

人形机器人

专题三之执行器系统：核心部件，顺势启航

执行器是人形机器人硬件系统的关键部件。近些年的研究和应用主要围绕结构设计、减速器、控制方式等方面。技术方案经历了从刚性到弹性，再到准直驱的发展，集成度、控制精度逐步提升，能量损耗逐步降低，对减速器传动比需求逐步减小。目前刚性执行器方案成熟度高、控制精度高，成为人形机器人执行器的主流技术方案。准直驱方案集成度高、能量效率高，在人形机器人、四足机器人等领域应用前景可观。

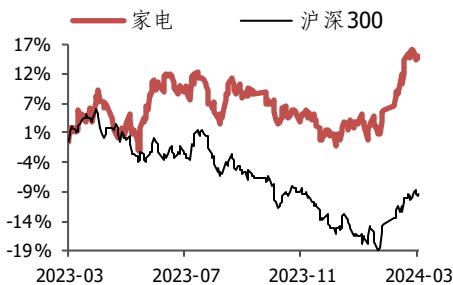
电机、减速器、丝杠、编码器、力传感器是核心零部件。1) 电机：执行器系统的“血管”。人形机器人主要采用集成度高、运动控制精度高、扭矩输出效率高的无框力矩电机。人形机器人的普及将带动无框电机市场规模增长。2) 减速器：电机和传动装置之间的桥梁。旋转执行器普遍采用体积较小的谐波减速器；直线执行器通常选择高负载的 RV 减速器或精密行星减速器。谐波减速器、RV 减速器技术发展依赖于专业化生产设备和材料等，目前日本哈默纳科、纳博特斯克处于领先地位。3) 丝杠：直线执行器的传动装置。受益于机器人等高端制造领域快速发展，高负载的行星滚柱丝杠具备较大发展潜力。目前瑞士 Rollvis、GSA，瑞典 SKF，美国 Exlar、Moog 等企业处于领先地位。4) 编码器：驱动信息的反馈装置。常用于机器人的有光电编码器、磁编码器。目前光电编码器技术更成熟，更达的精度更高。磁编码器理论成本更低，未来前景可观。全球来看，欧美日韩占据主要市场，奥普光电等国产品牌快速崛起。5) 力传感器：电机输出力矩的反馈装置。六维力传感器能够检测最完整的三维空间力/力矩，是当前研究的重点。其弹性结构体结构设计是技术突破的关键。目前国内仅有宇立仪器、坤维科技等少数企业能够实现量产。

投资建议：人形机器人有望先在工商业普及，逐步拓展至家用、公共领域，发展成为千亿美元级蓝海市场。执行器作为价值量占比最高的部件，有望直接受益于人形机器人的普及。相关标的有：1) 总成：三花智控、拓普集团；2) 电机：步科股份、昊志机电；3) 减速器：哈默纳科、纳博特斯克、绿的谐波、双环传动、中大力德；4) 丝杠：鼎智科技、恒立液压、贝斯特；5) 编码器：奥普光电；6) 力传感器：柯力传感。

风险提示：技术研发不确定性风险、降本进程不及预期、商业化落地不及预期、三方数据失真风险

强于大市（维持评级）

行业走势



作者

分析师 荣泽宇

执业证书编号：S1070523040002

邮箱：rongzeyu@cgws.com

分析师 刘鹏

执业证书编号：S1070520030002

邮箱：liupeng@cgws.com

联系人 陈羽桦

执业证书编号：S1070122080057

邮箱：chenyuehua@cgws.com

相关研究

1.《人形机器人专题一：前景广阔，飞轮待启》

2023-11-27

2.《人形机器人专题二：发展意义重大，市场规模几何》

2023-12-06

内容目录

1. 执行器：人形机器人硬件系统关键部件	5
1.1 兼具精度和成本优势，电动执行器是首选动力方式	5
1.2 刚性执行器是主流方案，准直驱执行器前景广阔	6
1.2.1 刚性执行器：控制精度高，能量效率低	7
1.2.2 弹性执行器：功率调制好，控制方式相对复杂	8
1.2.3 准直驱执行器：控制方式简单，能量效率高	9
1.2.4 几种执行器的对比	10
1.3 特斯拉人形机器人执行器技术框架	10
2. 电机：执行器系统的“血管”	12
2.1 伺服电机：无刷、直流方案是主要发展方向	13
2.2 无框力矩电机：人形机器人普遍采用的电机类型	16
3. 减速器：电机和传动装置之间的桥梁	18
3.1 行星减速器：高精度系列可以用于人形机器人	21
3.2 谐波减速器：旋转执行器主流方案	23
3.3 RV 减速器：负载优势突出，高成本限制普及	25
4. 丝杠：直线执行器的传动装置	27
4.1 滚珠丝杠：常用于中大负载的工业自动化设备	27
4.2 行星滚柱丝杠：人形机器人传动装置的理想方案	30
5. 编码器：驱控信息的反馈装置	33
5.1 光电编码器：分辨率优势明显，技术成熟	34
5.2 磁编码器：兼具成本和精度优势，未来发展前景可观	36
6. 力传感器：电机输出力矩的反馈装置	38
7. 投资建议：前景广阔，本土化进程是关键	42
风险提示	43

图表目录

图表 1：执行器原理	5
图表 2：气压驱动机器人	5
图表 3：液压驱动机器人	5
图表 4：电机驱动机器人	6
图表 5：机器人执行器发展历程	7
图表 6：刚性执行器结构	7
图表 7：部分刚性执行器型号对比	8
图表 8：弹性执行器结构	9
图表 9：准直驱执行器结构	10
图表 10：几种执行器方案性能对比	10
图表 11：特斯拉 Optimus Gen2 执行器方案	11
图表 12：特斯拉 Optimus 旋转执行器方案	11
图表 13：特斯拉 Optimus 直线执行器方案	11
图表 14：伺服驱动系统工作流程	12
图表 15：电机分类	12
图表 16：步进电机结构示意图	13
图表 17：伺服电机结构示意图	13

图表 18: 步进电机和伺服电机性能对比.....	13
图表 19: 主要伺服电机类型的性能对比.....	14
图表 20: 我国伺服电机发展历程	15
图表 21: 我国伺服电机产业链.....	15
图表 22: 我国伺服电机市场规模	16
图表 23: 我国伺服电机市场格局 (2022 年)	16
图表 24: 无框力矩电机结构示意图.....	17
图表 25: 部分人形机器人电机方案.....	17
图表 26: 全球无框力矩电机市场规模	18
图表 27: 三种精密减速器性能对比.....	19
图表 28: 全球机器人领域精密减速器市场份额 (2022 年)	19
图表 29: 我国减速器市场规模.....	20
图表 30: 我国减速器产量.....	20
图表 31: 我国减速器销售均价.....	20
图表 32: 我国减速器市场份额 (2020 年)	20
图表 33: 我国精密减速器产品回差对比.....	20
图表 34: 国内外精密减速器产品传动效率对比	20
图表 35: 精密行星减速器结构示意图.....	21
图表 36: 某型号三级行星减速器材料选择.....	22
图表 37: 我国行星减速器市场规模	22
图表 38: 我国精密行星减速器市场份额 (2022 年)	22
图表 39: 谐波减速器结构示意图	23
图表 40: 谐波减速器工作原理.....	24
图表 41: 我国谐波减速器市场规模	25
图表 42: 我国谐波减速器需求量	25
图表 43: 我国谐波减速器均价	25
图表 44: 我国谐波减速器市场份额 (2022 年)	25
图表 45: RV 减速器结构示意图	25
图表 46: 我国 RV 减速器市场规模	27
图表 47: 我国 RV 减速器市场份额 (2022 年)	27
图表 48: 丝杠分类	27
图表 49: 滚珠丝杠结构示意图	28
图表 50: 滚珠丝杠内外循环方式	28
图表 51: 滚珠丝杠 JIS 精度划分标准	29
图表 52: 滚珠丝杠和滑动丝杠性能对比	29
图表 53: 我国滚珠丝杠市场规模	29
图表 54: 我国滚珠丝杠产量和需求量	29
图表 55: 我国滚珠丝杠市场价格	30
图表 56: 我国滚珠丝杠市场份额 (2021 年)	30
图表 57: 标准式行星滚柱丝杠结构示意图	30
图表 58: 主要行星滚柱丝杠类型性能对比	31
图表 59: 反向式行星滚柱丝杠结构示意图	31
图表 60: 循环式行星滚柱丝杠结构示意图	31
图表 61: 差动式行星滚柱丝杠结构示意图	31
图表 62: 循环式行星滚柱丝杠结构示意图	31
图表 63: 行星滚柱丝杠和滚珠丝杠性能对比	32
图表 64: 采购滚动功能部件应用行业分析	32

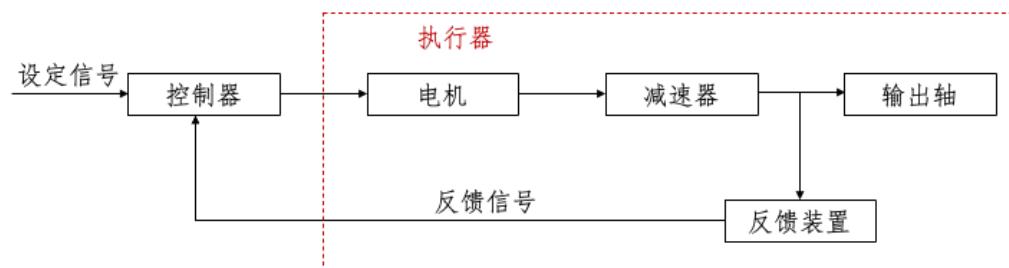
图表 65: 中高档滚动丝杠副结构分析	32
图表 66: IHS Market 对行星滚柱丝杠销售预测	33
图表 67: 全球行星滚柱丝杠市场份额 (2022 年)	33
图表 68: 多摩川编码器	33
图表 69: 主要编码器类型性能对比	33
图表 70: 光电编码器结构示意图	34
图表 71: 增量式码盘	34
图表 72: 绝对式码盘	34
图表 73: 部分用于码盘的光学树脂材料和玻璃的性能对比	35
图表 74: 磁阻式编码器结构示意图	36
图表 75: 霍尔式编码器结构示意图	36
图表 76: 磁编码器常用磁性材料	36
图表 77: 主要编码器用传感元件性能对比	37
图表 78: 海外主要编码器品牌地域分布	37
图表 79: 国内主要编码器品牌地域分布	37
图表 80: 力传感器结构示意图	38
图表 81: 主要力传感器类型的优缺点	38
图表 82: 六维力传感器结构示意图	39
图表 83: 六维力传感器弹性体结构设计方案汇总	40
图表 84: 我国应变式力传感器市场规模	40
图表 85: 我国应变式力传感器产量和需求量	40
图表 86: 人形机器人执行器系统相关标的	42

1. 执行器：人形机器人硬件系统关键部件

1.1 兼具精度和成本优势，电动执行器是首选动力方式

执行器（Actuator）是根据给定信号与阀门位置反馈量之间的偏差，通过微型控制电机运行，通过变速及执行机构输出位置，实现对阀门的自动调节。人形机器人关节执行器，也称为一体化关节，是机器人的关键部件，其技术水平直接影响人形机器人的发展。

图表1：执行器原理

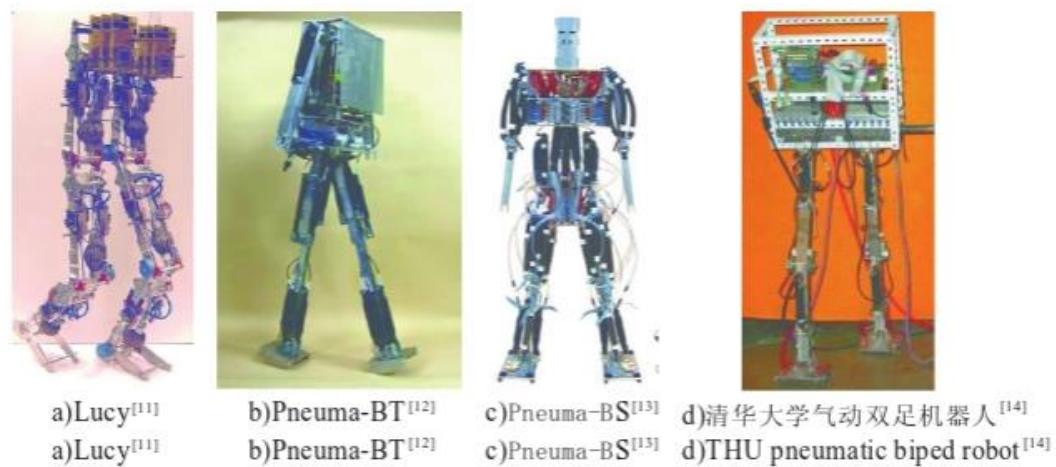


资料来源：《智能电动执行器关键技术的研究和开发（2012年）》，长城证券产业金融研究院

根据动力来源的不同，执行器可分为液压、气动、电机等。由于电机驱动方式具有成本低、控制精度高、密闭性好等特点，人形机器人执行器一般采用该驱动方式。

- 气压驱动：常见于点到点的控制。随着气动肌肉和气压伺服技术的发展，气压驱动逐渐被应用到人形机器人中。但是空气的可压缩性和延迟特性使得气压驱动方式难以实现精准控制，此外还具有能量效率低、气压出力小等缺点，故目前使用较少。

图表2：气压驱动机器人



资料来源：《液压驱动双足机器人及其动态平衡运动控制研究（2017年）》，长城证券产业金融研究院

- 液压驱动：不需要采用减速装置，驱动结构简单；同时还具备输出力大、功率重量比高的优点，故被用作早期阶段人形机器人的主要动力来源。美国波士顿动力公司发布的 Petman 和 Atlas 均采用液压驱动方式。但是液压驱动精度较低，制造和维修成本高，目前无法满足大规模商业化的需要，故逐步被电机驱动方式所替代。

图表3：液压驱动机器人



资料来源:《液压驱动双足机器人及其动态平衡运动控制研究(2017年)》,长城证券产业金融研究院

- ◆ 电机驱动: 具有控制精度高、成本低等优势, 是服务机器人、人形机器人首选动力方式。但是电机驱动的功率密度不如液压驱动, 在应用中往往需要搭配减速装置, 增大了回程间隙等误差; 同时也较难适应大负载、野外等场景。未来的发展方向主要是提高驱动系统的负载能力和柔性, 使其能够适应多元应用场景需求。

图表4: 电机驱动机器人



资料来源:《液压驱动双足机器人及其动态平衡运动控制研究(2017年)》,长城证券产业金融研究院

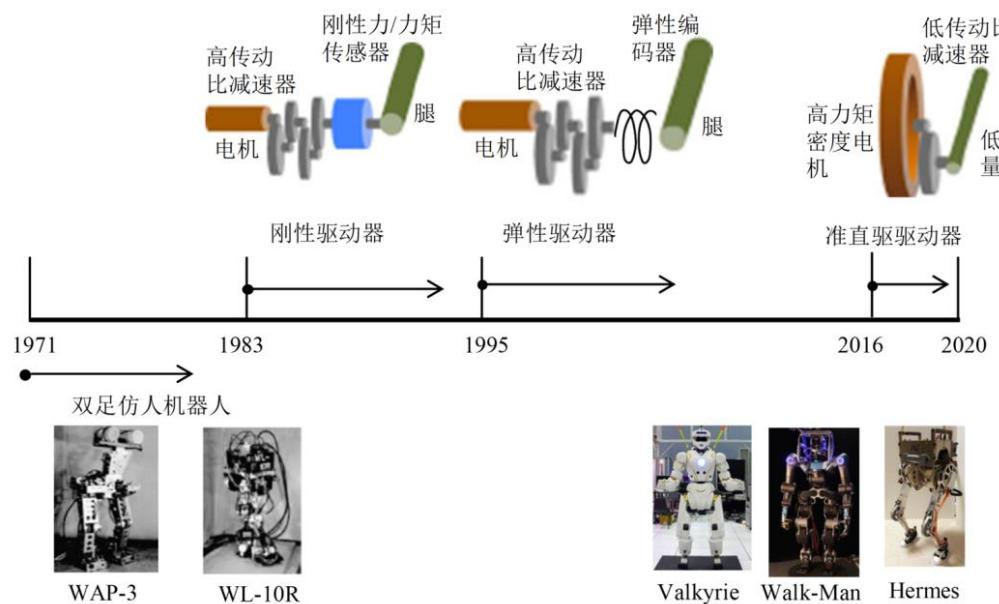
1.2 刚性执行器是主流方案, 准直驱执行器前景广阔

人形机器人电动执行器的研究和应用始于20世纪70年代, 技术迭代主要围绕结构设计、减速器、控制方式等方面。结构设计上, 执行器结构设计经历了从独立设计到和整机融合的发展, 技术层面经历了从刚性到弹性, 再到准直驱的发展, 集成度逐步提升。减速器上, 执行器用减速器经历了从大传动比到小传动比的演变, 制造难度逐步降低。控制方式上, 执行器控制方式经历了从位置控制到力位混合控制和阻抗控制的演变, 控制精度逐步提升、能量损耗逐步降低。

- ◆ 刚性执行器 (Traditional Stiffness Actuator): 1983年早稻田大学研究的WL-10R机器人使用刚性执行器TSA, 自此人形机器人开始广泛应用刚性执行器为关节动力源。该方案控制精度高、技术成熟, 目前也是人形机器人执行器的主流方案。
- ◆ 弹性执行器 (Series Elastic Actuator): 1995年麻省理工学院的Pratt等人提出了弹性执行器SEA的概念, 拉开了弹性驱动器研究的序幕。美国宇航局的机器人Valkyrie和意大利技术研究院的机器人Walk-Man都使用了弹性驱动器。

- ◆ 准直驱执行器 (Proprioceptive Actuator): 2016 年 Wensing 等提出了准直驱执行器 PA 的概念, 并将其应用于四足机器人 Cheetah 和双足机器人 Hermes, 准直驱执行器是最近几年研究的热点。

图表5: 机器人执行器发展历程



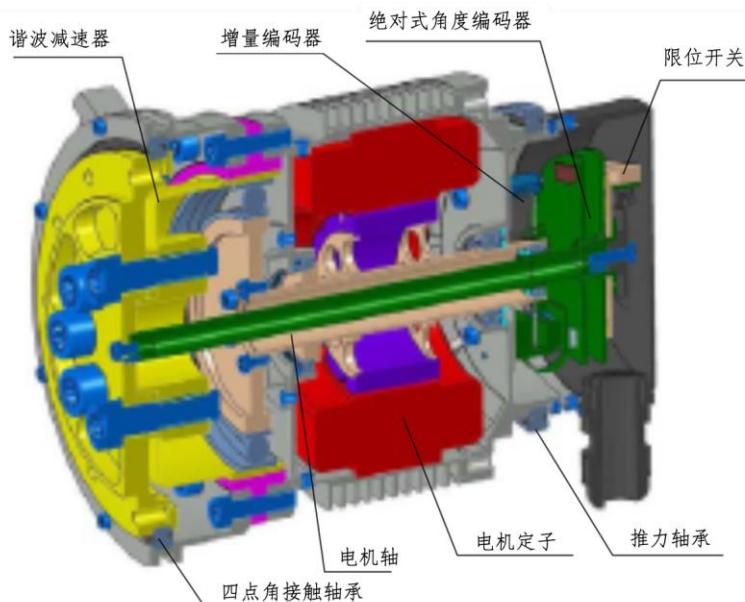
资料来源: 北京精密, 长城证券产业金融研究院

1.2.1 刚性执行器: 控制精度高, 能量效率低

刚性执行器主要由电机、高传动比减速器、编码器、力矩传感器和控制板等组成, 力矩传感器是可选器件。根据《双足机器人腿部及其驱动器的设计理论与关键技术研究》一文, **Lola**、**SDR**、**Dynamixel Pro Series** 等机器人的执行器采用该方案。它们在电机上, 多选择无刷电机; 在减速器上, 绝大多数刚性执行器方案采用谐波减速器、少部分采用摆线针轮减速器; 在编码器上, 几乎都采用绝对式编码器。

目前刚性执行器结构设计基本定型, 前瞻研究主要集中在电机和减速器等零部件的整体优化设计上。从实际应用来看, 刚性执行器具备控制精度高、稳定性好等特点, 成为主流方案。但是受限于元器件工艺和原理, 传统刚性执行器的功率密度很难达到生物肌肉的水平 **500 W/kg**, 同时也解决不了机器人受外部冲击时零部件强度问题, 故很难适配大负载、高运动强度的关节部位。

图表6: 刚性执行器结构



资料来源：北京精密，长城证券产业金融研究院

图表7：部分刚性执行器型号对比

刚性执行器型号	马达 + 减速器	刹车	绝对式编码器	力矩传感器	IMU	滑环	整体控制	通信方式
Robotis Dynamixel Pro Series	✓	✗	✓	✗	✗	✗	✓	CAN, RS-485
Harmonic Drive CanisDrive	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	-
RoboDrive RD50/70/85-HD	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	-
Kinova Actuators K-58, K-75	✓	✗	✓	✓	✗	✓	✓	RS-485
Schunk Powercube, PDU, PR, PSM	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✓	CAN, Profibus
RoboSimian Actuator	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	EtherCA, RS-485
NREC Drive Joint	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	CAN
DLR LWR III Joint Unit	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	SERCOS
ARMAR-4 Sensor-Actuator Unit	✓	✗	✓	✓	✗	✗	✗	CAN
KITSensor-Actuator-Controller Unit	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	EtherCAT

资料来源：北京精密，长城证券产业金融研究院

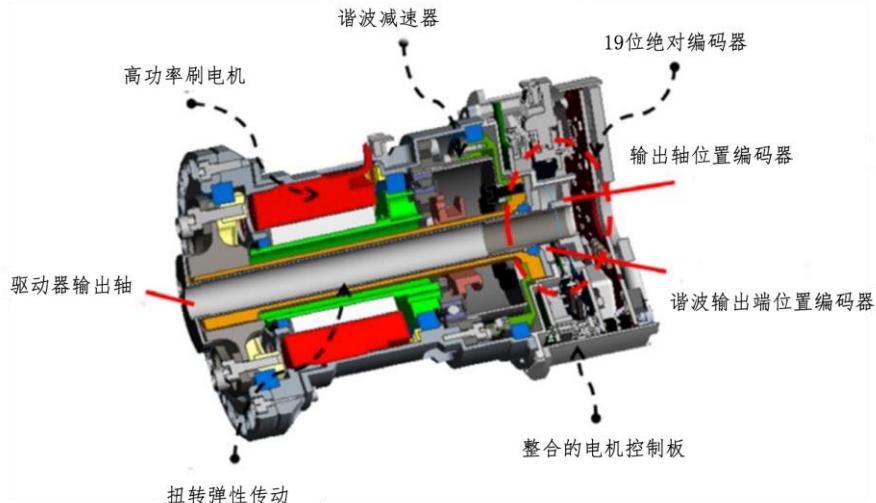
1.2.2 弹性执行器：功率调制好，控制方式相对复杂

弹性执行器主要借鉴 Hill 肌肉三元素力学模型，通过模拟动物利用骨骼肌肉系统在运动过程中储存和释放能量的过程，使得执行器表现出柔顺、安全和高能量效率特性。从结构上看，弹性执行器在刚性执行器基础上增加了弹性元件。根据弹性元件原理和结构设

计的不同，目前市面上主要有串联弹性执行器、并联弹性执行器、离合式弹性执行器和多模态弹性执行器几类产品。

- ◆ **串联弹性执行器 SEA (Series Elastic Actuator)**：是在刚性执行器的驱动元件和负载间增加弹性单元，从而具有缓冲机器人触地冲击和缓解外部碰撞冲击的作用，同时还可以储存能量。但是由于弹性元件引入，系统变为欠驱动系统，运动控制精度较低。
- ◆ **并联弹性执行器 PEA (Parallel Elastic Actuator)**：弹性元件的连接方式由串联改变为并联。相对传统刚性执行器，此方案可以显著提高输出功率，降低能量损耗。根据《双足机器人腿部及其驱动器的设计理论与关键技术研究》一文，在实现平滑轨迹跟踪，尤其是在稳定性和对冲击的鲁棒性(在受冲击时仍能保持正常工作的能力)方面，机器人手部引入此方案具有优势。
- ◆ **离合式弹性执行器 CEA (Clutched Elastic Actuator)**：是在弹性元件位置增加离合装置，控制弹性元件开合，从而能控制能量储存和释放，大幅提高了能量效率。
- ◆ **多模态弹性执行器 MEA (Multi-mode Elastic Actuator)**：是将多个执行器集成成为一个系统，能够集合多方面优势。根据《双足机器人腿部及其驱动器的设计理论与关键技术研究》一文，Mathijssen 等使用多个带有锁紧环和锁板的不完全齿轮作为与电机并联的间歇结构。结构表明此装置可以降低电机扭矩要求，提高效率。目前由于此方案结构复杂，系统建模和控制也十分复杂，相关技术应用案例较少。

图表8：弹性执行器结构



资料来源：北京精密，长城证券产业金融研究院

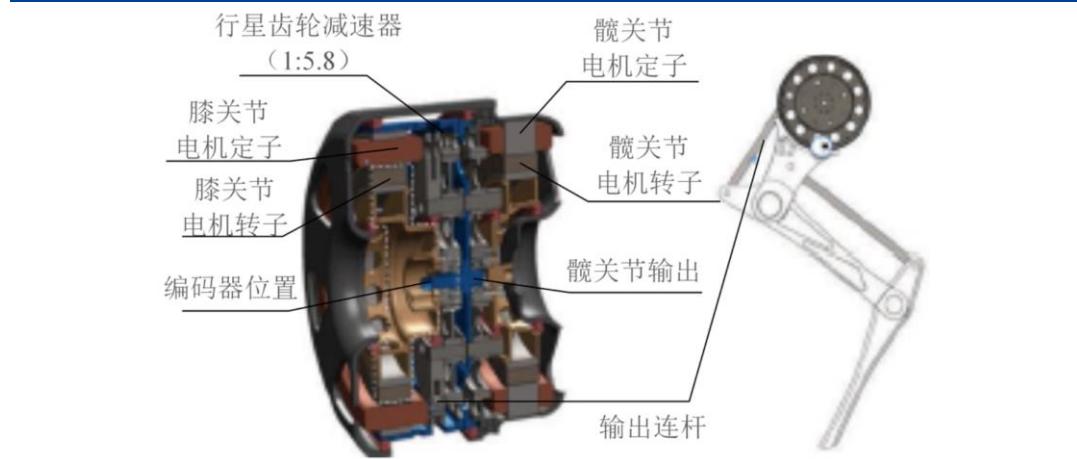
1.2.3 准直驱执行器：控制方式简单，能量效率高

准直驱执行器依靠电机开环力控，不依赖于附加力或力矩传感器。其优点是功率密度高，力控带宽大，抗冲击能力强等。最理想的技术方案是电机直接驱动，但受限于工艺和技术，电机直驱的扭矩密度不能满足机器人应用需求，故实践中仍然采用电机加低传动比减速器的方案。同时此方案要求负载质量和转动惯量尽可能小，故多用于机器人的低负载关节。

从结构上看，准直驱执行器由高扭矩密度电机、低传动比减速器、编码器和控制板等组成。根据《双足机器人腿部及其驱动器的设计理论与关键技术研究》一文，部分设计方案在电机基座和内齿圈间增加了离合结构，用于抵挡外界冲击造成能量损耗，保护减

速器。在编码器的使用方面,目前单编码器方案还没有很好地解决断电后回零位的问题,故主流设计方案多采用双编码器或单个新型多圈绝对值编码器。

图表9: 准直驱执行器结构



资料来源: 北京精密, 长城证券产业金融研究院

1.2.4 几种执行器的对比

对比几种执行器方案的控制精度、功率特性、能量效率、安全性和应用场景等,可以得知在控制精度方面,刚性、并联弹性、准直驱执行器控制相对简单且精度高。功率特性方面,几种弹性执行器功率调制较好。能量效率方面,离合式弹性、多模态、准直驱执行器效率高。安全性方面,准直驱执行器具有反驱特性,安全性好。

图表10: 几种执行器方案性能对比

类型	TSA	SEA	PEA	CEA	MEA	PA
结构配置	电机+高传动比 减速器+高刚性 力矩传感器	电机+高传动比 减速器+弹性体	电机+高传动比 减速器+高性能 力矩传感器+并 联弹性体	电机+高传动比 减速器+弹性体 SEA 和 PEA 组合 +离合机构	高扭矩密度电机 MEA 和 PA 组合 +低传动比减速器	
力矩测量方式	应变片原理或电 流	编码器或应变片 原理	应变片原理或电 流	编码器或应变片 原理	编码器或应变片 原理	电流
控制特点	简单、精度高	复杂、精度低	复杂、精度高	复杂、精度一般	复杂、精度一般	简单、精度一般
功率特点	无功率调制	功率调制好	功率调制好	功率调制好	功率调制好	无功率调制
能量效率	效率低	效率一般	效率高	效率非常高	效率非常高	效率高
安全性	安全性差	安全性好	安全性差	安全性一般	安全性好	安全性好
应用场景	精密系统, 如精 密机床, 仪器仪 表, 传统双足机 器人	安全性系统, 协 作机器人	非对称载荷或自 支撑平衡系统	双足或四足机器 人	兼顾功率、能量 效率、安全特性 的系统	四足机器人, 小 型双足机器人

资料来源: 北京精密, 长城证券产业金融研究院

1.3 特斯拉人形机器人执行器技术框架

我们以特斯拉 Optimus 机器人设计方案为例来分析执行器技术框架。Optimus Gen1 执行器布置方案为 14 个直线执行器和 14 个旋转执行器, Optimus Gen2 在颈部增加了 2

个旋转执行器，其余部位预计未做调整。30个自由度分布在颈部（2个旋转）、肩部（3个旋转） \times 2、大臂（1个直线） \times 2、小臂（2个直线+1个旋转） \times 2、腰部（2个旋转）、髋部（2个旋转） \times 2、大腿（2个直线） \times 2和小腿（2个直线） \times 2。

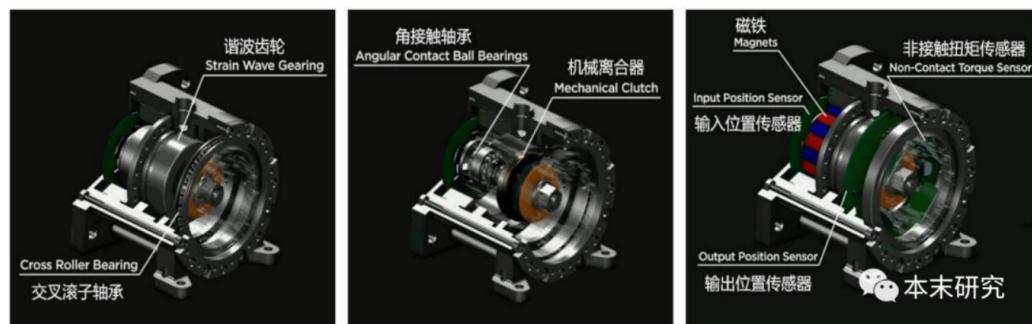
图表11: 特斯拉 Optimus Gen2 执行器方案

执行器所在位置	旋转执行器	直线执行器
上半身 (16)	颈部	2
	肩部	3*2
	大臂	-
	小臂	1*2
腰部 (2)	2	-
下半身 (12)	髋部	2*2
	大腿	-
	小腿	1*2
合计	16	14
	30	

资料来源: 本末研究, 机器人之心, 特斯拉官网, 长城证券产业金融研究院 注: 数字单位为个

旋转执行器: 伺服电机*1+减速器*1+力矩传感器*1+编码器*2+交叉滚子轴承*1+角接触球轴承*1。1) 电机: 采用无框力矩电机, 预计为特斯拉自研方案。2) 减速器: 采用谐波减速器。3) 力矩传感器: 在手腕、脚腕部位可能会采用多维力传感器, 其余部位用一维力传感器。4) 编码器: 采用输入位置和输出位置双编码器。

图表12: 特斯拉 Optimus 旋转执行器方案



资料来源: 本末研究, 特斯拉官网, 长城证券产业金融研究院

直线执行器: 伺服电机*1+减速器*1+力矩传感器*1+编码器*2+丝杠*1+深沟球轴承*1+四点接触球轴承*1。1) 电机: 采用无框力矩电机, 预计为特斯拉自研方案。2) 减速器: 可以使用行星减速器、RV减速器。3) 力传感器: 预计采用一维力传感器。4) 编码器: 预计采用双编码器配置。5) 丝杠: 采用反向式行星滚柱丝杠, 刚度高。

图表13: 特斯拉 Optimus 直线执行器方案



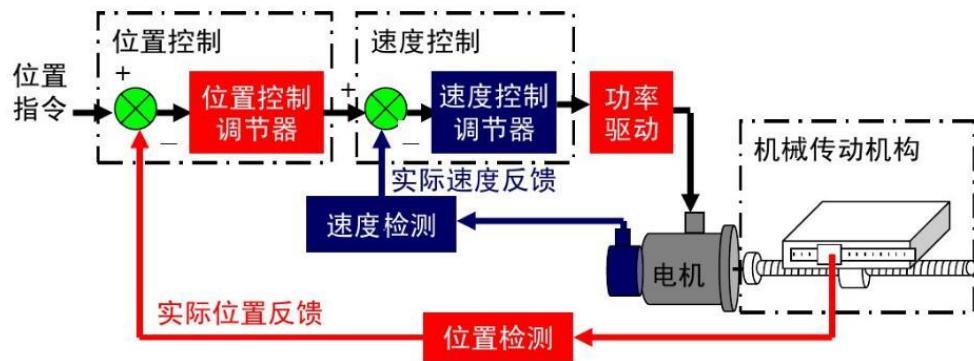
资料来源：本末研究，特斯拉官网，长城证券产业金融研究院

2. 电机：执行器系统的“血管”

电机（Motor）相当于执行器的“血管”，其作用是根据所接收的力矩、速度、位置等指令信号，带动机械部件实现特定运动。同时电机中的多种传感器，如编码器、力传感器等，还会将电机与机械部件的实时运作信息反馈给驱动器和控制器，从而完成精准运动控制。

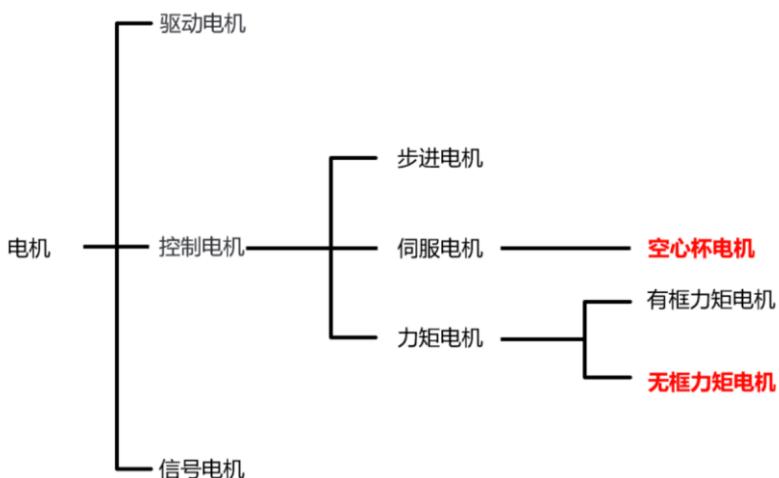
根据用途的不同，电机可以分为驱动类电机、控制类电机、信号类电机。机器人中的电机主要任务是完成对机械运动的精准控制，所以属于控制类电机。根据控制方式的不同，又可以分为步进电机、伺服电机和力矩电机，机器人对运动精准度要求，所以主要采用伺服电机或力矩电机。

图表 14：伺服驱动系统工作流程



资料来源：杭州之山智控技术公司官网，长城证券产业金融研究院

图表 15：电机分类



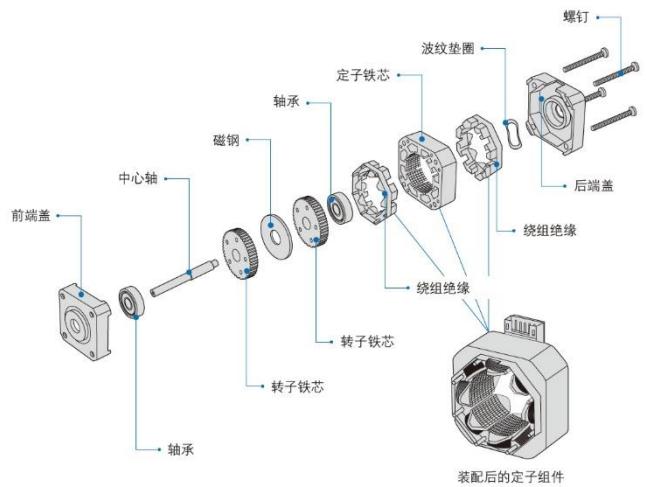
资料来源：工链汇，长城证券产业金融研究院

2.1 伺服电机：无刷、直流方案是主要发展方向

伺服电机（Servomotor）是指在伺服系统中控制机械元件运动的发动机，它可把所收到的脉冲信号转换成电动机轴上的角位移或角速度输出。与步进电机相比，它多了一个与电动机相连的传感器，用于位置反馈，这意味着伺服电机每收到1个脉冲，就会发出对应数量的脉冲，与接收的脉冲形成呼应，或者叫闭环，如此一来，就能实现对角速度或线的位置，速度和加速度的精确控制。

就内部结构而言，伺服电机主要由定子和转子构成。定子上有两个绕组，励磁绕组和控制绕组。转子是永磁铁或感应线圈等导磁材料。转子在由励磁绕组产生的旋转磁场的作用下转动。同时伺服电机装配有编码器，工作时驱动器实时接受到编码器的反馈信号，再根据反馈值与目标值进行比较来调整转子转动的角度。

图表16：步进电机结构示意图



图表17：伺服电机结构示意图



资料来源：鸣志电器官网，长城证券产业金融研究院

资料来源：智造漫谈，长城证券产业金融研究院

对比控制精度、变频特性、过载能力、响应速度等性能，可以看到伺服电机控制精度更高；低频时运转平稳、高频时能恒力矩输出；闭环控制使得过载保护能力更强；开机时响应速度更快。就产品特性而言，伺服电机更适配机器人高精度要求、多变环境的应用需求。

图表18：步进电机和伺服电机性能对比

性能指标	步进电机	伺服电机
控制精度	0.36° - 1.8°	<0.036°
低频特性	低速时易出现低频振动现象	运转非常平稳，即使在低速时也不会出现振动现象
矩频特性	输出力矩随转速升高而下降，且在较高转速时会急剧下降，所以其最高工作转速一般在 300 ~ 600RPM	恒力矩输出，即在其额定转速（一般为 2000RPM 或 3000RPM）以内，都能输出额定转矩，在额定转速以上为恒功率输出
过载能力	一般不具有过载能力	具有较强的过载能力
运行性能	开环控制，启动频率过高或负载过大易出现失步或堵转的现象	闭环控制，一般不会出现步进电机的失步或过冲的现象，控制性能更为可靠
速度响应性能	从静止加速到工作转速（一般为每分钟几百转）需要 200 ~ 400 毫秒	以鸣志 400W 交流伺服电机为例，从静止加速到其额定转速 3000RPM 仅需几毫秒

资料来源：鸣志电器官网，长城证券产业金融研究院

根据控制电源的不同，可以分为直流伺服电机和交流伺服电机。其中直流伺服电机根据是否具有电刷，又可以分为有刷直流伺服电机和无刷直流伺服电机。对比三种类型电机，可以看到直流伺服电机具有控制精准，转矩特性、线性调节特性较好，使用方便且价格便宜等优势。无刷直流伺服电机以电子转向器取代机械转向器，减少摩擦和噪音、延长寿命且安全性，但是一定程度增加了成本。根据《永磁无刷直流电机技术》一文，目前在航空航天和军事装备、工业自动化等领域，有刷直流伺服电机正在逐步被无刷直流伺服电机所取代。

图表 19：主要伺服电机类型的性能对比

性能指标	永磁无刷直流电机	永磁有刷直流电机	交流感应电机
定子	多相绕组	永磁	多相绕组
转子	永磁无刷直流电机	绕组	绕线组或笼型绕组
转子位置传感器	需要	不需要	不需要
电滑动接触火花	无	有，换向器与电刷	无，或可能有集电环
EMC 干扰	较低	高	低
可闻噪音	较低	高	低
电子控制器	必需	不是必需，调速时需要	不是必需，调速时需要
使用电源	DC	DC	AC
使用电压范围	高，受功率器耐压限制	较低，受换向器耐压限制	高
机械特性	接近线性	线性	非线性
起动转矩倍数	较高	较高	较低
高速范围	高，受转子离心力限制，已有每分钟数十万转的产品	低，受换向器离心力限制	高，受转子离心力限制
效率	高，转子几乎没有损耗	较低，换向器与电刷摩擦损耗，电刷压降损耗	低，转子有损耗
转子转动惯量	较小，响应快速	大	较小
功率密度	高，定子绕组容易散热	较低，转子绕组不容易散热	较低，转子绕组不容易散热
转矩波动	大	小	小
可控性	好	好	差

性能指标	永磁无刷直流电机	永磁有刷直流电机	交流感应电机
寿命和可靠性	好	好	差
安全性	较高	低	高
维护	不必经常维护	需要定期清洁或更换电刷	不必经常维护
使用温度范围	较低, 收到永磁材料限制	较低	较高
成本	高, 必需有永磁材料和控制器	较高, 必须有永磁材料和换向器	低

资料来源:《永磁无刷直流电机技术(2019年)》,长城证券产业金融研究院

我国伺服电机技术处于快速赶超阶段。目前技术水平大约落后西方 20 年左右,应用普及性相当于西方 40 年前的水平。具体看,我国伺服电机产品主要有以下几点缺陷:

- ◆ 外形普遍较长,外观粗糙,很难应用在一些高档机器人上面。尤其是在轻载 6kg 左右的桌面型机器人上,由于机器人手臂的安装空间非常狭小,对伺服电机的长度有严格要求。
- ◆ 信号接插件的可靠性需要改进,整体设计要与本体更好融合,时限小型化、高密度化,以便于安装、调试、更换。
- ◆ 高精度编码器的自研率较低,尤其机器人上用的多圈绝对值编码器,严重依赖进口,是制约我国高档机器人发展的很大瓶颈。编码器的小型化也是伺服电机小型化的重要驱动力。
- ◆ 伺服系统各部分产业协同联合不够,导致伺服电机和驱动系统整体性能难以做好。

图表 20: 我国伺服电机发展历程

时间阶段	发展情况
初期阶段 (20世纪 60 年代以前)	主要是步进电机操控的液压伺服或者功率步进电机直接驱动为重心,该阶段伺服系统的位置控制是开环系统
中期阶段 (20世纪 60-70 年代)	出现了直流伺服电机,并高速发展的时候。因为直流电机拥有精良的调速功能,越来越多的驱动装置配备了直流伺服电机,伺服系统的位置控制也由最开始的开环系统转变为闭环系统
快速发展阶段 (20世纪 80 年代至今)	因为电子技术突飞猛进的发展,伺服系统控制逐步向微机控制转变,硬件伺服逐渐被软件伺服所替代,软件伺服成为新趋势。伺服电机的结构材料及控制技术都在不断的创新发展,各类新型伺服电机应运而生

资料来源:前瞻产业研究院,长城证券产业金融研究院

磁性材料和制造工艺是生产重要环节。从产业链看,伺服电机上游主要是原材料和电子零部件等其他材料供应商。从工作原理可知,磁材是其制造过程中所必需的重要原材料,其寿命和性能直接影响伺服电机性能。中游包括电机、驱动器制造,数控系统研发等环节。下游应用领域包括医疗器械、机器人制造、汽车制造和工业装备制造等领域。

就参与企业而言,我国对磁材的开采、冶炼实行总量可控,由六大集团完成,代表性企业有中科三环、领益智造、安泰科技、银河磁体等。伺服电机制造生产企业则有汇川技术、星辰科技、江特电机等企业,其中汇川技术是国内伺服电机行业龙头。

图表 21: 我国伺服电机产业链

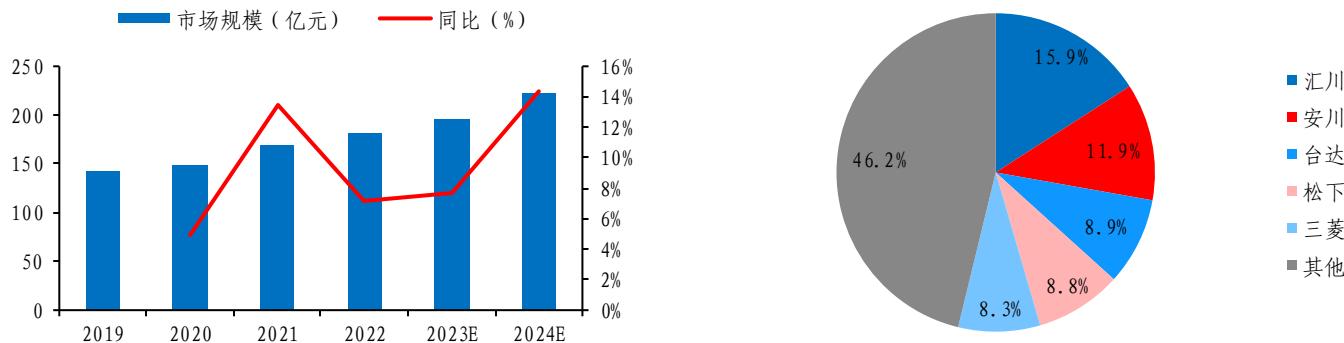


资料来源：前瞻产业研究院，长城证券产业金融研究院

受益于需求扩张，我国伺服电机市场保持稳健增长。根据中商产业研究院数据，2022年我国伺服电机市场规模181亿元，同比增长7.1%。我国伺服电机市场由外资主导，外资品牌占比65%。国产品牌汇川技术市场份额占比排名第一，市占率15.9%。安川、台达、松下及三菱，占比分别为11.9%、8.9%、8.8%及8.3%。

图表22：我国伺服电机市场规模

图表23：我国伺服电机市场格局（2022年）



资料来源：工控网，中商产业研究院，长城证券产业金融研究院

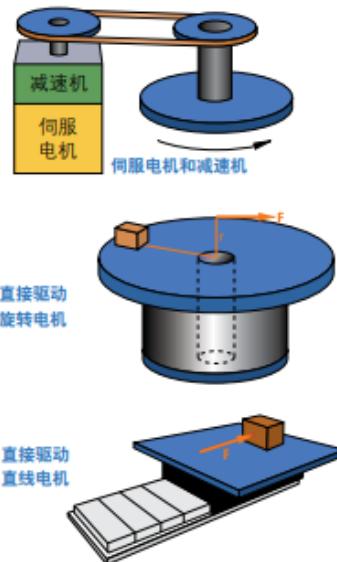
资料来源：MIR DATABANK，中商产业研究院，长城证券产业金融研究院

2.2 无框力矩电机：人形机器人普遍采用的电机类型

无框力矩电机是力矩电机的一种，以输出扭矩的大小为性能指标，通常可以被看成极对数很多的无刷、永磁、直驱伺服电机。因为力矩电机直接连接转子，不需要任何传动件，因此力矩电机属于直驱电机。又因为力矩电机极对数多，因此可以在中低速运动时，提供很高的扭矩。目前是人形机器人执行器普遍采用的电机类型。

就内部结构而言，相较于传统伺服电机、有框力矩电机，无框力矩电机没有轴、轴承、外壳和端盖，只有转子和定子两个部件。转子通常是内部部件，由带永磁体的旋转钢圆环组件构成，直接安装在机器轴上。定子是外部部件，齿轮外部环绕钢片和铜绕组，以产生紧密攀附在机器壳体内的电磁力。

图表24: 无框力矩电机结构示意图



资料来源：科尔摩根官网，长城证券产业金融研究院

无框力矩电机的主要优势有：

- 更高的精度：以科尔摩根的直驱电机为例，其相关的产品位置保持能力比传统电机/减速机好 **60** 倍。
- 更大的带宽：直驱电机可以实现更快的启动/停止操作，并显著缩短了整定时间。
- 高可靠性且免维护：齿轮、皮带和其他机械传动部件可能会折断。在磨损比较严重的启动/停止应用系统中，减速机需要定期进行润滑或更换。皮带需要定期拧紧。在直接驱动电机中没有会随着时间磨损的部件，因而不需要维护。
- 部件更少，成本更优：虽然直接驱动电机的价格可能略高于相同转矩的有框电机/减速机，但是考虑到它不需要使用机械传动伺服系统的很多部件，并节约了所有额外部件的工作量，因而总体上仍然减少了成本。
- 降低噪音。

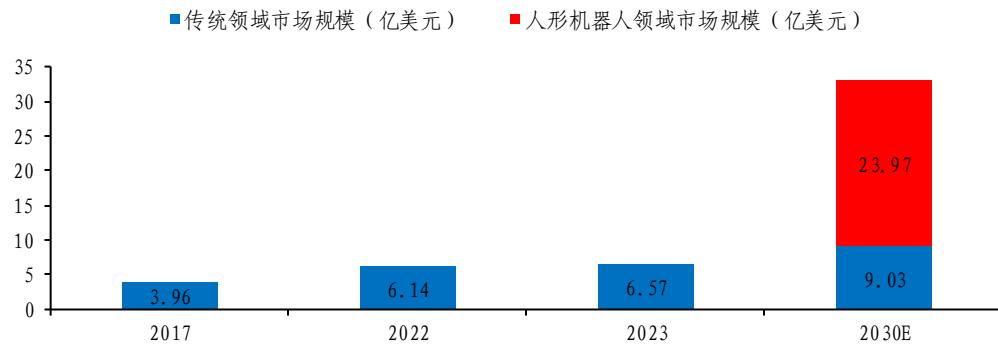
图表25: 部分人形机器人电机方案

公司	型号	一般关节方案			灵巧手关节方案
		电机	力矩传感器	旋转或直线	
优必选	Walker X	高密度无框力矩电机	有	/	/
智元	远征A1	/	/	/	
达闼	小紫 XR-4(双足)	高扭矩密度无框电机	可选配	旋转	空心杯电机+齿轮传动
宇树	Unitree H1	无框电机	/	/	/
小米	CyberOne	无框力矩电机	无	/	无灵巧手
傅利叶	Fourier GR-1	未公布类型	无	旋转	/
追觅	通用人形机器人	无框电机	/	/	/
小鹏	PX5	未公布类型		/	4个推杆电机(集成空心杯电机)
开普勒	先行	未公布类型	/	旋转+线性	/
特斯拉	Optimus	无框力矩电机	有	旋转+线性	空心杯电机+行星紧密齿轮箱+位置传感器+金属腱绳
本田	ASIMO	直流电机以及无刷直流电机	/	/	/
波士顿动力	Atlas	/		旋转+线性	无灵巧手
1X Technologies	EVE(人形轮式)	高扭矩重量比的直驱电机		/	无灵巧手
美国宇航局	Valkyrie	/		旋转+线性	/
Agility Robotics	Digit	有刷/无刷直流电机		/	无灵巧手

资料来源：工链汇，长城证券产业金融研究院

人形机器人有望带动力矩电机市场规模快速增长。根据海外市场研究公司 Technavio 数据，2023 年全球力矩电机市场规模增长 6.95% 至 6.57 亿美元，市场空间较小。未来随着人形机器人逐步放量，无框力矩电机市场规模有望快速增长。若以 2030 年人形机器人出货量达 100 万台，同时无框力矩电机产品单价下降一半到 500 元/台来估算，预计人形机器人领域无框力矩电机市场空间将达到 23.97 亿美元，叠加传统领域市场空间的平稳增长，总市场规模有望达到 33 亿美元。

图表 26：全球无框力矩电机市场规模



资料来源：工链汇，Technavio，长城证券产业金融研究院

3. 减速器：电机和传动装置之间的桥梁

减速器 (Reducer) 是电机和传动装置之间的桥梁，其作用是将伺服电机输出的高转速、低转矩的动力转换为低转速、高转矩的动力，从而驱动机器人关节运行。受限于电机工艺技术，目前在机器人执行器中，减速器和电机通常搭配使用。

工作原理上，减速器是通过输入轴上的齿数少的齿轮啮合输出轴上的大齿轮来达到减速的目的，大小齿轮的齿数之比就是传动比。分类上，根据工作原理的不同，机器人用减

速器可以分为 RV 减速器、谐波减速器、精密行星减速器。这三种电机都是基于行星齿轮传动原理发展而来的精密减速器。

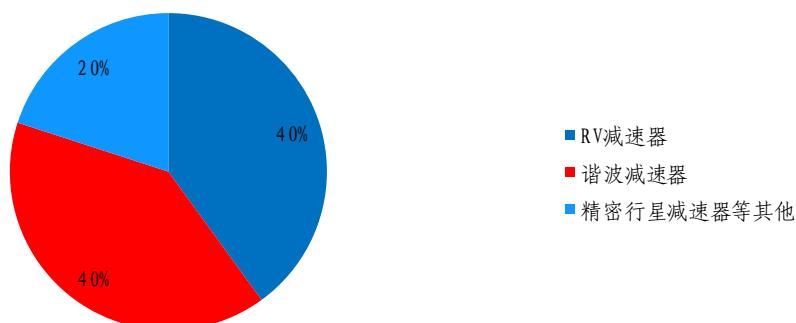
对比三种机器人常用精密减速器，可以看到谐波减速器优势在于体积小、价格相对便宜，非常适用于机器人小关节；RV 减速器优势在于高负载、大传动比，更适用于重型机械或重负载机器人。从 2022 年全球销量来看，RV 减速器、谐波减速器的市场销售数量占比均为 40%左右，精密行星减速器、摆线针轮减速器、滤波减速器等共占 20%左右。

图表27：三种精密减速器性能对比

	谐波减速器	RV 减速器	精密行星减速器
结构组成	主要由柔轮、刚轮、波发 生器三个核心零部件组 成，通过柔轮的弹性变形 传递运动	一般采用两级传动结构， 由行星齿轮减速器的前级 和摆线针轮减速器的后级 组成	主要传动结构包括行星 轮、太阳轮、内齿圈
产品性能	体积小、减速比大、精密 度高	大体积、高负载能力和高 刚度	高刚性、高耐磨性、高扭 矩、高传动效率、寿命长
优点	运动精度高，传动比大， 较小的传动惯量，在同等 输出力矩时，体积可以缩 小到其他减速器的 1/3， 重量缩减 1/2	高负载、传动比范围大、 寿命长、精度保持稳定、 效率高、传动平稳	结构简单、刚性和耐磨性 更好
缺点	柔轮每转发生两次椭圆变 形，容易引起材料的疲劳 损坏，损耗功率大，同时 回程误差小，不具有自锁 功能	外形尺寸大，零部件多， 结构复杂，加工难度大， 价格贵	存在多级传动体积大、精 密化后性能降低等问题
应用场景	主要应用于机器人小臂、 腕部或手部等轻负载领域	一般应用于多关节机器人 中的机座、大臂、肩部等 重负载的位置	多用于直角坐标机器人以 及传统工业自动化
终端领域	3C、半导体、食品等行业 中 30kg 负载以下的机器 人	汽车、运输等行业中重负 载的机器人	多用于步进电机和伺服电 机的减速运动
价格	1000-5000 元/台	5000-8000 元/台	200-2000 元/台

资料来源：中商产业研究院，长城证券产业金融研究院

图表28：全球机器人领域精密减速器市场份额（2022年）



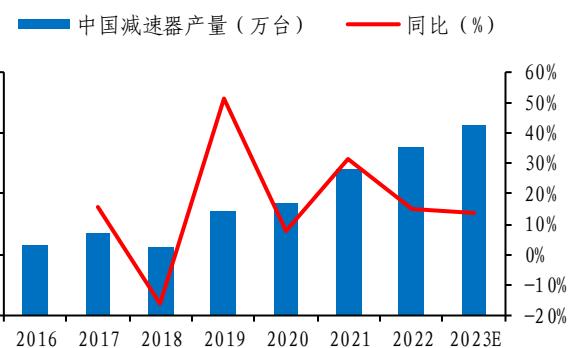
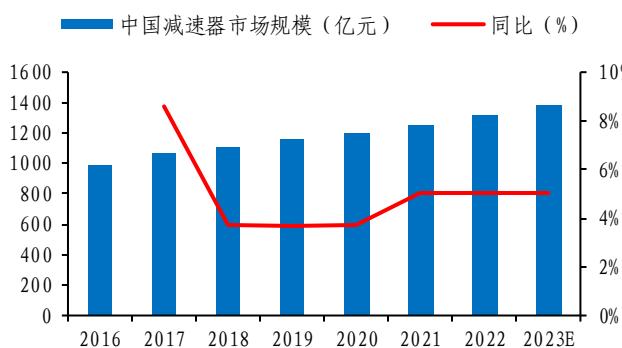
资料来源: GGII, 纳博特斯克, 中商产业研究院, 长城证券产业金融研究院

我国减速器市场具备一定规模, 市场竞争趋于激烈。根据中商产业研究院数据, 2022年我国减速器市场规模 1321 亿元, 同比增长 5.01%, 2017-2022 年五年 CAGR 约为 4.23%。产量方面, 2022 年我国减速器产量 1380 万台, 同比增长 14.71%, 2017-2022 年五年 CAGR 约为 15.51%。均价方面, 2022 年我国减速器均价为 9572 元, 同比下滑 8.46%, 近四年呈现连续下滑趋势。

我国减速器主要应用在起重运输、水泥建材、重型矿山、冶金、电力和航空船用等国民经济及国防工业领域。2020 年起重运输行业使用减速机产品的数量占比约为 25.02%, 水泥建材行业使用减速机产品的数量占比约为 14.89%, 重型矿山行业占比约为 9.76%。

图表29: 我国减速器市场规模

图表30: 我国减速器产量

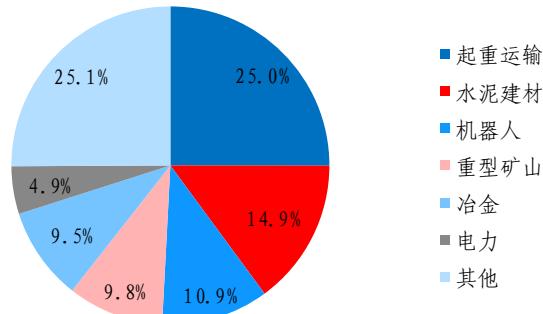
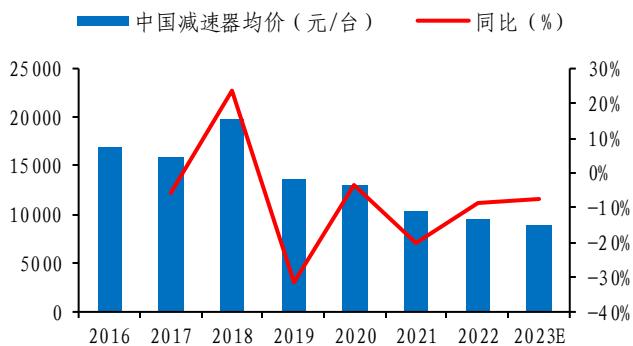


资料来源: 观研天下, 中商产业研究院, 长城证券产业金融研究院

资料来源: 观研天下, 中商产业研究院, 长城证券产业金融研究院

图表31: 我国减速器销售均价

图表32: 我国减速器市场份额 (2020年)



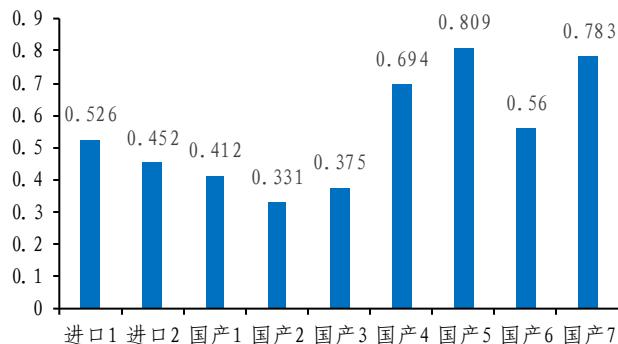
资料来源: 观研天下, 中商产业研究院, 长城证券产业金融研究院

资料来源: 华经产业研究院, 长城证券产业金融研究院

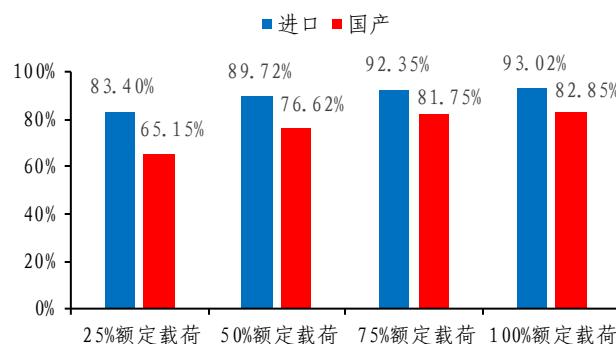
精密减速器领域仍有短板, 未来提升空间较大。与日、欧美等发达国家相比, 中国对精密减速器的研究开始较晚。20 世纪 80 年代的研究主要集中在传动原理和构造分析上, 国内缺乏精密减速器的核心设计和制造技术, 相关产品大量依赖进口。“863”计划的实施加大了对相关核心技术的投入, 我国精密减速器技术水平不断提升。目前我国产品整体仍存在承载能力弱、传动精度不高, 使用寿命短、可靠性较差等不足, 但与国外的差距正不断缩小。例如某国产品牌减速器的回差可以做到 0.375', 低于某进口产品的 0.452'。

图表33: 我国精密减速器产品回差对比

图表34: 国内外精密减速器产品传动效率对比



资料来源:《机器人精密摆线针轮减速器两级齿廓修形研究》,长城证券产业金融研究院

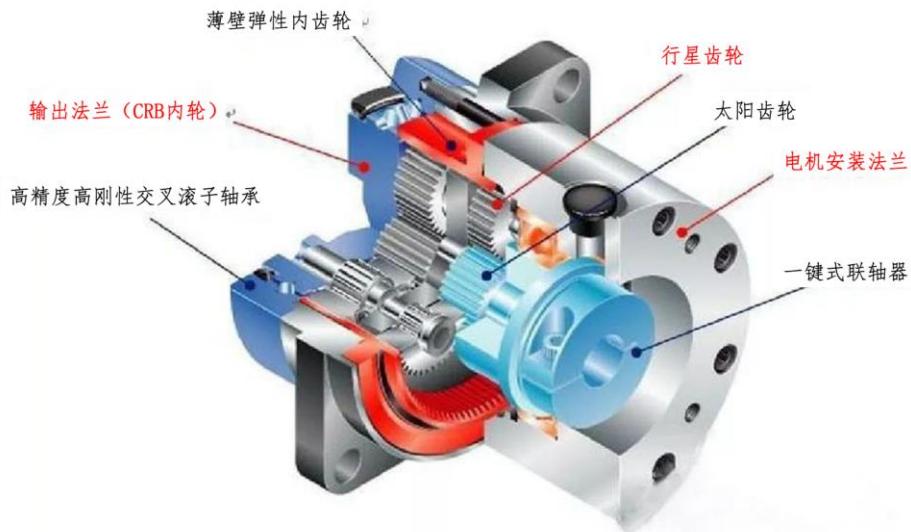


资料来源:《机器人精密摆线针轮减速器两级齿廓修形研究》,长城证券产业金融研究院

3.1 行星减速器: 高精度系列可以用于人形机器人

行星减速器由一个内齿圈固定,内齿圈中心有一个自外部动力所驱动的太阳齿轮,介于两者之间有三颗行星齿轮,该组行星齿轮通过滚针等分排布于行星架上。当入力侧动力驱动太阳齿轮时,可带动行星齿轮自转,并依附于内齿圈之轨迹沿着中心公转,行星齿轮公转之旋转带动行星架(出力轴)输出动力。普通行星减速器是一种通用减速器,不适用于机器人;精密行星减速器在驱动精度和级数上有明显提升,适用于机器人。

图表35: 精密行星减速器结构示意图



资料来源:纽格尔官网,长城证券产业金融研究院

行星减速器技术首创于德国。19世纪以来,受益于汽车和飞机工业的发展,行星齿轮技术和市场规模迎来快速发展。第二次世界大战后,全球工业化进程提速,减速器的应用拓展至舰船、发电机、压缩机等领域,也促进高速大功率、低速重载行星减速器的发展,行星减速器技术和应用走向通用化。

我国对行星齿轮传动技术的开发及应用,开始于20世纪50年代。改革开放以来,国内多家单位相继引进了国外先进的行星传动生产及设计技术,并在此基础上进行了消化吸收和创新开发,使得国内的行星齿轮传动技术取得了长足的发展。近20年来,通过对引进的磨齿机、插齿机、加工中心及热处理装置等的广泛应用,大大提升了制造水平,

在硬件上也切实保证了产品的加工质量。总体而言，近年来我国在各类行星传动产品的开发与应用方面都取得了较大进展。

结构设计、材料选择和制造工艺是影响行星减速器机械效率的重要因素。机械效率的提高能够减少精密行星减速器的功耗、提高使用寿命和性能。根据《行星减速器机械效率影响因素分析》一文，目前主流精密行星减速器设计主要有以下特点：

- ◆ 传动比：传动比效率值随着传动比的变化而变化，通常传动比越大，机械效率越低。在机器人等智能设备的应用中，通常采用多级行星减速器来满足小尺寸、大传动比的需求。对于多级传动比的计算，是将每一级的传动比相乘。因此，每一级减速器速比的分配对减速器很重要，是总体设计的主要内容。通常高速级的第一级传动选择较大的传动比，因为第一级的转矩最小，后面的传动比可以根据具体情况合理分配。
- ◆ 结构设计：行星轮和行星架通常被设计为对称布置来提高承载能力，普通行星轮采用 2-4 个不等，精密行星轮较多采用 3-4 个均匀分布。每增加一个行星轮，就增加了一对齿轮啮合，传动效率就会降低。因此，多级行星减速器为了结构紧凑，通常共用内齿轮。
- ◆ 材料：普通行星减速器的传动零件齿轮、轴、轴承等主要选用钢材承载能力强。精密行星减速器通常采用的材料有钢材、粉末冶金材料、工程塑料、铝合金等。内齿轮通常选用工程塑料，其强度大、耐热性好，可以自润滑。内齿圈通常选用工程塑料 PA66，其是一种熔点较高的聚酰胺（属于一种半晶体材料），且粘性低、流动性好，可以用来加工薄壁的元件。行星轮也可以选用工程塑料，如聚甲醛 POM、热塑性弹性、粉末冶金材料等。行星架可以选择铝合金材料。

图表 36：某型号三级行星减速器材料选择

序号	零件	一级传动	二级传动	三级传动
1	太阳轮 1	45 钢	铝合金	粉末冶金
2	行星轮 2	弹性体	聚甲醛	粉末冶金
3	内齿轮 3	尼龙 PA66		
4	行星架 H	铝合金	铝合金	铝合金

资料来源：《行星减速器机械效率影响因素分析（2021 年）》，长城证券产业金融研究院

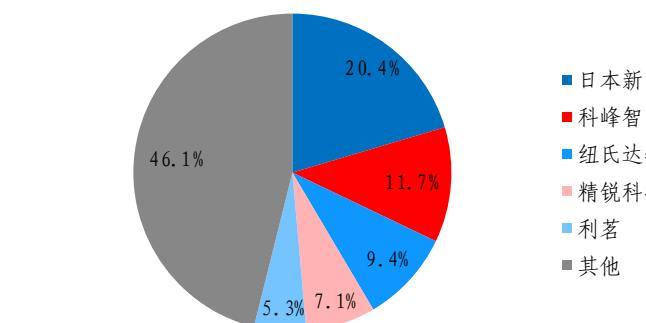
我国行星减速器以中低端为主。据中商产业研究院数据，2022 年我国行星减速器市场规模 5 亿美元，约为 35 亿元人民币，同比增长 6.16%，2018-2022 年四年 CAGR 约为 14%。我国市场主要参与者为外资厂商、合资厂商，高端精密行星减速器国产化率很低。日本新宝、科峰智能及纽氏达特是我国精密行星减速器市场的主要供应商，2022 年市场占有率为 20.4%、11.7%、9.4%。

图表 37：我国行星减速器市场规模

图表 38：我国精密行星减速器市场份额（2022 年）



资料来源: QYResearch, 中商产业研究院, 长城证券产业金融研究院



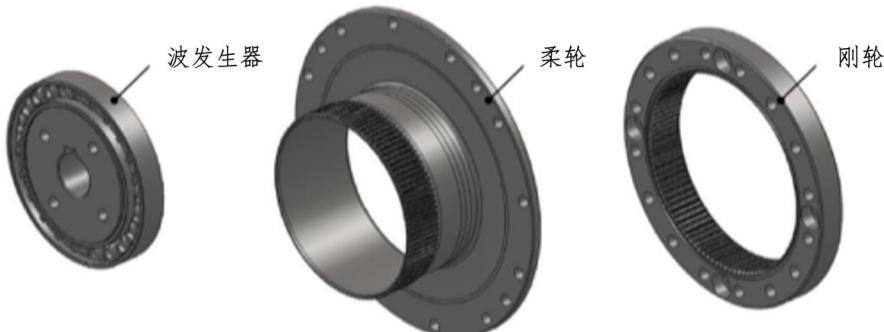
资料来源: MIR DATABANK, 中商产业研究院, 长城证券产业金融研究院

3.2 谐波减速器: 旋转执行器主流方案

谐波减速器是一种新型齿轮传动装置, 结构上比行星减速器、RV减速器都要简洁, 主要由波发生器、柔轮、内齿刚轮三个基本构件所组成。具体来看:

- **波发生器 (WaveGenerator):** 由椭圆凸轮和滚珠柔性轴承组成, 是主动件或称为输入件, 其工作时受电机驱动力使柔性轴承在装配过程中产生预定变形进而使得谐波齿轮的柔轮产生可控弹性变形。如果椭圆凸轮具有两个波瓣, 那么波发生器在谐波传动过程中每转一圈产生波数为 2 (波数对应的为柔轮上某点变形循环次数), 这又称为双波传动。
- **柔轮 (Flexspline):** 是一个容易变形的薄壁圆筒外齿轮, 是从动件或固定件。在波发生器未装配时, 柔轮未发生弹性变形, 为圆形齿圈。当波发生器装配进柔轮, 因其长轴长略微大于柔轮内壁直径, 并且柔轮齿数比刚轮齿数少 2, 在波生器长轴两端就将出现两个啮合区域, 短轴两端柔轮轮齿远离刚轮轮齿, 柔轮被迫呈现椭圆型状。
- **刚轮 (CircularSpline):** 是一个刚性的内齿轮, 是从动件或固定件。刚轮和柔轮一同具有三角形 (或渐开线) 的齿形, 且两者的周节相等, 但刚轮比柔轮多几个齿 (通常为两齿)。

图表39: 谐波减速器结构示意图

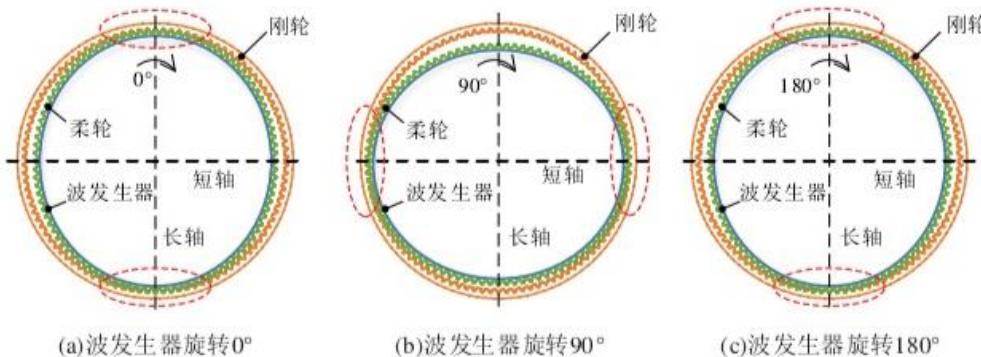


资料来源: 《双圆弧谐波齿轮传动误差影响分析研究 (2022年)》, 长城证券产业金融研究院

就整体工作原理而言, 如果波发生器沿顺时针方向旋转, 固定刚轮, 能使柔轮发生连续变形, 那么刚柔轮齿啮合位置会在柔轮逆时针旋转时不断变化。如果是上文提到的双谐波传动, 波发生器每一次整圈旋转柔轮便会逆时针转动两齿, 以此使得柔轮轮齿与刚轮

轮齿历经多次“啮入-啮出-分离-啮入-啮出”过程。

图表 40: 谐波减速器工作原理



资料来源:《双圆弧谐波齿轮传动误差影响分析研究(2022年)》,长城证券产业金融研究院

谐波减速器首创于美国,日本技术领先世界。1944年,前苏联工程师莫查维提出依靠柔轮的连续波动变形进行传动的工作原理。十年后,美国工程师 Musser.C.W 研制出第一台谐波齿轮传动减速器装置,紧接着 1959 年美国联合制鞋机械公司取得了谐波传动技术的发明专利,并于第二年发表了谐波传动技术资料和展示了实物。1970 年,日本长谷川齿轮株式会社从航天局 NASA 引进了谐波减速的相关技术,而后成立了哈默纳科公司,自那时起其谐波减速器的技术水平领先世界。

随后欧洲部分国家,如意大利、德国、法国等,也对谐波减速器进行了研究,为推动谐波传动的发展做了巨大贡献,其产品近些年来广泛应用于欧洲的机器人和卫星等高端领域。比如德国 Micromotion 已经开发出了 MHD8 和 MHD10 两种系列的微型谐波减速器产品,其中最小外径仅为 8mm,最小质量为 2.2g。

我国行业发展方面,1961 年上海纺织科学研究院的工程师孙伟将谐波传动技术引入国内。我国于 1962 年研制出了第一台谐波减速器。从参与的科研机构和公司来看,绿的谐波表现突出,自 2003 年开始从事精密谐波减速器的研发,目前已研制出十几个系列,近千种谐波减速器产品,得到国内、国际市场的高度赞扬和肯定。相较于绿的谐波产品在机器人领域应用较广,中技克美的产品在航空航天和军工领域占有较大的市场份额。但我们谐波传动系列产品的整体水平与技术先进的国家相比仍有差距。如在结构尺寸及传动参数几乎相同的情况下,国外品牌的谐波减速器的承载能力比国内的更强。

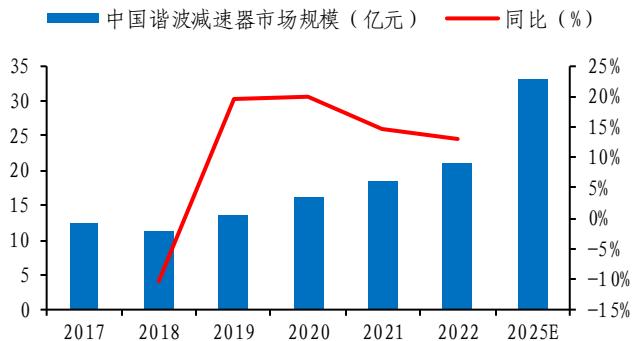
齿轮设计和材料是影响谐波减速器传动精度和疲劳寿命的关键。具体来看:

- 齿轮设计:是突破专利技术的关键,优异的齿轮设计可以提升传动精度、减少能量损耗。目前市场中主要的齿轮设计有哈默纳克的 IH 齿形,绿的谐波的 P 齿形和浙江来福的 δ 齿形等,其中 IH 齿形是基于余滋凸轮波发生器开发的双圆弧达形,该产品凭借独特优势垄断了主要国际市场。
- 材料:根据《双圆弧谐波齿轮传动误差影响分析》一文,柔轮刚度需求高,国内外谐波减速器的柔轮主要采用机械强度高、综合性能好的材料,如 40CrA、30CrMnNiA 等中碳合金钢。若不考虑价格,还可以加入复合材料优化传动性能。

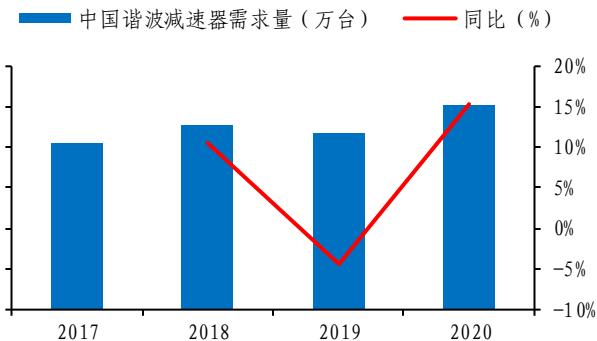
我国谐波减速器市场快速增长,国产替代成果显著。根据中商产业研究院数据,2022 年我国谐波减速器市场规模 21 亿元,同比增长 12.90%,2017-2022 年五年 CAGR 约为 10.76%,预计到 2025 年市场规模将达到 33.2 亿元。哈默纳科是我国市场龙头,2022

年市场份额占比约为 38%。谐波减速器国产替代进程较快,国产品牌份额不断提升。2022 年绿的谐波、来福、新宝、同川、大族市场份额分别为 26%、8%、7%、6%、4%。

图表41: 我国谐波减速器市场规模



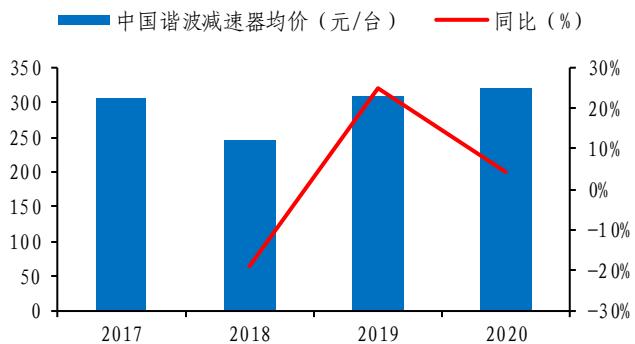
图表42: 我国谐波减速器需求量



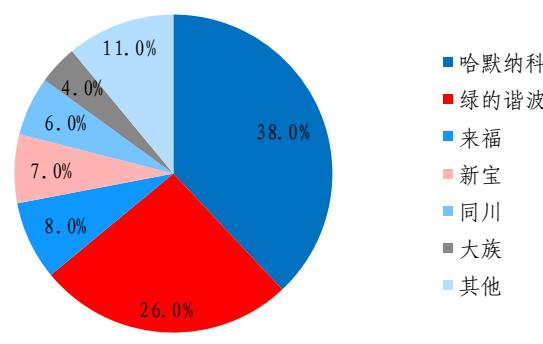
资料来源: 华经产业研究院, 中商产业研究院, 长城证券产业金融研究院

资料来源: 华经产业研究院, 中商产业研究院, 长城证券产业金融研究院

图表43: 我国谐波减速器均价



图表44: 我国谐波减速器市场份额(2022年)



资料来源: 华经产业研究院, 中商产业研究院, 长城证券产业金融研究院

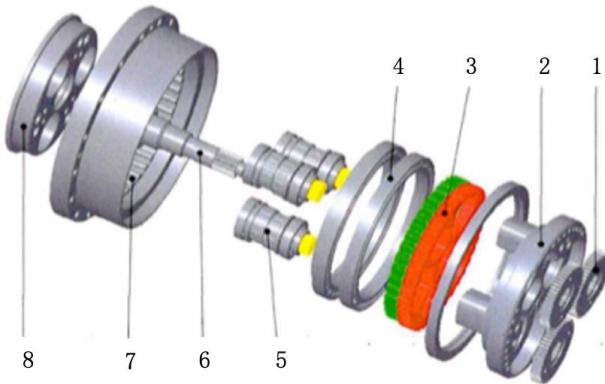
资料来源: MIR DATABANK, 中商产业研究院, 长城证券产业金融研究院

3.3RV 减速器: 负载优势突出, 高成本限制普及

RV 减速器是由一个渐开线圆柱行星齿轮减速器的前级和一个摆线针轮减速器的后级组成。就微观结构而言, 第一级减速机构是渐开线行星齿轮减速机构, 主要由输入轴(太阳轮)和行星轮组成; 第二级减速机构是摆线针传动减速机构, 主要由摆线轮盘、针齿壳、针齿、行星架、转臂轴承、支撑轴承、输出盘等组成。

若电机驱动输入轴顺时针方向转动, 输入轴转动带动行星轮围绕其旋转, 并产生逆时针方向自转, 然后通过曲柄轴的转动带动两个摆线轮偏心转动, 这时摆线轮除了会绕着它的轴线转动外还会沿顺时针方向自转, 同时会通过曲柄轴推动钢架结构组成的输出盘做沿顺时针方向的转动钢架结构组成的输出盘做沿顺时针方向的转动以输出转矩, 实现大传动比减速的效果。

图表45: RV减速器结构示意图



1-行星轮 2-行星架 3-摆线轮 4-支撑轴承 5-曲柄轴 6-输入轴 7-针齿壳 8-输出盘

资料来源：《RV减速器摆线针轮齿廓修形方法与传动性能研究（2022年）》，长城证券产业金融研究院

1983年日本帝人精机基于摆线针轮减速器理论，率先提出RV传动理论，并于1986年推出了RV系列减速器。2003年帝人精机株式会社和纳博克株式会社合并成为Nabtesco（纳博特斯克）公司，一直致力于RV减速器的技术与产业化研究，掌握了核心技术，并取得快速发展，在机器人减速器领域处于垄断地位。

随后海外其它国家也相继研制出与RV减速器原理类似的高精度减速器。韩国SEJIN公司自行开发出新摆线齿形的工业机器人扁平高精度减速器，已推出PQ摆线、XQ摆线以及CK摆线等多个系列产品，但其市场占有率很小，近几年有逐渐淡出的迹象。此外，美国Onvio公司、斯洛伐克Spinea公司均有高精度的RV减速器产品。

我国研究机构和企业虽然在精密行星减速器、谐波减速器领域已取得一定成果，但是对于重载驱动的RV减速器的核心技术没有完全掌握，尚不足大规模应用，目前仍依赖于进口。

RV减速器对结构设计和生产工艺要求很高，我国产品寿命较短、量产能力差。目前我国精密齿轮减速器在精度、刚性、效率等方面与国外优秀产品差距不大，主要短板在于精度保持性差、使用寿命短和大批量产品性能一致性差三个方面。具体看问题主要在两个方面：一是对摆线轮齿形设计及啮合理论研究不足；二是对核心零部件制造、检测和热处理等工艺研究不足。

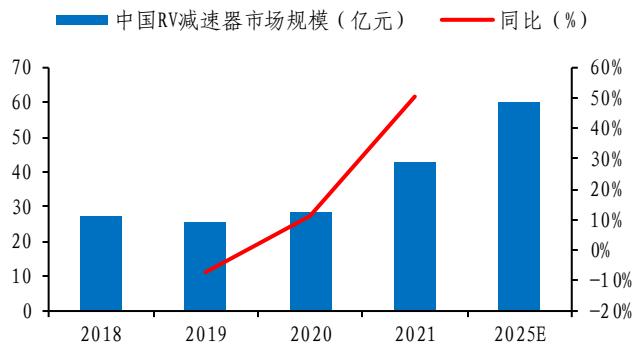
- ◆ 齿轮修形：国外目前已经成功地解决了摆线齿轮齿形修形、制造精度、加工工艺优化等技术难题。国内虽然也取得了一些成果，但受限于与国外先进机构之间的信息交流壁垒，国内减速器产品大多仿制日本产品，正向设计研究工作较少，导致我国精密减速器产业一直扮演追赶的角色。
- ◆ 加工工艺：与日本企业严格的质量管理相比，我国存在检测能力差、质量检查不严格、生产环境不规范等不足。此外，精密减速器的制造受限于超高精度加工装备产业的发展，像高端数控加工中心和齿轮磨床穿品等，我国都依赖于日本进口。

我国RV减速器快速成长，日系品牌垄断市场。根据中商产业研究院数据，2021年我国RV减速器市场规模42.9亿元，同比增长50.53%，2018-2021年三年CAGR约为15.84%，预计到2025年市场规模可达60亿元，2021-2025年期间复合增长率约为8.75%。

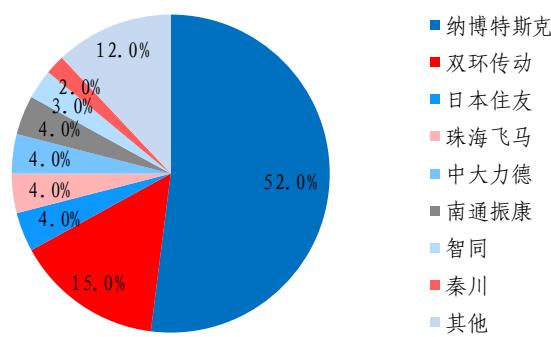
日本纳博特斯克在近几十年牢牢掌握该领域垄断地位。近几年随着工业机器人等领域的快速发展，市场对各类型的RV减速器需求迅速增长，为其他品牌进入创造了空间，我

国企业如中大力德等快速成长。

图表46: 我国 RV 减速器市场规模



图表47: 我国 RV 减速器市场份额(2022年)



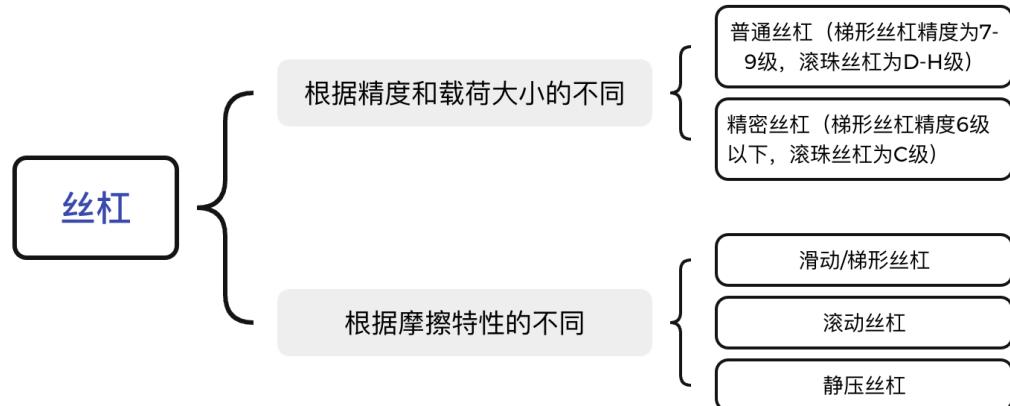
资料来源: 中商产业研究院, 长城证券产业金融研究院

资料来源: MIR DATABANK, 中商产业研究院, 长城证券产业金融研究院

4. 丝杠: 直线执行器的传动装置

丝杠是位于直线执行器末端的线性传动装置, 其作用是减速器输出的扭矩转换成线性往复运动动力, 从而驱动关节完成轴向往复运动。就分类而言, 根据精度和载荷大小的不同, 可以分为普通丝杠(梯形丝杠精度为7-9级, 滚珠丝杠为D-H级)和精密丝杠(梯形丝杠精度6级以下, 滚珠丝杠为C级)。根据摩擦特性的不同, 可以分为滑动/梯形丝杠、滚动丝杠和静压丝杠。滚动丝杠又可以细分为滚珠丝杠和行星滚柱丝杠两大类。

图表48: 丝杠分类

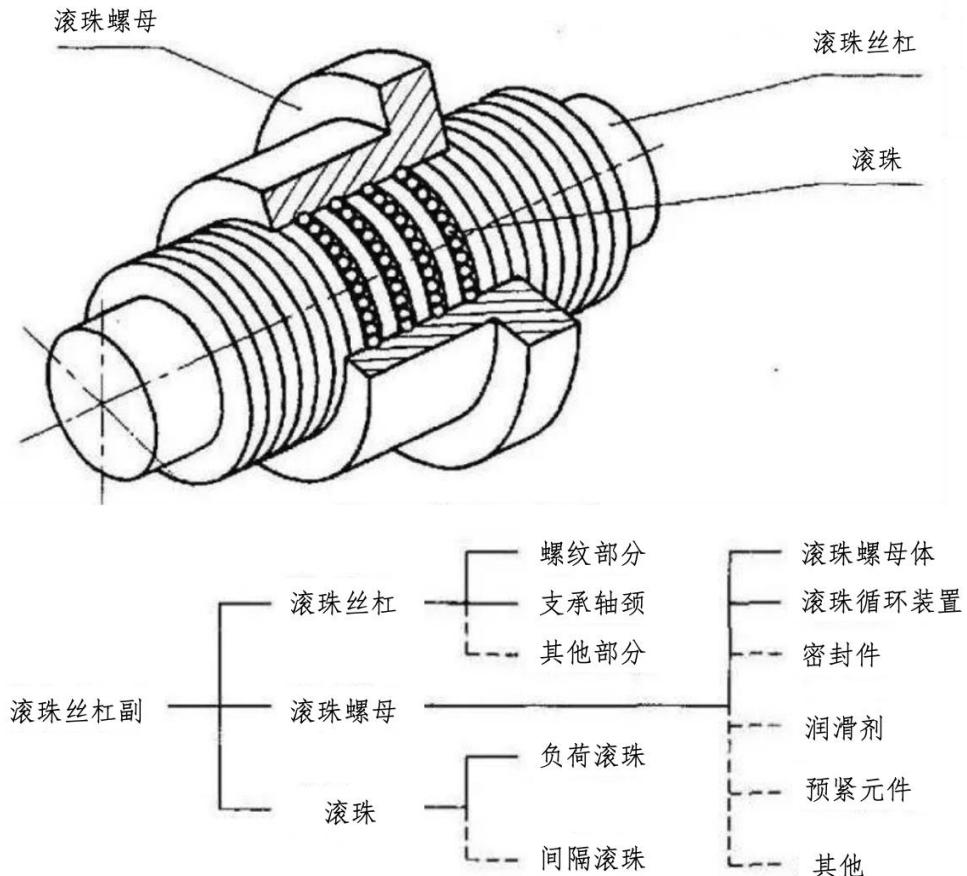


资料来源: 新商报网, 机械网, 长城证券产业金融研究院

4.1 滚珠丝杠: 常用于中大负载的工业自动化设备

滚珠丝杠(Ball Screw)是由滚珠、螺母、丝杠、反向器组成。反向器, 即一个滚珠循环通道, 它的作用是防止滚珠从内滚道中滚出, 同时也使得整体的结构更为简单。当丝杠轴(或螺母)转动时, 丝杠与螺母之间的滚珠会沿着螺纹内滚道滚动, 从而带着丝杠轴(或螺母)进行直线运动。

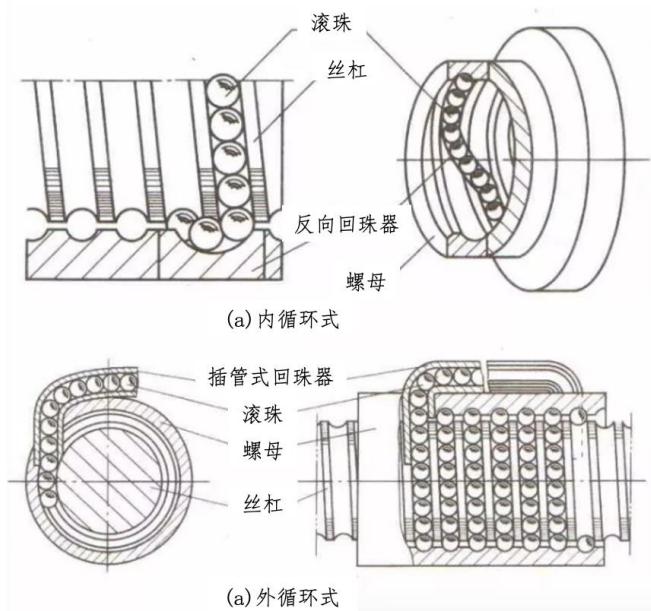
图表49: 滚珠丝杠结构示意图



资料来源：金属加工，长城证券产业金融研究院

根据滚珠循环方式的不同，滚珠丝杠可以分为内循环式和外循环式。内循环式结构简单、便于进行微型设计；但是由于反向器珠槽为空间曲面，加工难度大。其紧凑的结构优势使其适用于中小导程、中低速场合，例如 3D 打印机、中小型医疗扫描仪等。外循环式由于滚珠在体外循环往复运动，制造尺寸较大，适用于载荷较大的场合，常见于大型重载机床等领域。

图表50: 滚珠丝杠内外循环方式



资料来源：金属加工，长城证券产业金融研究院

丝杠是典型的工业制成品，产品精度越高、制造难度越大。滚珠丝杠的精度表示方法为：不论滚珠丝杠有多长，任取一段 300mm，误差都在等级代表的精度之内。根据金属加工杂志介绍，按我国标准分类，精度等级有 P1、P2、P3、P4、P5、P7、P10，日本、韩国，还有中国台湾省采用 JIS 等级，即 C0、C1、C2、C3、C5、C7、C10；欧洲国家的标准采用的是 IT0、IT1、IT2、IT3、IT4、IT5、IT7、IT10。标号越低/高，精度越高/低。一般来说，普通机械采用 C7、C10 级；数控设备采用 C5、C3 级；航空制造设备，精密投影及三坐标测量设备等一般采用 C3、C2 精度。

图表 51：滚珠丝杠 JIS 精度划分标准

精度等级	C0	C1	C2	C3	C5	C7	C10
精度 (E300) (um)	3.5	5	7	8	18	50	210

资料来源：金属加工，长城证券产业金融研究院

与滑动丝杠相比，滚珠丝杠在传动精度、传动效率、寿命、同步性等方面具备显著优势；同时随着产量不断增长，二者价格差异越来越小。未来滚珠丝杠不仅在不同精度需求领域具备广阔空间。

图表 52：滚珠丝杠和滑动丝杠性能对比

性能指标	滑动丝杠	滚珠丝杠
传动效率	约 26%-46%	约 90%-96%
传动速度	滑动摩擦，受温升影响，难以承担高 速运动	滚动摩擦，温升远低于滑动，可以承 担高速运动
使用寿命	表面损伤大，寿命相对小	表面损伤小，寿命相对高
自锁性	几乎没有自锁性	具有一定的自锁性
经济性	价格相对低	价格相对高

资料来源：山东福盛机械官网，长城证券产业金融研究院

需求广泛市场规模稳步增长，国内市场由外资品牌主导。滚珠丝杠广泛应用于机床、工业自动化、仪器仪表等领域，国内工业设备的快速发展带来了稳定的市场需求。据华经产业研究院数据，2022 年我国滚珠丝杠市场规模约为 28 亿元，同比增长 9.38%。从价格走势看，近几年我国滚珠丝杠市场竞争不断加剧。国内滚珠丝杠价格从 2014 年 225 元/套的均价下降至 2022 年的 180 元/套，下降速度趋缓。

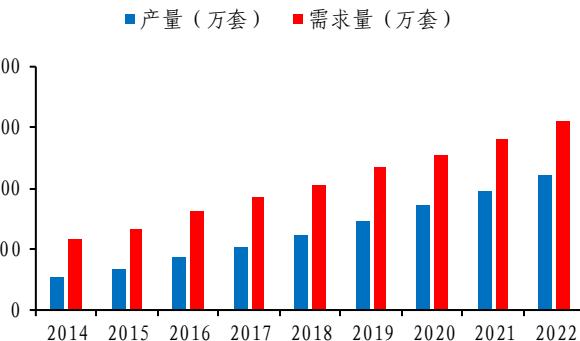
外资品牌在我国中高端市场中的份额保持领先，并不断抢占经济型产品份额。国产品牌技术持续提升，产品逐步由低端向中高端迭代。从全球市场看，日系、欧系品牌仍占据主导地位。据华经产业研究院数据，全球主要的滚珠丝杠厂商有 NSK、THK、SKF 等，2021 年日本和欧洲滚珠丝杠企业全球份额约 70%。全球 CR5 市占率约 46%，主要来自欧洲和日本。

图表 53：我国滚珠丝杠市场规模

图表 54：我国滚珠丝杠产量和需求量



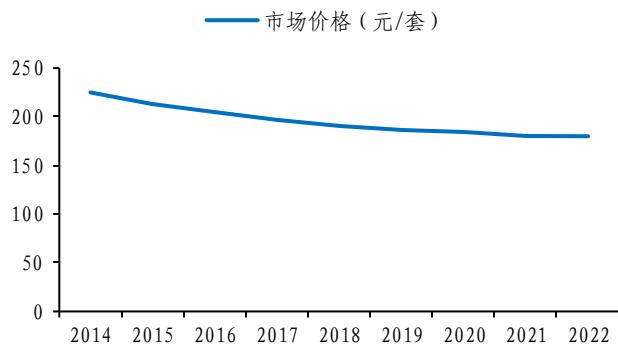
资料来源：华经产业研究院，长城证券产业金融研究院



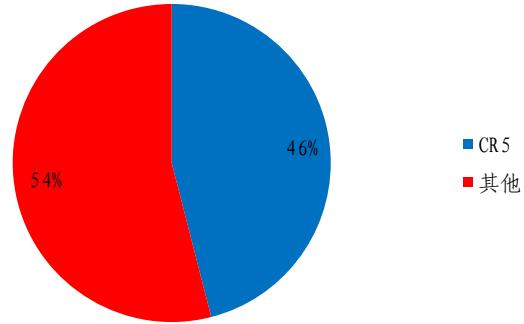
资料来源：华经产业研究院，长城证券产业金融研究院

图表55：我国滚珠丝杠市场价格

图表56：我国滚珠丝杠市场份额（2021年）



资料来源：华经产业研究院，长城证券产业金融研究院

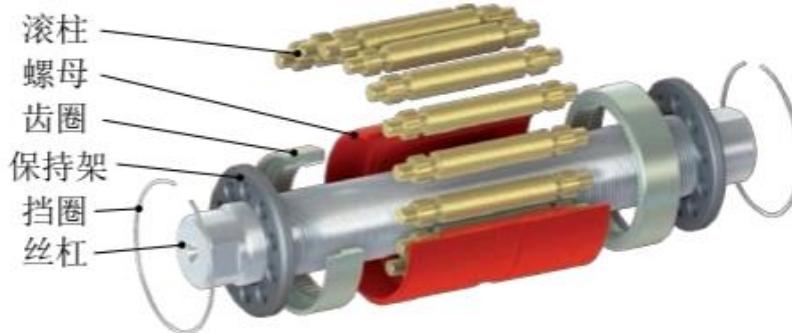


资料来源：华经产业研究院，长城证券产业金融研究院

4.2 行星滚柱丝杠：人形机器人传动装置的理想方案

行星滚柱丝杠通过在主丝杠周围布置若干行星螺纹滚柱，大幅增加丝杠传动过程的接触面和受力面积，从而具备了“高承载、高效率、高精度、高可靠性”等优点。受限于高成本、低产量，以前行星滚柱丝杠需求较小。近些年随着机器人等高端制造领域快速发展，行星滚柱丝杠具备较大发展潜力。

图表57：标准式行星滚柱丝杠结构示意图



资料来源：《行星滚柱丝杠设计（2020年）》，长城证券产业金融研究院

根据结构组成及运动关系的不同，可分为标准式行星滚柱丝杠、反向式行星滚柱丝杠、循环式行星滚柱丝杠、差动式行星滚柱丝杠、轴承环式行星滚柱丝杠。反向式、循环式、

差动式等变形产品通过优化结构设计，可以实现更高负载运动，但对应的传动效率会有所降低。反向式优势是适配于机电一体化设计，主要应用于中小负载、小行程和高速的应用场景。循环式优势是啮合螺纹数量大，最大设计负载大，主要应用于要求高刚度、高承载、高精度的场合，如医疗器械、光学精密仪器等领域。差动式优势是结构简洁、导程小，适用于传动比较大的场合。

图表58: 主要行星滚柱丝杠类型性能对比

性能指标	标准式	反向式	循环式	差动式
规格(丝杠中径*导程)	3.5*1-92*36	10.5*2-80*16	8*0.25-125*5	5*0.8-110*2.36
效率	80-90%	70-90%	60-80%	60-70%
导程精度	G1, G3, G5 (每 315mm 行程, 导程精度: 6 μ m, 12 μ m, 23 μ m)	G1, G3, G5 (每 315mm 行程, 导程精度: 6 μ m, 12 μ m, 23 μ m)	G1, G3, G5 (每 315mm 行程, 导程精度: 6 μ m, 12 μ m, 23 μ m)	T3, T5, T7 (每 315mm 行程, 导程精度: 12 μ m, 23 μ m, 52 μ m)
承载	静态承载: 8.4KN-1898KN; 动态承载: 3.9KN-709KN	静态承载: 20.8KN-1225KN; 动态承载: 13.4KN-559KN	静态承载: 14.3KN-3972KN; 动态承载: 7.3KN-986KN	静态承载: 10KN-1300KN; 动态承载: 8KN-550KN
转速	最高可达 1200 转/分	最高可达 1000 转/分	最高可达 1000 转/分	最高可达 1400 转/分
轴向间隙	0.02mm	0.02mm	0.02mm	-0.01mm (过盈预紧)

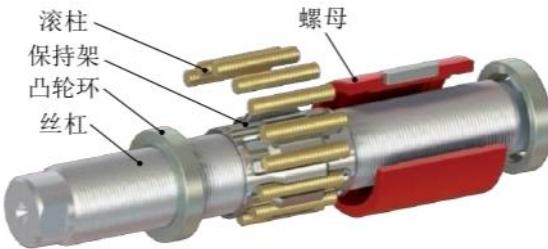
资料来源: 新剑传动官网, 长城证券产业金融研究院

图表59: 反向式行星滚柱丝杠结构示意图



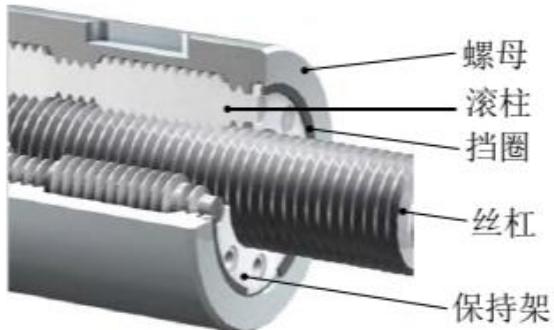
资料来源: 《行星滚柱丝杠设计 (2020 年)》, 长城证券产业金融研究院

图表60: 循环式行星滚柱丝杠结构示意图



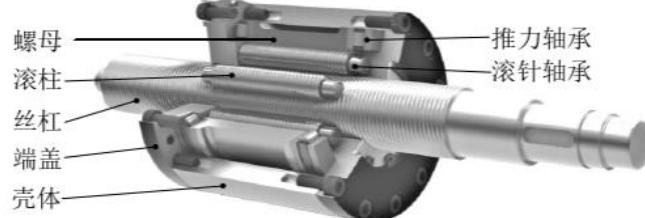
资料来源: 《行星滚柱丝杠设计 (2020 年)》, 长城证券产业金融研究院

图表61: 差动式行星滚柱丝杠结构示意图



资料来源: 《行星滚柱丝杠设计 (2020 年)》, 长城证券产业金融研究院

图表62: 循环式行星滚柱丝杠结构示意图



资料来源: 《行星滚柱丝杠设计 (2020 年)》, 长城证券产业金融研究院

与滚珠丝杠相比，行星滚柱丝杠负载的传递单元使用螺纹滚柱而不是滚珠，能够承受更

高的静态负载和动态负载，静载为滚珠丝杠的3倍，寿命为滚珠丝杠的15倍。同时具有更强的刚度和抗冲击能力，可以提供更高的转速及更大的加速度。此外，行星滚柱丝杠为螺纹传动，螺距设计范围更广，理论导程可以比滚珠丝杠更小。

图表63：行星滚柱丝杠和滚珠丝杠性能对比

性能指标	滚珠丝杠	行星滚柱丝杠
相对承载能力	1	≥ 3
相对旋转速度	1	2
相对寿命	1	15
导程	受滚珠直径限制，大于0.5mm	可小于0.5mm或更小
受力状态	受承载面积小轮流受载	受承载面积大同时受载
离心力	高速转动产生较大离心力	行星机构阻止离心力

资料来源：《行星滚柱丝杠副滚柱塑性成形的探讨（2015年）》，GGII，中国传动网，长城证券产业金融研究院

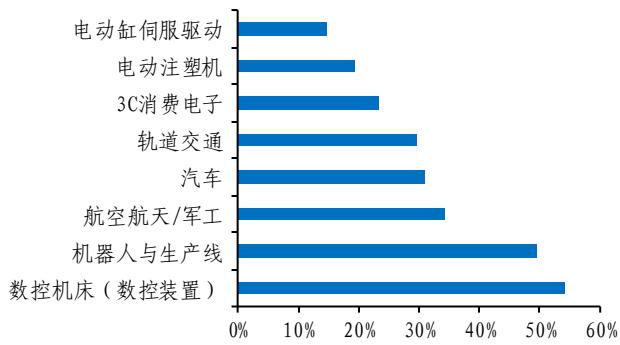
生产工艺进步推动行星滚珠丝杠发展，欧洲品牌引领全球。行星滚柱丝杠最早起源于1942年，一名瑞典的发明家 Carl Bruno Strandgren（卡尔·布朗·斯特兰德格伦）申请了第一个循环式滚柱丝杠的专利。但是由于结构复杂、加工难度大和成本较高的原因，在产品问世后的很长一段时间都无人问津。

70年代起，随着武器装备技术发展以及石油、化工、数控机床等对大推力、高精度、高效率、长寿命的需求提升，瑞士的 Rollvis、瑞典 SKF（被 Ewellix 收购）、美国 Exlar、瑞士 GSA、美国 Moog 等公司相继突破专利，现已具备较为齐全的产品种类和系列，标准化产品精度行业领先。

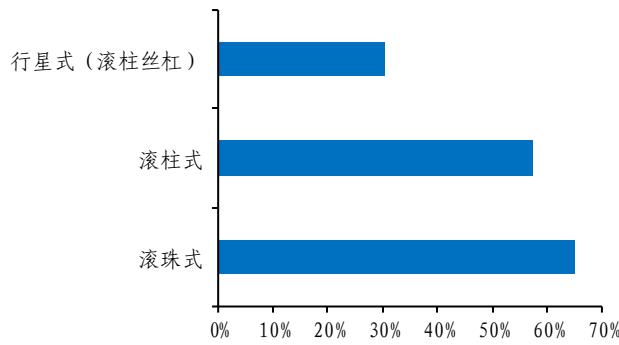
国内生产高精度滚柱丝杠的企业不多，相关研发处于发展初期，代表企业有南京工艺、博特精工、鼎智科技、汉江机床、新剑传动等。

行星滚柱丝杠在负载和精度需求高的场景具备广泛空间。根据金属加工杂志社最新发布的《第三届滚动功能部件用户调查分析报告》，数控机床、机器人是行星滚柱丝杠最主要的需求领域。随着这类场景对滚动部件的需求向高刚度、重载荷方向发展，高承载能力、耐冲击、高刚度的行星滚柱丝杠采用比例逐渐上升。

图表64：采购滚动功能部件应用行业分析



图表65：中高档滚动丝杠副结构分析



资料来源：《第三届滚动功能部件用户调查分析报告（2021年）》，长城证券产业金融研究院

资料来源：《第三届滚动功能部件用户调查分析报告（2021年）》，长城证券产业金融研究院

我国市场仍处起步期，国产品牌份额较低。受限于制造工艺难度高，生产设备有限，行星滚柱丝杠总体市场规模较低。根据 IHS Market 的预测。2022年我国行星滚柱丝杠销量约为10000根，销售单价为11000元/根，对应销售额为1.1亿元。

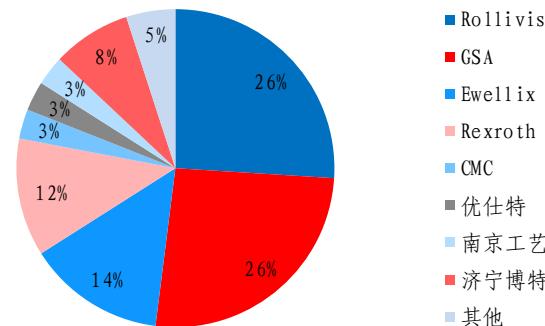
国内行星滚柱丝杠市场主要被国外厂商占据，2022年 Rollvis、GSA 和 Ewellix 的市场份额

额占比分别为 26%、26%、14%；国内行星滚柱丝杠厂商合计市场份额占比为 19%，其中以南京工艺、博特精工为代表，市场份额均为 8%。

图表66: IHS Market对行星滚柱丝杠销售预测

销售地区	2022年销售数量 预测(根)	2022年销售额 预测(万元)	未来年复合 增长率预期
全球(含中国)	86000	65000	3.1%
中国	10000	11000	3.1%

图表67: 全球行星滚柱丝杠市场份额(2022年)



资料来源:《E公司滚柱丝杠产品营销策略研究(2022年)》, IHS Market, 长城证券产业金融研究院

资料来源:《E公司滚柱丝杠产品营销策略研究(2022年)》, 长城证券产业金融研究院

5. 编码器: 驱控信息的反馈装置

编码器(Encoder)安装在伺服电机上,通过将角位移(码盘)或直线位移(码尺)转换成电信号的方式反馈转子位置和速度,将所获得的运动信息转换为脉冲信号并发送给驱动器,以便其进行信息比对,确保完成闭环控制。

图表68: 多摩川编码器



资料来源:多摩川官网,长城证券产业金融研究院

根据工作原理不同,主要有霍尔式编码器、磁编码器和光电编码器。霍尔式编码器成本优势明显,但精度一般,在中高端伺服系统中很少采用。光电编码器分辨率优势明显,但其码盘容易积灰,从而阻碍 LED 光透射到光学传感器,影响精度。磁编码器结构简单,成本低,精度高,且环境适应能力强。就目前发展来说,光电编码器技术与磁编码器相比更为成熟,可达到的精度更高。

图表69: 主要编码器类型性能对比

性能指标	光电编码器	磁编码器	霍尔式编码器
结构	复杂	较复杂	简单
体积	较大	较小	小
精度	高	高	较高
成本	较高	较低	低

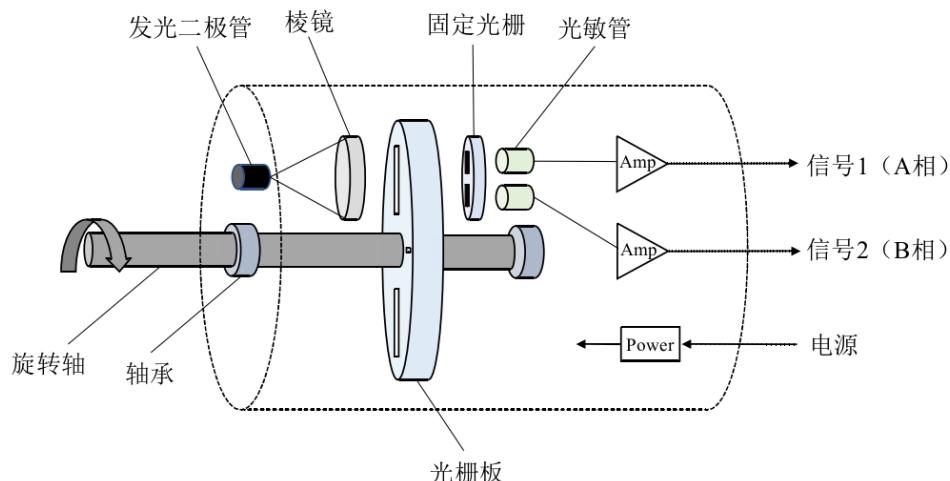
性能指标	光电编码器	磁编码器	霍尔式编码器
环境要求	高	低	低
抗干扰能力	弱	强	一般

资料来源:《磁编码器设计及误差补偿研究(2022年)》,长城证券产业金融研究院

5.1 光电编码器: 分辨率优势明显, 技术成熟

光电编码器主要由光源、码盘及光电检测装置等组成, 电机和码盘同轴, 电机旋转时, 码盘和电机同速旋转, 使得光栅狭缝与光栅码盘的位置具有相对位移, 从而产生莫尔条纹。主轴旋转每经过码盘上一个栅距大小的角度时, 会使得莫尔条纹信号发生一个周期的变化。位于狭缝后的光电接收元件进行光电转换, 将光信号转为电信号, 再进行信号处理后最终输出对应的角位移信息。

图表70: 光电编码器结构示意图



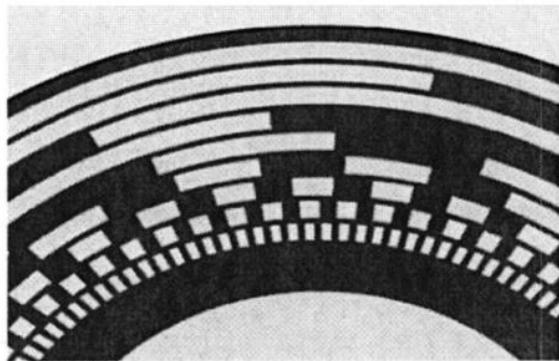
资料来源:《基于TMR的高位高精度磁编码器的设计与实现(2021年)》,长城证券产业金融研究院

根据码盘编码方式的不同, 光电编码器可以分为增量式光电编码器和绝对式光电编码器。

- 增量式: 采用莫尔条纹技术, 码盘上的间距是均匀刻划的, 从而每一个分辨率区间都可以产生一个计数脉冲, 以零位信号的位置作为基准位置计数器以输出脉冲相对于基准位置来计数。如果是正方向转动, 则加计数, 反方向转动, 则减计数。增量式编码器的突出特点就是响应迅速, 容易实现小型化, 结构也相对简单, 但是其断电后很容易造成数据损失, 会出现累计误差的现象。
- 绝对式: 一般采用二进制码盘, 按照一定的规律排列码道, 每一个分辨率区间都对应有唯一的二进制代码, 所以对应轴的每一个转角都可以输出特定的数字代码, 该编码是唯一的, 且与其它位置都没有关系。相比于增量式, 绝对式非常突出的特点就是掉电期间不会造成数据损失, 能够保留该位置的信息, 抗干扰能力强, 一般干扰的瞬间过后就可以恢复正常。

图表71: 增量式码盘

图表72: 绝对式码盘



资料来源:《新型光电编码器关键技术的研究(2013年)》,长城证券产业金融研究院

资料来源:《新型光电编码器关键技术的研究(2013年)》,长城证券产业金融研究院

光栅码盘的材料和工艺是影响编码器精度的重要因素。光电编码器分辨率和精度要求越高,光栅所需刻蚀的面积就越大。这使得码盘使用材料十分关键。通常能用作码盘的材料有浮法玻璃、K9玻璃、窗玻璃、金属、光学树脂等。

- ◆ **玻璃码盘:**精度可以做得很高、热稳定性也很好,但玻璃材料抗冲击能力、抗震都相对较差;同时由于玻璃密度相对较大,要把精度做高就要增加厚度,就会伴随着重量增加,使得设备启动力矩增加,灵敏度降低。
- ◆ **金属(不锈钢)码盘:**生产工艺简单、成本较低,但金属材料很难做薄且透光率低,所以对精度有一定限制,并且其热稳定性不如玻璃材料。
- ◆ **光学树脂:**在耐高温、质量轻、韧性、抗冲击力强等方面,都比玻璃有很大的优势。目前该工艺设计属于前沿技术,在国外有一定应用。可用于码盘的光学树脂材料有聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)、聚碳酸酯(PC)、聚苯乙烯(PS)等。

图表73:部分用于码盘的光学树脂材料和玻璃的性能对比

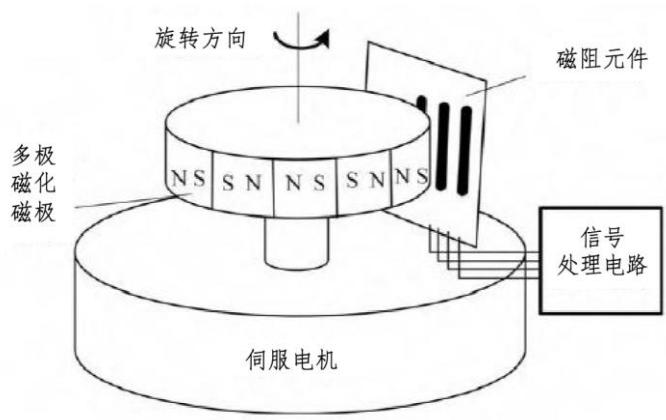
性能指标	PMMA	PC	PS	K9玻璃
透光率	90-92%	80-90%	88-92%	92%
密度	1.19g/cm ³	1.2g/cm ³	1.0g/cm ³	2.35g/cm ³
线膨胀系数	6.3*10 ⁻⁵ mm/- ° C	7*10 ⁻⁵ mm/ ° C	8*10 ⁻⁵ mm/ ° C	0.74*10 ⁻⁵ mm/ ° C
使用温度	80° C	-60-120° C	-30-75° C	-
冲击韧性	2.2-2.8KJ/m ²	80-100KJ/m ²	1.4-2.8KJ/m ²	-
耐酸性及 对盐稳定性	除强氧化酸外,对 酸、盐水均稳定	稀酸、盐水稳定	能耐有机酸盐等溶 液	除氢氟酸,对酸、 盐水均稳定
耐碱性	强碱侵蚀、弱碱稳 定	弱碱影响较轻,强 碱不行	对碱类化合物稳定	强碱侵蚀、弱碱稳 定
耐油性	稳定	稳定	影响表面颜色	强
耐有机溶 液性	芳香族、氯化烃能 溶解	不溶于脂肪族、碳 氢化合物、醚和醇 类	受许多烃类、酮类 脂肪族侵蚀而软化	强

资料来源:《新型光电编码器关键技术的研究(2013年)》,长城证券产业金融研究院

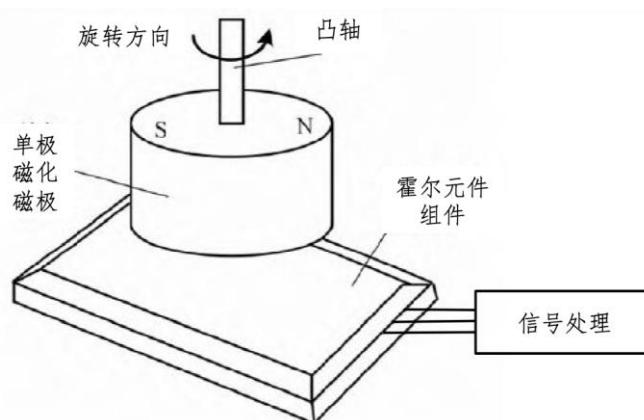
5.2 磁编码器：兼具成本和精度优势，未来发展前景可观

磁编码器主要是由磁栅、磁敏感元件以及信号处理电路组成，通过涂敷磁材料或者刻录法将磁栅制作成等间距的小磁极，将磁极磁化，安装在电机轴上。电机在旋转的过程中带动磁栅旋转，产生周期分布的空间漏磁场。磁敏感元件检测该信号，将周期变化的磁场信号转换成电信号。然后经过信号处理电路对其进行处理，最终实现磁编码器的编码功能。磁栅主要分为单极对式和多极对式；磁敏感元件主要分为霍尔元件和磁阻元件。

图表74: 磁阻式编码器结构示意图



图表75: 霍尔式编码器结构示意图



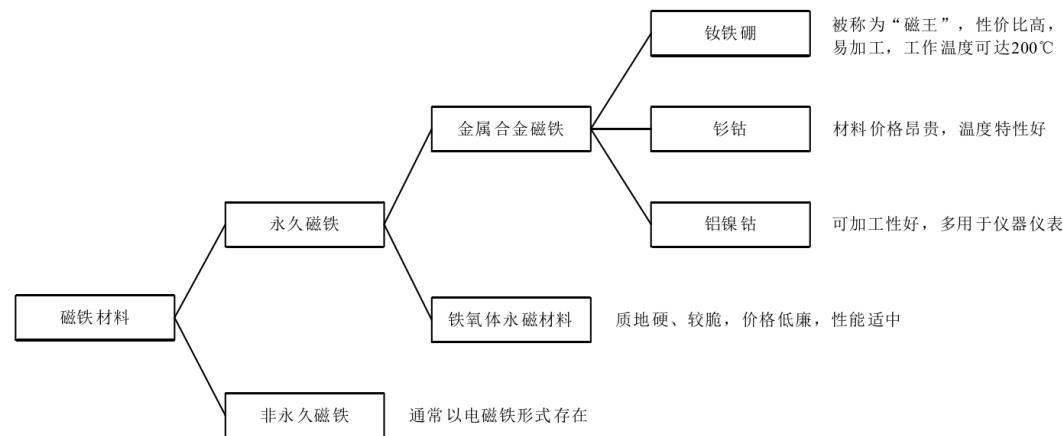
资料来源:《磁编码器设计及误差补偿研究(2022年)》，长城证券产业金融研究院

资料来源:《磁编码器设计及误差补偿研究(2022年)》，长城证券产业金融研究院

敏感元件是影响磁编码器分辨率和精度的关键零部件。敏感元件主要由磁栅和磁传感芯片组成。

- 磁栅: 由一个或多个均匀分布的 NS 极组成的用于测量位置的永磁体。适用于磁电编码器的永磁材料有两大类，合金永磁材料和铁氧体永磁材料。后者包括钕铁硼磁铁、钐钴磁铁、铝镍钴磁铁及铁氧体等。根据《基于 TMR 的高位高精度磁编码器的设计与实现》一文的分析，四种磁体材料性能顺序为：钕铁硼>钐钴>铁氧体>铝镍钴。

图表76: 磁编码器常用磁性材料



资料来源:《基于 TMR 的高位高精度磁编码器的设计与实现(2021年)》，长城证券产业金融研究院

- 传感元件: 主要有两类，一类是霍尔元件。另一类是磁阻元件，包括各向异性磁电阻 (AMR)、巨磁电阻 (GMR)、和隧道磁电阻 (TMR)。霍尔元件是基于霍尔效应制作而成的霍尔元传感器。AMR 磁阻元件是基于 AMR 原理(对铁施加一路磁场时，在磁化方向上，其导电电阻变大，在垂直磁化方向上，导电电阻减小)制成；GMR 磁阻元件是基于 Fe/Cr 纳米多层膜中的 GMR 效应，常见于硬盘读出磁头；TMR 磁

阻元件是基于磁性隧道结在外磁场的控制下，电阻进行切换的磁阻效应而制成。根据《基于 TMR 的高位高精度磁编码器的设计与实现》一文，对比这几种传感元件可以看到，TMR 传感器灵敏度更高，可用于磁场变化较快的场景，但目前该技术仍处于研发阶段。

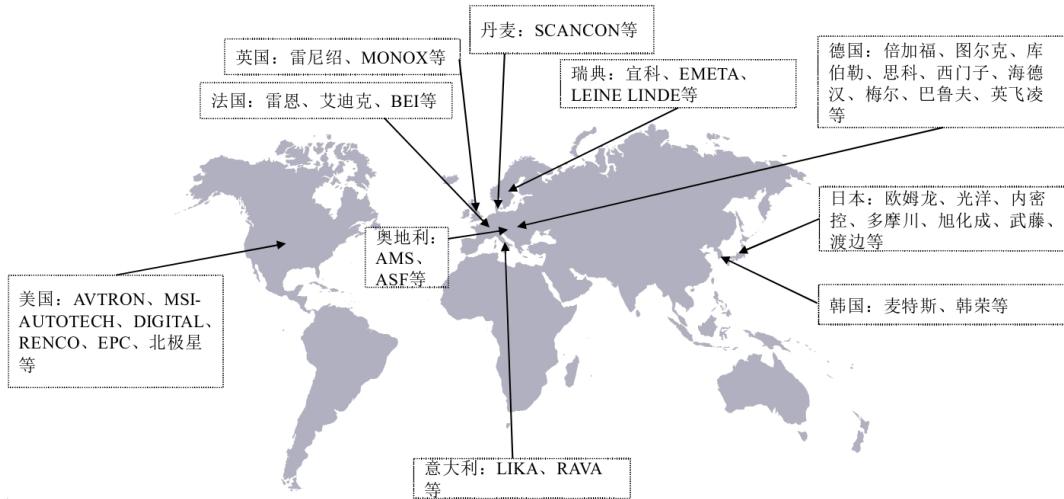
图表77：主要编码器用传感元件性能对比

性能指标	Hall	AMR	GMR	TMR
功耗 (mA)	5-20	1-10	1-10	0.001-0.01
尺寸 (mm)	1*1	1*1	2*2	0.5*0.5
工作范围 (Oe)	1-1000	0.001-10	0.1-30	0.001-200
分辨率 (mOe)	500	0.1	2	0.1
温度特性 (°C)	<150	<150	<150	<200
响应时间 (ns)	>1000	10	10	0.1
温度漂移 (PPM/K)	3000	3000	3000	400
灵敏度 (mV/V/Oe)	0.05	1	3	20

资料来源：《基于 TMR 的高位高精度磁编码器的设计与实现 (2021 年)》，长城证券产业金融研究院

欧美品牌占据全球中高端市场，日韩品牌主打性价比。根据《基于 TMR 的高位高精度磁编码器的设计与实现》一文，国外磁编码器技术领先于国内，欧美、日韩品牌全球市场份额超过 80%。欧美地区编码器公司较多，其产品一般分辨率和精度较高，但售价也较为昂贵；日韩地区一般生产中低端产品，售价相对低廉。

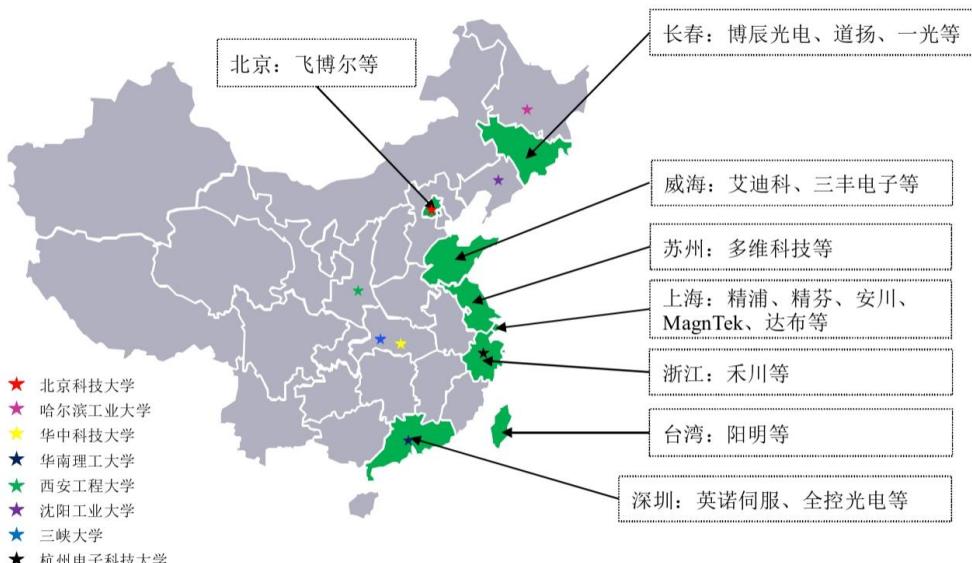
图表78：海外主要编码器品牌地域分布



资料来源：《基于 TMR 的高位高精度磁编码器的设计与实现 (2021 年)》，长城证券产业金融研究院

国内需求主要来自进口，自主品牌呈快速追赶趋势。根据《基于 TMR 的高位高精度磁编码器的设计与实现》一文，预计国内编码器市场份额，有 35% 来自欧美品牌、33% 来自日韩品牌、25% 来自国产品牌，7% 来自其他品牌。近年来如奥普光电、苏州多维、上海精浦等企业取得较大技术突破，未来国产化空间较大。

图表79：国内主要编码器品牌地域分布

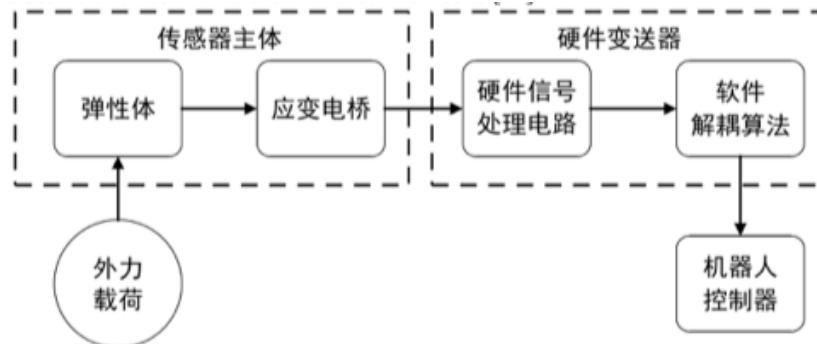


资料来源：《基于 TMR 的高位高精度磁编码器的设计与实现（2021 年）》，长城证券产业金融研究院

6. 力传感器：电机输出力矩的反馈装置

力矩传感器是用于执行器末端的一种接触式传感器，主要用于对电机输出力的扭矩的检测和控制。其核心零部件是弹性体（感应元件）和应变片（电阻转换）。当扭矩作用于传感器时，传感器内部的感力元件会发生变化，从而产生电荷/电压信号，这个信号与扭矩大小成正比，因此可以通过测量电压信号来确定扭矩大小。

图表 80：力传感器结构示意图



资料来源：《机器人用多维力传感器的设计与实现（2021 年）》，长城证券产业金融研究院

根据感力元件的不同，可以分为电磁式力传感器、光电式力传感器、电感式力传感器、电阻应变式力传感器、压电式力传感器、电容式力传感器。其中电阻应变式技术成熟、精度高、测量范围广，金属箔应变式力传感器是目前国外应用最多的一种力传感器。

图表 81：主要力传感器类型的优缺点

检测方法	方法描述	优点	缺点
电磁式	基于霍尔效应在力/力矩作用下产生与之相应的磁通量的变化	动态测量范围大 功耗小 系统简单可靠	非线性误差较大 互换性较差 分辨率不高

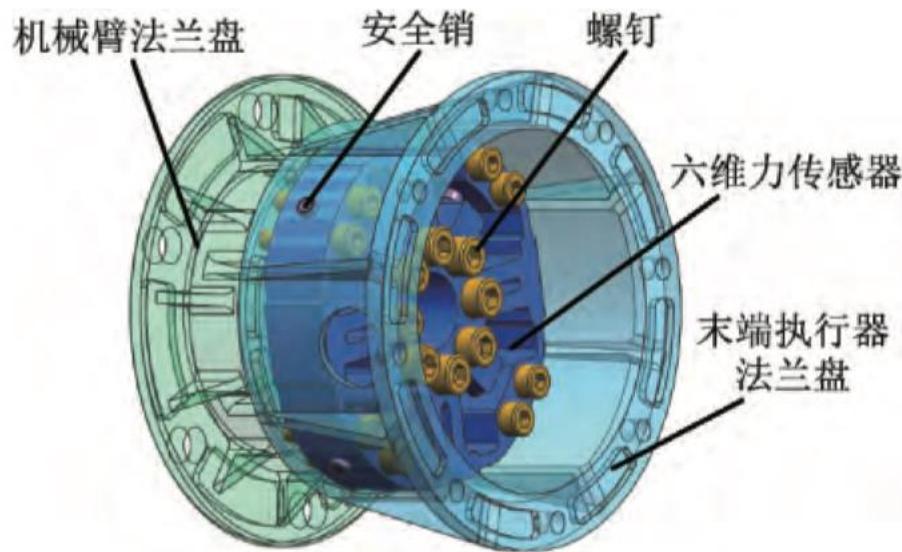
检测方法	方法描述	优点	缺点
光电式	基于光电效应在力/力矩作用下产生与之相应的光学量的变化	可靠性高 测量范围广 动态响应好	价格昂贵 对测试环境要求高
电感式	在力/力矩作用下产生与之相应的电感量的变化	高灵敏度和高分辨率 线性度好 重复性高	不适合用于动态测量 可靠性不高
电阻应变式	在力/力矩作用下产生与之相应的电阻变化量	精度高、技术成熟 测量范围广 频响特性好	存在非线性误差 信号输出微弱
压电式	基于正压效应在力/力矩作用下产生与之相应的电荷量的变化	动态响应好 精确性好和分辨率高 结构紧凑、尺寸小 刚度强	存在电荷泄露，静态力测量困难 分辨率不高
电容式	在力/力矩作用下产生与之相应的电容变化量	高灵敏度和高分辨率 频率范围宽，结构简单 环境适用性强	调理电路复杂 寄生电容影响大

资料来源:《机器人多维力传感器(2022年)》,长城证券产业金融研究院

根据检测力方向的数量,可以分为一维力和多维力传感器。在笛卡尔坐标系中力和力矩可以各自分解为三个分量,因此,多维力最完整的形式是六维力/力矩传感器,即能够同时测量三个力分量和三个力矩分量的传感器。

六维力传感器通常采用电阻应变式,根据传感器弹性体结构的不同,电阻应变式六维力传感器又可以细分为整体式和组合式。整体式弹性体采用一整块材料加工而成,具有迟滞小、灵敏度高等优点,而且通过合理的结构设计可以减少传感器间耦合,实现较高精度的测量。因此整体式弹性体结构设计是六维力传感器研究的重点。

图表82: 六维力传感器结构示意图



资料来源:《高灵敏度大量程六维力传感器设计(2019年)》,长城证券产业金融研究院

六维力传感器自20世纪70年代问世以来,已有数十种弹性体设计方案。海外学者曾提出三竖直梁式、平板式十字梁式等结构;国内学者曾提出Stewart整体式、平行板梁式等结构。由于弹性体结构受到使用场景和使用条件约束,不同的弹性体结构在不同条件下可能各有优势。

图表83: 六维力传感器弹性体结构设计方案汇总

弹性体结构	结构示意图	研发国家或地区	研发时间	优点	缺点
三垂直梁		美国	1975年	结构简单, 承载能力强	Z向灵敏度较差
十字梁		美国	1983年	结构对称、维间耦合小, 比较流行的方案	-
四T型梁		中国台湾	2001年	条件数小, 贴片数量少	维间耦合比较严重
Stewart 整体式		中国	2003年	小型化	加工困难
全剪切应变式		中国	2006年	特别适用于支撑力测量	-
双层E型膜		中国	2008年	耦合小、测量精度高、小型化	-
三梁式		韩国	2011年	小型化, 适用于手指内部	-
平行板梁		中国	2014年	维间耦合小、加工容易、刚度较高	-
平板式十字架		韩国	2014年	承载能力接近人类手臂	-

资料来源:《空间容错六维力传感器设计及标定研究(2021年)》,长城证券产业金融研究院

我国应变式力传感器规模稳步增长,国产品牌实力仍有提升空间。据华经产业研究院数据,2022年我国应变式力传感器市场规模30.57亿元,同比增长15.80%;总产量1122.6万台,同比增长18.31%。

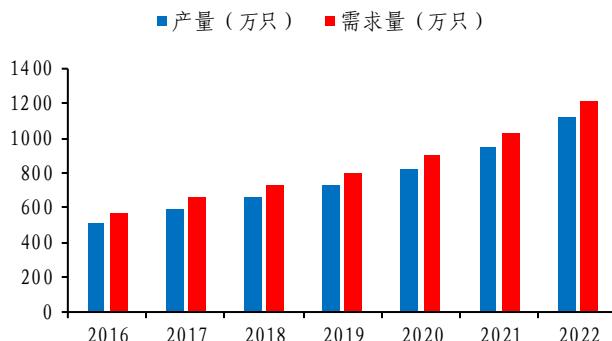
全球应变式力传感器的生产厂家大致可以划分为三个梯队:1)第一梯队以跨国公司为主,如Vishay、HBM、梅特勒-托利多集团、Flintec等。2)第二梯队以中航电测、柯力传感等国内龙头企业为主,在细分市场、产品价格及下游应用等方面各有所长。3)第三梯队是中国、韩国等国家的中低端产品生产厂家,其产品主要在国内销售,竞争力主要体现在相对低廉的劳动力成本上,技术水平相对较低,尚不能参与全球市场竞争。

图表84: 我国应变式力传感器市场规模

图表85: 我国应变式力传感器产量和需求量



资料来源：华经产业研究院，长城证券产业金融研究院



资料来源：华经产业研究院，长城证券产业金融研究院

7. 投资建议：前景广阔，本土化进程是关键

随着产品性能不断提升、资本投入持续扩张、扶持政策相继颁布，人形机器人产业链各环节快速发展壮大。在《人形机器人专题一&二》中，我们指出人形机器人有望先在工商业普及，逐步拓展至家用、公共领域，发展成为千亿美元级蓝海市场。

执行器作为价值量占比最高的部件，其中包含诸多细分组件和相关产业链。部分产业链从原材料、设备到终端产品，本土企业已取得较大突破，有望在人形机器人供应链中占据领先地位，随规模化商业落地迎来重大发展机遇。部分产业链仍有待于技术、产品、渠道等多方面实现突破，与终端厂商携手共进，打开国产替代化的广阔空间。

我们整理了人形机器人执行器系统产业链相关标的：1) 总成：三花智控、拓普集团；2) 电机：步科股份、昊志机电；3) 减速器：哈默纳科、纳博特斯克、绿的谐波、双环传动、中大力德；4) 丝杠：鼎智科技、恒立液压、贝斯特；5) 编码器：奥普光电；6) 力传感器：柯力传感。

图表86：人形机器人执行器系统相关标的

产业链环节	公司名称	股票代码	交易货币	收盘价	总市值 (亿元)	P/E 2024E	P/E 2025E	人形机器人产业链 关联性	备注
总成	三花智控	002050.SZ	CNY	25.59	955	24.55	19.95	★★★★★	主要做旋转，直线也有送样
	拓普集团	601689.SH	CNY	61.01	709	23.47	17.44	★★★★★	主要做直线
电机	步科股份	688160.SH	CNY	61.94	52	54.07	42.86	★★★★★	广泛应用于协作机器人
	昊志机电	300503.SZ	CNY	17.22	53	—	—	★★★★★	已批量应用于按摩机器人
减速器	哈默纳科	6324.T	JPY	4,300	4,142	—	—	★★★★★	谐波减速器龙头
	绿的谐波	688017.SH	CNY	144.36	243	149.75	102.38	★★★★★	谐波减速器国产品牌龙头
	纳博特斯克	6268.T	JPY	2,595	3,142	—	—	★★★★★	RV减速器龙头
	双环传动	002472.SZ	CNY	24.95	213	20.38	16.28	★★★★★	具备谐波、RV减速器产能
丝杠	中大力德	002896.SZ	CNY	36.80	56	56.38	44.39	★★★	具备多种精密减速器产能
	鼎智科技	873593.BJ	CNY	42.98	41	35.65	26.50	★★★★★	具备行星滚柱丝杠产能
	恒立液压	601100.SH	CNY	57.95	777	26.98	21.72	★★★★★	产能建设中
	贝斯特	300580.SZ	CNY	30.69	104	29.21	22.74	★★★	产能建设中
编码器	奥普光电	002338.SZ	CNY	30.06	72	39.21	27.30	★★★★★	国内光电编码器领先企业
力传感器	柯力传感	603662.SH	CNY	33.82	96	24.50	19.81	★★★★★	国内力传感器头部企业

资料来源：Wind，各公司公告，长城证券产业金融研究院 注：相关标的盈利预测均来自wind机构一致预期，数据截至2024年3月18日

风险提示

1. 技术研发不确定性风险:

人形机器人执行器的研发涉及机械工程、电子工程、计算机科学等多个学科，技术难度大、研发的周期与效果不确定性较大。本文技术框架拆解参考特斯拉 Optimus Gen1 结构设计方案，可能与最终落地产品有所差异。

2. 降本进程不及预期:

人形机器人尚未出现可大规模推向市场的成熟产品，其结构部件与材料仍有不确定性，整个产业链仍在发展早期。若未来人形机器人产品的生产技术工艺、产业链发展完善速度不及预期，本文对部分零部件成本的预测可能与实际情况不符。

3. 商业化落地不及预期:

人形机器人潜在应用场景涵盖社会生活诸多领域，商业化推广可能对国家与社会产生多方面的综合影响，存在复杂性和不确定性。本文研究的部分零部件市场发展与人形机器人高度相关。若人形机器人大规模商业化应用受到全球或具体国家法律、道德、社会接受度、准入机制、国际贸易关系等方面限制，可能导致我们对部分零部件的市场规模预测与实际情况不符。

4. 三方数据失真风险:

本文市场规模、市场份额等数据主要来自第三方平台，可能与行业和公司真实情况存在出入，从而影响对市场情况的判断。

免责声明

长城证券股份有限公司（以下简称长城证券）具备中国证监会批准的证券投资咨询业务资格。

本报告由长城证券向专业投资者客户及风险承受能力为稳健型、积极型、激进型的普通投资者客户（以下统称客户）提供，除非另有说明，所有本报告的版权属于长城证券。未经长城证券事先书面授权许可，任何机构和个人不得以任何形式翻版、复制和发布，亦不得作为诉讼、仲裁、传媒及任何单位或个人引用的证明或依据，不得用于未经允许的其它任何用途。如引用、刊发，需注明出处为长城证券研究院，且不得对本报告进行有悖原意的引用、删节和修改。

本报告是基于本公司认为可靠的已公开信息，但本公司不保证信息的准确性或完整性。本报告所载的资料、工具、意见及推测只提供给客户作参考之用，并非作为或被视为出售或购买证券或其他投资标的的邀请或向他人作出邀请。在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见并不构成对任何人的投资建议。在任何情况下，本公司不对任何人因使用本报告中的任何内容所引致的任何损失负任何责任。

长城证券在法律允许的情况下可参与、投资或持有本报告涉及的证券或进行证券交易，或向本报告涉及的公司提供或争取提供包括投资银行业务在内的服务或业务支持。长城证券可能与本报告涉及的公司之间存在业务关系，并无需事先或在获得业务关系后通知客户。

长城证券版权所有并保留一切权利。

特别声明

《证券期货投资者适当性管理办法》、《证券经营机构投资者适当性管理实施指引（试行）》已于 2017 年 7 月 1 日 起正式实施。因本研究报告涉及股票相关内容，仅面向长城证券客户中的专业投资者及风险承受能力为稳健型、积极型、激进型的普通投资者。若您并非上述类型的投资者，请取消阅读，请勿收藏、接收或使用本研究报告中的任何信息。

因此受限于访问权限的设置，若给您造成不便，烦请见谅！感谢您给予的理解与配合。

分析师声明

本报告署名分析师在此声明：本人具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格或相当的专业胜任能力，在执业过程中恪守独立诚信、勤勉尽职、谨慎客观、公平公正的原则，独立、客观地出具本报告。本报告反映了本人的研究观点，不曾因，不因，也将不会因本报告中的具体推荐意见或观点而直接或间接接收到任何形式的报酬。

投资评级说明

公司评级		行业评级	
买入	预期未来 6 个月内股价相对行业指数涨幅 15%以上	强于大市	预期未来 6 个月内行业整体表现战胜市场
增持	预期未来 6 个月内股价相对行业指数涨幅介于 5%~15%之间	中性	预期未来 6 个月内行业整体表现与市场同步
持有	预期未来 6 个月内股价相对行业指数涨幅介于-5%~5%之间	弱于大市	预期未来 6 个月内行业整体表现弱于市场
卖出	预期未来 6 个月内股价相对行业指数跌幅 5%以上		
	行业指中信一级行业，市场指沪深 300 指数		

长城证券产业金融研究院

深圳

地址：深圳市福田区福田街道金田路 2026 号能源大厦南塔楼 16 层

邮编：518033

传真：86-755-83516207

上海

地址：上海市浦东新区世博馆路 200 号 A 座 8 层

邮编：200126

传真：021-31829681

网址：<http://www.cqws.com>

北京

地址：北京市西城区西直门外大街 112 号阳光大厦 8 层

邮编：100044

传真：86-10-88366686

