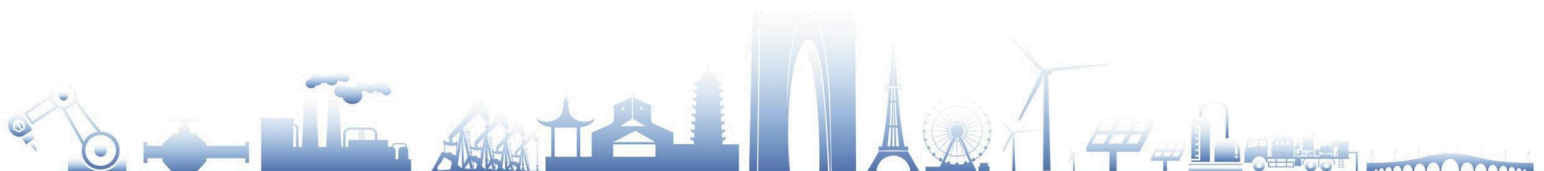


工业元宇宙白皮书

牵头编制单位：中国信息通信研究院

工业互联网产业联盟（AII）

2023 年 3 月



声明

本报告所载的材料和信息，包括但不限于文本、图片、数据、观点、建议，不构成法律建议，也不应替代律师意见。本报告所有材料或内容的知识产权归工业互联网产业联盟所有（注明是引自其他文献的内容除外），并受法律保护。

如需转载，需联系本联盟并获得授权许可。未经授权许可，任何人不得将报告的全部或部分内容以发布、转载、汇编、转让、出售等方式使用，不得将报告的全部或部分内容通过网络方式传播，不得在任何公开场合使用报告内相关描述及相关数据图表。违反上述声明者，本联盟将追究其相关法律责任。

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

联系电话：010-62305887
邮箱：aia@caict.ac.cn

前言

2021年3月，随着元宇宙概念第一股Roblox上市，元宇宙引起全球广泛关注，脸书、微软、英伟达、腾讯、字节跳动、百度等纷纷布局相关领域。元宇宙是构建在新型基础设施之上，实现虚拟世界和现实世界时空融合的新一代互联网应用和社会生态。元宇宙通过区块链、人工智能、扩展现实、数字孪生等技术，实现对现实世界的镜像映射、时空拓展和价值延伸，帮助人们实现在虚拟世界的数字化身，进而借助扩展现实等人机交互手段实现虚拟世界和现实世界的融合。

工业元宇宙是元宇宙重要的应用领域，是基于元宇宙核心基础设施和应用理念，构建的服务于工业经济的新型工业体系、工业生态和工业模式。工业元宇宙可以在虚拟世界中实现对工业全要素、全价值链、全产业链的全息展示和跨时空聚合，并叠加新的社交模式和新型经济模式，进而借助人机交互、数字化身等手段协同开展工业生产经营活动，促进工业转型升级及创新发展。

工业元宇宙概念较为前沿，涉及的技术复杂，产业类型多，工业元宇宙的产业生态体系尚未建立完善，但围绕工业元宇宙的应用探索正在逐步展开，国内外都在加强相关布局。为了凝聚共识，引导业界协同开展工业元宇宙探索，工业互联网产业联盟特编制本报告，对工业元宇宙的概念内涵、可能引发的变革、概念框架、支撑体系进行了阐述，并给出了推进建议，希望为工业元宇宙的落地应用和产业发展提供参考和借鉴。

白皮书编写组成员：

李海花、刘阳、池程、杨鹏、景浩盟、录天凤、樊森、高琦、刘澍、王亦澎、姚顼、李琦琦、期治博、汤雁斐、童晋、孙银、韩玲、高信波、陈柱铭、黄子沛、景越、王宇鹏、田美园、柴森春、张百海、柴润祺、王乃军、崔灵果、许继平、姜露、王昭洋、郑治、郎燕、杨卫国、代淑玉、马晨阳、王铭、李程、李响、丁志刚、王润、熊林恺、徐梦非、王春生、冀岩琦、张远峰、马晨光、姚亚静、焦臻桢、张发振、李韩军、吴陈炜、冯源、张贝莹、杨春强、高亮、陈能技、安宁、兰健、程海旭、庄磊、陈昕、郭惠军、李果、滕护兵

牵头编写单位：

中国信息通信研究院

参与编写单位：

中国信息通信研究院

北京理工大学

北京工商大学

北京航天云路有限公司

美国参数技术公司（PTC）

阿依瓦（北京）技术有限公司

富士康工业互联网股份有限公司

浪潮工业互联网云洲链

百度在线网络技术（北京）有限公司

黑龙江数字化研究院

北京泰尔英福网络科技有限责任公司

工业互联网创新中心（上海）有限公司

Bentley软件（北京）有限公司

软通智慧科技有限公司

中国联通四川省分公司

国际商业机器（中国）投资有限公司
（IBM）

普天信息工程设计服务有限公司

北京华创易丰管理技术有限公司



工业互联网产业联盟公众号

目录

一、工业元宇宙概述	1
（一）元宇宙基本内涵	1
（二）工业元宇宙基本内涵	9
二、工业元宇宙可能引发的变革	10
（一）时空交融的平台化设计	11
（二）虚实结合的智能化制造	11
（三）沉浸体验的个性化定制	12
（四）全局可视的网络化协同	13
（五）虚实共生的服务化延伸	13
（六）全息洞察的数字化管理	14
三、工业元宇宙概念框架和发展阶段	15
（一）概念框架	15
（二）发展阶段	19
四、工业元宇宙支撑体系	20
（一）总体视图	20
（二）基础设施	22
（三）交互与应用	26
（四）其他支撑	27
五、工业元宇宙推进建议	27
（一）引导应用创新探索	27
（二）加快关键技术创新	28

（三） 培育关键产品和产业链	28
（四） 加强基础设施建设	28
（五） 探索监管机制	29
六、 发展展望	29



工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

一、工业元宇宙概述

（一）元宇宙基本内涵

元宇宙目前尚无完全统一定义，通常来说元宇宙是指利用科技手段创造的与现实世界映射交互的虚拟世界，在此基础上形成具备新型社会经济体系的数字生活空间。综合元宇宙相关定义，可以将元宇宙看作是**基于多种信息技术有机结合，沉浸式、自主化、虚实融合的数字网络空间**，是基于互联网平台价值重构，身份资产化、内容价值化、开放互通的虚拟经济体系，是基于现实世界社会活动与人际关系时空深度延伸的新型网络社会。元宇宙利用扩展现实、区块链、人工智能、数字孪生等技术实现对现实世界的数字拓展，完成对现实世界的空间延伸、时间延伸和价值延伸。元宇宙概念示意如图1所示。

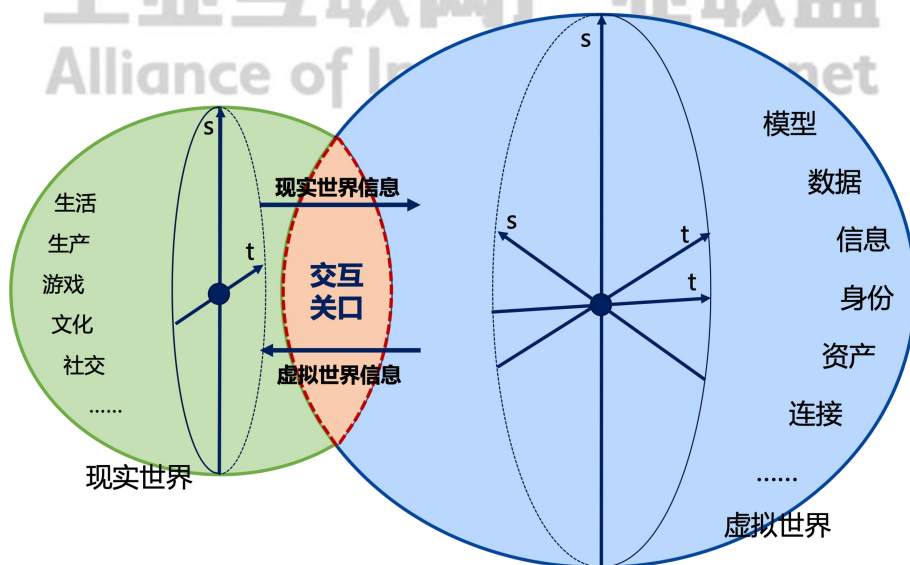


图1 元宇宙概念示意

1. 元宇宙概况

通常认为元宇宙概念来源于 1992 年科幻作品《雪崩》中提到的“Metaverse”。2021 年是元宇宙元年，3 月份随着元宇宙概念第一股 Roblox 上市，元宇宙开始进入公众视野，国外脸书、微软、英伟达等科技公司纷纷布局相关领域，国内腾讯、字节跳动、百度等公司也紧随其后，10 月份，脸书正式改名为 Meta 彻底拥抱元宇宙，使得全球范围内掀起了关注元宇宙发展的热潮。自此以后，世界各国开始在扩展现实、人工智能等元宇宙重要的领域开展了布局，政策和产业发展策略等方面也有所倾斜。

（1）主要政策

国外，主要国家在元宇宙技术研发、产业发展、政策监管等方面进行了积极布局。在技术研发上，韩国重点关注元宇宙城市、虚拟数字人、扩展现实等方向，且给予资金支持，2021 年 5 月，韩国科学技术信息通信部发起成立包括现代、SK 集团等 200 多家韩国本土企业和机构的“元宇宙联盟”，专注元宇宙探索。法国在数字资产、扩展现实等方向积极展开探索，于西部卢瓦尔河大区成立了配备虚拟实现工业中心的智能工厂创新科研中心，拟通过虚拟现实技术，开展新型工厂设计、新机器监测、人体工学研究以及员工虚拟培训等研究。在产业发展上，2021 年 7 月，韩国公布《数字新政 2.0》，推出数字内容产业培育支

援计划，共投资 2024 亿韩元，其中投资扩展现实内容开发、数字内容开发和扩展现实产业基础共计 760 亿韩元。

2021 年 11 月 3 日，首尔市长提出首尔愿景 2030 计划，计划投资 30 亿韩元建设元宇宙首尔，涵盖包括经济、教育、旅游、通信、城市、行政、和基础设施 7 个领域。韩国产业界对元宇宙关注度极高，主要侧重于元宇宙平台、虚拟人、VR 等方面，并初步形成了游戏、虚拟偶像、虚拟世界等领域应用。2021 年 7 月，日本经济产业省发布了《关于虚拟空间行业未来可能性与课题的调查报告》，报告认为，政府应着重防范和解决“虚拟空间”的法律问题，并对跨国、跨平台业务法律适用条款加以完善，政府应与业内人士制定行业标准和指导方针，并向全球输出此类规范。2021 年 12 月，日本成立元宇宙的业界团体“一般社团法人日本元宇宙协会”，启动市场构建，力争使日本成为元宇宙发达国家。2022 年 4 月，日本成立面向应用推进研究和规则完善的“元宇宙推进协议会”。在政策监管上，2021 年 10 月，美国出台《政府对人工智能数据的所有权和监督法案》，要求对人工智能系统所涉及的数据，特别是面部识别数据，进行监管。2022 年 3 月 9 日，美国总统签署“关于确保数字资产负责任发展”的行政命令，要求各部门通力合作，就数字资产展开相关研究。2022 年 4 月和 7 月，欧盟分别通过了《数字服务法》和《数字市场法》，

重点关注网络平台内容安全、保护、个人隐私安全以及恶性竞争等关键问题。

国内，元宇宙产业也获得了广泛的重点关注。2021年12月，中央纪委国家监委网站发布《元宇宙如何改写人类社会生活》，提出要“理性看待元宇宙带来的新一轮技术革命和对社会的影响，不低估5-10年的机会，也不高估1-2年的演进变化”。2022年1月，工信部召开中小企业发展情况发布会，提出要注重培育一批深耕专业领域工业互联网、工业软件、网络与数据安全、智能传感器等方面的“小巨人”企业，培育一批进军元宇宙、区块链、人工智能等新兴领域的创新型中小企业。此外，工信部工业文化发展中心于2022年10月发布的《工业元宇宙三年行动计划（2022-2025年）》，以及工信部、教育部等五部委2022年11月联合发布的《虚拟现实与行业应用融合发展行动计划（2022—2026年）》，着重突出对元宇宙产业发展的重视。目前，我国已有24省市相继发布元宇宙方面的产业发展规划或方案，涉及产业发展、人才引进、税收支持等方面。

（2）发展情况

当前，元宇宙整体还处在探索期，相关技术、产品、平台和应用还需要进一步整合和发展，但关键领域产业布局趋势已经逐渐明朗。

在硬件方面，扩展现实设备、算力芯片和网络基础设施等已成为元宇宙产业关注重点。其中，扩展现实设备已经成为元宇宙最直接入场券，以美国为主的国外厂商占据先发优势，市场占比较高。2021年第一季度脸书旗下的Oculus出货量已占全球VR/AR头显出货量75%，同比增长117%，行业呈现向头部集中的趋势。以GPU为代表的算力正逐步向元宇宙计算核心发展，英伟达在该领域具有绝对的话语权和主导权，在前四大云供应商亚马逊、谷歌、阿里巴巴、Azure中97.4%的AI加速器实例部署了英伟达GPU，同时英伟达主导着人工智能算法训练市场，全球Top500超级计算机中近70%使用了英伟达GPU。以网络为代表的基础设施成为保障沉浸式体验的关键，在传统无线方式不能解决元宇宙终端设备需求的背景下，5G和新的WIFI标准不断出现，华为5G通信天罡基站和巴龙5000等都在向该方向发展。

在核心技术上，人工智能、区块链等成为了重要元宇宙的重要支撑。其中，人工智能已经成为驱动元宇宙的内在动力，美国围绕人工智能基础框架开展了大量的研究与应用。谷歌、脸书、亚马逊、微软等科技巨头纷纷布局基础算法框架，开发了TensorFlow、MXNet、CNTK、Caffe等重要产品，其中谷歌所研发的TensorFlow已被大量人工智能项目采纳。国内，作为最早“All in AI”的公司，百度

在 AI 领域的积累深厚，基于百度大脑的 VR2.0 产业化平台为产业提供全栈式行业场景应用开发，并提供全链路元宇宙内容生态和 AI 支撑下的元宇宙新业态。区块链技术作为元宇宙数字身份和数字资产的支撑也获得了飞速发展。据 IDC 数据显示，我国区块链市场规模已达 4.68 亿美元，是全球的第二大区块链支出单体。随着产业动能的释放，我国区块链产业链条进一步完善，产业链上、中、下游持续补充，形成了具备成熟度与完备性的全产业链链条，在数字经济带动下，应用领域企业飙升，约占据我国区块链产业链条 61.37%，同比增加 24.48%。

在应用方面，当前游戏和社交领域仍是元宇宙应用的主要方向。国外作为元宇宙的发起方，在应用方面积累了大量的优质企业，产业发展优势明显。我国科技企业在元宇宙应用领域迅速跟进，以腾讯、字节跳动、华为、阿里巴巴等为代表的巨头整合业务优势迅速布局，以米哈游、莉莉丝等为代表的游戏企业升维游戏场景靠近虚拟世界，游戏公司中青宝、宝通科技、汤姆猫等宣布开发元宇宙概念游戏。整体来看，得益于强大的基建能力及人口规模优势，我国元宇宙科技企业在后端基建、人工智能、内容与场景创新等方面的潜力巨大。

在国家整体层面，美国重视基础研究，尤其在底层架构方面，整体领先水平较高。中国掌握用户基数与社交基

因优势，在后端基建和人工智能领域持续布局和发力。日本有丰富的 ACG（动画 Animation、漫画 Comic、游戏 Game）产业基础，其应用已逐步由游戏向其他场景延展。韩国元宇宙由政府引领，应用场景主要由“偶像经济”驱动，并在“虚拟数字人”上有一定技术领先。

2. 元宇宙主要特性

元宇宙主要特点是帮助人们实现在虚拟世界的数字化身，进而借助扩展现实等人机交互手段实现虚拟世界和现实世界的融合。从元宇宙数字化身的角度上看，**元宇宙主要具备时空融合性、多元共生性、价值融通性、自主多样性四个主要特性。****时空融合性**是指元宇宙不仅完成对现实世界的数字拓展，更是在时间和空间上提供了多种发展的可能，时间和空间高度统一，借助元宇宙，用户可发展多个时间线，体验不同空间、不同场景下的生活，未来可能性大大增加。**多元共生性**是指元宇宙可将多重身份进行统一，实现虚拟身份和现实身份的绑定，化身将成为元宇宙身份的主要特点。**价值融通性**是指元宇宙实现了现实世界和数字世界的价值流转和融合，新型经济体系将会出现，现实世界的重要数据会转变为重要的数字资产，在虚拟世界中的数字化创造也可能转为现实财富。**自主多样性**是指元宇宙给予了用户充分的自主和自由，用户可自由掌握自身身份信息的应用范围，选择自己想要置身的场景。

3. 元宇宙发展趋势

元宇宙发展趋势可以从虚实融合、生态连通、人机交互和信息交互四方面描述。**一是虚实融合性将不断加强。**元宇宙是现实世界和数字世界的总和，从世界融合的角度上看，元宇宙可能会经历独立发展、虚实结合和虚实相生三个阶段。在独立发展阶段，数字世界是现实世界的附属，两者之间不存在太多的交互。在虚实结合阶段，现实世界与数字世界交互频繁，两者相互影响。在虚实相生阶段，数字世界与现实世界高度融合，数字世界在时间、空间、经济等体量上逼近甚至超越现实世界，出现新的社会形态。**二是应用覆盖范围不断扩大。**从应用发展趋势看，元宇宙要经历自发阶段、领域互联阶段和全连接阶段。在初始阶段，一些相互独立的应用零散出现，然后应用开始按照领域、应用目标等不断聚合，形成领域生态，最后实现全面互联，形成元宇宙应用生态。**三是人机交互体验不断提升。**从交互技术发展上看，元宇宙将推动现有文字、视频等传统交互向以扩展现实为主的音视频沉浸式交互转变，最终可能涵盖甚至超越人体五感的全方位沉浸式交互，实现真正意义的元宇宙交互模式。**四是信息交互方式向去中心化转变。**从信息交互理念上看，元宇宙将推动互联网从信息只读的网-人交互、人-人交互向以智能化的人-网交互为主的 web3.0 迈进。

目前，元宇宙还在初期阶段：**一是核心关键技术有待进一步发展**，如扩展现实的体验上尚未完全解决人机交互的根本问题，沉浸式体验有待加强，人工智能技术仍旧停留在模式识别阶段，元宇宙迫切需要的意识层面交互还尚未实现，区块链技术也面临着性能、安全、去中心化“不可能三角”问题。**二是基础设施能力与理想需求还存在很大差距**，元宇宙的发展对基础设施提供更高能力要求，以算力为例，元宇宙的算力需求预测过千甚至超万 EFLOPS，根据 IDC 统计，2020 年全球的算力只有 429EFLOPS，两者存在巨大的缺口。**三是应用内容还需进一步丰富**。元宇宙虽在游戏、社交等领域取得一定进展，但能够代表行业突破的现象级应用尚未出现，应用的广度和深度有待加强，标杆应用有待进一步培育。

（二）工业元宇宙基本内涵

李伯虎院士指出“工业元宇宙是指在新发展理念指引下，在新一代人工智能技术引领下，借助新时代各类新技术群跨界融合，实现工业领域中‘人、虚拟空间与现实空间’虚实映射/交互/融合、以虚促实、以虚强实的工业全要素链、全产业链、全价值链（三链）智慧、协同、开放、服务、互联的**复杂数字工业经济系统**”。

工业元宇宙是元宇宙重要应用领域，是以扩展现实、数字孪生、内容生成等为代表的新一代信息通信技术与实

体工业经济深度融合的新型工业生态。工业元宇宙与元宇宙的关系如图 2 所示。

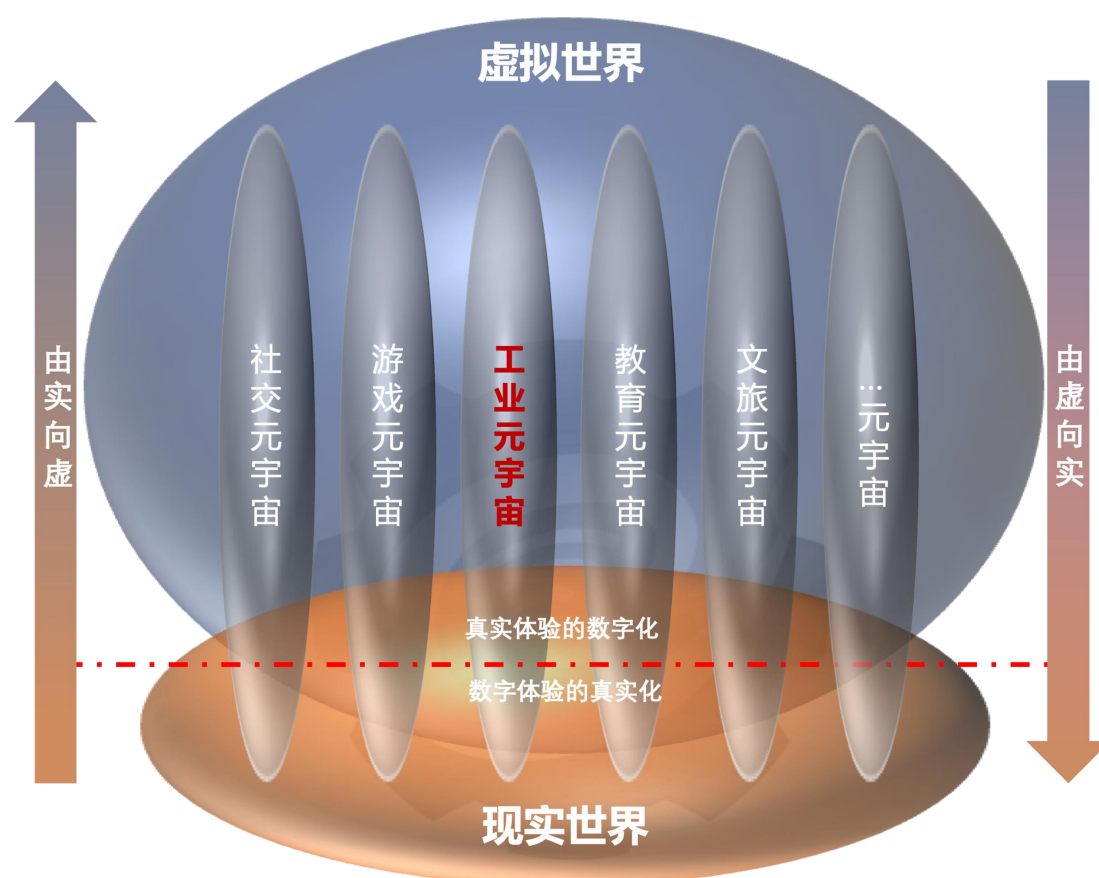


图 2 工业元宇宙与元宇宙

与消费场景下超现实的内容创造和用户体验感相比，工业元宇宙构建的场景和对象是一个确切物理系统，所要解决的问题、组织关系和任务都是明确的。得益于工业领域的坚实技术基础和明确的工业场景，未来工业元宇宙将可能是元宇宙优先落地应用的方向。

二、工业元宇宙可能引发的变革

工业元宇宙是元宇宙在工业领域的落地与拓展，是新型工业数字空间、新型工业智慧互联系统、数字经济与实

体经济融合发展的新型载体。工业元宇宙为制造业数字化转型、实体经济高质量发展、企业智慧化管理等方面提供更大创新空间，并引发更加广泛的工业变革。

（一）时空交融的平台化设计

工业元宇宙可以通过模拟产品的设计、生产和使用环境，对产品、产品零部件之间的作用方式进行更加直观、精准的模拟和展示。设计研发阶段，产品设计者们可以通过工业元宇宙构建的虚实融合环境，打破协作时空边界，实现协作体验和效率大幅度提升。设计者还可以通过 VR 或 AR 眼镜，沉浸式的感受设计效果，通过“真实”的管理实验，完成各种人机工程的设计及优化。

以宝马新型数字工厂为例，借助英伟达 Omniverse 平台，设计人员可以在全球范围内获得 31 座工厂的各类数据，借助平台的协作工具，设计人员可以无视距离和时间的限制，达成全球范围内的高效协作，有效解决了设计规划耗时、产品无法兼容和数据更新滞后的问题。设计者可以在设计阶段体验建成后的真实工厂，进而可以对工厂进行优化设计，并进行模拟生产。

（二）虚实结合的智能化制造

工业元宇宙将可以通过在虚拟世界中复刻、聚合现实世界生产资源，提升全球化生产协同能力和水平，构建全

球“大生产线”模式。工业元宇宙中，时空界限变得模糊，可以通过构建亲临现场感的远程作业模式，提升生产经营对作业环境的实时感知，避免生产现场带来的人身安全问题，还可以实现多用户沉浸式远程生产监控、作业操作指导等。

以微软 Azure 平台为例，借助内部强大的技术优势，微软将软硬件产品整合为“元宇宙技术栈”，并通过增强现实技术创建一个能复刻现实世界的数字化工作空间，从而加快维修和启动新的生产线等流程。目前，日本川崎重工已成为微软工业元宇宙业务的新客户，工厂员工将佩戴 HoloLens 全息眼镜开展机器人制造、设备维修等工作，实现供应链的透明化管理。

（三）沉浸体验的个性化定制

工业元宇宙可以在虚拟世界中构建虚实融合、开放透明、可直观体验的产品全生命周期情景视图，吸引更多人以各种形式参与到产品生产中来。用户可以在工业元宇宙构建的虚拟世界中，参与产品设计，观摩甚至参与产品生产过程，进行产品虚拟体验，并随时可以反馈产品改进或优化建议，也可在上述过程后直接进行产品消费并追踪产品物流进程、进行产品使用反馈。

以服装生产企业的个性化定制为例，通过在生产中应用 3D 量体系统、手持式 3D 扫描等新技术，实现快速人体

建模和数字化量体，根据用户需求建立精准的“人-号-型”对应关系，同时用户可全程监控过程生产，实施跟踪产品的生产进度，并根据实际生产情况进行反馈来进一步明确定制需求，从而实现了服装的个性化定制。

（四）全局可视的网络化协同

工业元宇宙可进一步深化产业链供应链组织模式变革，产业链供应链上的企业和合作伙伴可以在虚拟世界中进行协同设计、协同生产、协同服务，协同体验更加直观、高效，并且通过虚实融合、3D展示、沉浸体验，精准展示完整的协作进程和协作视图，进而促进资源共享、能力交易以及业务优化配置。

以百度天工物联网平台为例，平台通过传感器连接所有物理资产，并将物理世界的数据和状态传送到元宇宙应用数字程序的数字虚拟空间，结合百度地图的海量数据处理能力和物联网的时间聚合分析能力，构建一整套时空大数据系统，并采用时空时序数据库来用于存储和管理时间序列数据及地理空间数据，从而实现数据治理及共享，使得需要结合空间与时间的应用落地就会变得简单，提升了工业协同效率。

（五）虚实共生的服务化延伸

工业元宇宙可以通过对现实世界的映射、化身等技

术，支撑企业打造多种虚拟化形象、虚拟场景，打破时空界线与用户进行更高效的交流，更精准的获取用户产品使用信息。企业产品客户通过 VR、AR 设备，可以实时看到产品操作流程和使用要求，从而有效降低培训难度，减少操作失误率。企业设备供应商通过 AR、VR 进入虚拟工厂，可以获取更精确的情景信息，加快故障定位、原因排查和故障修复。

以百事可乐的 AR 生产支持为例，在 AR 技术未引入前，百事可乐位于南非德班的 Prospecton 工厂需要员工掌握四种以上的语言才能保证工作的顺利进行，这对一线员工带来了极大的挑战。借助 AR 技术，一些不具备外语能力的当地工人，就可以在车间接受培训和开展工作，同时结合 AR 眼镜内置的 Zoom 应用，就可实现居家办公人员与现场人员远程沟通，让工人可以便捷开展工作交流，最终提升生产效率。

（六）全息洞察的数字化管理

工业元宇宙可以在虚拟世界中实时展示智能工厂的建设、运营管理、生产设备和产线运行状态，更加直观、便捷地优化、创新乃至重塑企业相关活动。在智能工厂建设前期，建设与现实智能工厂的建筑结构、产线布置、生产流程、设备结构一致的虚拟智能工厂，对产能配置、设备结构、人员动线等的合理性进行提前验证。在智能工厂运

行阶段，可以在虚拟智能工厂中进行全场景、全环节、全要素、全过程的 3D 化直观展示、模拟和预测分析，极大提升经营管理效率。

以 ALVA Systems 打造的基于 AR 数字孪生的研发量产研究中心为例，中心将数据分析以及虚拟仿真等过程“搬”到现场，管理人员能够将数字模型投放在任意平面，进行区域、产线、设备等不同层级的内容信息查看、触摸、抓取、移动、缩放等 AR 交互操作，实现远程的生产状态监测与运维管理。

三、工业元宇宙概念框架和发展阶段

（一）概念框架

工业元宇宙作为元宇宙的重要应用场景，主要目标是实现工业现实世界到虚拟世界的映射，并实现工业生产在虚拟世界中的新发展。工业元宇宙的概念框架如图 3 所示。

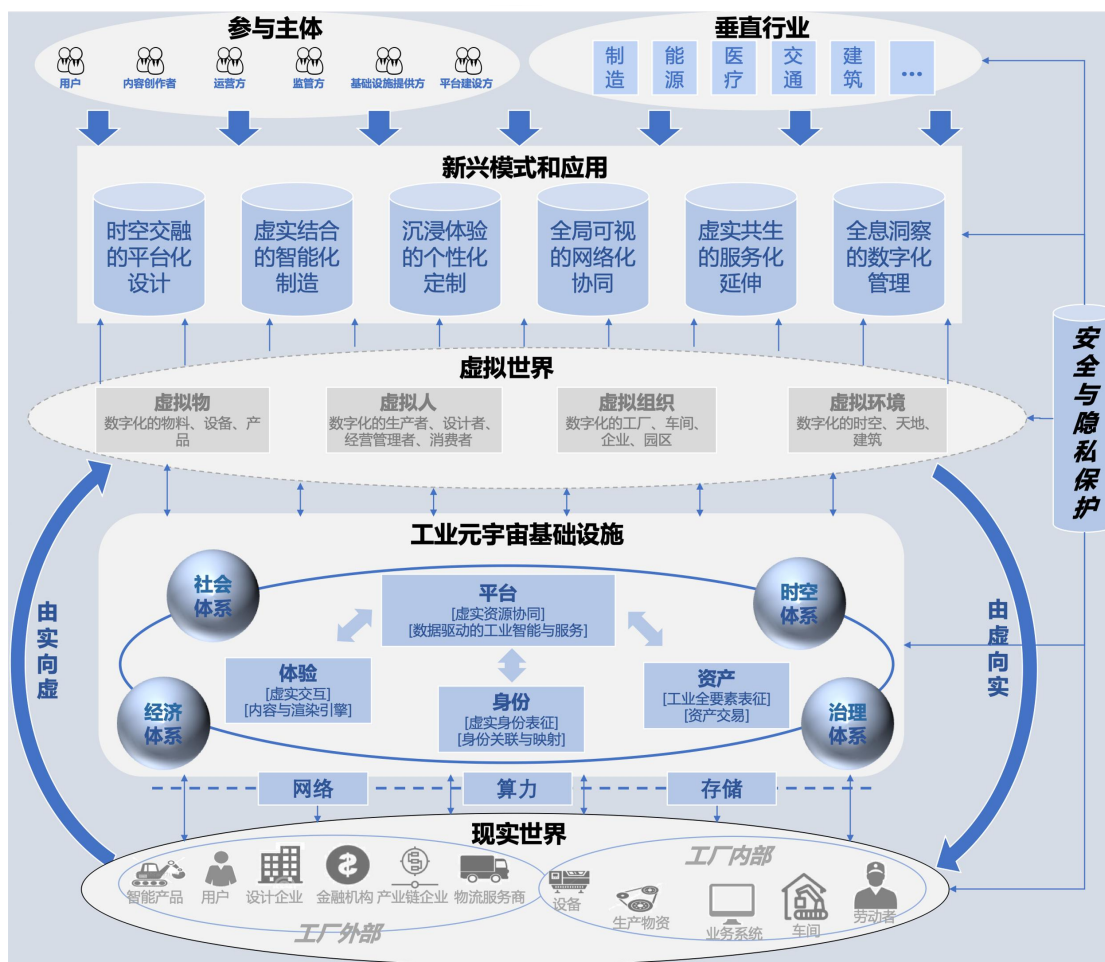


图 3 工业元宇宙概念框架

现实世界。除工业生产外，现实世界还包含对工业全要素、全产业链、全价值链的全面感知。其中，全要素包括人、机、料、法、环、质，全产业链包括采购、生产、物流、销售等多个环节构成的完整的产业链，全价值链包括所有参与者和生产销售等活动的组织及其价值、利润分配。现实世界通过对全要素、全产业链、全价值链的数字化，构建了工业元宇宙坚实的数据基础。

基础设施。工业元宇宙在网络、算力、存储等关键信息基础设施的支撑下，进一步打造体验、身份、资产和平

台等具有工业元宇宙特色的基础设施，形成社会、时空、经济 and 治理四大体系。其中，体验基础设施主要聚焦虚实交互和内容与渲染引擎的打造，是工业元宇宙中虚实交互的关口，也是用户进入虚拟世界的关键。身份基础设施主要实现虚实身份的表征并实现身份的关联与映射，是支撑工业元宇宙中“化身”实现的重要基础，是实现工业元宇宙内部社会关系的重要支撑。资产基础设施主要是将工业全要素进行资产化，实现工业全要素的表征，并支撑表征下的工业数字资产的交易。平台基础设施支撑工业元宇宙中的虚实资源协同，面向整个体系提供数据驱动的工业智能与服务，支撑体验、身份、资产之间的关联交互，支撑面向工业生产经营管理的新型社会、经济、时空和治理体系的构建，支撑虚拟世界构建和各种工业元宇宙创新应用支撑。工业元宇宙构建在整个元宇宙社会、经济、时空和治理基础之上，适配新型工业化需求并持续进行迭代演进，其中时空体系和社会体系通过虚拟世界实现对现实世界的数字拓展，通过分布式标识、数字化身等技术赋予用户更强的身份自主能力，通过现实世界的数字孪生和虚拟原生构建更加丰富多彩的虚拟世界，并跨越时空限制；经济体系既涵盖又可以超越现实世界的经济体系，甚至在虚拟世界中构建全新的经济体系并影响现有经济体系，如创作者经济等；治理体系为元宇宙安全可靠及平稳运行的制

度和规则基础。

虚拟世界。以现实世界映射而来的镜像为基础，以工业元宇宙基础设施为支撑，在社会、时空、经济 and 治理体系下，构建包含虚拟物、虚拟人、虚拟组织和虚拟环境等数字化要素的虚拟世界。其中，虚拟物主要是对现实世界生产资料的映射，包括数字化的物料、设备和产品；虚拟人主要是对工业生产参与者的映射，包括数字化的生产者、设计者、经营管理者 and 消费者；虚拟组织主要是对生产主体的映射，包括数字化的工厂、车间、企业和园区；虚拟环境主要是对生产环境的映射，包括数字化的时空、天地和建筑。未来，虚拟世界将成为工业元宇宙时代进行工业生产经营管理的重要载体。

新兴模式和应用。工业元宇宙借助虚实结合，实现了对工业现实世界的极大扩展，消除时空限制并实现物理资源、数字资源在更大范围内的整合调度，同时借助工业元宇宙带来的交互手段、展现方式、协作模式以及社会体系、经济体系、治理体系的变革，促进平台化设计、智能化制造、个性化定制、网络化协同、服务化延伸、数字化管理六大典型应用模式进一步创新发展，实现设计、生产、制造、服务、管理的全面提升。

在此基础上，用户、内容创作者、运营方、平台建设方、基础设施提供方和平台监管者等参与主体，围绕工业

元宇宙基础共性以及制造、能源、医疗、交通等行业领域，开展创新探索，推进新型工业化体系建设与发展。

（二）发展阶段

作为元宇宙的重要应用场景，工业元宇宙发展遵循元宇宙发展的一般规律，在虚实融合、生态连通、人机交互和信息交互等方面有类似的发展脉络，但由于工业应用的复杂性及与生产绑定的耦合性，工业元宇宙的发展还具有其自身的特点。

在初期发展阶段，现有现实世界的生产过程和需求结构尚未改变，虚拟物、虚拟人、虚拟组织和虚拟环境等的构建需要结合实际需要和场景逐步展开，现实世界与虚拟世界虚实结合及虚实融合的程度、深度和广度有待培育，并受限于工业元宇宙相关支撑体系的发展、社会经济治理体系的发展以及工业场景的复杂度，工业元宇宙聚焦“单点”探索。在快速发展阶段，虚拟世界变得更加真实感，并深入参与到改造现实世界的生产过程。工业元宇宙相关的技术、交互设备、基础设施等支撑体系较完善，设计、生产、制造、服务、管理等生产经营活动加速向虚拟世界进行映射或迁移，出现大量可复制可推广的创新应用模式，创新社交模式和经济活动推动治理体系变革。在成熟发展阶段，工业元宇宙将工业生产的虚实统一。虚拟世界和现实世界之间实现完整映射和无缝交互，人们借助虚实

融合参与到生产经营的各个环节。

四、工业元宇宙支撑体系

（一）总体视图

工业元宇宙的发展需要构建强有力的支撑体系，涉及支持工业元宇宙发展的新型基础设施建设、技术产品创新、产业生态培育以及配套政策法规建立等。结合当前业界对工业元宇宙的研究与探索，我们给出了工业元宇宙的支撑体系的总体视图如图 4 所示。



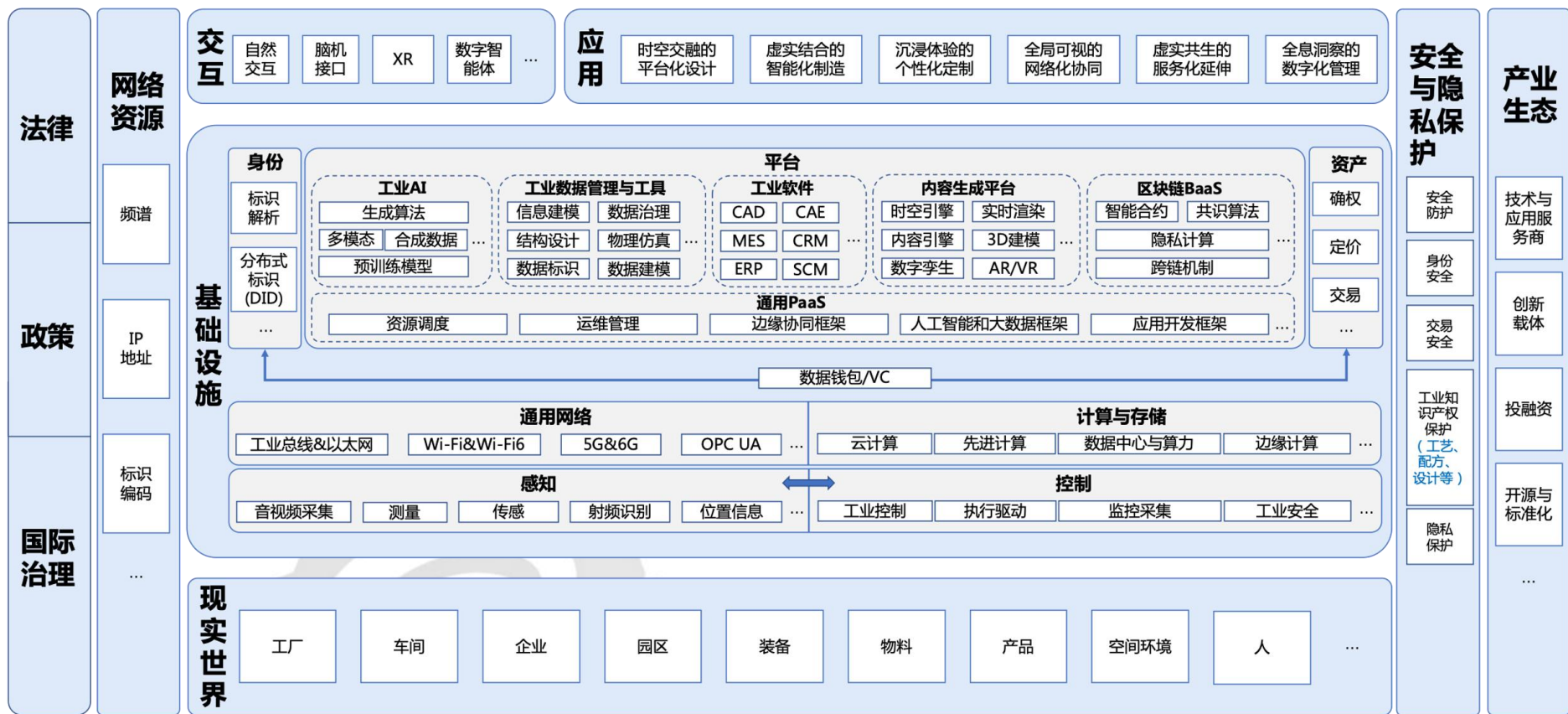


图 4 工业元宇宙支撑体系

（二）基础设施

1. 感知与控制

感知是工业元宇宙重要的数据来源和运行的数据基础，通过音视频采集、测量、传感、射频识别、位置信息采集等数据采集手段，实现对工业生产经营活动的全方位感知。控制将工业信息与控制系统、虚拟世界的控制信息和指令作用到现实世界，改变现实世界资产运行状态，使得虚拟交互界面下用户可以实现对生产经营活动的操控。

2. 网络、计算与存储

工业元宇宙带来的数据量爆炸式的增长，全息通信、虚实互动、数字资产交易、去中心化交互等需求，以及塑造支撑工业元宇宙发展的社会体系、经济体系、时空体系和治理体系等，都对现有信息基础设施提出跨越式的发展要求，网络带宽、传输时延、算力等方面需求的持续提高也对通信技术和基础设施的建设带来了巨大的挑战。通信技术中，工业以太网、5G/6G、Wi-Fi 6 等为代表的网络技术提供更可靠、快捷、灵活的数据传输能力，并且需要适应工业元宇宙应用需求发展，如虚实融合场景下的高实时应用要求网络毫秒级时延。边缘计算、云计算、算力中心等计算技术为不同工业场景提供分布式、低成本数据计算能力，特别是区块链等分布式技术应用以及数字化身、数

字资产交易等，对网络计算能力和存储能力都将带来巨大挑战。

3. 平台

平台为工业元宇宙的构建、运行提供通用能力支撑，通过聚合虚实数据、虚实资产、虚实资源、模型工具、数字身份、时空状态等信息，提供海量数据分析、时空建模、内容创作、资源协同、资产交易、工业控制、应用开发等功能，是工业元宇宙的核心。

（1）工业人工智能

工业人工智能（AI）是建设和驱动工业虚拟世界、实现虚实联动的关键。**虚拟世界的创造需要 AI**，在工业元宇宙中，用户突破了时间和空间限制进行交流，但虚拟场景的搭建需要进行大量工作，需要借助 AI 技术打造智能“大脑”来创新内容，降低用户内容创作门槛。**虚拟世界的“数字人”需要 AI**，化身是工业元宇宙提供用户的主要功能，数字化身除具备与现实对应的数字身份外，还存在一些专为虚拟场景服务的“数字人”，这些角色需要 AI 技术赋予一定的智能来完成相应的职责。**工业元宇宙的自动化管理需要 AI**，自治是工业元宇宙运行的关键能力，在应对各种突发状况时，工业元宇宙能够进行自动调整，优化自身行为，保障自身的运转。工业 AI 未来会在生成算法、多模态、内容生成以及预训练模型等方面持续发展。

（2）工业数据管理与工具

工业数据管理与工具为工业元宇宙实现海量数据分析、管理、治理以及在此基础上形成的智能决策提供重要支撑。通过对现实世界和虚拟世界中**工业生产**、经营、管理等各类**数据的汇聚**，借助数据建模、数据标识、数据治理等工业模型与数据科学，并与工业人工智能技术结合，构建工业元宇宙数据体系，推动工业数据的知识化和资产化，形成更深度更精准的数据洞察、分析预测、决策反馈和可视化展示，并作用于现实世界和虚拟世界中的工业活动，为工业元宇宙的自动化、智能化运转提供基础。

（3）工业软件

工业软件为工业元宇宙提供工具组件，如 CAD、MES、ERP 等，使用流程优化、仿真验证等核心技术将工业知识进一步显性化，支撑工厂、产线虚拟建模与仿真、多品种变批量任务动态排产等先进应用。未来需要与 3D 呈现、数字孪生、虚实交互等技术结合，支撑工业元宇宙中各种虚实结合/虚实融合的生产经营管理活动。

（4）内容生成平台

内容生成平台为工业元宇宙建立现实世界的数字映像、打造虚拟世界、构建数字化身或数字人以及虚实交互提供文字、图片、音视频等内容生成服务，包括时空引擎、内容引擎、实时渲染等工具，当前人工智能生成内容

（AI-Generated Content，AIGC）正在成为元宇宙内容生成的重要解决方案。工业元宇宙中，内容生成平台需要和工业活动需求衔接起来以加速实现产业落地。

（5）区块链 BaaS 平台

区块链技术能够赋予数据难以篡改的特性，进而支持数据/资源/资产的跨平台管理和流通，用户真正拥有数字资产，是工业元宇宙打造可信价值网络 and 新型经济体系的基础底座。区块链 BaaS 平台可以提供智能合约、共识算法、隐私计算、跨链机制等服务，促进区块链在工业元宇宙中的应用，促进各种虚实数据/资源/资产在不同制造主体之间的流转与协作共享，加速重构现有的业务逻辑和商业模式。

（6）通用 PaaS 平台

通用 PaaS 平台通过云计算、大数据等技术为工业元宇宙平台提供系统资源调度与运维管理等基础共性支撑。。

4. 身份与资产

工业元宇宙将是一个持久运行、虚实融合的世界，价值性是其存在的重要基础。资产的确权、定价和交易是激发数据要素、数字原生创新、虚实资源/资产进行流通进而达到经济作用的基础保障，特别是面向工业生产经营活动尤为重要。资产的确权、定价和交易除了需要政策保障、行业自律等，还需要依赖区块链等信息化手段和机制，既

需要考虑虚拟世界对现实世界的价值延伸，还需要考虑与现实世界的经济体系衔接。

数字身份是现实世界的人/机/物及虚拟世界中的人/机/物在工业元宇宙的唯一表征，涉及数字身份的唯一标识、关联信息以及身份验证、关联信息查找与定位等，工业互联网标识解析体系以及以分布式标识代表的新型标识体系将提供重要基础支撑，同时还可以借助数字钱包技术实现数字身份与数字资产的绑定以及在此基础之上数字资产交易。借助数字化身等技术，既可以支撑企业打造多种虚拟化形象、虚拟场景，还可以吸引人们打破时空界线，借助数字化身参与到工业生产经营活动。

（三）交互与应用

工业元宇宙将带来全新的人机交互模式和体验，借助自然语言、扩展现实、脑机接口、数字智能体等交互技术和设备，可以实现虚实结合或虚实融合，并且可以根据工业场景定制开发所需要的交互环境，使交互体验更加真实、流畅。工业元宇宙发展，对交互设备在光学、芯片、传感、感知交互等技术能力水平不断提出更高要求，包括稳定性、精确性、实时性、用户友好度、更低成本等。交互形式如脑机接口正在不断创新发展，交互范围也由传统的人人交互向人与数字智能体的混合交互发展。

应用方面，工业元宇宙将赋能千行百业，通过虚实结

合/虚实融合促进设计、生产、制造、服务、管理各环节的创新发展。

（四）其他支撑

当前工业元宇宙还处于发展初期阶段，但对现有社会经济体系带来新的冲击和挑战，需要结合工业元宇宙发展不断完善法律、政策和国际治理，以确保工业元宇宙规范健康发展。此外，还需要频谱、IP 地址、标识编码等关键资源保障。安全与隐私保护为工业元宇宙发展的重要前提，以区块链为代表的分布式技术应用、数字化身模式、内容生产以及数据/资源/资产的跨主体、跨平台流通，对工业元宇宙的安全与隐私保护都提出了更高要求，涉及安全防护、身份安全、交易安全、知识产权保护与隐私保护等，并且需要考虑隐私计算等技术应用以保障数据的全生命周期安全可信、用户有能力自主控制数据、支持各方进行分布式协同治理。工业元宇宙的发展离不开产业生态培育以及配套创新环境和公共服务能力建设，包括创新载体、投融资、开源与标准化、技术与应用服务商等。

五、工业元宇宙推进建议

（一）引导应用创新探索

结合工业元宇宙相关技术产品成熟度情况，引导各行业结合自身发展基础和发展需求，围绕设计、生产、制

造、服务、管理等环节，选择典型场景，开展工业元宇宙应用探索，以应用促发展。

（二）加快关键技术创新

加强扩展现实、人工智能、区块链、内容生成等新一代信息技术研发投入，基于工业需求、虚实结合/虚实融合需求开展融合性技术创新。加强工业知识的挖掘与转化。注重创新载体建设，为工业元宇宙技术创新和成果转化提供平台和环境。

（三）培育关键产品和产业链

工业元宇宙对相关软硬件产品的可靠性、精准性要求更高，可以结合落地难度相对小场景，如维修、培训等，开发工业元宇宙产品，实现工业元宇宙的快速落地，促进产品迭代升级。同时建立产品目录，围绕重点产品锻造产业链。

（四）加强基础设施建设

目前全球都在加速构建面向信任和价值传递的新型基础设施。面向工业元宇宙未来发展，持续推动工业互联网网络、标识、平台、安全基础设施建设，同步推进 6G、新型标识、工业元宇宙平台、隐私计算等能力建设与应用，快速构建支撑工业元宇宙发展的基础设施。

（五）探索监管机制

工业元宇宙将带动区块链等分布式技术、数字智能体与数字化身、原生虚拟资产、人工智能生成内容等快速发展，同时也带来分布式系统监管、企业数据与活动保护、虚拟资产炒作、生成内容知识产权保护等系列监管挑战，需要结合工业元宇宙发展提前研究可能的机制和手段。

六、发展展望

工业元宇宙通过打造与现实工业经济映射和交互的虚拟世界，构建围绕产品、企业自身、企业上下游、消费者乃至整个工业生态体系虚实共生环境下智能高效协作闭环，推动工业向全息智能生产经营管理的更高阶段发展。当前，工业元宇宙仍处发展初期，网络传输能力、内容引擎开发、应用场景创新、虚实映射与交互等方面还面临很多限制，工业元宇宙应用的实时性、交互感、沉浸感和真实感仍有待提高，特别是面向制造过程孪生化的核心业务和应用系统相对较少，工业元宇宙离落地应用仍有较大差距，但工厂数字孪生、产品沉浸式体验、AR/VR 培训等等应用已经展示出了成效。未来，随着应用探索和技术创新不断展开，工业元宇宙将逐渐走向成熟。