人类深层疾病的治疗

2022 年 3 月，英国利兹大学(University of Leeds)“风暴”实验室团队开发出一种磁性触手机器人。该机器人直径只有 2 毫米，可由患者体外的磁铁引导进入肺部狭窄的管道。研究

证明，这种机器人可以到达肺部最小的支气管处，采集组织样本或提供癌症治疗。在手术前，医生将对患者肺部进行扫描，规划机器人通过支气管树的路线，并将路径编程到系统中。当患者外部的磁铁移动时，磁铁会对导管管段中的磁性颗粒产生作用力，导引体内机器人改变形状或方向，从而通过肺部到达可疑病变的位置，进行组织样本采集或治疗。

2022 年 4 月，美国斯坦福大学研究人员开发出一种磁控式的折纸机器人。这种机器人可以通过分布式磁化设计和磁场控制实现灵巧的导航，同时具有各向异性和磁场可调的结构刚度特性，可以有效地克服来自侧向的运动阻力，并通过狭窄空间定向送药。这种机器人可以用于未来的医学应用，如进行靶向药物运送、辅助受精或活体组织检查。

2022 年 4 月，美国初创公司 Bionaut Labs 表示，公司研发的微型机器人可被送入人类大脑深处，以治疗其他方法无法治疗的疾病。该机器人可以由磁铁引导进入大脑，同时不伤害人体。公司计划在两年内针对其微型可注射机器人进行首次人体临床试验。

2022 年 5 月，美国西北大学工程师开发出有史以来最小的遥控步行机器人。该机器人只有半毫米宽，形状类似螃蟹，可以在微观尺度上完成各种动作，如弯曲、扭转、爬行、行走、转向甚至跳跃。该机器人通过外部磁场接收指令，并利用电流改变形状和运动轨迹。研究人员表示，这种机器人有着广

泛的应用潜力，如医学、生物工程和微纳制造等领域。

2022 年 5 月，印度科学研究所(Indian Institute of Science, IISc)的研究人员开发出一款纳米级牙科清洁机器人，可清除牙本质小管(dentinal tubule)中的细菌。牙本质小管从牙齿内部的牙髓一直向外延伸至牙釉质附近，积聚在其中的细菌会导致感染，需要进行根管治疗。该纳米机器人可以通过磁场引导进入牙本质小管中，并产生热量杀死细菌，为提高标准根管治疗的成功率提供了一种安全而有效的方法。

2022 年 5 月，德国马克斯普朗克智能系统研究所(Max Planck Institute for Intelligent Systems, MPI-IS)的研究人员设计并制造出一种微型千足虫状机器人。该机器人只有几毫米大小，由柔性金属制成，并使用磁流引导。该机器人进入人体后可以粘在覆盖内部器官的黏液上，并能向任何方向攀爬。研究人员选用了由壳聚糖制成的尖刺脚垫来保持抓力。目前，该机器人已在猪肺和消化道内进行了相关实验。测试表明，该机器人能够承载自身大小 3 倍和自身重量 20 倍的货物。

2022 年 6 月，美国宾夕法尼亚大学的研究人员开发出一套微型机器人系统。该机器人系统可以改变自身形状，变成刷毛或牙线。该系统不仅能刷掉牙菌斑，还能释放出抗菌剂杀死有害细菌。同时，该项技术可以通过调整磁场精确控制刷毛的硬度和长度，在完成牙齿清洁的同时保护牙龈。

2022 年 8 月，美国加利福尼亚大学洛杉矶分校(UCLA)的研究

人员开发出一种可 3D 打印的“元机器人”。该机器人所需的整个机械和电子系统能够通过一种新型的 3D 打印工艺一次性制造出来，由感觉、移动和结构元素组成的内部网络组成，通过与电池和控制器集成，可以按照程序命令自行移动。研究人员构建并演示了 3 个具有不同功能的“元机器人”，可分别执行绕“S”形拐角和随机放置的障碍物，在接触撞击时逃脱，在崎岖地形环境中行走或进行小幅度跳跃的操作。未来“元机器人”可用于设计组装生物医学机器人或执行搜救任务等。

3.仿生机器人辅助人类进行多种特种任务作业

2022 年 3 月，英国帝国理工学院的研究人员开发出一种灵活性很强的机器人手臂，能够在多个场景中发挥作用。该机器人的柔性手臂可以扭曲和转向各个方向，从而在制造业、航天器维护、伤害康复等领域中得到应用。

2022 年 4 月，西日本旅客铁道株式会社(West Japan Railway, JR West)计划开发用于架线维修保养等高空作业的人形机器人，力争 2024 年春季投入使用。该公司称使用机器人有助于提高效率，也有利于防止人员触电、坠落等工伤事故。

2022 年 8 月，美国加利福尼亚大学(University of California)的研究人员开发出一种新型双臂机器人，可以使用两个夹具解开缠绕在一起的电线。该机器人可以使用不同的抓取方式解开电线上的结，并可以根据电线的状态调整其动作。

2022 年 10 月，美国特斯拉公司(Tesla)推出人形机器人擎天柱 Optimus。这款机器人身高约 1.72 米，体重约 56.7 千克，搭载了特斯拉自主研发的芯片和自动驾驶摄像头，拥有像人类一样的双手。擎天柱 Optimus 可以执行一些简单的任务，如去商店买东西、搬运物品等。该公司称，随着生产规模扩大和成本下降，人形机器人的实用性将逐年提升。

2022 年 10 月，美国哈佛大学工程与应用科学学院(Harvard School of Engineering and Applied Sciences)的研究人员设计出一种新型柔软的机器人抓手。该机器人抓手使用一组细长的触手缠绕和诱捕物体，类似于水母捕获猎物。这种机器人抓手可以轻柔地抓取各种形状和质地的物体，具有广泛的潜在应用。例如，抓手可抓取农业生产和配送中的水果和蔬菜、医疗环境中的脆弱人体组织，甚至是玻璃器皿等不规则形状物体。

2022 年 11 月，荷兰格罗宁根大学(University of Groningen)等机构的研究人员设计出一种游隼机器人(RobotFalcon)。该机器人是一种模仿游隼外形和飞行方式的机器人，可以有效地驱赶机场附近的鸟群，防止鸟击事故。研究人员通过实验比较了游隼机器人、无人机和传统方法（如放鞭炮、发射信号弹）对驱赶不同种类鸟群的效果。结果显示，游隼机器人比其他方法更能有效地减少鸟类数量和活动范围，并且不会对环境造成污染或伤害。

2022 年 11 月，日本机器人公司 TMSUK 开发出一种下水道管道检查蜘蛛机器人，以减轻现有工人的工作负担。这种机器人配备了摄像头和传感器，可以检测管道内部的裂缝、污垢、异物等情况，并将数据传输给操作员。该机器人还可以通过无线网络与其他机器人协作，共同完成任务。

（三）服务机器人在多个领域作用显著

2022 年，服务机器人产品持续迭代升级，应用场景和服务模式不断扩展，在全球范围内呈现出日益旺盛的市场需求。代替人从事精巧作业的服务机器人逐渐增多，移动式服务机器人在多个行业有新的应用，医疗机器人与 AI 技术结合显现出巨大发展潜力。目前，中国服务机器人发展水平和世界先进水平处于并跑阶段，但仍存在关键零部件对外依存度高，关键核心技术原创性、智能化水平有待提高等问题。

1.医疗服务机器人借助 AI 技术提供更加多样化的治疗手段

2022 年 3 月，美国麻省理工学院林肯实验室(Lincoln Laboratory)的研究人员开发出一种手持式机器人 AI-GUIDE，可以帮助急救人员控制外伤患者的严重内出血情况。这种机器人利用人工智能和集成机器人技术，通过导管插入患者的主要血管，提供治疗。

2022 年 9 月，新加坡南洋理工大学(NTU)的研究人员开发出一种新的可穿戴辅助机器人，被称为移动机器人平衡助手

(Mobile Robot Balance Assistant, MRBA)。MRBA 机器人主要用于提前检测和防止老年人因平衡感下降而导致的跌倒问题。

2022 年 9 月，英国施乐辉公司（Smith&Nephew）使用 CORI 手术机器人平台进行了首例机器人辅助膝关节翻修手术。这是美国食品药品管理局(FDA)批准的第一个使用机器人平台的膝关节翻修手术。CORI 手术机器人平台是一种手持设备，使用人工智能和集成机器人技术在关节置换手术期间为外科医生提供指导。CORI 手术机器人平台可用于全膝关节置换术、部分膝关节置换术和翻修膝关节置换术，以及计算机引导的全髋关节置换术。该公司表示 CORI 手术系统可以提高手术的准确性和效率，减少并发症和感染，并提高患者的治疗效果。

2022 年 10 月，美国约翰斯·霍普金斯大学的研究人员设计的智能组织自主机器人 STAR 在没有人类指导的情况下对猪的软组织进行了腹腔镜手术。STAR 擅长肠道吻合术，其配备了增强自主性和提高手术精度的新功能，包括专门的缝合工具和最先进的成像系统，可以提供更准确的手术区域可视化，满足高水平重复运动和高精确度手术的需要。

2022 年 10 月，日本筑波大学(University of Tsukuba)的研究人员开发出一款机器人，可以戴在手上作出轻柔的回握动作。这款机器人由一个可穿戴的传感器和一个小型的电动机组成，可以检测用户的握力，并根据预设的模式给予适当的反

馈。研究人员称，这种回握动作可以产生被关怀和支持的感觉，从而降低用户对疼痛和压力的感知。这款机器人手有望应用于医院、养老院等场所，为需要抚慰和安慰的患者提供帮助。2.移动式服务机器人在多个行业大显身手

2022 年 5 月，新加坡科技与设计大学(Singapore University of Technology and Design, SUTD)的研究人员设计出一种新的可重构机器人，可以帮助人类进行清洁和维护。这种机器人可根据不同的任务和环境，改变自身的形态和功能。这种机器人的设计灵感来自生物界中的可重构生物，如章鱼、蜥蜴等。研究人员希望这种机器人能帮助人类提高清洁和维护工作的效率和安全性。

2022 年 6 月，美国亚马逊集团推出其首款全自动移动机器人 Proteus。Proteus 拥有先进的安全、感知和导航技术，能根据环境和任务自动调整速度和路径，可在仓库中搬运大型推车，并且可以安全地在工厂中穿梭。亚马逊表示，该机器人可以提高仓库的效率和灵活性。

2022 年 7 月，美国西北大学机器人与生物系统中心(Center for Robotics and Biosystems)的研究人员开发出一种新型的协作移动机器人 Omnid Mocobots。这种机器人可以与其他机器人或人类合作，安全有效地拾取、处理和运输柔软和易碎的物品。Omnid Mocobots 由一个全向移动底盘和一个弹性并联式三角洲机械臂组成，是一种适用于多种场景的移动协作机器

人。

2022 年 9 月，巴西数字农业初创公司 Solinftec 设计出一款农业机器人——Solix Spraye。该机器人由 4 个机载太阳能电池板供电。可以负责自主寻找并消灭杂草，还可以检查和报告农作物情况。Solix Spraye 自主地在种植田中移动时，利用一套集成传感器对经过的每棵植物进行从根到叶的扫描。如果机载 Alice AI 系统确定该植物是杂草，该机器人就会有选择地对其使用除草剂。该机器人还能生成田地数字地图并显示检测和处理杂草的位置，帮助农民进行农田管理。

2022 年 10 月，美国惠普公司推出新型自主式平面图打印机器人 SitePrint，可以将建筑工地的布局精确地打印到地板上。这种机器人是一个三轮设备，配有一个跟踪棱镜，可以与全站仪（测量角度和距离的工具）协同工作。用户只需通过平板电脑控制机器人，便可实现快速、准确和简单的施工现场布局。惠普公司表示，这种机器人可以提高施工效率和质量。

三、增材制造技术

增材制造（3D 打印）作为极具发展前景的智能制造技术，越发得到发达国家的高度重视。2022 年，增材制造产业在引领技术创新的同时，从新冠疫情中展现复苏态势，实现了高速增长。当前增材制造技术已被广泛应用于航空航天、汽车、医疗器械、电子和通信等领域，凭借高精度、高效率、低成

本等优点，在工业制造中的地位不断提升。据麦肯锡预测，到 2025 年，全球增材制造有望产生 2000 亿美元到 5000 亿美元的经济效益。作为战略性新兴产业，增材制造技术受到世界上多数国家的高度重视。目前，全球增材制造产业已基本形成美、欧等发达国家和地区主导，亚洲国家和地区后起追赶的发展态势。中国增材制造产业近年来保持了较高速的增长，但与美、欧、日发达国家和地区相比，还存在关键技术滞后、创新动力不足、高端装备及零部件质量可靠性有待提升的问题，工业级增材制造装备在环境污染控制、工艺稳定性等方面总体上还有差距。

（一）增材制造技术取得诸多新突破

增材制造技术(Additive Manufacturing, AM)，也称 3D 打印技术，是指在计算机程序控制下，使用数字模型为指导，连续形成材料层以创建物理对象而生成 3D 物体的过程。增材制造是一种从数字文件创建物理对象的制造过程，具有许多不同的技术。最常见的增材制造形式是熔融沉积成型和光固化成型。与传统制造方法相比，增材制造能够创建更复杂的几何形状和内部结构，大幅缩短原型的制作工期，并能减少材料浪费。2022 年，西班牙、日本、荷兰等国家的 3D 打印厂商将技术水平快速拔高，促进行业飞跃发展。

1.西班牙 BCN3D 公司推出黏性光刻制造 3D 打印技术

2022 年 3 月，西班牙 3D 打印机制造商 BCN3D 推出了其新的黏性光刻(VLM)制造 3D 打印技术。该技术是一种双材料技术，允许用户在一次构建中使用两种不同的树脂进行打印。该技术的主要优势在于其打印高黏性树脂的能力，能够处理比行业标准的树脂高 50 倍的黏性，为制造高强度部件铺平道路。

2.日本爱普生推出其第一台全新螺杆挤压 3D 打印机

2022 年 3 月，日本精工爱普生公司(Seiko Epson Corporation)推出了其第一台 3D 打印机。该打印机在 2022 年国际机器人展览会上亮相，采用“扁平螺杆挤压法”进行打印，能够与多种常见的第三方材料一起使用，包括树脂颗粒、金属颗粒和环保生物质颗粒等高性能热塑性塑料。爱普生公司采用独特的机制使 3D 打印机实现了对打印温度的精确控制，使其可以利用常用材料制造出更加坚固、精确的物体，使产品质量更高，交货时间更短，成本更低。

3.日本杉野机械推出数控加工和激光金属沉积 3D 打印混合系统

2022 年 10 月，日本精密设备制造商杉野机械(Sugino Machine Limited)推出一种混合 3D 打印机——XtenDED，这是一种将数控加工(Computerized Numerical Control, CNC)与激光金属沉积(Laser Metal Deposition, LMD)相结合的装置。通过将混合制造技术的打印头和 CNC 加工头结合在一起，XtenDED 打印机能够以更高的产量和精度生产、加工满足航空航天应用要

求的零部件。

4.荷兰 atum3D 公司获阿姆斯特丹大学 SLA-DLP 混合 3D 打印技术的许可

2022 年 10 月，荷兰 atum3D 公司从阿姆斯特丹大学获得了混合 SLA-DLP 技术的许可。这种混合光固化立体成型(Stereo lithography Appearance, SLA)工艺由该大学的范特霍夫分子科学研究所(Van't Hoff Institute for Molecular Sciences, University of Amsterdam)开发，结合了面曝光和点曝光技术，能够大规模生产具有高分辨率特征的零件。阿姆斯特丹大学表示，该技术可用于医疗研发，解决临床研究应用，如创建具有临床研究应用的组织支架或微流体设备。

5.以色列 Stratasys 公司开发出完全集成的 3D 打印和后处理平台

2022 年 11 月，以色列 3D 打印公司 Stratasys 推出了全新开发的可编程光聚合 P3 自动化生产单元，这是一种集成了 Origin One 打印机和后处理设备的工厂级解决方案。P3 自动化生产单元可以实现全自动、高效、高质量和高可重复性的 3D 打印生产过程，具备全天候生产能力，并可通过软件精确地控制光线、温度、拉力和气压优化打印过程。此外，它还支持多种高性能材料，包括耐热、坚固、常规用途和弹性材料。全自动的流程确保了从打印到终端部件的连续性，在最大限度提升产量的同时，也精简了成本和后处理工序。此外，

P3 自动化生产单元还能配置任何数量的打印机和各种后处理设备，以满足不同生产车间的生产需求。

（二）3D 打印材料向着可持续化方向发展

2022 年，3D 打印材料不断更新换代，如金属材料、陶瓷材料、复合材料等都有了新的突破。可持续材料技术成为研发热点，研究人员开发出多种环保型 3D 打印材料，包括从树皮中提取的纤维素、麦麸、废弃塑料水瓶等。

1.美国麻省理工学院提取树皮作为复合 3D 打印材料

2022 年 2 月，美国麻省理工学院(MIT)研究人员开发出一种新型植物衍生 3D 打印复合材料。这种复合材料由木质纤维和聚乳酸混合而成，结合了骨骼的韧性和铝的硬度。同时，研究人员使用该材料制造了各种形状和尺寸的样品，包括牙齿、螺丝和扳手等。

2.波兰 Greenfill3D 公司用麦麸制作线材实现绿色环保的 3D 打印

2022 年 2 月，波兰增材制造公司 Greenfill3D 推出基于麦麸的新型 3D 打印线材。Greenfill3D 是一家初创公司，在生态、可生物降解材料和 3D 打印的交叉领域开展业务。经过对麦麸的长期研究，该公司把麦麸、聚乳酸和其他可生物降解的成分混合在一起，开发出一种基于麦麸的新型线材 GF3D Branfill3d，并将其应用于 FDM 3D 打印机。使用 GF3D Branfill3d

打印的 3D 部件具有较好的弹性和韧性，可防止断裂。

3.英国巴斯大学开发出使用紫外线就可分解的环保型 3D 打印材料

2022 年 5 月，英国巴斯大学可持续与循环技术中心(Centre for Sustainable and Circular Technologies, CSCT)研究人员通过实验发现，在合成聚合物时向聚乳酸(Polylactide, PLA)链中添加不同数量的糖分子，可以微调最终产品的可降解性。研究数据表明，在 PLA 中添加 3%的糖聚合物单元，就可在暴露于紫外线后的 6 小时内减少 40%的质量。据此，研究人员开发出了可使用紫外线分解的 3D 打印材料。

4.美国工业设计师开发出可将废弃塑料瓶变成功能性 3D 打印线材的设备

2022 年 5 月，美国加利福尼亚工业设计师 Reiten Cheng 开发出一种名为 Polyformer 的独特设备，能够将废弃的塑料水瓶变成功能性 3D 打印线材。在使用过程中，设计师首先将废弃塑料瓶通过带有堆叠轴承的切片工具切成长条，然后将其送入 Polyformer 的热端，使其重新定型为直径 1.75 毫米的线材。塑料瓶是常见的废弃物，如果这一设备可以得到广泛应用，将成为一种有效的环保问题解决方案。

5.德国 3D 打印开发商 EOS 推出两种新型环保 3D 打印材料

2022 年 11 月，德国 3D 打印开发商 EOS 推出了两种环保 3D 打印材料 PA 2200 Carbon Reduced 和 PA 1101 Climate Neutral。

PA 2200 Carbon Reduced 是一种使用新生产工艺开发的材料，含碳量比以前减少了近 45%。PA 1101 Climate Neutral 是一种生物基粉末。EOS 表示，这两款新型环保绿色材料都可以减少温室气体排放。

（三）3D 打印技术在生物领域应用加快

3D 生物打印技术是一种利用 3D 打印制造生物组织和器官的技术，可以使用多种材料，如细胞、基质和高分子材料，制造出不同类型的生物组织和器官模型。目前，3D 生物打印技术已被用于器官模型和植入物制造、手术模拟及数字化外科手术等领域。3D 生物打印技术作为一项新兴技术，应用前景广阔，但也存在一些挑战，如材料和技术的研究和优化、生物组织和器官的生产质量和生物相容性的改善等。

1.荷兰利用超快体积 3D 生物打印方法制造出功能性肝脏

2022 年 2 月，荷兰乌得勒支大学研究人员使用新开发的超快体积 3D 生物打印方法成功制造出功能性肝脏。该团队长期致力于新型 3D 生物打印技术及其在医学和生物医学研究中的应用，最终实现了在 20 秒内制造出超过 1 立方厘米的功能性肝脏单元。这些人工肝脏单元能够像天然肝脏一样在人体内执行毒素消除功能。该研究团队通过开发一种使用生物友好型化合物（碘沙醇）的新材料配方，使细胞达到基本透明，避免了印刷伪影和光散射导致的分辨率损失，从而实现

高细胞密度调价下的高保真度。

2.中美合作利用低温生物 3D 打印技术制造出活体人类肌腱

2022 年 2 月，哈佛医学院(HMS)和四川大学的研究团队开发出一种 3D 生物打印活体人体肌肉肌腱组织的新方法。与涉及沿 X 轴和 Y 轴沉积细胞的普通挤压生物打印相反，该研究团队利用低温生物打印将细胞冷冻并垂直堆叠，创建了独立的混合细胞组织。研究人员称，该项技术可以生产出更坚固、用途更广的组织，因此可在再生医学、药物发现或个性化治疗领域得到应用。

3.意大利开发出用于改善机器人触觉和感知的 3D 打印人造皮肤

2022 年 7 月，意大利圣安娜高等研究学院(Sant'Anna School of Advanced Studies)、威尼斯大学(Ca'Foscari University of Venice)和罗马大学(Sapienza University of Rome)的研究人员利用 3D 打印技术开发出一种人造皮肤，旨在用于提高机器人的触觉感知能力。这种人造皮肤由一层柔性聚合物和一层导电墨水组成，可以检测压力、温度和湿度等环境变化，并将信号传输给机器人的控制系统。这种人造皮肤可以让机器人更好地适应复杂的场景，如医疗、护理和服务等领域。

4.印度首个 3D 打印眼角膜成功通过动物测试

2022 年 8 月，印度普拉萨德眼科研究所(Pradeep Jain Eye Institute)和印度海得拉巴理工学院(Indian Institute of

Technology Hyderabad)3D 打印的眼角膜成功通过动物测试。该研究团队使用脱细胞角膜组织基质和从人眼中提取的干细胞，开发了一种生物识别水凝胶。这种材料完全不含合成成分，可为基质再生提供理想的微环境。由于其完全天然的基础，研究人员认为这种 3D 打印眼角膜可以为患有角膜瘢痕或其他导致失明的严重眼病的人提供一种新的治疗方案。

5.法国医疗机构利用 3D 生物打印技术完成鼻子重建手术

2022 年 12 月，法国图卢兹大学医院(Centre Hospitalier Universitaire de Toulouse)的医生为一名患者做了创新的鼻移植手术。这项手术利用了 3D 生物打印技术，将患者自己的软骨细胞和胶原蛋白混合在一起，制作出一个与真实鼻子相似的结构，并将其种植在患者的前臂上，培养出新的组织和血管，最后移植到患者的脸上。

（四）3D 打印技术在建筑领域应用逐渐增加

3D 打印技术在建筑业中的应用主要集中在建筑模型和相应部件。3D 打印技术在建筑领域的应用具有创新性，可实现个性化设计，构建复杂造型，同时节约材料和缩短制造周期。当前，3D 打印技术在建筑业中的应用逐渐增加，有望推动建筑行业向可持续和创新的方向发展。

1.印度理工学院利用工业废料制造出可 3D 打印的混凝土

2022 年 1 月，印度理工学院古瓦哈提分校(Indian Institute of

Technology Guwahati, IIT Guwahati)的研究人员开发出一种新技术，利用工业废料作为黏合剂制造可打印的混凝土，并用其 3D 打印家具和建筑物。研究人员使用一台自制的 3D 打印机，成功地打印出了一个高 0.4 米、宽 0.4 米、带有拱形支撑的座椅，以及一个高 1.5 米、宽 1.5 米、带有圆形窗口的安全岗亭。这种技术将提高混凝土的可持续性和耐久性，同时减少碳足迹和成本。

2.印度陆军建造出该国首栋 3D 打印房屋

2022 年 3 月，印度陆军军事工程服务处(MES)在其西南空军司令部基地建成本国首栋 3D 打印房屋，以满足印度武装部队日益增长的住宿需求。MES 利用 Tvasta 公司的混凝土 3D 打印技术及其自制的建筑物 3D 打印机，仅用三周时间便建成了占地 65 平方米的房屋。该房屋具有抗灾能力，可满足印度 3 区地震规范。该研究也是《自力更生的印度》计划的一部分，MES 将 3D 打印确定为有助于解决士兵住宿短缺问题的重要技术，认为与现有建造技术相比，3D 打印技术能够快速满足对建造此类房屋的迫切需求。

3.荷兰建筑公司利用 3D 打印技术建造混凝土楼梯

2022 年 9 月，荷兰建筑公司 BAM 和 Weber Beamix 在英国苏格兰的 M8 高速公路上建设了一座 3D 打印的混凝土楼梯。该楼梯由 12 个预制部件组成，每个部件重约 1.5 吨，被认为是英国迄今为止最大的 3D 打印混凝土结构。这些部件在荷

兰 Weber Beamix 3D 打印混凝土工厂中制造而成。该楼梯的成功建造展示出 3D 打印混凝土技术在提高建筑行业效率、节省材料和降低碳排放方面的优势。

4.英国建筑公司 ChangeMaker 3D 打印了英国首座污水处理设施

2022 年 9 月，英国建筑初创公司 ChangeMaker 3D 与英国水务公司(United Utilities)合作建造出英国首个 3D 打印的污水处理设施。该污水处理设施直径 1.8 米，内建有部分隔墙。工程师们认为，与现有模型相比，这种制造方法使成本降低了 20%，建造时间缩短至 4 小时以内。

5.英瑞研究人员共同创建出具备 3D 打印功能的无人机

2022 年 9 月，伦敦帝国理工学院和瑞士联邦材料科学与技术实验室(Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology)的研究人员开发出一款具有 3D 打印功能的无人机。研究人员受自然界中蜜蜂可以共同创造大型、复杂结构的启发，编组了一个空中增材制造机队。该机队由 BuilDrones 和 ScanDrones 无人机组成，它们根据同一份蓝图自主协同工作，BuilDrones 在飞行过程中沉积材料，而 ScanDrones 则持续测量 BuilDrones 的输出结果，并告知其下一步的制造步骤。研究人员表示，该机队可自主建造和修复建筑物，未来有望用于人类难以进入或危险的区域执行建造任务。

6.美国加利福尼亚建筑公司交付世界首个 3D 打印净零能耗

住宅

2022 年 10 月，美国加利福尼亚建筑初创公司 Mighty Buildings 宣称其交付了世界首个 3D 打印净零能耗住宅。这套由 3D 打印预制板组装成的住宅包含两间卧室和两间浴室，是南加利福尼亚 3D 打印社区中的第一幢房子，这个社区规划了至少 40 个住宅单元。

（五）3D 打印技术在国防领域备受瞩目

3D 打印技术凭借强大的功能，可以满足军用产品对更快的制造速度、更轻的产品重量和更低的制造成本的要求，因此越来越多地被世界各地的防务部门采用。3D 打印技术在国防领域中的应用主要是利用各种材料，如金属、塑料和复合材料等制造出不同类型的军事装备和武器。未来 3D 打印技术在国防领域中的应用将逐渐增加，预计到 2027 年，军用 3D 打印行业的价值将达到 17 亿美元。

1.美国结合 SLS 与 SLA 技术开发出新型增材制造工艺

2022 年 6 月，美国哥伦比亚大学(Columbia University in the City of New York)开发出一种名为多进程增材制造(Multi-Process AM)的新型增材制造工艺，将选择性激光烧结(SLS)增材制造技术和立体光刻(SLA)增材制造技术相结合。该工艺的单层成型原理是：首先，将基材压在涂有脱模剂和粉末层的玻璃片表面，并用激光从玻璃一侧照射粉末，使粉末

融合在基材上；然后，将基材转移到另一个涂有树脂薄膜的玻璃片上，再次用激光照射，使树脂在基材上固化。该工艺实现了两种增材制造技术的互补，既能以立体光刻增材制造技术的精度制造高精度零件，又具备选择性激光烧结增材制造技术在材料的选用范围、坚固性和质量方面的优势。除改善增材制造产品性能，该工艺还有望利用导电粉末材料实现三维电路板的增材制造。

2.英国皇家空军开发出 3D 打印无人机群

2022 年 7 月，英国皇家空军开发出一个以 3D 打印无人机为特色的空中攻击部队，这些无人机可以安装弹药并用于摧毁战略目标。在取消“蚊子”无人机建造计划后，英国皇家空军将重点打造一支可以更紧急部署的无人机机队。英国空军参谋长迈克·威格斯顿(Mike Wigston)表示，3D 打印等技术能够快速构建无人机蜂群系统，这些系统具有巨大的作战潜力，可以迷惑和压制对方的防空系统。

3.美国海军两栖攻击舰安装首台金属 3D 打印机

2022 年 11 月，美国海军在“黄蜂”级两栖攻击舰(Wasp-Class Amphibious Assault Ship)巴丹号(LHD 5)安装了首台可长期使用的金属 3D 打印机。该金属 3D 打印机采用飞利浦增材混合系统，该系统集成了激光金属丝沉积头 Meltio3D 和哈斯 TM-1 计算机数控铣床，具备增材和减材加工功能，可打印 316L 不锈钢材料。除金属 3D 打印机外，美国海军海上体系司令

部(Naval Sea Systems Command, NAVSEA)工程师还在“黄蜂”级船上安装了一台用于生产聚合物零部件的 3D 打印机，该打印机能够打印 NAVSEA 开发的 300 个增材制造技术数据包中的任意船舶零部件。

4.澳大利亚 SPEE3D 公司冷喷涂 3D 打印技术入选美国军事演习

2022 年 11 月，澳大利亚金属增材制造公司 SPEE3D 受邀参加了美国陆军未来司令部“汇聚工程-2022”演习。双方共同验证了 SPEE3D 公司的 WarpSPEE3D 金属 3D 打印机的可部署性，并在现场和各种条件下打印了金属零件，研究了冷喷涂金属增材制造技术对军队能力和后勤的影响。SPEE3D 公司的冷喷涂金属增材制造专利技术相比传统增材制造技术沉积速率快 1000 倍，适用材料包括铜、不锈钢、钛、高强度铝和镍基物等 12 种以上，能够快速生产出工业级金属零件。此次演习是针对金属 3D 打印对战损船只进行维修的能力的试验，目的是减少美国海军对传统供应链的依赖。

四、智能制造及赋能技术

2022 年，工业物联网与工业云、边缘计算、人工智能、数字孪生等新技术深度融合，进一步系统化、平台化地服务于智能制造的各个应用场景，促进制造业数字化转型。工业物联网在进一步强调现场级高速通信的同时，协同工业云与边缘

计算技术，在物流、矿业、食品等领域，助力实现数字化生产与运维。人工智能技术的应用领域逐渐从生产过程监测预警与优化，延伸至利用智能系统进行全流程、整厂级的自主控制，并率先在化工领域实验成功。数字孪生技术助力打造原生数字化工厂，同人工智能技术协力，加速构建工业元宇宙。

（一）工业物联网通信手段、技术、应用领域，实现跨界融合

工业物联网系统，作为数字化生产的前端系统，担负着现场设备、前端控制系统、远程控制系统的通信与数据采集工作。2022 年，多家机构配合为时间敏感网络(Time Sensitive Networking, TSN)制定统一测试标准，加速打通底层设备间的高速稳定通信。工业物联网进一步同工业控制平台、边缘设备、工业云平台协同，拓宽应用领域，实现多技术融合的平台化发展。

1.TSN 网络加速部署打通工业物联网现场通信脉络

2022 年 5 月，国际 CC-Link 协会(CC-Link Partner Association, CLPA)、Avnu 联盟(Avnu Alliance)等 5 家全球组织，在 2022 年汉诺威工业博览会上联合宣布将为“工业自动化 IEEE/IEC 60802 TSN 概要”(IEEE/IEC 60802 TSN Profile for Industrial Automation)制定通用的一致性测试方案。这一测试方案作为

TSN 唯一通用测试规范的最终版本，加速构建出更为广泛的工业网络生态系统，从而加速打通工业 4.0 工业物联网现场通信脉络。

2.物联网云边技术协同加速赋能制造业数字化转型

2022 年 9 月，美国网络技术开发商亚马逊云科技(Amazon Web Services)与德国西门子公司开启云边协同合作，共同赋能制造业。此次双方共同研制的云边协同技术框架，融合了西门子工业边缘解决方案和亚马逊云科技的人工智能与机器学习、数据分析、物联网和存储等云服务技术。西门子提供的工业边缘解决方案包括：边缘设备、边缘应用程序和边缘管理平台，为数据上云提供前端支持。亚马逊通过 Amazon Glue 对云端数据湖中的数据进行处理，并利用 Amazon Elastic MapReduce 实时分析流式数据源。通过 Amazon SageMaker 机器学习服务，客户将机器学习与传统工控设备结合，在云端进行机器学习模型训练和推理。双方合作研发的云边协同解决方案，部署于工业废料自动分拣系统，可将分拣准确率从 70%大幅提升至 97%以上，有害垃圾的分类准确率从 90%提升到近 100%，帮助实现分拣流程的无人工干预作业。

3.工业物联网平台化发展与其他工业系统加强跨界融合

2022 年 9 月，瑞士 ABB 集团为南非金田公司(Gold Fields Limited)在智利实施的 Salares Norte 项目定制部署了 ABB Ability 工业物联网系统。该平台化定制工业物联网系统包括

ABB Ability System 800xA 分布式控制系统、ABB Ability Knowledge Manager 知识管理器、Ability Asset Vista 工业设备智慧化管理系统，以及 ABB Ability Genix 工业分析与人工智能套件。这一整体方案消除了运营、业务和工程系统间的隔阂，通过先进的分析方法收集和关联数据，然后将其转换为有意义的信息，能够第一时间挖掘还原出有价值的数据信息，帮助提高工业生产力和运营绩效，在降低成本的同时，利用远程连接帮助精简矿场所需的现场作业人员，从而提升生产的安全性。

2022 年 10 月，瑞士 ABB 集团研制发布了 Ability Beer Maker 智能过程控制解决方案以促进啤酒厂数字化转型，提升运营效率。该方案包含 ABB Ability System 800xA 分布式控制系统、符合国际标准 S88 的批次控制系统、新配方模拟数字孪生系统、制造运营管理系统及 ABB Ability Batch Insight 大数据分析模块。该系统的成功部署使生产管理者能够使用多种参数来适应不同用户的需求；评估能耗、啤酒或萃取物损耗，提供报告和仪表板可视化；模拟新配方的强大辅助工具，全面描述控制系统的运行状态；利用大数据分析在早期发现过程异常。同时，该系统的成功部署，能够帮助运营商和客户的酿酒专家通过实时决策进一步改善工艺、质量和生产能力。

4.边缘计算与专家服务共筑工业系统运维

2022 年 10 月，法国施耐德电气公司发布面向关键电源和制

冷的 EcoStruxureTM Asset Advisor(EAA)远程专家服务系统。该系统在解决工业数据边缘采集、筛选分析的同时，通过分布在各地的专业团队，可为企业实施全天候在线监测，提供包括报警分级、在线诊断、主动精准派单、全过程事件跟踪和及时补救性维护服务等。基于持续集中观察，专家团队可对设备进行定期专业分析，包括月度监测数据统计分析、设备健康状态分析、电池健康分析等，并提供预防性维护建议。运维信息不需要组网或利用 VPN 进行传播，各类信息以短信、电话、App 的形式发送给用户，在提升工作效率的同时，确保设备安全可靠，并保障数据安全。系统通过创新融合数字化工具、全天候在线资源及专业知识，提供专家级主动监测及前瞻资产洞察，最终实现以专业的远程服务构建智慧运维管理，帮助企业客户降低停机风险和运营成本。

（二）人工智能从服务工业现场设备走向整体管控

2022 年，人工智能首次从优化具体生产过程走向整厂自主控制，完成了人工智能系统连续 35 天对一家化工厂进行自主控制，创下了新的里程碑，并最终与 5G 通信技术配合实现化工厂远程自主控制。另外，人工智能技术还赋能工业水务管理，系统持续打造智能化水务系统。

1.AI 与 5G 协作开创工厂远程自主控制先河

2022 年 3 月，日本横河电机公司(YOKOGAWA)和日本 JSR 株

式会社首次成功通过人工智能系统连续 35 天对一家化工厂进行自主控制。此次测试证明了人工智能强化学习方法可以安全地应用于实际工厂，并证明了阶乘内核动态策略规划算法，可以控制现有控制方法所无法实现的操作过程。在现场测试中，人工智能解决方案成功地处理了确保产品质量和保持蒸馏塔中液体处于适当水平所需的复杂条件，同时最大限度地利用余热作为热源。这种方法可以稳定质量，提高产量并节省能源。

2022 年 6 月，横河电机公司和 NTT DOCOMO 株式会社成功对一种用于工业过程的远程控制技术进行了概念验证测试。该测试将 FKDPP 和云计算与 5G 结合，具有低延时和连接大量设备的能力，并有望成为实现工业自主化的核心技术。

2.人工智能技术助力高精度运动控制与风电叶片监测

2022 年 6 月，德国倍福自动化公司推出全新研制的 TwinCAT Cogging Compensation 软件系统。该系统利用人工智能技术，对倍福高动态 AL8000 直线电机进行齿槽力补偿，使运动机构获得更高精度。该系统的设计充分考虑了机械设计或能量流动带来的磁效应，可独立记录使用中的齿槽数据，通过神经网络训练，作用于电流预控。通过这种方式调节电流预控后，设备跟踪误差可大幅降低，同步性能可提升 5 倍。该技术的推广，将进一步提升铣床或激光切割机等高精度加工设备的整体性能。

2022 年 9 月，德国魏德米勒集团(Weidmuller)开发出风机叶片状态监测系统 BLADEcontrol。该系统基于高精度的加速度传感器对风机叶片摆振和挥舞方向的振动信号采集，并运用特定算法和数据模型对现有无损叶片进行数据建模，确定该叶片的固有频率模型。系统会将采集的数据通过人工智能预学习建立叶片正常运行时的振动模型。当叶片振动模型建立后，叶片在线监测系统便可实时采集、计算、分析叶片振动数据，并实时与正常模型数据对比，提早发现叶片异常。该系统的部署将有效提升风机可用性，缩短停机时间，确保工作效率和成本效益。

3.人工智能加速可持续化工业水务管理

2022 年 6 月，德国西门子公司在慕尼黑国际环博会(IFAT Munich)上展示了其智能化水务管理系统 SIWA。该系统包含 SIWA LeakPlus、SIWA Blockage Predictor、SIWA Optim、SIWA Optim Dynamics 等模块，可利用现有流量和压力数据进行“训练学习”，鉴别和分类管网中的异常泄漏状况。该系统基于人工智能技术，可确定污水管网中的堵塞状况，避免下水道管网发生污染。该系统还可从工厂的过程控制系统中收集数据，并将其与公共供水和用水预测数据关联；可利用泵站的水力模型来计算输送饮用水的有效解决方案，降低泵和阀门操作程序的能耗。通过 SIWA 系统，工业企业可以优化能效、避免水资源损失、减少水污染，并实施预测性维护措施。

（三）数字孪生技术加速打造工业元宇宙

2022 年，构筑工业元宇宙成为未来工业系统追逐的目标，而这离不开数字孪生技术的支撑。数字孪生技术助力打造原生数字化工厂，在工厂的各个建设阶段提升建设效率，提高了空间利用率与物料周转率。数字孪生技术还与人工智能技术融合，加速工业元宇宙的建设，引领设备全生命周期管理革新。

1.数字孪生技术助力打造原生数字化工厂

2022 年 6 月，德国西门子公司全球首座原生数字化工厂投入运行。西门子公司利用数字孪生技术，在工厂实地建设前就预先在虚拟世界中打造出工厂的数字孪生，实现从需求分析、规划设计、动工实施到生产运营全过程的数字化。在实体建设及运营阶段，西门子公司借助工业云的大数据分析，工业物联网系统和数字孪生系统的有机结合，进一步优化了生产流程，为实际生产提供了实时可靠的数据支撑，实现了数字制造和管理。新工厂投产之后，产能将提高近两倍，生产效率提升 20%，柔性生产能力提升 30%，产品上市时间缩短近 20%，空间利用率提升 40%，物料流转效率提升 50%。新工厂可同时柔性生产电子和电机两大类从原材料、生产设备到工艺流程均截然不同的产品。作为西门子全球首座原生数字化工厂，新工厂全面展示了先进数字化企业理念与技术价值。

2.人工智能驱动数字孪生加速打造工业元宇宙

2022 年 7 月，德国西门子公司和美国英伟达公司宣布，携手通过西门子 Xcelerator 平台与英伟达 3D 设计与协作平台 Omniverse 打造人工智能驱动数字孪生技术的应用系统，加速构建工业元宇宙。双方计划打通西门子 Xcelerator 平台和英伟达 Omniverse 平台，借助来自西门子基于物理世界的数字模型和来自英伟达的将人工智能与自然规律相结合的实时仿真技术，促使不同规模的企业都能够借助实时运营数据应用数字孪生技术，打造创新的工业物联网解决方案，应用在边缘侧或云端分析得出有效的管理优化策略，通过视觉更加丰富、更沉浸式的模拟仿真来应对未来的工程挑战。未来该系统将使西门子机械、电气、软件、物联网、边缘计算和数字孪生等，实现信息技术(Information Technology, IT)和操作技术(Operation Technology, OT)的融合，成功打造全新的工业化生态系统，借助工业元宇宙推动数字化转型。

3.数字孪生技术引领设备全生命周期管理革新

2022 年 7 月，法国施耐德电气公司推出 EcoStruxureTM 机器专家数字孪生系统 EcoStruxureTM Machine Expert Twin。在产品设计阶段，工厂可通过该系统的拖放式机电组件、虚拟现实/增强现实界面和应用程序库等模块，快速建立数字孪生模型，然后通过数字化平台改进及验证设计理念。利用该系统，工厂不仅降低了风险，还可以节约 10%～20%的质量成本及 20%～50%的上市时间。在设备调试阶段，工厂通过虚拟调试，

使机器专家数字孪生系统与即插即用的 EcoStruxure 开放自动化平台无缝连接，可节约 60%的调试时间，并改进系统集成测试的效果，进而提升软件质量和生产产能。在设备运营阶段，工厂基于 EcoStruxure 机器专家数字孪生系统与机器顾问系统配合，可对操作员进行培训，并实现软件升级与测试、智能维护，从而减少机器停机时间，在机器的生命周期中节约成本并获得新的收入来源。该系统的成功应用，可针对复杂应用场景，高效赋能新型设备设计，实现更为灵活的生产过程。

五、工业控制平台、工业软件与智能工厂

2022 年，工业控制平台进一步强调开放性与网络化，更多软件系统逐步开始支持第三方硬件系统的适配，有效打破了软硬件厂商差异的兼容性壁垒。工业软件作为工业数字化的重要支撑，通过各类云平台技术加速部署，借助云原生应用，逐渐打通了不同工业软件系统间的隔离状态。在新冠疫情的促动下低代码开发成为了工业软件系统未来的主要开发手段。作为智能制造技术赋能的对象，智能工厂利用 3D 打印技术、运动控制技术、分布式控制技术加速汽车制造、食品包装、精密装配、油物炼化等生产过程的数字化转型。

（一）现场级工业控制平台进一步强调开放性与网络化

2022 年，工业控制平台有机地将工业控制器，通信设备、边缘设备，各类功能模块系统进行组合，实现同一软件平台下的不同硬件适配，即软硬件解耦。同时，基于网络(Web)的软件系统，促进了大型项目的远程协作开发。现场级工业控制平台整体呈开放性与网络化发展趋势。

1.分布式控制节点带来更具开放性的工业控制平台

2022 年 6 月，法国施耐德电气公司与英特尔公司宣布进行合作研发，通过创建分布式控制节点、软件框架和基于英特尔处理器的 DCN 硬件产品，扩展施耐德 EcoStruxure 开放自动化平台。双方合作将英特尔工业边缘控制平台与 EcoStruxure 开放自动化平台相结合，利用 DCN 框架简化并加快软件定义控制系统的开发，加速并深化在流程工业中的应用，包括在油气化工、矿业、水务与污水处理、制药和混合行业等市场。EcoStruxure 开放自动化平台的基本特征是实现软硬件的解耦，使用户能在根据需要单独升级硬件并提高系统性能的同时，保持应用程序不变，从而更好地保护客户的知识产权和已有投资。施耐德电气与英特尔的合作表明，工业行业正在从固定功能的硬件向由软件定义的灵活、“即插即用”式解决方案过渡，从而为客户带来更高的运营效率。

2.自动化系统平台与第三方硬件和虚拟化环境相适应

2022 年 11 月，德国传动与控制技术开发商博世力士乐(Bosch

Rexroth)推出可供第三方使用的基于 Linux 的操作系统——ctrlX OS 操作系统。利用 ctrlX OS 系统，使用者可更轻松、更灵活地在自动化拓扑的所有层级上对软件功能进行开发、安装、更新和操作。该系统可以满足软件驱动工厂的需求，并实现虚拟测试、自动化开发和运维等现代软件操作。由于硬件的独立性，该系统可以在虚拟机管理程序平台、数据中心、边缘服务器或云中进行虚拟控制系统操作。

3.德国西门成功研制基于网络的过程控制系统

2022 年 11 月，德国西门子公司全新发布基于网络的 SIMATIC PCS neo 控制系统 4.0 版本。完全基于网络的系统能够打破地域的限制，无论是居家还是在办公室均可支持团队工作。工厂模块可以更轻松地集成到过程控制系统中，并且可以独立于系统制造商进行描述、配置并实现自动化。随着 4.0 版本的推出，SIMATIC PCS neo 控制系统可更好地满足工厂产能需求，能够支持涉及多达 64000 个过程对象和 56 个控制器的大型项目，并适用于不同规模的工厂环境。

（二）低代码、云平台技术加速工业软件开发与应用转型

2022 年，工业软件作为制造业企业数字化转型的有力支撑，在开发手段、应用模式等方面有着诸多变化。低代码技术开发的工业软件系统已涉及工程、设计质量控制，以及精益制造等，未来低代码开发技术将成为工业软件的重要开发手段；

云平台下的工业软件系统加速部署，涉及了 SaaS、Paas、Maas 平台的 PLM，远程维护，电网运营管理软件等领域；云原生应用，促使不同工业软件系统间的数据融合更加便捷，助力 CAD、PDM 和 PLM 软件系统实现了一键连接，有效打通产品从设计到生产的数据传递过程，促进了设计端与生产供应链侧的数据协同。

1.低代码开发技术将成为工业 4.0 的重要组成部分

2022 年 10 月，德国西门子旗下的企业级低代码应用开发公司 Mendix 发布了 2022 年低代码关键行业应用现状的调查报告。这份报告汇总了来自法国、德国、荷兰、英国和美国的银行、金融服务、保险、公共部门、工业制造和零售行业的企业领导者的经验和见解。报告指出，新冠疫情迫使企业忽略安全风险和通信挑战问题，使用包括低代码在内的新技术，以保持业务交易量。69%的企业认为，低代码从危机解决方案变成了核心解决方案；38%的企业将低代码用于关键任务解决方案，如企业级软件开发、生产力 App 和客户门户；10%的企业认为，低代码是业务转型的基础。其中在制造业领域，2020—2021 年，企业将低代码用于非关键的支持性服务，如物流。2022 年低代码开发的系统开始涉及工程、设计和质量控制过程，以支持供应链，并实现精益制造。在 2023—2024 年，低代码将是工业 4.0 的重要组成部分，通过低代码开发的工业软件能够将系统和人员实时连接，加速实现智能制造。

2.云平台技术促进各类云边工业系统应用推广

2022 年 4 月，美国参数技术公司(Parameter Technologies Inc, PTC)推出 Windchill+产品生命周期管理软件。Windchill+是该公司市场领先的新一代 Windchill 软件，通过软件即服务架构提供。利用软件即服务(Software as a Service, SaaS)的优势，Windchill+促进了围绕产品数据的协作，使产品开发组织能够更快地将产品推向市场并加快产品生命周期管理(Product Lifecycle Management, PLM)部署。Windchill+将 SaaS 架构的转型优势与 PLM 速度、敏捷性和开放性相结合。通过采用 SaaS，客户可以减少或消除其本地旧应用程序和解决方案的使用。客户可以快速、简单地从 PLM 实施转变为全面使用，并可以轻松加快整个组织的 PLM 应用，还可以更快、更轻松、更安全地与外部供应链合作伙伴进行协作。

2022 年 5 月，美国国家仪器有限公司(National Instruments)在全球用户大会上推出一款维修即服务(Maintenance as a Service, MaaS)解决方案 ActiveUptime，用于测试设备和测试设施的状态监测和预测性维护。该方案提供即用型服务，包括收集有价值的环境和系统数据所需的硬件和软件，基于边缘预处理技术以加快数据收集、聚合和传输。系统采集的数据可用于状态监控和预测性维护的特定结果看板，直观展示实时监控系统运行状况并识别需要注意的关键区域，从而消除意外设备故障造成的中断。这款解决方案，专为用户环境

量身定制，可以主动监控系统运行健康状况并提出关键测试设备发生故障的预警信息。

2022 年 6 月，法国施耐德电气公司发布了基于平台即服务的电网运营解决方案，将其作为 EcoStruxureTM Grid 产品组合的一个组成部分。在开放式云平台的支持下，施耐德电气提供了一个部署环境，使电网规划和运营解决方案能够在云端进行托管和管理。云上运行的分布式能源管理系统 EcoStruxure DERM 和高级配电管理系统 EcoStruxureTM ADMS，可实现包括分布式能源管理、停电管理、电网规划和用户培训等用例的应用。这一举措让较小的公司与大型公司同等获益，将能源管理系统交付至更广阔的市场，实现了更敏捷的创新交付方法。

（三）智能工厂新方案

智能工厂是工业智能化数字化的最终体现，是诸多工业软硬件系统的服务对象。2022 年，3D 打印首次集成到汽车自动化生产工艺中，展示了汽车零部件增材制造的潜力。磁驱柔性输送系统以其高精度，柔性化的特点，助力食品包装与精密装配行业转型。数字化分布式控制系统，进一步提升生物精炼厂运营效率。

1.德国首次将金属 3D 打印集成到汽车自动化制造工艺中

2022 年 6 月，德国亚琛增材制造中心(Aachen Center for

Additive Manufacturing, ACAM)研究人员展示了宝马增材制造工业化和数字化(Industrialization and Digitalization of Additive Manufacturing)项目汽车零件 3D 打印自动化生产线的科研成果。除了自动化流程链之外，该项目还解决了增材制造创新培训概念的需求，开发了增强现实和虚拟现实培训。项目开发了各个工艺步骤之间的自动化接口，建设了用于金属 3D 打印的系列化和模块化生产设施，如模块化粉末处理、监控和自动化后处理工艺组件。研究项目最终成功落地于吉凯恩集团(GKN)在波恩的工厂，以及宝马集团在慕尼黑的工厂。该项目的数字化生产系统首次将金属 3D 打印集成到汽车行业的自动化制造工艺中，将人工活动减少 30%、零件成本降低 50%以上，展示出汽车零部件增材制造的非凡潜力。

2.高精度智能输送系统助力食品包装与精密装配

2022 年 1 月，美国 Brenton 公司成功利用德国倍福自动化公司的 XTS 磁驱柔性输送系统，实现差异化食品包装。采用 XTS 系统的包装设备最多能够将 41 个不同的库存单位(Stock Keeping Unit, SKU)分开装箱，每分钟可装 27 箱。该包装设备还能够实现 26 种不同的包装模式，包括更复杂的展示用包装模式和商业化包装模式，吞吐量为每分钟 12.5 箱。其他进料装置更换所需的停机时间从 30 分钟减少到 5 分钟，进料段的工程时间节省了至少 200 个小时，进料段中诸如链条、飞行器、推杆和旋转机构等部件减少了约 100 个，因此复杂

性大大降低。包装设备利用 XTS 磁驱柔性输送系统满足了食品包装行业中最具挑战性的物料输送要求。

2022 年 8 月，荷兰精密零件生产厂商 IMS 公司借助 XTS 系统实现了模块化装配和高精度定位。IMS 公司近 10 年来一直致力于研发用于微小零件生产（如智能手机中使用的光模块）的高科技装配线。XTS 磁驱柔性输送系统采用模块化设计，并配备高性能软件，可应对产品规格更换和较慢的工艺步骤带来的挑战。如果装配线需要根据新的产品进行调整，XTS 可以通过 250 毫米小网格尺寸的模块，进行扩展。只需要在生产系统中插入新的单元，操作人员就可以在短短几个小时内用转换后的系统恢复生产。该系统可以真正助力实现智能手机中的摄像头模组柔性高效装配生产。

3.数字化分布式控制系统提升生物精炼厂运营

2022 年 6 月，美国艾默生电气公司(Emerson)为世界第三大粗制妥尔油生物精炼厂进行数字化升级，促进其生产先进的生物燃料和生化原料，以降低排放，减少对化石燃料的依赖。该工厂部署了艾默生的 DeltaV 分布式控制系统、DeltaV 安全仪表系统及 DeltaV Live 操作员界面软件。利用这些系统，工厂可实现高效生产、提升运营性能和提供更完善的过程数据展示，还支持启用紧急关闭功能，以提高工厂和人员的安全性。该工厂全部建设完成后，年产能可达 20 万吨，将会减少 40 万吨的二氧化碳排放，占芬兰总碳排放量的 1%左右。

第七章 世界航天技术发展报告

2022 年，世界航天事业蓬勃发展，航天发射频次、航天器部署数量再创历史纪录。在巨型星座布建进程加快、航天运载器能力稳步提升的背景下，全球共实施 186 次航天发射任务，将 2505 个航天器送入太空。2022 年，中国航天发展稳扎稳打，航天发射频次再创历史新高，太空站全面建成，航天器研制能力大幅提升，进出太空、利用太空能力跨越式发展。“问天”驻轨、“梦天”展翅、“夸父”逐日、“祝融”探火、“北斗”指路，诸多重大成就谱写了中国航天事业新的辉煌篇章。同时，主要国家将航天视为国家综合实力的重要组成部分，持续强化航天战略布局，推进航天前沿技术发展。美国深化太空力量建设，持续提升太空军事实力和威慑力，依靠太空技术优势抢占太空资源和发展主导权。俄罗斯、欧洲、日本、韩国、印度等积极推进航天战略部署，加快提升太空系统能力，维护各自太空利益和太空安全。

一、世界航天技术发展重要动向

2022 年，主要航天国家积极推进航天战略部署，实施新的航天发展规划，进一步增强太空竞争实力，占据太空发展主动权。军事航天能力仍是主要国家发展重点，助推太空领域向

军事化、武器化、联盟化方向发展。低轨星座布建提速，应用范围进一步拓展，或将成为重塑国际太空格局的重要力量。商业航天力量日益壮大，作为大国介入的新型工具对改变俄乌冲突局势和未来作战形态产生深刻影响。此外，手机卫星直连技术实现“0 到 1”的突破，受到更多关注，将成为推动全球通信和太空产业变革的新生力量。

（一）中国航天事业硕果累累

2022 年，中国航天事业续写辉煌，全年航天发射次数达到创纪录的 64 次，位居世界第二。中国航天取得诸多举世瞩目的重大成就，天宫太空站建造阶段全部 6 次飞行任务顺利完成，载人航天工程“三步走”战略圆满收官；长征六号甲运载火箭成功首飞；多型商业运载火箭成功发射；液体火箭发动机取得重大突破；对月、对火、对日探索取得新成果。

1.中国航天运载火箭发射次数再创新高

2022 年，中国航天全年实施发射任务 64 次，再次刷新全年发射次数的纪录。长征系列运载火箭发射 53 次，全部成功，年度发射次数首次突破 50 大关，并打破 102 次连续发射成功的纪录。快舟系列火箭成功实施 5 次发射，快舟一号甲火箭实现全年发射四连胜，快舟十一号火箭发射获得圆满成功。力箭一号、捷龙三号火箭成功首飞，谷神星一号火箭两次发射成功，双曲线一号火箭和朱雀二号火箭发射失利。

2.中国太空站“T”字基本构型在轨组装完成

2022 年是中国载人航天立项 30 周年，载人航天工程全年共计实施 6 次发射任务，先后将天舟四号货运飞船、神舟十四号载人飞船、问天实验舱、梦天实验舱、天舟五号货运飞船、神舟十五号载人飞船送入太空，中国载人航天工程开启太空站应用与发展新篇章。2022 年 11 月，梦天实验舱顺利完成转位操作，中国天宫太空站“T”字基本构型在轨组装完成。2022 年 11 月，神舟十五号与神舟十四号的两个乘组在太空“胜利会师”，中国首次实现太空站三船三舱构型及 6 名航天员同时在轨飞行。载人航天工程是中国迄今规模最庞大、系统组成最复杂、技术难度和安全可靠性要求最高的航天重大工程。天宫太空站的建造和运营将使中国掌握近地轨道空间（一般指距地球表面 200～2000 千米高的太空空间）长期载人飞行技术，具备较大规模、长期有人照料的太空应用能力，显著提升中国综合开发利用太空资源的水平。

3.中国首型固体捆绑中型运载火箭长征六号甲首飞成功

2022 年 3 月，中国首型固体捆绑中型运载火箭长征六号甲在太原卫星发射中心成功发射，顺利将浦江二号卫星和天鲲二号卫星送入预定轨道。长征六号甲运载火箭芯一、二级直径为 3.35 米，一级采用两台 120 吨推力的液氧/煤油发动机，二级采用一台推力 18 吨的液氧/煤油发动机，芯级捆绑 4 台 2 米直径的助推器。火箭全箭总长约 50 米，起飞重量约 530

吨，700 千米太阳同步轨道运载能力不小于 4 吨。长征六号甲运载火箭成功首飞，实现了中国固体捆绑等一系列技术新突破，进一步完善了中国新一代运载火箭的型谱，推动新一代运载火箭向更高效、更智能、更安全的方向发展，为中国新一代运载火箭的创新发展奠定了坚实基础。

4.多型商业运载火箭成功发射

2022 年，中国共有三型商业固体运载火箭相继发射成功。2022 年 7 月，中国科学院自主研制的一型四级固体运载火箭“力箭一号”首飞成功，丰富了中国固体运载火箭发射能力谱系。2022 年 12 月，中国航天科工集团有限公司研制的快舟十一号固体运载火箭成功将行云交通甚高频数据交换系统(VHF Data Exchange System, VDES)试验卫星送入预定轨道，总体技术水平达到固体运载火箭国际先进水平。2022 年 12 月，中国航天科技集团有限公司研制的新型商业运载火箭捷龙三号采用全新的发射平台在海上首飞成功，首次实施中国运载火箭海上热发射。三型火箭的近地轨道运载能力均达到吨级以上。捷龙三号火箭采用四级固体发动机串联布局，总长约 31 米，箭体最大直径 2.65 米，最小直径 2 米，总质量约 140 吨，500 千米高度太阳同步轨道运载能力为 1.5 吨。该火箭拥有直径 3.35 米和 2.9 米两种构型整流罩，能够与多种星箭接口适配，满足多种卫星安装要求。

5.中国最大推力液体火箭发动机首次整机试车圆满成功

2022 年 11 月，由中国航天科技集团六院自主研制的中国最大推力液体火箭发动机首次整机试车圆满成功。该型发动机设计推力为 500 吨级，采用世界上最大的补燃循环发动机推力室。首次整机试车的成功，标志着该型发动机研制取得重大突破，具有重大里程碑意义。航天液体动力技术可以支撑航天强国建设跃上崭新台阶。

6.中国多项深空探测任务取得新成果和新成绩

2022 年 9 月，中国国家航天局、国家原子能机构联合宣布，来自核工业北京地质研究院的研究团队首次发现月球上的新矿物，并称之为“嫦娥石”。中国科学院地球化学研究所发表的相关研究结果证实，嫦娥五号月壤样品矿物表层中存在大量的太阳风成因水，为月球有水再添“实证”。嫦娥五号返回器携带 1731 克月壤样品成功返回地面后，共计有 4 批 50 余克月壤样品被分发至 100 多个科研团队。经过一年多的研究，各团队的研究成果陆续发布。由中国科学院地质与地球物理研究所和国家天文台主导的多家研究机构联合对嫦娥五号月壤样品展开了研究，推演了月球的来龙去脉。中国研究人员还发现嫦娥五号月壤可催化生产氧气和燃料，并建立了新的月球年代函数模型。

2022 年 9 月，中国科学院地质与地球物理研究所火星研究团队与合作者通过分析“祝融号”火星车携带的次表层探测雷达数据揭示了火星的浅表结构，发现该区域数米厚的风化层

下存在两套向上变细的沉积层序，可能反映了约 35 亿年至 32 亿年以来，多期次与水活动相关的火表改造过程。同时，该区域火表之下 0～80 米内未发现液态水存在的证据，但不排除存在盐冰的可能。此次研究为深入认识火星地质演化与环境、气候变迁提供了重要依据，对人们认识火星地下结构和演化具有重要意义。

2022 年 9 月，第 73 届国际宇航大会在法国巴黎举行。会议期间，国际宇航联合会将 2022 年度“世界航天奖”授予中国天问一号火星探测团队。该联合会表示，天问一号火星探测团队为成功探索火星提供了创新性的选择，并为推进深空探测技术作出了杰出贡献。

2022 年 12 月，中国综合性太阳探测专用卫星“夸父一号”最新一批科学图像在北京发布，其中多幅图像的品质达到国际领先水平，验证了“夸父一号”3 台有效载荷的观测能力和先进性。“夸父一号”是中国科学院“空间科学二期先导专项”研制的一颗太空科学卫星，于 2022 年 10 月在酒泉卫星发射中心成功发射。卫星以“一磁两暴”为科学目标，即同时观测太阳磁场和太阳上两类最剧烈的爆发现象——耀斑和日冕物质抛射，研究它们的形成、演化、相互作用和彼此关联，同时为太空天气预报提供支持。

经过 60 余年发展，中国已经全面建成航天大国，进入世界航天强国行列，开启了全面建成航天强国新征程。近 10 年

来更是实现了“北斗”组网、“天宫”翱翔、“天问”探火、“嫦娥”探月、“羲和”逐日。面对大国博弈日趋激烈、世界航天领域竞争加剧、太空经济持续增长的大趋势和大环境，中国必须保持坚韧不拔的战略定力，坚决贯彻习近平总书记关于航天强国建设的战略部署，锚定建设航天强国宏伟目标，不断提升自主可控的创新发展能力、聚焦前沿的科学探索研究能力、强大持续的经济社会发展服务能力、有效可靠的国家安全保障能力、科学高效的现代治理能力、互利共赢的国际交流与合作能力，着力推动高质量发展，为实现中华民族伟大复兴、促进人类文明和社会进步作出更大贡献。

（二）主要航天国家和组织发布战略文件，强化国防太空能力建设

太空作为战略制高点和战略新疆域，被视为关乎国家安全和发展的重要领域空间，已成为大国开展战略博弈的新战场。2022 年，主要航天国家和组织纷纷出台太空领域战略文件，将国防太空能力作为发展重点，维护自身太空安全和太空利益。

1.美国发布多份太空战略政策文件，多维度推进太空安全能力建设

2022 年 4 月，美国太空司令部(Space Command)发布《太空司令部商业整合战略》(Spacecom Commercial Integration

Strategy)，从需求端帮助美军呼吁采办制度改革以推动商业航天能力集成，从作战集成应用角度为美国太空司令部与商业企业合作、集成和形成长期伙伴关系建立商业现货、购买集成服务、购买专业知识 3 条途径的战略框架。战略为各项商业整合工作确定优先级并整体同步推进，从而填补美国太空司令部能力缺口，提升太空体系韧性，发挥商业航天力量在大国混合博弈中的特殊作用，获得和保持对潜在对手的技术和作战优势。

2022 年 5 月，美国太空军发布《太空试验体系愿景》(Space Test Enterprise Vision)，提出以一体化试验理念在能力生成整个生命周期内最大限度整合研制试验和作战试验工作，明确了美国太空军各机构职责分工，加强试验体系中组织、人员、设施、采办、试验等各组成要素的统筹管理。愿景还提出建立一体化试验组织体系、发展专业太空试验队伍、建设太空试验基础设施 3 项重点工作，促进太空作战部门和采办部门密切协作，确保交付管用、好用的太空系统，最大限度提高太空军为联合部队和国家提供天基能力的灵活性和效率。

2022 年 6 月，美国国土安全部(DHS)发布新版《国土安全部太空政策》文件。该政策文件指出，国土安全部必须支持美国发展增长中的太空生态系统，措施一是认识太空生态系统对国土安全的重要性，二是通过本政策定义和更新国土安全部在太空疆域中的职责。该政策明确了国土安全部太空政策

的三个要点。第一，在政府和商业天基系统及其相关供应链的设计、开发、采购、部署、运行过程中，支持天基系统及其供应链的安全性、完整性和韧性。国土安全部将倡导把赛博安全(Cyber Security)原则结合进太空系统设计、开发、采办、部署、运行的所有阶段，并与政府和行业伙伴保持密切关系，重点关注太空系统的赛博安全措施。第二，要使关键太空资产的运用具备韧性，使任何自然中断或人为中断对本土或国土安全部使命任务执行的影响降到最低。第三，制定应对降级(Degraded)太空环境的应急规划。

2022 年 8 月，美国国防部发布新版《太空政策》(DoD D3100.10 Space Policy)指令文件，将太空视为“美国国家军事力量的优先领域”，提出要加强美国太空军事能力，以抵御“敌对行为”。政策提出与盟国扩大军事合作，共同推动达成“负责任外太空行为准则”，为美盟国提供持久战略优势。政策对美国太空军事活动提出 5 条原则：一是在太空、自太空、对太空和过太空以顾及他方和专业方式行事；二是限制生成长期存在的太空碎片；三是避免产生有害干扰；四是保持安全间隔距离和飞行轨迹；五是为增强太空域安全和稳定进行沟通和发布通知。与 2016 年版《太空政策》相比，新版文件首次将太空视为美国国家军事力量的优先领域，首次将负责任的太空行为准则纳入政策内容，并根据美国国防部太空组织体制改革调整，重新划分各机构职责分工，增强太空领域

的控制力和威慑力，或将进一步加大太空军事化、武器化风险。

2022 年 10 月，美国政府发布《2022 年导弹防御评估》报告，为作战部队提供导弹防御战略和政策指导。报告重申，本土导弹防御是美国导弹防御的首要任务，美国将继续升级和发展地基中段防御系统。报告认为，美军需要继续开发下一代拦截弹，预计将于 2028 年部署，并逐步取代当前装备的拦截弹。报告指出，美国将继续寻求联合部队、盟国和伙伴的一体化防空反导能力，以保持联合机动部队和关键基础设施的可靠水平，抵御来自任何对手的所有导弹威胁，从而保护美国海外部队，保持机动自由，并加强对盟国和伙伴的安全承诺。未来，美国将继续发展全面的导弹挫败能力，构建导弹防御与核能力相辅相成的综合威慑，重点增强印太地区反导能力建设，强化一体化防空反导探测器网络建设，以提升对先进威胁的探测和跟踪能力。

2.英国发布《国防太空战略》和《英国太空力量》文件，将提升太空军事力量作为维护英国太空利益的重要抓手

2022 年 2 月，英国国防部发布新版《国防太空战略》，阐述了英国政府作为太空领域参与者的愿景，并具体明确了国防部通过太空相关能力、行动和伙伴关系来实现“保护与防御”目标的具体措施。该战略设定了 4 个发展目标：一是充分利用全球合作伙伴关系，加强国内外安全防御；二是通过跨部

门太空项目，最大限度地提高国家资源利用效率；三是加快国防太空创新，保持战略优势；四是塑造未来的国际秩序。英国计划投入 14 亿英镑，以增加在轨卫星数量，完善卫星情报侦察能力，强化对“在太空、自太空或经由太空”的威胁和危险感知。《国防太空战略》作为英国《国家太空战略》(National Space Strategy)的补充与更新，凸显英国提升太空竞争力和话语权的决心。

2022 年 9 月，英国发布《英国太空力量》文件，用于指导英军运用太空力量夺取作战优势，确保太空安全。文件指出，太空是与陆、海、空类似的作战域，天基情报搜集、预警、环境监测、卫星通信、定位导航授时等太空活动能支持英军战场作战行动。太空力量是国家整体战略力量的重要组成部分，国防部要与其他政府部门、工业界、商业界和学术界建立伙伴关系，促进太空新兴技术开发，提升太空威慑能力。文件将军事航天力量的角色定位从传统信息支援向直接对抗作战转变，把运用太空力量“以天制胜”作为核心使命，推动太空作战深度融入联合作战，表明英国将加快太空力量建设，积极构建以军事实力为核心的国家太空整体力量运用体系，增强战略威慑能力。

3.澳大利亚发布《国防太空战略》，将加强与盟国合作

2022 年 3 月，澳大利亚发布《国防太空战略》，描述了太空环境中的战略背景，阐明了澳大利亚在太空领域的愿景和使

命，并确定了实现太空愿景的 5 条工作路线及太空能力阶段性交付成果。报告指出，澳国防部应充分认识太空对国家安全的重要性，认为太空是与陆地、海洋、空中、赛博空间并列的作战域。面对日益激烈的太空竞争，该战略提出了支持澳大利亚太空发展的 5 条基本路线：一是增强国防部太空能力，确保联合部队在拥挤、对抗和竞争的太空环境中使用太空的能力；二是交付军事效果，融入全政府一盘棋机制(Whole of Government)，融入盟友和伙伴，以保障澳大利亚国家安全；三是在国家层面上提高对太空重要性的认知；四是提高澳大利亚的主权太空能力(Sovereign Space Capability)，以支持可持续的国家太空事业体系的开发；五是稳步发展国防太空事业体系，确保对太空域连贯的、高效率的和有效果的利用。

4.北约发布新太空政策，强化集体防御体系建设

2022 年 1 月，北约发布《太空政策》，把太空域纳入集体防御体系，以捍卫北约在太空域的安全利益。政策认为，鉴于太空系统在冲突中的优势及盟国对太空系统的依赖，发展各盟国的太空能力应成为高优先级目标，同时促进盟国对太空在危机或冲突中的作用形成共识。政策列出了北约在太空中的 4 个关键角色：一是把太空及太空相关事项融入北约核心任务（集体防务、危机管理、合作安保）的交付之中；二是作为就“威慑和涉防务太空开发进展”进行政治-军事磋商和

信息共享的论坛；三是确保向联盟的行动、任务和其他活动提供有实效的太空支持和太空效应；四是促进盟国太空服务、产品和能力之间的兼容性与互操作性的发展。该政策明确了北约的九大工作线(Lines of Effort, LOE)：太空支持；太空域感知；威慑、防御和韧性；能力开发与互操作性；训练和演习；战略沟通和及时响应的太空行为；科学、技术和创新；产业；伙伴关系。

5.对中国的影响与启示

当前，在国际战略竞争日趋激烈的态势下，为争夺战略竞争制高点，掌握太空开发主动权，西方主要航天国家在美国的带领下纷纷调整太空战略，并将太空军事能力建设视为发展重点，推动国际太空战略竞争呈现出新的发展动向。面对国际太空竞争和安全风险加剧的态势，中国应采取积极对策：一是面向世界科技前沿和国家重大战略需求，以航天重大工程为牵引，加快关键核心技术攻关和应用，大力发展太空技术与系统，全面提升进出、探索、利用和治理太空能力，推动航天可持续发展；二是积极制定发展航天事业的政策与措施，科学部署各项航天活动，充分发挥有效市场和有为政府作用，营造良好发展环境，推动航天事业高质量发展；三是倡导世界各国一起推动构建人类命运共同体，坚持在平等互利、和平利用、包容发展的基础上，深入开展航天国际交流合作。

（三）低轨星座布建规模持续增长，应用服务范围不断扩大

低轨卫星星座因广覆盖、全天候等特点，成为弥补地面网络覆盖盲区最有效的解决方案，是未来天空地海一体化网络的重要组成部分，更是大国太空领域竞争焦点。2022 年，美国 SpaceX 公司“星链”星座部署起速，基本具备全球通信覆盖能力，并推出陆、海、空版终端设备，应用范围进一步扩大；俄罗斯开展“球体”星座建设前期试验工作；英国 OneWeb 星座受俄乌冲突影响，部署进程一度放缓；欧盟公布低轨星座建设规划，拟构建主权星座。

1.美国 SpaceX 公司“星链”星座部署加速推进，覆盖和应用范围进一步扩展

2022 年，美国 SpaceX 公司通过 34 次发射将 1732 颗“星链”卫星部署入轨，使在轨运行工作的“星链”卫星达到 3375 颗。“星链”星座自 2019 年 5 月首批试验星发射起，截至 2022 年 12 月底，共部署 3666 颗卫星，成为全球首个初步建成的低轨互联网星座，也是人类有史以来卫星数量最多的星座。

2022 年，“星链”星座覆盖范围进一步扩大。2022 年 7 月，美国 SpaceX 公司发射第 50 批 46 颗“星链”v1.5 卫星，正式部署“星链”星座第 3 个轨道层，即极轨层。极轨“星链”覆盖南北极圈地区，为实现全球通信覆盖奠定基础。2022 年 9 月，美国 SpaceX 公司在南极麦克默多站（McMurdo Station，

美国科学基金会南极科研中心）部署天线，对“星链”网络通信能力开展测试。此次部署后，“星链”卫星网络实现了对全球七大洲的通信覆盖。根据测算，“星链”星座可为麦克默多站提供超过 17 兆比特每秒的网络连接能力，并可同时为 1000 人提供宽带服务。2022 年 10 月，美国 SpaceX 公司“星链”系统在日本开通通信服务。根据 SpaceX 发布的“星链”覆盖地图，日本近 50%的地区已实现服务覆盖。日本用户表示，“星链”系统在东京都辖下的 23 个特别区的下载速度达 50 兆比特每秒，延迟为 34 毫秒。“星链”在日本的服务费为每月 1.23 万日元（约合 94 美元），地面终端售价为 7.3 万日元（约合 588 美元）。截至 2022 年年底，“星链”系统正在为 44 个国家和地区提供卫星互联网覆盖服务。

2022 年，美国 SpaceX 公司陆续推出海事、车载移动、航空版终端，拓展“星链”应用场景和服务范围。2022 年 7 月，美国联邦通信委员会(FCC)批准了 SpaceX 在包括汽车、卡车、船舶和飞机等移动工具上使用其“星链”卫星网络的申请。2022 年 9 月，美国 SpaceX 公司为海事客户推出新型客户终端设备。该设备拥有 140 度的信号接收视野，工作温度范围为负 30～50 摄氏度，抗风能力等级达到每小时 280 千米以上，设备融雪能力达到每小时 75 毫米，平均功耗范围为 110～150 瓦。2022 年 9 月，美国 SpaceX 公司与远程通信提供商 Speedcast 公司签署协议，将为石油钻井平台、商船和其他偏

远地区客户提供“星链”宽带服务。该协议的签署标志着Speedcast 公司成为“星链”网络服务系统的第一位分销商。2022 年 10 月，美国 SpaceX 公司在原有车辆固定终端基础上推出新型车载移动终端，可为行驶的陆地车辆提供实时“星链”宽带服务。车载移动终端配备的天线具有增强全球定位系统(GPS)功能，能够提升恶劣环境下的导航定位能力，购买费用为 2500 美元，每月服务费为 135 美元。2022 年 10 月，美国 SpaceX 公司宣布发展航空专用“星链”卫星互联网服务，拟于 2023 年年中开始交付终端产品。航空“星链”终端费用为 15 万美元，每月服务费为 1.25 万至 2.5 万美元。航空“星链”服务将为客机提供 350 兆比特每秒的宽带流量，网络延时约为 20 毫秒，可在飞行全程中为乘客使用流媒体、视频通话、在线游戏、虚拟专用网络等数据应用提供支持。此外，“星链”星座在全球应急救灾方面也提供了通信支援服务。2022 年 1 月，南太平洋岛国汤加因火山喷发导致海底光缆被毁。SpaceX 公司派遣团队在汤加附近的斐济建设了地面站，并为汤加提供“星链”终端，帮助其恢复网络通信。2022 年 3 月，澳大利亚新南威尔士州北部的居民遭遇洪水，导致通信中断。SpaceX 公司为该地区严重受灾城镇提供“星链”终端，帮助该地区民众恢复网络连接。

2.俄罗斯公布“球体”星座系统信息，并发射首颗试验星

2022 年，俄罗斯国家航天集团(Roscosmos)公布的“球体”星

座信息显示，该星座将由 388 颗卫星组网，包括 289 颗通信和广播卫星和 99 颗遥感卫星，为俄罗斯全境提供固定广播、宽带接入、对地观测、物联网等多种服务。其中，通信系统由“快车”(Express)、“快车”-RV(Express-RV)、“亚马尔”(Yamal)、“马拉松”(Marathon)物联网星座、“斯基泰人”(Skif)中轨宽带星座组成；遥感卫星系统包括“检阅”(Smotr)遥感卫星、“金雕”-O(Berkut-O)和“金雕”-VD 光学观测卫星及“金雕”-X 和“金雕”-XLP 雷达卫星。目前，俄罗斯政府已为 149 颗通信和广播卫星及 13 颗地球遥感卫星提供了资金预算。

2022 年 10 月，俄罗斯国家航天集团成功发射“球体”项目首颗卫星“斯基泰人-D”。“斯基泰人-D”卫星重量不到 200 千克，功耗约为 250 瓦，有效寿命 3 年，将成为俄未来宽带互联网接入“斯基泰人”系统技术的演示卫星。俄国家航天集团前总裁德米特里·罗戈津(Dmitry Rogozin)表示，“球体”项目将包括 5 个提供电信服务的卫星星座，以及 5 个提供观测服务的卫星星座。

3.英国 OneWeb 星座计划受俄乌冲突影响部署迟滞

2022 年，英国 OneWeb 公司通过 3 次发射将 112 颗卫星送入轨道，将 OneWeb 星座规模扩大至 502 颗，完成初期规划 77%的部署任务。OneWeb 公司原定于 2022 年完成由 648 颗卫星组网的初期星座部署工作，为北纬 50 度以上地区提供卫星

互联网服务。受俄乌冲突影响，俄罗斯拒绝为 OneWeb 星座继续提供发射服务，导致 OneWeb 星座部署进程迟滞。2022 年 10 月，印度太空研究组织(Indian Space Research Organisation, ISRO)利用重型运载火箭 GSLV MK3 将 36 颗 OneWeb 卫星送入近地轨道，帮助 OneWeb 公司恢复星座部署进程。

2022 年 7 月，法国卫星公司 Eutelsat 与英国 OneWeb 公司达成协议，将通过合并成为欧洲最大的卫星公司，以与 SpaceX 公司竞争未来太空通信市场。2022 年 10 月，Eutelsat 和 OneWeb 公司拟于 2028 年推出 OneWeb 项目二代星座(Gen-2 OneWeb)，并将为该星座联合开发地面网络，以发挥混合网络的协同效应。Eutelsat 公司表示，两家公司的技术合作将能够实现更多的场景应用，并将满足未来全球通信市场需求。

4.欧盟拟投资 24 亿欧元构建低轨星座

2022 年 12 月，欧盟提出将投资 24 亿欧元建立新型主权卫星星座 IRIS2。IRIS2 星座将是继“伽利略”(Galileo)和“哥白尼”之后欧洲的第三个太空旗舰项目。该星座的目标是为政府用户提供安全的卫星连接，支持对经济、环境、安全和国防至关重要的应用，并进一步开发包括通信盲区在内的全球高速宽带服务。此外，该星座将利用量子通信等颠覆性技术，确保在全球范围内提供可靠、安全和低价的卫星通信服务。预计，该卫星星座将在 2025—2027 年建造和发射约 170 颗低

轨卫星。

5.对中国的影响与启示

低轨卫星星座是天地一体化信息网络的重要组成部分，低轨卫星互联网星座的发展将促进天地一体信息网络的联通，推动信息基础设施的新变革。当前，全球范围内低轨卫星大发展时代已经到来，主要航天国家均将低轨卫星星座建设视为抢占太空频率轨位资源和未来太空战略优势的重要抓手，积极推进星座的研发与建设，大国间的太空“圈地战”将愈演愈烈。为掌握太空发展主动权，中国需采取措施积极应对：一是在国家层面应从政策、资金、技术等方面支持航天企业在国家规划指导下发展小卫星星座，积极争取频率和轨道资源，维护国家太空安全和太空利益。二是要提升自身参与太空频轨规则制定的影响力和话语权，借助国际电信联盟和世界无线电大会等国际平台，积极推动低地球轨道的频轨制度完善。三是提早应对低轨卫星星座部署带来太空碎片增加的安全挑战和风险，维护近地轨道的太空环境可持续发展。中国可结合国际公域管理概念和现实战略需求，构建中国特色的太空交通管理技术和管理体系，推进国家太空交通管理系统建设，深度参与太空交通管理国际规则制定，为航天强国建设奠定基础。四是要发挥卫星互联网在数字经济中的独特作用，帮助提高 5G 覆盖度，推进 6G 网络架构解决“泛在覆盖”新场景要求，抢占手机卫星直连新赛道，通过技术融合

加速产业互联网发展。

（四）商业卫星广泛参与俄乌冲突，将成为军事介入新兴工具

商业卫星星座可为军方用户提供更加多样的卫星服务，提升军事卫星通信性能韧性和战场侦察覆盖广度，满足现代化军事作战需求。俄乌冲突爆发以来，美西方商业卫星在战场通信、情报搜集等方面发挥了重要作用，体现了商业卫星在现代战争中的军事应用潜力。由于商业卫星的深度介入，俄乌冲突被业界认为是世界首场“商业太空战”。

1.美国 SpaceX 公司“星链”星座成为保障乌克兰通信网络连接、作战指挥和情报传输的关键平台

俄乌冲突伊始，俄军对乌克兰境内通信设施和网络进行打击和干扰，使乌通信网络处于瘫痪状态。面对网络瘫痪的不利局面，乌克兰政府向美国 SpaceX 公司求助，希望借助“星链”系统恢复国内网络通信。2022 年 3 月，美国 SpaceX 公司应乌克兰政府请求，迅速为其提供“星链”终端，并开启了乌克兰部分地区的“星链”网络服务。2022 年 4 月，美国 SpaceX 公司和美国国际开发署(United States Agency for International Development, USAID)向乌克兰交付 5000 台“星链”终端，以帮助其应对与俄罗斯的持续冲突。截至 2022 年 12 月，乌克兰使用的“星链”终端超过 2 万台，正在俄乌冲突中发挥重

要作用。一是为乌提供高品质网络服务，保障当地基础通信能力。“星链”终端设备为政府机构、军事单位、基础设施、医疗机构、公共场所及避难所等提供不受限制的互联网连接，有力地支持政府部门与当地民众沟通及与外界沟通。同时，“星链”终端可通过特斯拉太阳能供电系统工作，为断电地区提供持续的网络通信能力。二是为军事作战提供通信和情报支持。乌军通过“星链”卫星网络实时传输无人机收集的情报，为对俄军发动袭击提供战场态势感知支持。在“星链”卫星网络的支持下，乌克兰使用美国协助开发的“德尔塔”(Delta)系统将无人机、卫星、侦察兵获得的情报汇总，并创建互动地图，构建作战态势图，帮助乌军跟踪打击俄军的坦克。同时，乌克兰利用“星链”卫星提供的网络服务，通过民众提供的图片和文字信息收集俄军情报，实现对俄军的动态感知。

2.多家商业遥感卫星公司为乌克兰提供战场态势感知服务

俄乌冲突发生后，美西方媒体公布了大量商业遥感卫星照片，高清晰度地展示了俄军的部署情况和战场实况。商业遥感卫星公司公布的图片信息不仅帮助美西方掌握了舆论的主导权，还直接为美国、北约国家和乌克兰军方提供了大量的战场情报。

美国科罗拉多州商业卫星公司 MaxarTechnologies 利用遥感卫星获取乌克兰热点地区的卫星图像，并将图像发布在网站

上，对战况进行直播。美国 Maxar 公司发布的卫星图片显示了俄军在白俄罗斯的集结情况，这被西方专家认为是俄军将从白俄罗斯直捣乌克兰首都基辅的标志。Maxar 公司发布的高分辨率卫星影像，清晰显示了机场上的苏-25 攻击机、苏-27/35 战斗机、野战医院、陆军车辆和防空部队等装备和部署情况。此外，美国的 BlackSky 公司、卡佩拉太空公司(Capella Space)、法国空中客车防务与宇航公司(Airbus Defence and Space)、芬兰冰眼公司等遥感卫星公司都通过旗下的高分辨率光学和合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)卫星拍摄到了大量俄乌战场上的高价值卫星影像。其中，美国 BlackSky 公司于 2022 年 4 月发射的两颗卫星，在发射 12 小时后就提供了乌克兰地区的卫星影像，创造了商业遥感卫星新纪录。法国空客防务和宇航部门的商业遥感卫星“昴星团”(Pleiades Neo)聚焦乌克兰，利用光学遥感和雷达遥感卫星拍摄了大量高分辨率卫星影像。2022 年 3 月，冰眼公司表示，正在和芬兰、波兰、欧盟及美国等相关国家和地区政府合作，为其行动决策提供 SAR 卫星影像支持。

3.美国加强对商业航天公司发展的支持力度，并积极开展商业卫星参与现代作战的测试与研究

随着商业卫星性能的提升，美国更加重视商业卫星在通信支持、情报获取领域的价值，正在更广泛地使用和采集商业服务和数据，并拟制定战时商业卫星响应制度。

在商业卫星通信服务方面，2022 年 4 月，美国空军基于“星链”卫星开展 F-35A“闪电Ⅱ”（Lightning Ⅱ）的地面后勤数据通信测试。第 388 战斗机联队的业务支援中队在野外机场利用“星链”网络系统连接了 F-35 通信设备，使通信连接速度提升约 30 倍。2022 年 5 月，美国北方司令部(United States Northern Command, USNORTHCOM)司令格伦·范赫克(Glen VanHerck)表示，美国将利用 OneWeb 和“星链”星座开展极地通信实验，并将把终端集成在平台及指挥所和作战中心等通信节点，使美军能够更好地共享数据和信息。2022 年 6 月，英国 OneWeb 和美国休斯公司(Hughes)在格林兰图勒空军基地(Thule)成功部署并测试了低地球轨道网络原型设备系统，证明了低地球轨道网络可在北极地区实现高速互联网连接。2022 年 6 月，美国空军第 49 试验和鉴定中队利用一架 B-52H 轰炸机的机载 IRIS 超视距(Beyond-Line-Of-Sight, BLOS)通信系统（由美国 Outlink Global Solution 公司研制）通过下一代铱星(Iridium NEXT)低轨卫星星座完成了实时语音、图像和视频等数据传输，将帮助 B-52H 轰炸机实现全球覆盖。2022 年 8 月，美国空军与 SpaceX 公司签订一份为期 12 个月（2022 年 8 月到 2023 年 7 月）、价值 192 万美元的合同，为美国欧洲-非洲空军司令部位于德国拉姆施泰因(Ramstein)空军基地的第 86 空运联队提供支持。美国空军称，“星链”是唯一一个能够同时在欧洲和非洲提供低地球轨道卫星通信的商业

系统，并在对抗环境中具有抗干扰能力。

在商业遥感数据采集方面，2022 年 7 月，美国空军研究实验室(AFRL)拟开发“全球统一环境”(Global Unified Environment, GLUE)系统，加强对商业卫星图像的采集能力。GLUE 将允许作战指挥部从商业供应商和盟国合作伙伴获取卫星图像数据，以满足军事行动需求。预计，GLUE 系统将在 2024 财年交付太空部队。2022 年 7 月，美国太空军采购部门考虑在大型商业星座上搭载战术情报监视侦察(Tactical ISR)载荷，为美军及盟友的一线作战部队指挥官提供快速更新的战场情报数据。2022 年 8 月，美国 SpaceLink 公司与美国陆军签署合作研发协议，以研究使用该公司数据中继星座将商业卫星图像直接传送给地面部队的方法。该中继星座将由 4 颗卫星组成，将同时安装光学和射频通信链路，拟 2024 年开始部署于中地球轨道。根据协议，SpaceLink 公司将帮助美国陆军建模仿真分析，展示政府系统如何与中继网络连接。2022 年 9 月，美国国家侦察局(National Reconnaissance Office, NRO)授予 Aurora Insight、HawkEye 360、Kleos Space、PredaSAR、Spire Global 和 Umbra Lab 六家公司合同，允许国家侦察局访问这些公司的系统和商业产品，探索无线电监测的潜力。这些公司使用低轨道卫星跟踪船舶、车辆或任何发射射频信号的设备，拥有大量射频数据，可为美军提供情报。

在战时响应方面，2022 年 10 月，美国太空司令部和太空军

与情报界合作，制定针对商业太空系统的使用要求及使用方式规范。美国太空军表示，俄乌冲突揭示了商业航天力量对国家安全的价值，但战时军方如何与商业航天公司合作仍存在悬而未决的问题，现在需要明确与商业航天的关系，将商业航天服务纳入到混合体系架构中；提供财政支持，鼓励商业航天的研发；制定相应政策，保护商业航天的利益，使商业航天公司在战时更好地发挥作用。2022 年 10 月，美国太空军寻求深化与商业公司的伙伴关系，建立一支商业航天器征召预备队，类似于民用后备航空队可随时响应战时需求。太空系统司令部创新和原型设计局(Innovation and Prototyping Directorate)表示，商业航天公司已提供了国防部所依赖的许多能力，包括卫星通信、太空态势感知及情报、监视和侦察。美国太空军指出，将从源于多家商业公司的资源中获取能力与更广泛的卫星和地面控制系统进行整合，至关重要。

此外，2022 年 12 月，SpaceX 公司在官方网站发布“星盾”(StarShield)计划，将“星盾”定位为“为政府实体提供安全保密服务的卫星网络”。“星盾”计划初始阶段将重点聚焦 3 个任务领域：一是对地观测，发射带有遥感载荷的卫星，把经过处理的数据直接提供给用户；二是通信，为配备“星盾”用户设备的政府用户提供安全可靠的全球通信；三是托管搭载载荷，“星盾”建造的卫星平台支持军事有效载荷搭

载任务。

4.对中国的影响与启示

通过对俄乌战况的分析可见，以 SpaceX 公司为代表的商业太空力量日渐壮大，不仅深度介入俄乌冲突，而且对改变战争态势和进程产生重大影响，已成为国防力量的“倍增器”，成为美西方军民融合的典型案例。同时，在全球新一轮科技革命和产业革命的大背景下，美国等西方国家将继续支持商业航天公司发展，积极推进商业航天军事应用，进一步增强其国防军事实力。面对商业航天力量与现代作战融合的新趋势，中国应积极应对：一是政府主导建设的大规模太空基础设施所创造的大规模需求，要向“大众创业、万众创新”活动进行开放，从而带动商业航天行业发展；二是加强政策创新和资金支持，扶持优质商业航天企业发展，促进商业航天应用创新发展；三是构建中国商业航天发展长期战略规划，引导中国商业航天长期健康可持续发展；四是借鉴欧美军民商一体化发展做法，将“民建军用、以民保军”等方式作为中国太空信息基础设施建设的备选模式。

（五）手机卫星直连技术备受关注，有望引发全球通信变革

随着低轨星座的快速发展，“手机+低轨卫星通信”或将成为推动天地一体化网络建设的重要技术方向，具有广阔的应用市场。2022 年，华为和苹果公司率先推出手机卫星紧急通

信服务，实现手机卫星直连商用化“0 到 1”的突破。以 SpaceX、Lynk Global 为代表的商业航天公司与 T-Mobile、比利时电信(BICS)等移动通信公司积极开展合作，超前布局手机卫星直连业务，抢占未来新兴通信市场。联发科和 AST SpaceMobile 公司开展手机卫星直连技术测试，为商业化应用奠定技术基础。

1.苹果和华为率先推出手机卫星紧急通信服务

2022 年 9 月，美国苹果公司与 GlobalStar 公司建立合作伙伴关系，为 iPhone 14 手机提供紧急卫星通信服务。苹果公司表示，iPhone 14 手机具有可连接卫星功能的硬件和软件，用户将手机指向既定方位，即可以与卫星创建连接，获取紧急 SOS 服务。该服务无法通过卫星连接拨打电话，但可以发送短消息，已率先在美国和加拿大地区进行试点，并可免费使用两年。2022 年 12 月，苹果公司将通过卫星紧急呼救(Emergency SOS via Satellite)和通过卫星找我(Find Me via satellite)的功能扩展到英国、法国、德国和爱尔兰，使 iPhone 用户在户外没有通信信号或 WiFi 连接的情况下，利用卫星连接拨打紧急电话。此外，Globalstar 作为苹果移动设备的卫星运营商合作伙伴，同意将该公司当前和未来 85%的网络容量预留给 iPhone 手机，并提供包括人员、软件、卫星系统等在内的所有服务和维护支持。

2022 年 9 月，华为推出旗舰高端机型 Mate50 系列，具备北

斗卫星通信功能。Mate50 系列是业界首款支持北斗卫星消息的大众智能手机，可为海上、沙漠、无人区等无地面网络信号覆盖地区提供紧急通信服务，通过畅连 App 发送文字和位置信息，多条位置还可生成轨迹地图。与 iPhone 的紧急通信服务相比，Mate50 系列不仅能发送 SOS 消息，还能利用北斗短报文功能，向指定人员发送文字信息。2023 年，华为或将推出卫星通信 2.0 版本，可实现双向收发短信，并支持发送语音短信和短时语音通话，使卫星通信功能在紧急情况下发挥更大作用。

2.全球多家公司推出手机卫星直连项目，积极布局手机卫星直连市场

2022 年 7 月，美国 SpaceX 公司向美国联邦通信委员会发出请求，拟获得 2GHz 频段使用许可，以升级“星链”移动卫星服务(Mobile Satellite Service, MSS)。SpaceX 公司将为“星链”卫星增加一个模块化有效载荷，以传输 2GHz 频段的频率。对此，美国高盛表示，2GHz 移动卫星服务系统将利用现有的地面设备和用户终端，并增加新的地球站设备，以优化通信性能。2022 年 8 月，美国 SpaceX 公司与 T-Mobile 公司达成协议，拟于 2023 年推出手机卫星直连服务。SpaceX 公司表示，2023 年发射的“星链”V2.0 卫星将配备直径达 5～6 米的天线，使其能够使用 T-Mobile 的部分中频 PCS 频谱(2.5GHz)广播服务。T-Mobile 表示，手机卫星直连服务将覆盖

美国大陆、夏威夷、阿拉斯加部分地区、波多黎各等区域，初期可实现短信收发功能，长期可实现语音和数据传输能力。

2022 年 7 月，爱立信(Ericsson)、高通和泰雷兹(Thales)公司宣布拟在地球轨道卫星网络上部署 5G，项目投资约 80 亿欧元，开展技术研发、测试和验证等工作。三方拟开展以智能手机为重点的 5G 非地面网络(5G NTN)测试和验证，拟为全球提供 5G 连接，并实现宽带数据服务的全球覆盖。其中，泰雷兹作为欧洲知名航空航天公司，将负责建造卫星；爱立信作为通信设备商，将负责地面网络部署；高通作为芯片终端生态领军者，将测试智能手机，并实现手机与低轨道卫星的通信。目前，该项目处于起步阶段，三方分别进行平行研究，预计其通信网速介于 4G 和 5G 之间。

2022 年 9 月，美国联邦通信委员会授予 Lynk Global 公司首个商业卫星直连运营许可，允许其向全球提供手机连接、紧急求救和物联网设备连接服务。2022 年 9 月，Lynk Global 与比利时电信合作，拟为全球偏远地区提供手机卫星直连的移动通信服务。比利时电信将利用其移动网络将 Ly n k 的卫星星座与全球移动运营商进行匹配。Lynk Global 曾于 2020 年 2 月利用“太空蜂窝发射塔”技术成功实现卫星与普通手机终端的通信连接，成为全球第一家成功利用卫星为普通手机提供宽带服务的公司。该公司的一期星座拟部署 10 颗卫星，为巴哈马、中非、蒙古国等国家和地区提供应急短信通信商

业服务，未来拟部署 5000 颗卫星，为全球普通手机提供语音和数据流量服务。

3.商业公司推进发展手机卫星直连业务，开展相关技术测试

2022 年 8 月，联发科(MediaTek)宣布，搭载联发科 5GNR NTN 卫星连网功能芯片的智能手机已在实验室环境测试中成功连线卫星。此次是 5G 手机首次支持非地面网络的双向资料传输。联发科表示，此次测试遵循 5G 国际标准组织 3GPP Rel-17 规范定义的功能和程序，使用联发科 5GNR NTN 卫星网络功能移动通信芯片，配搭罗德史瓦兹(Rohde Schwarz)的低轨卫星通道模拟器及工研院开发的测试基地台，在实验室中模拟高度为 600 千米、移动速度达每小时 27000 千米的低轨卫星。在此次实验中，联发科采用与智能手机相同的组件，展示了将 5G NTN 技术用于卫星通信的可行性。5G NTN 技术通过利用现有的移动通信网络的规模经济效应，提高全球服务的可靠性，帮助用户在无服务或服务信号弱的地区获得稳定的 5G 连接。该技术不仅可以让 5G 用户数量继续保持增长，还可以应用于应急通信、交通、农业、车队和重型机械管理及物联网设备等领域。

2022 年 9 月，美国 AST SpaceMobile 公司成功部署 BlueWalker-3 卫星，开展手机卫星直连技术测试。BlueWalker-3 重约 1.5 吨，搭载了 AST SpaceMobile 独创的卫星基站，拥有一个面积达 64.4 平方米的天线阵列，用户使用

普通手机就可直接访问天基蜂窝宽带网络。目前，AST SpaceMobile 已经获得美国联邦通信委员会的实验许可证，可在美国得克萨斯州和夏威夷的指定区域测试 BlueWalker-3 星地直连。AST SpaceMobile 拟在 2023 年发射 5 颗卫星，建立初期运行网络，提供手机卫星直连通信服务。

4.对中国的影响与启示

手机卫星直连是顺应未来网络信息技术和航天前沿技术发展的必然选择，将对全球通信产业和航天技术应用带来颠覆性变革。目前，手机卫星直连处于初期发展阶段，面临低轨星座布建成本高企、频谱资源争夺、通信标准制定及卫星手机硬件升级等诸多挑战。面对复杂多变的市场发展环境和激烈的国际竞争，中国应四措并举，瞄准前沿颠覆性创新技术，加快推进手机产业和卫星通信产业融合发展：一是应在国家层面研究制定低轨卫星通信发展指导文件，积极推进低轨通信星座部署，加速推进太空基础设施布建；二是加大与国际电信联盟等国际组织的沟通协调力度，积极参与国际太空规则制定和太空治理机制构建；三是加强技术创新，推进小卫星批产、低成本卫星制造、可重复使用火箭、手机天线等技术和产品的研发力度，保障关键核心技术自主可控；四是加大政策支持力度，鼓励商业公司布局手机卫星直连产业，培植上下游产业生态，使卫星产业与地面移动产业通力合作，加快卫星与地面通信融合进程。

二 、卫星技术

2022 年，全球卫星研制与部署保持高速发展态势。主要航天国家和地区继续推进天基信息获取、天基信息传输、天基导航定位及天基预警能力的建设与发展。在通信卫星方面，美国、俄罗斯及欧洲等国家和地区在部署新型通信卫星的同时，推进低轨通信卫星技术的研制与测试。在侦察与遥感卫星方面，美国、俄国、德国、印度等积极部署新型侦察卫星，进一步提升情报、监视与侦察能力。在导航卫星方面，美国、俄国、欧洲继续推进全球导航卫星星座部署、更新及升级，并开展对低轨卫星导航的技术研究。在预警卫星方面，美俄持续完善现有天基预警体系，并发展对高超声速威胁的探测能力。

（一）通信卫星

2022 年，主要航天国家和地区持续补网发射通信星座卫星，重点推进卫星光学星间链路技术验证与在轨部署。美国按计划推进国防太空体系架构(National Defense Space Architecture, NDSA)研发与部署，加速太空能力发展变革，助力实现未来联合全域作战。俄罗斯对军事通信卫星进行升级，不断扩展通信网络范围。欧洲部署多颗高频通信卫星，为建设高容量、高速率、高带宽通信网络奠定基础。

1.美国太空发展局推进“国防太空体系架构”，持续部署“传

输层”卫星

2022 年 1 月，美国太空发展局(Space Development Agency, SDA)发布有关“国防太空体系架构”第一阶段地面运行与集成段的信息征询书。此次征询的核心功能包括跨架构中地面、链路、太空和用户段的整体管理、网络管理、任务管理、有效载荷数据管理及星座监控。第一阶段地面运行与集成工作范围包括开发、装备、管理和运行先进的运行中心，运行地面入口点，以及进行地面和太空段集成。国防太空体系架构中的“传输层”(Transport Layer)卫星星座是太空发展局首个利用更小、更低成本卫星开展关键军事行动的重大项目，旨在通过商业航天发展，利用光学星间链路降低传感器到射手之间的数据传输时延。

2022 年 3 月，美国太空发展局授予洛克希德·马丁、诺斯罗普·格鲁曼和约克(York)3 家公司总价值约 18 亿美元的合同，为 1 阶段(Tranche 1)星座生产并交付共 126 颗卫星。2022 年 10 月，美国太空发展局公布第 0 批光通信终端供应商名单，将由德国 Mynaric、美国 SA Photonics、美国 Skyloom 和法国 Tesat 公司为 0 阶段(Tranche 0)“传输层”和“跟踪层”(Tracking Layer)卫星提供光通信服务。2022 年 12 月，美国地球轨道公司(Terran Orbital)向总承包商洛克希德·马丁公司交付“国防太空体系架构”中最后 10 个 0 阶段“传输层”卫星平台，后续还将为 1 阶段“传输层”卫星设计和制造卫星平台。美

国太空发展局拟于 2024 年 9 月前，发射 144 颗 1 阶段“传输层”卫星，形成网状网络，达到初始作战能力。

“传输层”星座将为美国提供高韧性、低延迟、大容量的数据传输通信，为未来联合全域指挥控制提供关键能力。同时，国防太空体系架构将为美国提供超视距跟踪、目指和通信等多重能力，将大幅扩展美国作战选择，并允许更多盟友将各自拥有的能力带入网络。

2.美国军方在近地轨道成功演示验证星间激光通信

2022 年 5 月，美国太空发展局和 DARPA 利用“曼德拉”-2 商业卫星平台成功建立光学链路，在相距 100 千米的低地球轨道，成功开展了通信速率超过 200 吉比特每秒的星间激光通信试验。此次演示验证了利用商业可用卫星总线和激光终端建立网状网络的可行性，将为美军下一代的“国防太空体系架构”实现卫星间通信奠定基础。

3.DARPA 启动“天基自适应通信节点”项目，为增强太空通信在轨互操作能力提供支持

2022 年 8 月，DARPA 启动天基自适应通信节点(Space-Based Adaptive Communication Note, Space-BACN)项目，旨在创建一个低成本、可重新配置的光通信终端，以适应大多数卫星间光链路标准，在不同的卫星群之间进行数据转换。DARPA 希望 Space-BACN 将创建一个低地球轨道卫星的分布式互联网络，使目前无法相互连接的军用、政府、商业和私营部门卫

星群间实现无缝通信。

目前，DARPA 已为 Space-BACN 第一阶段选择了 11 个来自学术界和不同规模企业的研究团队，对 3 种独立技术开展研究，具体技术包括：低成本光学孔径、可重新配置的调制解调器及跨星座光学卫星星间链路通信指挥和控制模式。第一阶段结束时，DARPA 将对前两项技术进行初步的设计审查，并将在仿真环境中针对基线场景演示第三项跨星座光学卫星星间链路通信指控模式技术。

4.美国 SpaceX 公司成功发射波音公司 V 波段通信卫星

2022 年 9 月，美国 SpaceX 公司在拼车发射任务中成功将波音公司 V 波段通信卫星部署入轨。该卫星由美国星球数字公司(Star Digital)制造，将在轨验证 V 波段通信抗干扰技术。美国联邦通信委员会于 2021 年 11 月正式批准了波音公司建设由 147 颗卫星组成的 V 波段通信星座。与 Ka、Ku 波段相比，V 波段频率更高、带宽更大，可提升连接速度，增大通信吞吐量。

5.美国国际通信卫星公司成功部署两颗 C 波段卫星

2022 年 10 月，美国 SpaceX 公司使用“猎鹰”-9 运载火箭搭载“银河”-33(Galaxy-33)和“银河”-34(Galaxy-34)卫星发射升空，为美国国际通信卫星公司(Intelsat)成功部署两颗 C 波段卫星。两颗卫星成功入轨地球静止转移轨道，以替换 2003 年和 2005 年发射的“银河”-12(Galaxy-12)和“银河”

-15(Galaxy-15)卫星。同时，美国联邦通信委员会将卫星通信C 频段中 300MHz 划分给了 5G 网络，如果美国国际通信卫星公司能够在 2023 年 12 月前将原来使用该频段的用户转移到这两颗新卫星上，将获得 48.7 亿美元的 C 频段频谱加速清理补偿费。

6.美国 SpaceX 公司“猎鹰”-9 火箭成功将 Eutelsat 10B 通信卫星送入轨道

2022 年 11 月，美国 SpaceX 公司使用“猎鹰”-9 火箭于佛罗里达州卡纳维拉尔角成功发射 Eutelsat 10B 通信卫星。该卫星携带两个多波束的高通量 Ku 波段载荷，提供约 35 千兆比特每秒速度通量，将为欧洲、地中海盆地、中东、非洲、大西洋和印度洋高流量地区的航空和海事客户提供通信服务。此外，该卫星还携带 2 个宽波束的 C 波段和 Ku 波段有效载荷，用于替换 Eutelsat 10A 电视广播卫星。

7.俄罗斯成功发射“子午线”-M 通信卫星

2022 年 3 月，俄罗斯国防部使用“联盟”-2.1a(Soyuz 2.1a)运载火箭成功发射“子午线”-M(Meridian-M)通信卫星。“子午线”-M 卫星是俄罗斯新一代闪电轨道(Molniya orbit)军事通信卫星，用于替代“闪电”(Molniya)卫星。“子午线”系列卫星通过沿海和地面站为北海航线区域的海船和侦察机提供通信服务，还可用于扩展远东和西伯利亚地区地面站的通信能力。

8.欧洲卫星公司成功部署 SES-22 卫星

2022 年 6 月，美国 SpaceX 公司利用“猎鹰”-9 运载火箭成功发射欧洲卫星公司(SES)SES-22 卫星。该卫星由泰雷兹·阿莱尼亚太空公司(Thales Alenia Space)研制，发射质量约 3500 千克，设计寿命 15 年，可为美国家庭提供电视、广播及其他关键数据传输服务。SES-22 卫星可使欧洲卫星公司现有的 C 频段过渡到更高频段，帮助美国联邦通信委员会完成 C 波段频谱拍卖计划，推进美国 5G 网络建设进程。未来，欧洲卫星公司将获得美国联邦通信委员会提供的 C 波段迁移补偿。

9.法国卫星公司 Eutelsat“量子”号通信卫星开始提供商业服务

2022 年 8 月，法国 Eutelsat 公司的“量子”号(Quantum)通信卫星作为首颗可在太空中完全重新编程的商业卫星投入商业使用。Eutelsat 公司已向包括政府和其他用户在内的组织出售了其 8 条卫星波束中的 6 条，用于提供数据和移动通信服务。该卫星的波束可通过改变形状和方向，近实时地为行进中的飞机、卡车和汽车提供网络服务。

10.法国 Eutelsat 公司成功发射高功率宽带通信卫星

2022 年 9 月，法国 Eutelsat 公司成功发射甚高吞吐量卫星(Eutelsat Konnect VHTS)高功率宽带通信卫星，将为欧洲、北非和中东提供高速宽带和移动网络连接服务。

该卫星作为一颗 Ka 波段超高通量卫星，基于泰雷兹·阿莱

尼亚太空公司的全电动平台 Spacebus Neo 设计制造，并得到了法国航天局(Centre National d'Etudes Spatiales, CNES)和欧洲航天局的大力支持。甚高吞吐量卫星高约 9 米，翼展超过 45 米，重量超过 7 吨，设计寿命超过 15 年，通信容量达 500 吉比特每秒，是欧洲迄今体积和容量最大的地球同步通信卫星。同时，该卫星搭载了有史以来最强大的在轨数字处理器，可实现灵活的容量分配和最优的频谱使用。预计，该卫星将于 2023 年下半年开始提供商业服务。

11.埃及部署 Nilesat-301 通信卫星

2022 年 6 月，美国 SpaceX 公司成功发射埃及 NileSat-301 通信卫星。该卫星发射质量 4100 千克，在轨运行质量约 3900 千克，搭载 32 个 Ku 波段转发器和 6 个 Ka 波段转发器，可为非洲北部和中东地区提供服务。Nilesat-301 卫星由法国泰雷兹·阿莱尼亚太空公司研制，是埃及尼罗河卫星公司(Nilesat)负责运营的民用通信广播卫星，主要用于数字通信和直播到户电视广播、无线电广播和多媒体业务。

（二）侦察监视与遥感卫星

2022 年，主要航天国家持续稳步发展先进侦察与遥感卫星，多星组网规模、能力等不断延伸。美国发射多颗卫星继续扩大太空观测范围，着力增强太空态势感知能力；俄罗斯加强现有天基侦察监视系统高分辨和定位能力；德国、印度和伊

朗等部署高精度侦察卫星。

1.美国发射“地球同步轨道太空态势感知项目”卫星

2022 年 1 月，美国使用“宇宙神”-5(Atlas)火箭于卡纳维拉尔角航天中心成功发射地球同步轨道太空态势感知项目(Geosynchronous Space Situational Awareness Program, GSSAP)的第 5 及第 6 颗卫星。此次发射任务代号为“美国太空军任务”-8(United States Space Force-8, USSF-8)，旨在将两颗 GSSAP 卫星送入地球同步轨道。

GSSAP 卫星是诺斯罗普·格鲁曼公司为美国太空军研制的业务型高轨巡视卫星。GSSAP 卫星利用与地球同步轨道的相对漂移进行轨道机动，对太空中的目标进行探测、编目和精确侦察。此外，GSSAP 卫星作为地球同步轨道机动平台，还可能具备太空进攻能力。

2.美国国家侦察局发射“锁眼”侦察卫星

2022 年 9 月，美国国家侦察局(NRO)利用“德尔塔”-4 重型（Delta Ⅳ Heavy，D4H）运载火箭发射第 19 颗“锁眼”-11 卫星。卫星部署轨道高度约 400 千米，倾角约为 74 度。“锁眼”系列近地轨道卫星由洛克希德·马丁公司制造，是美国现役分辨率最高的光电侦察卫星，全色分辨率优于 0.1 米，红外分辨率可达 0.5 米，旨在开展对地观测任务。“锁眼”KH-11 卫星使用电荷耦合器摄像机拍摄地物场景图像，可将拍摄的照片实时传输回地面，为美军战略决策提供关键信息

支撑。

3.俄罗斯发射“中子”-1 光学侦察卫星

2022 年 2 月，俄罗斯利用“联盟”-2.1a 运载火箭成功发射一颗编号“宇宙 2553”(Kosmos 2553)的保密军事卫星，部署在 1987 千米×1995 千米、67.08 度倾角的轨道上。该卫星代号为“中子”-1(Neitron-1)，是一颗军事光学侦察卫星，由机械制造科研生产联合公司(NPO Mashinostroyeniya)设计，主要用于对地球目标进行光学侦察和对在轨卫星进行精确成像。

4.俄罗斯“芍药”-NKS 海洋监视卫星通过国家试验，开始执行战斗值班任务

2022 年 10 月，俄罗斯“芍药”-NKS(Pion-NKS)海洋监视卫星通过国家试验，开始执行战斗值班任务。“芍药”-NKS 卫星单体重量 6.5 吨，带有两组大型雷达天线和太阳能电池板，在轨服役时间至少 4 年。该卫星作为海上侦察监视卫星，主要任务是对美国航母编队及其他舰艇进行侦察定位，为远程反舰导弹的攻击提供目标指引。

5.德国部署“萨拉”-1 军用雷达侦察卫星

2022 年 6 月，德国使用“猎鹰”-9 运载火箭成功发射“萨拉”-1(SARah-1)军用雷达侦察卫星，以开启为期 10 年的全天候观测图像采集任务。“萨拉”-1 卫星由欧洲空客公司制造，是德国于 2013 年订购的 3 颗合成孔径雷达成像卫星中的首颗卫星。该卫星采用有源相控阵雷达天线，具有指向速度快、

天线波束成形灵活等优点，可快速提供图像数据。

6.印度成功发射“雷达成像卫星”-1A

2022 年 2 月，印度太空研究组织(Indian Space Research Organisation, ISRO)使用“极轨卫星”-XL C52 运载火箭(Polar Satellite Launch Vehicle-XL.C52, PSLV-XL.C52)成功发射“雷达成像卫星”-1A(Radar Imaging Satellite 1A, RISAT-1A)。该卫星又名 EOS-04，是印度首型国产民用合成孔径雷达成像卫星(Radar Imaging Satellite 1, RISAT-1)系列的第 2 颗卫星，发射质量 1710 千克，运行轨道高度为 529 千米的太阳同步轨道，设计寿命 10 年。同时，RISAT-1A 卫星采用 C 频段合成孔径雷达系统，中心频率 5.35 吉赫兹，最高分辨率为 1 米，可全天候获取高分辨率图像，支持农业、林业、种植业、土壤湿度、水文测量和洪涝监测等应用，并可用于军事侦察监视。

7.印度成功发射海洋监测卫星

2022 年 11 月，印度太空研究组织成功发射“极地卫星”-XL C54 运载火箭(Polar Satellite Launch Vehicle-XL.C54, PSLV-XL.C54)，将“海洋卫星”-3(Oceansat 3)卫星和 8 颗纳米卫星送入太空。“海洋卫星”-3 卫星又名 EOS-06，是印度海洋卫星系列的第三代，用于提供海洋监测服务。该卫星的主要作用是监测海洋表面的颜色，并收集有关海面上风速和风向的数据。

8.伊朗发射第 2 颗军用卫星

2022 年 3 月，伊朗“努尔”-2(Nour-2)军用侦察卫星搭乘“信使”号(Kavoshgar)运载火箭成功发射，进入高度 500 千米的低地球轨道。“努尔”-2 卫星作为伊朗发射的第 2 颗军用卫星，轨道周期 90 分钟，设计寿命 3 年，旨在执行军用成像侦察和测绘任务，以及救灾等民用任务。此前，伊朗于 2020 年 4 月发射“努尔”-1 卫星，轨道高度 425 千米，现仍在轨运行。

（三）导航卫星

2022 年，美欧等国家和地区的导航卫星系统均取得新进展。美国启动并推进多项天基导航系统改进项目，增强定位、导航和授时(PNT)能力；俄罗斯继续部署“格洛纳斯”(Glonass)全球导航系统；欧洲拟开发低轨导航卫星星座，并完成第二代“伽利略”导航卫星初步设计评审工作；日本完成“准天顶”(Quasi-Zenith)试验卫星在轨运行功能和性能初步测试。

1.美国加速部署新一代 GPS 卫星

美国新一代 GPS 卫星包括 10 颗 GPS III 卫星和 22 颗 GPS IIIF 卫星。2022 年 5 月，第 5 颗 GPS III 卫星具备初始运行能力。2022 年 11 月，美国 SpaceX 公司成功将 GPS III-SV04 卫星送入太空，完成第 4 颗 GPS III 卫星部署任务。2022 年 12 月，美国正式启用 GPS III 卫星。

2022 年 1 月，美国太空军与洛克希德·马丁公司签订了 22

颗 GPS IIIF 卫星生产合同。与 GPS III 卫星相比，GPS IIIF 卫星性能更先进，具备新的区域军事保护能力，可向指定区域发送可信的 M 码（军码）信号，抗干扰能力提升 60 倍。新一代 GPS 星座将具备星座长期自主运行能力，降低对地面运控系统的依赖，点波束功率增强能力大幅提升，在全球指定区域的功率增强可达 20dB。

2.美国空军“导航技术卫星”-3 进入发射前的综合测试阶段

2022 年，美国空军“导航技术卫星”-3 项目(Navigation Technology Satellite-3, NTS-3)取得了实质性的进展，为试验星发射及在轨技术验证奠定了基础。2022 年 7 月，美国空军研究实验室太空载具管理局(Space Vehicles Directorate)对“导航技术卫星”-3 进行整合测试试验，为中断了 50 年的导航技术试验系列卫星发射做好准备。“导航技术卫星”-3 将展示可改进未来 GPS 卫星的新技术，包括提供区域覆盖的可控波束、防止信号干扰的保护措施和可在轨升级的可重新编程有效载荷。“导航技术卫星”-3 试验星将于 2023 年发射，用于验证韧性天基 PNT 新概念及新型时频技术、在轨可编程数字波形生成器、高增益天线、先进的 L 频段放大器、软件定义接收机等新技术，验证后的新技术将在 GPS IIIF 卫星上应用。

3.美国太空发展局寻求发展基于低轨星座的 PNT 服务体系架构

2022 年 11 月，美国太空发展局发布 2 阶段“传输层”PNT 服务有效载荷信息征询，寻求将低成本 L 波段 PNT 有效载荷应用于数百颗低地球轨道(LEO)卫星。该 PNT 有效载荷包括在轨可重编程 PNT 信号发生器、中型高功率放大器和固定宽波束天线。美国国防部和太空军作战司令部已确认将这种 LEO 星座作为传输 PNT 服务的潜在来源，可补充增强 GPS，并在极端情况下作为 GPS 的备份，为导航战略性规划和行动提供先进能力。

4.美国科研人员利用“星链”星座开展定位、导航和授时能力验证，实现 30 米高定位精度能力

2022 年 10 月，美国得克萨斯大学奥斯汀分校科研人员开展了一项独立研究，通过监测 SpaceX 公司“星链”星座网络通信信号，分析其 PNT 潜力。试验结果显示，利用小型无线电接收机监测“星链”卫星信号，并借助接收机测量的数据序列进行卫星距离测量，可实现 30 米的定位精度。

5.俄罗斯联邦航天局发射 3 颗“格洛纳斯”导航卫星

2022 年 7 月，俄罗斯联邦航天局(Russian Federal Space Agency, RKA)利用“联盟”-2.1b(Soyuz 2.1b)运载火箭成功发射一颗“格洛纳斯”-K(Glonass-K)导航卫星。2022 年 10 月，俄罗斯将一颗“格洛纳斯”-K 卫星送入预定轨道。2022 年 11 月，俄罗斯成功发射“格洛纳斯”-M(Glonass-M)导航卫星。截至 2022 年 12 月，俄罗斯“格洛纳斯”全球导航卫星系统共有 26 颗

卫星在轨，其中 22 颗处于运行状态，1 颗处于维护状态。“格洛纳斯”全球卫星导航系统是俄罗斯的军民两用系统，可为全球用户提供陆地、海上及空中的定位和导航服务。俄联邦航天局下属列舍特涅夫信息卫星系统公司(Reshetnev)正在制造第三代“格洛纳斯”-K 卫星，将替代“格洛纳斯”-M 系列卫星。此次发射的两颗新卫星是“格洛纳斯”-K 系列导航卫星中的第 4 颗和第 5 颗，设计的运行时间为 10 年。

6.英国国际海事卫星组织将帮助英国建设自主天基导航能力，以替代欧洲地球静止导航重叠服务系统

2022 年 6 月，英国国际海事卫星组织(Inmarsat)正在开发一种新技术，以替代欧洲地球静止导航覆盖服务(European Geostationary Navigation Overlay Service, EGNOS)星基导航增强系统，帮助英国建设自主天基导航能力。国际海事卫星组织已将其“国际海事卫星”-3 F5(Inmarsat-3 F5)卫星上的应答器重新用于广播 PNT 信号，为替代 EGNOS SoL(Safety of Life)服务提供测试平台。此举将帮助英国公司和监管机构验证“英国天基增强系统”(UK Space-Based Augmentation System, UKSBAS)计划，为提升 GPS 导航能力提供支持。

7.欧洲航天局拟开发低轨导航卫星星座

2022 年 11 月，欧洲航天局下属导航局(Navigation Support Office)计划对在低轨运行的新型导航卫星进行在轨演示，使其成为“伽利略”卫星导航系统星座的补充星座。该星座将

利用一种新型多层卫星导航系统，提供更精确、更高鲁棒性及在全球范围内可用的定位、导航和授时服务。欧洲航天局初步打算发射至少由 6 颗卫星组成的初始微型星座，以测试其能力、关键技术及后续运行使用的信号和频段。

8.欧洲“伽利略二代”导航卫星系统概念成功完成初始设计评审

2022 年 3 月，欧洲空客公司成功完成“伽利略第二代”(Galileo next-gen)导航卫星系统概念初步设计和客户系统要求全面审查。该公司后续将开展并完成设备和模块级别的进一步验证、验收和鉴定。同时，该卫星有效载荷级别的验证已全面展开，结构关键设计审查即将到期。

9.日本三菱电机宣布“准天顶”系统 1 号卫星接替星完成在轨功能和性能初步测试

2022 年 4 月，日本三菱电机株式会社(Mitsubishi Electric Corporation)完成“准天顶”卫星系统 1 号卫星接替星(Quasi-Zenith Satellite Replacement 1, QZS-1R)在轨功能和性能的初步测试。同时，日本政府宣布通过 QZS-1R 及其他在轨卫星推出定位和高精度定位增强服务。未来，三菱电机还将为日本政府研制“准天顶”卫星系统 5 号、6 号和 7 号卫星，以实现“准天顶”卫星系统七星体制，完善其独立的 PNT 能力，并增强系统性能和鲁棒性。

（四）预警卫星

2022 年，美国继续完善现有天基预警系统建设，进一步加强对高超声速武器预警和监测系统的研发和部署，并调整天基预警系统建设方向。俄罗斯补网加强现役导弹预警系统。

1.美国太空发展局将部署低轨跟踪卫星，实现高超声速武器目标跟踪指示能力

2022 年 1 月，美国太空发展局(SDA)表示将加快在低地球轨道部署“国防太空体系架构”中的“跟踪层”卫星，实现对高超声速武器跟踪及从天基传感器到武器系统的目标指示能力。

2022 年 7 月，美国国防部授予美国 L3 哈里斯公司(L3 Harris)和诺斯罗普·格鲁曼公司价值 13 亿美元的合同，用于研发“跟踪层”卫星。其中，L3 哈里斯公司将负责生产 14 颗卫星，价值约 7 亿美元；诺斯罗普·格鲁曼公司将制造 14 颗卫星，价值约 6.17 亿美元。美国太空发展局表示，新卫星项目表明美国正在发展更大的卫星系统，用于扩大并加强美国应对高超声速导弹威胁的能力。同时，国防部还将采购第二批大约 54 颗该型卫星。

与高地球轨道卫星相比，低地球轨道卫星对高超声速武器在飞行过程中产生的热信号具有更强的探测与跟踪能力。数颗低地球轨道卫星同时跟踪，可提升对高超声速武器的定位精度。“跟踪层”卫星将通过星间激光链路与“传输层”卫星

通信，实现数据高速传输。“跟踪层”卫星数据可通过联合过顶持续红外地面系统进行集成，并通过“16 号数据链”(Link-16)链路传输至武器系统。美国太空发展局拟于 2024 年或 2025 年发射 28 颗“跟踪层”卫星，实现全球网络覆盖。

2.美国部署“宽视场”卫星

2022 年 7 月，美国联合发射联盟公司利用“宇宙神”-5 火箭成功发射美国太空军“宽视场”(Wide Field of View, WFOV)卫星。“宽视场”卫星由美国千禧年太空系统公司(Millennium Space Systems)和 L3 哈里斯技术公司研制，主要用于搜集在轨数据，探索导弹预警算法，为美国“下一代过顶持续红外”(Next-Generation Overhead Persistent Infrared, Next-Gen OPIR)项目进行风险降低技术演示。

“宽视场”卫星尺寸约为当前“天基红外系统”(Space-Based Infrared System, SBIRS)导弹预警卫星的四分之一，设计寿命周期为 3 年。此外，“宽视场”卫星搭载了 L3 哈里斯公司的凝视红外探测器，其传感器采用 4000×4000 像元的大面阵，相关技术可用于太空发展局低轨跟踪层卫星和 2028 年年底前部署的 4 颗中轨导弹预警卫星，以探测跟踪高超声速导弹。

3.美国太空军完成“天基红外系统”预警卫星系统建设

2022 年 8 月，美国太空军成功发射天基红外系统(SBIRS)6 颗导弹预警卫星中的最后一颗，即 SBIRS GEO 6 导弹预警卫星，标志着整体系统部署完成。天基红外系统为地球同步轨道卫

星，携带扫描和凝视型红外传感器，可探测来自导弹尾气的热羽流，并为可能瞄准美国本土、盟国或军事力量部署地点的导弹发射提供发射警告。天基红外系统的扫描速度和灵敏度比上一代国防支援计划(Defence Support Program, DSP)导弹预警卫星系统提高了 10 倍以上，覆盖范围扩大了 2～4 倍，可在导弹发射 10～20 秒内将预警信息发送至地面运行控制系统，大幅延长了预警时间，为反导系统预留更充分的作战准备时间，从而提高拦截成功率。

4.美国国防部将逐步取消采购地球同步轨道导弹预警卫星，转向部署低轨和中轨预警卫星

2022 年 9 月，美国国防部计划未来停止采购承担弹道导弹预警功能的超大型地球同步轨道卫星。美国太空发展局表示，正在制造部署的下一代过顶持续红外(Next-Generation Overhead Persistent Infrared, Next-Gen OPIR)卫星成本高昂、研发周期长，将在完成最后一批卫星部署后结束采购。未来，美国太空军将依靠太空发展局正在研制的由数百颗低地球轨道导弹预警、跟踪卫星组成的大型星座，以及目前正在规划的中地球轨道 4 颗卫星开展导弹预警工作。

5.俄罗斯成功发射“天顶”导弹预警星座第 6 颗“苔原”卫星

2022 年 11 月，俄罗斯利用“联盟”-2.1b 火箭成功发射“天顶”(Kupol)星座“苔原”(Tundra)导弹预警卫星。“天顶”星

座由“苔原”卫星和地球同步轨道卫星组成，具有探测能力强、功能多样化等特点。截至 2022 年 12 月，俄罗斯已将 6 颗新一代“苔原”导弹预警卫星送入大椭圆轨道。“苔原”卫星作为“天顶”天基导弹预警星座的重要组成部分，旨在为俄军提供全球导弹发射的早期预警、持续监视对手国家洲际导弹的部署位置及大西洋和太平洋战略核潜艇主要巡弋地区。

三、运载火箭技术

2022 年，主要国家共实施 186 次航天发射任务，打破了 2021 年创下的 146 次史上最高发射次数纪录。其中，美国发射 87 次，中国发射 64 次，俄罗斯发射 22 次，欧洲和印度各发射 5 次，伊朗、韩国和日本各发射 1 次。其中 7 次发射任务失败，主要发生在新研火箭的试飞任务中。在美国实施的航天发射任务中，SpaceX 公司独占 61 次，其中由“猎鹰”-9 火箭完成 60 次，“重型猎鹰”火箭完成 1 次。

（一）一次性使用运载器

1.美国维珍轨道公司“运载器一号”火箭成功执行两次空中发射任务

2022 年 1 月，美国维珍轨道公司的“运载器一号”空射型小运载火箭由波音 747 型飞机携带到高空进行了第 4 次发射。

相较于前 3 次发射，此次发射将火箭着陆点变更至西海岸西南方向的太平洋上空，使火箭能够以 45 度倾角将卫星送入轨道，提高了发射效率。此次发射任务将 7 颗 3U 立方星送入低地球轨道，其中包括 4 颗美国国防部的“太空测试项目”-27VPB(Space Test Program-27VPB, STP-27VPB)卫星，2 颗波兰卫星革命公司(SatRevolution)STORK 星座地球观测卫星及 1 颗美国顶尖全球公司(Spire Global)用于观测轨道碎片环境的立方星。

2022 年 7 月，“运载器一号”搭乘经过改装的波音 747 型飞机成功进行第 5 次发射。此次发射任务代号为 Straight Up，旨在发射美军太空试验计划下的技术试验卫星。“运载器一号”此次共携带美军 7 个有效载荷，包括“反曲”(Recurve)卫星、“弹弓”-1(Slingshot 1)卫星、“大气化学高光谱观测纳卫星系统”-2(Nanosat Atmospheric Chemistry Hyperspectral Observation System 2, NACHO-2)、“模块化情报、监视和侦察”-B 卫星(Modular Intelligence, Surveillance and Reconnaissance B, MISR-B)、“小型总辐照度监测器飞行演示”(Compact Total Irradiance Monitor Flight Demonstration, CTIM-FD)卫星、GPX-2 卫星及“硝烟”-L(Gunsmoke L)系列卫星。

2.美国萤火虫航天公司“阿尔法”火箭首次发射成功

2022 年 10 月，美国萤火虫航天公司“阿尔法”火箭首次成功发射，将 3 颗卫星有效载荷送入轨道，具体包括：用于收

集数据与教育社区共享的“太空教师宁静号”(Teachers in Space-Serenity, TIS-Serenity)教育立方体卫星；旨在优化立方体卫星数据传输的“科技教育”-15(TechEdSat-15, TES-15)NASA技术演示立方体卫星；以及携带了 5 颗微型卫星的“皮星巴士”(PicoBus)多星部署器。

“阿尔法”火箭为两级液氧煤油火箭，全长 29 米，箭体直径 1.82 米，起飞质量 54 吨。值得注意的是，此次是“阿尔法”火箭的第 2 次尝试发射。该火箭曾于 2021 年 9 月尝试进行初次发射，但在飞行经过最大动压后不久发生空中翻滚并爆炸，以失败告终。

3.美国旋转发射公司亚轨道加速器完成第 10 次飞行试验

2022 年 10 月，美国旋转发射公司(Spin Launch)亚轨道加速器完成第 10 次飞行试验。此次试验验证了旋转发射公司合作伙伴的标准卫星组件与“旋转发射”系统的内在兼容性，提供了飞行数据，并顺利完成所有载荷的飞行和回收工作。此次亚轨道加速器发射的无动力航天器样机搭载 6 个有效载荷，其中 4 个来自旋转发射公司的合作伙伴，包括 NASA、空客公司、康奈尔工程公司(Cornell Engineering)和前哨公司(Outpost)，另外 2 个为旋转发射公司的测量仪器。

4.俄罗斯国家航天集团公司完成 RD-171MV 发动机的点火测试

2022 年 8 月，俄罗斯国家航天集团公司下属的格鲁什科院士

动力机械制造科研生产联合体公司(NPO Energomash)顺利完成用于“联盟”-5(Soyuz 5)运载火箭的 RD-171MV 发动机系列点火测试。该公司负责人伊戈尔·阿尔布佐夫(Igor Arbuzov)表示，RD-171MV 发动机点火测试包括在不同工况下对改进后的发动机控制和事故保护系统，以及联动装置及其组件等发动机相关资产的测试。该发动机基于“萘基-氧”绿色组合燃料，推力高达 806 吨，是全球功率最强的液体燃料火箭发动机。RD-171MV 发动机拟作为“联盟”-5 运载火箭的第一级，于 2023 年执行首次发射任务。

5.欧洲航天局“织女星”-C 运载火箭成功执行首飞任务后遭遇失败

2022 年 7 月，欧洲航天局新型“织女星”-C 运载火箭将 7 个有效载荷成功送入预定轨道，标志着首飞任务取得圆满成功。此次发射携带有效载荷总质量约为 474 千克，包括由意大利航天局(Italian Space Agency, ASI)研制的“激光相对论”-2(LARES-2)卫星，法国、意大利和斯洛文尼亚的 6 个立方体卫星等。欧洲航天局称，“织女星”-C 运载火箭采用三级固体助推器和液体上面级的四级构型，可将 2.3 吨有效载荷送入距地 700 千米的地球极地轨道，具有灵活性更强、性能更高、承载有效载荷更大和竞争力更强等特点。

2022 年 12 月，“织女星”-C 运载火箭执行的第 2 次发射任务以失败告终。该火箭在发射 2 分钟后第二级出现严重异常，

偏离预定发射轨道，地面控制人员下令其自毁，残骸落入大西洋公海水域。此次任务也是该火箭的首次商业发射，搭载欧洲空中客车公司 2 颗用于组网的高分辨率地球观测卫星。

6.韩国成功发射“世界”号运载火箭，成为全球第 7 个拥有自主太空发射能力的国家

2022 年 6 月，韩国自主研发的首枚运载火箭“世界”号搭载 1 颗 180 千克的卫星和 4 颗立方体卫星于罗老航天中心(Naro Space Center)顺利发射升空，标志着韩国成为全球第七个拥有自主太空发射能力的国家。

“世界”号火箭是韩国首枚完全自主研制的运载火箭，整体工程耗时 12 年左右，总投资近 16.1 亿美元。该火箭长 47.2 米，最大直径 3.5 米，推进剂为液氧煤油，可将 1.5 吨有效载荷送入 600～800 千米太阳同步轨道。该火箭为三级火箭，其中一子级采用 4 台 KRE-075 发动机，单台推力 75 吨级；二子级采用 1 台 KRE-075 发动机，单台推力 75 吨级；三子级采用 1 台 KRE-007 发动机，单台推力为 7 吨级。

7.法国、德国和意大利三国达成欧洲运载火箭开发协议

2022 年 11 月，法国、德国和意大利三国政府宣布达成“欧洲运载火箭开发的未来”(Future of Launcher Exploitation in Europe)协议，以提升欧洲运载火箭的竞争力。该协议规定三国将于 2024 年 6 月前建立投资框架，为“阿里安”-6(Ariane 6)和“织女星”-C(Vega C)等运载火箭吸纳社会资本，并允许

数家欧洲公司小型运载火箭竞标欧洲航天局的发射任务。同时，该协议打破了欧洲航天局的“地域返还”原则，即根据各国对欧洲航天局项目的贡献份额分配合同。此协议的签署可保证运载火箭开发的短期资金，影响未来项目的长期融资方式，并确保欧洲具备独立进入太空的能力。

8.中国最大固体燃料火箭“力箭一号”首飞成功

2022 年 7 月，中国最大固体燃料运载火箭“力箭一号”于酒泉卫星发射中心成功首飞，将 6 颗卫星送入预定轨道。此次搭载的卫星包括：太空新技术试验卫星、轨道大气密度探测试验卫星、低轨道量子密钥分发试验卫星、电磁组装试验双星和南粤科学星，将用于开展太空探测、大气密度探测等相关技术验证及试验应用。

“力箭一号”运载火箭是中国科学院力学研究所主导、中科宇航公司参与研制的首型固体运载火箭，由中国科学院“十四五”重大项目支持，是中国科学院在空天科技领域的又一次创新性尝试。“力箭一号”作为国内最大的固体燃料火箭，突破了大吨位固体运载器总体优化设计与试验技术、先进动力系统与推力矢量控制技术、集中/分布式现代航天电子技术、低成本箭体结构与分离技术、智慧飞行控制技术、大吨位固体火箭地面使用及热发射技术共 6 项关键技术，并有 13 项技术为国内首次使用。同时，该火箭采用箭上航电一体化设计和地面检查测试并实施火箭发射控制的新方式，可大幅降

低发射成本，简化发射流程，入轨精度高，响应速度快，十分适用于中小型卫星载荷的中低轨快速组网发射。

（二）可重复使用运载器

1.美国 SpaceX 公司实施“一箭 105 星”拼单发射任务

2022 年 1 月，美国 SpaceX 公司利用“猎鹰”-9 火箭于佛罗里达州卡纳维拉尔角太空部队 40 号发射场成功发射了 105 颗小型卫星，加快了低成本有效载荷拼单发射任务模式转型，将加剧微小卫星发射市场的竞争。

此次发射任务代号为“运输者”-3(Transporter-3)，是 SpaceX 公司 2022 年首次实现真正的基地发射，也是该公司“小卫星拼单”(SmallSat Rideshare)项目下的第 3 次专项拼单发射任务。SpaceX 公司表示，此次拼单发射费用仅为每千克 5000 美元。搭载的航天器中，主要包含 44 颗美国行星公司(Planet)“超级信鸽”(SuperDove)成像卫星、4 颗美国顶尖全球公司(Spire Global)“狐猴”(Lemur)多用途卫星、4 颗加拿大开普勒通信公司(Kepler)“电信星”(Telesat)星座卫星、1 颗德国奥罗拉科技公司(OroraTech)立方星、1 颗迪拜电力和水务局(Dubai Electricity and Water Authority, DEWA)卫星等。在此次任务中，“猎鹰”-9 火箭上面级在发射 8.5 分钟后到达既定轨道，并在后续的半小时内将各有效载荷顺利部署至距地 525 千米的太阳同步轨道上。此次“一箭 105 星”任务成功执行，充分

展示出美国卫星批量搭载发射商业化应用趋于成熟，标志着SpaceX 公司建立起由大中小型卫星商业发射服务、商业货物运输服务、商业载人航天服务、低轨宽带卫星通信服务等构成的全业务领域，涵盖卫星制造、发射与运管、应用全产业链条。

2.美国 SpaceX 公司“重型猎鹰”火箭执行首个美国国家安全任务，将多颗军事卫星送入地球同步轨道

2022 年 11 月，美国 SpaceX 公司“重型猎鹰”火箭于佛罗里达州肯尼迪航天中心 39A 发射场成功发射升空，执行 USSF-44 任务，将美国太空军 6 颗军事有效载荷送入地球同步轨道。此次发射是该型火箭执行的首次国家安全太空发射任务，主任务为发射“牧羊人”(Shepherd)秘密技术试验卫星，还携带了“泰特拉”-1(Tetra-1)卫星、“阿尔派”(Alpine)通信卫星、“洛马太空升级卫星系统”-1、2(Linus-1、2)卫星和“长寿命带推力演进型运载火箭次级有效载荷适配器”-2(Long Duration Propulsive Evolved Expendable Launch Vehicle Secondary Payload Adapter 2, LDPE-2)机动母星。其中，LDPE-2 搭载 3 颗小型卫星，包括“野马”(Mustang)测试卫星、“氙气”(Xenon)卫星和“高能带电粒子简化版”(Energetic Charged Particle-Lite, ECP-Lite)气象卫星，用于演示通信、太空天气传感和其他技术。

3.美国 SpaceX 公司对“星舰”飞船开展测试，为其首次轨道

试飞做准备

2022 年 2 月，美国 SpaceX 公司创始人兼首席执行官埃隆 •马斯克(Elon Musk)表示，超重型火箭助推器装配的“猛禽”(Raptor)发动机数量将从 29 台增加至 33 台，“星舰”(Starship)飞船装配“猛禽”发动机数量将从 6 台增加至 9 台。2022 年 9 月，SpaceX 公司进行超重型火箭助推器 7 台发动机静态点火测试。2022 年 11 月，SpaceX 公司进行“星舰基地”(Starbase)轨道发射和回收塔测试，为“星舰”回收复用提供支持。该塔架配有“快速断开臂”(Quick-Disconnect, QD)火箭捕获臂，将被用于抓取、提升和安装超重型火箭助推器。

美国 SpaceX 公司拟于 2023 年 3 月进行“星舰”飞船的首次轨道发射测试。此次测试包括将超重型助推器和“星舰”飞船送入轨道，绕地飞行近一圈后在夏威夷附近着陆。NASA 表示，此次测试将为 2025 年“星舰”飞船载人登月计划奠定基础，后续还将进行该飞船太空推进剂转移测试、长时间持续飞行测试和无人登月演示测试。“星舰”一旦成功发射，将成为全球有史以来运载力最强的火箭，有望替代 SpaceX 公司“猎鹰”系列火箭，用于执行包括卫星发射、太空站补给、全球“点对点”运输及火星移民等任务。

4.美国空军推进“火箭货运”项目，验证全球点对点运输技术

2022 年 1 月，美国空军授予 SpaceX 公司一份价值 1.02 亿美

元合同，以开展“火箭货运”(Rocket Cargo)项目，验证利用重型火箭向全球运送军用货物和人道救援物资的技术和能力。SpaceX 公司“火箭货运”项目经理格雷格 •斯帕杰斯(Greg Spanjers)称，该合同正式确立美国政府与企业的合作伙伴关系，将明确项目所使用的具体火箭类型、火箭用于货物运输时的具体效果、火箭实际运力及整体系统成本等事项。斯帕杰斯还表示，美国空军将在未来几年内通过 SapceX 公司开展的相关商业飞行任务采集数据。

2022 年 9 月，美国火箭实验室公司与美国运输司令部(United States Transportation Command, USTRANSCOM)签署合作协议，探索如何利用商业运载火箭在全球范围为国防物资提供支持，以实现关键军用货物的快速投送。该公司是继 SpaceX、XArc 和蓝色起源公司后第四个加入“火箭货运”项目的公司。美国国防部拟对该公司“电子”火箭和“中子”火箭的点对点运输能力开展测试，并将对其“光子”航天器是否可作为在轨货运平台进行研究。

2022 年 9 月，美国塞拉太空公司(Sierra Space)与美国运输司令部签署“合作研究与发展协议”(Cooperative Research and Development Agreement, CRADA)，为其提供全球点对点高速运输服务。根据协议，塞拉太空公司将与美国运输司令部共同探索使用“追梦者”(Dream Chaser)航天飞机与“流星”(Shooting Star)货运模块，为美国军方实现低成本、高速率的

点对点人员和物资运输提供支持。

5.美国火箭实验室两次尝试利用直升机捕获“电子”号一级助推器，推进火箭可重复使用计划

2022 年 5 月，美国火箭实验室首次利用改进型“西科斯基”S-92 直升机(S-92Helicopter)在太平洋上空成功捕获执行轨道级发射任务的“电子”号(Electron)一级助推器。直升机在捕获助推器 20 秒后，因载荷超出此前测试和仿真时的承载范围，被迫释放了助推器。

2022 年 11 月，火箭实验室再次尝试空中捕获“电子”号火箭一级助推器失败，助推器坠入大海。此次任务原计划是利用改进型“西科斯基”S-92 直升机通过长绳末端的钩子空中钩住返地“电子”号火箭一级助推器的降落伞，以完成空中回收作业。但由于“电子”号火箭一级助推器在重返大气层期间遥测信号丢失，因而未能顺利进行捕获任务。

火箭实验室开展一系列空中捕获回收任务旨在测试火箭一级助推器重复使用的可行性，使“电子”号火箭成为可重复使用火箭，以提高火箭发射频率，降低发射成本。

6.美国 X-37B 空天飞机创造新的在轨时间纪录

2022 年 11 月，美国太空军无人驾驶、可重复使用的 X-37B“轨道试验航天器”-6(Orbital Test Vehicle-6, OTV-6)空天飞机，在轨运行 908 天后降落于佛罗里达州肯尼迪航天中心，完成了第 6 次任务。该空天飞机在此次飞行任务中进行了包括光

能转化为直流电能在内的多项美军科学实验，并打破了先前创造的 780 天在轨时间纪录。

X-37B 空天飞机的发射重量为 4990 千克，可在 240～805 千米间的任意高度运行，具有全自动脱离轨道着陆能力，是美国太空军和美国空军快速能力办公室(Rapid Capabilities Office, RCO)联合运营的无人驾驶可重复使用飞行器，是目前唯一能够全自主返航的太空航天器。此外，该航天器首次引入可增加载荷数量的有效载荷适配环，进行了太空中材料暴露和技术创新(Materials Exposure and Technology Innovation in Space, METIS-2)、长时太空育种等试验，并搭载光伏射频天线模块(Photovoltaic Radiofrequency Antenna Module)，以测试在轨道上将太阳能转化为微波并向地球发射的技术。

7.美国蓝色起源公司开展 BE-4 发动机测试

2022 年 10 月，美国蓝色起源公司研发的大型火箭发动机 BE-4(Blue Engine 4)成功通过长达 4.5 分钟的测试，证实所有组件都可承受实际发射产生的压力，标志着 BE-4 发动机研发工作进入新阶段。BE-4 发动机将用于蓝色起源公司“新格伦”号(New Glenn)重型运载火箭，还将提供给美国联合发射联盟公司(United Launch Alliance, ULA)用于“火神”(Vulcan Centaur)运载火箭等。BE-4 发动机与 SpaceX 公司研发的“猛禽”发动机均属重型火箭发动机，使用甲烷作为燃料。BE-4 发动机是全球推力最大的火箭发动机之一，单台 BE-4 发动机提供的

推力高于“猛禽”发动机，两者分别可产生约 245 吨和约 231 吨推力。

8.法国阿里安公司公布欧洲全复用火箭第一级方案

2022 年 9 月，法国阿里安(Ariane)公司在巴黎举行的 2022 年度国际宇航大会(International Astronautical Congress, IAC)上首次展示了“苏西”(Smart Upper Stage for Innovative Exploration, SUSIE)全复用火箭第一级，但未明确公布该项目的时间线。“苏西”采用垂直发射垂直返回(Vertical Takeoff and Vertical Landing, VTVL)模式，加压舱容量达 40 立方米，可用于执行货物和有效载荷运输及载人飞行等任务。“苏西”在执行载人飞行任务时最多可搭载 5 名航天员，初期将由“阿里安”-6 火箭发射。

“苏西”是欧洲航天局主导的新欧洲太空运输解决方案(New European Space Transportation Solutions, NESTS)的组成部分，预计将用于欧洲下一代可复用重型运载火箭，为实现欧洲未来完全可重复太空运输系统铺平道路。

9.中国首次实现液体火箭发动机的重复使用

2022 年 9 月，中国自主研制的某型液氧煤油发动机成功完成重复飞行试验，标志着中国首次实现液体火箭动力系统重复使用，也标志着中国液体火箭发动机重复使用技术进入工程应用阶段。此次试验进一步验证了该型发动机全任务剖面复杂力热环境适应性和飞行后回收重复使用的可行性，探索了

液氧煤油发动机快速简化处理方案、检测维护及健康管理方案，初步建立了液体火箭发动机重复使用设计评估准则，推动了重复使用航天运输技术的发展和工程应用。

液氧煤油发动机是中国新一代运载火箭的主要动力装置，具有高性能、大推力、任务适应强、研制周期长及无毒无污染等优点。该型液氧煤油发动机曾于 2021 年作为某飞行器主动力装置参加首飞试验，经检测维护后成功参加重复飞行试验任务。

四、载人航天技术

载人航天进一步扩展了人类的活动范围，对国家政治、经济和科技等方面的发展具有重要战略意义。2022 年，美国 SpaceX 公司使用载人“龙”(Crew Dragon)飞船先后实施“公理 1 号”(Axiom Mission-1)首次商业性国际太空站飞行任务、第 4 次商业载人航天任务(Crew-4)和第 5 次商业载人航天任务(Crew-5)；蓝色起源公司成功开展两次亚轨道载人飞行任务；波音公司进行“星际客机”(Starliner)不载人试飞任务。俄罗斯首次公布新太空站建造实体模型，将为航天员观察地球提供更广阔的视野。中国太空站梦天实验舱成功发射并顺利完成了在轨交会对接。

（一）美国多家商业公司开展载人航天发射和测试任务

1.美国 SpaceX 公司载人“龙”飞船开展常态化载人任务，并完成首次全商业性太空载人任务

2022 年 4 月，美国 SpaceX 公司利用“猎鹰”-9 火箭于佛罗里达州肯尼迪航天中心 39A 发射台成功发射载人“龙”(Crew Dragon)飞船，执行首次商业国际太空站飞行任务。此次任务名为“公理 1 号”，由美国公理太空公司(Axiom Space)负责，将 4 名乘客送入国际太空站，是载人“龙”飞船首次执行由私人出资和运作的国际太空站飞行任务。4 名乘客分别为 NASA 前航天员迈克尔·洛佩兹(Michael Lopez-Alegría)、美国房地产大亨拉里·康纳(Larry Connor)、加拿大投资人马克·帕蒂(Mark Pathy)和以色列商人埃坦·斯蒂比(Eytan Stibbe)。4 名乘客在国际太空站上驻留 8 天，参与数十项微重力实验，包括研究太空旅行对衰老细胞和心脏健康的影响等。

2022 年 10 月，美国 SpaceX 公司载人“龙”飞船搭载 4 名航天员从国际太空站返回地球，于美国东南部佛罗里达州附近海面成功降落。该项任务为美国“第四次商业载人航天任务”(Crew-4)，任务执行周期共计 6 个月。此前，美国 SpaceX 公司利用“猎鹰”-9 火箭成功发射载人“龙”飞船，将 4 名航天员送往国际太空站。4 名航天员包括 3 名 NASA 航天员和 1 名意大利女航天员，分别为指令长谢尔·林格伦(Kjell Lindgren)，驾驶员罗伯特·海因斯(Robert Hines)，任务专家

杰西卡·沃特金斯(Jessica Watkins)，以及意大利籍欧洲航天局航天员瑟曼莎·克里斯托弗雷蒂(Samantha Cristoforetti)。4名航天员在6个月内在太空开展了超200项科学研究，内容涉材料科学、健康技术、植物科学等领域。

2022年10月，美国SpaceX公司利用“猎鹰”-9火箭于佛罗里达州肯尼迪航天中心成功发射载人“龙”飞船，将2名美国航天员、1名俄罗斯航天员和1名日本航天员送往国际太空站完成定期人员轮换任务。此次任务为“第5次国际太空站载人发射任务”(Crew-5)。4名航天员分别为指挥官美国女航天员尼科尔·曼恩(Nicole Mann)，美国航天员乔什·卡萨达(Josh Cassada)，俄罗斯航天员安娜·基吉纳(Anna Kikina)和日本航天员若田浩一(Koichi Wakata)。4名航天员将在国际太空站停留6个月，开展心血管健康、生物打印、微重力环境下流体运动等方面的科学研究。

2.美国蓝色起源公司成功开展两次亚轨道载人飞行任务

2022年4月，美国蓝色起源公司利用“新谢泼德”亚轨道载人火箭成功将6名乘客送至距地约107千米高空，完成第4次亚轨道载人飞行任务。此次任务从发射到太空舱着陆持续了约10分钟，是2015年以来“新谢泼德”火箭的第20次飞行。2022年6月，“新谢泼德”火箭再次成功将6名乘客送至距地约107千米高空，完成第5次亚轨道载人飞行任务。此次任务从发射到太空舱着陆同样持续了近10分钟，是2015

年以来“新谢泼德”火箭的第 21 次飞行。

3.美国波音公司“星际客机”飞船开展第二次不载人试飞任务

2022 年 5 月，美国波音公司“星际客机”载人飞船结束为期 6 天的第二次不载人轨道飞行试验任务，驶离国际太空站。随后，“星际客机”的乘员舱与服务舱分离，进入大气层，在美国新墨西哥州白沙太空港安全着陆。试验期间，“星际客机”与国际太空站成功对接，太空站上的航天员首次进入舱内对其进行了检查，卸下“星际客机”运送的约 227 千克物资，并打包约 272 千克太空站物资送回地球。

“星际客机”是 NASA 商业载人项目(Commercial Crew Program, CCP)的一部分。2014 年，波音公司和 SpaceX 公司分别从 NASA 获得 42 亿和 26 亿美元合同，用以建造“星际客机”载人飞船和载人“龙”飞船。截至 2022 年 12 月底，SpaceX 公司为 NASA 完成 5 次国际太空站载人发射任务。波音公司曾于 2019 年 12 月开展“星际客机”首次不载人试飞，但未能成功对接国际太空站。“星际客机”预计将于 2023 年 4 月执行载人机组飞行测试(Crew Flight Test, CFT)任务，2024 年执行首次正式载人飞行任务。

（二）俄罗斯航天局公布新太空站实体模型

2022 年 8 月，俄罗斯航天局首次公布打造太空站实体模型俄

罗斯轨道服务站(Russian Orbital Service Station, ROSS)的规划。目前，俄罗斯航天局正在开展 ROSS 太空站的设计工作。俄罗斯航天局新任局长尤里·鲍里索夫(Yuri Borisov)表示，俄罗斯或将在 2024 年后退出国际太空站项目。

俄罗斯航天局表示，ROSS 太空站将分两个阶段发射：第一阶段，拥有 4 个模块的 ROSS 太空站将开始运行；第二阶段，ROSS 太空站将增设另外两个模块和一个服务平台。俄罗斯暂时未给出各阶段具体的发射日期。与国际太空站相比，俄罗斯预计在 ROSS 太空站整体建设完成后能够容纳 4 名航天员和相应的科学设备，并将为航天员观察地球提供更广阔的视野。俄罗斯当地媒体透露，第一阶段发射预计在 2025—2026 年进行，最晚不迟于 2030 年；第二阶段发射预计在 2030—2035 年进行。按照目前的设想，俄罗斯 ROSS 太空站不会让航天员永久驻留，但每年会安排两次航天员接替任务。

（三）中国太空站梦天实验舱成功发射并顺利完成交会对接任务

2022 年 10 月，中国太空站梦天实验舱搭乘长征五号 B 运载火箭在海南文昌航天发射场发射升空，并在约 8 分钟后精确入轨，发射任务圆满成功。2022 年 11 月，梦天实验舱成功对接天和核心舱前向端口，顺利完成在轨交会对接，整个交会对接过程历时约 13 小时。对接成功后，梦天实验舱顺利

完成转位，与天和核心舱、问天实验舱在同一平面形成天宫太空站 T 字构型，标志着天宫太空站全面建成。

梦天实验舱由工作舱、货物气闸舱、载荷舱、资源舱 4 个舱段组成，舱体全长 17.88 米，最大直径 4.2 米，发射质量约 23 吨，配备 2 套大型柔性太阳翼及双自由度对日定向系统，可根据天宫太空站在轨运动姿态与太阳角度，让太阳翼围绕实验舱轴与太阳翼轴进行转动，确保阳光能垂直照射在电池片上，实现最高发电效率。梦天实验舱此次搭载 3 台原子钟升空，包括 1 台冷原子铷微波钟、1 台冷原子锶光钟、1 台主动型氢原子钟。3 台原子钟将组成太空冷原子钟组，构成在太空中频率稳定度、准确度最高的计时系统，将实现 30 亿年误差 1 秒的超高精度。

同时，梦天实验舱内还配置 13 个标准载荷机柜，舱外配置 37 个载荷安装工位，支持在天宫太空站开展多种科学实验。该实验舱主要面向微重力科学研究，配置了流体物理、材料科学等多学科方向的实验柜，支持开展重力掩盖下的材料凝固机理等物质本质规律研究及超冷原子物理等前沿实验研究。

五、太空探索技术

深空探测作为人类太空探索活动的风向标和太空科技创新的主要路径，是当前和未来国际航天领域的重点发展方向之

一。2022 年，美国、日本、韩国和中国等继续由近及远地开展多目标多任务深空探索，以月球作为前哨基地，逐步开展延伸至其他小行星、火星及太阳等天体的探测活动。

（一）月球探索规划和探索活动

1.美国推进“阿尔忒弥斯”项目实施，并公布月球候选着陆区

2022 年，NASA 先后与以色列、罗马尼亚、巴林、新加坡、沙特阿拉伯、卢旺达和尼日利亚签署《阿尔忒弥斯协定》(Artemis Accords)。截至 2022 年 12 月，全球已有 23 个国家与美国签署《阿尔忒弥斯协定》。“阿尔忒弥斯”(Artemis)项目是 NASA 主导的载人航天项目，目标是将航天员平安送往月球并返回，建立常态化驻留机制，为未来火星载人登陆任务铺平道路。该项目前期任务主要包括“阿尔忒弥斯”-1 不载人绕月任务、“阿尔忒弥斯”-2 首次载人绕月飞行任务、“阿尔忒弥斯”-3 载人登月任务。其中，“阿尔忒弥斯”-1 和“阿尔忒弥斯”-2 任务预计将由“太空发射系统”(SLS)执行；“阿尔忒弥斯”-3 及后续任务预计将由 SpaceX 公司研发的“星舰”执行。NASA 表示，“阿尔忒弥斯”-3 任务预计于 2026 年执行。

2022 年 8 月，NASA 为“阿尔忒弥斯”-3(Artemis 3)载人登月任务选定了 13 个月球南极附近的候选着陆区，分别是“弗

斯蒂尼”陨石坑边缘-A(Faustini Rim A)、“沙克尔顿”陨石坑附近山顶(Peak Near Shackleton)、“连接岭”(Connecting Ridge)、“连接岭”延伸区域(Connecting Ridge Extension)、“德·杰拉许”陨石坑边缘-1(de Gerlache Rim 1)、“德·杰拉许”陨石坑边缘-2(de Gerlache Rim 2)、“德·杰拉许”与“科赫尔”陨石坑地块(de Gerlache-Kocher Massif)、“霍沃斯环形山”(Haworth)、“马拉柏特环形山”地块(Malapert Massif)、“莱布尼兹环形山β高原”(Leibnitz Beta Plateau)、“诺比尔环形山”边缘-1(Nobile Rim 1)、“诺比尔环形山”边缘-2(Nobile Rim 2)和“阿蒙森环形山”边缘(Amundsen Rim)。

此次选定的每块候选着陆区域大小约 15 千米×15 千米，均包含至少 10 个潜在着陆点。NASA 表示，候选着陆区域的选择标准是位于月球南极纬度 6 度范围内，并足够靠近月球永久阴影区，以保证登月航天员可前往探索并取回水冰沉积物样本。此外，该 13 处区域均拥有可持续受太阳照射 6.5 天的特点，与“阿尔忒弥斯”-3 任务作业时长重合，以保证航天员登月期间电能补充和避免温差过大。

2022 年 9 月，NASA 与欧洲航天局在国际宇航大会期间签署关于月球合作探索活动的联合声明。声明强调 NASA 将与欧洲航天局在“阿尔忒弥斯”(Artemis)任务上开展合作。欧洲航天局将负责为美国“猎户座”飞船提供服务模块、建造月球居住模块和加油元件等相关组件。同时，欧洲航天局将派

遣 3 名航天员参与“阿尔忒弥斯”未来任务，其中 1 名航天员将完成月球行走任务。

2022 年 10 月，NASA 向韩国 SpaceLink 公司和挪威 Kongsberg 公司的美国分支机构分别授予 19 万美元和 16 万美元合同，为“阿尔忒弥斯”任务提供通信和导航服务。两家公司将帮助 NASA 分析光通信地面终端集成到近太空(Near Space)实现中继通信和导航服务的解决路径，并开展射频兼容性测试、无线电和云计算与近太空网络架构集成及增强针对月球轨道的遥测、跟踪和指挥等研究。

2.NASA“猎户座”飞船成功发射并完成无人绕月飞行任务

作为“阿尔忒弥斯”-1 任务的核心作业，2022 年 11 月，美国“太空发射系统”重型运载火箭首次成功发射，将“猎户座”载人飞船和 10 颗立方星送入地月转移轨道。“猎户座”飞船成功脱离箭体后，进行了第 1 次轨道机动系统发动机点火，并成功飞抵距离月球表面不足 129 千米处。该飞船通过第 2 次机动点火首次进入大幅值逆行绕月轨道，并逆行绕飞月球收集测试数据。该飞船在该轨道驻留 6 天后，再次进行了两次机动点火，成功进入地球返回轨道。在进入地球大气层期间，该飞船采取了特殊的“跳跃式进入法”，通过在地球大气层上弹跳进行减速，以让飞船更精确着陆。

2022 年 12 月，NASA 的“猎户座”飞船在加利福尼亚州附近的太平洋上溅落，成功完成了为期 25.5 天的绕月飞行测试任

务，标志着“阿尔忒弥斯”-1(Artemis 1)任务顺利结束。此次测试任务中，“猎户座”飞船搭载了装有传感器的“仿真航天员”，行程超过 225 万千米，与地球的最大距离超过 43 万千米，创下载人航天器离地最远距离的纪录。

3.美国拟建立“地月空间高速公路巡逻系统”以监测地月空间

2022 年 3 月，美国空军研究实验室拟开展“地月高速公路巡逻卫星”(Cislunar Highway Patrol Satellite, CHPS)项目，并表示将关注地球静止轨道和月球轨道之间的地月空间。该项目于 2022 年 8 月正式更名为“甲骨文”(Oracle)项目。美国空军拟向月球发射 CHPS 卫星，拟于 2025 年投入使用，用于搜寻碎片、火箭箭体和以往未进行跟踪的地月空间里的其他物体，并更新目前运行在月球附近或从地球上难以观测的地月空间区域内其他航天器的位置数据。AFRL 已向美国 Advanced Space 公司授予一份价值 7200 万美元合同，以开发用于监测地月空间环境的实验性航天器。同时，AFRL 向企业征询卫星设计和研制方案，希望具备对运行在月球乃至更远距离上的物体进行探测、跟踪和识别的能力。

4.美国成功发射 CAPSTONE 立方体卫星，对环月轨道环境开展测试

2022 年 6 月，美国火箭实验室公司利用“电子”号(Electron)火箭在新西兰成功发射由 NASA 资助的地月空间自主定位系

统技术操作和导航试验(Cislunar Autonomous Positioning System Technology Operations and Navigation Experiment, CAPSTONE)立方体卫星。CAPSTONE 卫星重 25 千克，旨在对环月轨道的稳定性及自主导航系统进行测试，为“阿尔忒弥斯”(Artemis)任务的实施奠定基础。该卫星曾在脱离地球轨道向月球前进的过程中失联，经 NASA 尝试修复后已重新建立联系，并在 3 次轨迹校正机动后于 2022 年 11 月成功进入环月近直线晕轨道。

5.韩国发射首个月球探测器，并成功与地面站实现通信

2022 年 8 月，韩国首个月球探测器“赏月”号搭乘美国 SpaceX 公司“猎鹰”-9 火箭发射升空，执行为期 1 年的月球观测任务。“赏月”号在发射后成功与地面站实现首次通信，并在经过近 30 天飞行后，成功抵达距地球约 150 万千米的日地拉格朗日 L1 点，并再次启动发动机对轨道进行修正。2022 年 12 月 16 日，该飞行器成功进入月球轨道，并以每 12.3 小时绕月球周围椭圆轨道一周的速度飞行。“赏月”号将使用 6 种不同仪器，对月球表面地形、磁场强度、伽马射线等进行数据采集，其中包括使用由 NASA 提供的 ShadowCam 高灵敏阴影相机对月球南极地区进行高清拍摄，为“阿尔忒弥斯”-3 任务提供潜在的登月着陆点。

6.日本宇宙航空研究开发机构“好客”号小型月球着陆器任务失败

2022 年 11 月，日本宇宙航空研究开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)宣布放弃小型箱型探测器“好客”号月球着陆项目。“好客”号探测器是一个 6U 立方星，长 11 厘米、宽 24 厘米、高 37 厘米、重 12.6 千克，开发成本 560 万美元，由美国太空发射系统火箭发射。“好客”号在发射后成功与火箭分离并飞向月球，但出现了角速度每 4～5 秒旋转一次的现象，比极限值高出 8 倍，其太阳能电池未能及时朝向太阳，无法接收信号和提供能源，因此错过进入月球轨道并在月球着陆的机会。JAXA 已成立特别小组调查失败原因，包括探测器位置偏离问题。

日本曾于 2007 年发射月球轨道器“月亮女神”(Kaguya)，此后日本在月球探测器领域落后于其他国家。原以为“好客”号会成为日本第一个在月球表面着陆的探测器。除“好客”号项目外，JAXA 推动中的月球探测项目还包括 2023 年“苗条”号月球探测智慧着陆器(Smart Lander for Investigating Moon, SLIM)实现软着陆、2024 年或之后在月球南极寻找水等。

7.日本初创公司 ispace 成功发射全球首个商业月球着陆器

2022 年 12 月，日本太空初创公司 ispace 自主研发的“玉兔”号(HAKUTO-R M1)飞船搭乘美国 SpaceX 公司的“猎鹰”-9 运载火箭于佛罗里达州卡纳维拉尔角成功发射，成为全球首个顺利升空的商业月球着陆器。“玉兔”号月球着陆器高 2.3

米，宽 2.6 米，净重 340 千克，将在约 4 个月后抵达月球轨道，并预计于 2023 年 4 月底在北纬 47.5 度，东经 44.4 度月球最北端“冷海”(Mare Frigoris)的阿特拉斯陨石坑(Atlas Crater)着陆。该着陆器的其他潜在着陆点包括“伊里杜姆窦”(Sinus Iridum)、“索姆尼奥姆湖”(Lacus Somniorum)和“前海”(Oceanus Procellarum)。此外，此次发射还搭载了阿联酋月球车和日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)的有效载荷。

该公司希望完成 10 项任务操作计划，具体包括：一是完成发射准备；二是启动和部署完成；三是建立稳定运行状态；四是完成首次轨道控制机动；五是完成为期一个月的稳定状态飞行操作；六是在进入月球轨道前完成所有深空轨道控制机动；七是到达月球引力场/月球轨道；八是完成月球轨道上的所有轨道控制机动；九是完成登月软着陆；十是登月后建立稳定系统状态。2023 年 1 月，“玉兔”号已根据任务操作计划成功进行第 2 次轨道控制机动。此次轨道机动是着陆器前往月球期间的第 2 次调整，相较于 2022 年 12 月完成的第 1 次调整，机动位置距离地球更远，持续机动时间更长，验证了该公司在各种条件下进行轨道机动的能力。如果任务顺利进行，ispace 公司或将成为首家实现月球表面着陆的商业公司。

（二）火星探索活动

1.NASA“洞察”号火星探测器任务正式结束

2022 年 12 月，NASA“洞察”号(InSight)火星无人着陆探测器任务正式结束。NASA 表示，“洞察”号火星探测器因长期灰尘积聚在其太阳能电池阵列上导致电池功率水平持续下降，已连续两次无法支持与地球通信，最后一次与地球通信是在 2022 年 12 月 15 日。该探测器初始电池阵列功率水平达 5000 瓦时，2021 年 6 月降至仅 700 瓦时，2022 年 12 月功率水平已降至 285 瓦时。美国工程师团队已进行多次清除积聚灰尘尝试后，包括使用“洞察”号的机械臂铲起火星风化层并将其倾倒在电池阵列附近，以期使风化层颗粒吸附电池阵列上灰尘达到除尘效果，但收效甚微。

2018 年 11 月，“洞察”号在火星赤道以北广阔且平坦的“埃律西昂平原”(Elysium Planitia)登陆，旨在了解火星内部结构、探究火星震和火星内核等，任务年限从最初的两年延长至 4 年。“洞察”号的主要成就之一是证实火星仍存在地震活跃现象，并记录火星震超 1300 次，同时测量到陨石撞击产生的地震波。

2.NASA“毅力”号火星探测器在火星连续投放岩石取样管

2022 年 12 月，NASA“毅力”号(Perseverance)火星探测器已在火星表面连续投放 2 份火星岩石样本管，为“火星采样返回项目”(Mars Sample-return Mission, MSR)提供支持。“毅力”

号于 2022 年 12 月 21 日在火星表面投放了第一份取样管，其中装有在火星“杰泽罗”陨石坑(JezeroCrater)采集的粉笔大小的火成岩岩芯；2022 年 12 月 24 日在火星表面投放了第二份取样管，其中装有在火星古河流三角洲边缘采集的 7.36 厘米的沉积岩岩芯。该沉积岩岩芯是迄今火星探测器采集到的最长岩芯。“毅力”号预计将投放共计 10 个密封取样管，建造人类在火星上的第一个样本库。样本库的建成将标志着 NASA“火星采样返回项目”迈出了重要一步。

“毅力”号在每个钻探点均收集了两份样本，其中一份保存在探测器内，另一份则投放在火星表面作为备份。NASA 表示，如果“毅力”号的动力持续时间足够长，就可以把携带的样本交付给未来的着陆器；如果“毅力”号不能交付样本，那么火星上的样本库就会作为备份，由两架样本回收直升机来完成交付工作。NASA 拟于 2033 年将火星样本送回地球。届时，“毅力”号将使用机械臂把样本放置在小型火箭舱内，再由小型火箭发射到火星轨道。火星轨道上的航天器将捕获小型火箭舱并将样本送回地球进行深入分析。

3.NASA 成功进行火星登陆充气式返回舱测试任务

2022 年 11 月，NASA 利用“宇宙神”-5 火箭成功进行“充气减速器”(Low-Earth Orbit Flight Test of an Inflatable Decelerator, LOFTID)充气式返回舱近地轨道飞行测试任务。“充气减速器”返回舱验证了充气式再入减速技术，成功溅落在夏威夷附近

海域。该任务旨在测试直径为 6 米的“充气减速器”返回舱的性能，并收集再入大气层时的数据，以支持开展未来的火星登陆任务。

（三）太阳探索活动

1.中国成功发射综合性太阳探测卫星“夸父一号”

2022 年 10 月，中国科学院使用长征二号丁运载火箭成功发射太空科学卫星“夸父一号”，并顺利进入太空“逐日”的预定轨道。该卫星作为先进天基太阳天文台(Advanced Space-based Solar Observatory, ASO-S)，是由中国太阳物理学家自主提出的综合性太阳探测专用卫星，也是中国科学院“空间科学先导专项”继“悟空”“墨子号”“慧眼”“实践十号”“太极一号”和“怀柔一号”之后，研制发射的又一颗太空科学卫星，实现了中国天基太阳探测卫星跨越式突破。“夸父一号”卫星由中国科学院国家“空间科学中心”负责工程大总体和地面支撑系统的研制建设；中国科学院微小卫星创新研究院、中国科学院国家天文台、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国科学院紫金山天文台负责卫星平台及有效载荷研制；中国科学院紫金山天文台负责研发科学应用系统；中国西安卫星测控中心负责研发测控系统；中国航天科技集团有限公司第八研究院负责研制生产运载火箭。

“夸父一号”卫星将利用太阳活动第 25 周峰年契机，以探测太阳“一磁两暴”为任务，研究“一磁”（全日面矢量磁场）“两暴”（太阳耀斑和日冕物质抛射）的形成、相互作用及彼此关联，为影响人类航天、通信、导航等高科技活动的太空灾害性天气预报提供支持。该卫星设计寿命 4 年，运行在距地约 720 千米的太阳同步晨昏轨道，搭载有全日面矢量磁像仪、莱曼阿尔法太阳望远镜和太阳硬 X 射线成像仪 3 台有效载荷。此次观测任务将首次在一颗近地卫星平台上实现对全日面矢量磁场、太阳耀斑非热辐射、日冕物质抛射日面形成和近日面传播的同时观测，同时将首次在莱曼阿尔法波段实现全日面和近日冕的同时观测。

2.中国发布首颗太阳探测科学技术试验卫星“羲和号”探测成果

2022 年 8 月，中国国家航天局发布中国首颗太阳探测科学技术试验卫星“羲和号”探测成果。“羲和号”是一颗太阳 Hα 光谱探测与双超平台科学技术试验卫星，于 2021 年 10 月搭载长征二号丁运载火箭发射升空，运行于平均高度为 517 千米的太阳同步轨道，主要科学载荷为太阳 Hα 成像光谱仪。该卫星以太阳科学探测与新型卫星技术测试为主，经过前期在轨试验与调试，创下 5 个国际首次，对后续开展太阳探测任务、提升中国在太空科学领域国际影响力等具有重要意义。一是国际首次成功实现太阳 Hα 波段光谱扫描成像；二是国

际首次在轨获取太阳 Hα 谱线、Si I 谱线、Fe I 谱线的精细结构；三是国际首次实现主从协同非接触“双超”（超高指向精度、超高稳定度）卫星平台技术在轨性能验证与工程应用；四是实现国际首台太阳 Hα 成像光谱仪在轨应用；五是实现国际首台原子鉴频太阳测速导航仪在轨验证。

（四）其他深空探索活动

1.美国詹姆斯·韦伯太空望远镜成功部署，并取得多项探测成果

美国詹姆斯·韦伯太空望远镜(James Webb Space Telescope, JWST)是由 NASA、欧洲航天局和加拿大航空航天局(Canadian Space Agency)联合研发的红外线观测用太空望远镜。该望远镜于 2021 年 12 月成功发射，2022 年 1 月抵达了第二拉格朗日点，并围绕该点以半径 80 万千米的日晕轨道运行。

2022 年 2 月，詹姆斯·韦伯太空望远镜传回了拍摄的第一张照片。2022 年 7 月，NASA 公布了詹姆斯·韦伯太空望远镜升空半年多以来拍摄的首批全彩照片。该批图像涵盖深空星系团、致密星系群、弥漫星云及系外行星等天文学最前沿的研究领域。2022 年 8 月，望远镜首次捕捉到太阳系外行星大气中存在二氧化碳的明确证据。2022 年 9 月，望远镜发布了其拍摄的首张火星红外图像，捕获了整颗行星的大气数据。2022 年 11 月，望远镜发现已知最早星系。詹姆斯·韦伯太

空望远镜通过观测遥远的原始星系，可以确定星系的演化过程，对研究人员理解太阳系的形成与演化过程具有建设性意义。同时，詹姆斯·韦伯太空望远镜利用强大的观测系统可对光芒相对暗淡的低能量褐矮星、年轻的原恒星等目标开展观测，揭示一个由不可见的恒星和行星组成的隐秘宇宙，为研究人员开展系外行星的探索，深入研究地球上生命的起源提供重要帮助。

2.NASA 实施全球首次近地小行星防御任务

2022 年 9 月，NASA“双小行星重定向测试”(DART)航天器以每秒 6.5 千米的速度成功撞击了近地双小行星系统中的卫星“迪莫尔弗斯”(Dimorphos)。该任务是 NASA 开展的全球首次行星防御技术测试，旨在验证利用动能撞击技术偏转小行星运行轨道的可行性。NASA 表示，撞击任务后两周的观测数据表明，DART 航天器成功使目标小行星“迪莫尔弗斯”的轨道周期缩短了 32 分钟。根据 NASA 的衡量标准，DART 任务取得成功的最低要求是使目标小行星的轨道周期改变 73 秒，这意味着该任务的实际成果达到了最低基准的 25 倍以上。后续撞击观测活动或将持续 6 个月，将对小行星轨道变化、质地、撞击陨石坑进行测算，以精准评估撞击效果。

3.日本在小行星探测器“隼鸟”-2 的采集样本中发现超 20 种氨基酸，首次确认地球外氨基酸的存在

2022 年 6 月，日本在其小行星探测器“隼鸟”-2(Hayabusa 2)

带回的“龙宫”(Ryugu)小行星沙土样本中发现了 20 余种氨基酸。此次发现是人类首次在地球外确认氨基酸的存在。氨基酸是构成蛋白质的基本单位，有助于探索生命起源。此外，此次发现可能将进一步证实生命起源于太空，即地球上的原始氨基酸分子可能是通过陨石携带进入地球的。

（五）深空探索前沿技术

1.NASA 授出月球核裂变发电系统合同

2022 年 6 月，NASA 与美国能源部合作选定 3 种月球表面核裂变发电系统(The Fission Surface Power)的设计概念提案，向洛克希德·马丁、西屋电气(Westinghouse)及 IX 公司（Orix Corporation；Intuitive Machines 和 X-Energy 公司的合资企业）授出价值约 500 万美元的合同，用于初步设计开发 40 千瓦级裂变发电系统。裂变系统相比其他发电系统，具有体积小、重量轻、可靠性高，以及可在任意位置及各种自然环境下连续供电的优势。根据计划，月球表面核裂变发电系统将在 21 世纪 20 年代末具备月球演示能力，最终实现在月球至少运行 10 年的目标。

2.DARPA 启动探索太空制造计划

2022 年 3 月，DARPA 与 8 个企业与大学研究团队签订新型轨道与月球制造、材料和大质量高效设计(Novel Orbital and Moon Manufacturing, Materials, and Mass-efficient Design,

NOM4D)项目合同，任务目标是开展太空制造领域材料科学、制造和设计技术等方面的概念研究，实现未来太空结构的在轨制造，以免受火箭发射能力的限制。DARPA 希望实现从地球运送原材料，并收集月球材料进行在轨制造的模式。NOM4D 项目不涉及在月球表面建造任何结构，所有制造过程都将在轨道建设设施中完成，其最终成果也将用于轨道应用。

3.DARPA“敏捷型地月空间行动演示验证火箭”项目持续推进，为核热火箭设计研制提供支持

2022 年 5 月，DARPA 发布敏捷型地月空间行动演示验证火箭(Demonstration Rocket for Agile Cislunar Operations, DRACO)项目第二和第三阶段征询书，推进核热火箭发动机的设计、开发、制造与组装。DRACO 项目旨在开发新型核热推进技术，以解决电力推进系统的推重比和化学推进系统的推进剂效率方面存在的局限性，为未来太空作业奠定基础。该项目第一阶段的目标是开展核热推进反应堆和推进子系统的概念设计，以及开展在轨演示验证系统的概念设计；第二阶段的目标是完成演示系统的初步和详细设计，并建造和试验核热火箭发动机；第三阶段的目标是进行核热火箭发动机的全功率在轨飞行试验。

目前，DARPA 授予通用原子电磁系统(General Atomics Electromagnetic Systems Group, GA-EMS)、蓝色起源和洛克希

德·马丁 3 家美国公司第一阶段合同。截至 2022 年 11 月，GA-EMS 已完成 DRACO 项目 A 任务第一阶段主要任务目标，包括交付核热推进反应堆和发动机的基线设计，并使用 NASA 核热火箭元件环境模拟器成功测试核反应堆的耐高温元件等关键部件。

4.美国国防创新小组选择美国超安全核能公司和雪崩能源公司开发小型核动力航天器

2022 年 5 月，美国国防创新小组选择两家美国公司超安全核能和雪崩能源(Avalanche Energy)开发小型核动力航天器，并计划 2027 年开展太空演示。其中，超安全核能公司将展示一种名为 EmberCore 的可充电封装核放射性同位素电池。雪崩能源公司开发了一种名为 Orbitron 的手持式微聚变反应堆，可用作推进器和动力源。

5.美国桑迪亚国家实验室为月球基地设计微电网

2022 年 5 月，美国桑迪亚国家实验室(Sandia National Laboratories, SNL)与 NASA 达成合作，为未来月球基地设计微电网。该实验室为月球基地采矿与加工中心的微电网设计电气系统控制器。该控制器可在不同时间维持均匀的电压水平。采矿设施的微电网最终与月球居住单元的微电网相连。该实验室的另一个工作重点是开发连接采矿设施与居住单元微电网的系统，以维持电网的韧性与稳健性。

6.日本探测器“小马座”将验证以水为推进剂的新型推进器

2022 年 11 月，日本“小马座”(Equuleus)探测器顺利与地面建立通信，按照预期目标执行任务。“小马座”是一颗由日本宇宙航空研究开发机构和东京大学联合研制的月地平动点 6U 立方星，与“好客”号同时搭乘“阿尔忒弥斯”-1 任务 SLS 运载火箭发射。“小马座”配有“宝瓶宫”(Aquarius)推进系统，包括 8 个水推进器，载有 1.5 千克水推进剂，用于姿态控制和机动管理。此外，该探测器还配备了等离子层氦离子观测望远镜、6U 月球撞击现象探测相机、隔热地月物体探测器等多种科学仪器。“小马座”将飞向地月拉格朗日点验证轨道机动技术，并测量地球周边等离子体分布，为研究地球周围空间区域的辐射环境、测试低能量轨迹控制技术提供支持。

第八章 世界航空技术发展报告

航空产业代表着一个国家的经济、军事和科技水平，是一个国家综合国力、国防实力的重要标志之一。2022 年，随着新冠疫情的缓解和防疫管控政策的放宽，世界航空业逐步复苏，客运市场回暖，航空产业需求持续回升；美欧航空企业通过加大对航空科研生产设施的投入和并购重组等举措，持续提升企业研发和制造水平，增强市场竞争力。同时，主要国家在航空前沿技术领域竞争加剧。作为世界航空工业的领导者，美国为维持其技术优势，继续加大对隐身轰炸机、高超声速飞行器、第六代战斗机、高空长航时无人机等方面的投入力度。俄罗斯因俄乌冲突，面临美欧严厉制裁，被迫更加注重航空技术的自主性建设，加快进口产品和设备的国产替代进程。欧盟、日本、韩国则通过加强国际合作的方式，增强航空技术能力。随着越来越多的国家持续提升对航空装备和航空技术的投入力度，以智能机载系统、高超声速、新能源动力为代表的航空先进技术呈现出快速发展态势，军用飞机、民用飞机、航空发动机、机载系统领域中的新突破不断涌现。

一、世界航空技术及产业发展重要动向

2022 年，世界航空产业继续保持回升态势，航空运力有序恢复。国际组织和航空头部公司均认为，未来几年航空客运市

场和航空制造业将继续回升；而无人机、战斗机等航空装备在俄乌冲突中大规模应用，证明了航空装备依旧是夺取战场主动权的关键力量。为加快推进航空新技术研发，积极应对复杂多变的地缘动荡与挑战，美欧积极建设新的航空科研生产设施，开展兼并重组，并将高超声速、人工智能、绿色航空等作为研发突破重点。

（一）世界航空产业继续保持回升态势

随着新冠疫情的缓解，全球航空客运量持续回升，民用航空业呈现出明显的复苏态势。2022 年，国际航空运输协会(International Air Transport Association, IATA)等航空组织与波音公司和空客公司等航空制造商均对市场给出了相对乐观的预期。

1.国际航空运输协会预测全球航空业将在 2023 年恢复到疫情前水平

2022 年 10 月，国际航空运输协会公布的航空客运市场数据显示，全球客运量已经达到 2019 年 10 月的 74.2%，国际旅行的远期预订量增加到疫情前水平的 75%左右，这表明全球航空旅行持续复苏。在航空运输市场复苏过程中，北美和欧洲市场明显快于亚洲市场。中国大陆、中国台湾、中国香港及日本逐步放松管制，亚洲的航空客运市场也呈现出快速增长态势。2022 年 5 月，国际航空运输协会理事长威利·沃尔

什(Willie Walsh)曾表示，航空业客运量的恢复正在加速，将在 2023 年恢复到新冠疫情暴发前的水平。

2.美国波音公司对未来民机市场保持乐观预期

2022 年 7 月，波音公司发布 2022 年《商用航空市场展望》(Commercial Market Outlook, CMO)报告，展示了未来 20 年对新飞机和相关服务的强劲需求。CMO 报告预测，到 2041 年全球机队规模将较 2019 年增长 80%，全球将需要 41170 架新飞机，总价值约 7.2 万亿美元。其中，窄体客机需求量为 30880 架，宽体客机需求量为 7230 架，货机需求量为 940 架，支线飞机需求量为 2120 架。其中，未来 20 年，中国年均航空客流增长速度为 4.9%，中国的民用飞机机队规模将从 2019 年的约 3900 架增加到 2041 年的约 9600 架。中国将需要 8485 架新飞机，占同期全球飞机交付量的五分之一以上，总价值约 1.5 万亿美元。波音公司民用航空市场销售高级副总裁毛毅山(Ihssane Mounir)认为，尽管在过去两年（2021—2022 年）中遭受了难以预料的纷扰，全球航空业还是显示出了惊人的坚韧性。

3.欧洲空客公司小幅上调客机需求预测

2022 年 7 月，空客公司发布全球市场预测报告，报告认为在 2019—2041 年期间，全球国内生产总值(GDP)将以年均 2.6%的速度增长，航空客运的增长率将达到 3.6%，航空货运的增长率将达到 3.2%。民航机队的数量将从新冠疫情前的 22880

架增长到 2041 年的 46930 架。为满足机队规模增加和替换老旧飞机的需要，2022—2041 年，全球客运和货运飞机的总需求将为 39490 架。其中，典型的单通道飞机交付量为 31620 架，而典型宽体飞机的交付量为 7870 架。与 2021 年发布的预测结果相比，空客公司将未来 20 年的飞机需求数量由 39020 架增加至 39490 架，小幅上调了需求预期。

4.美国霍尼韦尔公司上调未来 10 年公务机市场预测

2022 年 10 月，霍尼韦尔(Honeywell)公司发布《2022 年全球公务航空展望》(2022 Global Business Aviation Outlook)报告，预计 2023—2032 年，全球飞机制造商将交付 8500 架公务机，总价值约 2740 亿美元。此次预测的交付量较其 2021 年预测的交付量增长了约 15%。

5.对中国的影响与启示

随着全球航空业的复苏，中国航空运输业也迎来机遇。中国应提前谋划，做好准备，更好地满足未来航空运输的需求。一是要抓住目前飞机价格偏低的机遇，淘汰老旧飞机，有序扩充机队，逐步扩大运力，满足市场需求；二是要优先发展受疫情影响小、市场前景好的机种，如无人机、货机等；三是要扩大 C919 产能，推动 C929 等国产飞机的研发力度，利用市场回升契机积极拓展全球市场；四是在恢复欧洲各国国际航班的同时，尽快落实中美互飞，推动中美间航班顺利复航，促进中美贸易人员往来和供应链提升；五是加强对公务

机的市场调研与研发力度。

（二）俄乌冲突再次证明航空装备的重要性

2022 年，俄乌冲突爆发并持续升级。在冲突的初始阶段，俄军对乌克兰重要机场、仓库、防空系统、雷达站等军事设施开展空袭行动，并出动伊尔-76 运输机和多种直升机实施空降和机降作战，成功占领戈斯托梅利安东诺夫机场，对基辅形成较大军事压力。但是，俄罗斯先进航空装备数量少、信息化作战能力弱、精确打击能力有限，难以完全掌握制空权，作战行动受到较大影响。截至 2022 年 12 月底，双方陷入消耗战。尽管如此，以苏-57 战斗机、“匕首”高超声速导弹、“猎户座”无人机为代表的新型航空装备依然取得了重要战果。

1.俄军空中作战力量不足是导致战争进程延长的主要影响因素之一

俄罗斯空天军共有 800 多架战斗机、470 架攻击机和 121 架轰炸机，但实际投入对乌作战的仅有几百架战机。与伊拉克战争中的多国部队相比，俄罗斯无论是装备的数量还是性能，均存在较大差距，特别是对地面目标的侦察监视和精确打击方面，俄军装备难以满足作战需求。由于只能使用铁炸弹，所以不少俄罗斯战斗机为提高打击精度采用了低空投弹的方式，结果被乌军地空导弹击落。综观整个战场，俄军航空

装备数量和性能均不足，使俄军预想的闪电战变成了旷日持久的消耗战。

2.俄军新型航空装备摧毁多个乌克兰目标

在俄乌冲突中，俄罗斯的“匕首”高超声速导弹、苏-57 战斗机、“猎户座”无人机等新型航空装备取得了不俗的战绩。2022 年 3 月，俄罗斯空天军使用“匕首”高超声速导弹打击了乌克兰伊万-弗兰科夫州的一处大型地下弹药库，这是全球高超声速导弹首次用于实战。2022 年 3 月，俄军再次使用“匕首”高超声速导弹打击了尼古拉耶夫州的一处大型油库。2022 年 6 月，俄罗斯空天军出动苏-57 战斗机在乌克兰“山毛榉”和 S-300 防空系统的作战区域执行侦察和防空系统压制任务，俄军将 4 架苏-57 战斗机组成编队，通过组网的方式提高发现和摧毁乌军目标的效率。2022 年 10 月，俄军苏-57 发射 R-37M 远程空空导弹，距离 217 千米击落乌军 1 架苏-27 战斗机和 1 架苏-24 战斗机。此战创造了空中实战中击落敌人高机动战斗机的最远距离世界纪录。“猎户座”无人机是俄罗斯研制的中空长航时无人机，此前它在叙利亚冲突中多次执行侦察监视任务，此次俄乌冲突是该机首次在实战中对地面目标实施打击，成功摧毁了乌南部艾达尔营指挥所。

3.无人机成为俄乌双方交战的重要装备

无人机作为一类成本低廉、使用灵活、操作方便、种类多样的新兴作战装备，大量出现在俄乌战场，执行监视侦察、定

点清除、自杀式攻击等任务，充分发挥无人机高效费比的作战优势，产生了明显的作战效果。

俄军出动的无人机超过 10 型，以中小型侦察无人机为主，执行战场监视、目标指示、火炮校射任务。俄军的主力无人机为“海雕”-10(Orlan-10)和“前哨”(Forpost)系列无人机。“海雕”-10 作战半径为 200 千米，最大任务载荷仅为 5 千克。“前哨”无人机由以色列引进和改进而来，最新改型的“前哨”-R 初步实现了国产化并具备火力打击能力，最大任务载荷为 100 千克。俄乌冲突中后期，俄罗斯小型无人机消耗量持续增大，为弥补自身低成本无人作战力量的缺失，俄罗斯开始从伊朗采购“沙赫德”-136(Shahed-136)自杀式无人机，总量近千架。该机可搭载战斗部重量达 50 千克，远超乌军正在使用的自杀式无人机，再次扭转了小型消耗类无人机的战场攻防平衡。

乌克兰空军利用低成本无人机对俄军造成重创。2022 年 4 月，乌克兰出动“旗手”-TB2(Bayraktar-TB2)无人机，对“莫斯科”号的防空系统实施干扰，并确定了目标位置，协助“海王星”反舰导弹实施攻击任务。2022 年 5 月，俄军在别洛戈罗夫卡附近试图渡过北顿涅茨克河时，被乌克兰无人机发现，并将目标位置提供给乌克兰炮兵，在无人机和炮兵的协同下，大量俄军被歼灭。2022 年 10 月，乌克兰利用至少 7 艘无人艇和若干无人机组成的无人集群袭击位于克里米亚塞瓦斯托

波尔港内的俄罗斯海军黑海舰队，成功击中旗舰马卡洛夫海军上将号巡防舰等舰只。2022 年 12 月，1 架乌克兰无人机袭击了俄罗斯空军基地，2 架图-95 轰炸机被摧毁，两名俄罗斯军人在爆炸中受伤。

4.对中国的影响与启示

俄乌冲突和近期的局部战争表明，借助先进航空装备可快速、高效地达成预定的作战目的，反之则会陷入被动的消耗战，甚至存在输掉战争的风险。为维护中国主权和发展利益，从军用航空领域来看，一是要发展性能先进的航空装备体系，避免与强敌产生代差；二是要增加航空装备的数量，以满足多方向、高强度、持续作战的需要；三是要提高航空装备的信息化、智能化和多军种联合作战能力，通过陆海空天电多维一体的联合掌握未来战场主动权；四是要增加精确制导弹药的生产和储备，为大规模持久战做好充足准备。

（三）美欧积极建设新的航空科研生产设施

为抢占发展先机，美国、欧洲、俄罗斯的航空企业加大对航空科研生产设施的建设与改造的投入力度，以满足新型装备研制和提高创新能力的需要。

1.美国波音公司公开其首座创新工厂

2022 年 9 月，波音防务、太空与安保公司（Boeing Defense，Space&Security）首次公开先进复合材料制造中心(Advanced

Composite Fabrication Center, ACFC)。该中心是波音首座创新工厂，位于美国亚利桑那州梅萨，占地面积约 1.44 万平方米，由波音鬼怪工厂(Phantom Works)负责运营，任务是为未来作战飞机制造先进复合材料组件。截至 2022 年 12 月，该工厂的建筑工作已经完成，即将具备运行能力。波音透露，其他支持后续生产阶段的新工厂也正在圣路易斯地区建设中，并计划在未来几年投产。先进复合材料制造中心和这些新工厂的运营将大幅提升波音公司的产品研制和市场竞争力。

2.法国赛峰集团开设新的增材制造卓越中心

2022 年 10 月，赛峰集团(Safran)投资 8000 万欧元成立新的增材制造园区。新园区占地面积约 1.25 万平方米，拥有 100 多名世界一流的科学家、工程师和技术人员，使用先进的增材制造设备生产飞机和发动机零件。新园区将按增材制造所需的流程从研发到工程和生产的组合，配备了粉末实验室、冶金实验室、扫描电镜、两个热处理炉、精加工设备和至少 8 台粉末床熔融 3D 打印机。赛峰集团表示，作出创建新卓越中心的战略决策，将巩固赛峰集团在增材制造方面的专业能力并加速该技术的应用。新园区 2022 年的目标是总共交付 4000 个零件，预计到 2023 年总体交付数量将翻倍。

3.俄罗斯“土星”科研生产联合体建设“智慧工厂”

2022 年 11 月，俄罗斯联合发动机集团(United Engine Corporation, UEC)下属的“土星”科研生产联合体(NPO Saturn)

完成“智慧工厂”数字平台建设项目的第二阶段工作，包括构建 60 个自动化工作站，实现 10 台冶金设备联网等任务。该“智慧工厂”项目属于《俄罗斯联邦数字经济》国家计划中“数字技术”国家项目的一部分，项目经费主要来自俄罗斯信息技术发展基金会。“智慧工厂”的各控制台和工作站已进入测试状态，将可有效评估生产线绩效指标，辅助管理层的决策。

4.对中国的影响与启示

航空工业是资金密集、技术密集的高技术产业，科研生产设施是航空工业发展的重要物质基础。中国应把握机遇，加强战略规划和技术布局：一是要做好战略规划，以新型飞机研制、前沿技术发展、提升信息化/智能化水平为重点，超前开展科研生产设施建设；二是要加强航空科研生产设施相关的技术研发，特别是高端机床、工业软件等方面的研发工作，实现科研生产设施的自立自强；三是要加强跨行业的协作，通过航空科研设施建设带动机械、电子、材料等相关产业的发展。

（四）美欧航空制造商并购重组提升运营效率

为提高企业运行效率、更好地满足市场需要，2022 年，美国派克汉尼汾公司(Parker Hannifin)、L3 哈里斯公司、俄罗斯联合飞机公司(United Aircraft Corporation, UAC)等航空制造商分

别开展业务重组活动。

1.美国派克汉尼汾公司成功并购美吉特公司

2022 年 4 月，欧盟委员会批准派克汉尼汾公司以 86.5 亿美元收购英国工程公司美吉特公司(Meggitt)的交易。2022 年 9 月，派克汉尼汾公司完成收购。派克汉尼汾公司主要生产用于控制各种工程机械和航空航天设备的流体传动元器件及系统，2020 年产值约 137 亿美元。美吉特公司是航空刹车系统、传感器、复合材料、环境控制系统等航空产品的供应商，2021 年营业收入约 15.9 亿英镑。派克汉尼汾公司通过此次并购，将强化其国防和航空航天系统业务，更好地满足客户对飞机和航空发动机部件及系统的需求。

2.俄罗斯米格公司和苏霍伊公司完成合并

2022 年 6 月，俄罗斯联合飞机制造公司旗下的米格公司(MiG)和苏霍伊公司(Sukhoi)完成合并，并在俄罗斯国家统一法人实体登记处进行了登记。此次合并是俄对俄罗斯联合飞机制造公司改革重组的关键步骤。改革后，米格和苏霍伊两个公司的独立品牌仍会保留，但俄罗斯联合飞机制造公司的管理结构从以往的 3 级压缩为 2 级，使公司更直接地关注产品的设计和生产、基础设施的改进和效率的提升，更好地落实航空规划、推动技术开发，助力研制未来飞机、无人机和混合动力飞机等新装备。

3.美国 L3 哈里斯公司计划收购航空喷气·洛克达因公司

2022 年 12 月，L3 哈里斯公司宣布计划以 47 亿美元收购航空喷气·洛克达因公司(Aerojet Rocketdyne)。该交易正在接受美国联邦贸易委员会(Federal Trade Commission, FTC)等机构审议批准。航空喷气·洛克达因公司总部位于加利福尼亚州萨克拉门托，为航天器、弹道导弹和军事战术武器制造火箭发动机和推进系统，年收入约 23 亿美元。L3 哈里斯公司如能成功实现收购，将在民用航天、战略防御系统和精确打击武器方面占据更大的市场份额。

4.对中国的影响与启示

通过上述情况，可以得到以下两点启示：一是并购重组仍然是整合资源、提高效率、增强自身实力、化解竞争矛盾及拓展业务领域的重要手段，对航空企业保持持续健康发展起着至关重要的作用；二是米格公司和苏霍伊公司合并的案例表明，在业务相同或相近的情况下，简化管理层级，有助于缩减周期、优化管理，提高运行效率。

（五）高超声速技术竞争日趋激烈

高超声速飞行器具有速度快、突防能力强的特点，是世界航空强国竞相发展的技术制高点。2022 年，俄罗斯“匕首”高超声速导弹在乌克兰用于实战及美国 AGM-183A 高超声速导弹试射成功，标志着采用助推滑翔模式的高超声速导弹技术已经趋于成熟。高超声速技术的研究重点正在向采用吸气式

动力的高超声速飞行器转移。

1.美国完成涡轮冲压组合循环发动机地面模态转换试验

2022 年 11 月，美国赫尔墨斯公司(Hermeus)宣布，在圣母大学涡轮机械实验室(Notre Dame Turbomachinery Laboratory, NDTL)成功演示了“奇美拉”(Chimera)涡轮冲压组合循环发动机由涡喷模态到冲压模态的转换。试验中，研究人员通过加热来流空气模拟了高马赫数下的温度和压力。低速飞行时，发动机处于涡喷模态，通过采用预冷技术降低来流空气温度，可以将涡喷模态的性能极限由马赫数 2 提升到马赫数 3。该发动机进入马赫数 3 后，开始转换模态，气流完全绕过涡喷发动机，直接进入后半部分的冲压发动机，将速度提高到马赫数 5。此次模态转换试验的成功，为 2023 年年底进行“夸特马”(Quarterhorse)高超声速飞机首飞奠定了重要基础。

2.日本首次完成超燃冲压发动机飞行试验

2022 年 7 月，日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)在内之浦航天中心(Uchinoura Space Center)进行超燃冲压发动机飞行试验。该机构研制的超燃冲压发动机随 S-520-RD1 探空火箭发射升空，在到达约 150 千米高度后飞行试验段被释放，在下降至 30 千米高度、速度达到 5.5 倍声速时，进行了约 6 秒的燃烧测试，试验取得圆满成功。S-520-RD1 探空火箭的发射角度为 78 度，发射后 206 秒达到 168 千米的最大高度，试验全程约 412 秒。该火箭由单级助推器和飞行试验段组成，

全长 9.15 米，直径 0.52 米，总重 2.6 吨，其中飞行试验段长 1.8 米，直径 0.52 米，重 0.3 吨。此次飞行试验旨在获得真实飞行状态下气动加热和超声速燃烧数据，用来修正地面风洞测试结果，最终构建预测实际飞行状态特性的相关分析工具。

3.英国公布军用高超声速飞机验证机概念方案

2022 年 7 月，英国皇家空军快速能力办公室(Rapid Capabilities Office, RCO)、国防部国防科学与技术实验室(MOD's Defence Science and Technology Laboratory)、罗尔斯·罗伊斯公司和反作用发动机(Reaction Engines Ltd., REL)公司在范堡罗航展上联合展出了名为“概念 V”的军用高超声速飞机模型及其概念方案。“概念 V”机长 9 米，翼展 4 米，最大速度马赫数 5 左右，起飞总重约 4～6 吨，采用 1 台涡轮冲压组合发动机。“概念 V”旨在突破新型吸气式高速推进系统总体设计、创新的热管理系统和先进飞机方案设计等关键技术。“概念 V”的公开展示也标志着英国成为继美国之后，第二个官方公开宣布军用高超声速飞机研发计划的国家。按计划，英国将在 2030 年前完成一型速度不超过 5 倍声速的验证机飞行试验，在 2030 年后实现 5 倍声速以上的高超声速飞机飞行试验。

4.美国空军授出“混乱”高超声速攻击/侦察机合同

2022 年 12 月，美国空军授予莱多斯公司(Leidos)“混乱”

(Mayhem)项目合同，研制一种高超声速技术验证机。合同内容包括 4 项：一是开发一种比 AGM-183A 高超声速导弹更有效的吸气式高超声速系统，能够携带多种有效载荷，用于执行打击和敌情监侦任务；二是建立 DARPA 高超声速吸气式武器概念(HAWC)；三是提供更大级别的高超声速吸气式系统，通过标准化的有效载荷接口执行多种任务，提供重大的技术进步和未来能力；四是使用数字和基于模型的系统工程，加速开发并提高设计精度。

5.对中国的影响与启示

与采用火箭动力的高超声速飞行器相比，采用吸气式动力的高超声速飞行器重量更轻和体积更小，更适合重复使用并降低成本。目前，超燃冲压发动机等吸气式高超声速动力技术的逐渐成熟，为高超声速飞机的研制奠定了重要的技术基础。中国应充分把握这一技术机遇：一是要加强超燃冲压发动机和涡轮基组合循环发动机的技术研发力度，为高超声速飞行器提供可靠的动力；二是要循序渐进，先研制吸气式高超声速导弹，再研制小型高超声速试验机，最后研制具有实用价值的大型高超声速飞机；三是要积极研究探测和拦截高超声速武器的技术，保卫国家领空安全。

（六）人工智能技术向空战领域拓展

近年来，人工智能技术发展迅速，在航空中的应用越来越广，

目前已涵盖飞机设计、制造、维修保障等诸多领域。智能空战具有对抗性强、信息不完整等特征，因此一直是技术难度最大的人工智能技术领域。2022 年，美欧加大了对智能空战领域的研发力度，取得了诸多新进展。

1.英国 BAE 系统公司完成有人-无人编组技术试飞

2022 年 3 月，BAE 系统(BAE Systems)公司联合美国防部战略能力办公室(Strategic Capabilities Office)进行了有人-无人混合编组(MUM-T)技术飞行试验。此次试验出动了 1 架战斗机和多架无人机，每架无人机均携载真实任务传感器，自主制定和执行战术，完成预定作战任务。战斗机飞行员通过人机交互界面监控无人机任务进展情况，与无人机进行实时互动。BAE 系统公司表示，此次试验演示了典型作战环境中有人-无人混合编组机队具有的协同作战能力，所采用的人机交互界面是在飞行员和电子战军官的协助下，通过广泛的虚拟试验、模拟推演开发出来的，其底层算法能在战术层面实现分布式自主决策，软件开发工具包还允许第三方引入新算法、编入新装备、执行新任务。

2.美国洛克希德·马丁公司升级“忠诚僚机”作战概念

2022 年 7 月，洛克希德·马丁公司臭鼬工厂(Skunk Works)总经理约翰·克拉克(John Clarke)表示，该公司对未来空中作战提出了全新展望，即以有人-无人编组为基础，广泛使用人工智能和机器自主赋能的多样化飞行器。该公司在研的低端

“忠诚僚机”将根据任务类型进行划分，形成与有人作战飞机功能互补的“系统簇”(Family of Systems)，同时具有较高自主水平，无须飞行员过多干预和指控，可显著降低后者的工作负荷，预计未来 3～4 年有望部署至作战部队。

3.美军开展智能自主超视距空战技术开发

2022 年 11 月，美国 DARPA 战术技术办公室(Tactical Technology Office, TTO)发布人工智能增强(Artificial Intelligence Reinforcements)项目信息征询书。该项目设想由人工智能驾驶的多架飞机在超视距空战仿真中与敌机编队进行对抗，目标是证明人工智能可在超视距空战领域执行进攻性和防御性制空任务。DARPA TTO 将选择 6 家企业承担为期 18 个月的第一阶段研发，之后选择 4 家进行为期 30 个月的第二阶段研发，项目总投入 7000 万美元。

4.对中国的影响与启示

随着人工智能技术的不断发展，空战领域必将越来越多地引入人工智能技术。在智能空战领域，优先发展有人-无人协同的空战技术，是一个重要的发展方向。面对人工智能科技研发竞争加剧，中国应加快推动人工智能与空战应用的融合研究：一是要把作战任务进行分类，制定从易到难、循序渐进的智能空战技术发展路线图；二是要加强有人-无人协同技术研究，将人工智能技术引入协同作战场景的任务能力构建；三是要加强仿真和试验，通过仿真和试验不断积累数据，验

证作战战术，加速技术成熟。

（七）绿色航空成为多国关注的重点

为降低航空运输对全球气候变化的影响，人们对飞机环保性的要求越来越高。2022 年，世界多个国家或组织分别制定了新的绿色航空战略规划，将对绿色航空技术发展提供强力牵引。

1.欧洲 35 个国家签署《2050 目标》航空减排宣言

2022 年 2 月，35 个欧洲国家、146 个行业团体和 5 个航空业协会在法国图卢兹签署了《2050 目标》(Destination 2050)航空减排宣言，确认到 2050 年实现航空业二氧化碳净零排放的目标。该宣言期望通过改进飞机和发动机技术、开发可持续航空燃料(Sustainable Aviation Fuel, SAF)、改进空中交通管理和运营，以及通过有效的经济鼓励措施，来引导航空业向净零排放过渡；并呼吁通过《欧盟航空脱碳协定》，在政府和航空业之间进行对话，制定具体政策，以支持航空业的绿色转型。

2.英国政府公布航空零排放战略

2022 年 7 月，英国政府正式公布《航空零排放战略》(Jet Zero Strategy)，提出 2040 年实现英国国内航空运输和机场净零排放的目标，并要求到 2030 年至少 10%的航空燃料是可持续航空燃料，而目前英国的这一比例低于 0.1%。该战略提出 6

个优先领域：一是提高现有航空系统的效率；二是强制要求创造安全且不断增长的可持续航空燃料需求，增加对可持续航空燃料的支持；三是支持发展零排放飞机，计划到 2030 年实现英国国内的零排放航线；四是开发碳市场和温室气体去除技术，以推动脱碳和抵消任何残余排放；五是为消费者提供信息，方便消费者选择可持续航空旅行；六是增加对航空运输非二氧化碳排放，如尾迹和氮氧化物等造成影响的认识。

3.美国空军发布《气候行动规划》

2022 年 10 月，美国空军发布《气候行动规划》(Climate Action Plan)，拟在不断变化的气候环境中保持空中优势。该规划认为，气候变化对美国空军作战部队保持战备状态、进入全球战略要地和执行作战任务带来极大影响。面对气候变化的挑战，美国空军提出以下 3 个优先方案：一是面对气候变化风险，美国空军应保持装备系统韧性，维持空天优势；二是制定决策时应充分考虑气候因素，培养相关专业人才队伍；三是优化能源分配和使用率，寻求替代能源，减少化石燃料需求，减轻后勤保障压力，在减排的同时提升战备能力。4.对中国的影响与启示

中国已向世界承诺，力争 2030 年前实现碳达峰，2060 年前实现碳中和。为达此目标，中国航空业已采取积极措施，如 2022 年 1 月，中国民用航空局印发《“十四五”民航绿色发

展专项规划》。面对艰巨任务，中国还应采取进一步的措施：一是要制定中国的绿色航空发展路线图，明确具体措施和各阶段目标；二是要坚持“共同但有区别责任”的原则，充分考虑中国航空运输业和航空制造业的实际情况和发展阶段，维护国家利益和发展空间；三是要加强航空基础技术研究，通过技术进步实现绿色航空发展目标。

二、军用飞机技术

根据所承担任务的不同，军用飞机可分为作战飞机和支援飞机。2022 年，在作战飞机方面，美国、俄罗斯第五代战斗机改进升级技术获得重要进展，美欧探索新一代战斗机技术，美国新型隐身轰炸机技术发展取得阶段性成果；在支援飞机方面，美国重点发展新型加油机技术，欧洲、美国和俄罗斯皆关注新型预警机技术，欧洲发展新型中型运输机技术。

（一）作战飞机

作战飞机主要包括战斗机、攻击机和轰炸机。2022 年，美国、俄罗斯等国在第五代战斗机改进升级、第六代战斗机和新一代远程轰炸机的研发方面均取得较大进展。

1.美俄对第五代战斗机进行升级改进

2022 年 4 月，美国国防部公开的 2023 财年预算申请报告显示，F-22 将开展一系列重大升级，并对可能用于下一代空中

主宰(Next Generation Air Dominance, NGAD)第六代战斗机上的相关技术开展测试，包括网络入侵检测和预防、预测性维护、传感器融合、改进的雷达、飞行员辅助技术、替代 GPS 的导航设备、作战识别等技术。美军希望此次大规模改进能帮助 F-22 保持作战优势，直至第六代战斗机服役。同期，美国空军发布了 F-22 升级型概念图，首次展示其改进之后的状态。一是加挂电子战吊舱，提升其电子对抗能力；二是增加低阻力油箱及挂架(Low Drag Tank and Pylon, LDTP)，使 F-22 具有更远的航程，并确保美军空中加油平台的生存能力；三是配备 AIM-260 远距空空导弹。此外，头盔显示器(Helmet-Mounted Display, HMD)也将是 F-22 的一项重要升级项目。2022 年 8 月，美国空军在 F-22 上成功测试了第三方软件，这是第三方软件首次集成在第五代战斗机上。根据 2023 至 2027 财年预算案，美国国防部将每年划拨 5.479 亿美元用于 F-22 的升级工作，总计约 28 亿美元。2021 年 11 月，美国空军正式与洛克希德·马丁公司签署了 143 架 F-22 升级合同（增量 3.2B 升级），合同总金额为 108.6 亿美元，预计升级将在 2031 年年底前完成。

2022 年 8 月，俄罗斯联合飞机制造公司向俄罗斯国防部提交双座型苏-57 第五代战斗机方案，后座飞行员负责使用机载武器和与无人机协同。联合飞机制造公司计划在 2028 年前向俄罗斯国防部交付 76 架苏-57，平均年产要达到约 11 架，

目前正在着手扩大该机产能。

2022 年 10 月，俄罗斯联合飞机制造公司对苏-57 的机载设备进行了现代化改造，升级后的飞机顺利完成首飞。该公司正在对苏-57 的机载配套设备扩展功能，对飞行员人工智能支持设备及各种新型武器的使用进行测试。

2.美欧第六代战斗机技术取得新进展

2022 年 4 月，美国海军阐述了其下一代空中主宰项目愿景，其中 F/A-XX 战斗机将作为下一代空中主宰、系统簇的重要组成部分，成为美国海军有人-无人编组协同作战的组织者和指挥者，进一步扩大舰载机联队作战范围。美国海军于 2021 财年启动 F/A-XX 概念完善阶段工作，使其具有更远的航程和更快的飞行速度，可融合主/被动传感器，并能使用规划中的未来远程武器。2022 年 9 月，美国空军部长肯德尔(Kendall)透露下一代空中主宰仍处于设计阶段，计划在 2030 年前进入生产阶段。肯德尔表示，有人机将成为下一代空中主宰、系统簇的核心，包括伴随行动的合作式作战飞机。

2022 年 7 月，英国在范保罗航展上展出了“暴风”(Tempest)战斗机的最新效果图和缩比模型。与之前的设计方案相比，新设计的机头尺寸更为正常，进气口由前掠改为了斜切，翼型也进行了大幅修改，发动机间隔缩短且取消了尾椎。

2022 年 12 月，英国、意大利和日本政府发表联合声明，启动名为全球空中作战项目(Global Combat Air Programme,

GCAP)的战斗机联合研制项目。该机由日本的 F-X 战斗机和英国的“暴风”战斗机合并而成，是一种多功能隐身战斗机，性能优于 F-35 和“暴风”战斗机，具有先进的传感和网络功能。新型战机拟于 2035 年前后交付部队，用于取代日本的 94 架 F-2 战斗机、英国的 144 架和意大利的 94 架“暴风”战斗机。

3.美国 B-21 隐身轰炸机正式亮相

2022 年 3 月，美国空军表示，首架 B-21“空袭者”新型隐身战略轰炸机原型机已从诺斯罗普·格鲁曼公司位于加利福尼亚州帕姆代尔的工厂转入载荷校准设施中。2022 年 5 月，美国空军高层表示，B-21 轰炸机首架原型机的载荷校准试验进展顺利，与计算机预测的数字模型相符，按计划该机在未来几周内安装机载设备、喷涂必要涂层，随后出厂进行发动机试车、低速/高速滑行等地面试验。

2022 年 9 月，诺斯罗普·格鲁曼公司与美国空军签署了一项业界首创的数据权利协议，在整个项目中开放 B-21 轰炸机数据访问和协作，包括启动数字孪生共享环境。该协议将使对 B-21 项目的通用数据和数据环境的访问提升到一个新的级别，扩大诺斯罗普·格鲁曼公司和美国空军之间的透明度和协作，有助于在整个项目寿命周期内提供更高的经济可承受性和升级的快速性。

2022 年 12 月，诺斯罗普·格鲁曼公司和美国空军联合举办

了 B-21 下线仪式。美国空军透露，B-21 的隐身能力优于 B-2A，是目前隐身能力最强的军用飞机，可以在反通行/区域拒止(Anti-Access/Area Denial, A2/AD)环境下有效作战。B-21 采用飞翼布局，具备 6 个主要技术特点：一是兼备网络化协同作战和独立作战能力；二是具备较强的战场生存能力；三是作战半径适中，能满足对主要对手的打击覆盖需求；四是内埋载弹量适中，武器配置灵活多样；五是临空/防区外打击能力兼顾，突出临空打击能力；六是强调经济可承受性，便于升级改造。根据计划，美军将购买 100 架 B-21，预计 2025 年前后形成初始作战能力，并逐步取代 B-1B、B-2A 轰炸机。

（二）支援飞机

支援飞机主要包括运输机、加油机、预警机、教练机等。支援飞机是作战能力的倍增器，对完成预定的空中作战任务具有重要的保障作用。2022 年，美国加油机、美俄欧预警机和欧洲运输机技术取得显著进展。

1.美国空军拟研制翼身融合布局运输/加油机

2022 年 7 月，美国国防部发布信息征询书，向工业界寻求采用翼身融合体(Blended Wing Body, BWB)布局的大型飞机原型机的设计方案。该方案未来可能衍生为多功能加油/运输机。美国国防部希望意向企业的 BWB 方案与波音 767 和空客 A330 系列商用和军用飞机相比，空气动力学效率至少提高

30%，换装新型发动机后油耗至少降低 60%。

2022 年 10 月，美国空军表示正与国防部、NASA 及工业界合作，设计超高效加油/运输机原型机，拟在 4 年内完成全尺寸翼身融合布局运输/加油机原型机的试验。与现役加油机和运输机相比，该原型机的气动效率将提高 30%，雷达截面积减小，有效载重航程和供油量提高，对抗环境下的作战能力增强。

2.美欧厂商积极参加北约未来预警机技术研究项目

2022 年 3 月，空客联合诺斯罗普·格鲁曼等 7 家公司建立的大西洋先进全域强韧行动战略伙伴关系(Atlantic Strategic Partnership for Advanced All-domain Resilient Operations, ASPAARO)团队参与北约的联盟未来监视与控制(Alliance Future Surveillance and Control, AFSC)项目。该团队将向北约提供先进的战术监视、指挥与控制能力，实现 2035 年前后替换现役预警机的目标。后续，ASPAARO 团队将对全分布式监视模式进行全面评估，优化细节，开展综合评估，并提供经验、技术、开放标准/接口解决方案。目前，北约拥有 14 架 E-3 系列预警机，拟在 2035 年全部退役。除空客公司牵头的 ASPAARO 团队外，北约还授予波音公司牵头的相关团队 E-3 替换研究合同，表明该项目竞争很可能在两大巨头及其各自跨大西洋团队之间展开。

3.美国空军选择 E-7A 替换 E-3 预警机

2022 年 2 月，美国空军发布 E-3 预警机替换项目信息征询书。2022 年 6 月，美国空军宣布将授予波音公司合同，采购 2 架 E-7A 预警机原型机，同时具有追加制造 20 架的选择权。美国空军采购的 E-7A 将以波音公司为英国空军生产的同型机为基线型，进行相应的改进升级。E-7A 的雷达采用诺斯罗普·格鲁曼公司的多波段多功能有源相控阵雷达，比 E-3 预警机采用的脉冲多普勒预警雷达效能更高，探测范围达 350 千米，可同时跟踪 300 个目标。该机雷达有 3 种工作模式：聚束模式主要用于跟踪优先目标；高重频模式主要用于瞄准探测空中目标；低重频模式主要用于探测地面及海上目标。此外，E-7 预警机已在美国多个盟国使用，互用性较好，其空中动目标指示能力获得美国空军高层一致认可。美国空军希望 2023 财年第一季度授出原型机采购合同，不晚于 2025 财年启动生产，2030 财年形成初始作战能力。

4.俄罗斯 A-100 预警机继续开展飞行试验

2022 年 2 月，俄罗斯国家技术集团(Rostec)称，其下属织女星公司(Vega)和别里耶夫航空公司(Beriev Aircraft Company)完成 A-100 预警机在机载雷达开机状态下的首次飞行试验。此次试飞评估了 A-100 的空气动力学性能、航电设备，以及机载无线电设备的某些特定部件。此次试飞检验了高电磁辐射条件下机载系统的运行，以及指定模式下飞机的操稳特性。A-100 采用伊尔-76MD-90A 运输机平台，搭载双波段有源相

控阵雷达，可在 650 千米距离上同时跟踪 300 多个目标，并能控制无人机执行作战任务。在试验工作完成后，该机拟于 2024 年投产，逐步替换 A-50 和 A-50U 预警机。

5.法国、德国、瑞典将联合研发新型中型运输机

2022 年 7 月，法国、德国、瑞典宣布启动未来中型战术运输机(FMTC)项目，将联合研发一种新型中型固定翼运输机，拟于 2040 年替换 C-130 系列运输机和 CN235 运输机，但不会替代 A400M 运输机。未来中型战术运输机项目主要用于解决 20 年后欧洲多国空军对战术运输机的需求。该项目 2020 年由法国提出，得到欧洲多国响应。欧洲防务局(Europeam Defence Agency)在《永久结构性合作》(Permanent Structural Cooperation, PESCO)框架下为该项目提供支持，法国牵头协调，德、瑞两国参与，且持续对其他欧洲国家开放。

三、民用飞机技术

2022 年，世界民用飞机技术全面发展。在干线飞机方面，中国 C919、空客 A321XLR 和 NASA 下一代民机技术研究引人关注；在支线飞机方面，绿色环保新能源支线飞机技术成为民用航空发展重点方向；在通用飞机方面，新型公务机技术发展较显著。

（一）干线飞机

干线客机航程远、载客量大，是民航运输的主力机型，也是民机市场竞争的焦点。2022 年，中国 C919 客机获得中国民航局颁发的型号合格证，并向航空公司交付首架；欧洲和美国在干线飞机研制和技术研发方面取得重要进展。

1.中国 C919 客机获得型号合格证并交付使用

2022 年 9 月，中国自行研制、具有自主知识产权的 C919 大型客机完成全部适航审定工作，正式获得中国民航局颁发的型号合格证，并于 2022 年 12 月 9 日向中国东方航空公司交付首架飞机，预计最早在 2023 年春进行商业运营。C919 试飞取证工作始于 2017 年 5 月，此后 5 年间，6 架 C919 分别在陕西阎良、江西南昌、山东东营、内蒙古锡林浩特、新疆吐鲁番、甘肃敦煌等地全面开展失速、动力、性能、飞控、结冰等科目试飞。C919 通过了高温、高湿、高寒、大风和结冰天气等各种极端自然环境的验证，该机的安全性、可靠性、环保性等得到了全面考核。C919 是中国按照国际民航规章自行研制、具有自主知识产权的大型喷气式民用飞机，重点满足国内外大运量和中运量市场需求，座级 158～168 座，航程 4075～5555 千米，直接竞争对手为空客 A320Neo 和波音 B737Max。C919 大型客机研制成功，标志着中国具备了自主研制世界一流大型客机的能力，是中国大飞机事业发展的重要里程碑。

2.空客公司 A321XLR 超远程型窄体客机完成首飞

2022 年 6 月，空客公司首架 A321XLR 超远程窄体客机完成首飞。首飞过程中，机组人员在高速和低速条件下测试了飞控、发动机和包括飞行包线保护在内的主要功能。A321XLR 是 A321Neo 的升级型别，于 2019 年 1 月推出，其最大续航里程可达约 8700 千米，比 A321LR 远程型多 15%，每座位的燃油消耗比竞争飞机低 30%。截至 2022 年 5 月，A321XLR 的客户已达 20 家以上，累计订单超过 500 架。A321XLR 是空客迄今开发的最大单通道飞机，目标市场是介于窄体和宽体客机之间的中间市场。目前，该细分市场主要被老机型波音 757-200、767-300（约占 5 成）和空客 A330-200（约占 4 成）占据，更新换代需求较大。

3.NASA 持续开展下一代民机技术研究

为实现航空业 2050 年净零碳排放的目标，NASA 与工业界、学术界等合作，于 2021 年 5 月启动可持续飞行国家伙伴关系(Sustainable Flight National Partnership)计划，对桁架支撑机翼、小核心机涡扇发动机和先进电力系统等开展评估工作，为下一代单通道民用飞机的研制和开发提供技术支撑。2022 年 3 月，NASA 艾姆斯研究中心(Ames Research Center)表示，正在对该计划中的跨声速桁架支撑翼(Transonic Truss-Braced Wing, TTBW)飞机模型进行风洞试验，目标是通过采集模型上的传感器数据，预测 TTBW 飞机在飞行中的状态。TTBW 飞

机长且薄的机翼由机身两侧的支撑结构提供稳定支撑，TTBW 飞机比传统客机更轻，在空中的阻力更小，油耗较传统机翼飞机降低 8%～10%。NASA 表示将开发一款 X 系列技术验证机来评估 TTBW 等先进技术。该验证机预计在 2026 年年底前首飞。

4.欧洲开展“超高性能机翼”演示验证项目

2022 年 6 月，空客公司与英国国家复合材料中心(NCC)联合开展超高性能机翼(eXtra Performance Wing)演示验证机项目，完成演示验证机设计，并推进制造工作。该项目旨在改进机翼气动布局、提高飞行性能并减少对环境的影响，正在进行机翼主动控制技术的开发验证，具体内容包括飞行中主动打开扰流板、主动放下后缘襟翼以改变机翼面积、半气动弹性铰链控制翼尖折起等。此前，空客公司已于 2022 年 4 月完成了超高性能机翼缩比 3D 打印模型的风洞测试。

超高性能机翼是空客公司设立的机翼主动控制技术集成验证项目，重点验证 4 项技术：一是加装传感器，使飞机能根据传感器数据自动调整机翼控制面以应对阵风载荷；二是采用半气动弹性铰链翼尖，飞行中可按需自动折叠或展开；三是采用多功能变体机翼后缘，可在飞行中改变机翼后缘形状，改善飞机总体气动性能；四是安装弹出式扰流板，可根据流场状况快速偏转至所需角度。该项目将实现从感知到执行的全过程主动控制，技术集成度高，如成功将显著提升机翼主

动控制技术的成熟度。

（二）支线飞机

支线飞机的技术门槛比干线飞机略低，有能力研制支线飞机的国家较多，导致竞争更加激烈。2022 年，德国继续研发电动支线飞机，法国、意大利发展新型动力和能源支线飞机，俄罗斯努力提高支线飞机的国产化水平。

1.德国航宇中心完成“电动飞机概念及技术”项目中期工作

2022 年 6 月，德国航宇中心(Deutsches Zentrum fur Luft-und Raumfahrt, DLR)表示，该中心实施的电动飞机概念及技术(Electric Aircraft Concepts and Technologies, EXACT)项目已取得中期成果，形成了配装多种推进系统的支线、短程和中程飞机组成的机队概念，包括基于分布式电推进系统的支线飞机，以及涡桨和涡扇中短程飞机。这些飞机可采用氢燃料电池、氢燃料或可持续航空燃料等实现混合动力飞行。EXACT 项目的总体目标是设计可在 2035 年之前投入运营的新型民用飞机，其中支线飞机至少 70 座，航程 2000 千米，无二氧化碳排放。

2.ATR 公司拟推出更可持续的新一代支线飞机

2022 年 5 月，法国、意大利合资的支线飞机制造商 ATR 公司公布了新一代支线飞机 ATR EVO 的研制计划。该新一代飞机将采用混合动力发动机、更轻的生物原材料和创新技术，以

显著提高经济性和可持续性等性能。ATR 公司表示，已向发动机制造商发出开发新动力装置的信息征询书。

ATR 称，ATR EVO 将提供 20%的整体燃油率改进和 100%的可持续航空燃料兼容性。这将使 ATR EVO 的二氧化碳排放量比使用航空煤油的支线喷气机少 50%以上，并且当使用 100%的可持续航空燃料时，ATR EVO 二氧化碳排放量将接近于零。ATR 公司预计新机有望在 2030 年前投入运营。

3.俄罗斯 SSJ New 新型喷气式支线飞机开展测试工作

2022 年 7 月，俄罗斯联合飞机制造公司完成第一架 SSJ New 新型喷气式飞机原型机身的制造工作，并将其交付至中央空气动力研究所(TsAGI)进行测试。该机机身完全采用俄罗斯产零部件制造，在 TsAGI 进行寿命周期测试，测试中需要将机身与机翼、垂直尾翼和水平安定面组合在一起。SSJ New 是 SSJ 100 的“俄罗斯化”改型，具有复合材料机翼和本土航空电子设备，该支线飞机由俄罗斯自研的新型涡轮风扇发动机 PD-8 提供动力。该机拟于 2023 年开始批量生产，预计 2024 年开始商业交付。

（三）通用飞机

通用飞机是指除固定航班之外的所有民用飞机，包括农林、勘探、警务、救援、公务及观光等用途的飞机。2022 年，在通用飞机领域，北美制造商开展了诸多新型公务机研发项目。

1.美国湾流公司全新 G800 公务喷气机首飞

2022 年 6 月，美国湾流公司(Gulfstream)宣布，湾流公司全新超远程公务机 G800 成功首飞，正式开启了该机的取证试验。G800 从佐治亚州萨凡纳(Savannah)起飞，使用可持续航空燃料的燃油，飞行两小时后返回希尔顿海德机场(Hilton Head Airport)。湾流公司于 2021 年 10 月推出 G800，是湾流公司速度最快、航程最远的飞机，拟于 2023 年服役。G800 可以 85%声速飞行 8000 海里（约合 14820 千米），或以 90%声速飞行 7000 海里（约合 12960 千米），具有同类型飞机高效的燃油效率。G800 配备了湾流公司的下一代对称驾驶舱和双平视显示器，采用了新的组合视觉系统，包括增强型飞行视觉系统和合成视觉系统，进一步提高了飞机的安全性和飞行员的态势感知能力。

2.加拿大庞巴迪公司推出“环球”8000 新型公务喷气机计划

2022 年 5 月，加拿大庞巴迪公司(Bombardier)推出“环球”8000(Global 8000)新型公务喷气机项目。该机将在“环球”7500(Global 7500)公务喷气机基础上进一步提高飞机性能，继续保持庞巴迪公务喷气机的全球领先优势。“环球”8000 最大使用速度设计为马赫数 0.94，高于“环球”7500 的 92.5%声速，航程设计达 8000 海里（约合 14820 千米），高于“环球”7500 的 7700 海里（约合 14260 千米）。“环球”8000 的其他改进还包括：更光滑柔顺的机翼设计；改进型驾驶舱；

更舒适的客舱设计；更短的飞机起降滑跑距离等。“环球”8000 预计于 2025 年服役。

四、无人机技术

2022 年，世界无人机技术发展持续受到重视。在无人作战飞机方面，美军“协同式作战飞机”项目和俄罗斯“猎人”(Okhotnik)重型攻击无人机等项目的技术进展引人注目。在支援保障无人机方面，欧洲军用无人机和美国 MQ-25 无人加油机项目等取得突出发展。在微小型无人机方面，美国和俄罗斯无人机技术发展受到最多关注。目前，无人机已成为中国低空经济发展新引擎。截至 2022 年年底，全国无人机年产值达到 1070 亿元，除了应急救援、电力巡检、物流运输、农林植保等行业应用，城市空中交通、先进空中交通、电动垂直起降航空器(Electric Vertical Take-Off and Landing, eVTOL)等新的应用场景不断涌现。

（一）无人作战飞机

无人作战飞机主要执行压制敌防空系统、对地攻击和夺取制空权等任务。无人作战飞机的发展使无人机从过去主要执行情报侦察监视任务的作战支援装备升级成为能执行作战任务的主战装备。近年来，无人忠诚僚机成为无人作战飞机的重要技术发展趋势之一。2022 年，包括美国协同式无人作战

飞机项目在内的多个无人作战飞机项目取得了重要进展。

1.美国空军披露可与下一代战斗机编组作战的协同式无人作战飞机项目

2022 年 3 月，美国空军表示，“下一代空中主宰”“系统簇”将包含一种低成本的“协同式无人作战飞机”。该作战飞机将配备系列化、多样化、可定制的传感器、武器和任务载荷，并将利用天空博格人(Skyborg)和空战进化(Air Combat Evolution, ACE)项目的技术成果。协同式无人作战飞机将拥有宽带隐身、先进电子战和与“长机”相当的作战半径等高端能力，旨在伴随“长机”完成作战任务。

2022 年 5 月，美国空军表示，拟于 2024 财年开始编列协同式无人作战飞机项目相关预算。该项目可能跳过技术成熟和风险降低阶段，直接进入工程研制阶段，可以采用空战进化智能空战算法、波音 MQ-28A 无人机等相关技术，加快研制进度。美国空军还将同步研制配套的任务系统和软件。美国空军将协同式无人作战飞机视为战术飞机领域的一次“赌博”，也是该军种首次将自主无人机与高端战斗机进行结合。

2022 年 8 月，美国空军探讨了协同式无人作战飞机与 B-21 编组作战的可能性，认为低成本无人僚机可有效提升高价值平台的生存力、杀伤力和任务效率，同时可向对手施加高昂的作战成本，以及剧增的决策复杂性。

2.俄罗斯无人作战飞机取得重要进展

2022 年 5 月，俄罗斯 S-70“猎人”重型攻击无人机首次试射 Kh-59MK2 防区外空地导弹。该弹长 4.2 米，出口型的最大射程为 250 千米，而俄军自用型的射程可达 500 千米。Kh-59MK2 导弹的成功试射，一方面体现了“猎人”与苏-57 的通用化设计理念，另一方面使“猎人”成为国外已知首型试射、配装防区外空地导弹的隐身攻击无人机。此前，美欧等的全尺寸或缩比演示验证机试投的均为制导炸弹或中近程空地导弹。俄罗斯拟于 2023 年开始批量生产“猎人”无人作战飞机。该型无人机有望成为国外首型投产的飞翼布局重型攻击无人机。该型无人机由苏霍伊设计局研制，具有一定的隐身能力，机长约 14 米，翼展约 19 米，最大起飞重量 20 吨左右，弹舱可携载 2.8 吨武器弹药。

2022 年 8 月，俄罗斯喀琅施塔得公司(Kronstadt)称，其“雷霆”(Thunder)无人忠诚僚机项目已在俄罗斯军队-2022(Army-2022)防务展上签订初步设计国家合同。“雷霆”既可作为忠诚僚机与有人机协同作战，也可作为无人攻击机，可配挂精确制导武器打击防空系统、水面舰艇等目标。“雷霆”无人机是喀琅施塔得公司在军队-2020 防务展上首次公开的一型采用隐身设计的察打一体无人机。该机采用类似美国 XQ-58A“战神婢女”(Valkyrie)无人机的设计布局，有效载重 2 吨，可内埋 100～500 千克级弹药，并能作为僚机与苏-35S、苏-57 等编组执行任务，使用成本上明显低于俄罗斯“猎人”

重型无人机。

（二）支援保障无人机

支援保障无人机主要承担侦察、监视、通信及运输等任务。随着相关技术的持续发展，无人机完成任务的能力不断增强。2022 年，欧洲无人机和美国 MQ-25 无人加油机项目技术进展引人注目。

1.欧洲无人机项目通过首个里程碑

2022 年 10 月，欧洲联合军备合作组织(Organisation Conjointe de Cooperation en matiere d'ARmement, OCCAR)宣布，欧洲无人机(Eurodrone)项目通过综合基线审查(Integrated Baseline Review, IBR)里程碑，表明所有活动、资源、供应和服务均已完成规划，已为初步设计评审做好准备。欧洲无人机是一型中空长航时无人机，可执行情报收集、目标搜索和侦察监视等任务。该机由德国、法国、意大利、西班牙合作开发，德国空客防务和航天公司(German Airbus Defence and Space)牵头，法国达索航空公司(Dassault Aircraft)、意大利莱昂纳多公司和西班牙空客公司(Spain Airbus)共同参与。2022 年 2 月，空客公司作为代表，与代表德国、法国、意大利和西班牙四个首批用户国家的 OCCAR 签订欧洲无人机项目开发合同。根据合同要求，空客公司首批将交付 20 套欧洲无人机（每套系统包括 3 架无人机和 2 个控制站），其中法国 4 套、德国

7 套、意大利 5 套、西班牙 4 套，还将提供为期 5 年的技术保障。欧洲无人机采用开放式体系架构，可根据不同需求重新规划各系统部件功能，提高飞机的战术技术性能，并使用数字化设计、制造和服务（Digital Design，Manufacturing&Services，DDMS）技术，有效降低寿命周期成本。美国通用电气公司将为该机提供催化剂(Catalyst)先进涡桨发动机。欧洲无人机项目拟于 2023 年进行初步设计评审，2024 年进行关键设计评审并开始原型机研制，2027 年 2 月后首飞。

2.美国海军继续开展 MQ-25 无人加油机测试工作

2022 年 6 月，美国海军表示，已在系统测试与集成实验室开展了 MQ-25“黄貂鱼”(Stingray)舰载无人加油机地面控制站与该无人机的首次集成测试。测试中，MD-5 型地面控制站首次控制了硬件在回路(Hardware in the Loop, HITL)模拟飞行器，演示了地面控制站如何在航母环境中指挥 MQ-25 无人加油机。美国海军还表示，MQ-25 无人加油机预计于 2025 年 9 月形成初始作战能力，比原计划推迟 6 个月，原因是供应链质量问题。按要求，MQ-25 将能够运送约 6810 千克燃油到距离航母约 926 千米处，为各种舰载机加油，可将舰载机联队的作战半径增加约 556～741 千米。

（三）微小型无人机

微小型无人机具有尺寸小、价格低和装备数量大等特点，可执行多种战术任务。2022 年，美国和俄罗斯的微小型无人机技术快速发展。

1.美国洛克希德·马丁公司“潜行者”VXE 战术无人机创续航时间纪录

2022 年 4 月，洛克希德·马丁公司宣布其“潜行者”VXE(Stalker VXE)战术无人机在 2 月进行的试验中持续飞行 39 小时 17 分 7 秒，创造了第 2 等级无人机（起飞重量 9.5～25 千克，美国陆军定义）续航时间世界纪录。洛克希德·马丁公司于 2006 年开始研发“潜行者”系列无人机，旨在为特种部队提供对抗环境下的长航时侦察监视能力。多年来，洛克希德·马丁公司臭鼬工厂对该系列无人机持续升级改进，以提高其续航能力和通用性。“潜行者”VXE 战术无人机为该系列最新的垂直起降增程型，翼展 4.9 米，最大有效载重 2.5 千克，最大起飞重量 21.8 千克，实用升限 3650 米，最大飞行速度 93 千米/小时。该无人机采用开放式架构，使用丙烷燃料电池提供电力。此次试验证明了其优异的续航能力，后续可为特种作战部队提供基于轻小型战术无人机的持久感知能力，成为特种作战效能倍增器。

2.俄罗斯生产首型配装国产热像仪的战术无人机

2022 年 8 月，俄罗斯开始生产首型配装国产热像仪的无人机。

该型无人机为阿斯特龙光学机械设计局(Astron Optical-Mechanical Design Bureau)研制的UAV400T，已交付俄军部队，并在对乌特别军事行动中进行侦察和炮兵校射。该型机起飞重量1.2千克，飞行高度3000米，续航时间45分钟。按计划，该设计局将具备年产5000架UAV400T无人机的能力。在此次俄乌冲突中，双方利用“前哨”、“猎户座”、“海雕”、“旗手”-TB2等无人机实施侦察、炮兵校射、对地攻击等作战任务，甚至使用“弹簧刀”(Switchblade)、“柳叶刀”(Lancet)等巡飞弹参战，凸显出各类无人机，特别是战术无人机在有限烈度战争中的重要作用。

五、直升机技术

2022年，世界直升机技术取得重大发展。在常规直升机技术方面，新型重型运输直升机、下一代中型通用运输直升机、有人/无人旋翼飞行器编组和直升机全自主飞行技术发展较为显著。在新概念直升机技术发展方面，美国未来攻击侦察机(Future Attack Reconnaissance Aircraft, FARA)和未来远程突击机(Future Long Range Assault Aircraft, FLRAA)项目的技术发展备受关注。

（一）常规直升机技术

经过多年发展，常规直升机技术已基本成熟。目前，常规直

升机技术发展重点为新型动力系统、开放式系统架构和有人/无人编组技术等。2022 年，欧洲联合启动下一代旋翼飞行器能力(NGRC)项目。美国和法国重视发展有人/无人旋翼飞行器编组技术。美国直升机全自主飞行技术取得重大进展。

1.北约六国联合启动下一代旋翼飞行器能力项目

2022 年 6 月，法国、德国、英国、意大利、荷兰和希腊六国国防部长联合启动了北约下一代旋翼飞行器能力项目。该项目首批资金投入约 2900 万美元，主要任务是共同探索未来直升机的创新解决方案，以保持技术优势和促进多国合作。在该项目框架下，六国将探讨如何利用最新技术来满足各自需求，寻找具备混合动力和电动推进、开放式系统架构，以及改进的飞行性能等特征的解决方案。下一代旋翼飞行器能力项目的概念阶段将由北约后勤和采购局(NATO Support and Procurement Agency, NSPA)牵头执行，可为相关成员国开发并部署新一代旋翼飞行器提供基础。

下一代旋翼飞行器能力项目主要为替换北约各国现役的 NH90、AW101 等中型通用运输直升机设立。这些型号均为 20 世纪 80 年代至 90 年代研制、2000 年前后开始装备部队。到下一代旋翼飞行器能力项目完成研制并投入使用时，这批装备的服役时间将超过 30 年。目前启动的该阶段工作主要是协调各国需求，并以欧洲各国直升机相关领域的技术能力为基础，确定下一代旋翼飞行器能力项目的初步指标和概念

方案。

2.美国和法国重视发展有人/无人直升机编组能力

2022 年 3 月，美国海军和海军陆战队联合演示了有人/无人直升机编组能力。演示中，美国海军使用一架 MQ-8C“火力侦察兵”(Fire Scout)无人直升机，在地面控制站的辅助下进行目标探测和任务协调。海军陆战队使用 UH-1Y 通用直升机和 AH-1Z 攻击直升机根据 MQ-8C 提供的信息实施了火力打击。有人机/无人机编组协同能实现异构装备优势互补和互促增效，成为航空装备形态、空中作战样式的发展重点。美国海军已实施战术作战管理器(Tactical Battle Manager, TBM)、联合无人作战航空系统(Joint Unmanned Combat Air System, J-UCAS)、通用控制系统(Common Control System, CCS)等计划，解决了有人/无人直升机空域集成、编队飞行、协同操控、指令传输、信息融合等问题。此次演示表明，美国海军已成功验证无人机前置侦察预警、有人机后置火力打击的完整杀伤链闭合，初步具备有人/无人直升机编组协同打击能力。

2022 年 6 月，法国武器装备总署(Director General Armaments, DGA)表示，法国陆军将在 2025 年前列装 H160M、NH90 Caiman 和“虎式”Mk Ⅲ（Tiger Mk Ⅲ）升级型三型新型直升机。围绕法国陆军涵盖陆航和地面装备的“蝎子”(Scorpion)装备计划需求，三型直升机将大量应用自主/半自主技术，提供有人/无人编组协同作战能力，且相关功能可能集成到法国

陆军未来的战术指挥与控制软件中。为此，三型机需要融入数字环境，改进威胁探测，综合新的武器，并提高感知和打击的精确性。

目前，有人/无人编组协同已成为世界各国快速、有效提升其现役常规构型直升机作战能力的重要途径。美军现役 AH-64E、MH-60R 等型号均已具备有人/无人编组协同能力。国外主要国家均选择在不对直升机平台进行太大升级改造的情况下实现有人/无人编组协同，从而高效提升直升机态势感知、火力打击等能力，进而提高其任务效能和战场生存力。

3.美国“黑鹰”直升机完成不载人全自主飞行

2022 年 2 月，DARPA 联合西科斯基公司(Sikorsky)完成了 UH-60“黑鹰”(Black Hawk)直升机首次不载人的全自主飞行，展示了障碍物规避、跑道上空小幅度机动等能力。西科斯基公司称，集成自主软件的“黑鹰”直升机将在座舱内配置一个开关，可在两名飞行员、一名飞行员、无飞行员三挡间进行选择。

相关试验采用了 DARPA 机组人员驾驶舱工作自动化系统(Aircrew Labor In-Cockpit Automation System, ALIAS)项目的成果。该项目于 2015 年启动，西科斯基公司于 2016 年获得第三阶段合同。该项目旨在开发接管基础飞行操作自动化系统，降低飞行员作战飞行工作负担，提高任务能力和飞行安全，缩减飞行员的培训周期和规模，节省培训和工资成本。

（二）新概念直升机技术

目前，新概念直升机的发展重点是高速直升机。美军正在开展的未来攻击侦察机和未来远程突击机(FLRAA)等项目代表了高速直升机技术发展的最新水平。

1.美国“劫掠者”X 型直升机参与陆军“未来攻击侦察机”项目竞争

2022 年 10 月，西科斯基公司基于快速复合型 S-97 改进的“劫掠者”(Raider)X 型直升机首架原型机完成了 90%的制造工作。该原型机将进行项目结构测试，以验证机身的飞行和地面载荷能力。“劫掠者”X 基于洛克希德·马丁公司在利用数字化设计、3D 打印和制造技术开发创新武器系统方面的工作经验，采用了基于模块化开放系统架构(Modular Open Systems Architecture, MOSA)的航空电子设备和任务系统，为计算、传感器、生存能力和武器提供“即插即用”选项，不仅能够降低采购成本，而且能够实施快速、经济可承受的升级，从而在不断演变的威胁面前保持技术和性能领先。“劫掠者”X 将参与美国陆军未来攻击侦察机项目的竞争。参与项目争夺的另一种机型为贝尔德事隆公司(Bell Textron)的贝尔 360“无敌”(Invictus)攻击侦察直升机。美国陆军拟在 2024 财年从两种竞争机型中选出一型，完成工程研制并投产，拟于 2028 年列装部署。

2.美国贝尔 V-280 倾转旋翼机获得美国陆军未来远程突击直

升机项目

2022 年 12 月，贝尔公司获得美国陆军近 40 年来最大直升机采办竞标合同。由贝尔公司研制的 V-280“勇士”(Valor)倾转旋翼机中标美国陆军未来远程突击直升机项目。该项目研发合同价值高达 13 亿美元。V-280“勇士”倾转旋翼机于 2017 年 12 月首飞，最高巡航速度达 305 节（约合 565 千米/小时），截至 2021 年 6 月，飞行超过 214 小时，展示了其低速敏捷性和远程巡航能力。未来远程突击直升机原型机拟于 2025 年交付部队，于 2030 年前后正式服役，逐步替代约 2000 架“黑鹰”通用直升机和约 1200 架“阿帕奇”(Apache)攻击直升机。

六、航空动力技术

航空动力技术根据用途不同可分为军用航空动力技术和民用航空动力技术。军用航空动力对于提高战斗机的机动性、航程和运载能力至关重要。民用航空动力是决定民用飞机经济性、安全性和环保性的决定性因素。2022 年，世界航空动力科研机构针对未来飞机发展需要，开展了多项产品研发和技术探索工作，进展显著。中国航空动力技术着力打造国家战略科技力量，实现了从装备自主向装备和能力双自主的跨越，主要航空武器装备国产化率屡创新高。

（一）军用航空动力技术

2022 年，美国和法国针对第五代战斗机的升级和第六代战斗机的发展需要，分别开展了自适应发动机技术研发工作。同时，美国还加大了涡轴发动机和重油发动机的研发力度，以满足未来直升机和无人机对小型、低成本发动机的需要。

1.美国空军授出下一代自适应推进项目合同

2022 年 8 月，美国空军分别向洛克希德·马丁、诺斯罗普·格鲁曼、波音、通用电气和普惠五家公司各授出一份不定期交付/不确定数量合同，要求其执行下一代自适应推进(Next Generation Adaptive Propulsion, NGAP)项目的技术成熟和风险降低阶段工作，开展设计开发、台架试验、原型试验和系统集成等活动，要求在 2032 年 7 月前完成。该项目当前阶段的合同总金额最高达 9.75 亿美元。根据合同要求，上述企业将聚焦交付拟配装下一代空中主宰平台的推进系统，并推进实现航空动力工业基础的数字化转型。

2.法国完成下一代战斗机发动机原型机地面测试

2022 年 1 月，法国国防部武器装备总局在蒂雷纳(Turenne)项目下成功完成新型发动机原型机的地面测试。该原型机由 M88 涡扇发动机衍生而来，拟作为未来作战航空系统中新一代战斗机(New Generation Fighter)的动力装置。

3.美国通用电气公司为美国陆军测试首台 T901 涡轴发动机

2022 年 3 月，通用电气公司宣布，在公司位于林恩(Lynn)工

厂的试验台启动首台 T901-GE-900 涡轴发动机的测试工作。通用电气公司已对林恩工厂的三个试验台进行了升级，以便全面有效地完成测试项目。升级后的试验台能够测试更大功率的发动机，允许发动机空载运行，同时提升了仪器和测试控制的能力。目前获得的测试数据表明，T901 发动机的性能符合项目预期和美国陆军要求。与 T700 相比，T901 的轴功率提高 50%，油耗降低 25%，部件耐久性的增加还将降低全寿命周期成本。

4.美国液体活塞公司研制高功重比重油发动机

2022 年 11 月，美国液体活塞(Liquid Piston)公司获得美国陆军授出的价值 900 万美元的合同，开展一种先进重油发动机设计、制造和演示项目，目标是耗油量比同功率级别的汽油发动机少 30%，体积和重量为同等功率级别柴油发动机的十分之一。该发动机将针对 Jet A、JP8 和 F24 燃料进行优化，提高部件性能和可靠性，并能够集成到混电推进系统中。借此，液体活塞公司将为无人机系统提供更好的动力系统，为地面、海上和空中平台提供更远的航程和更高效的辅助动力装置，并通过更轻、更小、更便携的发电机，提高电力供应能力，减轻陆军人员的后勤负担。

（二）民用航空动力技术

2022 年，美国积极推动绿色环保发动机技术研发。英国低排

放发动机技术验证机进入飞行试验阶段。俄罗斯完成 PD-8 涡扇发动机原型机的制造工作，并进入试验测试阶段。

1.美国通用电气“护照”发动机完成 100%可持续航空燃料试飞

2022 年 5 月，通用电气航空表示，使用 100%可持续航空燃料对“护照”(Passport)发动机进行了首次飞行测试，结果显示其性能与使用石油基航空燃料时相似。“护照”发动机是通用电气航空针对公务机市场研发的一款先进涡扇发动机，采用整体叶盘和陶瓷基复合材料，具有燃油效率高、飞行噪声低、兼容 100%可持续航空燃料等特点。此次飞行测试则标志着该公司在推进 100%可持续航空燃料商业化上达到了一个新里程碑。

2.美国普惠公司披露下一代齿轮传动技术发展路线图

2022 年 7 月，普惠公司披露了其下一代齿轮传动涡扇(Geared Turbo-Fan, GTF)发动机技术发展路线图的关键内容——在 2030 年前研发出一型燃油效率较现有发动机至少提高 10%的发动机。拟议的发展路径以提升推进效率和热效率为基础，包括将涵道比提高至 15、增大齿轮传动比、研究轻质结构技术等。该路线图还涉及电推进和混合电推进技术的开发，其中包括该公司正在评估的氢蒸气注入间冷涡轮发动机(Hydrogen Steam Injected, Inter-Cooled Turbine Engine, HySIITE)概念，不仅将氢用作燃料，还将充分利用其低温特性，改善

发动机热力学性能，并降低排放。

3.英国罗尔斯·罗伊斯公司低排放发动机进入飞行试验阶段

2022 年 11 月，罗尔斯·罗伊斯公司的先进低排放燃烧系统(Advanced Low Emissions Combustion System, ALECSys)演示验证活动进入飞行试验阶段。该发动机配装在一架波音 747 飞机上，成功完成包括 12000 米高度飞行及在不同条件下重新启动的多项试验任务。此前，ALECSys 验证机已完成全面的地面试验，包括结冰、吸水、地面可操作性、排放和使用 100%可持续航空燃料运行。ALECSys 创新的稀薄燃烧系统改善了燃料和空气在点火前的预混合，降低了氮氧化物和颗粒物排放，使燃料燃烧更清洁。ALECSys 是“超扇”(UltraFan)发动机项目的一部分，油耗较第一代“遄达”(Trent)发动机降低 25%。

4.俄罗斯开展 PD-8 发动机首批原型机试验

2022 年 10 月，俄罗斯联合发动机制造集团副总经理兼总设计师尤里·什莫金表示，已经制造了 3 台 PD-8 发动机原型机，目前正在进行相关试验。PD-8 发动机将用于 SSJ-NEW 客机和别-200 水陆两栖飞机，采用了俄罗斯最新材料和先进技术（包括 3D 打印）制造。以 PD-8 的核心机为基础开发的发动机可为米-26 直升机提供动力，将用于替换乌克兰研制的 D-136 涡轴发动机。

（三）新概念航空动力

为提高航空发动机领域的创新能力，主要航空国家高度注重高超声速动力和新能源动力的研发工作。2022 年，美国和欧洲在涡轮基组合循环发动、旋转爆震发动机、氢动力和混合电推进等方面取得诸多进展。

1.美国金星航宇公司完成高超声速旋转爆震发动机地面试验

2022 年 10 月，美国金星航宇(Venus Aerospace)公司公布了一批开展高超声速旋转爆震发动机试验的视频，宣告该公司在位于休斯敦总部的试验设施中进行了历时 3 个月的旋转爆震火箭发动机地面试验，成为世界上第一家将室温可储存液体燃料用于旋转爆震火箭发动机(Rotating Detonation Rocket Engine, RDRE)的企业。金星航宇公司是一家开发高超声速技术的初创公司，该公司拟使用长度为 20 英尺（约合 6.1 米）、速度为 5 倍声速的无人机开展高超声速旋转爆震火箭发动机飞行试验，然后研制飞行速度为 9 倍声速的“观星者”(Stargazer)客机。“观星者”客机一旦投入使用，可在 1 小时内飞行 8000 千米，兼具商业和军事双重用途。

2.英国罗尔斯·罗伊斯公司开始测试氢燃料涡轮发动机

2022 年 11 月，罗尔斯·罗伊斯公司表示，已联合易捷航空公司成功进行了氢燃料 AE2100 发动机的首次测试，达到重要里程碑节点。此次测试是双方 H2 ZERO 项目的一部分，将分别使用庞巴迪“环球快车”5500 和 6500 公务机测试 AE2100

涡桨发动机和“珍珠”15 涡喷发动机，其目标是在 2023 年前将首架使用氢动力技术的零排放商用飞机投入运营。

3.美国通用电气公司为美国陆军开发混合电推进技术

2022 年 3 月，美国陆军授予通用电气公司一份价值 510 万美元的协调系统涡轴电气化应用研究(Applied Research Collaborative Systematic Turboshaft Electrification Project, ARC-STEP)项目合同，以支持该公司开发混合电推进技术。该项目包括对兆瓦级电气化动力装置的研究、开发、测试和评估，并进一步开发适用于美国陆军未来垂直起降(Future Vertical Lift, FVL)飞行器项目的轻质、高效、安全、可靠的混合电推进技术，以满足美国陆军对增加有效载荷、续航时间、航程和机载功率的需求。

七、机载系统与武器技术

2022 年，国外的机载系统与武器技术取得诸多新进展。美国在机载系统的多个技术领域开展了新技术探索和新产品开发。机载武器领域的一些重大研发项目取得关键进展，现有产品的改进升级取得新成果。

（一）机载系统技术

2022 年，5G 通信、人工智能等新技术加速向机载系统领域渗透，不断推动机载系统性能提升和技术升级；频谱自主感

知技术的应用推动了自适应处理器的发展；着眼于未来战争中的导航战，美国正在开发光学原子钟技术。

1.美国推进商用 5G 技术在航空装备中的应用

5G 技术可大幅提升军事通信能力。美国军方及军工企业正在开发基于 5G 的军用技术，以实现在众多网络间快速、无缝地共享数据的能力。

2022 年 4 月，诺斯罗普·格鲁曼公司和 AT&T 公司就联合为美国国防部研发数字式战斗网络达成协议。按照协议要求，双方将建立一个联合研发框架，用于原型系统的设计、验证和测试。美国国防部通过与商业企业合作，汇聚军用和商用通信优势技术，为实现联合全域指挥与控制(JADC2)愿景奠定技术基础。

美国洛克希德·马丁公司与微软合作开发 5G 军用解决方案，以实现美军陆、海、空、天、赛博等作战域的系统快速互联。2022 年 2 月，洛克希德·马丁公司与微软公司达成一项新的协议，将微软的 5G 技术和微软蓝天(Azure)服务用于洛克希德·马丁公司的混合基站（基本是军用级基站），以测试如何对美军联合全域行动(Joint-All Domain Operations, JADO)的各种 5G 网络应用进行有效的扩展和管理。

2022 年 9 月，洛克希德·马丁公司和威瑞森公司(Verizon)联合验证了无人机采用 5G 技术安全传输高速、实时 ISR 数据的能力。试验表明，通过 5G 毫米波链路可实时传送 ISR 射频数

据和视频，在战术终端可通过先进的信号处理算法，实现数据的实时显示，从而提高作战人员的态势感知和指挥控制能力。

2.人工智能技术在航空中的应用日益增多

2022 年 2 月，DARPA 授予诺斯罗普·格鲁曼公司感知使能任务指导(Perceptually-enabled Task Guidance, PTG)项目合同，用于开发一种人工智能助理原型装置，将其嵌入到 UH-60“黑鹰”直升机驾驶员的增强现实耳机中，增强态势感知和决策能力，以应对常规任务和突发情况。

2022 年 9 月，通用原子航空系统公司 MQ-20A 无人机采用人工智能飞行员和任务系统软件完成全自主飞行试验，飞行持续时间约 30 分钟。洛克希德·马丁公司的嵌入式红外搜索和跟踪传感器系统提供了实时跟踪能力。此次试飞验证了协同作战飞机的自主控制能力及通用原子航空系统公司开发的人工智能和机器学习方案。

2022 年 9 月，波音公司与威斯克(Wisk)公司发布了过渡到未来航空业的概念路线图，其中包括可以在城市和郊区间高效安全地进行客运和货运的自动驾驶和无人驾驶飞机。路线图中列出了将城市空中交通(Urban Air Mobility, UAM)纳入国家空域系统所需的技术、监管和社会建议。这份文件是波音公司、威斯克公司、美国联邦航空局、NASA 和主要行业利益相关者多年合作的结果，提出了在国家空域实现无人驾驶航

空器的愿景，并将成为城市空中交通系统在美国和世界各国发展的基础。

3.美国空军研究实验室推出综合座舱感知技术

2022 年 3 月，美国空军研究实验室(AFRL)在美国空军与航天军协会（Air&Space Forces Association，AFA）战争研讨会上介绍了综合座舱传感(Integrated Cockpit Sensing, ICS)等新技术。军用飞机在高重力加速度、高海拔情况下执行任务时，可能导致不明原因的生理障碍(Unexplained Physiological Episodes, UPE)现象发生，对飞行员生命安全造成极大威胁。美军在 2013 财年至 2018 财年期间，由于包括 UPE 在内的非战斗航空事故导致 244 人丧生、186 架飞机损毁，损失总价值达 116 亿美元。为解决这一问题，美国空军研究实验室与波尔航宇公司(Ball Aerospace)联合开发的 ICS 系统可对飞行员健康、座舱环境和生命保障系统进行实时监测和分析，帮助检测、减轻和洞察飞行中有可能对飞行员的身体和认知能力产生不利影响的生理事件。该技术将有助于飞行员作出更好的决策，也有助于开发出增强的生命保障系统。

4.美国空军为固定翼飞机驾驶员选定新一代头盔

2022 年 4 月，美国空军选择立福特机载技术公司(LIFT Airborne Technologies)为美国空军固定翼飞机驾驶员开发新一代头盔。目前，美国空军使用的头盔是基于 1980 年的设计理念，此后因采用头盔显示装备导致头盔重量增加和重心

改变，已不适用于现代作战。2020 年美国空军进行的一项人体测量学研究发现，需要研发小尺寸的头盔，以更好地满足飞行员需求。因此，美国空战司令部开始寻找下一代头盔，并选定立福特机载技术公司的下一代头盔原型产品，以利于飞行员的健康，并为不同的飞行员提供更好的装备。

5.美国 DARPA 探索通过机载光能量中继实现无线配电网络

2022 年 6 月，DARPA 战术技术办公室发布了一项关于机载能量源的信息征询书，旨在发展与现有空中加油机适配的、能通过激光能量波束为无人机系统充电的新技术。机载能量源系统包括发电、传输中继和接收等能源网络组成部分，将成为无人机持续飞行的充电站，以增加无人机的续航时间，该技术或将用于 KC-46 加油机。

2022 年 10 月，DARPA 邀请工业界参与持续光学无线能量中继(Persistent Optical Wireless Energy Relay, POWER)项目，旨在帮助 DARPA 设计并验证机载光学能量中继器。该中继装置可以实现对地面激光能量的高空、长距离的高效传输，未来还可实现多路径无线能源网络(Wireless Energy Networks)传输。该项目将利用无线功率传输技术创建一个动态、自适应、光速无线能源传输网络，利用有韧性的多路径网络实现能源流动，大幅压缩能源的运输时间，为空中、陆地、海上、水下和太空的用户提供分布式能源，使小型廉价平台获得无限航程或续航能力。

6.美国 DARPA 将开发光学原子钟以取代 GPS 原子钟

2022 年 10 月，DARPA 宣布了健壮光学时钟网络(Robust Optical Clock Network, ROCkN)项目，目标是开发一种能在实验室以外使用的小尺寸、低重量和低功率(Size Weight and Power, SWaP)的光学原子钟。该光学原子钟的计时精度将达到皮秒级，是现有微波原子钟计时精度的 100 倍，将安装在战斗机或卫星上。该项目为期 4 年，分两个阶段开展，将获得用于未来网络化时钟架构的多项关键技术。在第一阶段，各技术领域的研究人员将开发出一个物理装置进行技术验证；第二阶段将开发出完全可用的时钟。最终，项目将对静止的、移动的和机载时钟之间的同步情况进行验证。

7.美国霍尼韦尔公司开发无人机用电传飞控系统

2022 年 4 月，霍尼韦尔公司先进空中交通(Advanced Air Mobility, AAM)实验室展示了该公司为无人机和电动垂直起降航空器开发的小型电传飞行控制系统。这是该公司在航空电子技术开发方面的最新进展，是其在机载系统小型化方面的又一成果。

8.美国 DARPA 研发未来智能电台所需的自适应实时处理器

2022 年 10 月，DARPA 发布用于宽带传感器系统的处理器重构 (Processor Reconfiguration for Wideband Sensor Systems, PROWESS)项目的跨部门公告。PROWESS 项目旨在开发能实时重构的检测和表征新信号的高通量数据流处理器。这种处

理器通过在 50 纳秒内自我重构，即时合成处理通道。PROWESS 项目将使未来的接收机性能更加优化，从而适应被测频谱的复杂条件及认知型射频决策逻辑的需求。

现代战争对设备数量和传输速度的无止境需求，使得无线频谱变得日益拥挤和复杂。解决这种问题的一种有效方法是采用射频自主技术，即无线电台使用人工智能感知频谱，并适应所感知的环境。与人工管理的系统相比，射频自主可以增强对干扰的健壮性，提高频谱容量以容纳更多设备。射频自主的基础是频谱感知，但对宽带频谱的自主感知将使对边缘计算的需求远远超出目前处理器的处理能力，因而需要高度灵活、高通量数据处理器。

（二）机载武器技术

2022 年，国外在机载武器发展方面取得多项新进展。美国高超声速武器系统进行了多次成功试验：洛克希德·马丁公司研发的首套机载激光武器系统交付军方，美国空军研究实验室低成本空对舰导弹试验成功，美国波音公司模块化机载导弹研制受到美国空军资助。

1.美国高超声速武器技术取得多项进展

2022 年 4 月，洛克希德·马丁公司研制的高超声速吸气式武器概念超燃冲压发动机完成飞行测试。该发动机使用碳氢化合物燃料，利用压缩进入的空气燃烧，因此不携带额外的氧

化剂，减轻了整体重量。2022 年 7 月，雷神导弹完成高超声速吸气式武器概念验证性导弹试飞。该导弹配装诺斯罗普·格鲁曼公司的超燃冲压发动机，以大于 5 倍声速，在约 18 千米的高度飞行了约 555 千米。

2022 年 9 月，美国空军与雷神公司和诺斯罗普·格鲁曼公司签订价值 9.85 亿美元的合同，用于研制高超声速攻击巡航导弹(Hypersonic Attack Cruise Missile, HACM)。HACM 源于美国空军的高超声速吸气式武器概念项目。诺斯罗普·格鲁曼公司负责为雷神公司的高超声速攻击巡航导弹提供超燃冲压发动机，这种高超声速攻击巡航导弹将装备美国空军战斗机，以提供防区外或接近防区外的攻击能力。

2022 年 12 月，美国空军使用一架 B-52H 轰炸机，在加利福尼亚州南部海岸成功试射了首枚 AGM-183A 空射快速响应武器高超声速助推滑翔导弹实弹。试验中，AGM-183A 导弹与载机分离后，加速至 5 倍声速以上，并完成全部预定路径飞行，最后在目标区域引爆。

2.美国洛克希德·马丁公司向美国空军研究实验室交付新型机载激光器

2022 年 3 月，洛克希德·马丁公司向美国空军研究实验室交付了一种紧凑、坚固、耐用的激光器。这种新型机载激光器在同功率级别的激光器中尺寸最小、重量最轻，专门用于提升战斗机的防御能力。该项工作是美国空军用于下一代紧凑

环境激光增强(Laser Advancements for Next-generation Compact Environments, LANCE)高能激光器项目的一部分。这种小尺寸、低重量和低功率机载激光器是开发作战型机载激光武器系统的关键基础，将为战机提供持续防御能力。

3.美国空军研究实验室研发低成本空对舰攻击武器

2022 年 4 月，美国空军研究实验室和美国埃格林空军基地(Eglin Air Force Base)的综合测试团队，对“快沉”(Quick Sink)联合能力技术验证(Joint Capability Technology Demonstration, JCTD)项目进行了第二次试验，验证了一种用于打击海上目标的新型低成本空中投放武器。试验中，该武器成功将一艘全尺寸水面舰艇摧毁。“快沉”JCTD 项目旨在开发一种能够从空中进行的更高速率、更大范围、更低成本的鱼雷式杀伤手段，或将进一步提升美军对海面舰艇等威胁目标的打击能力。

4.美国空军授予多家公司防区内攻击武器项目开发合同

2022 年 5 月，美国空军分别授予洛克希德·马丁公司、L3 哈里斯公司和诺斯罗普·格鲁曼防区内攻击武器(Stand-in Attack Weapon, SiAW)开发合同。防区内攻击武器是美国空军下一代空对地武器组成部分之一，采用开放式系统架构和数字化设计技术，便于进行快速改进升级。SiAW 导弹将能够对反通行/区域拒止(A2/AD)环境内的目标进行打击，包括综合防空系统、弹道导弹发射器、对地攻击和反舰巡航导弹发射器、GPS 干扰器及反卫星系统等。该武器还具备齐射和制导

能力，装备 F-35 后，将进一步提升战机对敌防空系统的打击能力。

5.美国波音公司开展模块化导弹研究

2022 年 9 月，美国空军研究实验室授予波音公司价值 980 万美元的合同，用于研究先进导弹子系统组件，以支持其紧凑型空空导弹(Compact Air-to-Air Missile, CAAM)及增程型空空导弹(Extended Range Air-to-Air Missile, ERAAM)的发展。波音公司表示，CAAM 和 ERAAM 导弹与该公司 2021 年首次提出的远程空空导弹(Long-Range Air-to-Air Missile, LRAAM)概念有关。LRAAM 导弹概念由两个核心部件组成，一个杀伤载具和一个助推器。助推器提供初始推进和加速，分离后杀伤载具的火箭发动机点火推动导弹完成剩余的飞行。这两部分采用一种高度通用的物理结构，利用模块化设计方法和开放式系统架构，能够按照客户的需求引入其所需的技术和能力，在导弹生产、作战使用、后勤和维持方面具有显著优势。根据计划，美国空军拟在 2023 财年启动模块化先进导弹(Modular Advanced Missile, MAM)研发。

6.美国雷神公司提升 AIM-120D 空空导弹射程

2022 年 7 月，雷神公司透露，进行了首枚升级型 AIM-120D3 空空导弹的实弹射击。一架 F-15E 发射 AIM-120D3 导弹完成对 QF-16 测试目标的打击任务。AIM-120D3 导弹是 AIM-120D 的升级型，改进了软件水平和硬件能力，并在 AIM-120D 上

集成了 15 个新电路板，提高了任务处理能力。

第九章 世界海洋技术发展报告

长期以来，海洋事业的发展一直是衡量国家综合实力的重要指标，围绕海洋资源的争夺正成为世界主要国家战略竞争、政治博弈的焦点。进入 21 世纪以后，随着陆地资源的逐渐枯竭，各国更加重视海洋资源的开发利用与利益维护，围绕海洋开启了更为激烈的争夺，谋求构建更为全面的整体竞争优势。2022 年，美国、俄罗斯等海洋大国继续围绕全球性与战略性海洋问题进行谋篇布局，相继发布多份政策指导文件，旨在抢占战略层面的发展先机。同期，多国持续加大对相关装备与技术的研发投入，在海洋防务装备、极地考察与开发、深海装备与技术、高技术船舶、海洋电子信息技术等方面取得诸多突破，海洋科技的发展迈入了新的阶段。

一、世界海洋技术发展动向

2022 年，世界主要国家持续聚焦海洋事业发展，围绕海洋热点问题与前沿技术领域进行积极探索，发布各类政策指导文件的同时，稳步推进海洋防务装备、北极、深海及高技术船舶等重点领域的发展，相关装备与技术的发展呈现出上升态势。

（一）世界主要国家聚焦海洋科技与产业发展，相继推出多份政策指导文件

1.美国发布《2022—2028 年海洋科技机遇与行动》，旨在指导各机构更好地制定未来海洋科学研究计划

2022 年 3 月，美国国家科学技术委员会（National Science&Technology Council，NSTC）下设的海洋科学和技术小组委员会(Subcommittee on Ocean Science and Technology Committee on Environment)发布《2022—2028 年海洋科技机遇与行动》(Opportunities and Actions for Ocean Science and Technology 2022—2028)。该报告与美国政府早前发布的《美国海洋科技十年愿景》(Science and Technology for America's Oceans: A Decadal Vision)交相呼应，以其确立的 2018—2028 年海洋科技事业面临的紧迫需求和机会领域为研究背景，提出了关注气候变化、建设具有韧性的海洋科技基础设施、拓展多元化且具有包容性的蓝色劳动力队伍三大主题。同时，该报告还将上述主题与《美国海洋科技十年愿景》中了解地球系统中的海洋、促进经济繁荣、确保海洋安全、保障人类健康及打造具有韧性的沿海社区五大战略目标进行了交叉研究，提出了海洋可续发展中的一系列优先事项，旨在指导联邦政府下属的各机构更好地制定未来海洋科学研究计划。

2.英国发布《净零海洋能力总结报告》，将实现零碳排放作为核心目标

2022 年 3 月，英国国家海洋学中心(National Oceanography Centre, NOC)发布《净零海洋能力总结报告》(Net Zero Oceanographic Capability Summary Report)。该报告以实现零碳排放作为核心目标，提出了一系列战略布局和发展方向，主要内容包括：改造现有海洋船舶，利用高新技术实现零碳目标；开发新型传感器，以探索海洋并了解海洋在气候变化中的作用；减少部分船载调查设备，通过应用卫星、自主平台和浮标等为调查船安装绿色燃料系统腾出空间；增加海上无人装备数量以监测海洋；建立观测模型，开发数据生态系统，发挥数字工具在海洋观测领域的价值。英国国家海洋中心表示，英国将从 2035 年开始使用新一代零排放、自动化的大型调查船，继续开发高新技术以建立可持续发展的海洋传感器基础设施，并组建大规模全球海洋物联网，最终实现海洋科学研究零碳排放目标。

3.法国发布《海床控制战略》，谋求全面提升深海装备与技术水平

2022 年 2 月，法国国防部(French Ministry of Defence)发布《海床控制战略》(Seabed Warfare Strategy)，目标是推动法国海军获得水下 6000 米深处的作战能力，并在全球绝大多数海域形成竞争力，以更好地维护法国战略利益。该战略分析了海底与法国战略利益的关系，阐述了控制海底对维护法国战略利益的重要性，并提出了所要采取措施的路线图。未来，

法国将重点研发新型自主无人潜航器(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)与遥控潜航器(Remote Operated Vehicle, ROV)，并持续发展水下搜索、监视和干扰技术，超低频声波传输技术，以及能够用于水下 300 米的潜水装置等新一代装备与技术。同时，该战略将与法国 2030 年投资计划保持一致，并与其未来反水雷战项目(Le Système de Lutte Anti-mines Marines Futur, SLAM-F)、未来水文和海洋学能力项目(Capacité Hydrographique et Océanographique Future, CHOF)保持同步。该战略的发布表明，法国已认识到深海在当前及未来战略竞争中的重要地位，正加紧在该领域的谋篇布局。

4.俄罗斯发布新版国家海洋战略，统筹规划海军战略重点区域发展

2022 年 7 月，俄罗斯总统普京签署命令批准了新版国家海洋战略，这是继 2001 年版和 2015 年版后俄罗斯颁布的第三版国家海洋战略。该战略阐述了俄在世界海洋的国家利益、俄国家安全面临的挑战及威胁、俄海洋活动优先发展方向等，包括建立俄海军后勤保障点、发展卫星通信和导航系统、加强人工智能系统开发应用、实现船舶制造技术独立、推进北极和里海大陆架勘探、加强海上活动领域动员培训等具体内容。此外，该政策还概述了影响俄罗斯海上活动的几个挑战。例如，该国科研船队规模小、状况不佳，以及一些国家对俄罗斯军用造船和石油天然气部门的制裁，包括在尖端技术、

设备交付和外国投资领域的制裁。俄总统普京表示，俄新版国家海洋战略勾画出了包括经济利益和重要战略利益在内的俄国家利益边界和区域，将直接对俄罗斯海军的建设与运用产生重大影响。

5.韩国出台《超级差距战略》，谋求韩国造船产业的新竞争优势

2022 年 10 月，韩国贸易、工业和能源部(Ministry of Trade, Industry and Energy)发布了《超级差距》(Super Gap)战略，旨在确保韩国造船业的全球竞争力。该战略提出，为了抢占未来船舶市场的主导权，要将韩国造船业在高附加值船舶市场的占有率从目前的 64%到 2030 年提升至 75%，并计划推进 LNG 船核心技术的国产化及碳减排技术和零碳船舶的开发，2024—2029 年完成液氢运输船的示范建造并提前实现商业化应用。为此，在金融政策方面，该战略提出将为造船企业提供预付款保函等金融支援，以及稳定的原材料供应。在产业链建设方面，该战略提出将根据钢材供求状况，研究并改善钢铁业与造船业的价格协商方式，同时将大型造船企业的环保核心技术转移到中小型造船厂。韩国造船业相关专家表示，此次韩国政府出台《超级差距》战略，旨在确保韩国造船业在未来船舶市场的主导权，强化造船产业出口竞争力。

6.挪威推出《面向 2050 年的海事展望》，聚焦航运业脱碳化发展

2022 年 9 月，挪威船级社(Det Norske Veritas, DNV)发布《面向 2050 年的海事展望》(Maritime Forecast to 2050)，重点阐述了航运业实现碳中和燃料转型所必须具备的生产、分销和加注基础设施等综合性关键因素。同时，该报告更新了对相关法规、驱动因素、未来技术及成本的展望；围绕 3 个可能的脱碳目标，对 16 种不同类型的燃料和 10 种燃料技术系统建立了模型；通过 30 个不同场景的假设，预测了到 2050 年世界船队构成、能源使用、燃料结构及相应的二氧化碳排放情况，并指出化石燃料将在 2050 年之前被逐渐淘汰。此外，该报告还关注了航运业在脱碳历程中如何提升航运公司能力、如何加强全行业的协作，以及如何应对在技术、监管和市场方面的不确定性和挑战等内容，对于未来航运业的脱碳化发展意义重大。

7.对中国的影响与启示

2022 年，世界主要国家继续推动海洋领域前瞻性规划，瞄准战略和前沿技术领域提前布局，进一步强化全球海洋影响力。这些国家在海洋领域相关规划布局对中国海洋发展有以下两点启示。一方面，提升海洋在国家发展战略中的地位。中国是陆海兼备大国，拥有 18400 千米的大陆海洋线，无论是经济利益还是长远发展抑或是国家安全，海洋都至关重要，实现中国的海上崛起是历史和时代赋予的责任。对此，从战略角度关注海洋，并根据国际形势发展更新完善海洋整体发

展战略，更加符合中国发展利益。另一方面，加强海洋科技创新。海洋科技是实施海洋战略的重要支撑，一直以来备受海洋国家重视。2022 年，美国、法国等海洋国家均出台相关政策性文件，从战略层面规划海洋装备与技术的发展，体现出对海洋科技创新的重视。当前，围绕海洋战略性资源获取、深海利用权争夺、深海生命探究、海洋材料开发等战略性、前沿性领域的大国博弈日趋激烈，中国海洋科技创新已进入局部领域“质的突破”阶段，需要我们通过创新驱动填补自主创新较少、科技成果转化能力不足等短板，加强海洋科技基础研究和应用，为实现由海洋大国向海洋强国的转变提供坚实的科技保障和支撑。

（二）世界主要国家持续推动海上无人装备向着大型化、实战化方向发展

2022 年，世界主要国家持续发展以无人潜航器、无人水面艇为代表的海上无人装备，同时注重通过开展各类演习来推动其实战化应用进程，意在全方位构建未来海上无人装备技术发展优势。总体来看，海上无人装备已成为各国海军装备建设体系中的重要一环，其发展主要呈现出大型化、实战化两大主流趋势。

1.美英等国聚焦大型海上无人装备研建，取得一系列重要进展

当前，世界各主要国家的海上无人装备发展各具特点，以美国为首的西方国家注重发展大型无人装备，并持续加大相关研发投入。2022 年，美国海军先后对“虎鲸”和“蛇头”(Snakehead)超大型无人潜航器进行了多项技术测试，并开展了包括“先锋”级(Spearhead)远征高速运输船自主性能验证、大型无人水面舰艇概念设计等前沿无人艇项目，其无人值守舰船(No Manning Required Ship, NOMARS)项目、幽灵舰队(Ghost Fleet)项目也取得了重要进展。此外，英国在超大型无人潜航器上测试了反潜任务载荷，加拿大开始研建“海狼”超大型无人潜航器，澳大利亚则推出了幽灵鲨鱼(Ghost Shark)超大型无人潜航器原型。

综合分析来看，大型化已成为各国海上无人装备发展的重要趋势之一，且美国在该领域处在绝对领先位置。一方面，大型化能够赋予海上无人装备更高的续航能力和更强的任务载荷搭载能力，并能够大幅扩展其可执行任务范围。以美国海军的“虎鲸”超大型无人潜航器为例，该型无人潜航器能够容纳多型任务模块，以及鱼雷、水雷等武器，未来有望成为新概念水下战的核心节点。另一方面，大型海上无人装备能够在扩充各国海军舰队规模的同时，进一步丰富其作战手段与作战概念，全面提升其整体作战能力。未来，美英等国的海上无人装备将继续向着大型化方向进一步发展。

2.多国重视开展海上无人装备作战试验，加速推进其作战能

力生成

除研建各型装备外，多国还致力于推动海上无人装备的实战化应用进程，举办了多场大规模海上无人装备演习。2022 年 2 月，美国举办了“国际海上演习 2022”，涉及来自 10 余个国家的 80 多型无人装备，全方位验证了各国海上无人装备的作战性能。2022 年 7 月，美国海军在“环太平洋 2022”(Rim of the Pacific 2022)演习中派遣了 4 艘试验性无人水面艇，重点演练了其“载人/无人联合作战”战术。2022 年 9 月，北约在葡萄牙大西洋沿海靶场举行了首次真正意义上的无人战役演习“动态水手-22”(Dynamic Mariner-22)，旨在考察其海上无人装备在海洋环境中的实战能力，以及无人系统一体化概念的应用效果。此外，俄罗斯、伊朗和以色列等国也各自开展了一系列涵盖海上无人装备作战内容的军事演习。可以看出，世界主要国家正依托一系列大规模军事演习，加快推进海上无人装备的实战化应用进程。现阶段，海上无人装备在战场感知、指挥控制、精确打击、信息作战和综合保障等方面已得到广泛应用，但距离真正的实战阶段还有一定距离。但随着人工智能、数字孪生等前沿技术的快速发展及应用，海上无人装备正逐步加大对海上作战中态势感知、信息传递、指挥决策和实施打击等各关键环节的影响。在此背景下，美俄等国积极开展海上无人装备作战试验，意在推进海上无人装备尽快形成作战能力，从而全面构建未来海上作

战优势。

3.乌克兰首次将无人水面艇应用于大规模实战，或将开启未来海战新模式

2022 年 10 月，乌克兰出动 9 架无人机和 7 艘无人水面艇袭击了位于塞瓦斯托波尔的俄罗斯海军基地，致使俄罗斯海军“伊万·格卢罗茨”号(Ivan Golubets)扫雷舰受到损坏。根据媒体消息，乌克兰在此次袭击使用的无人水面艇采用了高效的喷水驱动方式，并配备了多个摄像系统，船艏安装有冲击爆震传感器和卫星通信天线，表明其具备超视距作战能力，整体技术水平较为先进。相关分析认为，乌克兰此举将进一步加快无人水面艇的实战化应用进程，并对未来海上作战模式的演进产生重要影响。

作为海上无人装备的重要组成部分，无人水面艇具有行动隐蔽、续航时间长等特点，并且具备出色的侦察、监视和打击能力，现已成为各国海军开展监视侦察、情报收集、精准打击等任务，以及实现减少伤亡或零伤亡目标的重要手段。此次乌克兰海军将无人水面艇应用于大规模实战，在一定程度上反映出未来海战的无人化趋势，并进一步佐证了各国建设海上无人作战体系的战略设想和可行性。同时，此次实战经历对无人水面艇的实战化应用也起到了重要的推动作用，或将开创新的海战方式。未来，随着无人技术的快速发展，海上战场的力量结构和编组模式将发生颠覆性变化，无人水面

艇将逐步走向战争前线，成为未来海战的主要参与者。

4.对中国的影响与启示

现阶段，中国的地面和空中无人作战系统发展已初见成效，无人装备技术整体水平步入世界先进行列。但是，中国在海上无人装备领域相较美俄等国仍有着较大的提升空间。未来，中国可着重从以下三个方面推动海上无人装备技术发展，以构建更加完备的海上无人作战体系。首先，加大对美国、俄罗斯等国在海上无人装备领域研建动向的跟踪研究，汲取其在无人潜航器、无人水面艇研建过程中的经验。其次，准确把握海上无人装备的未来发展方向，积极推进国内相关研究项目的发展。最后，重视无人水面艇对未来海战方式的影响，在加快相关项目研建速度的同时，注重推进其战力生成与实战化应用进程。

（三）北极地区形势发生变化，主要国家围绕该地区展开新一轮竞争

近年来，北极地区已成为世界主要国家角力的新擂台。2022年，俄乌冲突爆发后，双方在全球地缘政治、经济中的地位和外溢效应逐渐在北极地区显现，进而引发该地区形势发生一系列变化，直接导致北极理事会几近停摆、能源合作项目搁浅。为在新形势下更有效地提升北极事务参与度，维护本国北极利益，世界主要国家以装备技术为切入点，持续推进

北极装备研建。美俄等北极大国更是将北极装备视为未来北极战略竞争和军事活动的重要支撑。同时，各北极域内外相关国家持续加大对极地通信、极地航行等技术的研发投入，以期为未来北极开发提供重要技术支撑。

1.俄乌冲突波及北极地区，北极国际合作面临系统性风险

2022 年 2 月，俄乌冲突爆发后，美西方国家对俄罗斯实施各种制裁和脱钩措施。在此背景下，作为新疆域的北极地区不可避免地受到波及，北极国际合作面临系统性风险。在北极国际治理方面，2022 年 3 月，北极理事会(Arctic Council)的西方七国（美国、加拿大、丹麦、芬兰、冰岛、挪威和瑞典）发布联合声明称，暂时停止参加北极理事会及其附属机构的所有会议，而俄罗斯自 2021 年 5 月起开始担任该理事会为期两年的轮值主席。在北极能源合作方面，俄乌冲突爆发后，法国道达尔、英国石油、挪威国家石油、美国埃克森美孚等全球多家大型石油公司纷纷宣布退出或暂停与俄罗斯的资源开发合作，涉及亚马尔(Yamal)、北极-2(Arctic-2)、北溪 2 号(Nord Stream 2)、库页岛 2 号(Sakhalin-2)等多个 LNG 项目。在北极航道合作方面，受美西方国家制裁俄航运公司的影响，俄北极航道的国际利用率进一步降低，其沿线地区的开发进程受阻。

从 2022 年北极国际合作情况来看，俄乌冲突打破“北极例外论”。此前，由于北极地理位置特殊，各主要国家均认同

该地区的合作不应受到世界其他地区冲突的影响。俄乌冲突爆发后，北极低政治领域的多项国际合作项目受到阻碍，尤其是作为北极治理核心机制的北极理事会，一度陷入停摆危机，这意味着北极形势发生变化，北极大国博弈已不再局限于军事、安全领域，而是逐渐蔓延到经济、能源资源和海上运输等领域。这一形势的变化将对北极开发的国际合作产生负面影响，严重冲击北极开发进程。未来，俄乌冲突在北极地区的溢出效应值得持续观察，而如何保持北极正常合作免遭俄乌冲突带来的政治和经济风险，是各国均需要思考的问题。

2.美俄高度重视发展北极装备，以支撑未来北极地区的战略竞争和军事活动

俄罗斯方面，积极扩充破冰船队规模，同时加速推进破冰船“武装化”进程。2022 年 10 月，俄罗斯宣布至 2033 年将再建造 5 艘破冰船，用于向北极地区驻军运送军事物资。2022 年 10 月，俄罗斯称其新下水的 23550 型破冰船将装备“口径”(Kalibr)巡航导弹系统，以及多型兼具对海、对陆打击能力的武器。该型破冰船将成为俄罗斯历史上首艘军用破冰船，预计将于 2023 年服役。美国方面，大力扩建北极核设施，在阿拉斯加军事基地部署小型核反应堆。2022 年 10 月，美国空军宣布将在阿拉斯加艾尔森基地部署其第一座小型便携式核反应堆。根据美军此前公布的文件显示，该型核反应

堆体积不仅比核潜艇的反应堆小，而且能够跟随部队在战场上灵活部署。分析人士指出，美方一直宣称建造和试验小型核反应堆是为应对气候变化，但其真实目的是在未来北极战场上获得近乎无限的能源供应。

当前，北极地区已成为大国竞争的前沿地带，尤其是美俄等北极大国，正大力发展极地装备与技术，全面构建极地破冰航行、监视及作战能力，以支撑未来北极地区的战略竞争和军事活动。其中，俄罗斯方面，破冰船的建设思路发生了转变，不仅重视破冰船数量的扩充，还开始将先进武器装备及导弹系统集成到破冰船上。以往，俄罗斯较少投入具有军事打击能力的破冰船，其计划在破冰船上安装的武器装备，几乎可以和海军主力战舰相媲美，标志着未来破冰船已不仅仅是用于破冰护航的民用船只，而且还是极地作战、资源争夺及战略部署的战略装备。美国方面，在破冰船数量大幅落后俄罗斯情况下，加快将其他装备应用到北极的大国竞争中。美国计划在阿拉斯加部署的小型核反应堆具备部署灵活、长时间不间断持续输出能源的特点，可提高部队持续作战能力。美国将其部署于北极这一战略新空间，展现出对北极安全问题的重视，未来美国或将研建更多适应极地活动的装备。

3.主要国家加大极地技术研发投入，旨在为北极开发利用提供技术支撑

作为科学认知北极、合理开发利用北极资源的基础保障，极

地技术近年来在全球气候变暖大背景下得以快速发展。2022年，主要国家继续加大在极地破冰航行、极地通信技术等方面的研发投入。2022 年 8 月，俄罗斯总理米哈伊尔·米舒斯京(Mikhail Mishustin)签署《2035 年前北方海航道开发计划》(Northern Sea Route Development Plan To 2035)，总拨款规模近 1.8 万亿卢布（约合 231.1 亿美元），其中一部分资金将用于新破冰船的研建项目。2022 年 8 月，美国电信公司(Far North Digita)、芬兰电信公司(Cinia)及日本基础设施公司(Arteria Networks)联合宣布，计划投资 10 亿欧元铺设一条通过北极海域的海底通信光纤电缆，力图在北极数码基建领域抢先布局。2022 年 11 月，韩国海洋水产部(Ministry of Oceans and Fisheries, MOF)公布第一期极地活动发展计划。根据计划，韩国海洋水产部将极地产业视为新的突破口，抢占新技术的发展高地，如开拓北极航道的破冰集装箱船技术。此外，韩国将在 2030 年年底之前投入 2774 亿韩元（约合 2.2 亿美元）建造新一代破冰科考船。

从 2022 年各国极地技术研发投入动向看，有三个趋势值得关注。一是随着极地冰川的加速融化，北极地区的战略价值越发显现，不仅美俄等北极国家重视极地技术研发，日韩等域外国家也开始投入巨资研发极地技术，目的是以技术为切入点，进一步提升北极开发参与度。二是俄罗斯在俄乌冲突背景下，仍然重视北极地区建设，投入大量资金来研发极地

破冰船技术。相较其他国家而言，俄罗斯在极地技术方向的投入更多，目的是保持在北极地区绝对领先的技术优势，尤其是保持其破冰船数量优势。三是部分国家利用其相关产业优势发展极地技术，或将引领新技术发展。例如，韩国依托其强大的造船业实力，发展新型破冰集装箱船技术，不仅将引领全球集装箱破冰航行技术发展，同时还将推动北极航道加速向商业化迈进。

4.对中国的影响与启示

可以预见，未来世界主要国家将围绕北极地区展开全方位竞争，或将引发该地区局势持续升温和安全态势进一步演变，尤其是随着俄乌冲突持续，其溢出效应在北极地区或将越发凸显。中国作为北极事务的重要利益攸关方，北极态势发展与中国北极事务的推进联系紧密，需要我们“不缺位、不越位”，以更为积极主动的姿态维护极地安全。一方面，需要研判北极可能出现的风险挑战，并提前做好应对部署。这些风险挑战主要表现为俄乌冲突导致主要国家在北极地区的博弈更趋激烈，引发地区局势日渐紧张，这将对包括中国在内的诸多国家开展北极活动产生负面影响。另一方面，需要加快推进北极装备建设，提升自身北极硬实力。北极装备是认识、开发和利用北极的重要支撑，亟须研发北极观测装备与技术，提升北极认知水平，为北极的可持续开发利用提供保障。此外，应注意到，在美国极力遏制中国发展的国际环

境下，“坚持向北发展”将成为应对国际挑战的一项重要战略。随着北极冰川的加速融化，北极通航时代加速到来，对我国意义重大。因此，需重点针对极地船舶开展技术储备工作，以为 21 世纪下半叶北极夏季商业航线的大规模开发和开辟能源资源获取新渠道提供技术支撑。

（四）深海资源开发热度持续高涨，多国在深海装备与技术领域取得重要进展

近年来，随着陆上资源的逐渐枯竭，深海资源的战略价值越发凸显，世界主要国家纷纷加大在深海装备与技术方面的研发工作，旨在全方位提升深海资源开发能力。2022 年，在深海资源开发方面长期走在世界前列的美英等国相继推出多种新型装备与技术，不仅提升了自身深海观测监测能力，同时也进一步完善了其深海装备与技术体系。

1.美欧推出多款新型深海装备，推动深海观测监测能力进一步提升

2022 年，美国与欧洲多国在深海装备与技术领域取得了一系列重要进展，先后推出了多款新型装备，极大地提升了深海观测监测能力。其中，美国推出了能够应用于军事部署、科学探测及水下基础设施管理等方面的新型潜水器“DIVE-LD”，同时还推出了无须电池的新型无线水下摄像机，可极大提升海底原位观测的效率。英国推出了“Auto Sub 5”号和“Boaty

McBoatface”号深海潜水器，并启动了一系列技术测试工作，全方位验证技术完整性。德国对“MeBo200”型海底钻机进行了多项功能检测，并为其开启了新一轮的北大西洋深海钻探任务。此外，西班牙、法国和意大利等欧洲国家也相继在深海装备与技术领域取得了重要进展。

现阶段，美国在深海资源开发方面处于世界领先位置，开发了多型深海装备，并研发了一系列相关配套技术，确保其深海观测监测能力长期保持在世界前沿水平。同时，美国注重探索未来水下作战模式，现有部分深海无人装备兼具资源探测与军事侦察等多种功能，体现出其旨在抢占未来深海资源开发利用和深海作战领域的双重领先地位。此外，以英国、德国和法国为代表的欧洲传统强国也长期深耕于深海装备与技术领域，其深海观测监测的整体水平同样处在世界前列。未来，随着人工智能、5G 通信等前沿技术的更新迭代，各国将进一步加快深海装备与技术的研建速度，推动深海观测监测能力进一步提升，为未来深海资源开发提供更为有力的支撑。

2.水下供能技术取得重要突破，助力深海装备与技术迈向新阶段

对于深海装备而言，现有水下供能技术大多无法满足其在复杂工况下长期运行的需求，因此该技术一直是影响深海装备发展的主要难点之一。2022 年，英国、德国相继在水下供能

技术领域取得了重要突破，对深海装备与技术的发展起到了重要的促进作用。其中，英国推出了一款专为恶劣的海底环境设计的新型海底电池存储系统。该系统是一种模块化、可拓展的电池存储解决方案，能够为潜水器、机器人和海底监测网等多种设备提供可靠、稳定的充电式电力供应，以保障其长时间离岸运行。德国开发了一款新型水下燃料电池。该型电池容量约为 120 千瓦时，最大输出功率 1 千瓦，额定工作深度 1200 米，工作效率是传统电池的 10 倍左右，未来将主要用于深海可移动装备供电，能够更好地满足深海观测探测等活动对装备长续航能力的要求。

受系统自放电、瞬时高功率和深海低温高压等诸多因素的影响，水下供能技术长期以来发展缓慢，在一定程度上影响了深海装备的技术进步。近年来，持续提升深海装备的续航能力、延长其作业时间和作业效率已成为世界海洋强国发展深海装备的重点关注方向。英国和德国推出的新型深海水下供能系统，不仅丰富了深海供能的技术手段，同时也有助于解决现有深海装备作业能力单一、单次续航时间短等问题，能够为深海装备的发展提供更多的路线选择。未来，深海装备将继续向着集群化、智能化等主流方向发展，对深海供能技术的要求也将随之提高。因此，高能量密度、高安全、高可靠和长寿命的水下供能技术必将成为未来推动深海装备发展的重点关键技术。3.对中国的影响与启示

深海技术俨然已成为深海资源开发、深海科学研究和深海安全保障的脊梁和基石。目前，中国在深海开发方面已取得一定成就，尤其是深海载人潜水器(Human Occupied Vehicle, HOV)的发展已达到世界先进水平，深海采矿装备已进入关键研发阶段，深海油气资源勘探开发也在稳步推进，但就深海装备与技术的整体发展而言，中国与美英等国相比存在较大上升空间。为进一步缩短与美英等国在深海装备技术方面的差距，切实提升深海观测监测能力，应从以下三个方面着手进行布局。一是重点推进关键核心技术的研发工作，加快启动深海装备重大项目，通过技术牵引，推动自主配套产品在国内深海装备上的推广应用，寻求构建深海装备的技术优势，抢占深海装备和技术的制高点。二是加强对深海开发领域高技能人才的培养力度，并健全领域人才的分类评价与晋升机制，为深海装备与技术的发展提供可靠的人才支持。三是注重深海装备的体系化建设，在开发各型先进装备的同时，注重推进相关配套技术的研发工作。

（五）主要造船国家致力于提升高技术船舶全球竞争力

当前，新一轮科技革命和产业变革兴起，引发船舶工业加快向数字化、智能化和网络化转变。在此背景下，高技术船舶迎来快速发展期，有力支撑了船舶工业的高速发展。高技术船舶是采用各种高技术、特种技术和尖端技术设计制造的各

种类型船舶的总称，主要包括绿色船舶、智能船舶和特种船舶。2022 年，为抢占高技术船舶市场主导权，世界主要造船国家继续从资金投入、技术研发和标准制定等方面入手，积极推动构建高技术船舶产业链优势。

1.欧日韩加大绿色船舶产业发展资金投入，进一步构建产业链优势

近年来，随着航运业脱碳化进程的加快，绿色船舶市场迎来广阔发展前景。世界主要国家全面规划绿色船舶发展，力求掌握该领域核心技术，进一步构建产业链优势。2022 年，欧日韩等造船强国和地区继续围绕绿色船舶展开布局，重点体现在资金投入方面。2022 年 1 月，日本商船三井宣布将在未来 3 年内投入 17 亿美元助力航运业脱碳，并计划到 2035 年将绿色船舶数量扩大到 110 艘。2022 年 3 月，英国政府宣布将投入 2.06 亿英镑用于支持航运零排放和绿色海事技术。2022 年 7 月，韩国政府宣布计划未来 10 年内投入 2 亿美元开发以氢、氨为基础的零碳动力核心技术。2022 年 8 月，德国政府宣布将每年投入 6000 万欧元发展绿色船舶产业并支持造船业数字化转型。

从 2022 年各国在绿色船舶领域的资金投入方面分析，绿色低碳、节能减排已是船舶航运业发展大势，欧日韩均已将绿色船舶列为船舶工业的优先发展项目。当前，有一定应用经验和发展潜力的绿色船舶燃料主要包括可再生能源（甲醇、

生物、风能）、替代燃料（氢能、氨能、液化天然气）、电池（蓄电池、燃料电池）等。日本将开发替代燃料视为促进绿色船舶发展的有效途径，近年来以三菱重工(Mitsubishi Heavy Industries, MHI)、川崎重工(KHI)、常石造船(Tsuneishi Shipbuilding)为代表的船企在氢燃料船舶、氨燃料船舶等领域取得突破。欧洲聚集了诸多航运巨头，在绿色船舶领域布局范围广，涉及生物燃料船舶、风能动力船舶以及氢燃料电池船舶等多型绿色船舶研发。韩国作为世界造船强国，船舶众多细分领域均走在世界前列，绿色船舶领域亦是如此。近年来，韩国在 LNG 动力船领域取得诸多重大突破，形成较强的 LNG 动力船产业链竞争优势。未来，各国绿色船舶产业在充足资金支持下，整体技术水平将日渐成熟，加之监管、成本等问题逐步解决，绿色船舶的大规模商用指日可待。

2.世界主要国家并行推进智能船舶技术研发与法规制定工作

作为数字与智能技术时代的新兴领域，智能船舶已成为全球航运业重点发展方向。2022 年，世界主要国家从技术研发和法规制定两个方面入手，持续推进本国智能船舶发展。在技术研发方面，自主航行技术的发展已经初具雏形，具有自主航行技术的智能船舶开始进行试验。2022 年 3 月，日本成功完成 6 个不同船型、不同条件的智能船舶实船测试，创造了 6 项世界纪录，为其在 2025 年实现智能船舶商业化目标迈出重要一步。2022 年 11 月，韩国首次在海上复杂环境下完成

船舶自主航行实证测试，在此次测试中船舶 29 次成功避开了与其他船舶相遇的碰撞危险，证明了其优越的性能。在法规制定方面，陆续出台支持智能船舶的相关规范与指南。2022 年 11 月，韩国提出制定关于促进智能船舶开发及商用化的法律，该法律明确定义了智能船舶及其自动航运系统，为开发和验证智能船舶等提供法律依据。2022 年 12 月，日本船级社(Nippon Kaiji Kyokai, NK)发布新版《数字智能船舶指南》(Guidelines for Digital Smart Ships)，为数字智能船舶船级符号制定了相应标准，以更好地响应业界未来需求与技术进步。

从 2022 年造船强国和地区在智能船舶领域的主要动向看，日韩等国在智能船舶技术尚未成熟时就开展相关法规制定，重视技术、法规领域同步布局，目的是抢占未来智能船舶时代发展先机。专家预测，2030 年以后，随着自主航行技术的成熟及法规等非技术性问题的解决，真正的智能航运时代将会到来。届时，在智能船舶领域布局已久的日韩等国或将引领全球智能船舶发展。

3.LNG 运输船迎来需求“井喷”，韩国引领全球 LNG 运输船发展

2022 年 2 月，俄乌冲突爆发后，欧盟各国对俄罗斯实施能源制裁，并转向从美国进口 LNG 运输船以弥补能源进口缺口，导致跨大西洋 LNG 运输船海运量激增。2022 年 9 月，“北

溪”天然气管道项目 3 条海上管线同时受损，1670 亿立方米的管道气运输要改为水路。如果欧洲从俄罗斯进口的管道气全部替换成 LNG 运输船，假设平均运距与原先持平，需要 233 艘 LNG 运输船。而据公开资料显示，截至 2022 年 9 月初，全球 LNG 运输船仅有不到 700 艘，欧洲约占用 145 艘。

近年来，在全球碳中和趋势下，天然气作为一种清洁能源，消费需求持续增长，LNG 运输船进口量连年增长。同时，俄乌冲突加剧了全球天然气市场的紧缺性，加之“北溪”天然气管道又出现泄漏。多种因素叠加下，导致全球 LNG 运输船需求持续增长。据英国克拉克森研究公司(Clarkson Research)数据显示，未来 10 年内，LNG 运输船海运量将增长 65%，预计到 2030 年，海运量将从 2021 年的 3.8 亿吨增至 6.3 亿吨，LNG 运输船将迎来需求“井喷”。LNG 运输船属于高技术密集型船型，设备复杂、技术难度大且造价高，目前全球主要 LNG 运输船建造国为中韩两国。而韩国基于长期的技术积累与创新，大宇造船（Daewoo Shipbuilding&Marine Engineering，DSME）、三星重工(Samsung Heavy Industries, SHI)、现代重工(Hyundai Heavy Industries, HHI)三大船企几乎包揽了全部大型 LNG 运输船订单，占据约全球 70%的市场份额，其大型 LNG 运输船年交付能力达 60 艘。据瑞典能源咨询机构雷斯塔能源(Rystad Energy)预测，目前韩国造船业产能全满，最快要到 2027 年才能承接新订单。可以预见，在碳中和步伐加快及国

际能源市场动荡大背景下，全球对 LNG 运输船的需求将大幅提升，LNG 运输船市场将迎来快速增长期。

4.对中国的影响与启示

近年来，国际船舶市场进入新一轮大的调整周期，高技术船舶成为需求热点。高技术船舶也将成为推动中国造船产业转型升级的重要方向。纵观 2022 年及近年来世界主要造船国家高技术船舶发展整体态势，可形成对中国高技术船舶产业发展的启示如下。

首先，强化核心技术自主，构建产业链优势。纵观欧日韩等造船强国和地区高技术船舶发展历程，各国家和地区造船业及船舶配套企业形成合力，同时攻关高技术船舶核心设备和配套设备，不仅实现了核心设备的自主可控，同时还建立了完善的船舶配套产业集群。中国在布局超大型集装箱船、极地科考船及重型破冰船等高技术船舶核心设备的同时，应开展船用动力系统和其他配套装备的技术攻关，提升智能综合管控系统、大功率激光器、动力定位系统等关键系统能力，在高技术船舶整个产业链涉及的关键技术上实现自主可控。

其次，密切关注全球高技术船舶市场发展趋势。欧日韩对于高技术船舶发展趋势极为关注，以韩国 LNG 运输船为例，其早年间充分把握了美国、俄罗斯天然气出口增加的 LNG 运输船市场发展趋势，以及印度、欧洲、日本等国家和地区大量进口 LNG 运输船产生的 LNG 运输船需求，接获了全球约 70%

的 LNG 运输船订单。因此，密切关注高技术船舶市场发展趋势，准确把握市场需求，进而提升中国高技术船舶市场份额。最后，积极参与高技术船舶国际标准制定，提升未来市场话语权。近年来，欧日韩致力于占据国际新标准引领者和推动者的位置，并希望通过深度参与制定国际新标准赢得更大的竞争优势。中国虽然目前与欧日韩在国际标准制定方面存在一定差距，但船舶智能化、绿色化和信息化发展趋势越来越明显，相关国际标准更新频率将越来越高，这将为中国在国际标准制定方面发挥后发优势提供机遇，主动抢抓机遇，高度关注并积极参与国际标准制定，助力中国高技术船舶实现高质量发展。

二、海洋防务装备与技术

2022 年，世界主要国家持续推进航母、潜艇与水面舰艇等多型海军主战装备的研建进程，将新研项目与升级换代工作并行推进。其中，美国与俄罗斯在多个领域取得重要进展，尤其在核潜艇、无人装备及定向能武器等领域成果颇丰，相关技术持续保持在世界领先水平。此外，日本、韩国与欧洲多国同样取得了诸多成就，相继下水或服役了多艘主战舰艇，并同样聚焦于先进装备与技术领域，旨在进一步提升各自海军的实力。

（一）航空母舰

1.美国持续加强“福特”级航母部署与建造力度，全面推进航母换代工作

2022 年 4 月，美国海军“福特”级航母首舰“福特”号完成航行中常规弹药装载演训。2022 年 7 月，“福特”号航母达成 10000 次弹射起飞、阻拦着舰的里程碑。2022 年 8 月，“福特”号航母完成作战系统战备演练。2022 年 10 月，“福特”号航母正式开启服役 5 年来的首次部署任务。

2022 年 8 月，美国海军在纽波特纽斯造船厂(Newport News Shipbuilding, NNS)为第 3 艘“福特”级航母“企业”号(Enterprise)举行了龙骨铺设仪式。相比前两艘“福特”级航母，“企业”号航母在施工流程与技术方面作出了诸多改进。同时，“企业”号航母舰体上大量钢质结构模块经过不断优化设计，生产效率得到了进一步提升。根据计划，“企业”号将于 2028 年正式服役。

2022 年 10 月，美国亨廷顿·英格尔斯工业(Huntington Ingalls Industries, HII)向美国海军移交了第 2 艘“福特”级航母“肯尼迪”号(John F. Kennedy)的第 1000 个舱室，标志着该舰在舾装工程和系统建设方面达到了重要里程碑。根据计划，“肯尼迪”号将于 2024 年正式服役，用以替代现役“尼米兹”号(Nimitz)航母。

2022 年 11 月，美国海军“福特”号航母完成了为期 3 周的

首次部署任务。部署期间，“福特”号航母打击群在大西洋海域与法国、德国及瑞典等北约国家的多艘舰艇开展了一系列演训活动，演训内容主要包括动态演习、模拟海峡过境、飞行操作、武器测试、通信和网络响应等。此次部署标志着“福特”级航母已正式迈入实战化阶段。

2.法国稳步推进新一代航母研建工作，相关技术细节持续完善

2022 年 4 月，法国海军通过 Twitter 账号发布了首个关于新一代核动力航母“PANG”的视频。该航母长 305 米，宽 40 米，满载排水量 75000 吨，建成后将作为法国海军部队的核心，用于执行远程对地攻击、反舰反潜作战等任务。根据计划，“PANG”航母将于 2035 年年底或 2036 年年初首次海试、2036 年年底至 2037 年年初交付，随后于 2038 年服役，取代届时退役的“戴高乐”号(Charles de Gaulle)航母。

2022 年 10 月，法国海军在第 27 届欧洲海军展上首次展出新一代核动力航母“PANG”的概念模型。2022 年 10 月，根据美国通用原子公司发布的消息，“PANG”航母将采用该公司研制的电磁弹射系统(Electromagnetic Aircraft Launch System, EALS)与先进降落拦截装置(Advanced Arresting Gear, AAG)，该公司将于 2023 年 6 月前完成交付工作。

3.日本、印度持续寻求航母作战能力，以期大幅提升整体海上实力

2022 年 4 月，日本海上自卫队开始对“出云”级(Izumo)直升机母舰 2 号舰“加贺”号(Kaga)进行航母化改造。该舰长 248 米，宽 38 米，满载排水量 27000 吨。2019 年，日本正式确定对“出云”级直升机母舰进行航母化改造，并于 2021 年 7 月对其首舰“出云”号进行改造。2022 年 6 月，完成改造后的“出云”号直升机母舰与其他 4 艘舰艇组成编队，开始执行为期 4 个月的印太部署任务，意在探索航母编队远海作战经验。

2022 年 9 月，印度首艘国产航母“维克兰特”号正式服役。该航母长 262 米，宽 62 米，满载排水量约 43000 吨，最高航速达 28 节，能够搭载约 30 架各型舰载战斗机。该航母是印度历史上建造过吨位最大的军舰，造价高达 2000 亿卢比（约合 24.1 亿美元），整体国产化率达 76%。对该航母的研建使得印度成了有能力自行设计和建造航母的少数国家之一。

（二）潜艇

1.攻击型核潜艇技术稳步发展，主要国家水下作战能力获得进一步提升

2022 年 2 月，英国第 5 艘“机敏”级(Astute)攻击型核潜艇“安森”号(Anson)完成首次侧倾潜水测试。“机敏”级攻击型核潜艇水下排水量约 7400 吨，是英国有史以来吨位最大，

且最为先进的攻击型核潜艇，表面加装了能隔绝艇内噪声的消声瓦，同时搭载了“战斧”(Tomahawk)巡航导弹和“旗鱼”(Spearfish)重型鱼雷，兼具优良的静音性和强大的打击能力。

2022 年 3 月，俄罗斯北德文斯克造船厂(Sevmash)发布消息称，该造船厂正在现有生产条件下进行大规模技术升级，引入一种全新的模块化核潜艇建造方案，该方案将使俄罗斯第五代攻击型核潜艇的建造周期缩短 18 个月。此外，俄罗斯首艘第五代攻击型核潜艇早前被命名为“赫斯基”(Husky)，该艇将装备“锆石”高超声速导弹，预计于 2027 年下水，未来将成为俄罗斯海军主要的水下作战力量。

2022 年 5 月，美国海军第 2 艘“弗吉尼亚”级(Virginia)Block Ⅳ型攻击型核潜艇“俄勒冈”号(Oregon)正式服役。该艇同样也是第 20 艘“弗吉尼亚”级攻击型核潜艇，服役后将用于执行反潜作战、反水面作战、攻击作战、非常规作战及水雷战等多种任务。相比 Block Ⅰ～Ⅲ型，Block Ⅳ型攻击型核潜艇的保养周期由 4 个月减少为 3 个月，意味着其部署次数将由 14 次提升到了 15 次。

2022 年 6 月，法国国防部发布消息称，法国海军新一代攻击型核潜艇“絮弗伦”号(Suffren)已具备完全作战能力。该艇长 99.5 米，宽 8.8 米，水下排水量约 5300 吨，主要由法国海军集团(Naval Group)负责设计建造。该艇采用了多种减噪技术，整体隐身能力达到了世界先进水平。此外，相比法国

现役“红宝石”级(Rubis)攻击型核潜艇，“絮弗伦”号在尺寸与性能上均有明显提升。

2.美俄等国持续聚焦战略核潜艇研建工作，旨在强化水下核威慑能力

2022 年 1 月，英国媒体报道称，印度第 3 艘“歼敌者”级(Arihant)战略核潜艇已于 2021 年 11 月悄然下水。与前两艘同级潜艇相比，该艇尺寸更大，可以安装 8 个发射器，并可携带 8 枚 K-4 弹道导弹或 24 枚 K-15 弹道导弹。“歼敌者”级战略核潜艇使印度具备了水下核发射能力，并为印度发展可靠的核三位一体实力提供了支撑。

2022 年 6 月，美国通用动力电船(General Dynamics Electric Boat, GDEB)开始为美国海军首艘“哥伦比亚”级(Columbia)战略核潜艇“哥伦比亚特区”号(District of Columbia)铺设龙骨。该级潜艇是美国新一代战略核潜艇，共将建造 12 艘，以取代现役“俄亥俄”级(Ohio)战略核潜艇。通用动力电船表示，每艘“哥伦比亚”级战略核潜艇可携带 16 枚核导弹，未来约 70%的美国核武库力量将由该级潜艇携带。

2022 年 9 月，俄罗斯红宝石海洋机械中央设计局(Ruby Central Design Bureau of Marine Machinery)推出一款代号为“大角星”(Arcturus)的战略核潜艇概念设计，外界猜测该设计模型或为俄罗斯下一代战略核潜艇雏形，可能于 21 世纪下半叶出现在俄罗斯海军中。2022 年 10 月，该设计局表示，俄罗斯未

来将通过降低反射音场及减少电磁场、热场来提高核潜艇的隐身性能。

2022 年 11 月，俄罗斯北方造船厂(Northern Shipyard)表示，俄罗斯最新的战略核潜艇“苏沃洛夫大元帅”号(Generalissimo Suvorov)完成了所有阶段的测试，已做好服役准备。该艇是俄罗斯第 6 艘第四代战略核潜艇，也是第 3 艘“北风之神-A”级(Borei-A)战略核潜艇，最多能够装备 16 枚“布拉瓦”(Bulava)潜射弹道导弹。

3.研建项目与更新换代同步推进，多国重视常规动力潜艇技术升级

1）日本、韩国新型常规动力潜艇取得阶段性进展

2022 年 3 月，日本海上自卫队“大鲸”级(Big Whale)常规动力潜艇首艇“大鲸”号正式服役。2022 年 10 月，该级潜艇的 3 号艇“迅鲸”号(Swift Whale)在神户市下水。该级潜艇长 84 米，宽 9.1 米，标准排水量约 3000 吨，刷新了日本常规潜艇的最大吨位纪录。与最后两艘“苍龙”级(Soryu)潜艇相同，“大鲸”级潜艇采用锂离子蓄电池替代了此前的铅酸电池，大幅延长了水下潜航时间。

2022 年 5 月，韩国海军“岛山安昌浩”级(Dosan Ahn Changho)常规动力潜艇 3 号艇“申采浩”(Shin Chae-ho)正式服役。2022 年 8 月，该级潜艇首艇“岛山安昌浩”号完成首次作战部署。该级潜艇是韩国有史以来建造的最大潜艇，长 83.5 米，宽

9.6 米，水下排水量约 3750 吨，至少可搭载 6 枚潜射弹道导弹，同时还装备了水雷、鱼雷等各式武器。

2）欧洲多国致力于推动常规动力潜艇更新换代

2022 年 2 月，意大利新一代 U212NFS 级常规动力潜艇正式进入生产阶段。该级潜艇为德国蒂森克虏伯海事系统公司(Thyssenkrupp Marine Systems)与意大利合建的 U212A 型潜艇的改进型，动力更强大，平台更安静。此外，该级潜艇将使用意大利国防部(Ministero della Difesa)牵头研发的锂离子蓄电池系统，此举将使意大利成为继日本、韩国之后世界上第 3 个在常规动力潜艇上采用锂离子电池的国家。

2022 年 4 月，荷兰国防部(Ministerie van Defensie)宣布，将为“海象”级(Walrus)常规动力潜艇启动第二轮升级计划，以帮助该级潜艇服役至 21 世纪 30 年代中期。该级潜艇长 68 米，宽 8.4 米，水下排水量约 2650 吨，是北约成员国海军中为数不多具备远洋航行能力的常规动力潜艇。相关分析认为，升级后的“海象”级潜艇将继续成为荷兰未来水下作战的主要力量。

2022 年 7 月，瑞典正式开启新一代 A26 型常规动力舰艇首艇“布雷金格”号(Blekinge)的建造工作。该级潜艇长 66 米，宽 6.75 米，标准排水量约 1950 吨，能够在水下连续航行 18 天，同时还可以布放无人潜航器。此外，该级潜艇还面向国际市场推出了其他两个版本，分别为标准排水量约 1000 吨

的 A26 缩小型和标准排水量约 3000 吨的 A26 增程型。

4.特种潜艇战略地位不断提升，俄罗斯取得重要进展

2022 年 7 月，俄罗斯北方造船厂通报称，用于搭载“波塞冬”核动力无人潜航器的“别尔哥罗德”号(Belgorod)特种核潜艇已正式交付俄罗斯海军。该艇长 184 米，宽 15 米，排水量约 30000 吨，是有史以来最大的核潜艇之一。其搭载的“波塞冬”核动力无人潜航器能够在敌国海岸线引爆，在引发大型海啸的同时，造成大面积放射性污染。根据现行的俄罗斯国家军备计划，到 2027 年，俄罗斯海军共计划建造 3 艘该型特种核潜艇。

2022 年 6 月，美国海军海豹突击队公布新型 MK11“海豹输送艇”(Seal Delivery Vehicle, SDV)。该型输送艇是一款小型特种潜艇，可以运送一小队装备精良的海豹突击队员，执行渗透、侦察、直接行动和其他两栖作战任务，将取代自 20 世纪 80 年代开始服役的 MK8“海豹输送艇”，并可能会部署在南海等重点海域。

2022 年 8 月，阿联酋高地系统公司(Highland Systems)推出了一型电驱动新概念潜艇“克洛诺斯”(Kronos)，可用于商业、救援和作战行动。受巨型蝠鲼和航天器的启发，该艇采用独特的船体设计，具有高性能、高效率，并能够显著降低能源成本。该艇长约 9 米，最大工作深度为 250 米，最高航速达 27 节，可配备 6 枚小型鱼雷，用以打击舰艇和港口基地。

（三）水面舰艇

1.美国重点推进新一代驱逐舰计划，并为现役驱逐舰升级武器系统

2022 年 7 月，美国海军将下一代驱逐舰 DDG(X)的设计工程合同授予亨廷顿·英格尔斯工业和巴斯钢铁造船厂(Bath Iron Works, BIW)，两家公司将向美国海军提供初步设计方案。早前，美国海军曾展出 DDG(X)的初步概念设计草案，分为基线版本和未来版本。其中，基线版本将沿用“朱姆沃尔特”级驱逐舰的部分设计，包括动力系统等，未来版本则将多处采用全新设计。

2022 年 10 月，美国海军为“阿利·伯克”级驱逐舰“普雷贝尔”号(Preble)列装了首套 60 千瓦的“高能激光武器”(HELIOS)，该武器系统射程约 8.05 千米，可用于摧毁小型船只、无人机和导弹等多种目标。2022 年 11 月，美国海军相关负责人表示，美国海军将于 2023 年 10 月开始为“朱姆沃尔特”级驱逐舰升级高超声速武器，整体工作预计于 2025 年完成。

2.世界主要国家大力发展海军护卫舰，整体研建水平获得进一步提升

1）美国、俄罗斯稳步推进护卫舰研建项目

2022 年 3 月，俄罗斯开始对自 2014 年以来一直处于大修状态的 11540 型“不惧”级(Neustrashimyy)护卫舰“不惧”号

进行验收试验。2022 年 4 月，俄罗斯阿穆尔造船厂(Amur Shipbuilding Plant)宣布，20380 型“守护”级(Steregushchiy)轻型护卫舰“尖锐”号(Rezkiy)已开始海试。2022 年 7 月，该造船厂为 20385 型“轰鸣”级(Gremyashchiy)轻型护卫舰“敏捷”号(Bystriy)举行龙骨铺设仪式。

2022 年 8 月，美国海军首艘“星座”级(Constellation)护卫舰在意大利分坎蒂尼公司(Cantieri Capelli)下属造船厂开工建造，预计于 2026 年交付。该级护卫舰将采用改良的欧洲多用途护卫舰(Fregates Europeennes Multi-Missions, FREMM)设计，长 151 米，宽 19 米，满载排水量约 7300 吨，具备较高的杀伤力和生存能力，能够为舰队指挥官提供多种选择。

2）日本、韩国相继下水或服役多艘护卫舰

2022 年 3 月，韩国现代重工为韩国海军建造的“大邱”级(Daegu)护卫舰 8 号舰“春川”号(Chuncheon)下水。该级护卫舰搭载了韩国自主研发的垂直发射系统，是韩国海军最新锐主战舰艇之一。根据计划，“春川”号护卫舰计划于 2023 年年底建造完成，届时将交付韩国海军进行实战部署。

2022 年 3 月，日本海上自卫队“最上”级(Mogami)护卫舰 2 号舰“熊野”号(Kumano)正式服役。2022 年 4 月，该级护卫舰首舰“最上”号正式服役。2022 年 6 月，该级护卫舰 5 号舰“矢矧”号(Yahagi)在三菱重工旗下造船厂举行下水仪式。“最上”级护卫舰长 130 米，宽 16 米，满载排水量约 5500

吨，是日本海上自卫队现役最新型多功能隐身护卫舰。

3）欧洲多国同步推进护卫舰新研与升级工作

2022 年 1 月，德国海军将第 4 艘“巴登-符腾堡”级(Baden-Württemberg)“莱茵兰 •普法尔茨”号(Rheinland-Pfalz)编入第四护卫舰中队，完成了该级护卫舰中队的更新计划。该级护卫舰长 150 米，宽 18.8 米，能够对 100 千米以外的目标实施精确打击，同时可在海上驻留长达两年时间，能够大幅提高德国海军执行海上任务的能力。

2022 年 2 月，法国海军集团宣布对配备了改进型防空系统的“洛林”号(Lorraine)“欧洲多用途护卫舰”进行首次海上试验，以测试其舰艇推进系统与导航系统的性能。该舰是法国海军建造的第 8 艘，同时也是最后 1 艘“欧洲多用途护卫舰”，此次海试是其最终交付前的重要一步。

2022 年 4 月，西班牙纳凡蒂亚造船厂(Navantia)开始为西班牙海军建造首艘“博尼法兹”级(Bonifaz)多功能护卫舰，计划于 2027 年交付。该级护卫舰采用了多项先进技术，具有防空、反舰和反潜能力，可以执行部队保护和海军力量投送任务，未来将取代西班牙现役“圣玛利亚”级(Santa Maria)护卫舰。

2022 年 5 月，英国巴布科克公司(Babcock International Group Plc)为 31 型护卫舰首舰“冒险者”号(Venturer)举行了龙骨铺设仪式，标志该型护卫舰项目取得重要进展。根据计划，英

国将建造 5 艘该型护卫舰，每艘价值约 2.5 亿英镑。相关分析认为，该型护卫舰未来将在以“伊丽莎白女王”级(Queen Elizabeth)航母为核心的战斗群中发挥重要作用。

3.反潜舰与潜水巡逻舰仍为俄罗斯海军重点发展领域

2022 年 2 月，俄罗斯红宝石海洋机械中央设计局表示，该设计局已成功研发出改进型“守卫者”级(Boss)潜水巡逻艇。相比此前型号，改进型潜水巡逻艇尺寸更大，武器装备更强。2022 年 2 月，俄罗斯宣布将为“斯特拉兹”级(Sentinel)潜水巡逻艇装备“锆石”高超声速导弹、“缟玛瑙”(Oniks)反舰导弹及“口径”巡航导弹，以提升该级潜水巡逻艇的打击能力。

2022 年 8 月，俄罗斯海军发布消息，1155 型“无畏”级(Udaloy)反潜舰“列夫琴科海军上将”号(Admiral Levchenko)将重返俄罗斯海军。该舰始建于 1982 年，近年来进行了一系列现代化改造。2022 年 8 月，俄罗斯国防部(The Ministry of Defence of the Russian Federation, MO)批准了“无畏”级升级版反潜舰“恰巴年科海军上将”号(Admiral Chabanenko)的现代化改造计划。未来，两艘舰艇均将有望成为能够对抗航母编队的强大远洋作战单元。

4.小型水面舰艇开发热度持续高涨，各型装备层出不穷

2022 年 6 月，美国海军接收首艘新一代“气垫登陆艇”(The Landing Craft Air Cushion, LCAC)。该型登陆艇采用了与先前型

号相似的配置、尺寸和内部空间，能够确保与现有两栖舰艇的兼容性，同时配备了新型计算机控制装置与大功率发动机，服役后将有助于满足美国海军分布式海上作战(Distributed Maritime Operation, DMO)的战略需求。

2022 年 8 月，伊朗新型“沙希德·苏莱曼尼”级(Shahid Soleimani)双体舰正式进入伊斯兰革命卫队海军服役。该级舰艇长约 65 米，标准排水量约 600 吨，同时采用了高双船体结构，能够在双船体之间隐藏两艘或更多的武装快艇，并使空中力量难以发现。此外，相比单体船或传统双体船，该级双体舰还能够更好地应对恶劣天气。

2022 年 8 月，俄罗斯海军 21631 型“暴徒-M”级(Buyan-M)小型导弹舰“冰雹”号(Grayvoron)开始海试。该舰长 75 米，宽 11 米，标准排水量约 950 吨，最高航速达 26 节，配备有多管火箭炮、防空导弹等武器，能够发射“缟玛瑙”反舰导弹和“口径”巡航导弹。该级导弹舰虽然吨位较小，但具有较强的打击能力，是目前俄罗斯海军的主要装备之一。

（四）无人装备

1.无人水面艇继续向着大型化、系列化、实战化方向发展

1）美国聚焦无人水面艇的实战化应用

2022 年 1 月，美国海军水面作战中心(Naval Surface Warfare Center, NSWC)完成了新型无人扫雷艇的水下爆炸冲击测试。

该型无人艇能够通过发射器的输出来生成声源及电磁场，并以此来引爆水雷。2022 年 6 月，美国海军派出另外 4 艘无人水面艇参加了“环太平洋 2022”军事演习，意在收集舰艇数据，促进无人水面艇更好地融入舰队作战。

2022 年 1 月，美国海军发布《水面战：竞争利刃》(Surface Warfare: The Competitive Edge)，对未来 10 年美国海军水面作战部队发展作出规划，明确提出将加速部署无人舰艇。2022 年 2 月，美国海军接收 4 艘“幽灵舰队”无人水面艇，进一步扩大了无人舰队规模。2022 年 8 月，美国开展大型无人水面艇概念设计，并开始推进“无人值守舰船”项目第二阶段的研发工作。

2）俄罗斯、土耳其在无人水面艇领域取得重要进展

2022 年 1 月，俄媒报道称俄罗斯正在研制一种无人艇，其主要任务是自主搜索并摧毁敌方潜艇。该型无人艇长 14 米，最大航速超过 35 节，可承受 6 级海浪，能够在不补充燃料的情况下连续航行 3 天以上，既能自主行动，也能由几名乘员操控，还能由岸上或运载船上的操作人员远程控制。

2022 年 1 月，土耳其向欧洲出口“乌拉克”武装无人水面艇，专用于保护海军基地，目前该型无人艇已完成对面打击能力验收试验。2022 年 10 月，土耳其相关官员表示，土耳其正在研发具有电子战能力的“马林鱼”(Marlin)无人水面艇，该型无人艇长 15 米，可执行情报搜集、监控、侦察和非对称

作战等多种任务。2022 年 11 月，土耳其国防工业局(Defence Industry Agency)公布新型无人水面艇，主要将用于反潜作战，同时还能够执行搜索和救援行动。

2.世界主要国家持续加大研发投入，无人潜航器的自主性、可靠性不断提升

1）美国引领超大型无人潜航器技术发展

2022 年 2 月，美国海军首次公布“蛇头”超大型无人潜航器。该型潜航器能够携带多任务载荷，并能够从潜艇和水面舰艇等多型平台进行部署，具备强大的任务执行能力。2022 年 8 月，美国海军利用“蛇头”超大型无人潜航器原型成功演示了端到端作战环境情报战备任务(End-to-end Intelligence Preparation of the Operational Environment, IPOE)。

2022 年 6 月，美国海军开始对“虎鲸”超大型无人潜航器进行水下布雷测试。该型潜航器能够容纳多单元水听器阵列、反水雷任务包与通信装置等任务模块，同时可搭载其他小型无人潜航器、反舰导弹、鱼雷和水雷等各式装备，具备强大的水下作战能力。2022 年 7 月，波音公司开始为“虎鲸”超大型无人潜航器集成有效载荷传输系统(Payload Delivery System)。

2）其他主要国家相继推出多型先进无人潜航器

2022 年 3 月，挪威康斯伯格海事公司(Kongsberg Maritime)最新型“休金”(Hugin)系列无人潜航器下水。该型潜航器长

不到 4 米，采用了传统的碳纤维外壳和低阻力流线外形，能够在 1000 米水深作业超过 24 小时。同时，该型潜航器可以对无人水面艇、小型水面舰艇及岸上设施进行布放回收，用以执行海底环境调查评估、反水雷及关键国家基础设施检查等多种任务。

2022 年 5 月，加拿大 Cellula Robotics 公司表示，该公司正在开发名为“海狼”的新一代超大型无人潜航器。该型潜航器以现有的 Solus-LR 无人潜航器为基础，长 12 米，宽 1.7 米，配备了两个容积为2500升的模块化载荷舱，任务航程达5000千米。根据计划，“海狼”超大型无人潜航器演示任务将于 2023 年在澳大利亚进行。

2022 年 8 月，俄罗斯红宝石海洋机械中央设计局在“军队-2022”防务展上展出了最新型“替代者-Ⅴ”（Surrogate-Ⅴ）无人潜航器，并首次公布了其性能参数。该型潜航器水下排水量约 40 吨，能够与潜艇展开联合行动，通过模拟潜艇声学特性来欺骗敌军潜艇。此外，该型潜航器采用了新款锂离子电池，能够在载运船内和底部充电站充电，续航里程约 1300 千米。

（五）水中兵器

1.多国持续推进弹道导弹研建与部署工作

2022 年 4 月，韩国海军“岛山安昌浩”号常规动力潜艇在黄

海沿岸连续试射了两枚潜射弹道导弹，发射间隔 20 秒。两枚导弹在飞行约 400 千米后，成功命中海上预定目标。韩联社表示，此次导弹试射标志着韩国潜射弹道导弹有望尽快实现作战部署。

2022 年 9 月，俄罗斯马克耶夫国家火箭中心(Makeyev Rocket Design Bureau)总设计师表示，该中心正在开展用于核潜艇的未来弹道导弹研究工作。此前，该中心曾研发了“深蓝”(Sineva)和“班轮”(Liner)潜射洲际弹道导弹，这些导弹系统如今构成了俄罗斯海基核力量的基础。该设计师表示，对未来导弹系统的开发将可确保俄罗斯在未来数 10 年内所需的国防能力。

2022 年 10 月，印度海军成功从一艘国产核动力潜艇上发射了一枚弹道导弹。此次核威慑能力试验凸显出印度在国产军事装备方面取得的进展，也使其成为世界上继美国、俄罗斯、中国、法国和英国之后，第 6 个在陆地、海上和空中都拥有核打击和反击能力的国家。

2022 年 11 月，美国洛克希德·马丁公司获得了美国海军战略系统计划办公室(Navy Strategic Systems Programs Office)授予的总价约 5.8 亿美元的订单，用以建造更多的“三叉戟 II D5”(Trident II D5)潜射弹道导弹，并支撑该型导弹的核弹头部署系统。2.鱼雷重型化趋势越发明显，发射方式不断演进

2022 年 3 月，土耳其海军在“普鲁维兹”号(Preveze)攻击型

潜艇上成功试射了新一代潜射重型鱼雷“阿卡亚”(AKYA)。该型鱼雷配备了主动/被动声呐，能够打击 50 千米范围内的敌方潜艇与水面舰艇，速度达 45 节，具有速度快、射程远及自主性高等特点。

2022 年 3 月，英国海军宣布，“矛鱼”(Spearfish)Mod 1 型潜射重型鱼雷已形成初始作战能力。该型鱼雷由英国 BAE 系统公司在“矛鱼”初始型号的基础上开发而来，拥有全新的弹头和更安全的燃料系统。此外，该型鱼雷能够与潜艇、先进电子指挥系统的光纤制导系统相连接，因而具备更高的精准度和杀伤力。

2022 年 5 月，韩国国防技术与质量局(The Defense Agency of Technology and Quality, DTAQ)宣布，韩国海军先后两次对“虎鲨”(Tiger Shark)重型鱼雷进行了质量认证试射，均成功命中目标。该型鱼雷是继“白鲨”(White Shark)之后，韩国自主设计生产的新一代重型鱼雷，射程、速度和探测等技术指标均有所提高，对该型鱼雷的研建进一步验证了韩国自主设计生产重型鱼雷的能力。

2022 年 8 月，美国海军海上系统司令部(Naval Sea Systems Command, NAVSEA)授予波音公司一份价值 2560 万美元的合同，为 MK54 反潜鱼雷开发滑翔翼组件，使其具备空中滑翔飞行和制导功能。根据计划，该型鱼雷将在入水前滑翔 7～10 分钟后到达正常投放的高度和位置，随即打开滑翔伞潜入

水中，之后再执行搜索、跟踪和攻击敌方潜艇等任务。

（六）舰载武器

1.各国相继推出多型舰载反舰导弹，未来舰艇战场生存环境日趋严峻

2022 年 2 月，法国武器装备总署与欧洲导弹集团(MBDA Missile Systems)正式启动“未来巡航/反舰武器”(The Future Cruise/Anti-Ship Weapon, FC/ASW)开发项目，旨在替换法国与英国现役的“飞鱼”(Exocet)和“鱼叉”(Harpoon)反舰导弹。新型导弹将与法国海军“席尔瓦”(Sylver)垂直发射系统及英国海军 Mk41 垂直发射系统相兼容。

2022 年 8 月，以色列海军成功测试“加百利 5 号”(Gabriel 5)远程反舰导弹。该型导弹能够在多种海空条件下飞行数百千米，能够有效摧毁敌对目标并防御广泛威胁，是以色列海上防御领域的又一重要技术突破。在此次试射中，该型远程反舰导弹从“萨尔 6”级(Sa'ar 6)护卫舰上发射，成功摧毁了一艘目标靶船。

2022 年 8 月，日本政府和执政党多位有关人士透露，日本将提前部署原定于 2026 年后服役的改良款 12 式反舰导弹。该型反舰导弹由日本陆上自卫队的 12 式反舰导弹改进而来，射程目标为 900～1500 千米。现阶段，日本对该型导弹采用了所谓的“敏捷开发”方式，使其在开发完成前就具备一定

的性能，从而能够让其海上自卫队尽早部署该型导弹。

2.美国加速研发定向能武器，整体技术水平处在世界前列

2022 年 2 月，美国海军水面作战中心表示，该中心正在研究一款新型“高功率微波”(The High-Power Microwave, HPM)武器。该型武器能够发射极强的电磁能量，以破坏或禁用敌舰的关键部件，包括各型电子设备、舰载无人机和导弹等。同时，该型武器对人体基本没有伤害，属于非致命性武器。

2022 年 4 月，美国海军研究办公室使用分层激光防御武器系统(Layered Laser Defense, LLD)摧毁了一架高速飞行的无人机目标，这是该型武器系统继跟踪或摧毁了无人固定翼飞行器、四轴飞行器之后的另一次历史性试验。该型武器系统由洛克希德·马丁公司研制，能够摧毁无人机系统、快速攻击艇，并能够使用高倍率变焦透镜对付空中威胁。

2022 年 10 月，美国海军与空军对高功率联合电磁非动能打击武器(The High-Powered Joint Electromagnetic Non-Kinetic Strike, HIJENKS)进行了联合测试。该型武器通过微波技术阻断电子系统，能够破坏、降级或摧毁敌方的“指挥、控制、通信、计算机、情报”系统(Command Control Communication Computer Intelligence Surveillance Reconnaissance System, C4ISR)，增强己方电子战和网络作战能力，具有非动能、低附带伤害等特点，未来或将集成到美国航母系统当中。

三、极地考察与开发

随着气候加速变暖及科学技术水平迅速提升，开发利用极地特别是北极的可能性上升，北极在经济、军事及能源等领域的价值逐步凸显。近年来，围绕北极这一新疆域的竞争日趋激烈，世界主要国家加强谋篇布局，目的是在未来北极资源开发、航道建设等领域赢得主导权。2022 年，世界局势发生了深刻的变化，俄乌冲突的外溢效应引发北极地区局势紧张，美俄北极博弈持续升级。受北极大国竞争和俄乌冲突双重因素影响，各国北极政策作出重要调整，目的是在越发复杂的形势下更好地维护本国北极利益。同时，主要国家继续推动北极装备发展、北极航道建设和北极资源开发等工作，以期进一步提升北极实力。

（一）世界主要国家发布新版极地战略，统筹规划极地事务发展

1.美国发布新版北极战略，阐述未来 10 年在北极地区的主要目标任务

2022 年 10 月，美国白宫发布新版《北极地区国家战略》。新版北极战略从北极形势判断、北极愿景确定和北极任务制定三个方面，对未来 10 年美国的北极战略进行了详细描述，重点聚焦安全、气候变化、经济发展和国际合作四个方面内容。此次发布的新版北极战略有两个值得关注的趋势：一是

着重渲染北极“军事威胁”，或将对地区安全稳定带来更大挑战。新版北极战略表示，过去 10 年，北极地区的战略竞争日益激烈，而俄罗斯等国的北极军事部署更加剧了这种竞争。为更好地应对北极大国竞争，美国将进一步强化北极军事存在，如扩充破冰船队、定期开展军事演习及加强基础设施建设等。二是重视强化以美国为主导的北极国际治理体系，稳抓北极事务主导权。新版北极战略指出，美国将积极发展新的多边或双边北极国际合作机制，或将对北极事务制定新机制与新规则，以期牢牢掌握北极事务主导权。

2.法国发布首个极地战略，聚焦极地气候与地缘政治平衡

2022 年 4 月，法国政府发布首个极地战略报告《平衡极端：面向 2030 年的法国极地战略》(Equilibrium in Extremes: France's 2030 Polar Strategy)，明确两极地区的主要战略目标。该目标包含两层含义：一是应对气候变暖给两极地区带来的影响。当前，两极地区气候变暖速度比全球其他地区更为迅猛，因此确保两极地区的气候平衡对应对全球气候变暖具有重要意义。二是应对两极地区愈演愈烈的地缘政治竞争。近年来，两极地区地缘政治竞争愈演愈烈，尤其是俄罗斯作为两极地区的重要参与者，其与乌克兰的冲突为两极地区未来局势带来了不确定性。为更好地应对极地气候变暖和地缘政治竞争对法国极地研究带来的挑战，法国将在未来投入巨额资金。这些资金将用于新建一个科学考察站、建设北极浮动

极地站、开展南极科考及建造 1 艘破冰船。值得注意的是，法国新版极地战略将中国视为“极地强国”，暗指“中国在北极地区的投资与经济活动可能影响环境”，表明法国对中国参与两极事务总体呈戒备心态。

3.英国发布新北极战略报告，高度重视英国北极国防安全利益

2022 年 3 月，英国国防部发布《英国在北极的防务贡献报告》(The UK's Defence Contribution in the High North)。该报告以英国政府 2018 年发布的《超越冰雪：英国的北极政策》(Beyond the Ice: UK Policy towards the Arctic)和 2021 年发布的《竞争时代的全球英国：安全、国防、发展与外交政策综合评估》(Global Britain in a Competitive Age: The Integrated Review of Security, Defence, Development and Foreign Policy)为指导，重点聚焦北极国防安全能力建设。报告指出，近年来北极大国竞争日益激烈，对北极安全态势构成严重威胁。为维护北极地区稳定安全，英国国防部确立了四项政策目标：一是保护英国和盟友在北极地区的关键基础设施；二是确保在北冰洋及周边海域的航行自由；三是维护以《联合国海洋法公约》(United Nations Convention on the Law of the Sea, UNCLOS)为核心的国际体系；四是抵制“恶意竞争和破坏稳定的行为”。未来，英国计划采取四个方面的措施：一是加深对北极地区发展变化及相关行为体活动的认识；二是通过多边和双边渠

道与盟友伙伴加强合作；三是保持并增强北极地区军事存在；四是建设可持续、现代化的防务能力。总体来看，此次英国发布的北极战略报告体现出英国政府对北极国防安全利益的高度重视，将对其未来北极军事力量部署提供有力的政策支撑。

4.印度发布新版北极战略文件，将北极事务纳入全球战略布局

2022 年 3 月，印度地球科学部(Ministry of Earth Sciences, MOES)发布《印度与北极：建立可持续发展伙伴关系》战略文件，明确了印度北极战略的六大目标。一是提升在北极科研、气候环境保护和国际合作方面的能力；二是加强政府、企业和学术界的合作；三是加强北极气候变化对印度气候、经济和能源安全影响的研究；四是分析预测北极冰层融化对印度乃至全球航线、能源安全和矿产资源开发的影响；五是积极参加各种北极论坛，深化与相关国家的合作；六是加大北极事务参与力度，提高印度北极地区治理能力。为实现上述战略目标，印度将建造一艘极地考察船，增加北极科考的深度和广度。此外，印度还计划将现有观测地球的系列卫星用于北极地区，将区域导航卫星系统用于确保北极的海上航行。印度此次发布新版北极战略文件意味着，随着北极地区战略地位的日益凸显，该地区已成为印度全球战略布局中的重点领域之一。未来，在该战略指引下，印度将多方面提升

北极实力，进一步强化在北极存在。

（二）极地装备与技术成为各国推进极地战略的重要依托

1.俄美加等国重视推进极地船舶研建，为北极活动提供重要支撑

俄罗斯致力于巩固极地船舶领先优势，以支撑其北极科考与北极航道开发等活动。在极地科考平台建设方面，俄罗斯推出可在北极地区开展全年研究的耐冰自行式平台。2022 年 9 月，俄罗斯“北极”号(Arktika)耐冰平台首航。该平台全长 83.1 米，宽 22.5 米，排水量约 10390 吨，是当前全球唯一可在北极恶劣环境中全年工作的大型抗冰自行式科学研究平台，不需要破冰船即可在冰中移动，并可起降多用途直升机，能够支持进行地质学、声学、地球物理学研究。在破冰船研建方面，俄罗斯持续扩充破冰船队规模，进一步强化其在破冰船领域的绝对领先优势。2022 年 10 月，俄罗斯 22220 型核动力破冰船“乌拉尔”号(Ural)开始海上试航。22220 型核动力破冰船是目前全球最大、动力最强的破冰船，长 173.3 米，排水量 33500 吨，采用 2 台 175 兆瓦的核反应堆，功率约 81600 马力，最大破冰厚度 3 米，主要任务是开发北极航道的运输潜力。“乌拉尔”号是波罗的海造船厂(Baltic Shipyard)建造的第 3 艘 22220 型核动力破冰船，前两艘“北极”号和“西伯利亚”号分别于 2020 年 10 月和 2021 年 12 月正式交

付。此外，俄罗斯还有两艘 22220 型破冰船在建，分别为“雅库特”号(Yakutia)和“楚科奇”号(Chukchi)。除 22220 型破冰船外，俄罗斯还正在建造 10510 型核动力破冰船。该型破冰船将是全球首艘能够常年在北极航道引导载重量超过 10 万吨、宽度超过 50 米的大型运输船的破冰船，可在一定程度上保障北极航道的畅通。

美国加速组建破冰船队，以弥补“破冰船缺口”。美国当前破冰船数量、破冰能力与俄罗斯相差较大，只有一艘已服役 44 年的“极地星”号(Polar Star)破冰船，进入极地能力严重不足。鉴于俄罗斯近年来在北极地区越发频繁的军事活动所带来的压力，美国于 2021 年启动重型破冰船研建工作。2022 年，美国重型破冰船研建取得阶段性进展。2022 年 1 月，美国海岸警卫队下单订造第 2 艘重型破冰船。该型破冰船长 104.2 米，宽 26.8 米，满载排水量 33000 吨，采用柴电混合驱动，可破 2 米厚冰层。2022 年 5 月，美国海岸警卫队宣布，其新的重型破冰船将安装舰载武器，这是继去年宣布新船设计保留武器模块化接口之后的进一步动作。未来，新重型破冰船陆续下水服役，美国北极破冰航行能力将进一步提升。

加拿大接收多艘北极近海巡逻舰，以支撑其北极军事活动。2022 年 9 月，加拿大海军接收第 3 艘“哈里·德沃尔夫”级(Harry DeWolf)北极近海巡逻舰“马克斯·伯奈斯”号(Max Bernays)，以支持加拿大在北极地区的监视任务。2022 年 11

月，加拿大海军举行了第 2 艘“哈利·德沃尔夫”级北极近海巡逻舰“玛格丽特·布鲁克”号(Margaret Brooke)的服役仪式。“哈里·德沃尔夫”级巡逻舰长 103 米，宽 19 米，排水量 6615 吨，舰艏采用破冰设计，舰尾有直升机甲板和单机库，并配有大型吊具。该级巡逻舰自动化程度较高，主要任务是对包括北极在内的加拿大水域进行武装监视，提供态势感知，以及与加拿大武装部队合作维护和行使加拿大国家主权。根据加拿大《北极近海巡逻舰方案》(Arctic Offshore Patrol Ship, AOPS)及后续补充条款，加拿大共计划建造 8 艘同级舰，其中 6 艘用于海军，两艘归属海岸警卫队。

2.北极国家探索提升北极地区通信能力

美国探索商业卫星应用于北极通信的可能性。2022 年 5 月，美国北方司令部司令格伦·范赫尔克(Glen VanHerck)宣布，美国军方将于一年内对商业卫星和军事卫星联网用于战术和战略通信进行技术测试。此次测试是为北极地区通信寻找更多可能性。美国军方认为，OneWeb 和 SpaceX 公司部署的低轨星座，可以用于增强北极地区通信能力。2022 年 9 月，美国太空军称正在阿拉斯加建设新的卫星地面站，并宣布计划于 2023 年发射两个新的增强型极地系统重组(Enhanced Polar System Reorganization, EPS-R)有效载荷。EPS-R 是超高频扩展数据速率有效载荷，将为美军在北极地区作战提供安全通信服务。

俄罗斯打造覆盖北极地区的卫星星座。2022 年 8 月，俄罗斯发布的《2035 年前北方海航道开发计划》显示，俄罗斯将在 2026 年年底前将 4 枚用于北极互联网接入的“快车-RV”卫星送入高椭圆轨道。此外，值得关注的是，2022 年 10 月，俄罗斯将“球体”卫星星座的首颗卫星“斯基泰人-D”和 3 颗“信使-M”卫星顺利送入预定轨道。“球体”卫星星座包含运行在不同高度的多种卫星，具备卫星通信服务、对地观测等不同功能，可使俄罗斯拥有最现代化的太空通信和监控系统。“球体”卫星星座运行轨道高度高于星链，且主要服务对象集中在俄罗斯附近，因此仅需 288 颗卫星就可以为俄罗斯周边，尤其是地面通信设施稀少的北极航道沿线提供宽带互联网接入和通信服务。

加拿大增加预算提升北极通信能力。2022 年 4 月，加拿大公布 2022 财年预算，其中计划拨款 2.52 亿加元（约合 1.84 亿美元）用于北极监视项目，包括升级北方预警系统和研发远程通信、超视距雷达系统等。2022 年 8 月，加拿大空军重组了一个新的太空部门，其主要职责是推动其天基力量建设，并为加拿大及其盟友在北极地区的军事行动提供通信、指挥等一系列保障。该部门计划开展一个为北极地区提供可靠和安全通信的项目。该项目将致力于搭建窄带和宽带通信通道，与北约类似设备进行互通，计划于 2034 年运行，预算总额达 49 亿加元（约合 35.8 亿美元）。此外，加拿大还将于 2023

年启动国防太空监视计划(Defence Enhanced Surveillance from Space Project, DESSP)，对军用侦察及军民两用卫星星座进行大范围升级，以强化对北极地区及有关海域的监控，该卫星星座预计 2033 年形成初始能力。

3.主要国家构建北极动态监测能力

2022 年 6 月，加拿大政府宣布将加强太空资源和新兴技术的研发，以增强对北极地区的动态监测能力。加拿大将重点建设该国北极西北航道水域内的侦察预警能力。该航道是连通北美大陆东西海岸的黄金水道。在具体内容上，加拿大将升级位于北美防空司令部的指挥系统，特别是情报信息中枢。加拿大国防部(Department of National Defence)部长称，新兴技术除可增强海底光缆和太空通信的安全性、稳定性外，还可大幅提升系统中各类传感器间的响应速度。

2022 年 7 月，俄罗斯北极和南极研究所(The Russian Arctic and Antarctic Institute)所长亚历山大·马卡罗夫(Aleksandr Makarov)宣布，计划建立全球首个监测北极永久冻土的国家系统，该系统将于 2023 年启动。2022 年 10 月，俄罗斯国家技术倡议机构(National Technological Initiative, NTI)表示，俄罗斯将于 2026 年前创建对北极进行昼夜监测的卫星系统“眼环”(Oculus)。该项目研发人员安东·阿列克谢耶夫(Anton Aleksyev)表示，“眼环”是北极航道和北极地区的雷达卫星监测项目，能提供有关船只行驶和北极地区当前冰层状况的

即时数据，以支持未来几天的预测。目前，俄罗斯在轨道上没有类似系统。

2022 年 10 月，英国国家海洋学中心和挪威北极大学(The Arctic University of Norway)的研究人员通过卷积神经网络法(Convolutional Neural Networks, CNN)和人工智能技术(Artificial Intelligence, AI)来实现北极全年的海冰观测和预报。海冰会对北极航运构成威胁，了解和预测海冰的厚度和位置不仅可以降低北极航运风险，也可以更准确地预测未来气候变化。过去，卫星遥感可以测量冰层厚度，但无法区分正在融化的海冰和海水，因此这项技术只能在冬天海面全部结冰时有效应用。此次通过人工智能技术可实现北极全年海冰厚度和位置的观测，进而更好地预测未来气候变化。此外，研究人员正在开发一个新的卫星传感器模型，旨在提高对未来气候变化的长期预测能力。

（三）俄乌冲突对北极航道开发利用产生较大影响，俄罗斯加快开发北极航道

1.西方政治局势紧张，北极航道合作项目受阻

近年来，北极航道开发成为俄罗斯北极经济开发的核心支柱之一。2022 年，俄乌冲突导致俄罗斯与北极七国关系紧张，航道开发或因军事安全问题蒙上阴影。北极航道的利用率倚赖各国的贸易往来，但美西方国家对俄罗斯的制裁行为中断

了俄罗斯的资源出口和贸易往来，这将极大降低北极航道的运输需求，进一步迟滞北极航道及其沿线地区的开发进程。此外，北极航道合作项目也陷入停滞状态。2022 年 2 月以来，欧日韩等国家和地区对俄罗斯实施航运制裁。2022 年 3 月，全球排名第八的航运公司韩国现代商船(Hyundai Merchant Marine, HMM)宣布暂停俄罗斯远东航线相关业务，以响应美西方国家对俄罗斯实施的制裁措施。至此，全球前八大航运公司中已经有 6 家暂停俄罗斯航运业务。在欧日韩等国家和地区对俄罗斯实施航运制裁大背景下，可以预见，这些国家与俄罗斯在北极航道方面的相关合作项目也将受到阻碍。

2.俄罗斯加快北极航道开发，以应对美西方国家逐步升级的制裁

2022 年，在深受美西方国家大规模制裁背景下，俄罗斯进一步加大北极航道开发力度，一方面是为对冲俄乌冲突给北极航道开发利用带来的负面影响，另一方面是希望通过打通北极航道这一战略要道来冲破美西方国家日益升级的战略围堵。2022 年，俄罗斯主要从以下三个方面布局。

一是加强战略规划，继续从战略层面给予北极航道高度重视。2022 年 7 月，俄罗斯总统普京签署新版国家海洋战略。该战略文件将北极、大西洋、太平洋、里海、印度洋和南极共同划入事关国家安全和生存的关键区域。新版国家海洋战略专门明确了北极地区和北极航道的发展方向及优先事项，即加

强俄罗斯在包括大陆架在内的北极影响力，以及将北极航道运输走廊发展为具有全球竞争力的国家运输动脉。可以看出，俄新版国家海洋战略不仅给予了北极地区和北极航道高度关注，同时还落实到了具体任务目标上，足以体现出俄罗斯对该地区及该航道的重视程度。

二是加大资金投入，着力推进北极航道及沿线港口基础设施建设。2022 年 8 月，俄罗斯总理米哈伊尔 •米舒斯京签署《2035 年前北方海航道开发计划》，明确俄罗斯将继续建设北极航道这一具有重要意义的运输走廊，该计划包含 150 多个项目，涉及总金额近 1.8 万亿卢布（约合 231.1 亿美元）。根据计划，俄罗斯未来将着重发展以下领域：发展出口货物基地、沿海运输和过境运输，开通圣彼得堡、摩尔曼斯克和远东港口之间的定期沿海航线，并组建专门的集装箱运营商；升级改造现有北极港口并建设 12 个新港口；到 2035 年建造包括 12 艘破冰船和救援船在内的 153 艘船舶；建立并完善水文、医疗、卫星和应急等基础和人员保障设施；为北极航道运营企业开发配套信息和数字服务系统，用以预测船舶流量、气象情况和记录冰层数据等。

三是加强航道管控，多举措提升对北极航道控制力。2022 年，俄罗斯加强航道管控的措施主要体现在两方面。一方面，强化军事力量部署，保障北极航道安全。当前，俄罗斯正在组建北极舰队，以保护北极航道及其沿岸地区的安全，未来该

舰队将配备军舰和特种技术装备。另一方面，完善使用北极航道的相关法律制度。2022 年 8 月，俄罗斯国防部提议修改《俄罗斯联邦内水、领海和毗连区法》(Law on Internal Sea Waters, Territorial Sea and Contiguous Zone)的联邦法律。俄罗斯北极航道的现行航行规则仅适用于商业船只，不适用于具有主权豁免权的外国军舰和其他非商业目的船只。根据国防部的建议，拟在现行法律中补充一项条款，允许外国军舰和其他非商业目的船只进入北极航道内水（不进入港口或海军基地），但需要提前至少 90 天通过外交渠道申请许可。

（四）全球能源供需格局发生变化，围绕北极油气、矿产资源的竞争更加激烈

1.俄罗斯北极油气资源开发挑战与优势并存

在当前俄乌冲突持续背景下，欧盟对俄罗斯实施多轮制裁，包括禁止直接或间接向俄罗斯出售、供应、转让或出口天然气液化所需的货物和技术。面对西方制裁升级，俄罗斯北极 LNG 项目面临的阻力日渐增强。2022 年 3 月，法国道达尔能源宣布，不再为“北极-2”LNG 项目提供更多资金。“北极-2”是俄罗斯天然气生产商诺瓦泰克公司(Novatek)旗下北极 LNG 开发项目，共有 3 条 LNG 生产线，原计划分别在 2023 年、2024 年和 2025 年投产，产能均为 660 万吨/年，合计产能 1980 万吨/年。其中，道达尔能源、中国石油、中国海洋

石油有限公司和日本财团在该项目中各持股 10%。2022 年 4 月，诺瓦泰克表示，在当前形势下，该公司不能确定“北极-2”项目是否能按照先前宣布的日期投产。

同时，俄罗斯在北极地区发现大量石油，这将进一步夯实俄罗斯石油软实力价值根基。2022 年 7 月，俄罗斯石油公司宣布，该公司在俄罗斯西北部伯朝拉海(Pechora Sea)发现了大型石油矿藏，其资源储量相当于 8200 万吨石油。据称，该油田是在一次钻探活动中发现的，在此次钻探测试过程中，每天有最大流量为 220 立方米的石油可以自由流动，油是轻质、低硫且低黏度的。此外，俄罗斯石油公司还正在北极地区推进东方石油项目(Vostok)。该项目是全球最大的石油新项目，开采的石油具有从 0.01%～0.1%的独特低硫含量，质量优于布伦特原油和中东原油(Middle East Oil)。据俄罗斯石油称，东方石油项目预计在 2024 年开始生产。到 2033 年，该项目每年将生产多达 1.15 亿吨的石油，相当于俄罗斯 2021 年石油总产量的 20%。

2.欧盟支持挪威大力开采北极油气资源，以应对俄能源输出带来的冲击

2022 年，俄乌冲突及对俄制裁重塑了国际油气市场贸易格局，并对欧盟的油气供应、电力安全和关键资源供应链造成全面冲击。为应对俄罗斯能源输出带来的冲击，欧盟支持挪威大幅增加北极油气开发。2022 年 3 月，挪威政府批准增加约

500 亿立方英尺（约合 14 亿立方米）的天然气产量，主要来自北海塞伯格油田(Oseberg)和挪威海海特伦油田(Heidrun)。此外，挪威政府还在巴伦支海颁发了 12 个新的油气勘探许可证。北海、挪威海和巴伦支海是挪威的 3 个油气田聚集地。近年来，随着不断的开采，北海和挪威海的新增油气探明储量不断减少，巴伦支海开始走入挪威视线。根据挪威石油管理局(Oljedirektoratet)公布的数据，巴伦支海油气资源预估为 25.35 亿立方米油当量，而北海和挪威海合计仅有 14.65 亿立方米油当量。

3.美加通过北极格陵兰岛矿产资源强化本国稀土供应链

丹麦格陵兰岛处于北极圈内，矿产资源尤其是以重稀土元素为特色的稀土资源极其丰富。长期以来，由于气候寒冷、开发能力较弱，因此格陵兰岛矿产资源尚未大规模商业开发。近年来，随着全球变暖加剧，格陵兰岛的气候趋向温暖。同时，虽然格陵兰岛本地人口稀少、开发能力弱，但该地区丰富的矿产资源吸引了世界许多稀土使用大国的关注。2022 年，美英加等国加大力度开发格陵兰岛矿产资源，以期助力强化本国稀土供应链，减少对中国的依赖。2022 年 8 月，美国电池金属勘探公司科宝金属(Kobold Metals)和英国矿业巨头蓝鸦矿业(Bluejay Mining)共同合作，派遣 30 名地质学家、地球物理学家等相关人员前往格陵兰岛。美英两家公司希望获取更多的钴、镍、铜和锂等关键矿产资源，这些矿产资源是制

造电动汽车电池和储能电池所必需的稀有贵金属。2022 年 8 月，加拿大新性能材料公司(Neo Performance Materials)宣布，该公司购买了在丹麦格陵兰岛的采矿权，为稀土多元化供应开辟了新途径。新性能材料公司的目标是在未来 2～3 年内让该矿运转起来。可以预见，未来随着美英加等国进一步推动稀土供应链“去中国化”，各国将越发重视格陵兰岛稀土资源的开采与利用。

四、深海装备与技术

近年来，随着陆地、浅海资源的逐渐枯竭，深海资源的战略价值越发凸显，世界主要国家纷纷开展深海装备与技术研究，旨在全方位提升深海开发能力，抢占未来国际深海竞争制高点。2022 年，多国在深海装备与技术领域取得一系列重要进展，相继推出多型先进深海探测与资源开发装备，并持续深耕载人深潜、深海自主探测、水下供能、“超深水”油气开发等前沿技术领域，取得了多项关键性突破。

（一）深海探测装备与技术

1.中美两国在深海载人潜水器领域取得阶段性进展

2022 年 7 月，美国“阿尔文”号(Alvin)深海载人潜水器在大西洋波多黎各海沟成功下潜至 6453 米深，创造了其最大潜深纪录。“阿尔文”号于 1964 年由伍兹霍尔海洋研究所研

制并投入使用，设计初衷是用于国防军事，但实际上在深海科学研究领域也发挥了巨大作用。截至 2022 年 8 月，“阿尔文”号已成功完成 5086 次潜水，平均每年执行约 100 次深潜任务，超过了全球其他所有载人深潜器的深潜次数总和。2022 年 10 月，中国自主研发的深海载人潜水器“深海勇士”号返回三亚，成功完成了大深度原位科学实验站在海底的布设工作。“深海勇士”号是中国继“蛟龙”号之后的第二台深海载人潜水器，作业深度达 4500 米，关键部件国产化率达 91.3%，主要部件国产化率达 86.4%，是中国深海载人潜水器谱系化中的重要一员。在此次工作中，“奋斗者”号成功测试了中国科学院下属项目组研发的多型深海装备，以及国家重点研发计划相关项目的多项关键技术。同时，“深海勇士”号也在此次试验中完成了第 500 次下潜，深潜能力得到了充分验证。

2.世界主要国家相继推出多型自主潜水器，助力深海探测能力进一步提升

2022 年 4 月，美国安杜里尔工业公司推出一款名为“DIVE-LD”的新型自主潜水器，既可应用于军事目的，也可应用于深海科学探测、海洋牧场建设与维护、水下基础设施管理等方面。该型潜水器长约 5.8 米，宽约 1.2 米，重约 2.7 吨，其主体通过 3D 打印技术制造，成本低廉，整体外形类似中型潜艇，可独立航行 10 天，最大下潜深度达 6000 米。此外，该型潜

水器不仅能从船上施放，还可直接从岸边进行布放下水，而后控制其到达深海作业，具有较高的操作灵活性。

2022 年 5 月，西班牙海洋研究所(Institute of Oceanography, IEO)开始进行“Lander Pick”号自主潜水器的第三阶段测试工作。该潜水器最大工作深度为 3000 米，能够与配套的科考着陆器组成深海观测系统。其中，海底科考着陆器配备有多种先进传感器，可以采集温度、盐度、水流方向和速度等环境参数，并能够制作延时视频图像，实现海底长期观测。“Lander Pick”号的主要用途就是定位和回收长期部署于海底的科考着陆器。未来，该型潜水器还将在海底火山、峡谷等复杂环境开展进一步试验，以扩大科考着陆器的工作范围。

2022 年 7 月，英国国家海洋学中心开启新型自主潜水器“Auto Sub 5”的海试工作。该潜水器能够在 6000 米深的一般海域和 2000 米深的冰下海域进行作业，续航时间达 6 个月以上，能够携带温度、盐度和浮游植物丰度测量等一系列科学传感器，并能够通过卫星链实现水下与陆上数据互传。此外，该型潜水器还配备了最新的低能耗 3D 视觉测绘系统 BioCam，能够获取高分辨率彩色图像和高分辨率海底地形资料，未来将助力英国进一步提升深海探测能力。

2022 年 11 月，新加坡 Beex Autonomous Systems 公司研发的“Ikanbilis”号自主潜水器在德国北海风电场完成测试，并成功交付至德国 Nordsee One 公司。该潜水器具有人工智能驱

动的自主发动机，可自动适应潮汐、洋流和能见度的变化，并能够自主选择最安全、最有效的方式完成任务。同时，岸上人员能够通过其系统集成的云平台实时获取发电设备信息，大幅缩减相关分析报告所需的时间。此外，“Ikanbilis”号还能够优化风电设备的周期性水下检查工作流程，减少相关设备投入和人力成本，从而进一步提高海上风电项目的产能与安全性。

3.遥控潜水器热度不减，多项前沿技术发展迈入新阶段

2022 年 4 月，澳大利亚高级导航技术公司(Advanced Navigation)推出一款名为“Hydrus”的超小型遥控潜水器。该型潜水器可自主航行 3 小时，额定航速 4 节，最大航程 9000 米，最大工作深度 3000 米，能够进行自主避障、水下高度控制和图像质量控制等操作。同时，该型潜水器配有 4K 高清摄像机、动态照明和自动图像处理系统，能够确保视频画面的高清晰度。此外，通过内置的应用程序和操作界面，用户无须经过复杂的专业培训就可对该设备进行操作，有效解决了传统海洋勘探设备运行费用高、操作要求高等问题。

2022 年 7 月，美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)对升级后的“Okeanos Explorer”号科考船进行了海试，并尝试通过卫星信号在陆地远程操控船上搭载的潜水器。在此次测试中，研究人员在 2500 千米外的实验室内成功操控潜水器在水下 1800 米处执

行了水下航行、机械臂地质采样和实时影像采集等操作，影像延迟仅为 1.25 秒。NOAA 表示，通过卫星信号在陆地远程遥控操作潜水器能够节省作业成本，为科考船腾出宝贵的人员生活和设备作业空间，未来将成为深海探测领域新的发展方向之一。

2022 年 7 月，哈尔滨工程大学研发的国内首套海洋结构物水下无损检测机器人成功通过验收。海洋装备在经受长年累月海水侵蚀和风浪水流冲击等因素作用时，结构物形成的裂纹会导致构件断裂，对其进行周期性焊缝检测，可排查潜在安全隐患，对维护海洋装备运营安全十分必要。该机器人能够在遥控状态下完成水下 500 米处各类海洋结构物的无损检测，不仅能够避免人工潜水检测的安全风险，同时还能够提高检测效率，进一步降低运维成本，对于在该领域处于起步阶段的中国来说具有重大意义。

4.水下供能技术取得重要突破，新技术、新手段不断涌现

2022 年 1 月，德国基尔亥姆霍兹海洋研究中心联合德国陆军成功对一款新型燃料电池进行了海试。该型电池容量约为 120 千瓦时，最大输出功率 1 千瓦，工作效率是传统电池的 10 倍左右，未来将主要用于深海可移动装备供电，以更好地满足深海探测对装备长续航能力的要求。

2022 年 6 月，英国国家海洋学中心成功完成对“Boaty McBoatface”号自主潜水器长距离、长时间工作的测试，测

试重点是自主潜水器的长续航能力和数据接收能力。在为期5周的测试中，“Boaty McBoatface”号从英国普利茅斯港出发，行驶至爱尔兰南部的大陆架边缘后返回，总行程近2000千米，下潜最深处达1000米。此次测试成功验证了英国在自主潜航器水下供能领域的高技术水准。

2022年10月，美国地球空间技术公司(Geospace Technologies)推出一款名为“水手”(Mariner)的长续航浅水海底地震记录仪。该型地震仪长57.8厘米，宽17.8厘米，最深可布放在750米深的海底，连续记录数据长达70天，具有无线充电和数据下载等功能。其小巧的外形可有效节省勘探船的储存空间，从而提高地震记录仪器的搭载数量。此外，该型地震仪内部配置的航向传感器和全分辨率测试发生器还能够提高其在采集高保真数据过程中的安全性。

5.中国持续发展混合式潜水器与水下滑翔机

2022年6月，中国科学院沈阳自动化研究所研制的两台“海翼”1000-mini水下滑翔机在为期8天的连续观测任务中，实现对南海一中尺度涡旋边缘的精细水文测量，并顺利完成交付。该型水下滑翔机是面向基于多平台批量快速布放、提升海洋环境观测快速响应能力需求而研制的一款10千克级小型水下滑翔机，最大下潜深度为1000米。此次交付标志着中国在水下滑翔机实用化层面迈入了新的发展阶段。

2022年7月，中国海洋观测与探测联合实验室研制的“海燕

-X”号水下滑翔机完成综合科考任务，最大下潜深度达 10619 米，成功刷新了水下滑翔机下潜深度的世界纪录。该型水下滑翔机是“海燕”系列的大潜深型号，采用了超高压浮力精准驱动、轻型陶瓷复合耐压壳体和多传感协同控制等多种先进技术，是目前国际上唯一能够进行万米深海观测的水下滑翔机。在此次科考任务中，“海燕-X”共获得 45 个观测剖面，其中 3000 米级、6000 米级和 7000 米级剖面各 1 个，万米级剖面 3 个，充分验证了中国水下滑翔机技术的先进性和可靠性。

2022 年 8 月，中国科学院沈阳自动化研究所研制的“问海 1 号”6000 米级自主遥控水下机器人完成海上试验和科考应用。“问海 1 号”是面向海洋综合科考需求，定制开发的 6000 米级深海探测作业一体化的高技术海洋装备，在分类上属于混合式潜水器（Autonomous&Remotely Operated Vehicle，ARV），具备大范围自主巡航探测和定点精细遥控取样作业功能，拥有自主、遥控和混合“三合一”的多工作模式。未来，“问海 1 号”将服务于海洋环境调查、生物多样性调查、海底特定目标物探查、深海极端环境原位探测及深海矿产资源调查等多项深海科考工作。

（二）深海资源开发装备与技术

1.世界主要国家与国际组织加快完善深海资源开发框架

2022 年 2 月，法国国防部发布《海床控制战略》，其中重点强调了深海无人装备与深海矿产资源勘探的重要性。在该战略框架下，法国国防部将与法国武器装备总署及其他工业伙伴合作开发新型自主潜水器和遥控潜水器，并计划于 2023 年前完成产品原型以供相关测试。此外，该战略还将与法国海洋部(French Ministry of the Sea)制定的深海矿产资源勘探与开发战略相呼应。

2022 年 8 月，联合国国际海底管理局(The International Seabed Authority, ISA)被曝出正在制定深海采矿监管框架，以在 2027 年前向国际采矿企业颁发深海采矿许可证。该机构是依据《联合国海洋法公约》设立的联合国分支机构，主要负责国际海底区域及其资源的管理工作。近年来，随着国际市场对钴、锰和锂等矿产资源需求的增加，各大国际采矿公司纷纷加快深海采矿进程，ISA 此举将进一步推动深海采矿业的发展。

2.深海钻探技术深入发展，助力深海地学研究与资源勘探持续进步

2022 年 2 月，湖南科技大学研制的中国首台海底大孔深保压取芯钻机系统“海牛 II 号”开始执行新一轮的南海海底工程地质勘查任务。“海牛 II 号”是目前世界上唯一一台海底钻探深度大于 200 米的深海海底钻机，采用了水合物保压取芯原理、轻量化设计技术及海底复杂地层智能钻井系统等多项

先进技术，使得钻探效率、取芯质量及保压成功率显著提高。此外，“海牛Ⅱ号”钻机重量较国外同类钻机大幅减轻，显著降低了水下收放作业难度，能够进一步促进中国海底矿产资源勘探能力的提升。

2022 年 8 月，德国不来梅大学(University of Bremen)在测试水池中使用高压电源对“MeBo200”型海底钻机完成多项功能检测，并在 9 月开启其随“Maria S. Merian”号科考船进行的北大西洋 100 米深钻探任务。“MeBo200”是德国不来梅海底环境科学中心(Center for Marine Environmental Sciences, MARUM)研发的第二代海底钻机，高 6 米，重 10 吨，能够在 2700 米水深环境下进行作业，最大可钻取海底以下 200 米的沉积物和基岩岩心，综合技术水平处在世界前列。

2022 年 11 月，加拿大海洋地球物理岩土技术公司(PanGeo Subsea)推出一项名为声学测心(Accoustic Corer)的免钻探岩心勘测技术。该技术将声学数据与原有的岩土数据库相关联，从而推断出整个地层的岩土特性，同时可实现每秒收集超过 20000 个数据点，以构建一个直径约 12 米的高分辨率 3D 数字岩心。此外，该技术还能够穿透深度超过 40 米的地层来获取数据，并能够识别海底地层类型、判断潜在地质灾害，能够有效降低海上基础设施的施工风险。

3.美国、加拿大推出新型深海采矿装备

2022 年 5 月，加拿大金属公司(The Metals Company, TMC)宣

布，该公司研发的多金属结核采矿车成功完成技术测试。在此次测试中，新型采矿车随“Hidden Gem”号调查船前往大西洋海域，在水下 2470 米的海底行驶了 1018 米，成功验证了其耐低温、耐高压等各项技术指标。未来，TMC 公司还计划对该型采矿车进行立管组件和连接软管测试，并对其结核采矿系统进行全面调试，以全方位提高其深海采矿性能。

2022 年 8 月，美国自主潜水器科技研发公司 Impossible Mining 获得新一轮 1010 万美元种子资金，将用于加快海底采矿机器人的研发进程。根据该公司发布的公告，新研发的采矿机器人预计可在 6400 米水下进行作业。同时，其配备的图像传感器可识别和避开附着在结核矿产资源上的生物，有选择性地采集资源，尽量避免伤害深海生物，从而降低对环境影响。

4.深水油气开发继续向着“超深水”阶段迈进

2022 年 4 月，中国海洋石油集团有限公司建造的亚洲第一深水导管架“海基一号”在广东陆丰油田海域成功安装就位，系中国首次在近 300 米水深海域安装固定式导管架。“海基一号”总高度达 302 米，总重量达 30000 吨，采用了深水导管架整体设计、封舱隔板设计及数字孪生运维等 10 余项新技术。与往常的“水下生产系统+浮式生产平台”开发模式相比，“海基一号”更具经济性和安全性，能够大幅降低钻井、工程及后续的生产操作成本。此次安装也标志着中国超

大型深水导管架成套关键技术和安装能力达到了世界一流水平，对推动海上油气增储上产、保障国家能源安全具有重要战略意义。

2022 年 4 月，新加坡胜科海事公司(Sembcorp Marine)为全球首艘第八代超深水钻井船“Deepwater Atlas”号举行命名仪式。该钻井船是越洋公司(Transocean)在胜科海事公司订造的两艘第八代钻井船之一，市场原因，其建造成本从 2014 年签约时的单价 5.4 亿美元上涨到了近 9 亿美元。据越洋公司介绍，该型钻井船装备了 300 万磅（约合 1360 吨）吊钩负荷，是世界上能力最强、规格最高的钻井船。同时，该型钻井船还配备了全球首个 20000 Psi 的井控系统，能够有效减少燃料消耗及排放，从而最大限度地降低海工项目的碳排放量。

2022 年 11 月，意大利埃尼集团(Eni SpA)旗下的“Coral-Sul”号 FLNG 在莫桑比克完成首船 LNG 外运工作。“Coral-Sul”号长 432 米，重 22 万吨，工作水深超 2000 米，年设计产能超 330 万吨，集成了当今世界最前沿的深海 LNG 技术。该项目是世界上首个“超深水”FLNG 项目，同时也是世界第二大、非洲第一大 FLNG 项目。此次 LNG 外运标志着该项目正式实现全产业链运营，对于世界深水油气开发具有重大意义。

五、高技术船舶

高技术船舶具有技术复杂度高、附加值高等特点，是技术密

集、劳动密集和资金密集的船舶，主要包括节能环保的绿色船舶、无人驾驶的智能船舶及为海上运输、海上钻探作业提供服务和安全保障的特种船舶。在绿色船舶领域，2022 年，世界主要造船国家继续围绕内燃机、燃料电池等不同方向推进船舶动力形式变革，旨在满足国际海事组织(International Maritime Organization, IMO)2050 年碳中和要求。在智能船舶领域，2022 年，欧日韩等发达国家和地区继续将技术作为智能船舶发展的核心竞争力，加大技术研发投入力度，取得多项重要成果。在特种船舶领域，以液化天然气运输船、液化氢运输船和液化二氧化碳运输船为代表的特种船舶进入新发展阶段，各类船型相继面世。总体来看，2022 年，高技术船舶领域发展稳中向上，尤其是在航运脱碳进程加快、全球能源运输格局剧变等背景下，诸如氢氨燃料电池船舶、液化天然气运输船等船型迎来了快速发展期。

（一）绿色船舶

1.主要造船国家推动可再生能源在船舶上的应用

生物燃料方面，日本船企推进在各型船舶上进行生物燃料试验。2022 年 8 月，日本川崎汽船宣布，该公司成功在散货船上进行了船用生物燃料试验。该生物燃料由荷兰船用生物燃料供应商 Good Fuels 公司提供。2022 年 9 月，川崎汽船宣布，将在大型高速滚装船上进行新一代生物柴油燃料的试验航

行。新型燃料以生物质为原料，可在不改变现有船用柴油发动机规格的情况下使用。虽然该型生物柴油燃料在燃烧阶段会排放二氧化碳，但生物质原料在生长过程中能够通过光合作用吸收二氧化碳，因此使用该燃料有望达到碳中和状态。川崎汽船表示，预计生物燃料可以减少 80%～90%的二氧化碳排放量。

甲醇燃料方面，美国开发出全球首艘采用甲醇制氢发电机的船舶。2022 年 9 月，美国海事合作伙伴公司(Maritime Partners)宣布开发出全球首艘使用甲醇制氢发电机的拖船。甲醇制氢发电机可将甲醇和水转化为纯氢气，通过燃料电池为船舶电机发电，能够以标准运营航速航行长达 550 英里（约合 885 千米）。新拖船有望满足国际海事组织的 2030 年目标，即在 2008 年基础上将温室气体排放量减少 40%。

风能方面，日韩开启船舶风力推进系统研发项目。2022 年 8 月，日本商船三井宣布，将展开船舶风力推进技术研究。未来，商船三井将与日本东海大学(Tokai University)合作，通过优化风力推进船舶的船体形状并引进航空航天领域空气动力学技术，将船舶的温室气体排放量减少 12%以上。2022 年 9 月，韩国大宇造船与挪威船级社签署一份协议，将共同开发大型远洋船舶风力推进系统，包括旋翼帆解决方案、节油装置技术，旨在利用风能来减少船舶燃料消耗和温室气体排放。除大宇造船外，韩国三星重工也加入船舶风力推进系统

的赛道，其自主研发的“Hi-Rotor”旋翼帆系统，可为船舶减少燃料消耗和温室气体排放量。

2.各类船舶内燃机绿色燃料研发同步进行

氢燃料方面，日欧开展船舶氢燃料发动机研发项目并取得阶段性进展。2022 年 1 月，日本商船三井与日本发动机公司(Japan Engine Corporation)签署了一份氢燃料船合作协议。根据协议，两家公司将在一艘现役船舶上安装氢燃料发动机并进行试验。此次两家公司合作研发的发动机有望成为全球第一台安装在远洋商船上的氢燃料发动机。2022 年 5 月，欧洲 Beh2hydro 公司推出 100%纯氢发动机。该型纯氢发动机作为主驱动器，可与交流发电机结合使用，功率范围为 1～2.6 兆瓦，目前有 6 缸和 8 缸的直列发动机，以及 12 缸和 16 缸的 V 型发动机。据 Beh2hydro 公司称，该型纯氢发动机专为重型应用而开发，是船舶、钻井平台或其他海上应用的可靠且环保的能源来源。

氨燃料方面，欧日韩加速推进船用氨燃料发动机面世。2022 年 4 月，芬兰瓦锡兰集团(Wartsila)宣布将开发一款四冲程氨发动机演示机，并在 2025 年之前将该发动机的二冲程版本应用到船舶上。瓦锡兰已在氨燃料发动机研发上取得重大进展，于 2021 年成功演示了一款使用 70%氨气混合物的发动机演示机。2022 年 6 月，日本商船三井与常石造船、三井造船（Mitsui Engineering&Shipbuilding），正式启动氨燃料动力

液化气运输船研建项目，新船预计于 2026 年左右交付并投入使用。新船将配备正在研发中的三井-MAN B&W S60 氨燃料二冲程发动机。2022 年 6 月，韩国现代重工宣布，将与瑞士温特图尔发动机公司(WinGD)合作开发船用氨燃料发动机，计划于 2025 年推出首款氨燃料动力二冲程发动机。

LNG 燃料方面，韩国在 LNG 动力船核心设备和关键材料研发方面取得重大进展。2022 年 6 月，韩国现代重工集团成功研发出可减少燃料消耗和碳排放量的新一代高效 LNG 动力船燃料供应系统 Hi-eGAS。该系统能够回收利用 LNG 动力船燃料供应过程中废弃的热量，以减少不必要的燃料消耗。2022 年 6 月，韩国大宇造船与浦项制铁集团(Pohang Iron and Steel)合作开发的高锰钢材料成功批量生产，并成功应用于 LNG 燃料储罐上。LNG 燃料储罐是 LNG 动力船的核心设备，此前主要采用镍合金钢作为主要制作材料，但该材料成本较高且加工工序烦琐。高锰钢原材料锰资源全球储量丰富，价格更具竞争力。与镍合金钢相比，使用高锰钢制造储罐总容积 17 万立方米的 LNG 动力船费用可以节省 200 亿韩元（约合 1526 万美元）。韩国业界人士表示，此次自主研发的高锰钢燃料储罐将进一步巩固韩国在 LNG 动力船建造领域的全球领先地位。

3.船用燃料电池在多国新造船舶上逐步得到应用

瑞典方面，2022 年 7 月，瑞典电池系统(Echandia)公司和日

本东芝公司达成一项协议，将共同开发大功率燃料电池技术，以进一步推动海事领域的电气化进程。双方将为船舶燃料电池拓展市场，并着重拓展极端重型应用市场。Echandia 公司表示，随着深海开发的逐步深入及对大型船电气化需求的增加，重型和耐用的燃料电池正成为海上运输脱碳解决方案中越发重要的一部分，希望通过此次合作为航运市场提供高附加值的清洁燃料解决方案。

印度方面，2022 年 8 月，印度科钦造船厂(Cochin Shipyard)宣布，将于 2023 年交付印度国内建造的首艘氢燃料电动船。印度港口、航运和水路部(Ministry of Ports, Shipping and Waterways)于 2022 年 4 月宣布了国内首个氢燃料电动船建造项目，旨在建造一艘使用氢燃料电池作为动力的客船。预计该项目将花费 17.5 亿卢比（约合 2105 万美元），其中 75%的资金由印度政府资助。印度表示，氢燃料电动船开发项目将为印度到 2070 年实现碳中和目标提供支持。

德国方面，2022 年 9 月，德国科德宝(Freudenberg)开发的一款甲醇动力燃料电池系统获得意大利船级社(Registro Italiano Navale, RINA)颁发的型式认证。该系统将高效燃料重整技术与长寿命质子交换膜和聚合物电解质膜燃料电池(Proton Exchange Membrane, PEM)相结合，通过蒸汽重整产生氢气，使其与空气中的氧气反应，进而为船舶电气系统提供电能。科德宝研发的该款燃料电池是全球首款获得船级社认证的

甲醇动力燃料电池系统，对于海事领域绿色可持续发展具有里程碑式意义。

挪威方面，2022 年 9 月，挪威船舶氢能源系统供应商 HAV Hydrogen 公司宣布，将推出一款能够安装在甲板上的集装箱式船舶氢能源系统。该系统基于 200 千瓦的氢燃料电池模块组成，可根据不同功率要求增减模块。该系统不仅能为船舶主推进系统供电，还可为船上其他设备提供电力，其输出功率的大小将根据航行模式和船舶类型而变化。HAV Hydrogen 公司表示，该系统易于安装，可成为船舶实现零排放的快速途径，公司未来将进一步推进船舶氢燃料电池系统的商业化应用。

韩国方面，2022 年 10 月，韩国造船海洋工程公司（Korea Shipbuilding&Offshore Engineering）与全球能源巨头壳牌公司、韩国斗山燃料电池公司(Doosan Fuel Cell)、斗山集团全资北美子公司 HyAxiom 及挪威船级社签订了建立船用燃料电池实证联盟的合同。根据合同，由韩国造船海洋建造、壳牌运营的 17.4 万立方米 LNG 动力船将搭载 600 千瓦固体氧化物燃料电池(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)，并于 2025 年开始在实际贸易航线上进行为期一年的实证测试。未来，韩国船企将在此基础上，合作开发由燃料电池提供动力源的高效绿色船舶。

法国方面，2022 年 11 月，法国功率燃料电池制造商氢动力公司(Helion Hydrogen Power)的船舶版零排放氢燃料电池，获

得了法国船级社颁发的原则性认可证书(Agreement In Principle, AIP)。该燃料电池系统包含一套热管理系统、一套专用的船载控制系统和一套氢安全系统。此外，该燃料电池还采用了一种双层外壳，能确保其在海水环境中被完美密封。该燃料电池将于 2023 年年底投入运营，将首先被安装在一艘挖泥船上，未来有望逐步应用于其他船型，助力航运业实现净零排放目标。

（二）智能船舶

1.韩国加速推进智能船舶研发，聚焦自主航行技术及智能船舶配套系统

现代重工方面，持续攻克船舶自主航行核心技术。2022 年 9 月，韩国现代重工表示，该公司 4 项自主航行核心技术获得美国船级社(American Bureau of Shipping, ABS)颁发的原则性认可证书。这 4 项核心技术分别是自主航行船舶综合平台、设备自动化控制系统、船舶综合安全管理系统及自主航行辅助系统。其中，自主航行船舶综合平台可对船舶自主航行的全阶段进行综合控制；设备自动化控制系统和船舶综合安全管理系统是基于人工智能的自主航行船舶辅助系统，无须人为介入，即可对船上的机械设备和配件状态进行诊断；自主航行船舶辅助系统可自行生成最佳航线和航行速度，并控制发动机以最大限度地减少燃料消耗，同时还可对周边环境和

船舶进行识别并发出避碰等指令。此次 4 项自主航行核心技术获得美国船级社的原则性认可证书，标志着现代重工向完全自主航行船舶的开发目标又迈进一步。

三星重工方面，与英美船级社合作推动智能船舶自主航行技术研发。2022 年 6 月，韩国三星重工与英国劳氏船级社(Lloyd's Register of Shipping, LR)签署合作协议。根据协议，双方将合作研发自主航行船舶技术，并合作开展相关技术验证工作。此次合作将有助于三星重工提升在智能船舶领域的全球竞争力。2022 年 7 月，三星重工与美国船级社签署一项联合开发船体应力监测系统的协议。该应力监测系统将根据美国船级社的智能功能指南进行开发，计划于 2024 年安装在一艘新建集装箱船上，用于提升船体安全性。三星重工表示，此次合作将助力其加速迈向船舶数字化时代。

大宇造船方面，推出多款具有自主知识产权的船舶智能配套系统。2022 年 5 月，韩国大宇造船宣布，该公司自主研发的智能船舶——LNG 船液货舱环境监测及远程控制系统已成功应用于实船。液货舱是 LNG 运输船的核心设备，由对温度和湿度要求极高的殷瓦钢制成。大宇造船此次推出的液货舱监测控制系统通过在液货舱内设置各类物联网传感器和通信设备，就可在计算机端和手机端获取液货舱的实时状况，并能够对温度和湿度进行远程调节。2022 年 11 月，韩国大宇造船发布了自主研发的船舶智能节能系统(Smart Energy

Saving System)的性能验证结果，获得全球海事界相关人士的高度评价。数据显示，与现有同型船相比，使用该系统的船舶可节约 5%左右的燃料。根据测算，以欧亚航线为基准，安装该系统的船舶每年可节约 25 亿韩元（约合 190.7 万美元）。

2.日本无人船实船测试取得重大进展，向商业化应用迈进一步

2020 年，日本财团启动“MEGURI 2040”无人船项目。该项目汇集航运、造船及船舶设备制造商等 40 余家日本企业，目标是到 2025 年实现无人船商业化应用，到 2040 年实现 50%内航船舶的无人驾驶。2022 年，日本财团着力推动“MEGURI 2040”项目各类船型的自主航行示范试验，并取得多项重大进展。

2022 年 1 月 11 日，日本“海友零”号(Sea Friend Zero)小型客船成功完成 1.7 千米的无人驾驶航行，包括离岸和靠泊，全程约 10 分钟。2022 年 1 月 17 日，日本“太阳”号(Soleil)大型渡船在无人驾驶状态下以 26 节高速航行约 240 千米，全程约 7 小时。这是全球范围内首次在大型客船上展示先进的无人驾驶船舶技术。2022 年 1 月 24 日，日本“镜像”号(Mikage)内航集装箱船完成自主航行试验，这是全球首次利用实际运行的集装箱船进行自主航行试验，也是第一次使用无人机来协助船舶系泊。2022 年 2 月 5 日，日本“太阳花”号(Sunflower Shiretoko)大型车客渡船完成自主航行试验，整

个航程约 750 千米，航行时间长达 18 小时，无论是从距离还是时间上都是全球首次。2022 年 2 月 26 日，日本“朱雀”号(Suzaku)内航集装箱船顺利完成在拥挤海域的自主航行试验，整个航程长达 790 千米。该船配备了日本自主开发的无人船操作系统，能够通过陆上支持中心进行远程操作。值得一提的是，这是全球首个在海上交通繁忙的海域完成的无人船试验，证明了日本自主航行船舶的高技术水平。2022 年 3 月 14 日，日本水陆两用船完成全长约 2 千米、耗时 30 分钟的无人驾驶试验。这是全球首次通过水陆两栖船进行的自主航行试验。此次试验中开发的路线追踪和自主避航等系统有望为船舶安全航行作出新的贡献。

总体来看，日本财团“MEGURI 2040”无人船项目所有 6 个不同船型、不同条件的实船测试项目均已按计划成功完成，并在无人船领域创造了 6 项世界纪录，表明日本向在 2025 年实现无人船商业化的目标迈进一步。未来，日本财团将分析一系列试验结果，发挥各联盟的优势，进一步推进无人船技术开发，以在未来无人船领域掌握主导权。

3.欧洲智能船舶蓬勃发展，推出新型无人船

2022 年 5 月，由欧洲各大船企联手打造的全球首艘零排放无人集装箱船“雅苒伯克兰”号(Yara Birkeland)正式投入运营，标志着欧洲在智能船舶技术领域取得了重要阶段性进展。该无人集装箱船由挪威雅苒国际(Yara International)和挪威康士

伯海事(Kongsberg Maritime)合作研发，采用了远程控制和无人自动运营所需的传感器等先进设备，其电池功率约为 6.8 兆瓦，能够装载 103 个 20 英尺标准集装箱，最大航速 13 节，每年可减少约 4 万辆柴油卡车的碳排放量。根据计划，该无人集装箱船将进入为期两年的技术测试期，最终实现在港口全自动装卸货物的目标。

2022 年 6 月，英国“五月花”号(Mayflower)无人船完成了首次跨大西洋航行。该船由美国国际商用机器公司(International Business Machines Corporation, IBM)和英国海洋研究组织联合设计建造，长 15 米，宽 6.2 米，最大速度 10 节，由太阳能驱动的混合电机提供动力，并配有柴油发电机作为后备动力。值得一提的是，该船使用的是 IBM Power AC922 系统，该系统已在全球诸多大型人工智能超级计算机上应用。此外，在 IBM 的 Power AI Vision 的协助下，“五月花”号能够探测和识别船只及浮标，以及包括残骸在内的其他障碍物，并进行相应的动作决策。“五月花”号首席技术官表示，目前许多自动驾驶船仅仅是自动化机器人，严重依赖操作人员的控制，但“五月花”号在操作中无须人为干涉。

（三）特种船舶

1.韩国抢占 LNG 运输船领域核心设备、国际标准双重主导权

在 LNG 运输船核心技术研发方面，韩国实现核心设备国产化。

2022 年 6 月，韩国三星重工完成 LNG 运输船核心设备再液化系统“X-Reli”的实证测试。系统可在零下 163 摄氏度的超低温液货舱中，将自然气化的 LNG 蒸发气体全部重新冷凝液化，最大限度地保全运输中的 LNG，提高 LNG 运输效率。“X-Reli”再液化系统有助于三星重工实现 LNG 领域的技术自立，进一步扩大 LNG 全产业链竞争优势。2022 年 6 月，韩国大宇造船与韩国兴松金属材料有限公司(Hyupsung Metallize)联合自主研发的 LNG 船用高压泵，获得了韩国船级社(Korean Register of Shipping, KR)颁发的型式认可证书，标志着韩国实现又一个 LNG 运输船核心设备的国产化。LNG 船用高压泵是向柴油-天然气双燃料发动机提供高压燃料的核心设备，此前韩国造船企业需要从美国、法国进口该设备。目前，兴松金属材料有限公司正与大宇造船联合推进 LNG 船用高压泵的运行测试。大宇造船表示，未来将通过 LNG 运输船核心设备的国产化，进一步增强在新船市场上的价格竞争力，以承接更多的 LNG 运输船订单。

在 LNG 运输船国际标准制定方面，韩国抢夺相关国际标准话语权。2022 年 5 月，韩国国家技术标准研究院(Korea Agency for Technology and Standards, KATS)表示，韩国造船海洋设备研究院(Korea Marine Equipment Research Institute, KOMERI)开发的 LNG 再液化系统性能评价试验方法通过了国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO)新工

作项目提案(New Work Item Proposal, NP)投票，成功迈出了抢占 LNG 运输船相关国际标准的重要一步。国际标准制定通常分为预备工作项目(Pre Work Item, PWI)、新工作项目提案、工作草案(Work Draft, WD)、委员会草案(Committee Draft, CD)、询问草案(Draft International Standard, DIS)、最终国际标准草案 (Final Draft International Standard, FDIS) 和国际标准(International Standard, IS)等阶段。NP 投票是国际标准从提案建议阶段进入正式起草阶段的重要节点。近年来，LNG 运输船核心设备国际标准的开发被列为韩国政府研发事业。除 LNG 再液化系统外，韩国还计划向 ISO 追加提出采用高锰钢作为 LNG 运输船液货舱材料国际标准的建议。韩国希望通过这一系列举措巩固其在 LNG 运输船市场的国际竞争力。

2.日欧韩发力液化氢运输船领域，开展液化氢运输船研建项目

2022 年 2 月，日本川崎重工建造的全球首艘液化氢(LH2)运输船完成长距离液化氢运输。该船 2021 年年底从日本神户出发，于 2022 年 1 月抵达澳大利亚哈斯汀港(Hastings)，在当地装载了氢气后返回日本。该 LH2 运输船长 116 米，宽 19 米，配备一个 1250 立方米的液化氢储存罐，每次可运输 75 吨的液化氢。川崎重工从 2014 年开始研发全球首艘 LH2 运输船，基于丰富的 LNG 运输船设计建造经验，自主开发了液化氢储存系统。此外，川崎重工还于 2021 年在神户机场岛

建成了全球首个液化氢装卸基地，用于从陆地上接收经由LH2运输船运输而来的液化氢。

2022年8月，能源巨头壳牌公司与法国GTT公司（Gaztransport&Technigaz）签署协议。根据协议，法国GTT公司将设计一款LH2运输船及用于LH2运输船上的液化氢货物维护系统。此次合作协议是壳牌氢能源战略的一部分，该战略旨在通过开发安全可扩展的液化氢运输技术来发展氢能源供应链。法国GTT公司将发挥其在低温技术领域丰富的专业优势，助力壳牌于2050年前成为净零碳能源供应商。

2022年10月，韩国大宇造船与美国CB&I储氢解决方案公司（CB&I Storage Solutions）签订了开发大型LH2运输船的业务协议。根据协议，双方将围绕大型液氢储罐的船舶应用技术进行讨论。CB&I储氢解决方案公司此前为美国国家航空航天局制作了全球最大的液氢储罐，在相关存储设备建造领域积累了130年的经验。2021年8月，CB&I储氢解决方案公司完成了全球最大球形液氢储罐的概念设计，证实了扩大液氢存储规模以支持氢能规模化应用的可行性。通过此次合作，大宇造船有望获得适用于船舶的大型液氢储罐技术，为实现LH2运输船的大型化奠定技术基础。

3.日韩研发的液化二氧化碳运输船获得各大船级社认可，为未来推向市场奠定了良好的基础

2022年4月，韩国大宇造船宣布，该公司研发的70000立方

米级超大型液化二氧化碳(LCO2)运输船已获得美国船级社颁发的原则性认可证书。该船长 260 米，宽 44 米，是迄今获得船级社认可的最大的 LCO2 运输船。该船配备了 LNG 燃料发动机，并拥有足够的空间安装二氧化碳捕获储存装置。大宇造船表示，随着脱碳政策的推行和碳捕获技术的发展，LCO2 运输船受到行业关注，目前公司正在开发使用新材料的大容量液化二氧化碳储罐，旨在进一步提升公司 LCO2 运输船全球竞争力。

2022 年 5 月，日本三菱重工宣布，其子公司三菱造船(Mitsubishi Shipbuilding)与日本邮船(NYK Line)共同研发的大型 LCO2 运输船设计获得了日本船级社颁发的原则性认可证书。后续，两家企业将继续推进 LCO2 运输船的研发建造，以早日实现多型 LCO2 运输船的商业化运营。2022 年 8 月，日本商船三井宣布，其研发的 64000 立方米级大型液化 LCO2 运输船获得日本船级社颁发的原则性认可证书。商船三井于 2021 年启动了大型 LCO2 运输船的研发工作，以期将工厂和火力发电厂排放的二氧化碳安全、大量且低成本地运输到再利用和储存地点。根据计划，商船三井将于 2021—2026 年持续开发大型 LCO2 运输船并使其陆续投入使用。

六、海洋电子信息技术

近年来，海洋观测、监测与探测逐步由近海向远海，由低纬

度向立体，由单一要素向综合观测发展，海洋电子信息技术更加智能化、一体化。2022 年，随着电池、无人系统、人工智能和组网等新技术向海洋融合发展，海洋观测、探测覆盖海域更广，水下导航定位技术精准度日益增高，一体化海洋通信网络初步建立，海洋电子信息技术持续健康发展。

（一）海洋观测探测覆盖更广更深海域

海洋观测探测是感知海洋、认识地球最基础和最核心的技术手段。随着自动化与信息技术的广泛应用，海洋观测探测手段更加多维立体，涵盖岸海空天等全方位渠道。海洋环境感知、数据集成与分析及应用保障等方面技术持续创新发展，为构建覆盖全球的广域实时、多维一体的观测探测体系打下坚实基础。

1.新技术新装备不断涌现

2022 年 2 月，英国 EC-OG 公司推出一款专为恶劣的海底环境设计的新型海底电池存储系统。该系统是一种模块化、可拓展的电池存储解决方案，可为各类潜水器、海底监测网等设备提供可靠、稳定的充电式电力供应，保障其长时间离岸运行。未来，该系统将与美国能源公司 C-Power 研发的波浪能转换器进行集成，随后将与美国国防部下属的自主海上无人电力系统(Autonomous Offshore Power System, AOPS)项目进行联合海试。美国国防部计划将该系统发展成为自主、互联

和可长期工作的海上能源平台，以支持深潜器、传感器组件和装置等无人设备的海上活动。该系统未来有望广泛应用于海洋油气勘探与生产、海洋碳封存、海洋研究、水产养殖与国土防御等领域。

2022 年 3 月，英国国家海洋中心成功部署第一批生物地球化学(Fleet of Biogeochemical, BGC)Argo 剖面浮标。该浮标阵列由 15 个机器人浮标组成，占整个部署计划的 50%。与此前的机器人浮标相比，BGC Argo 配备了新的传感器，可以测量海水的压力、温度、含盐量、pH 值、氧气、硝酸盐、叶绿素、悬浮颗粒物和光照水平。此次部署补充并完善了英国对 2000 米深海洋过程的认识，为其海洋数据的获取提供了重要保障。未来，英国国家海洋中心还计划投资另外 15 个 Argo 剖面浮标，完成英国大西洋 Argo 网络建设，进一步协助研究人员获得有关海洋和气候变化的新认识，支持各国相关规划、资源管理和政策制定。

2022 年 9 月，法国泰雷兹集团在韩国 DX 2022 展会上向韩国海军和其他国际客户推出了新一代声呐浮标 Sono Flash。该型声呐浮标是一种标准化的 A 型声呐浮标，长约 1 米，直径约 10 厘米，特点是将低频主动声呐和被动声呐集成到一个系统中，探测范围是定向指令激活声呐浮标的 3～4 倍。同时，该型声呐浮标尺寸小，可在无人机等小型平台进行投放部署。根据计划，该型声呐浮标计划于 2025 年实现对外出

口。

2.海底监测能力持续提升

2022 年 6 月，英国海洋地理空间委员会(UK Hydrographic Office)发布《英国海洋地理空间数据的未来》，呼吁英国政府、工业界和学术界应探寻新的合作方式，以获取和管理全球海洋地理空间信息数据，确保英国保持在海洋科学领域的世界领先地位。该报告提出 4 项发展建议：一是呼吁英国公共部门和学术组织加强合作，制定更有战略性的发展方向；二是建立通用数据标准，统一信息创建和储存方法；三是提高数据透明度和可访问性；四是加大数据收集力度，降低数据收集门槛。

2022 年 8 月，英国政府成立海底测绘中心(UK Centre for Seabed Mapping, UKCSM)，旨在共同扩大全球海底测绘领域，提高数据质量，推广数据使用，以改善海洋产业的规划和管理，促进海洋经济增长和发展。该海底测绘中心包括国家数据协作组、国际数据协作组和数据收集标准组 3 个初始工作组，力求解决数据协作、数据标准、数据可访问性和数据收集 4 个优先事项。海底测绘中心的成立表明英国政府希望整合全部海底测量资源，加强海洋地理空间数据的管理和使用。

2022 年 6 月，韩国科学技术情报通信部(Ministry of Science and ICT, MSIT)宣布，将全面推进一个预算约 240 亿韩元（约合 1831 万美元）的国家级试点项目，目标是研发基于水下

无线通信网络的实时海底灾害监测系统。该项目计划在 5 年内开发海底监测技术，弥补陆地地震观测站无法识别水下震源和震级的不足，建立监测网络实时监测地震、海啸和滑坡等地质灾害，并利用无线网络快速传输预警信息。项目的具体内容包括：分析韩国东海岸的地质环境；识别海底灾害潜发点；创建海底无线观测网；传输海底观测数据；构建数据采集、储存、分析和管理一体化平台。相关分析表示，该项目有望在海底监测、水下无线通信、海事设施、国防和军事安全、自然灾害及海洋环境等领域带来一系列社会效益和经济效益。

2022 年 8 月，西班牙政府宣布投资 150 万欧元，用以支持 IQUA 公司牵头实施的海洋生态系统长期观测平台(Platform for Long-lasting Observation of Marine Ecosystems, PLOME)项目。该项目旨在开发一个水下平台，用以对海底生态系统进行实时智能监测。平台将由配备有电池和通信系统的海底固定站、水下潜航器和水面航行器三个部分组成。其水下潜航器可以靠泊海底固定站充电，而水面航行器还可利用太阳能供电。此外，平台还能够自主监控一个区域并采集数据，工作时间可持续数周甚至一个月。该项目将在未来进行 3 项实验，且计划连接到欧盟的 OBSEA 海底观测网(Expandable Seafloor Observatory)，以实现对所有主要海洋生态系统进行实时监控。

3.海洋监视卫星广泛使用

2022 年 4 月，中国成功利用长征四号丙运载火箭成功发射一颗 1 米 C-SAR 业务卫星。该卫星是中国第 2 颗 C 频段多极化合成孔径雷达业务卫星，能够与已在轨运行的首颗 1 米 C-SAR 业务卫星及“高分三号”科学试验卫星实现三星组网运行，可以显著提升其卫星重访与覆盖能力，标志着中国首个海洋监视监测雷达卫星星座正式建成。与单颗卫星相比，三颗卫星完成组网后的平均重访时间由 15 小时缩短至 5 小时，具有重要的进步意义。

2022 年 6 月，美国海军水面作战中心与美国 KSS 公司(Kleos Space Inc)签署了一项联合数据实验合作研发协议，旨在利用 KSS 公司卫星提供的射频(Radio Frequency, RF)传感数据进行海上态势感知实验，用于海上禁运、转运监测、搜救、资源管理、渔业管制、走私和边境安全等任务。该协议是美国海军“侦察兵演示活动”(Scout Experimentation Campaign)的第一阶段，将通过美国海军研发机构、工业界、学术界和国防部技术伙伴之间的合作，创新和集成应对军事挑战的整体解决方案。KSS 公司表示，其射频数据极大地扩展了探测范围、访问范围和数量，能够到达广阔的海洋领域。

2022 年 9 月，俄罗斯首颗海洋监视卫星“芍药”-NKS 通过国家试验，将开启试作战执勤，对国外军事活动进行监视。该卫星是俄罗斯海军“藤蔓”(Vine)侦察系统的重要组成部分，能够在侦察到敌方舰艇后，为俄罗斯海军反舰导弹对目标实

施远程打击实施精确引导。该卫星重达 6.5 吨，带有两组大型雷达天线和太阳能电池板，在轨服役时间至少为 4 年，90 分钟的公转周期和 67.15 度的倾角可确保其能够以足够的频率监测北大西洋和俄罗斯北方海域的关键区域。

4.数字化进程加快

2022 年 7 月，美国海军发布“海洋动力学与预测工程及软件开发”(Ocean Dynamics and Prediction Engineering and Software Development Tender)项目信息征询书，寻求海洋环境预测模型，以处理和分析来自海洋和大气传感器的数据，从而确定并预测海洋上空、海洋表面至海底的环境状况。该项目信息征询书要求：开发高质量数值模型、算法、测试案例和软件；使用遥感数据确定海面温度、预测北极海冰、建立海洋声学模型；重点了解海底地质过程、进行地理空间分析与可视化等。该预测模型将用于反潜战、两栖登陆、水雷战、特种作战、海底战和搜救行动等海军任务。

2022 年 8 月，美国海军数字作战办公室(Navy Digital Warfare)授出一项为期 5 年的合同，专门打造人工智能生态系统。根据合同，相关供应商将提供人工智能/机器学习能力与数据基础软件，完善和丰富美国海军各种平台的船只、传感器及其他海事数据源，同时使数据源成为可从任何地方访问的有效数据载荷。此外，该生态系统还包含云计算、存储、硬件和云边缘设备，将允许美国海军作战舰队在复杂和孤立的信息

技术环境中作战，有助于提高海军作战人员获取信息的速度，满足多域战场作战需求，帮助美国海军获取战场关键优势。2022 年 8 月，日本邮船、日本造船联合(Japan Marine United, JMU)、三菱造船、古野电气(Furuno Electric)和日本无线电(Japan Radio)等 8 家日本船企合作开展“海事和海洋数字工程”(Maritime and Ocean Digital Engineering, MODE)项目。该项目重点关注造船厂效率、脱碳技术和无人自主运营能力，将建立一个合作仿真平台，以促进和增强海事、造船企业的数字工程技术和技能。据称，日本航运业正面临各种挑战，如在全球去碳化的背景下开发和实施新技术、整合自主船技术以协助海员和提高航运安全性，以及在船舶设计和制造过程日益复杂的情况下确保生产效率。根据合作计划，MODE 项目将使用基于模型的设计(Model-based Development, MBD)和基于模型的系统工程(Model-based Systems Engineering, MBSE)来开发和实施新技术，以应对上述挑战。

（二）水下导航定位技术精准度日益增高

随着声信号、偏振光、地形匹配、地磁、重力匹配和惯性导航等技术的不断进步和完善，水下导航定位技术日益成熟，已经成为远洋作业和深海活动的重要保障。2022 年，μ 子射线定位、量子等新技术突破为水下协同定位和组合导航提供更多选择，水下定位导航的广域性和精准度不断提高。

1.超短基线技术实现水下高精度定位

2022 年 8 月，法国 iXblue 公司与 ECA 集团(ECA Group)对其联合研制的新一代遥控潜水器“R7 ROV”进行了演示，旨在测试该型潜水器对沿海地区水下目标进行精确定位和跟踪的能力。该型潜水器配备了先进声呐与高清声学检测摄像机，具备高定位精度和分辨率，同时还能够快速嵌入各种有效任务载荷，以适应不同任务需求。在此次演示中，“R7 ROV”在能见度较低且有显著声学回波的港口水域成功调查了水中物体和建筑物结构，并利用 iXblue 公司的超短基线定位系统进行了精确定位和航迹校正，成功验证了多项功能。

2022 年 11 月，美国蒙特利湾海洋研究所(Monterey Bay Aquarium Research Institute, MBARI)宣布，其新建的科考船“戴维·帕卡德”号(David Packard)将配备 Ranger 2 超短基线水下定位系统(Ultra-short Baseline, USBL)。该系统是英国索纳达因公司(Sonardyne)开发的第六代水下定位系统，采用第二代宽带数字脉冲技术，不仅能够提供高精度的测距和定位，还可以提供快速且多通道的声学数据传输，能同时跟踪定位多个目标。此外，该系统还配备 1 个 HPT 7000 收发器，具备深水定位功能，被广泛应用于水下机器人跟踪定位和潜水员跟踪定位等。“戴维·帕卡德”号科考船长 50 米，最多可容纳 18 名科研人员，可部署各种自主水下航行器，用于在蒙特利湾及其他地区执行各种海洋科考任务。

2.量子等技术在水下导航中获得应用

2022 年 1 月，美国海军研究署(Office of Naval Research, ONR)在覆盖 1 米厚冰层的北极湖测试了其 μ 子射线水下定位项目。该项目由美国海军研究署全球-X 挑战赛资助，旨在开发一种在极区与深海环境也可收信的导航方式，牵头单位是英国地质调查局(British Geological Survey, BGS)，日本、美国和芬兰的研究人员也共同参与。μ 子是由银河宇宙线等初级宇宙线与大气中的原子核碰撞后衰变产生的，在大气中普遍存在。μ 子成像技术利用 μ 子穿过不同物质时的透射或散射特性差异探测内部结构，已用于大型建筑结构探测。此前，英国地质调查局在铁路隧道、采矿和油气勘探中对 μ 子射线导航技术进行了验证，日本东京大学也提出了利用 μ 子进行水下定位的技术，称为 μPS 技术。该技术在水面布置多个 μ 子探测器，通过测量与水下 μ 子探测器之间的飞行时间差，计算水下探测器的位置，定位精度约为 1.5 千米。研究显示，μPS 定位精度与盐度、温度等海水变化有关。美国海军计划将该技术应用北极地区的水下定位。此外，该技术还可用于卫星定位信号不可用的环境中。

2022 年 11 月，法国国家科学研究中心研制出了首个可以开展 3D 测量的量子加速计，有望帮助船舶在没有 GPS 信号的时候导航，以及更精确地绘制地球内部的情况。该款 3D 量子加速计的外壳是一个 40 厘米长的金属盒，里面有 3 个激

光器和 1 个较小的玻璃盒，玻璃盒里装满了铷原子，该原子温度仅比绝对零度高一点。为测量运动的变化，3 束激光分别沿盒子的长、宽和高方向照射原子，迫使原子发生碰撞，产生波纹，波纹的性质取决于加速计的运动。通过分析波纹图案，量子加速计可以计算激光器的加速度。研究人员表示，配备量子加速计后，如果 GPS 信号出现故障或被黑客干扰，船舶也可以保持非常准确的航向。该技术未来有望应用于轮船、潜艇等容易发生振动的大型平台。

（三）一体化海洋通信网络加速构建

当前，海洋观测、监测及探测技术与装备正在向无人化、智能化和多样化方向快速发展，已经形成“岸、海、空、天、潜”立体感知网络。构建以海基为核心，综合利用水声通信、光学通信、卫星通信、散射通信和自组网等技术手段的一体化海洋通信网络，是立体感知网的重要技术保障。

1.海洋平台间通信可靠度增大

2022 年 3 月，以色列 DSIT 公司推出一款先进的水下通信系统——“白指针”(White Pointer)，可实现多个水面和水下平台间的同时通信。“白指针”系统符合北约标准，能够实现水面舰艇、潜艇和其他水下平台之间可靠的语音和数据通信，如蛙人运载器、蛙人推进器、自主水下航行器和无人潜航器。该系统支持多用户水声网络通信，可与任何舰载通信系统完

全集成。DSIT 所属的以色列拉斐尔先进防务系统(Rafael Advanced Defense Systems)公司，重点研发水下各类系统，包括水下安全系统、反潜作战系统、潜水平台声呐系统、声学分析训练系统及水下通信系统。基于 DSIT 的丰富经验和创新技术，该公司的水下系统及技术已被全球许多尖端客户成功部署，用于海军防御、国土安全和能源安全等领域。

2022 年 3 月，美国海军授予诺斯罗普·格鲁曼公司一份价值 1790 万美元的合同。根据合同，诺斯罗普·格鲁曼公司将为美国海军 15 架舰载巡逻机的 Link 16 战术数据链提升安全通信能力。Link 16 是一种军事战术数据链网络，可支持军用飞机、舰船和地面部队能够近实时交换战术图像，以及机组人员与其他战机共享通信数据，是美国国防部实施全域联合作战的关键指挥控制装备。此外，Link 16 具备支持通信、导航和识别等多种功能，具有大容量、抗干扰及保密能力强的特点，满足侦察数据、电子战数据、任务执行、武器分配和控制等数据的实时交换需求，已成为美军主战平台的基本配置，是各型主战平台实施信息化作战、形成体系作战能力的重要支撑。

2.卫星通信被广泛应用

2022 年 7 月，美国 SpaceX 公司正式推出全新的移动服务 Starlink Maritime，旨在为全球海事业提供“星链”卫星互联网服务。该公司表示，商船、海上钻井平台及游艇都可以用

Starlink Maritime。根据 SpaceX 的说法，选择为自家游艇订购 Starlink Maritime 服务的用户，除每月缴纳 5000 美元的费用外，在开通前还需购买两根价值 1 万美元的高性能卫星天线。该业务开通后，用户可以享受最高 350 兆比特币每秒的下载速度，并且所安装的天线在遇到恶劣天气的情况下，依旧能够保持稳定的网络传输。此前有消息称，SpaceX 还与全球最大的邮轮服务提供商皇家加勒比(Royal Caribbean)进行了合作，有望为该邮轮公司旗下的大型邮轮提供互联网服务。除邮轮业外，远洋航运业也一直受网络连接问题的困扰，甚至成为影响这一行业吸引力的关键因素之一。当前，远洋船舶网络供给能力明显不足，邮轮业的一些互联网接入方案将为远洋船舶提供有益借鉴。

3.深海光学通信首次实现

2022 年 7 月，日本海洋研究开发机构(Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, JAMSTEC)成功实现了全球首次深海光学无线通信，使用无缆水下机器人在 1420 米水深与海底着陆器 FFC11K 连接，获取了 130KB 的海底影像资料。目前，大多数自动化海底观测设备都可通过电池供电而无须连接电缆，然而因为光和无线电波难以穿透厚厚的水层到达海底，数据传输仍然依赖有线通信。为解决这一问题，2017 年起日本海洋研究开发机构就着手研发水下光学无线通信技术，试图在无缆水下机器人和海底观测设备之间建立

Wi-Fi 连接，从而获取数据。此次演示测试中，由于无缆水下机器人作业时需要与海底保持一定高度和速度，所以机器人在 FFC11K 附近仅停留了 10 秒左右，获取的数据量有限。下一步，日本海洋研究开发机构计划改进通信设备，增强数据传输效率。该项技术成熟后，可通过水下机器人实现观测数据的无线采集和传输，无须利用船只回收海底设备或铺设专用光缆进行设备数据传输。

致谢

本书在撰写过程中，汲取了大量的外部资料，包括各国政府、相关机构的报告和文件，以及期刊、网站的信息资料等，在此未及一一列出。在本书付梓之际，我们对相关资源的提供单位和著作权方表示衷心的感谢！