

2023年07月01日
 机械

ESSENCE

行业专题

证券研究报告

AI 赋能，人形机器人产业提速，把握产业链受益机会

——机器人系列报告四

核心观点：人形机器人产业发展仍处于 0-1 阶段，当前行业投资逻辑偏向事件驱动型的主题投资，但可落地服务场景的人形机器人成长空间非常广阔，值得长期关注。本文将围绕以下热点问题作出讨论：①当前节点人形机器人产业有哪些变化？②如何判断其市场空间？③我国在 Tesla 人形机器人产业链中哪些环节具体受益？④各环节供应格局及壁垒如何？⑤市场化如何展望？我们认为 AI 赋能及多方入局情形下人形机器人产业发展明显加速，商业化节奏值得期待，我国制造企业凭借成本优势有望在人形机器人硬件端获益。本文亮点在于，我们对 Tesla Optimus 制造成本进行拆分，讨论各零部件基本原理、技术壁垒及供应格局，并从价值量/壁垒等维度指出可重点关注电机、滚珠丝杠、减速器、传感器等部件，进而跟踪各环节中的有望进入 Tesla 供应链或能实现技术突破、国产替代及产能释放的优秀国产制造企业。

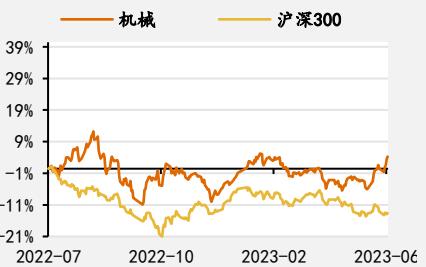
市场边际变化：AI 超预期发展及多方玩家入局，关注 Tesla AI DAY 等事件催化。我们认为 2023 年相对于 2022 年而言，市场最大的边际变化在于：一方面，人形机器人是 AI+机械的最大落地场景，ChatGPT 接入机器人，有望使得人机互动更加智能，更多元化，产业落地有望加速。另一方面，全球范围内兴起人形机器人热潮，特斯拉、波士顿动力、Engineered Arts、1X Technologies、优必选、达闼、小米、傅利叶智能等海内外企业纷纷入局，风投企业软银集团创始人孙正义亦在今年 6 月股东大会中表示出对 AI 革命的强烈兴趣。展望未来，我们认为短期可以重点关注今年 7 月傅利叶智能的新品发布会及 9 月 Tesla AI DAY，长期需要跟踪人形机器人于明后两年的量产进度。

市场空间判断：成长性明确，长期价值有望超过电动车。据高盛预测，在技术得到革命性突破的理想情况下人形机器人 2025-2035 年销量 CAGR 可达 94%，2035 年市场规模达 1540 亿美元。若参照电动汽车发展历程，则乐观情况下人形机器人 2025-2035 年销量 CAGR 可达 59%。从劳动力替代角度来看，人形机器人在两年投资回报期情形下将逐步实现从 B 端至 C 端的量产推广。Tesla CEO 马斯克在今年 5 月股东大会中指出长期维度人形机器人价值将超过电动车。

投资评级 **领先大市-A**
维持评级

首选股票 目标价（元） 评级

行业表现



资料来源：Wind 资讯

升幅%	1M	3M	12M
相对收益	7.4	10.5	18.8
绝对收益	7.5	5.6	4.5

郭倩倩 分析师

SAC 执业证书编号：S1450521120004

guoqq@essence.com.cn

相关报告

行业景气度分化，国企板块	2023-05-16
表现亮眼——机械行业	
2022 年报及 2023 年一季报总结	
工业机器人行业筑底阶段，关注盈利能力改善——工业机器人板块 2022 年报 &2023Q1 财报总结	2023-05-15
行业需求筑底，板块业绩边际好转——工程机械 2022 年报&2023 一季报总结	2023-05-08
整体进入估值快速消化期，新技术方向报表端延迟反映——光伏设备板块 2022 年报及 2023Q1 财报总结	2023-05-08
增速高位回落，盈利能力持续改善，看好锂电低渗透率	2023-05-07

受益环节：把握我国制造企业在人形机器人硬件端受益机会。参照智能手机及电动汽车的发展，苹果 IOS 系统及特斯拉 FSD 系统均由企业自研自控，是软件算法的核心部分。而硬件方面，为达降本诉求通常采取外购形式，因此我们认为中国制造企业有望凭借明显的成本优势在人形机器人产业链上获得受益机会。

成本拆分：Tesla Optimus 关节成本占比超 51%，重点关注电机、丝杠、减速器、传感器。根据 Tesla 数据，我们假设 Optimus 将分别使用 14 个旋转执行器、14 个直线执行器和 12 个手部执行器，并预计①旋转执行器：主要由无框力矩电机+谐波减速器/行星减速器+力矩传感器+编码器+轴承组成；②线性执行器：主要由无框力矩电机/步进电机+行星滚柱丝杠/滚珠丝杠+力矩传感器+编码器+轴承组成。③手部执行器：主要由空心杯电机+行星齿轮箱+滚珠丝杠+传感器+编码器组成。结合我们预期价格，可得 Optimus 制造成本约 2.25 万美金，其中关节执行器总成本占比达 51.42%，旋转关节、线性关节、手部关节占比分别达 20.87%、22.41% 和 8.13%。从价值量、技术壁垒排序判断可得：

- 零部件成本排序：无框力矩电机（10.34%）、行星滚柱丝杠（9.85%）、力矩传感器（7.51%）、谐波减速器（5.91%）、编码器（5.54%）、空心杯电机（4.43%）、轴承（3.02%）。
- 技术壁垒排序：行星滚柱丝杠、六维力矩传感器、空心杯电机、谐波减速器、无框力矩电机、行星减速器。

市场化展望：应用场景“用得上”、规模化降本“买得起”是量产关键。人形机器人尚处于商业化早期，市场化痛点在于刚需应用场景挖掘、规模化降本及产业标准构建。①应用场景——“用得上”：人形机器人有望优先于 B 端展开应用，比如特斯拉首批机器人可能落地其超级工厂，降本&智能化水平提升后传导至 C 端服务场景；②规模化降本——“买得起”：马斯克在 AI DAY 中提到 Optimus 目标价格低于 2 万美金。我们认为 Optimus 有望通过其强大的软件算法能力、明确的降本目标及应用场景，成为人形机器人行业首个实现大规模量产并商业化的项目。

相关受益企业：根据成本分析，执行器中成本占比较高的部件主要是电机、丝杠及减速器等，建议关注：①执行器：【拓普集团】、【三花智控】；②空心杯电机：【鸣志电器】、【鼎智科技】；③无框力矩电机：【步科股份】、【禾川科技】、【汇川技术】；④滚珠丝杠：【秦川机床】、【江苏雷利】、【鼎智科技】、【恒立液压】、【贝斯特】。⑤谐波减速器：【绿的谐波】、【双环传动】。⑥行星减速器：【中大力德】、【通力科技】。

风险提示：机器人推广不及预期、市场竞争加剧、产品迭代不及预期、政策风险、测算具有主观性。

三大方向——锂电设备
2022 年报及 2023 年一季报
综述

目 内容目录

1. AI 赋能人形机器人产业提速，把握我国硬件受益机会	7
1.1. 人形机器人 0-1 阶段，如何看待变化？	7
1.2. 老龄化&用工成本提升，人形机器人潜在空间巨大	9
1.3. 成本优势下，把握我国在硬件领域的受益机会	11
2. 特斯拉人形机器人产业链分析：核心零部件详解	12
2.1. 关节成本占比过半，重点关注电机、丝杠、减速器、传感器	12
2.2. 旋转关节：无框力矩电机+谐波减速器+传感器+编码器	15
2.2.1. 无框力矩电机	15
2.2.2. 谐波/行星减速器	17
2.2.3. 编码器	23
2.2.4. 力传感器	26
2.3. 线性关节：无框力矩电机+行星滚柱丝杠+传感器+编码器	27
2.3.1. 永磁同步电机	28
2.3.2. 行星滚柱丝杠/滚珠丝杠	31
2.4. 手部关节：空心杯电机+行星减速器+滚珠丝杠+传感器	34
2.4.1. 空心杯电机	35
2.4.2. 触觉传感器	37
3. 人形机器人商业化关键：刚需应用场景及降本驱动量产	38
3.1. 商业化痛点：刚需服务场景、规模化降本、标准构建	38
3.2. 市场化展望：有望复制新能源汽车及智能手机发展历程	41
3.3. 国内主流人形机器人公司尚未盈利，等待盈亏平衡点	42
4. 相关受益企业	43
5. 风险提示	45

目 图表目录

图 1. AI 大模型高速发展	7
图 2. AI 赋能 Tesla 人形机器人	7
图 3. 2021 年起人形机器人重大事件梳理	8
图 4. Tesla 机器人更新时间线	9
图 5. Tesla Optimus 电机转矩控制展示	9
图 6. Tesla Optimus 基于人类动作演示学习	9
图 7. 中国和世界 65 岁以上人口占比增长迅速	10
图 8. 中国劳动力成本快速上升, 机器人替代潜力巨大	10
图 9. 全球人型机器人市场规模预测	11
图 10. 人形机器人产业链概览	11
图 11. 人形机器人全套控制系统及对应软硬件示意图	12
图 12. Tesla Optimus 人形机器人运动执行关节	13
图 13. Tesla Optimus 核心零部件分布示意图	13
图 14. 关节执行器成本占比超 51%	14
图 15. 电机、滚珠丝杠、减速器、传感器成本占比较高	14
图 16. Tesla Optimus 旋转执行器零部件构成	15
图 17. Tesla Optimus 旋转执行器零部件成本拆分	15
图 18. 无框力矩电机的定子和转子结构图	16
图 19. 无框力矩电机能够很好地集成于机器人关节	16
图 20. 谐波减速器及其内部结构图	17
图 21. 谐波减速器的“错齿”原理	18
图 22. 柔轮疲劳损伤断裂示意图	18
图 23. 谐波减速器近 5 年专利申请数量排名	18
图 24. 谐波减速器行业壁垒存在于研发、生产、销售等各个环节	19
图 25. 2021 年哈默纳科全球谐波减速器市占率格局	19
图 26. 我国谐波减速器行业国产替代逐渐推进	19
图 27. 行星减速器及其内部结构示意图	21
图 28. 普通伺服电机+大减速比减速器, 反向驱动时合成扭矩会发生异常, 从而导致减速器损坏	21
图 29. 大气隙半径无框力矩电机+行星减速器, 正反驱动时合成扭矩均处于正常状态, 减速器不会损坏	21
图 30. UCLA Zhu. Taoyuanmin 博士设计并使用在人形机器人上的行星齿轮箱	22
图 31. UCLA Zhu. Taoyuanmin 博士设计的行星齿轮箱用于人形机器人的胯骨	22
图 32. 2022 年全球前五大行星减速器竞争格局	22
图 33. 编码器在伺服系统中的应用	23
图 34. 三种编码器盘结构对比	24
图 35. 光电编码器工作原理图	24
图 36. 磁电编码器工作原理图	24
图 37. 六维力学传感器外观结构	26
图 38. 六维力学传感器同时检测三方向力和三方向力矩	26
图 39. 多维传感器广泛应用于机器人末端关节	26
图 40. 多维传感器具体功能	26
图 41. Tesla Optimus 直线执行器零部件构成	28

图 42. Tesla Optimus 直线执行器零部件成本拆分	28
图 43. 线性执行器	28
图 44. 步进电机的步进原理	29
图 45. 步进电机和伺服电机结构图对比	29
图 46. 2014–2019 年我国直线电机行业市场规模及增长	30
图 47. 2015–2019 年我国直线电机产量及增长	30
图 48. 2019 年直线电机企业市占率情况	31
图 49. 线性滚珠丝杠实物图	32
图 50. 滚珠丝杠副结构图	32
图 51. 滚珠丝杠结构图	32
图 52. 行星滚柱丝杠结构图	32
图 53. Optimus 线性执行器剖面图 1 螺母螺杆	33
图 54. Optimus 线性执行器剖面图 2 滚珠	33
图 55. 中国品牌在国内中低端市场占据一席之地	33
图 56. 国内高端应用市场基本被德系、日系产品垄断	33
图 57. 特斯拉人形机器人手部结构	35
图 58. 特斯拉机器人手部包含 6 个驱动器和 11 个自由度	35
图 59. Tesla Optimus 手部执行器零部件成本拆分	35
图 60. 传统铁芯电机结构	35
图 61. 空心杯电机结构	35
图 62. 有刷空心杯电机可应用于机器人手部	36
图 63. 有刷空心杯电机	36
图 64. 机器手触觉传感器结构图	37
图 65. 基于石墨烯的触觉传感器	37
图 66. 扫地机器人和吸尘器产品	39
图 67. 扫地机器人和吸尘器产品	40
图 68. 优必选旗下人形机器人 Walker X	42
图 69. 达闼科技旗下人形机器人 Ginger XR-1	42
图 70. 优必选 2020–2022 年营业收入	43
图 71. 达闼科技 2017–2019 年营业收入	43
图 72. 2020 至 2022 年优必选利润率与研发费用率	43
图 73. 2017 至 2019 年达闼科技利润率与研发费用率	43
 表 1: Tesla Optimus 最新数据可视化与 2021 年概念机数据对比	13
表 2: Tesla Optimus 成本拆分测算	14
表 3: 机器人关节用无框力矩电机指标	16
表 4: 2022 年全球及国内无框力矩电机主要参与者情况	16
表 5: 国外主要谐波减速器厂商概况	19
表 6: 国内主要谐波减速器厂商概况	20
表 7: 国内有潜力进入谐波领域厂商概况	21
表 8: 2022 年我国主要行星减速器上市公司情况	23
表 9: 三种类型编码器性能对比	25
表 10: 国内主要编码器厂商概况	25
表 11: 国内主要传感器厂商概况	27

表 12: 无框力矩电机、步进电机、直线电机对比	28
表 13: 国内主要步进电机厂商概况	30
表 14: 国内外主要直线电机厂商概况	31
表 15: 国内外主要行星滚柱丝杠厂商概况	33
表 16: 空心杯电机特点与优势	36
表 17: 无刷电机与有刷电机对比	36
表 18: 国内主要空心杯电机厂概况	37
表 19: 国内主要触觉传感器厂商概况	38
表 20: 人形机器人应用场景	38
表 21: 扫地机器人与吸尘器对比	39
表 22: 波士顿动力 Atlas、优必选 Walker、特斯拉 Optimus 人形机器人应用场景	39
表 23: 智能手机/新能源汽车/人形机器人发展历程类比	41
表 24: 相关企业估值表	44

1. AI 赋能人形机器人产业提速，把握我国硬件受益机会

1.1. 人形机器人 0-1 阶段，如何看待变化？

产业 0-1 阶段，当前变化在于 AI 赋能&多方入局&性能改进。人形机器人产业的发展仍处于 0-1 阶段，2022 年 9 月 30 日 Tesla AI DAY 首次展示其人形机器人的详细参数、开发过程和行动能力，当时引发了社会、产业及市场广泛的关注。当前时间节点，我们认为较去年相比，主要的变化在于 AI 大模型赋能带来的对具身智能落地的想象、产业资本关注提升下多方巨头的入局以及 Tesla 人形机器人性能的迭代改进。

变化一：AI 大模型赋能，人形机器人成为具身智能的最佳载体。AI 大模型在语言、视觉、运动控制、降低研发成本等多方面为人形机器人产业赋能。**(1) 语言能力：**快速迭代的 ChatGPT 具有不亚于人的语言生成能力，为机器人的语音交互难题提供了解决方案，2023 年 4 月，人工智能公司 Levatas 与波士顿动力合作，将 ChatGPT 和谷歌语音合成技术接入 Spot 机器狗，实现与人类的交互。**(2) 视觉能力：**在 SAM 模型的加持下，机器视觉的准确性、识别速度和零样本迁移能力得到革命性提升，有望赋能人形机器人适配更多工业场景和生活场景。**(3) 运动控制：**以 AI 模型为基础的运动控制系统目前仍在不断迭代中，未来有望广泛应用于人型双足机器人的平衡和协调性控制。**(4) 降低研发成本：**AI 虚拟仿真测试大幅降低了测试成本，提升数据收集效率，加速产品迭代周期。此外，AI 大模型广泛也应用于人形机器人的自动化决策、路径设计与规划等领域。人形机器人作为人工智能的最佳载体，将充分享受到 AI 大模型高速发展的红利。

图1. AI 大模型高速发展



资料来源：中国工商银行金融科技研究院，安信证券研究中心

图2. AI 赋能 Tesla 人形机器人



资料来源：Tesla，安信证券研究中心

变化二：产业资本关注度提升，多方入场加速布局。自 2021 年起，特斯拉、波士顿动力、本田、Engineered Arts、1X Technologies 等海外企业纷纷发布了人形机器人产品或其迭代产品；国内企业优必选、达闼机器人、小米、傅里叶智能、纯米科技亦逐步进行产品首发及更新，相应的诸多相关零部件企业亦准备进入机器人领域布局，越来越多的企业开始瞄准人形机器人赛道，开展相关的研究计划及产品落地。风投企业软银集团创始人孙正义亦在今年 6 月股东大会中表示出对 AI 革命的强烈兴趣。当前人形机器人产业链仍处于商业化的早期，大部分产品位于概念机或试制机阶段，技术、性能及成本均未达到量产阶段，因此我们需要关注行业中重大事件及重大政策的影响，尤其是 Tesla 于今年 9 月 30 日 AI Day 上关于 Optimus 的最新进展及量产节奏。

图3. 2021 年起人形机器人重大事件梳理



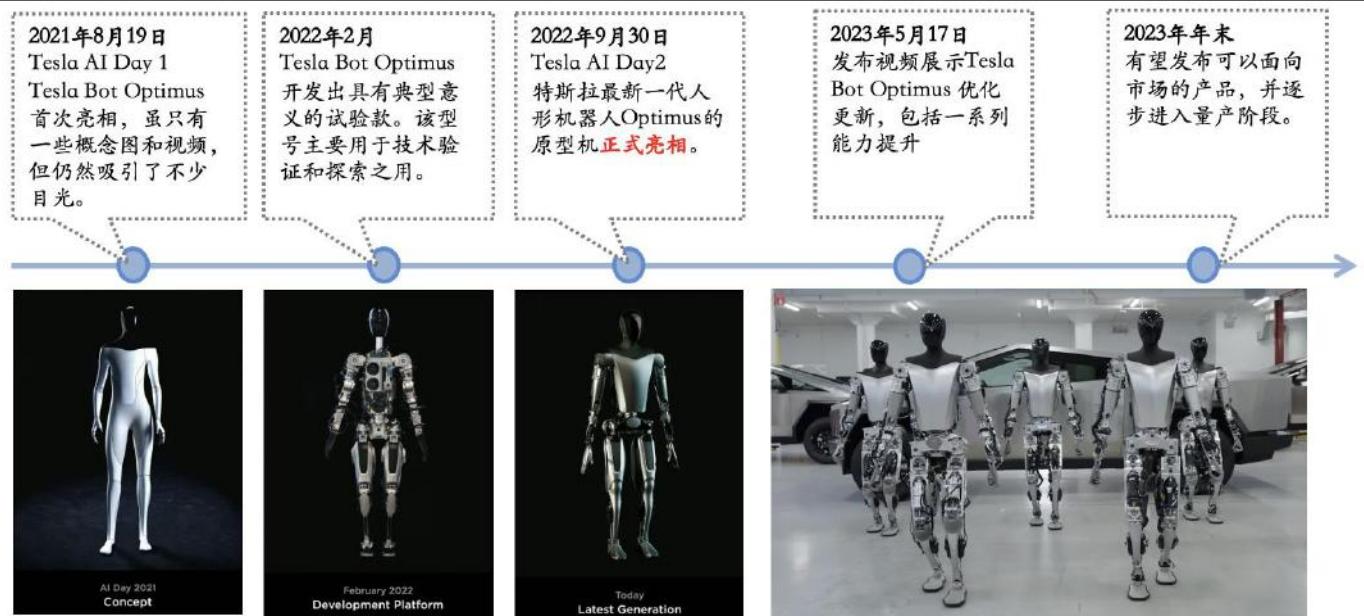
资料来源：Tesla AI day, 各公司官网, 安信证券研究中心

变化三：Tesla Optimus 5 月最新版本发布，产品性能升级功能完善。2021 年 8 月 Tesla 在首个 AI Day 上第一次公开分享人形机器人概念 Tesla Bot，随后在 2022 年 2 月推出 Tesla Bot 电线裸露的初代原型机，后于同年 9 月的 AI Day 上展示了 Optimus 的系列参数及相关视频，包括行走、浇花、在工厂搬运物品等行动能力，成为当时第一个没有遥控、外部电源，完全依靠 AI 算法、自身电池电控和高驱动的电驱执行器驱动的人形机器人。2023 年 5 月 16

日（北美时间），Tesla 在 2023 年股东大会上发布其人形机器人最新视频，我们可以看到其性能更加稳定、形态也更加自然，新的变化主要在于：

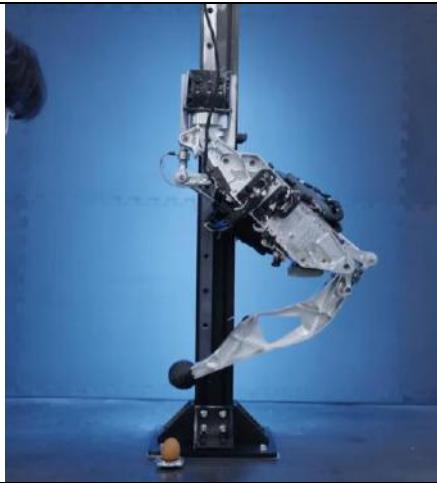
- ① **控制能力：**机器人展示机械臂控制、机械扭矩控制能力，行走、抓取物体自然，能实现敲打鸡蛋而不打破。
- ② **环境探索与记忆能力：**机器人承接了视觉 AI，安装相同的无人驾驶系统 FSD，并接入和特斯拉汽车同样的神经网络，可以更加全面完善地识别周边环境，探索环境并产生记忆。
- ③ **学习能力：**机器人可以基于人类动作演示来进行动作的学习，升级了端到端的控制能力，能用机械手进行各种物体交互。

图4. Tesla 机器人更新时间线



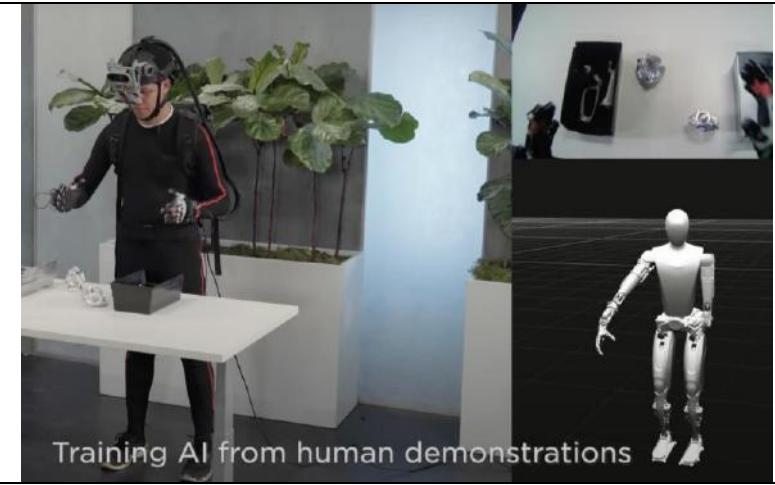
资料来源：Tesla AI day, Tesla YouTube, 安信证券研究中心

图5. Tesla Optimus 电机转矩控制展示



资料来源：Tesla YouTube, 安信证券研究中心

图6. Tesla Optimus 基于人类动作演示学习



资料来源：Tesla YouTube, 安信证券研究中心

1. 2. 老龄化&用工成本提升，人形机器人潜在空间巨大

人口加速老龄化，劳动力出现缺口。据中国卫健委统计，2015 年中国 65 岁以上人口比例达 10.5%，高于世界平均水平 8.4%。2020 年间，中国 65 岁以上人口比例快速攀升至 13.5%，增速亦高于同期世界平均水平。据联合国经社部预测，2035 年中国 65 岁以上人口比例将高达 22.5%，进入超老龄化社会。同期，全球平均水平亦将上升至 13.2%，接近严重老龄化。

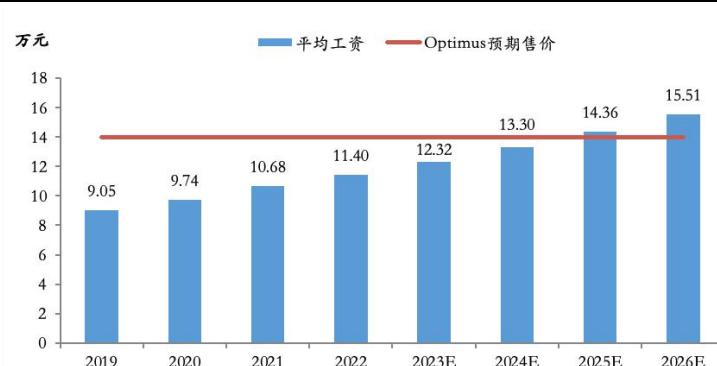
据此，全球均面临着日益严峻的人口老龄化问题，劳动力供给将面临严重短缺。

人均工资逐年上升，用工成本水涨船高。据国家统计局数据显示，中国人均工资从2019年的9.05万上升至2022年的11.4万，复合增长率达8%，用工成本压力快速上升，假定未来中国人均工资年增长率仍为8%，2025年预期中国人均工资将达14.4万元。同期，若Optimus投入量产，据马斯克宣称售价约为2万美元，约合14万元，与中国人均工资基本持平。据此，人形机器人有望占据成本优势，在工业和服务业中实现渗透率的提升。

图7. 中国和世界65岁以上人口占比增长迅速



图8. 中国劳动力成本快速上升，机器人替代潜力巨大



资料来源：中国卫健委，联合国经社部，世界银行，安信证券研究中心

资料来源：国家统计局，Tesla AI day，安信证券研究中心

理想情形下，2025-2035年人形机器人销量增速有望达94%，两年投资回报期。

根据哈默纳科官网公告显示的高盛预测，

①最乐观情形：2035年人形机器人市场规模可达1540亿美元，与2021年电动汽车市场规模相近，2025-2035年复合增速达94%。为了达到最乐观情形，技术必须有革命性的突破：比如机器人的电池需支持长达20小时的连续工作；机器人需要兼具敏捷性和智能性；运动规划算法的效率和算力需大幅提升；机器人需自主学习并适应工作环境；机器人制造成本需年均降低15%-20%。此外，消费者对机器人进入生活的接受度也需要大幅提升。高盛认为，上述技术突破虽然看似难以实现，但考虑到机器人的发展速度已然超乎公众想象，最乐观情形亦有可能达成。

②乐观情形：若参照全球电动汽车发展历程，预计2025-2035年人形机器人销量CAGR可达40%左右。乐观状态下，若人形机器人发展速度快于电动汽车发展进程，则预计2025-2035年人形机器人销量CAGR可达59%。

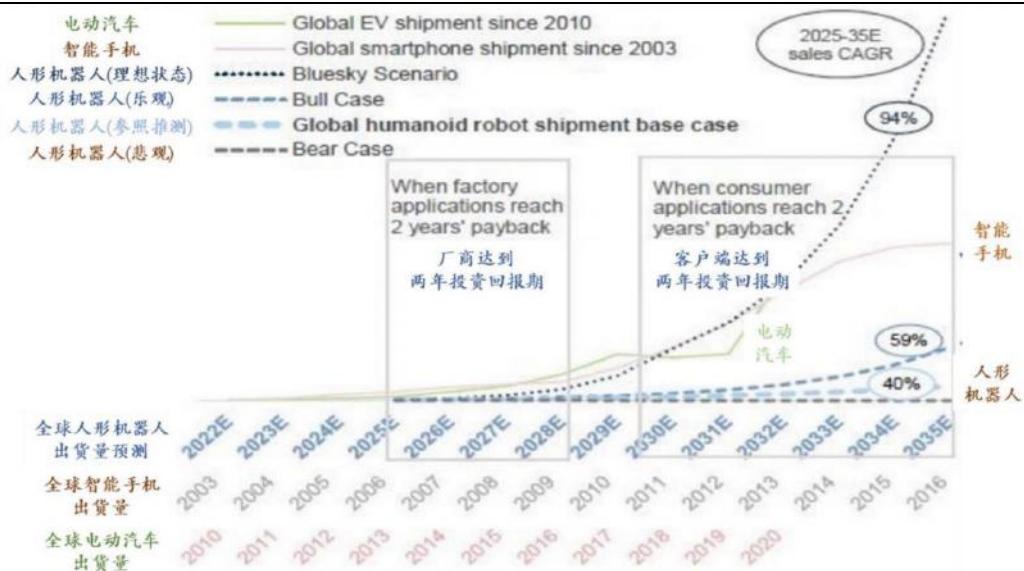
③中性情形：预计未来10-15年内人形机器人市场有望达到60亿美元；

④极悲观情形：人形机器人技术发展遇到瓶颈而停滞，预计2025-2035年人形机器人销量CAGR可能为0%；

从劳动力替代角度来看，预计2025年-2028年厂商达到两年投资回报期，2030年-2035年客户端达到两年投资回报期。

此外，特斯拉CEO马斯克在AI DAY以及股东大会上表示其人形机器人量产目标售价预计能够达到2万美元，销量有望达百万台级别。

图9. 全球人型机器人市场规模预测



资料来源：哈默纳科，高盛，安信证券研究中心

1.3. 成本优势下，把握我国在硬件领域的受益机会

人形机器人产业链与工业机器人具有一定重合度，但在上游零部件以及下游应用场景方面存在较大差异。工业机器人主要依托工控系统运行，具备高集成度和智能程度；人形机器人涉及到各种复杂场景的处理，因而既需要较强的运动控制能力，又需要强大的感知计算能力。人形机器人与工业机器人一样涉及到关节执行器，但结构更加复杂，此外还包含视觉传感器、力学传感器、动力电池、交互设备等。下游主要运用于军事、服务、巡检、咨询、配送等领域以及部分危险场景。

图10. 人形机器人产业链概览



资料来源：Tesla, DS Power, 行行查，安信证券研究中心

人形机器人成本主要包含硬件和软件两大块。其中，硬件主要包含处理器、驱动器、执行器、传感器等，软件主要包含相关操作系统、底层算法以及开大平台。按照重要程度，排序由高到低分别为：FSD 系统>减速器>各类电机>视觉传感器+力学传感器。①软件方面：人形机器人在软件上的难点主要在于手部和腿部，需要实现精细化的操作和稳定的步态。环境识别算法虽然得益于 SAM 等模型的出现而有所进步，但仍然存在难点。特斯拉拥有 FSD 系

统视觉识别学习算法，以及 D1 芯片支持的强大运算能力，并将自主研发作为自身发展的强大驱动力。**②硬件方面**：驱动、传动和感知是关键技术领域。驱动装置和传动装置是用于控制机器人关节运动的核心组件，借此可以实现顺畅且高精度的关节运动，涉及到精确的电机控制、力矩传递和位置反馈等技术，具体包括电机、减速机和丝杠等部件。在感知技术方面，人形机器人需要借助传感器来感知周围环境，以便进行环境感知、人机交互和避障等任务，包括视觉传感器、力传感器、位置传感器、触觉传感器等。

由于成本优势，中国企业有望在硬件领域充分受益。目前，国内外厂商在人形机器人的硬件技术上存在一定的差距，但随着国内厂商的技术进步，以及制造业比较优势下带来的明显的成本优势，参考智能手机及电动汽车产业我国企业在全球供应链中的分工，我们认为中国的企业有望凭借其较强的降本能力及规模优势在人形机器人硬件产业链上获得受益机会。

图11. 人形机器人全套控制系统及对应软硬件示意图



资料来源：雷赛智能招股说明书，安信证券研究中心

2. 特斯拉人形机器人产业链分析：核心零部件详解

2.1. 关节成本占比过半，重点关注电机、丝杠、减速器、传感器

我们可以从最新版本 Tesla Optimus 参数上看出：

- ① 体型参数：**完全体的特斯拉人形机器人身高 172cm, 体重 73kg, 用电功率在静坐时为 100W, 慢走时 500W, 全身超 200 个自由度。
- ② 电动和控制系统结构：**躯干 28 个执行器（不包括手指）+2.3kWh, 52V 电池组。特斯拉 SoC 芯片，支持 WIFI, LTE。
- ③ 躯干关节执行器：**不同关节选用不同执行器，共计 3 款旋转执行器和 3 款直线执行器 6 种组合，我们预计全身关节将分别使用 14 个旋转执行器和 14 个直线执行器。我们预计：
旋转执行器：主要由无框力矩电机+谐波减速器/行星减速器+力矩传感器+编码器+轴承组成；
线性执行器：主要由无框力矩电机/步进电机+行星滚柱丝杠/滚珠丝杠+力矩传感器+编码器+轴承组成。
- ④ 手部结构：**手部结构采用和人体相同的五指多关节设计，每手拥有 6 个执行器，11 个自由度，可提起 20 磅(9kg)物体，具有精确控制握持力输出的传感器。我们预计：
手部执行器：主要由空心杯电机+精密行星减速器+滚珠丝杠+传感器+编码器构成。

表1: Tesla Optimus 最新数据可视化与 2021 年概念机数据对比

参数	2021 年概念机	最新数据	变化
身高	172cm	-	无
体重	125lb (56.7kg)	73kg	有
躯干执行器	40	28	有
行走速度	5mpg (8km/h)	- (行走缓慢)	-
载重量	20.4kg	9kg	有
全身自由度	-	200+	-
用电功率 (静坐/慢走)	-	100w/500w	-

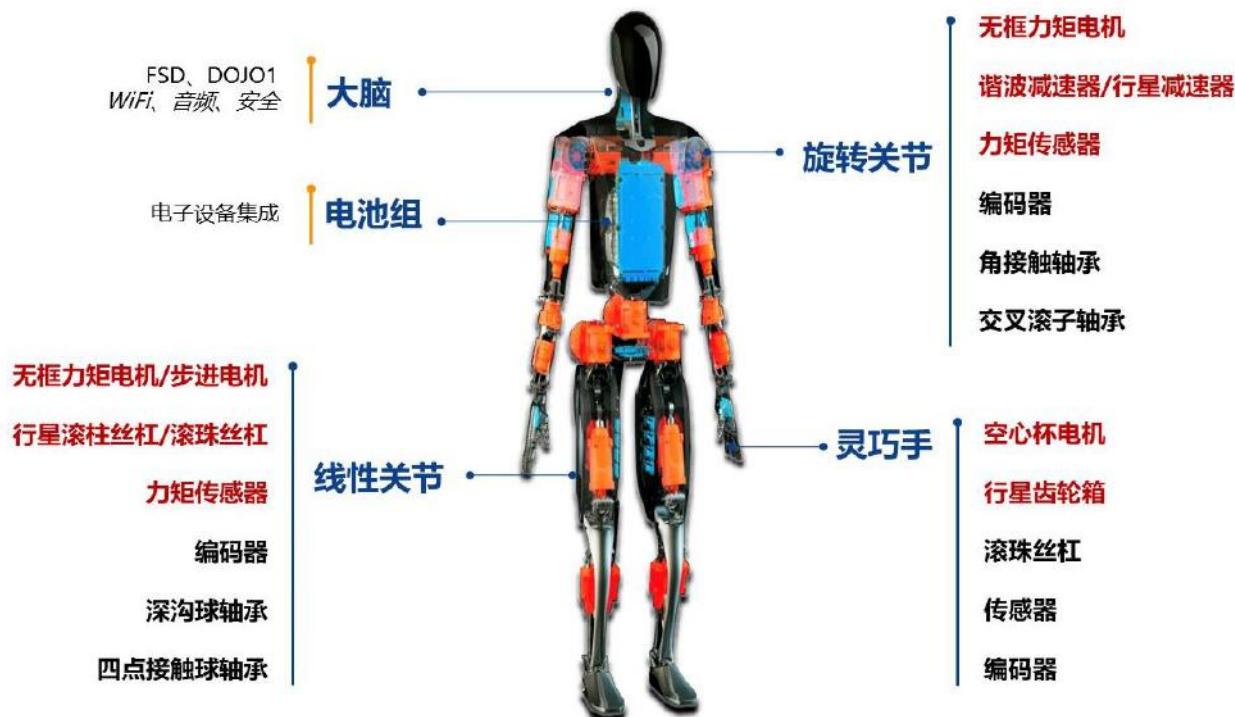
资料来源: Tesla AI Day 2022, Tesla AI Day 2021, 安信证券研究中心

图12. Tesla Optimus 人形机器人运动执行关节



资料来源: Tesla AI Day 2022, 安信证券研究中心

图13. Tesla Optimus 核心零部件分布示意图



资料来源: Tesla AI Day 2022, 安信证券研究中心

关节执行器成本占比超 51%，电机、滚珠丝杠、减速器、传感器占比较高。根据我们对特斯拉 Optimus 关节执行器中核心零部件的构成判断，结合量产价格假设，我们对特斯拉 Optimus 成本拆分进行测算分析。可以得出，在我们的假设下 Optimus 制造成本约 2.25 万美金，其中关节执行器总体成本占比达 51.42%，旋转关节、线性关节、手部关节占比分别达 20.87%、22.41% 和 8.13%。从具体零部件成本占比来看：

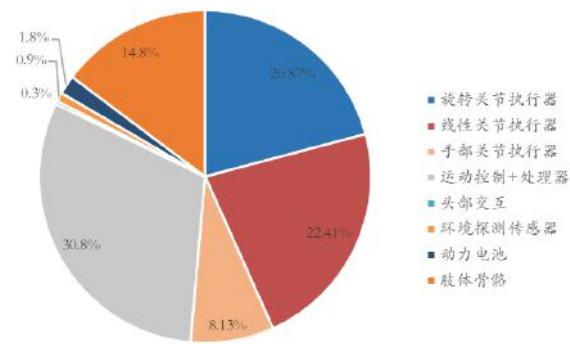
- ① 电机类占比达 15.52%。其中无框力矩电机、空心杯电机、步进电机占比分别达 10.34%、4.43%、0.74%。
- ② 丝杠类占比达 12.07%。其中行星滚柱丝杠占比达 9.85%、滚珠丝杠占比达 2.22%。
- ③ 减速器类占比达 7.76%。其中谐波减速器占比达 5.91%、行星减速器占比达 1.85%。
- ④ 传感器类占比达 7.51%。主要为力矩传感器。

表2：Tesla Optimus 成本拆分测算

所属部分	部件名称	渠道	量产单价 (元)	数量	总价 (元)	成本占比
旋转关节执行器	谐波减速器	采购	800	12	9600	5.91%
	行星减速器	采购	300	2	600	0.37%
	无框力矩电机	采购	700	14	9800	6.03%
	力矩传感器	采购	500	11	5500	3.39%
	编码器	采购	200	28	5600	3.45%
	角接触轴承	采购	50	28	1400	0.86%
	交叉滚子轴承	采购	100	14	1400	0.86%
线性关节执行器	无框力矩电机	采购	700	10	7000	4.31%
	步进电机	采购	300	4	1200	0.74%
	行星滚柱丝杠	采购	2000	8	16000	9.85%
	滚珠丝杠	采购	300	6	1800	1.11%
	力矩传感器	采购	500	11	5500	3.39%
	编码器	采购	200	14	2800	1.72%
	深沟球轴承	采购	100	14	1400	0.86%
手部关节执行器	四点接触轴承	采购	50	14	700	0.43%
	空心杯电机	采购	600	12	7200	4.43%
	行星齿轮箱	采购	200	12	2400	1.48%
	传感器	采购	100	12	1200	0.74%
	编码器	采购	50	12	600	0.37%
运动控制+处理器	滚珠丝杠	采购	150	12	1800	1.11%
	FSD 系统、AI 芯片	自研架构，代工制造	50000	1	50000	30.8%
头部交互	显示屏	采购	500	1	500	0.3%
环境探测传感器	摄像头	采购	300	3	900	0.6%
	毫米波雷达	采购	500	1	500	0.3%
动力电池	电池组	采购	3000	1	3000	1.8%
肢体制骨	手臂、胸腔、 腿部、脚部	自研	800	30KG	24000	14.8%
合计					162400	100%

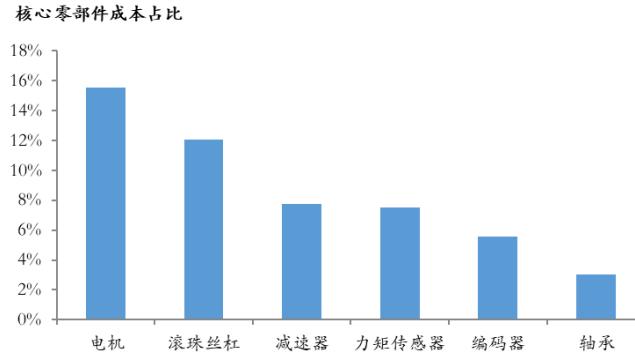
资料来源：Tesla AI Day, Ebay, 各公司官网, 安信证券研究中心

图14. 关节执行器成本占比超 51%



资料来源：Tesla AI Day, Ebay, 各公司官网, 安信证券研究中心

图15. 电机、滚珠丝杠、减速器、传感器成本占比较高

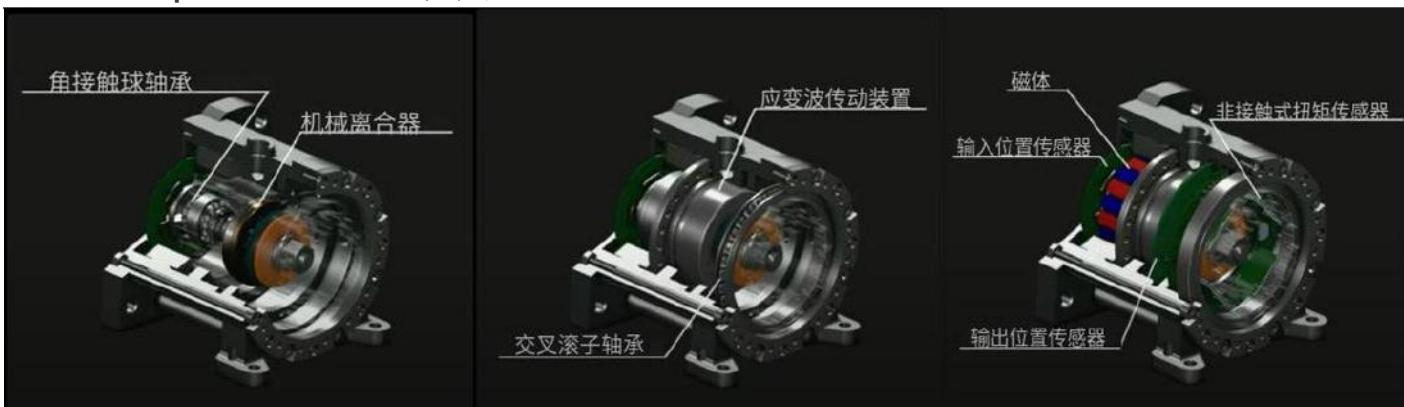


资料来源：Tesla AI Day, Ebay, 各公司官网, 安信证券研究中心

2.2. 旋转关节：无框力矩电机+谐波减速器+传感器+编码器

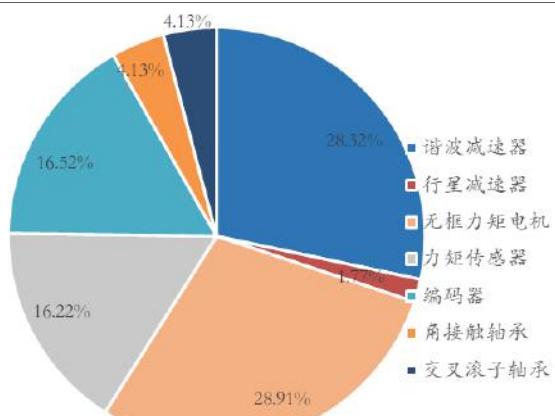
旋转执行器主要由无框力矩电机、谐波减速器、传感器、编码器等构成。根据 Tesla AI Day 发布的旋转执行器构成，我们预计旋转执行器主要由无框力矩电机、谐波减速器/行星减速器、力矩传感器、编码器、角接触轴承、交叉滚子轴承组成，其中核心部件为无框力矩电机、谐波减速器、力矩传感器、编码器等。从成本角度来看，旋转执行器中无框力矩电机、谐波减速器、编码器、力矩传感器占比分别达 28.91%、28.32%、16.52% 及 16.22%。接下来我们将重点从这四部分展开论述各零部件的特点及供应格局。

图16. Tesla Optimus 旋转执行器零部件构成



资料来源：Tesla AI Day, 安信证券研究中心

图17. Tesla Optimus 旋转执行器零部件成本拆分



资料来源：Tesla AI Day, Ebay, 各公司官网, 安信证券研究中心

2.2.1. 无框力矩电机

无框力矩电机结构简单，只包含转子和定子两部分。无框力矩电机一种特殊的力矩电机，但没有轴、轴承、外壳、反馈或端盖，只包含转子和定子。定子是外部部件，外面包覆着能产生电磁力的铜绕组，整体紧凑地安装在机器外壳的主体内；转子是内部部件，由带永磁体的旋转钢圆环组件构成，直接固定于机器轴上。

人形机器人一般使用无框力矩电机提供动力，具有体积小、性能强、环境耐受度高等优势。人形机器人关节体积有限，需要在有限的体积内实现尽可能高的功率密度，从而达到最好的效果。无框力矩电机集成到机器人结构中，能够最大限度减小电机占用空间。此外，无框电机元件集成于机器中，可去除联轴器、皮带等机器元件，从而提升机器性能。直驱解决方案可最大限度降低系统的柔性，从而提供更加可靠的性能。集成式电机还能提高动态响应和系统效率，并可简化添加液体冷却以显著增加可用连续转矩。另外，无框电机由于体积小，还可直接整合到机器元器件中以确保不受工作环境影响。

图18. 无框力矩电机的定子和转子结构图



资料来源：科尔摩根，安信证券研究中心

图19. 无框力矩电机能够很好地集成于机器人关节



资料来源：GW Industry，安信证券研究中心

机器人产业发展促进了无框力矩电机的进步与技术迭代。俄罗斯 Mashinoappara 在 1984 年推出了无框无刷力矩电机，但当时受限于技术水平，电机的转矩密度很低；近年来机器人行业的发展推动了永磁力矩电机的技术迭代，转矩密度、功率密度等性能指标是 80 年代的 2-3 倍，性能得到了很大程度的提升。

表3：机器人关节用无框力矩电机指标

公司名称	Kollmorgen	TQ-Robodrive	TM -TECH	宇捷电机	宁波菲仕
产品图例					
转矩密度 Nm/kg	1. 1-2. 5	3. 2-3. 6	1. 3-2. 4	1. 1-2. 5	1. 5-2. 5
转矩脉动%	0. 9%-2. 5%	-	0. 5%-3%	-	2%-4%
过载倍数	2. 5-3. 3	2. 8-3. 5	2. 9-5	2. 2-2. 8	2. 5-3. 0
特点	分布绕组 碳纤维绑扎	集中绕组 模块化定子环氧塑封	集中绕组 多极整体充磁环	分布绕组 面包型磁体	集中绕组 环氧塑封技术

资料来源：《基于辐射环充磁的高转矩密度永磁力矩电机设计与分析》，安信证券研究中心

从收入体量看，海外品牌实力强劲，国产品牌规模仍较小。外资品牌发展较早，实力较强的企业有 Kollmorgen、Allied motion、Parker、TQ Robodrive、Aerotech、TM TECH、Axsys、ETEL、Muirhead Aerospace、Gomtec。以 Kollmorgen 为例，2022 年营收规模达 135.5 亿元，相较于国内厂商优势明显。国内做得比较好的品牌主要有步科股份、昊志机电、汇川技术、禾川科技等。其中，步科股份全新第三代 FMC 无框力矩电机系列系自主研发设计，性能优于同业产品，产品尺寸可实现与国际接轨，相较于外资品牌成本优势明显，且可提供定制化解决方案；昊志机电的 DD 直驱电机运用独创的模块化定子结构、创新设计的电机冷却结构，使得电机的冷却效率最大化，进而提升了电机的输出特性。

表4：2022 年全球及国内无框力矩电机主要参与者情况

公司名称	公司介绍	相关产品	营业收入 (亿元)	归母净利润 (亿元)	毛利率
科尔摩根 (Kollmorgen)	成立于 1911 年，最初为美国海军提供光学和潜望镜，1948 年在美国成立电机公司，1960 年与 Inland 合并，1980 成立工业驱动事业部，2000 年被丹纳赫收购。	无框力矩电机、步进电机、伺服电机、有刷直流电机等	135.5	8.85	35.6%
Allied motion	一家面向全球客户，致力于设计、制造以及销售电动机、电子运转控制和光学编码器的公司。2013 年 10 月公司向 Safran USA, Inc. 收购了 Globe Motors, Inc.	各类电机、电子运动控制、光编码器等	35.03	1.21	31.3%
Parker	一家工业机械和材料的制造商。机械部门提供食品和化学机械，制鞋机械和材料，汽车相关机械和粉末喷涂设	各类电机等	31.48 (2018 年)	1.66 (2018 年)	25.3% (2018 年)

备。化学产品部门提供汽车材料，例如车身密封和底漆，汽车部件，例如刚度辅助，阻尼和中空发泡材料，以及玻璃密封材料。化学品部门提供工业洗涤剂。

步科股份	以智能制造为发展方向，坚持不懈打造自动化设备控制、数字化工厂与 SaaS 软件构成的“三轮驱动”技术平台，提供聚焦行业的自动化和智能化解决方案。	伺服系统、低压变频器、步进系统、运动控制配套件、数控系统、数字化工厂等	5.39	0.91	37.9%
昊志机电	从事高精密电主轴及其零配件研发设计、生产制造、销售与维修服务的环保型高新技术、创业板上市公司，通过坚持不懈的技术攻关和持之以恒的品质管理，构建了电主轴“整机—配件—服务”紧密结合的完整业务链	主轴整机、运动控制产品、转台、零配件及维修等	9.87	0.22	36.9%
汇川技术	专门从事工业自动化和新能源相关产品研发、生产和销售的高新技术企业。经过多年的发展，公司已经从单一的变频器供应商发展成机电液综合产品及解决方案供应商	通用自动化、电驱电源、牵引系统、电梯电气系统、工业自动化及机器人零部件	230.1	43.2	35.0%
禾川科技	一家技术驱动的工业自动化控制核心部件及整体解决方案提供商，主要从事工业自动化产品的研发、生产、销售及应用集成。禾川科技的主要产品包括伺服系统、PLC 等，覆盖了工业自动化领域控制层、驱动层和执行传感层，近年沿产业链上下游不断延伸，涉足上游的工控芯片、传感器和下游的高端精密数控机床等领域。	伺服电机、伺服驱动器、PLC、机床等	9.44	0.90	30.4%

资料来源：Wind，公司公告，安信证券研究中心

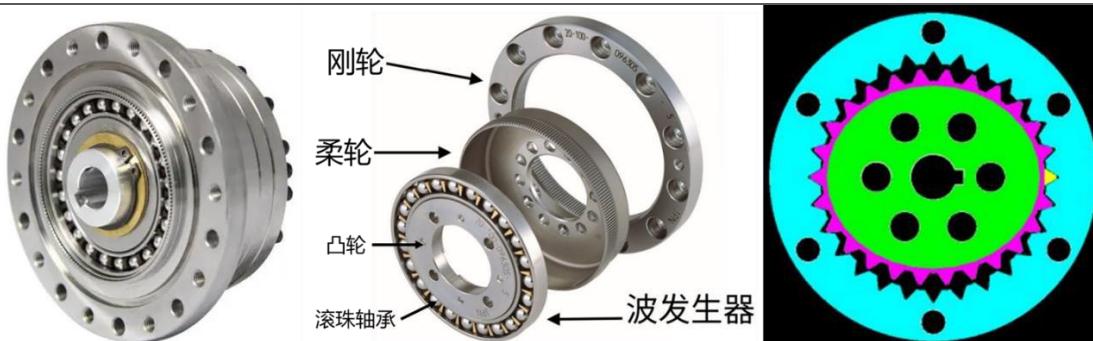
2.2.2. 谐波/行星减速器

旋转关节使用的主要减速器是谐波减速器，部分较大关节可配合使用行星减速器，以提升抗冲击能力。

1、谐波减速器

谐波减速器由波发生器、柔轮和刚轮三部分构成。**①波发生器**：图示绿色椭圆形部分，中间是凸轮，外圈是滚珠轴承，其内圈固定在凸轮上，外圈通过滚珠发生弹性形变。**②柔轮**：图示粉红色部分，使用柔性金属材料制成，外圈有齿。**③刚轮**：图示青色部分，使用刚性材料制成，内圈有齿。三部分可任意固定一个，其余一个主动、一个从动，实现减速或增速；也可转换成两个输入，一个输出，组成差动传动。实际使用中，通常固定刚轮，利用电机带动波发生器，柔轮输出转动。波发生器为椭圆形，将波发生器塞入柔轮，会迫使柔轮变为椭圆形，与波发生器紧密贴合。再将波发生器和柔轮的整体塞入刚轮，柔轮长轴两端的外齿刚好和刚轮的内齿啮合，而短轴两端的外齿与刚轮的内齿脱开。

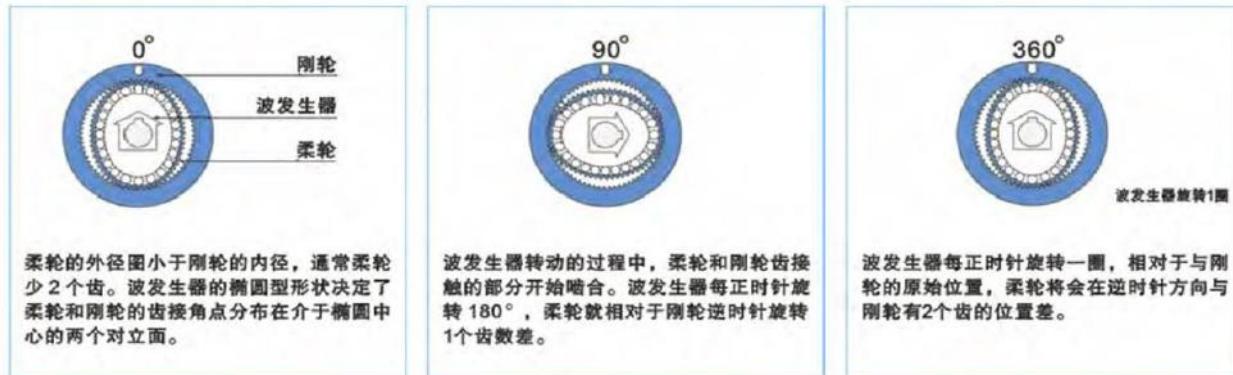
图20. 谐波减速器及其内部结构图



资料来源：哈默纳科公司公告，安信证券研究中心

谐波减速器的原理核心在于柔轮和刚轮之间的“错齿运动”。波发生器轴承处连接电机，电机带动波发生器一起顺时针转动。转动过程中，椭圆形的波发生器会迫使柔轮不断变形，柔轮上的齿会顺时针依次与刚轮内圈的每一个齿啮合。一般情况下，柔轮比刚轮少两个齿，波发生器每顺时针转动一圈，就使得柔轮逆时针错位两个齿，随着电机的不断转动，这种错位效应连续起来，便表现为柔轮的逆时针转动。假设刚轮总共有 200 个齿，柔轮共有 198 个齿，电机带动波发生器每转动一圈，柔轮便会旋转 $2/200$ 圈，即 $1/100$ 圈。因此，电机需要转动 100 圈，柔轮才会转动一圈，减速比为 100。柔轮的转速比波发生器要小很多，这实现了降低电机转速和增大输出扭矩的效果。

图21. 谐波减速器的“错齿”原理



资料来源：《绿的谐波减速机在SCARA机器人上的安装与应用》，安信证券研究中心

行业壁垒：壁垒较高，伴随着研发、生产、销售等各个环节。谐波减速器厂商只有打通全环节，才能形成良性循环，不断发展壮大：

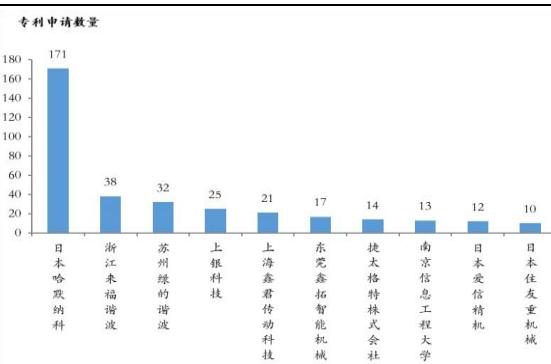
➤ **研发阶段：**长期正向研发，形成成套技术体系是关键，柔轮材料、齿形和结构设计为行业痛点。对于成熟的谐波减速器厂商，若计划开发一款针对下游某应用场景的产品，可通过谐波减速器各项性能指标的补偿来实现，技术路线选择较为丰富。对于新进入的厂商，在开始抢占市场份额时往往会对大品牌的某一种或几种产品进行逆向研发及仿制，最后产品即使质量合格，但逆向研发限制了公司技术的体系化，以及后续产品改良和创新。若不具备成体系的技术，随着下游应用场景对减速器的性能要求发生变化，新进入厂商无法及时根据客户需求作出调整，而面临淘汰风险。

图22. 柔轮疲劳损伤断裂示意图



资料来源：《谐波减速器柔轮力学特性分析》，安信证券研究中心

图23. 谐波减速器近5年专利申请数量排名



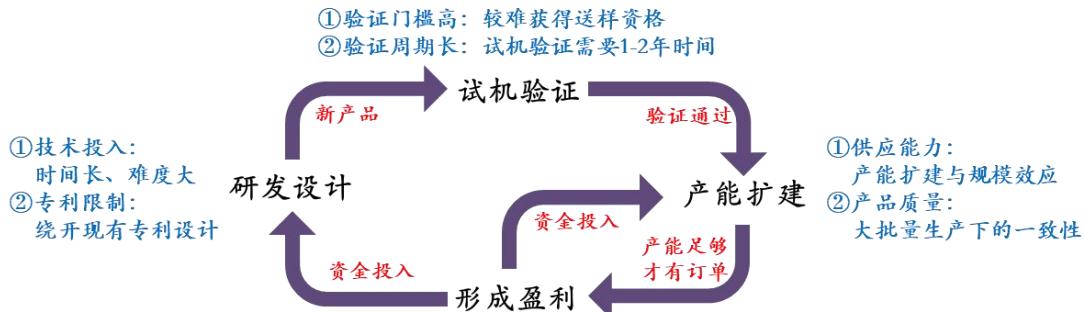
资料来源：《谐波减速器技术专利分析研究》，安信证券研究中心

➤ **试机验证：**对于下游机器人等设备商来说，一旦选定了减速器品牌，便不会轻易更换。减速器的质量问题往往来源于长时间使用的疲劳损坏，如果下游厂商引入质量不达标的新能源减速器，产品在使用1年后出现大规模质量问题，会带来较大规模的损失。因而，下游厂商大规模引入新品牌减速机前，需要经过1-2年的质量验证，通过试机来验证品牌的可靠性，选定品牌后往往不会轻易更换。新的谐波减速器厂商很难进入市场，唯有具备合格的质量、更低的价格以及更好的售后服务。

➤ **产能扩建：**固定资产投资壁垒高，大批量生产下需保持一致性，对设备和装配工人要求较高。从供应角度看，谐波减速器作为一种通用设备，竞争日趋激烈，规模效应下单位成本降低为关键所在，而降低单位成本就需要产能扩建。作为精密设备，谐波减速器加工精度需要达到毫米级别，加工设备严重依赖进口，设备初始投入较大。从需求角度看，客户对于供应商的批量供应能力和产品质量的一致性有较高要求，不具备批量供应能力的小厂商很难获得较大订单，从而形成盈利和资金回笼。除了设备以外，谐波减速器的

装备需要不断调整、校正、平衡才能最终组成出合格的产品，该环节依赖有成熟经验的装配工人。对于新厂商而言，很难在短时间内招聘足够数量有成熟经验的装配工人，因而这也对公司扩产形成了较大的阻碍。

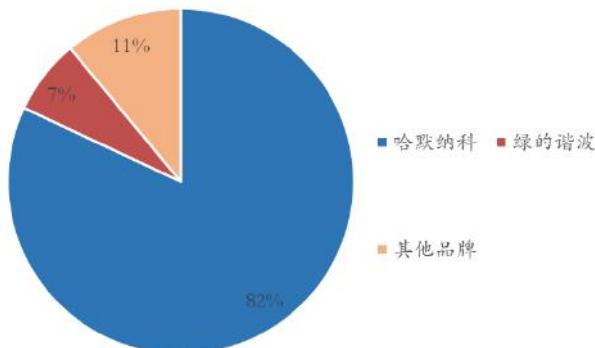
图24. 谐波减速器行业壁垒存在于研发、生产、销售等各个环节



资料来源：安信证券研究中心整理

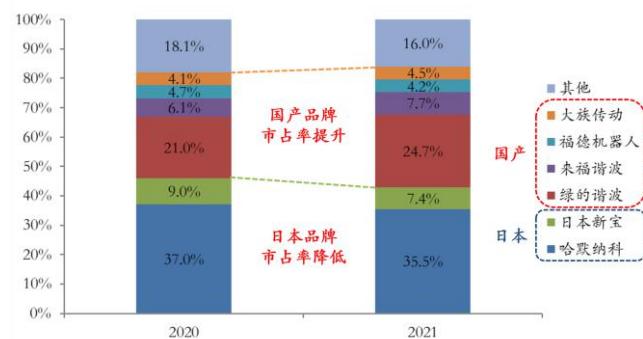
竞争格局：哈默纳科为全球龙头，我国谐波减速器国产替代稳步推进。全球市场来看，哈默纳科为谐波传动领域的开拓者，深耕谐波领域50多年，无论从研发投入时间，还是从营收规模和产能来看，都遥遥领先，处于绝对龙头地位。根据OFweek，2021年全球谐波减速器市场内主要参与者有哈默纳科、日本新宝、绿的谐波、中技克美等。其中哈默纳科全球市占率约82%，绿的谐波占比约7%，其他厂商占比约11%。根据华经产业研究院统计，2020-2021年，中国市场最大的两个外资品牌——哈默纳科和日本新宝在中国市场的占有率由46%降低至42.9%。2020年，国内做谐波减速器的企业有十几家，其中实力较强的有绿的谐波、来福谐波、福德机器人、大族传动等企业，2020-2021年，这四家企业在中国市场上的占有率之和由35.9%提升至41.1%。

图25. 2021年哈默纳科全球谐波减速器市占率格局



资料来源：OFweek官网，安信证券研究中心

图26. 我国谐波减速器行业国产替代逐渐推进



资料来源：华经产业研究院，安信证券研究中心

表5：国外主要谐波减速器厂商概况

公司名称	成立时间	发展概况	产能或营收情况
哈默纳科	1970年	1970年在日本成立，深耕谐波减速器领域，逐渐成长为全球龙头企业。1977年开始生产机电一体化产品，1996年其产品销欧洲、中东、非洲、印度及南美，2004年其股票在东京证券交易所上市，2011年在中国成立贸易公司。	2022财年，公司实现营收147亿元，净利润22.5亿元，毛利率接近40%，净利率12%左右。2022年初，谐波减速器产能在12.5万台/月，随着新厂房完工，预计2022年9月将达到16.5万台/月。
日本新宝	2003年	2003年在日本成立，2015年进入中国市场。作为日本首家“无级变速机”，成立后努力钻研技术，在“索引技术领域”确立了全球最高级别的技术，曾3次荣获日本机械学会大奖。公司做各种类型的减速机，包括谐波减速机，但是其谐波减速机的市场占比非常小。	2015年3月，公司共有2387人，年营业额在408亿日元以上。2017年中国市场出货量3000台/月左右。

资料来源：Wind，机器人大讲堂公众号，哈默纳科公司公告，安信证券研究中心整理

国产品牌如雨后春笋般涌现，绿的谐波占据优势地位。①中技克美研发布局最早，但其谐波减速器主要供应中国航空航天等特种领域，市场空间相对较小，公司营收规模也较小，产品服务与销售渠道不具备特别明显的竞争优势。②绿的谐波 2003 年董事长亲自带队进行研发，至今已有近 20 年的历史。③2010 年以来工业机器人下游快速增长，需求放量，国内厂商纷纷开始布局：大族传动 2010 年开始攻关谐波；来福谐波 2013 年成立并投入研发谐波；同川科技 2015 年立项研发谐波；中大力德 2016 年开始研发谐波；国茂股份 2021 年成立国茂精密，并收购安徽聚隆精密减速器相关资产。从产能的角度来看，国产品牌中，绿的谐波优势明显，已经进入研发→扩产→盈利→再研发再扩产的良性循环阶段。国产品牌很多已初步具备量产能力，但与绿的谐波的差距还是较为明显的。绿的谐波 2022 年产能已达 40 万台/年，2023 年有望继续扩产至 59 万台。相比之下，2021 年，同川科技产能约 10 万台/年，大族传动产能约 6 万台/年，国茂股份产能约 3 万台，而同年中大力德仅可小规模量产。

表6：国内主要谐波减速器厂商概况

公司名称	成立时间	发展概况	产能或营收情况
中技克美	1994 年	国家科技部批准的“国家谐波传动技术研究推广中心”和“谐波传动国家重点工业性试验基地”，是我国第一个专业从事谐波传动减速器技术设计、开发、生产、销售、服务的高新技术实业公司。通过与合作单位联合攻关， 研制成功具有全球领先水平的固体润滑谐波传动减速器 ，并成功地应用在我国“神舟号”“天宫”系列载人飞船及卫星上。	2022 年营业总收入 3413.01 万元，同比去年增长 22.40%，归母净利润为 375.69 万元，同比去年增长 87.24%，基本 EPS 为 0.09 元，平均 ROE 为 5.63%。
中大力德	2006 年	1998 年公司前身慈溪市中大电机厂成立，生产异步电机和小型齿轮减速器等，2008 年开始生产高精度行星减速器，2012 年开发摆线针轮减速器，2014 年开始与相关方合作研发机器人用 RV 减速器，2017 年公司在中小盘 A 股成功上市。	2022 年公司营收 9.0 亿元，同比下降 5.8%；净利润 0.66 亿元，同比下降 18.5%。 2017 年中大力德募集 2.18 亿元用于年产 20 万台精密减速器项目建设。
绿的谐波	2011 年	公司前身为恒嘉金属，2003 年由董事长带队开始投入谐波减速器的研发。公司 2011 年在江苏苏州成立，创始人团队实力强大，成立之初便投入谐波减速器的技术攻关。2013 年相继推多个系列的谐波减速器产品，2014 年公司主持编制 GB/T30819-2014《机器人用谐波齿轮减速器》国家标准。2020 年公司在上海交易所科创板上市。2019 年新一代 Y 系列谐波减速器上市。	2022 年营业收入 4.46 亿元，同增 0.5%，归母净利润 1.55 亿元，同比下降 17.9%。 2023 年募投项目达产后，预计产能合计达到 59 万台/年；定增项目 100 万台/年谐波减速器及 20 万台/年机电一体化产能预计 2027 年达产。
同川科技	2012 年	汉宇集团持有同川科技 60% 的股份。 2015 年立项谐波传动 ；2016 年从国外引进与 HD 相同的齿轮专用加工设备；2017 年第一台高端 3D 共轭双圆弧齿形精密谐波减速机下线；2018 年，产品市场验证获得圆满成功；2019 年与国内一线品牌机器人客户进行联合测试；2020 年同川科技进行谐波减速器的送样测试；2021 年开始谐波减速器的批量供应，实现超过万套产品出货量。	2021 年，同川科技的谐波减速器产能在 10 万台/年左右。
来福谐波	2013 年	公司成立于 2013 年， 2016 年进入谐波减速器市场 。推出了 8 齿形谐波减速器新品，提升寿命 30% 以上，转矩容量超过 30%。2019 年推出高扭矩 LSG、LHG，超短谐波 LSD、LHD，达到全球一流水平。	2017 年谐波减速器实现出货量 1 万台/年，2018 年实现销售 5 万台/年，2019 年实现月产 2 万套的生产能力， 2020 年与广州耐为机器人科技有限公司签署“谐波减速器年采购 3 万台战略合作协议”。
国茂股份	2013 年	公司成立于 2013 年，深耕通用减速机领域。2021 年国茂股份成立国茂精密子公司，同年完成对安徽聚隆机器人减速器有限公司、安徽聚隆起帆精密传动有限公司与减速器有关部分业务资产的收购，包括设备、存货、专利等等。	2021 年，国茂精密具备谐波减速器 2500 台/月的产能，年产能 3 万台左右。
大族传动	2015 年	大族集团 2010 年开始组建专业团队，从零研发谐波传动技术，团队实力雄厚，从国外引入全球一流加工检测设备，研发和技术人员占比 60% 以上。2012 年成功突破双圆弧齿形非标设计难点，设计出第一台谐波减速器，并于 2013 年进入试生产阶段，2014 年进入多家机构进行试机。2015 年成立大族精密传动科技有限公司，2017 年相继推出 6 种系列近 200 款谐波减速器，2018 年超扁平轻量系列产品进入市场，2021 年推出 HMG-I（大中空）系列谐波减速器。	2021 年左右产能在 6 万台左右，

资料来源：Wind，维科网机器人、高工机器人、绿的谐波官网，安信证券研究中心整理

潜在进入厂商多，竞争可能加剧。很多具备资本优势和技术基础的大企业纷纷开始布局谐波，产业链有望持续降本。双环传动主营业务为机加工齿轮传动产品，2013 年开始布局 RV 减速器，目前环动科技的营收主要来源于 RV，借助在该领域积累的客户资源，2018 年进军谐波，有望进入该领域市场。此外，美的集团也正在布局谐波领域，相关产品通过了库卡机器人 10000 小时寿命测试，未来也具备进入谐波领域市场的潜力。

表7：国内有潜力进入谐波领域厂商概况

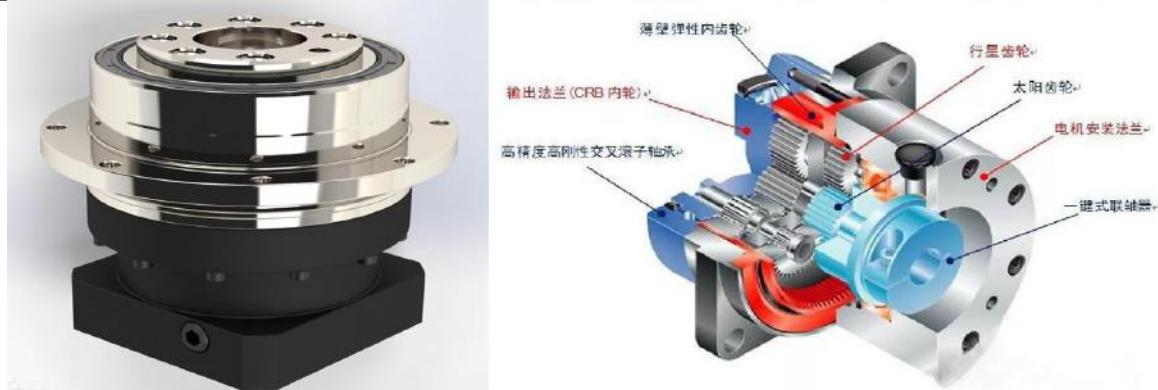
公司名称	成立时间	发展概况	产能或营收情况
双环传动	1980年	成立于1980年，目前是机加工齿轮传动产品头部企业。2013年开始布局RV减速器领域，2020年成立子公司浙江欢动机器人关节科技有限公司，该公司主营机器人关节、精密减速器和机电一体化产品。目前环动科技的营收主要来源于RV，依靠RV积淀下来的技术、客户和供应商资源，公司开始布局谐波领域。	在谐波减速器方面，双环传动属于新入者，还处于起步阶段，这几年在技术端的突破取得了一定效果，目前已经开始进行全面市场推广，实现焊接机器人等多关节工业机器人、协作机器人的多场景示范应用。
美的集团	2000年	2021年，美的集团机器人与自动化事业实现营收253亿元，同比增长23%。2022年4月9日，美的集团全资子公司广东极亚精机科技有限公司机器人核心精密零部件生产项目发布招标公告，建设机器人核心精密零部件生产数智车间，该项目针对谐波减速机业务。项目建成后，预计达产主营业务年收入3.83亿元。	2022年8月5日，美的集团完成“谐波减速机高精度长寿命设计技术研究及应用”项目，被认定性能达到“国际先进”水平。产品通过了库卡机器人有限公司10000小时寿命测试，测试后产品精度退化量小于0.5角分，刚度K12退化量小于30%，精度国际领先。

资料来源：Wind, 佛山科技公众号，公司年报，安信证券研究中心整理

2、行星减速器

行星减速器主要由行星轮、太阳轮、内齿环三部分构成。行星减速器由一个内齿环紧密结合于齿箱壳体上，环齿中心有一个外部动力驱动的太阳轮，两者之间有一组由三颗齿轮等分组合于托盘上的行星轮，行星轮依靠出力轴、内齿环及太阳齿支撑于其间。当外部动力驱动太阳齿轮时，可带动行星齿轮自转，并沿着固定的内齿环沿着中心公转，旋转带动连结于托盘的出力轴，从而输出动力，达到降低转速和提升扭矩的效果。

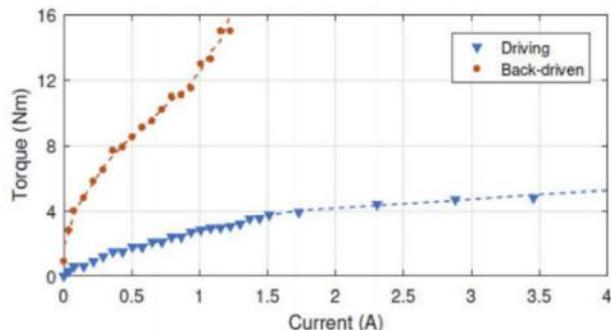
图27. 行星减速器及其内部结构示意图



资料来源：纽格尔，安信证券研究中心

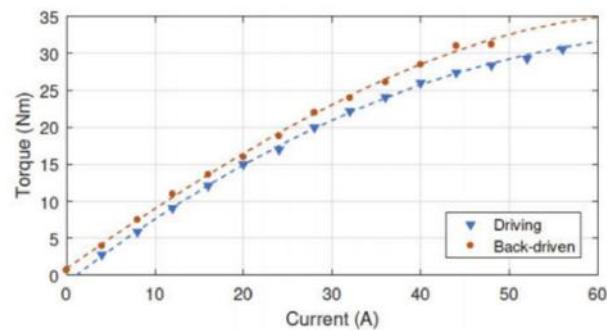
行星减速器更抗冲击，在人形机器人领域有望与谐波减速器形成优势互补。谐波减速器具有减速比大、体积小、重量轻等特点，但根据 UCLA Zhu.Taoyuanmin 博士研究，谐波减速器因为减速比高，传输透明度较低，抗冲击属性较差。大气隙半径无框力矩电机+行星减速器的组合，能够有效提高人形机器人抗冲击的能力。行星减速器有望在人形机器人部分关节替代谐波减速器，实现抗冲击性能的提升。

图28. 普通伺服电机+大减速比减速器，反向驱动时合成扭矩会发生异常，从而导致减速器损坏



资料来源：Design of a Highly Dynamic Humanoid Robot, 安信证券研究中心

图29. 大气隙半径无框力矩电机+行星减速器，正反驱动时合成扭矩均处于正常状态，减速器不会损坏



资料来源：Design of a Highly Dynamic Humanoid Robot, 安信证券研究中心

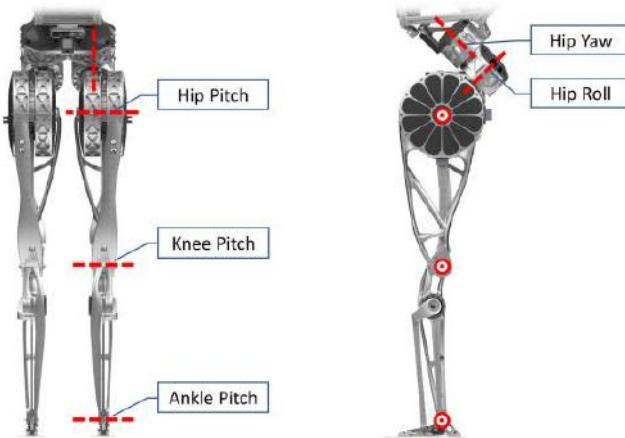
行星减速器更适合用于人形机器人胯骨等空间较大的部位。相较于谐波减速器，行星减速器减速比更低，难以提升足够倍数的扭矩，就需要将无框力矩电机的气隙半径做得足够大，以输出更大的扭矩。这导致了配套的无框力矩电机本身需要做得非常大，因而行星减速器更适合用于机器人胯骨等体积非常大的应用场景。

图30. UCLA Zhu.Taoyuanmin 博士设计并使用在人形机器人上的行星齿轮箱



资料来源: *Design of a Highly Dynamic Humanoid Robot*, 安信证券研究中心

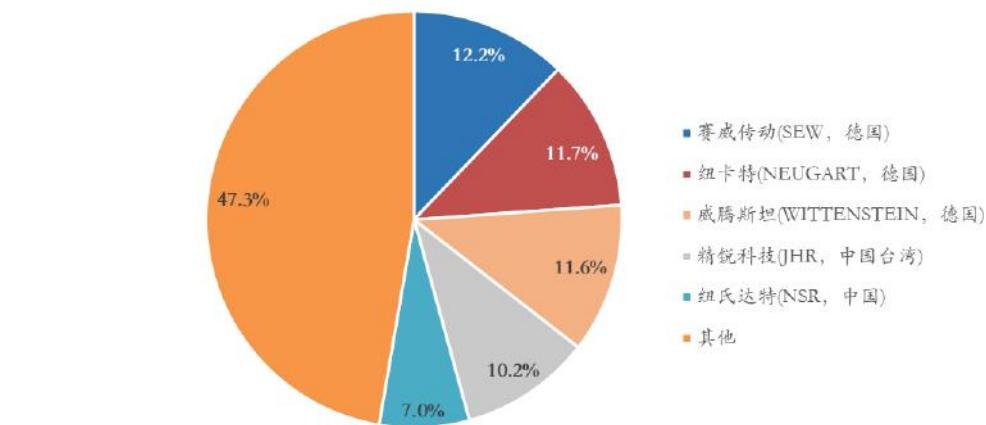
图31. UCLA Zhu.Taoyuanmin 博士设计的行星齿轮箱用于人形机器人的胯骨



资料来源: *Design of a Highly Dynamic Humanoid Robot*, 安信证券研究中心

竞争格局: 全球行星减速器市场份额较为集中，德资品牌占据前三名。行星减速器作为一种通用减速器，属于较成熟的产品，全球市场主要被外资品牌占据。根据 QY Research 调研结果，2022 年全球行星减速器排名前五品牌分别为赛威传动/纽卡特/威腾斯坦/精锐科技/纽氏达特，市占率分别为 12.2%/11.7%/11.6%/10.2%/7.0%，合计超过 50%。其中赛威传动、纽卡特、威腾斯坦均为德资企业，市占率合计超 30%，精锐科技为台资企业、纽氏达特为大陆本土企业。

图32. 2022 年全球前五大行星减速器竞争格局



资料来源: QY Research, 安信证券研究中心

我国行星减速器上市企业主要有宁波东力、通力科技、中大力德、兆威机电、优德精密、丰立智能等。宁波东力、通力科技的业务主体就是通用减速器，均有较为成熟的行星减速器产品；中大力德主营机械传动相关业务，包括精密减速器、传动行星减速器、无刷直流减速电机等；兆威机电主要做微型传动系统、精密注塑件和精密模具，涉及行星减速器业务；优德精密主营各类精密模具零部件以自动化设备零部件，传动设备和传动部件包含 RV 减速器及高精度曲柄轴。丰立智能主营钢齿轮、精密减速器及零部件等。

表8：2022年我国主要行星减速器上市公司情况

公司名称	公司介绍	相关产品	营业收入 (亿元)	归母净利润 (亿元)	毛利率
宁波东力	以传动设备、供应链综合服务、门控系统、工程技术服 务四大产业为主体，其行星减速器主要应用于冶金、矿 山、物流、工程机械、新能源等行业。	小型减速器、模块化高精减 速机、模块化减速电机、大 功率重载齿轮箱。	14.68	3.28	23.8%
兆威机电	专业从事微型传动系统、精密注塑件和精密模具的研 发、生产与销售的高新技术企业	为多领域的客户提供定制化 微型传动系统和精密注塑件	11.52	1.50	29.8%
通力科技	主要产品为自主品牌“通力”系列减速机，依据结构等 方面的差异进一步细分为通用减速机与工业齿轮箱。产 品已直接或间接与中国一重、中国二重、中国中冶、中 粮集团、青山控股、齐鲁制药、宁德时代等下游知名客 户建立了合作关系。	通用减速机、工业齿轮箱， 掌握全系列齿轮减速机设计 技术，形成R、K、S、F、H、 B、P等减速机全系列产品。	4.68	0.97	30.4%
优德精密	主营业务为汽车模具零部件、半导体计算机模具零部 件、家电模具零部件等精密模具零部件，以及自动化设 备零部件、制药模具及医疗器材零部件的研发、生产及 销售。研发和生产的RV减速机用高精度曲柄轴，拓展 了公司在自动化领域零部件的产品系列。	传动设备和传动部件，包括 RV减速器及其高精度曲柄轴 等。	3.97	0.28	29.1%
中大力德	从事机械传动与控制应用领域关键零部件的研发、生 产、销售和服务的高新技术企业，产品广泛应用于工业 机器人、智能物流、新能源、工作母机等领域及食品、 包装、纺织、电子、医疗等专用机械设备。	精密减速器、传动行星减速 器、无刷直流减速电机，各 类小型及微型减速电机等	2.19	0.66	24.1%
丰立智能	智能驱动研造与系统集成服务商，国家高新技术企业， 建有机械工业小模数螺旋锥齿轮工程研究中心等。	钢齿轮、精密减速器及零部 件、精密机械件、粉末冶金 制品以及气动工具等。	11.52	1.50	19.7%

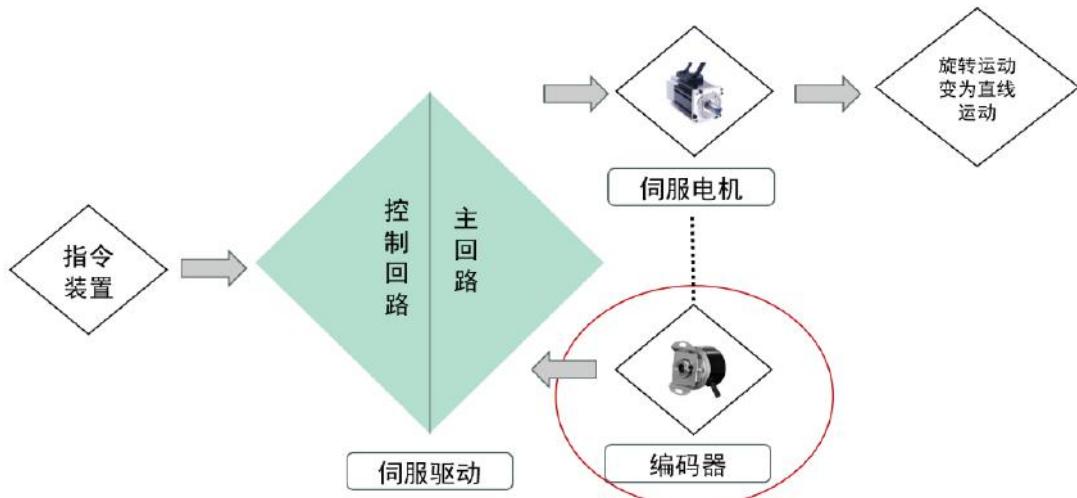
资料来源：Wind，公司公告，安信证券研究中心

2.2.3. 编码器

编码器是机械与电子紧密结合的精密测量器件，一般应用于机械角度、速度、位置的测量。编码器通过光电原理或电磁原理将一个机械的几何位移量转换为电子信号，这种电子信号通常需要连接到控制系统，例如PLC、高速计数模块、变频器等，控制系统经过计算便可以得到测量的数据，以便进行下一步工作。编码器可以分为增量式和绝对式两类，增量式编码器将位移转换成周期性的电信号，再把电信号转变成计数脉冲；绝对式编码器的每一个位置对应一个确定的数字码，示值只与测量的起始和终止位置有关。

编码器主要应用于伺服系统，是伺服电机的核心元件。伺服系统由伺服驱动器发出信号给伺服电机驱动其转动，同时编码器将伺服电机的运动参数反馈给伺服驱动器，伺服驱动器再对信号进行汇总、分析、修正。通常，编码器用于工业系统的运动控制中，用于测量并反馈被测物体的位置和状态，例如机床、机器人、电机反馈系统以及测量和控制设备等。

图33. 编码器在伺服系统中的应用

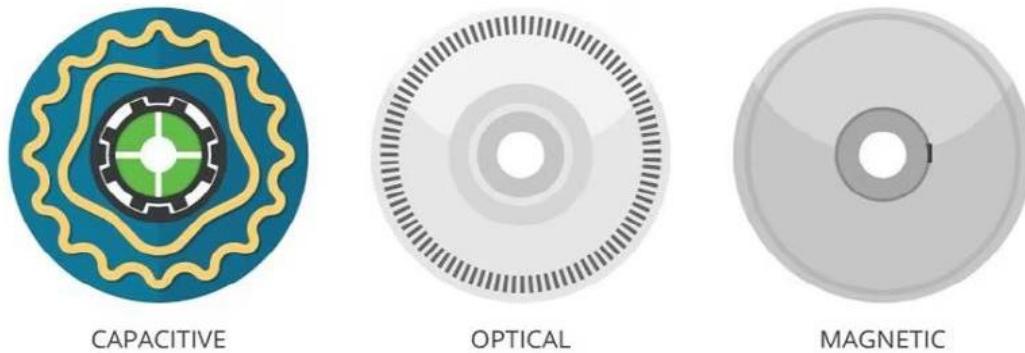


资料来源：禾川科技招股说明书，安信证券研究中心

编码器可分为光电编码器、磁电编码器、电容编码器三种，工作原理差异较大：

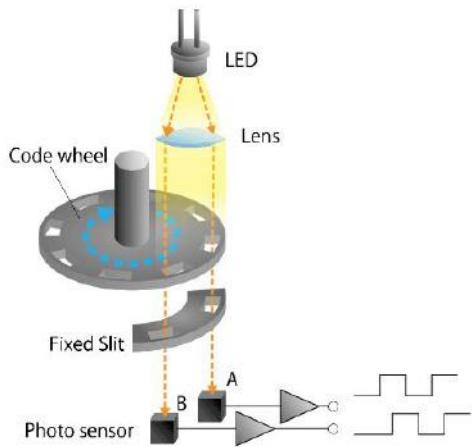
- **光电编码器：**由发光元件、光敏元件及码盘组成。作用是将旋转位置信息转化为光脉冲信号以对器进行检测。当安装在电机转轴上的码盘旋转时，固定住的发光元件发出的光经过码盘，产生透光和不透光的光脉冲。光敏元件检测到这些脉冲后，再转化为数字信号进行输出。
- **磁电编码器：**由磁阻传感器、磁鼓、信号处理电路组成。将磁鼓刻录成等间距小磁极，磁极被磁化后，旋转时产生周期分布的空间漏磁场。磁传感器探头通过磁电阻效应，将变化着的磁场信号转化为电阻阻值的变化，在外加电势的作用下，变化的电阻值转化成电压的变化，经过后续信号处理电路的处理，模拟的电压信号转化成计算机可识别的数字型号，从而实现编码。
- **电容编码器：**由转子、固定发送器和固定接收器组成。转子包含正弦模式，旋转过程中，发送器的高频参考信号以可预测的方式进行调制。编码器检测接收板上电容电抗的变化，并使用解调算法将其转换为旋转运动的增量。

图34. 三种编码器盘结构对比



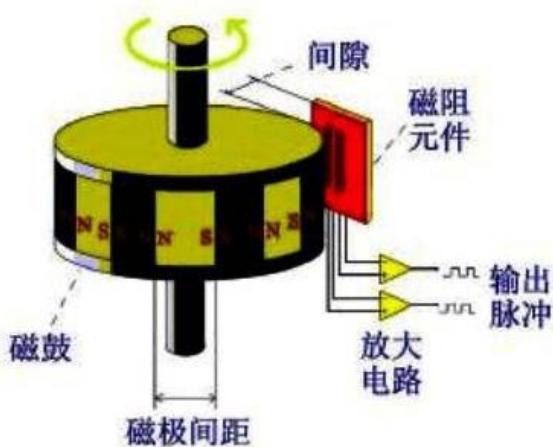
资料来源：ARROW 官网，安信证券研究中心

图35. 光电编码器工作原理图



资料来源：AsahiKasei 官网，安信证券研究中心

图36. 磁电编码器工作原理图



资料来源：KIND 官网，安信证券研究中心

光编码器性能更好，磁编码器更稳定可靠，电容编码器兼具前两者优势。电容编码器比光学编码器更坚固耐用，可以免受灰尘、污垢和油污等各种环境污染的影响，还能更好地应对振动和极端温度。此外，电容编码器不采用 LED，与光学编码器相比，使用寿命更长、体积更小、电流消耗 (6-18 mA) 更低。电容编码器不受电磁干扰和电噪声的影响，与磁性编码器一样坚固耐用，但精度和分辨率更高。

表9：三种类型编码器性能对比

性能项目	电容编码器	光电编码器	磁电编码器
耐脏、防尘、防油	高	低	高
精度	高	高	低
温度范围	广泛	中等	狭窄
电流损耗	低	高	中等
可编程序性	是	否	否
包装尺寸	小	中等	中等
EMC 抗扰度	高	高	高
磁性免疫	高	高	低
分辨率范围	广泛	广泛	狭窄

资料来源：CUI Devices, 安信证券研究中心

行业壁垒：编码器的核心技术壁垒在于插补算法的精度及小型化。机器人的位置传感器检测到点角度后在编码器内通过算法语言进行细分，细分为千级、万级乃至十万级以上精度。高精度是编码器的技术难关所在，也是伺服电机的核心技术之一，目前我国机器人的伺服电机所用的多圈绝对值编码器严重依赖进口，国内技术发展程度不足，国产化率较低。此外，编码器的核心技术还在于小型化，以及如何适用于集成芯片伺服电机本体的集成设计。

竞争格局：编码器市场竞争格局较为分散，国外品牌占据市场主导。国外主流编码器厂商有美国艾美柯(AMCI)、德国艾斯姆(ASM)、德国亨士乐(HENGSTLER)、日本欧姆龙(OMRON)等；国内编码器主流厂商包括汇川技术、禾川科技、长春汇通和奥普光电。

①汇川技术：2011年4月，公司设立全资子公司暨收购长春市汇通电子有限责任公司整体资产，获取了伺服系统编码器技术，并在此基础上攻克了更高位数的编码器技术；在直驱电机产品中，汇川结合自身电磁设计平台和电机制造技术，耦合电机驱动及编码器技术，实现了支取系统在易用性和运行性能上的显著提升。

②禾川科技：磁编码器已达到了业内先进水平，具有耐震动、耐油污、耐灰尘的优势，得到了大批量的市场验证，性能稳定可靠；在光编码器方面同样做到了先进水平，精度与分辨率更高，且具备低俗稳定性与高定位精度等特点。

③长春汇通：编码器具备完全自主知识产权，产品分辨率可覆盖20位及以上。

④奥普光电：子公司禹衡光学前身是1965年的长春第一光学仪器厂，也是中国最早的光电编码器及光学仪器制造商，是中国最早的光电编码器及光学仪器专业制造商，1967年中国第一台工业编码器、1984年中国第一套机床编码器、1986年中国第一套电梯编码器均出自禹衡光学。奥普光电2013年收购禹衡光学，获得了其编码器业务，目前在该领域具备显著技术优势，有望利用价格优势和快速响应能力与国外共享高端编码器市场。

表10：国内主要编码器厂商概况

公司名称	成立时间	公司概况	财务水平
汇川技术	2003年	专门从事工业自动化和新能源相关产品研发、生产和销售的高新技术企业。经过十多年的发展，公司已经从单一的变频器供应商发展成机电液综合产品及解决方案供应商，产品主要包括通用自动化、电驱电源、牵引系统、电梯电气系统、工业自动化及机器人零部件。	2022年公司营业总收入230.1亿元，同增28.2%，净利润43.2亿元，同增17.5%，毛利率35.0%，净利率18.8%。
禾川科技	2011年	是一家技术驱动的工业自动化控制核心部件及整体解决方案提供商，主要产品包括伺服系统、PLC等。公司自主研发的编码器在转矩精度、速度波动率、速度环带宽、控制周期等性能参数方面整体上已接近国外主流品牌同类可比产品水准，并可配合多种总线控制，拥有自调整、模型跟踪、制振等功能，大幅提高产品易用性的同时可以有效抗扰动并保持运行稳定。	2022年营业总收入9.44亿元，同增25.66%，归母净利润0.90亿元，同降17.85%。
长春汇通	1992年	汇川技术子公司，传感器解决方案供应商。公司编码器、制动器、开关等产品广泛应用于各行各业，包括电梯、机床、起重、纺织、印刷、包装、传输、风电、钢铁等行业。公司现有两个研发、生产基地。	2022年营业总收入230.08亿元，同增28.23%，归母净利润43.20亿元，同增20.91%。
奥普光电	2001年	国内国防用光电测控仪器设备的主要生产厂家，生产的光电测控仪器设备主要用于新型装备配套、现有装备升级换代或国防科学试验。公司从事的主要业务包括光电测控仪器设备、光栅编码器等。	2022年营业总收入6.27亿元，同增14.67%，归母净利润0.82亿元，同增75.31%。

资料来源：Wind, 安信证券研究中心

2.2.4. 力传感器

力传感器通过检测各种力的物理效应来检测力的大小，并将力的大小转化成相关电信号。力学传感器可以检测张力、压力、重量、扭矩、应力等各种物理量，是各种动力设备、工程机械、工作机械、工业自动化系统不可或缺的核心零部件。通常可被检测到的力的物理效应包括：①被测量力使得物体发生形变，②利用应变片受力或形变时电阻发生的变化，③通过压电晶体把力直接转换成晶体两表面的电位差，④力所引起的机械谐振固有频率变化，⑤待测力与其他已知力形成平衡。

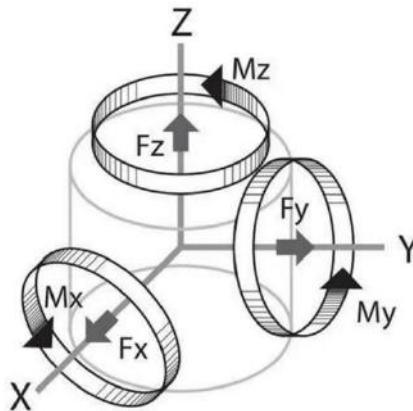
力学传感器按照测量维度可分为一至六维。六维传感器的定义为：在某直角坐标系中，传感器能同时测量沿三个坐标轴方向的力或者绕三个坐标轴坐标方向上的力矩，这种传感器就称为六维传感器。如果只能测量三个维度的力或者力矩，就叫三维力传感器。能测几个维度，就叫几维传感器，最常见的是一维、三维和六维的传感器，其他维度比较少。

图37. 六维力学传感器外观结构



资料来源：瑞尔特测控官网，安信证券研究中心

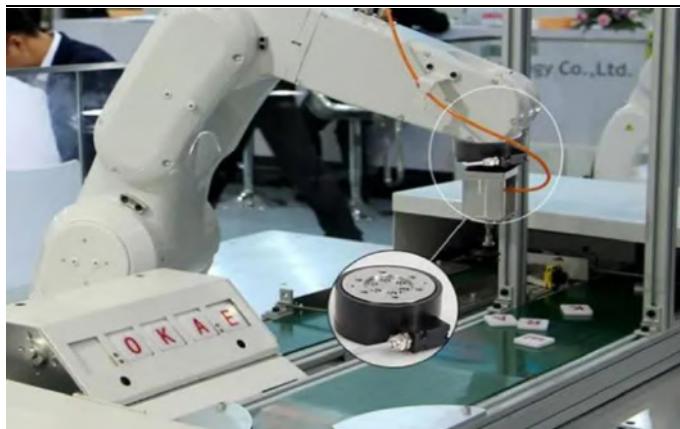
图38. 六维力学传感器同时检测三方向力和三方向力矩



资料来源：青昌实业官网，安信证券研究中心

多维力传感器广泛应用于机器人末端关节，实现对力的测量和控制。工业机器人本身是没有触觉的，末端关节加装力传感器后，就能够让机器人有“触觉”，实现对出力大小的控制。在工业机器人领域，力传感器广泛运用于检测、预防、测量、控制、示教、保护等环节，使得工业机器人能感知、测量并记录自己所施加力的大小，并检测设备的异常出力，提高生产环节的智能性和可靠性。

图39. 多维传感器广泛应用于机器人末端关节



资料来源：斯巴拓电子科技官网，安信证券研究中心

图40. 多维传感器具体功能

传感器作用	详细描述
检测	检测是否抓取到工件
预防	在损坏前检测到不正常的装配力
测量	记录工艺过程的力反馈实时确保质量
控制	利用力/力矩传感器来引导机器人在复杂的工作环境中的过程控制
示教	手动牵引示教机器人轨迹或自动触发确定位置
保护	安全感应可以检测意外接触情况下与人的接触

资料来源：斯巴拓电子科技官网，安信证券研究中心

行业壁垒：多维力学传感器壁垒较高，涉及材料控制及工艺。相较于其他元器件，传感器产品还包括芯片、陶瓷基板等，这些零部件一般需由上游企业配套提供，另外传感器的生产工艺和技术要点多，涉及材料控制和工艺控制等，因而企业自身需具备较强的技术整合能

力。尤其是六维传感器，并非三个一维力传感器和三个扭矩传感器的简单叠加，需要考虑多通道的温漂、蠕变、交叉干扰、数据处理的实时性，因而技术难度较低维力传感器更高。力传感器维度越高，成本和难度越高，协作机器人和人形机器人不一定需要用六维传感器。

竞争格局：力传感器供应商全球可分为三个梯队。第一梯队是美国 Vishay、瑞士 Metter Toledo、德国 HBM 和日本 NMB；第二梯队为国内柯力传感、中航电测；第三梯队主要是小规模生产商。目前国内主要力传感器供应商包括：苏州固锝，柯力传感，宇立仪器，坤维科技等。

①苏州固锝：MEMS 传感器是采用微电子和微机械加工技术制造出来的新型传感器，苏州固锝积极布局 MEMS 传感器领域，目前已成为了国内集 MEMS 传感器设计和封装于一身的领先企业，加速度传感器优势明显，在行车记录仪市场份额达到了 70%。

②柯力传感：技术研发方面，公司不断加快新型传感器及高端传感器的研发工作，管理方面，公司不断提升技术能力，安排技术人员到优秀科研院所和企业进行走访学习，市场开拓上，运用定期巡回服务、出差走访等方式不断挖掘客户潜在需求。目前公司在应变式传感器、称重仪表、称重系统集成行业处于领先地位。

③宇立仪器：公司发展始终围绕力传感器技术进行发力，从六维力传感器到协作机器人关节扭矩传感器再到打磨领域。凭借丰富的研发经验，公司以力传感器为核心技术向周边发散，为用户提供可靠产品，并基于客户的反馈，不断提高和改进产品性能。

④坤维科技：技术团队出自航天科研院所，从事飞行器空气动力学测试设备研发 15 年，对六维力测量和设备开发有着扎实的理论基础和丰富的实践经验。

表11：国内主要传感器厂商概况

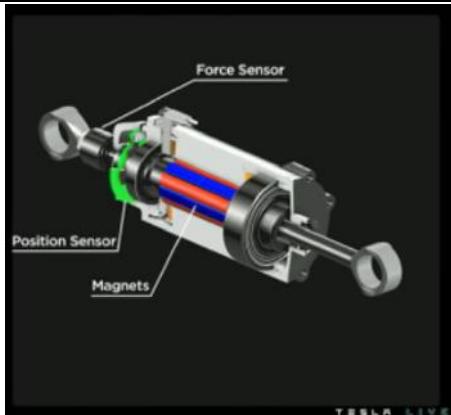
公司名称	成立时间	公司概况	财务水平
苏州固锝	1990 年	国内半导体分立器件二极管行业最完善、最齐全的设计、制造、封装、销售的厂商，产品包括最新封装技术的无引脚集成电路产品和分立器件产品、汽车整流二极管、功率模块、整流二极管芯片、硅整流二极管、开关二极管、稳压二极管、微型桥堆、军用熔断丝、光伏旁路模块等	2022 年实现营收 32.68 亿元，净利润 3.74 亿元；毛利率 17.21%，净利率 11.44%
柯力传感	1994 年	专业研制和生产健康秤、脂肪秤、厨房秤、高精度称重传感器、称重仪表、电子称重系统和分析仪器；钢制传感器长期以来占据了国内市场 50%以上的销售份额；已与 100 多个国家与地区的客商建立了广泛的贸易合作关系	2022 年实现营收 10.61 亿元，净利润 2.76 亿元；毛利率 40.24%，净利率 26.51%
宇立仪器	2007 年	简称 SRI，国内唯一具有汽车碰撞假人多轴力传感器生产能力的企业（全球仅两家）。公司产品 90%出口到欧、美地区。SRI 的六轴力传感器在 ABB、YASKAWA、FOXCONN 等国际领先的机器人企业得到良好应用。SRI 也推出了自主技术的 iGrinder 智能打磨机器人。	-
坤维科技	2018 年	主要产品为力学类传感器，用于工业自动化，系统集成、医疗设备、制药、航空航天、农牧业，汽车产品开发&OEM 等领域，持续为华为、立讯精密，华大智造、蓝思科技、美的、格力等制造业龙头企业提供品质可靠的传感器关产品。	-

资料来源：Wind，公司公告，安信证券研究中心

2.3. 线性关节：无框力矩电机+行星滚柱丝杠+传感器+编码器

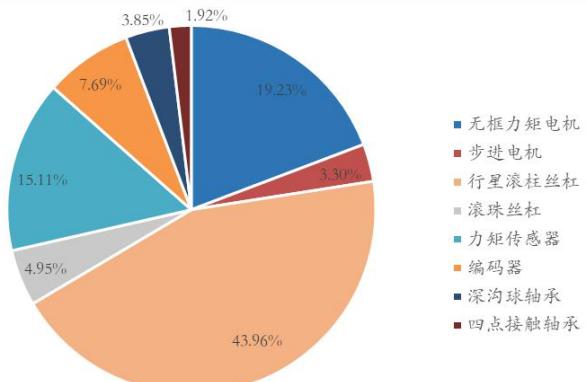
线性关节主要由无框力矩电机/步进电机+行星滚柱丝杠/滚珠丝杠+传感器+编码器构成。根据 Tesla AI Day 发布的线性执行器构成，我们预计线性执行器主要由无框力矩电机/步进电机、行星滚柱丝杠/滚珠丝杠、力矩传感器、编码器、深沟球轴承、四点接触轴承组成，其运动原理是采用内部旋转螺杆结构，通过永磁力矩电机带动螺杆旋转推动执行杆，从而实现将旋转运动转为直线运动。从成本角度来看，直线执行器中行星滚柱丝杠、无框力矩电机、力矩传感器、编码器占比分别达 43.96%、19.23%、15.11% 及 7.69%。接下来我们将重点从电机和滚珠丝杠展开论述其产品特点及供应格局。

图41. Tesla Optimus 直线执行器零部件构成



资料来源: Tesla AI Day, 安信证券研究中心

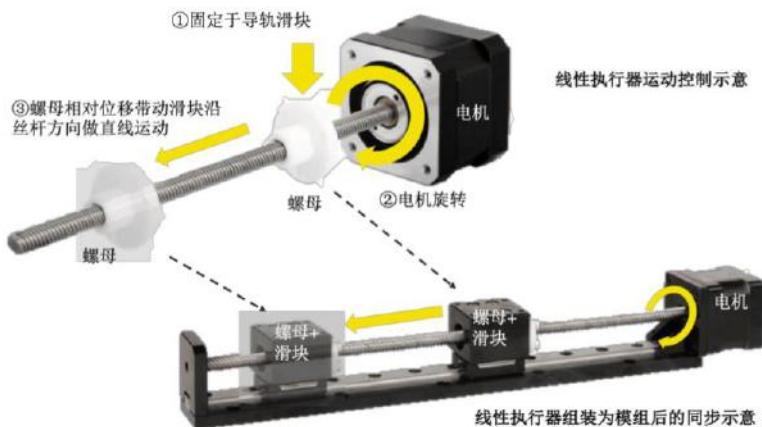
图42. Tesla Optimus 直线执行器零部件成本拆分



资料来源: Tesla AI Day, Ebay, 各公司官网, 安信证券研究中心

直线执行器的特点: 直线执行器主要分布于膝肘等负责支撑和承力, 且摆动角度不大但体积紧凑的单自由度关节和腕踝两个双自由度的关节。相比旋转执行器来说, 直线执行器可以节省成本, 亦能够为相应结构提供更有针对性的性能。和 Optimus 实用化的设计理念相关, 一个结构可靠、低耗能的机器人, 高动态响应并不是核心诉求。我们认为直线执行器的优势在于以下几点, ①空间利用率高: 直线执行器可纵向布局, 最大限度利用腿部内部空间, 也提供更大的推力, 如 2022 年 Tesla AI Day 上展示的一台线性执行器可以吊起一台半吨重的钢琴, 这也与机器人进行零件搬运的工作目标相吻合。②耗能较低: 直线执行器的螺杆传动机构通过合理设计可具备自锁能力, 即下半身不动时可以自动锁定姿态, 可以形成一个低功耗且稳定的底部支架。如果采用传统抱闸制动电机方案, 制动器需要占用额外重量且提供的制动力矩相对较小。

图43. 线性执行器



资料来源: 鼎智科技招股说明书, 安信证券研究中心

2.3.1. 永磁同步电机

我们认为直线执行器使用的永磁同步电机可能有两种, 无框力矩电机和步进电机。同时, 直线电机未来也有可能成为线性关节的可行性方案。无框力矩电机我们已在前文分析, 此处我们将针对步进电机和直线电机做相应的分析。

表12: 无框力矩电机、步进电机、直线电机对比

	无框力矩电机	步进电机	直线电机
原理	由驱动器供电, 驱动器控制 U/V/W 三相电形成电磁场, 永磁体的转子在此磁场的作用下转动, 以输出扭距为衡量指标	步进电机是一种通过步进(即以固定的角度移动)方式使轴旋转的电机	特殊类型的无刷同步伺服电机, 类似于力矩电机, 但它是敞开的扁平形状。通过线圈绕组与永磁体间的电磁相互作用

		用，电能高效率地转换成直线运动的机 械能
特征	通过霍尔元件/加装的编码器做为反馈信 号，驱动器根据反馈值与目标值比较，调整 转子转动角度。没有机壳，只有转子和定子 2个部件，中间是中空形式。	无需传感器。因为转子上的磁性部件 拥有高磁阻（即它们对磁场的传导能 力较差），所以无论线圈是否通电， 磁性部件仍然能够在转子上保持一个 相对稳定的磁场，抵抗位置变化
优点	能够达到步进电机很多倍的速度，并且控制 更大的电机。高生产率、高速度和高带宽 干扰校正能力	直接把输入电力转化为线性动能，与传 统的扭力及旋转动能不同，使用可同时 替代滚珠丝杠 硬件成本要求相对伺服电机低。保持 位置(使用带功率的堵转转矩和不带 功率的启动转矩)

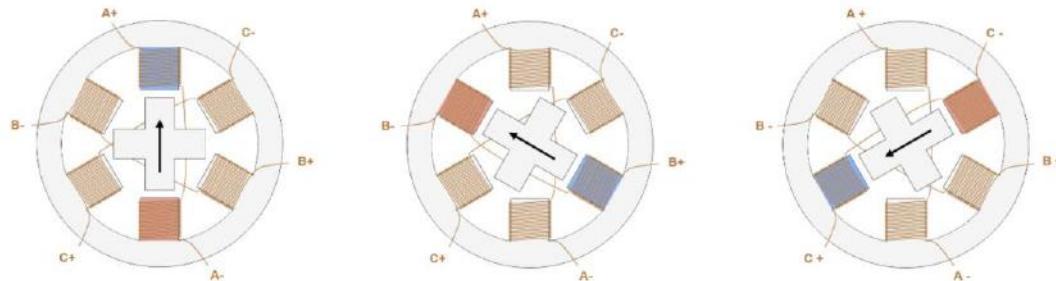
资料来源：研一机械，MPS 官网，ETEL 官网，安信证券研究中心

步进电机原理:步进电机是一种通过步进(即以固定的角度移动)方式使轴旋转的电机。其内部构造使它无需传感器,通过简单的步数计算即可获知轴的确切角位置。与所有电机一样,步进电机也包括固定部分(定子)和活动部分(转子)。定子上有缠绕了线圈的齿轮状突起,而转子为永磁体或可变磁阻铁芯。步进电机的基本工作原理为给一个或多个定子相位通电,线圈中通过的电流会产生磁场,而转子会与该磁场对齐;依次给不同的相位施加电压,转子将旋转特定的角度并最终到达需要的位置。当转子为永磁体时,转子与定子电路产生的磁场对齐。这种转子可以保证良好的扭矩,并具有制动扭矩。这意味着,无论线圈是否通电,电机都能抵抗位置的变化。但与其他转子类型相比,其缺点是速度和分辨率都较低。

优点: 坚固性, 高可靠性, 结构简单, 维护成本低, 对启动/停止/反转具有出色的响应能力, 并且可以在许多环境下工作。

缺点：电动机效率低下。无论负载如何，都会消耗较大功率。

图44. 步进电机的步进原理



资料来源：MPS 官网，安信证券研究中心

由于无框力矩电机与伺服电机原理相同，只是不同于传统的伺服电机，没有机壳，只有定子和转子2个部件，（相较于有框电机，无框电机配置灵活，安装方便，着眼于目前驱动系统的高度集成化趋势，可以说无框电机更贴合工程师的目标期望）所以我们将步进电机和伺服电机结构图进行对比可以比较步进电机与无框力矩电机的结构原理。

图45. 步进电机和伺服电机结构图对比



步进电机结构图

伺服电机结构图

竞争格局：步进电机国内主要厂商为常州运控，鸣志电器，江苏雷利等。2022年江苏雷利营业收入为29.0亿元，其中步进电机部分收入为11.9亿元，占总营收的40.91%，毛利率达31.31%。2022年鸣志电器营业收入29.6亿元，净利率8.4%，其中电机及驱动系统控制业务占总营收78%，毛利率38.2%，其中核心业务产品混合式步进电机产量约1,800万台，销售数量和金额排名全球前三，常州运控是隶属鸣志电器的专业生产精密步进电机、无刷电机及驱动器的制造商子公司，2022年总营收达3.4亿元，净利率4.3%。

表13：国内主要步进电机厂商概况

公司名称	成立时间	公司概况	经营业绩
常州运控 (上属 鸣志电器)	1999年	专业提供精密电机、驱动、高精密减速机及解决方案的制造商。拥有员工600余人，公司秉承“质量赢得市场、诚信开创未来”的宗旨。	2022年营收3.38亿元，净利润0.15亿元。
鸣志电器	1998年	从工厂自动化专业部件到智能LED照明驱动器，从大型工厂设备的智能管理系统到汽车通信设备的控制执行机构有广泛的应用领域。公司经营范围：生产传感器、步进电机、直流电机、传动传感装置。	2022年营收29.6亿元，净利润2.5亿元。营收中控制电机及其驱动系统产品（包括HB步进电机，步进及无刷驱动系统、集成式智能步进伺服驱动，PM步进电机）占比78.43%。
江苏雷利	2006年	主要从事家用电器微特电机及智能化组件的研发、生产与销售。公司产品包括空调电机及组件、洗衣机排水泵、洗衣机排水电机、冰箱电机及组件、洗碗机循环泵、跑步机电机、汽车零部件配套电机及组件等。是全球家用电器微特电机产品及智能化组件制造行业的领先企业。	2022年营收29亿元，净利润3.1亿元。营收中步进电机占40.91%。

资料来源：Wind，安信证券研究中心

直线电机原理：直线电机是一种特殊类型的无刷同步伺服电机，类似于力矩电机，但它是敞开的扁平形状。通过线圈绕组（初级部分）与永磁体（次级部分）间的电磁相互作用，电能高效率地转换成直线运动的机械能。初级部分的常见名称还有电机，运动件，平台或滑架，而次级被称为磁道或磁路。直线电机是直接把输入电力转化为线性动能，与传统的扭力及旋转动能不同。未来，直线电机亦有望应用在机器人领域。

优点：实现实定子和动子之间真正意义上的无接触磨损，寿命长、速度快、响应快，并且安装方便。

缺点：磁力有限，所以刚性、定位精度无法做到丝杠的水平，并且造价较高。直线电机目前应用领域仍然是自动化等高速、高响应场合。在对精度、刚性、承载要求高的场合，直线电机很难替代丝杠。

竞争格局：我国市场国产化率不足40%，国内企业包括昊志机电，大族电机等。2014年至2019年，我国直线电机的使用以每年20%-30%的增长速度不断地应用于各种自动化设备上，市场规模逐年增长，据华经产业研究院统计，截至2019年我国直线电机行业市场规模达到25.6亿元，同比增长28%。2019年我国直线电机产量达12.1亿台，同比增长13.08%。据温州恩阳（日本THK中国产品授权经销商）咨询，2021年直线电机国产品牌在国内市场占比不足40%。新加坡企业雅克贝思在国内直线电机高端市场占据较高份额，其次是沙迪克、台湾上银，科尔摩根等企业。国内直线电机品牌主要有昊志机电、大族电机、郑州微纳科技、嘉兴华领、青岛同日等。

图46. 2014-2019年我国直线电机行业市场规模及增长



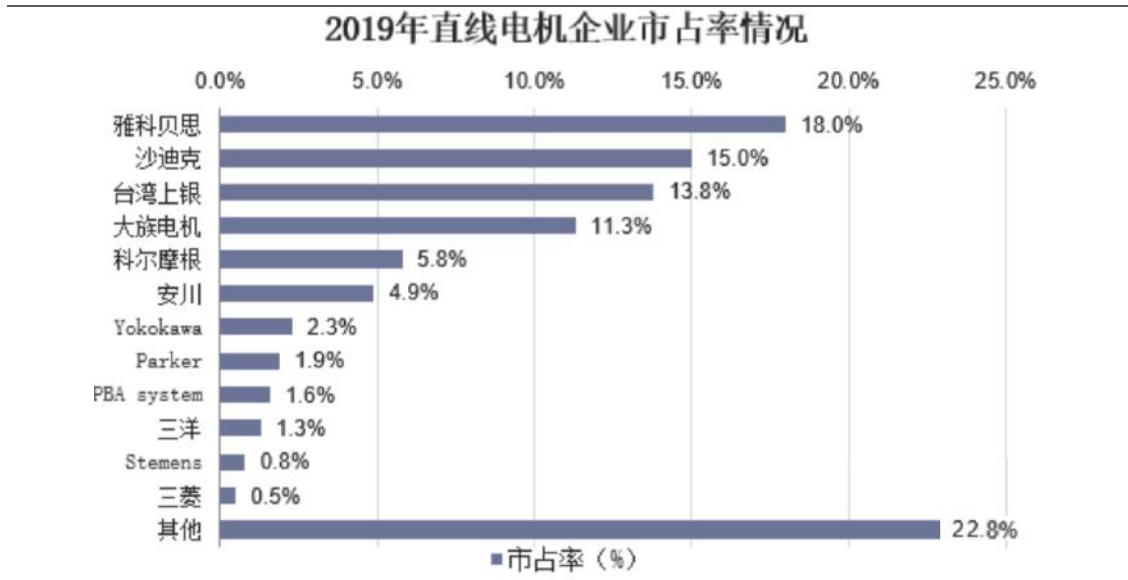
资料来源：华经产业研究院，安信证券研究中心

图47. 2015-2019年我国直线电机产量及增长



资料来源：中国电机工程学会，华经产业研究院，安信证券研究中心

图48. 2019年直线电机企业市占率情况



资料来源：华经产业研究院，安信证券研究中心

表14：国内外主要直线电机厂商概况

公司名称	成立时间	公司概况	经营业绩
科尔摩根 (美国)	1916年	全球领先的运动控制系统专家，提供丰富的标准电机，驱动器，运动控制系统以及AGV车辆控制系统。依托超过七十年的运动控制设计与研发领域的专业经验，为全球OEM机器制造商提供突破性的解决方案。1949年设计出无框力矩电机，自此成为科尔摩根原身Inland电机公司发展最快、最重要的业务部分。	2022年营收8.2亿美元(约57.4亿元)。
雅科贝斯 (新加坡)	2004年	致力于研发、设计和生产直驱电机(直线电机、力矩电机、音圈电机)和高精度运动平台，以及提供高精密系统解决方案。	2022年营收99.1百万美元(约718.5百万元)
沙迪克 (日本)	1976年	沙迪克公司是数控(NC)电火花加工制造厂商的先驱者。创业以来，通过电火花加工控制的研究和数控系统开发，使得加工精度飞跃提高，除了放电加工机，还制造和销售高精度的高速加工中心、运用公司独自技术V-LINE的注塑机，以及以制面装置为核心的自动食品机械等。直线电机业务由2007年进入技术收获期，2012年4月直线电机驱动机床(电火花/线切割放电加工机、冲压机、加工中心)累计出库达到30,000台。	2022年集团营收804亿日元，总公司营收455亿日元
上银 (台湾)	1989年	全世界传动控制产品与系统科技产品的专业制造者，主要产品有滚珠丝杠、直线导轨、单轴多轴机器人、谐波减速机、轴承、直线电机、力矩电机、伺服电机等。	2017年营收211.7亿元，净利润22.52亿元。
昊志机电	2006年	专业从事高精密电主轴及其零配件的研发设计、生产制造、销售与维修服务，昊志机电“以中高端电主轴产品为核心、以电主轴精密零配件制造为支撑、以配套维修服务为特色”，构建了电主轴“整机—配件—服务”紧密结合的完整业务链。为满足不同类型机床的加工要求，设计研制了包括PCB钻孔机/成型机电主轴、/玻璃雕铣机电主轴、木工雕铣机电主轴、钻攻中心电主轴、转台、刀柄夹头等十数个系列主轴及配件产品。	2022年营收9.9亿元，净利润0.25亿元。
大族电机 (上属 大族激光)	2005年	参与《永磁式直线电动机通用技术条件》GB/T 34115-2017国家标准起草与制定，公司引进直线电机和伺服驱动的海归团队，配备先进的软硬件开发平台，共享母公司大族激光集团的平台资源。自主研发生产的直线电机、力矩电机、伺服电机、新能源汽车驱动电机、直流无刷电机、直线运动平台、伺服运动模组、潜油直线电机等系列产品。	大族激光2022年营收149.6亿元，净利润12.8亿元。

资料来源：Wind, Datanyze, Kollmorgen官网，大族电机，安信证券研究中心

2.3.2. 行星滚柱丝杠/滚珠丝杠

滚珠丝杠是实现回转运动和直线运动相互转化的理想产品，被广泛应用于各种工业设备和精密仪器。滚珠丝杠线性执行器是微特电机和滚珠丝杠副的组合，滚珠丝杠副在具有螺旋滚道的丝杠和螺母间装有滚珠作为中间传动件，在螺母上闭合的回路中循环滚动，使丝杠和螺母间的运动由滑动变为滚动，减小了运动摩擦，可以完成高速传动任务。并且滚珠丝杠线性执行器可以满足精确定位，实现快速响应。滚珠丝杠螺母的传动效率在90%-96%，相较于梯形丝杠螺母26%-70%的传动效率，滚珠丝杠可以使用更少的驱动功率。

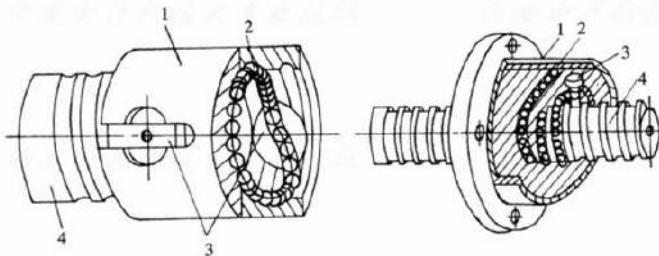
滚珠丝杠广泛应用于机床工具、机器人制造等领域。在技术上不断朝向高精、高速、高荷重及低噪音的方向精进，有多种抑制温度上升的创新产品，以克服加工时产生的高温造成螺杆热变形影响精度。随着客户生产设备不断向工程集约、节能轻量化方向迈进，维持产品性能并减少体积和通过热处理延长产品使用寿命成为滚珠丝杠产业发展的重点趋势。

图49. 线性滚珠丝杠实物图



资料来源：鼎智科技公司官网，安信证券研究中心

图50. 滚珠丝杠副结构图



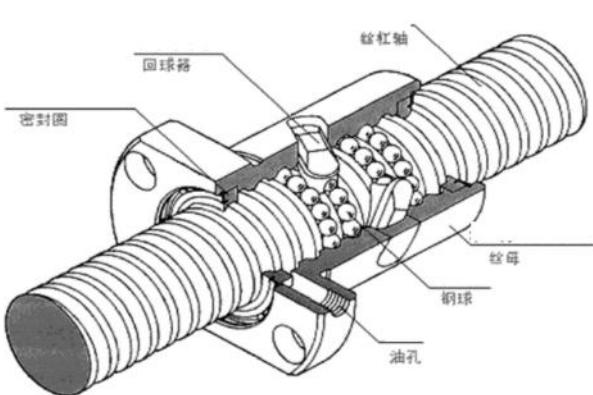
1—螺母；2—滚珠；3—回程引导装置；4—丝杠

机器人网

资料来源：机器人网，安信证券研究中心

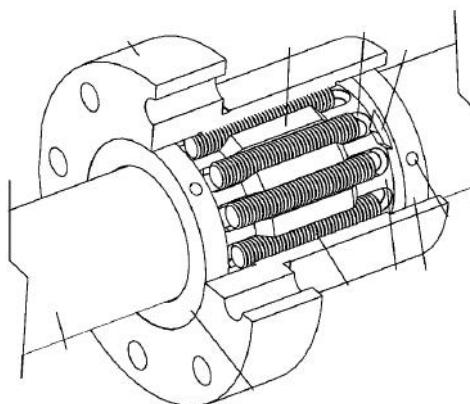
行星滚柱丝杠与滚珠丝杠区别：行星滚柱丝杠传动方式是在主螺纹丝杠的周围，行星布置了6-12个螺纹滚柱丝杠，这样将电机的旋转运动转换为丝杠或螺母的直线运动。行星滚柱丝杠与滚珠丝杠的结构相似，区别在于行星滚柱丝杠载荷传递元件为螺纹滚柱，是典型的线接触；而滚珠丝杠载荷传递元件为滚珠，是点接触。主要优势是有众多的接触点来支撑负载，能够提供高于滚珠丝杠的额定动载和静载，螺纹滚柱替代滚珠将使负载通过众多接触线迅速释放，从而能有更高的抗冲击能力。

图51. 滚珠丝杠结构图



资料来源：人人文库，安信证券研究中心

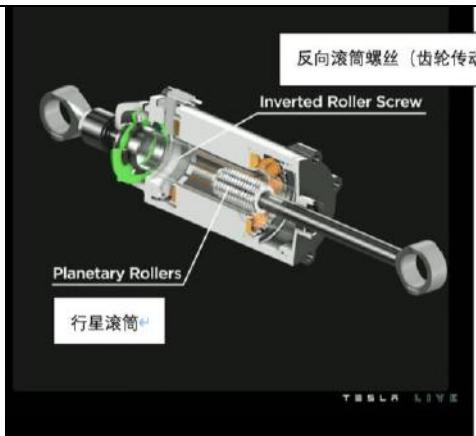
图52. 行星滚柱丝杠结构图



资料来源：苏州阳林滚动机械科技企查查产品数据，安信证券研究中心

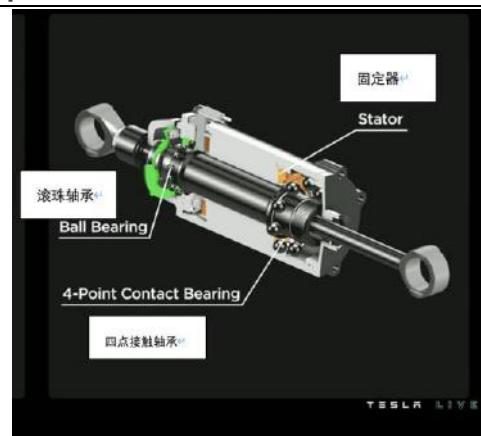
特斯拉 Optimus 滚柱丝杠方案特点：特斯拉的反向（inverted）行星滚柱丝杠方案与常规方案略微不同，“反向”意为将螺杆、螺母角色互换。非反向方案为电机带动螺杆旋转，螺母与主体固定，螺母沿螺纹被螺杆带动将其旋转运动变换为直线运动。反向方案变为螺母旋转，螺杆与主体固定，此时螺母旋转带动螺杆运动，螺杆将螺母的旋转运动转换为直线运动。剖面图可以看到伺服电机转子直接带动螺母旋转。该方案特点是行星滚子与螺母多点咬合滚动配合，承载能力极强，寿命超长，比常规滚珠丝杠提升一个数量级，但难点是滚子及螺母磨制工艺复杂耗时，装配时需要匹配不同滚子的相位，操作难度大，需要通过设计和工艺在保证性能的前提下将成本降低。

图53. Optimus 线性执行器剖面图 1 螺母螺杆



资料来源: Tesla AI Day 2022, 安信证券研究中心

图54. Optimus 线性执行器剖面图 2 滚珠

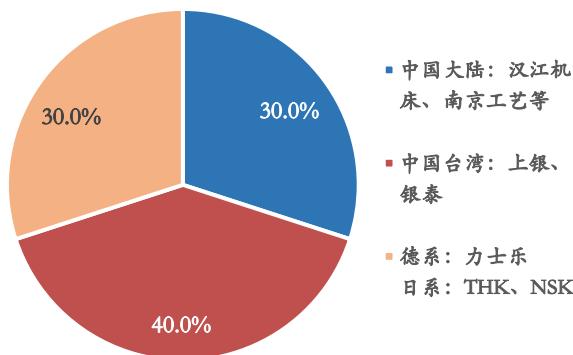


资料来源: Tesla AI Day 2022, 安信证券研究中心

行业壁垒: 滚珠丝杠制造具有结构刚性和速度的要求, 壁垒在于专利、生产设备、材料及工艺。为实现高速和精密的加工, 滚珠丝杠除在机床设备的结构刚性进行加强设计外, 同时还需要具备高速主轴系统和高速进给系统, 以实现高速材料切削的过程。行业壁垒主要体现在设计专利, 工业设备, 微量元素配方的原材料, 工艺 know-how 如热处理等。

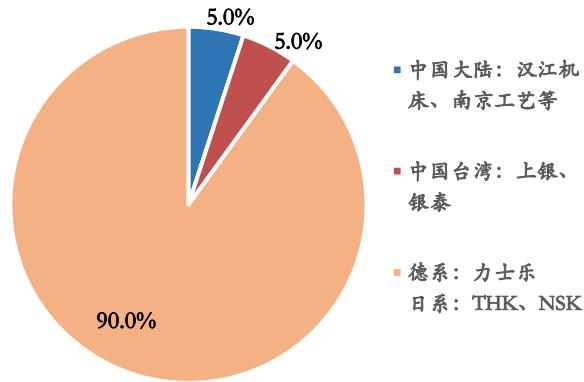
竞争格局: 日系、欧系、台系占据我国滚动功能部件中高端市场主导, 大陆制造商产品竞争力不足。根据金属加工杂志社数据, 在国内高端市场, 欧日企业市场占有率高达 90%, 大陆、台湾制造商市场份额各约 5%, 高端市场格局相对集中; 在国内中低端市场, 大陆制造商拥有过约 30%, 中低端市场格局相对分散。目前全球滚珠丝杠厂商有德系企业博世力士乐、舍弗勒; 台湾企业上银科技、银泰等; 日本企业 THK、NSK 等。国内厂商包括鼎智科技、秦川机床、拓普集团、贝斯特、三花智控、恒立液压、江汉机床、南京工艺等。国内滚动部件制造厂商众多, 许多正在研发的企业处于未上市阶段, 且多数仅具备单件生产能力, 和海外大规模量产企业仍有较大差距。

图55. 中国品牌在国内中低端市场占据一席之地



资料来源: 金属加工杂志社, 安信证券研究中心

图56. 国内高端应用市场基本被德系、日系产品垄断



资料来源: 金属加工杂志社, 安信证券研究中心

表15: 国内外主要行星滚柱丝杠厂商概况

公司名称	成立时间	公司概况	产能或营收情况
瑞士 GSA	1982 年	1982 年起生产行星滚柱丝杠, 同集团兄弟公司 GZ 公司专注螺纹磨削。2014 年, GSA 公司收购了 rterei Hertig AG。多年来与 rterei Hertig 一起获得的综合技术可以得到保证, 2019 年, 该公司搬到了霍里维尔的新工厂。 2016 年并购 Rollvis 后, 成为行星滚柱丝杠全球大型供应商 (注: Rollvis 从 1970 年起开始生产行星滚柱丝杠产品, 目前已覆盖非循环式、反向式、差动式以及循环式产品。)	2022 年营收 324 亿美元(约 2268 亿元), 净利润 50 亿美元(约 350 亿元)。
博士力士乐 Rexroth	2001 年	德国的工业液压设备制造商。2001 年 5 月 1 日, 博世收购了曼内斯曼力士乐, 并且与博世自动化技术部合并为博世力士乐。博世力士乐全球雇员约 31,000 人。主要产品有电动缸、直线运动模块、集成模块、精密模块、导	2021 年销售收入 62 亿欧元。

		轨导向滑台、行星滚珠丝杠等。通过PLSA行星滚柱丝杠传动系统，博世力士乐进一步扩展了其丝杠传动系统的应用领域，可以快速移动高负载。	
上银 (台湾)	1989年	全世界传动控制产品与系统科技产品的专业制造者，主要产品有滚珠丝杠、直线导轨、单轴多轴机器人、谐波减速机、轴承、直线电机、力矩电机、伺服电机等。	2017年营收211.7亿元，净利润22.52亿元。
银泰	1990年	主要生产滚珠导丝杆、精密丝杆花键、线性导轨、滚珠花键和线性模组，精密机械关键性零部件，主要供应机床、放电加工机、线切割机、塑胶注塑机、半导体设备、精密定位及其他各式设备与机器上。 PMI之滚珠丝杠是三十多年来所累积制造技术为基础 ，从材料、热处理、设计、生管、品管到出货，都有一定的处理作业，其制度化的管理让其滚珠丝杠给顾客高度的信赖度。	2016年台湾厂营收15亿元，营运规模仅次于上银，是台湾第二大传动系统元件厂。
瑞士 ROLLIVIS	1970年	成立于1970年，专业致力于行星滚柱丝杠副的制造，研究及推广。 全球第二大行星滚柱丝杠生产商 ，最大的通用件厂商之一。面对普通领域与高精技术场合分别推出标准式与循环式行星滚柱丝杠。	2018年销售数量占到整个行业45%，为航空保密认证单位并在军用市场占据全球市场65%。
舍弗勒 Schaeffler	2015年	舍弗勒集团是一家德国轴承制造商，涉及汽车航空、工业等领域。2015年10月9日在德国上市。 2022年舍弗勒集团牵头收购了Ewellix公司，完成了全球范围内行星滚柱丝杠优秀公司的垄断性收购。	2022年，舍弗勒集团全年实现销售额158亿欧元，按固定汇率增长9.4%，超过预期目标，全年实现自由现金流2.8亿欧元
德国 Ewellix	2019年	起源于法国LTI工厂，LTI为原始工厂，1968年被SKF集团收购，隶属于SKF线性运动技术事业部，2018年改名Ewellix，后被舍弗勒收购并以SKF时期技术与客户基础参与市场竞争，在滚珠丝杠、导轨、行星滚柱丝杠领域均有较强实力。	在全球拥有16个销售单元及6个制造基地。年销售额约为2.5亿欧元，拥有约1250名员工。其母公司舍弗勒集团2022年营收约158亿欧元，约84,000名员工。
THK	1971年	THK株式会社是一家日本公司，提供机械工程领域的机械元件和模块，包括机器人技术和自动化。公司总部位于东京。2001年THK的股票在东京证券交易所上市。	截至2022年，THK在日本、欧洲、北美、南美和亚洲等地拥有包括关联公司在内的37家制造工厂。
NSK	1916年	NSK Ltd.是全球范围内的大型轴承制造商，同时也是日本最大的轴承制造商。公司生产工业机械轴承、精密机械及零部件以及汽车轴承和组件。在东京证券交易所上市，在29个国家拥有超过144个海外业务。	截至2021年，公司资本达672亿日元(约33.6亿元)，年营业收入达7,476亿日元(374.4亿元)
拓普集团	1983年	主要致力于汽车动力底盘系统、饰件系统、智能驾驶系统等领域的研发与制造，在汽车行业专注笃行40年。	2022年营收160亿元，净利润达17亿。
鼎智科技	2008年	主营医疗及工业自动化用线性执行器、编码器、驱动器及其组件为基础的精密运动控制系列产品的设计、研发、生产、销售。公司产品线性执行器、混合式步进电机、音圈电机以及智能驱动器等广泛使用于医疗诊断设备、生命科学仪器、实验室自动化、机器人、流体控制、半导体及精密电子生产设备，各类工业自动化设备。	2022年营收3.2亿元，其中线性执行器占60.26%。毛利率55.39%，净利率31.67%。产能63.55万台，产能利用率104.46%，产销率96.8%。
贝斯特	1997年	专注于精密零部件和工装及自动化产品的研发、生产及销售，主要产品包括涡轮增压器精密轴承件、涡轮增压器叶轮、涡轮增压器中间壳、发动机缸体等关键汽车零部件，座椅构件等飞机机舱零部件，用于汽车、轨道交通等领域的工装夹具，以及飞机机身自动化钻铆系统、自动化工业生产线等智能制造系统集成产品。	2022年营收11亿元，净利润达2.3亿元。
三花智控	1994年	领先的生产和研发制冷空调控件元件和零部件的厂商。在汽车、电器和空调行业中，通过与全球著名企业的合作紧密，三花已成为世界领先的OEM供应商，并进入特斯拉一级供应商。	2022年营收213亿元，净利润达26亿元。
秦川机床	1998年	国内机床工具行业的龙头企业，主要产品有齿轮磨床、螺纹磨床等，所属汉江机床生产2级、3级精度的滚珠丝杠、直线导轨。	2022年营收41.01亿元，归母净利润2.75亿元。
恒立液压	2005年	专业生产液压元件及液压系统，涵盖高压油缸、高压柱塞泵、液压多路阀、工业阀、液压系统、液压测试台及高精密液压铸件。	2022年营收81.97亿元，归母净利润23.43亿元。

资料来源: Wind, Nookindustries, 天誉科技, U.S. General Services Administration, Craft, 维基百科, PMI官网, 安信证券研究中心

2.4. 手部关节：空心杯电机+行星减速器+滚珠丝杠+传感器

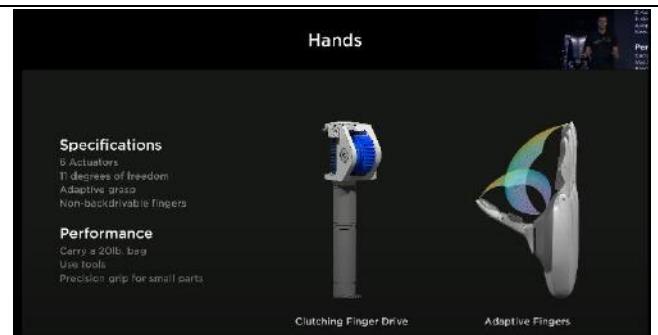
手部关节主要由空心杯电机、精密行星减速器、滚珠丝杠和传感器构成。空心杯电机使手指拥有活动能力，精密行星齿轮箱使得机械手定位更精准、运用更灵活，编码器提供了手部高精度位置反馈和速度反馈，传感器使机器人拥有类似人类的知觉功能和反应能力。特斯拉人形机器人每只手包括6个驱动器和11个自由度。驱动器通过齿轮驱动一根金属线来控制手指弯曲，并集成了感应器和锁定装置。自由度是机器人的运动技术指标，决定了机器人整体的灵活性和活动范围，可用轴关节的移动、摆动或旋转动作的运动方式和数量来体现。手部的11个自由度结合控制软件，可以使机械手如同人手一般完成复杂灵巧的操作。并且机械手能承担大约9公斤的负重。从成本角度来看，手部执行器中空心杯电机、行星减速器、滚珠丝杠、传感器占比分别达54.55%、18.18%、13.64%及9.09%。接下来我们将重点从空心杯电机及传感器两部分展开论述其产品特点及供应格局。

图57. 特斯拉人形机器人手部结构



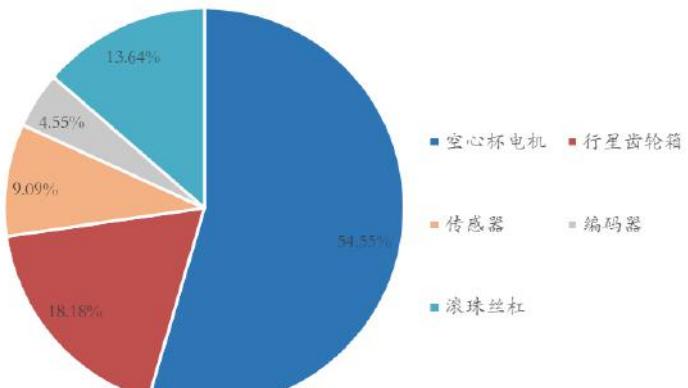
资料来源: Tesla AI Day, 安信证券研究中心

图58. 特斯拉机器人手部包含 6 个驱动器和 11 个自由度



资料来源: Tesla AI Day, 安信证券研究中心

图59. Tesla Optimus 手部执行器零部件成本拆分



资料来源: Tesla AI Day, Ebay, 各公司官网, 安信证券研究中心

2.4.1. 空心杯电机

空心杯电机是采用无铁芯转子的控制电动机。空心杯电机属于直流永磁的伺服、控制电动机，在结构上突破了传统电机的转子结构形式，采用无铁芯转子，这种特别的转子结构彻底消除了由于铁芯形成涡流而造成的涡流损耗，使得电动机运转性能优化，并具备控制和拖动特性。传统铁芯电机由带槽的铁芯结构组成，绕组缠绕在槽之上，而空心杯电机由于绕组没有铁芯，省去铁芯的空间，可以做到更小的尺寸和更高的效率。

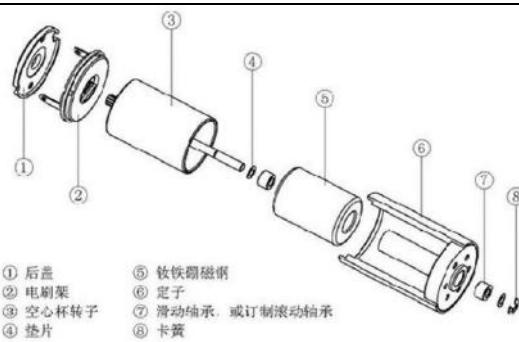
空心杯电机主要由后盖、接线端子、电刷端盖、电刷、换向器、杯形绕组（转子）、转轴、垫圈、滑动轴承、外壳、磁铁（定子）、法兰、定位环组成。定子由永磁体、壳体、法兰组成。外壳提供了恒定的磁场，使电机无铁损耗。由于没有软磁性牙齿，所产生的转矩是均匀的，即使在低速下也能使运行平稳。在较高的速度下，电机能减少振动，减少噪音。在绕组和换向器的转子中，绕组通过换向板连接到轴上。换向系统使用一对贵金属刷，减少了电刷火花，减少的电刷火花产生较少的电磁排放。

图60. 传统铁芯电机结构



资料来源: 鸣志电器公司官网, 安信证券研究中心

图61. 空心杯电机结构



资料来源: 新和电机网站, 安信证券研究中心

空心杯电机具有高功率密度、高动态响应等优势。无齿槽效应保持空心杯电机低速运行平稳和低振动、低噪音状态；结构紧凑保证空心杯电机具有更高的功率密度，即单位体积下所产生功率更高；低电感保证空心杯电机的高动态响应和高的加速度。

表16：空心杯电机特点与优势

特点	优势
无齿槽效应	低速运行平稳
结构紧凑	低振动，低噪音
低电感	转子可控制在任意位置
	磁路设计更优
	功率密度更高
	温升低，效率高
	高动态响应
	高加速度

资料来源：鸣志电器公司官网，安信证券研究中心

有刷空心杯电机由于体积、重量等优势，可以应用于机器人手部。空心杯电机分为有刷电机和无刷电机，无刷空心杯电机又称直流无刷无齿槽电机，其转速高，力矩大，具有高动态响应能力，适合应用于机器人关节。有刷空心杯电机又称直流有刷无铁芯电机，一般国内的“空心杯电机”泛指有刷电机，其具有比较低的反向力矩，具有高效率，高加速度，低摩擦等特性，同时在体积和重量方面有优势，可以应用于机器人手部。

表17：无刷电机与有刷电机对比

无刷电机	有刷电机
长寿命(10000h+)	电机寿命受限(1000-3000h)
高转速	电机转速受限
电磁干扰可忽略	有火花
有铁损	无铁损
需要驱动控制	控制简单

资料来源：鸣志电器公司官网，安信证券研究中心

图62. 有刷空心杯电机可应用于机器人手部

应用



资料来源：鸣志电器公司官网，安信证券研究中心

图63. 有刷空心杯电机



资料来源：鸣志电器公司官网，安信证券研究中心

行业壁垒：空心杯电机的技术壁垒在于绕线工艺。空心杯电机无铁芯转子的结构给绕线带来困难，目前海外企业的绕线工艺更先进且处于保密状态，国内绕线成熟设备较少，大多生产处于手工或半手工状态。

竞争格局：海外三大家份额较高，国内厂商包括鸣志电器、鼎智科技。瑞士 Maxon、德国 Faulhaber 和瑞士 Portescap 形成三足鼎立格局。国内主要厂商有鸣志电器、江苏雷利公司鼎智科技、拓邦股份。目前空心杯电机的国产化率较低，主要由于国内厂商技术储备与工艺精度不及国外，国内形成了差异化竞争格局，不同厂家产品、技术与性能各具特色。鸣志电器于 2019 年收购瑞士 Technosoft Motion 公司 100%的股权，完善了产业链布局。Technosoft Motion 在控制电机，尤其是空心杯电机、直流无刷电机和无槽无刷电机的驱动控制系统上具有全球领先的技术实力。2023 年 4 月 13 日，江苏雷利控股子公司鼎智科技在北交所上市，主要从事电机制造、微特电机及组件制造和销售等业务，鼎智科技不断加强空心杯电机的研发制造工作。

表18：国内主要空心杯电机厂概况

公司名称	成立时间	发展概况	营收情况
鸣志电器	1998 年	主要布局慢速移动人工智能、智能汽车电子等领域，持续拓展空心杯电机产品线，空心杯电机技术在全球居于前列水平。	2022 年营业总收入 29.60 亿元，同比去年增长 9.05%，归母净利润 2.47 亿元，同比去年下降 11.58%，基本 EPS 为 0.59 元，平均 ROE 为 0.60%。
鼎智科技	2008 年	立足于精密运动控制组件的设计、生产与销售等一站式服务业务，主要核心产品为线性执行器、音圈电机。空心杯电机已实现量产。	2022 年营业总收入 3.18 亿元，同比去年增长 63.99%，归母净利润 1.01 亿元，同比去年增长 103.39%，基本 EPS 为 3.05 元，平均 ROE 为 52.29%。
拓邦股份	1996 年	国内智能控制行业的开创者。为家用电器、电动工具、工业设备、个人护理、商业设备、医疗器械、汽车电子等领域厂商提供智能控制解决方案，在感知检测、控制处理、智能物联和人机交互等领域拥有一系列核心技术。空心杯电机是公司主营业务之一。	2022 年营业总收入 88.75 亿元，同比去年增长 14.27%，归母净利润 5.83 亿元，同比去年增长 3.13%，基本 EPS 为 0.46 元，平均 ROE 为 10.85%。

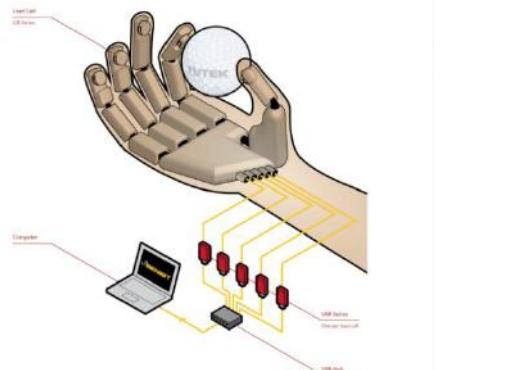
资料来源：Wind, 安信证券研究中心

2.4.2. 触觉传感器

手部关节可使用力觉和触觉传感器。其中，触觉传感器使机器人手部具备靠触觉来感知的能力。触觉传感器主要有四种方式：压电式、压阻式、电容式和光学原理式。**①压电触觉传感器**基于压电效应原理，即在外界力的作用下，压电材料表面因形变会产生电压。它的频率响应好，测量范围大，但分辨率不是很理想。**②压阻式触觉传感器**基于压阻效应原理，即施加外力时会产生自身电阻的变化。它测量范围大，鲁棒性好，但是迟滞效应较大。**③电容式触觉传感器**利用电容的变化来测量接触力。其空间分辨率高，功耗低，但抗干扰能力差。**④光学原理的触觉传感器**靠检测光的参数变化间接感知外界的接触信息。优点是抗干扰能力强，具有很高的空间分辨率。

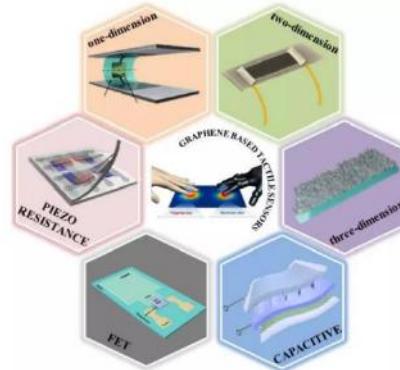
触觉传感器的技术壁垒在于对触觉传感机理的研究深度和材料纯度。由于机械、材料、电子、精密制造等技术难题，复现人体触觉传感机制的研究进展缓慢；材料方面，导电橡胶、导电塑料、碳纳米管、石墨烯等是可用作触觉传感器的材料，而国内目前的材料质量、生产水平并不稳定。

图64. 机器手触觉传感器结构图



资料来源：冠一科仪公司官网，安信证券研究中心

图65. 基于石墨烯的触觉传感器



资料来源：《Graphene Nanostructure-based Tactile Sensor for Electronic Skin Applications》，安信证券研究中心

国外企业垄断触觉传感器中高端市场，国内产业层次偏低。根据中国科技信息杂志社显示，目前国内传感器企业大多从事气体、温度等类型传感器的生产，生产触觉传感器的企业较少。国际触觉传感器技术不断攀升，但国内产业档次偏低，创新能力不足，中高端市场被国外企业垄断。目前全球传感器市场主要由美国、日本和德国的龙头企业主导，国外主要厂商有美国公司 Tekscan、Pressure Profile Systems 和 Sensor Products Inc. 等，国内相关企业有汉威科技、苏州固锝、柯力传感。

表19：国内主要触觉传感器厂商概况

公司名称	成立时间	公司概况	财务水平
汉威科技	1998 年	以传感器为核心，将传感技术、智能终端、通讯技术、云计算和地理信息等物联网技术紧密结合，形成了“传感器+监测终端+数据采集+空间信息技术+云应用”的系统解决方案，业务应用覆盖物联网综合解决方案及居家智能与健康等行业领域。	2022 年营业总收入 23.95 亿元，同比去年增长 3.40%，归母净利润 2.76 亿元，同比去年增长 4.94%。
苏州固锝	1990 年	国内半导体分立器件二极管厂商，从前端芯片的自主研发到后端成品的各种封装技术，形成完整的产业链。主要产品包括最新封装技术的无引脚集成电路产品和分立器件产品、汽车整流二极管、功率模块、整流二极管芯片等品种。	2022 年营业总收入 32.68 亿元，同比去年增长 32.01%，归母净利润 3.71 亿元，同比去年增长 70.34%。
柯力传感	2002 年	是目前中国最大的称重元件公司。企业专业研制和生产健康秤、脂肪秤、厨房秤、高精度称重传感器、称重仪表、电子称重系统和分析仪器，年生产能力达到 100 万台健康秤、脂肪秤、厨房秤、300 万只传感器、50 万台称重仪表、1500 台(套)称重系统和 2 万套分析仪器。	2022 年营业总收入 10.61 亿元，同比去年增长 2.85%，归母净利润 2.60 亿元，同比去年增长 3.58%。

资料来源：Wind，安信证券研究中心

3. 人形机器人商业化关键：刚需应用场景及降本驱动量产

3.1. 商业化痛点：刚需服务场景、规模化降本、标准构建

我们认为当下人形机器人尚处于商业化的早期，未来核心要解决的市场化痛点在于刚需应用场景挖掘、规模化降本以及产业标准构建。

1、“用得上”：工业应用有望更快落实，服务领域则是长期广阔的应用场景

人形机器人可在衣食住行等环节辅助完成繁杂任务，满足个人用户潜在需求。此外，在老龄化趋势下，人形机器人还可以满足老人看护、病患照顾等场景应用。如果未来人形机器人能够提供日常生活所需要的的服务，减少人的参与，将会获得 C 端巨大的市场需求。然而，服务应用场景的丰富能力主要取决于人形机器人的人工智能水平，人机交互能力与运动规划能力随人工智能水平提高，有望实现更加复杂的应用场景。

表20：人形机器人应用场景

按人类基本需求分类				按照工作性质分类	
食	住	行	陪伴	从事体力劳动	从事服务工作
进行烹饪，北京冬奥会中烹饪机器人已替代厨师	整理家务，替代家政人员服务	提供“跑腿”服务，替代外卖员，甚至驾驶载具	与用户进行交流，替代社区工作者/心理医生	进行组装、搬运、等劳动，但与工业机器人不同，人形机器人能执行非标准任务	在餐厅、酒店等场景为客户提供服务，替代服务员

资料来源：《机器人产业发展规划 2021》，安信证券研究中心

刚性服务场景是当前需要解决的重要问题。我们将人形机器人与日常使用的扫地机器人对比可以发现，扫地机器人之所以可以迅速落地，是因为它们可以在现实生活中找到与之完全匹配替代的成熟产品，且该产品具有明显弊端，而扫地机器人可以显著地解决其弊端。例如，过去的吸尘器产品可以帮助人们将灰尘更简单地清理出来，但却离不开人的操作。而扫地机器人在帮助人们清理灰尘的同时减少了人们的参与，因此形成了对吸尘器的完美替代，同时由于其所需工艺技巧尚不复杂，研发成本较低促使了其可以快速实现市场化的普及。

图66. 扫地机器人和吸尘器产品



资料来源：石头扫地机器人官网，奥克斯官网，安信证券研究中心

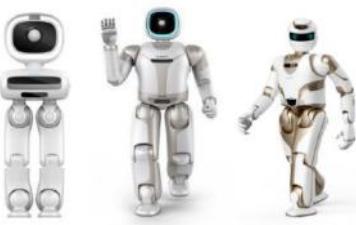
表21：扫地机器人与吸尘器对比

扫地机器人		吸尘器
核心功能	扫地	扫地
需要人类参与程度	95% (基本无人参与)	30% (需要人参与)
价格	1000-4000 元不等	200-500 元不等
使用频率	一天一次	一天一次
智能程度	95%	30%

资料来源：头豹研究院，安信证券研究中心

当前人形机器人应用场景仍偏教育、展览等，工业场景有望率先落地。目前，人形机器人的开发程度和功能完整性尚不完全，缺乏可完全替代的丰富的刚性应用场景需求。我们对比波士顿动力、优必选、特斯拉人形机器人主要的应用场景可以看出，目前主要集中于家庭服务、商业导览接待服务、搜救搬运等领域。由于性能未完全开发及智能水平较低，许多工作人形机器人尚缺乏完全替代效益，例如家庭服务板块人形机器人尚未拥有可完全替代现有日常用品功能的能力，商业导览接待领域人形机器人尚不能对客户所提出的所有问题进行解答，而搜救领域缺乏实地搜救场景和经验的考察应用，人们、一般企业和市场对其接受度和需求性较低，因此人形机器人目前在服务领域多用于科研教育或者商业展览、展示等场景，以期普及作用。与此同时，我们也可以看出，目前人形机器人企业亦在探索工业场景的应用，比如 Tesla bot 首批量产机器人有望投向其超级工厂，优必选亦计划与天奇股份合作探索人形机器人在新能源汽车、3C 电子、智慧物流等工业场景的应用。我们认为人形机器人有望优先在工业场景率先落地，与工业机器人类似，可以实现人力替代降低工厂生产成本，同时完成工业机器人无法执行的非标准及灵活运动的动作。

表22：波士顿动力Atlas、优必选Walker、特斯拉Optimus人形机器人应用场景

	特征	功能	未来应用场景
波士顿动力Atlas	 <p>身高: 1.5m 体重: 89kg 28 个液压关节 速度: 2.5m/s</p>	在各种地形行走; 跳跃; 后空翻以及后空翻并旋转 180 度; 跳过障碍; 倒立空翻旋转; 舞蹈+跑酷; 搬运传递抛掷货	室外和建筑物内作业 执行搜索和救灾任务 演示机器人舞蹈
优必选 Walker 系列	 <p>Walker 一代: 身高: 1.45m 体重: 77kg 36 个自由度 伸展状态单臂负载 1.5kg Walker X: 身高: 1.3m 体重: 63kg 41 个自由度 最大行走速度 3m/s 伸展状态单臂负载 1.5kg</p>	复杂地形灵活性走; 自平衡调解，适应干扰; 手眼协调操作; 全身柔韧性，安全交互; U-SLAM 导航避障; 人脸/物体/场景识别; 多模态交互; 智能家居控制	Walker 一代: 家庭服务 商业服务（客服、接待、来访人员信息收集、剪彩颁奖主持等） 科研开发 Walker X: 商业服务类（科技展馆、影视综艺、商演活动、政企展厅）；科研开发 新能源汽车、3C 电子、智慧物流等工厂

特斯拉 Optimus



身高: 1.72m
 体重: 73kg
 超 200 个自由度
 可负重 9kg 物品

基本灵活直立行走;
 弹跳;
 周边环境感知;
 简单手指关节抓取任务;
 力量控制;
 双手完成部分复杂任务, 如物品
 分类

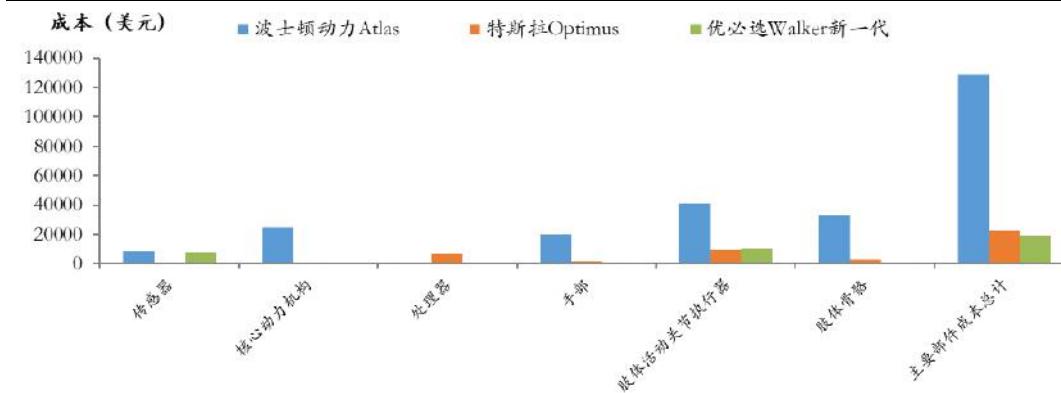
商业领域的导览接待;
 特殊环境下的搜救搬运;
 家庭服务;
 特斯拉工厂;

资料来源: 波士顿动力官网、优必选官网、特斯拉官网、安信证券研究中心

2、“用得起”：较高的制造成本制约商业化，设备规模化降本空间大

人形机器人制造成本尚高，量产后的设备降价空间大。规模化降本带动售价下降，将有望促进市场化进程。例如新能源汽车的发展，除了补贴以外，新能源车企亦逐步调低其销售价格促进规模的增长。当前人形机器人由于较高的制造成本，整体售价未能达到商业化的要求。参考之前的测算结果，横向对比主流人形机器人，我们可看出特斯拉 Optimus 具有市场化潜力的关键在于其成本可控制在约 2.2 万美元，远低于波士顿动力 Atlas 约 12.9 万美元的成本，与优必选 Walker 约 1.9 万美元的成本可同台竞争。若能进一步下探到 2 万美元以下，竞争优势将更加明显。若特斯拉成功实现其降本目标，则有可能成为人形机器人行业的首个实现大规模量产并商业化的项目。

图67. 扫地机器人和吸尘器产品



资料来源: 波士顿动力, 特斯拉, 优必选, 安信证券研究中心

大规模量产情形下，核心零部件降本空间大。硬件目前占据绝大部分成本，但规模的提升会有效降低成本实现规模效应，因此随着技术的升级，以及一定的量产出现，硬件成本将有效带动整体制造成本的下降，促进售价逐步合理化，达到吸引市场购买行为的水平。

3、行业标准及规范的构建，将助力产业有序成长。

人形机器人处于初期研发阶段，标准构建将促进产业有序、快速成长。2023年1月，国家工信部等十七部门关于印发《“机器人+”应用行动实施方案》的通知，到2025年，制造业机器人密度较2020年实现翻番，服务机器人、特种机器人行业应用深度和广度显著提升，政策明确引导机器人产业发展，同时重点强调开展标准的构建：①行业机器人应用工艺流程和专用算法模型、融合设备接口、应用数据安全、人机交互安全等标准的研制与推广；②针对特定行业准入要求，加强机器人特殊安全要求和检测方法标准研究；③开展机器人新产品通用技术规范、模块化设计与制造、应用安全与可靠性等标准化工作；④推进机器人新兴技术领域专有安全基础标准、产品标准、方法标准等标准化工作。⑤研究制定机器人伦理相关标准规范。⑥推动机器人应用标准国际化合作。统一的行业标准尚还需要继续探索，但政策明确鼓励人形机器人研发公司跨行业标准互采并研究制定行业标准，将有效助力行业形成有序、正向循环，加快实现模块化、标准化、规模化的生产。

3.2. 市场化展望：有望复制新能源汽车及智能手机发展历程

类似新能源汽车及智能手机，机器人有望迎来快速增长阶段。复盘新能源汽车及智能手机，可以看出标志性的产品、技术难点的攻克、产品性能的提升、销售价格的下降均是促进产业链快速发展的重要契机。人形机器人处于初期研发阶段，未来有望走向成本导向型时代。较低的成本往往带来递增的消费积极性，且伴随未来人形机器人智能化水平和性能的提升加之越来越多的企业发展了刚性应用场景，人形机器人会更加稳定且更多的参与到日常生活服务中，人们对人形机器人的需求也会得到大幅度的增加，人形机器人将有可能成为往后改变人类生活的爆款产品。

特斯拉的 Optimus 有望带领人形机器人行业迎来“IPHONE 时刻”。以较低的成本满足消费者绝大部分的需求，进而促进产业的转型提升。由于人形机器人高冗余度设计，使其可以像智能手机一样不断更新换代，从而不断满足客户各种不同场景的应用需求。我们期待特斯拉 Optimus 产品凭借特斯拉强大的软件技术团队以及其新能源汽车供应链及核心技术的赋能，将有望成为人形机器人中重要的标志性产品，率先实现量产，助力行业进入高速增长阶段。

表23：智能手机/新能源汽车/人形机器人发展历程类比

	年份	-2000	2000-2003	2004-2006	2007	2008-2009	2010	2011-2014	2015-至今
智能手机发展象限	阶段/事件	手机市场以功能机为主	智能 PDA 手机出现，但价格高，操作难，未能普及	谷歌、苹果等企业在该赛道发力，从软件和硬件层面加快研发	IPHONE 时刻：IPHONE 一代发布	IPHONE 在全球范围内掀起智能手机热潮，安卓阵营不甘示弱	联发科时刻：联发科方案让 ANDROID 机成本降低 2/3	市场呈现低端山寨机，中端国产机，高端旗舰机混战状态	华为、小米、OPPO 等走向高端化，国产品牌逐步获得市场认可
	相关产品	诺基亚功能机	摩托罗拉 A6188		IPHONE 一代	IPHONE3G/3GS、IPHONE4、HTC G1	智能手机平台 MT6573		华为 MATE40、小米 12ULTRA
新能源汽车发展象限	年份	-1991	1991-2003	2004-2011	2012	2013-2014	2014	2015-2016	2017-至今
	阶段/事件	市场以燃油车为主	实验或小批量生产纯电动汽车	ELON MUSK 向特斯拉注资收购股权，研制市场化车型	特斯拉 MODEL S 上市	新能源车获得舆论和市场关注，已有技术储备的企业研发新能源车型	比亚迪 E6、帝豪新能源在补贴后价格下探到十万元左右	资本集中布局新能源车企，传统车企加速布局新能源，造车新势力入场	比亚迪、吉利推出高端车型，“蔚小理”新势力均以中高端车型主打市场
人形机器人发展象限	相关产品	大众、奔驰、宝马传统主机厂车型	通用 EV1、特斯拉 ROADSTER		特斯拉 MODEL S	比亚迪 E6 (政府与出租车公司采购)	比亚迪 E6、吉利帝豪新能源		比亚迪唐、汉、吉利领克、蔚来 ES8、小鹏 P7
	年份	-2000	2000-2013	2014-2021	2022	2022-2025	2026 左右	2027-2030	2030-未来
	阶段/事件	低智能人形机器人时代，产品以体现人形外在为主	ATLAS、ASIMO 等高端研发用途智能人形机器人出现	波士顿动力等公司持续研发，吸引资本看到人形机器人发展机会	特斯拉发布 OPTIMUS 机器人	特斯拉 OPTIMUS 引起资本与舆论关注，人形机器人市场扩张	国产厂商推出低成本解决方案，人形机器人 OEM 化	高中低端人形机器人混战，高产品力厂商脱颖而出	国产人形机器人产品获得国内外认可，走向高端定位
	相关产品	西屋公司 TELEVOX	波士顿动力 ATLAS、本田 ASIMO	新一代波士顿动力 ATLAS、优必选 WALKER	特斯拉 OPTIMUS	特斯拉迭代产品	潜力国产厂家提供解决方案	国产厂家迭代人形机器人产品	国产厂家高端人形机器人产品

资料来源：特斯拉，通用，Wikipedia，安信证券研究中心

3.3. 国内主流人形机器人公司尚未盈利，等待盈亏平衡点

我们选取国内领先的人形机器人企业优必选、达闼科技进行比较分析，可以发现国内人形机器人企业尚未盈利，处于高研发高投入阶段。

优必选成立于2012年，致力于人形机器人的研发以及智能服务机器人解决方案的设计。凭借雄厚的技术基础和科研能力，优必选在真人尺寸人形机器人的研发中占据领先地位，是中国首家推出商业化双足真人尺寸人形机器人的企业。2021年，优必选在中国教育机器人解决方案市场中占有率达到20.1%。优必选旗下人形机器人产品有：Walker系列，Alpha系列，熊猫机器人。优必选曾计划2019年于A股上市，后转而寻求港股上市。2023年1月底，优必选正式向港交所提交招股说明书，有望成为中国“人形机器人第一股”。

达闼科技成立于2015年，致力于云端机器人的研发和产业化应用。达闼作为全球领先的云端机器人创造者、制造商和运营商，已拥有超1600项专利申请，在云端机器人领域专利数全球第一。目前，达闼云端机器人产品与解决方案已广泛应用于公共卫生、智慧农业、智慧医养、公共安全、智慧教育、智慧城市、商业零售等领域。达闼旗下人形机器人产品有：Cloud Pepper，Cloud Ginger系列。达闼科技曾计划2019年于纽交所上市，2023年3月转而寻求于港股上市，目前尚未递交招股说明书。

图68. 优必选旗下人形机器人 Walker X



资料来源：优必选，安信证券研究中心

图69. 达闼科技旗下人形机器人 Ginger XR-1



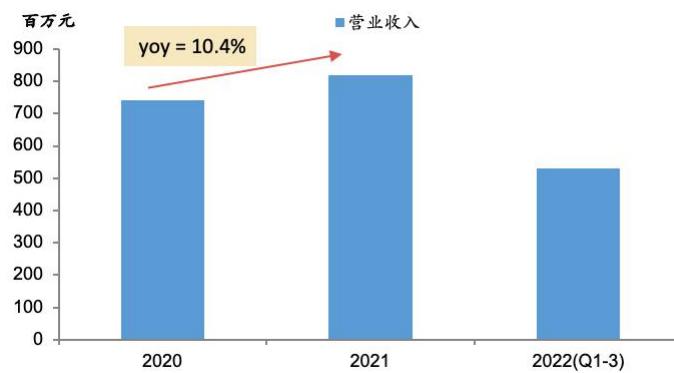
资料来源：达闼，安信证券研究中心

优必选、达闼科技营收规模增长潜力大。

2020年至2022年，各地学校受疫情影响大面积暂停线下课程，优必选主打产品教育机器人受到冲击，销量两年均有所下滑。与此同时，优必选针对疫情形势推出的防疫型ADIBOT、防疫型Cruzer等机器人都受到市场青睐，销量增长迅速，故2020-2021年总营业收入有小幅增长。此外，优必选于2022年首次售出一台最新款产品Walker X，未来实现量产将有巨大销售潜力。

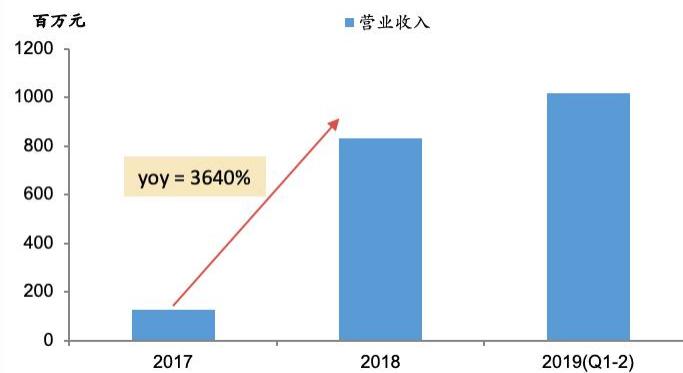
2018年，达闼科技推出首款云端机器人Cloud Pepper，市场反响强烈，达闼旗下智能设备、机器人销量与云AI业务营收均迅猛增长。2019年，达闼科技发布新款云端服务型机器人Cloud Ginger XR-1，但由于消费者尚未完全接纳服务型机器人，机器人销量未见明显增长。由于云AI业务维持高速增长趋势，达闼科技总营业收入仍迅速增长。预期随着市场对服务型机器人接受度的提升，未来达闼科技旗下机器人将充分发挥其潜力。

图70. 优必选 2020-2022 年营业收入



资料来源: Wind, 安信证券研究中心

图71. 达闼科技 2017-2019 年营业收入



资料来源: Wind, 安信证券研究中心

费用控制能力有待提升, 研发费用率维持高水平, 依靠销量提升扭亏为盈。

2020-2022 年间, 优必选由于疫情冲击, 毛利率较高的小型教育机器人 Alpha 系列销量减少, 毛利率较低的大型防疫、物流机器人销量增加, 导致整体毛利率由 44.7% 小幅下滑至 30.8%。预期疫情冲击结束后教育机器人市场将回暖, 优必选毛利率将有所回升。由于面向一般消费者的机器人市场仍处于起步阶段, 优必选在营销工作中投入大量资金, 因此销售费用率、管理费用率较高。为维持技术领先地位、研发费用率亦居高不下, 导致净利率始终为负。预期未来市场进入成熟期后, 销售费用率、管理费用率将得以缩减, 加之销量上升摊薄费用, 优必选将迅速实现扭亏为盈。

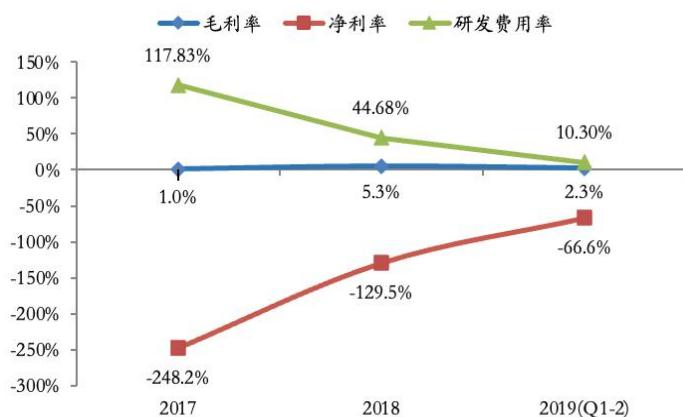
2017-2019 年间, 达闼科技毛利率始终较低, 导致三年内增收不增利, 亟需加强成本控制。达闼科技净利率始终为负, 但由于营业收入激增摊薄费用, 三年间净利率有所上升。与优必选类似, 为维持技术领先地位, 达闼科技研发费用较高、研发人员数量庞大, 占公司总员工数的 67.5%。2019 年, 由于研发进程的周期性以及研究器材的价格回落, 研发费用率有所下降。随着人形机器人零部件成本降低以及销量进一步攀升, 未来达闼科技有望实现盈利。

图72. 2020 至 2022 年优必选利润率与研发费用率



资料来源: Wind, 安信证券研究中心

图73. 2017 至 2019 年达闼科技利润率与研发费用率



资料来源: Wind, 安信证券研究中心

4. 相关受益企业

根据我们的成本分析, 执行器中占比较高的部件主要是电机、丝杠、减速器相关部分, 建议关注以下标的:

执行器：【拓普集团】、【三花智控】。
 空心杯电机：【鸣志电器】、【鼎智科技】。
 无框力矩电机：【步科股份】、【昊志机电】、【禾川科技】、【汇川技术】。
 滚珠丝杠：【秦川机床】、【江苏雷利】、【鼎智科技】、【恒立液压】、【贝斯特】。
 谐波减速器：【绿的谐波】、【双环传动】。
 行星减速器：【中大力德】、【通力科技】。

表24：相关企业估值表

类型	证券代码	证券简称	最新市值 (亿元)	归母净利润 (亿元)				PE			
				2023/6/29	2022A	2023E	2024E	2025E	2022A	2023E	2024E
执行器	601689.SH	拓普集团	835.68	17.00	23.47	32.74	43.95	51	36	26	19
	002050.SZ	三花智控	1070.08	25.73	31.25	38.65	46.95	43	34	28	23
减速器	688017.SH	绿的谐波	262.62	1.55	2.47	3.41	4.56	179	106	77	58
	000837.SZ	秦川机床	150.11	2.75	3.42	4.55	5.77	49	44	33	26
	002472.SZ	双环传动	290.16	5.82	8.02	10.50	13.47	47	36	28	22
	002896.SZ	中大力德	67.72	0.66	0.99	1.49	1.88	93	68	45	36
	300403.SZ	汉宇集团	54.93	2.04	2.39	2.68	3.19	27	23	21	17
	603915.SH	国茂股份	135.83	4.14	5.31	6.65	8.06	33	26	20	17
	301255.SZ	通力科技	46.74	0.97	—	—	—	47	—	—	—
	002164.SZ	宁波东力	34.27	3.28	—	—	—	10	—	—	—
	003021.SZ	兆威机电	136.59	1.50	2.20	3.08	6.30	93	62	44	22
电机	300124.SZ	汇川技术	1683.44	43.20	53.44	69.97	84.84	39	31	24	20
	300503.SZ	昊志机电	48.08	0.22	—	—	—	189	—	—	—
	688160.SH	步科股份	65.51	0.91	1.15	1.49	1.92	63	57	44	34
	688320.SH	禾川科技	64.98	0.90	1.72	2.52	3.15	79	38	26	21
	603728.SH	鸣志电器	301.77	2.47	4.04	6.08	8.41	128	75	50	36
力学传感器	002079.SZ	苏州固锝	108.34	3.71	3.07	3.72	—	32	35	29	—
	603662.SH	柯力传感	100.21	2.60	3.62	4.43	5.52	40	28	23	18
	300007.SZ	汉威科技	68.19	2.76	3.44	4.24	5.03	25	20	16	14
编码器	002338.SZ	奥普光电	96.05	0.82	2.02	2.85	4.00	119	48	34	24
行星滚柱丝杠/滚珠丝杠	300660.SZ	江苏雷利	120.63	2.59	3.51	4.63	5.57	47	34	26	22
	000837.SZ	秦川机床	150.11	2.75	3.42	4.55	5.77	49	44	33	26
	873593.BJ	鼎智科技	68.00	1.01	1.33	1.76	2.32	67	51	39	29
	300580.SZ	贝斯特	77.83	2.29	2.68	3.41	4.20	35	29	23	19
	601100.SH	恒立液压	844.05	23.43	27.09	32.50	38.96	38	31	26	22
伺服驱动	300124.SZ	汇川技术	1683.44	43.20	53.44	69.97	84.84	39	31	24	20
	688320.SH	禾川科技	64.98	0.90	1.72	2.52	3.15	79	38	26	21
	688698.SH	伟创电气	70.30	1.40	2.01	2.79	3.69	51	35	25	19
电机永磁材料	000970.SZ	中科三环	147.10	8.48	8.71	10.64	11.98	17	17	14	12
运动处理器	688981.SH	中芯国际	2144.04	121.33	57.36	82.51	109.39	33	37	26	20
动力电池	300750.SZ	宁德时代	9869.68	307.29	459.74	613.41	793.21	32	21	16	12
	300014.SZ	亿纬锂能	1189.59	35.09	61.31	92.01	121.58	34	19	13	10
	002594.SZ	比亚迪	7267.85	166.22	269.70	376.07	491.93	47	27	19	15
摄像头传感器	603501.SH	韦尔股份	1155.40	9.90	23.09	35.44	45.72	120	50	33	25
	603005.SH	晶方科技	129.73	2.28	3.70	5.28	6.48	60	35	25	20
毫米波雷达	600741.SH	华城汽车	578.84	72.03	77.26	87.41	95.93	8	7	7	6
	002920.SZ	德赛西威	815.59	11.84	16.07	21.97	28.39	75	51	37	29
显示屏幕	600703.SH	三安光电	843.14	6.85	15.85	22.21	27.44	123	53	38	31

资料来源：Wind, 安信证券研究中心（所有盈利预测均来自Wind一致预期）

5. 风险提示

- 1) **机器人推广不及预期。**目前人形机器人的推广会受到技术、用户接受度、成本和可行性等多方面的影响，商业化进度具有不确定性，可能对上游企业的发展产生不利影响。
- 2) **市场竞争加剧。**人形机器人未来商业价值显著，正处于持续投入、激烈竞争阶段，随着行业新入者的威胁加剧，或企业投入持续加大，各公司将面对更大的压力。
- 3) **产品迭代不及预期。**人形机器人对于研发技术更新迭代的要求较高，但技术挑战或用户需求变化等因素可能导致技术迭代的不确定性，如果技术更新进展达不到预期，可能会阻碍相关进程的发展。
- 4) **政策风险。**考虑到人形机器人对于社会的潜在影响，该行业可能会受到某些保護政策的限制，从而发展进度滞后。此外，由于国内外行业发展速度不同产生的贸易壁垒也会对公司造成一定的不利影响。
- 5) **测算具有主观性。**本报告基于一定假设进行预测，与客观环境可能有所差异，仅供参考。

目 行业评级体系 ■■■

收益评级：

领先大市 —— 未来 6 个月的投资收益率领先沪深 300 指数 10% 及以上；

同步大市 —— 未来 6 个月的投资收益率与沪深 300 指数的变动幅度相差 -10% 至 10%；

落后大市 —— 未来 6 个月的投资收益率落后沪深 300 指数 10% 及以上；

风险评级：

A —— 正常风险，未来 6 个月的投资收益率的波动小于等于沪深 300 指数波动；

B —— 较高风险，未来 6 个月的投资收益率的波动大于沪深 300 指数波动；

目 分析师声明 ■■■

本报告署名分析师声明，本人具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格，勤勉尽责、诚实守信。本人对本报告的内容和观点负责，保证信息来源合法合规、研究方法专业审慎、研究观点独立公正、分析结论具有合理依据，特此声明。

目 本公司具备证券投资咨询业务资格的说明 ■■■

安信证券股份有限公司（以下简称“本公司”）经中国证券监督管理委员会核准，取得证券投资咨询业务许可。本公司及其投资咨询人员可以为证券投资人或客户提供证券投资分析、预测或者建议等直接或间接的有偿咨询服务。发布证券研究报告，是证券投资咨询业务的一种基本形式，本公司可以对证券及证券相关产品的价值、市场走势或者相关影响因素进行分析，形成证券估值、投资评级等投资分析意见，制作证券研究报告，并向本公司的客户发布。

目 免责声明 ■■■

。本公司不会因为任何机构或个人接收到本报告而视其为本公司的当然客户。
本报告基于已公开的资料或信息撰写，但本公司不保证该等信息及资料的完整性、准确性。本报告所载的信息、资料、建议及推测仅反映本公司于本报告发布当日的判断，本报告中的证券或投资标的价格、价值及投资带来的收入可能会波动。在不同时期，本公司可能撰写并发布与本报告所载资料、建议及推测不一致的报告。本公司不保证本报告所含信息及资料保持在最新状态，本公司将随时补充、更新和修订有关信息及资料，但不保证及时公开发布。同时，本公司有权对本报告所含信息在不发出通知的情形下做出修改，投资者应当自行关注相应的更新或修改。任何有关本报告的摘要或节选都不代表本报告正式完整的观点，一切须以本公司向客户发布的本报告完整版本为准，如有需要，客户可以向本公司投资顾问进一步咨询。

在法律许可的情况下，本公司及所属关联机构可能会持有报告中提到的公司所发行的证券或期权并进行证券或期权交易，也可能为这些公司提供或者争取提供投资银行、财务顾问或者金融产品等服务，提请客户充分注意。客户不应将本报告为作出其投资决策的唯一参考因素，亦不应认为本报告可以取代客户自身的投资判断与决策。在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见均不构成对任何人的投资建议，无论是否已经明示或暗示，本报告不能作为道义的、责任的和法律的依据或者凭证。在任何情况下，本公司亦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。

本报告版权仅为本公司所有，未经事先书面许可，任何机构和个人不得以任何形式翻版、复制、发表、转发或引用本报告的任何部分。如征得本公司同意进行引用、刊发的，需在允许的范围内使用，并注明出处为“安信证券股份有限公司研究中心”，且不得对本报告进行任何有悖原意的引用、删节和修改。

本报告的估值结果和分析结论是基于所预定的假设，并采用适当的估值方法和模型得出的，由于假设、估值方法和模型均存在一定的局限性，估值结果和分析结论也存在局限性，请谨慎使用。

安信证券股份有限公司对本声明条款具有唯一修改权和最终解释权。

安信证券研究中心

深圳市

地 址： 深圳市福田区福华一路 19 号安信金融大厦 33 楼
邮 编： 518026

上海市

地 址： 上海市虹口区东大名路 638 号国投大厦 3 层
邮 编： 200080

北京市

地 址： 北京市西城区阜成门北大街 2 号国投金融大厦 15 层
邮 编： 100034