

灵巧手与传感器，拟人化与智能化

——人形机器人系列报告

核心观点

- **灵巧手是人形机器人“小脑”实现灵巧操作、人机交互的重要载体，向高集成度和智能化发展。**灵巧手是一种高度灵活、复杂的末端执行器，在机器人与环境交互中起关键作用。灵巧手因其能够模仿人手的各种灵巧抓持和复杂操作能力，广泛应用于航空航天、医疗、智能制造等领域。根据 Statista 数据，2021 年全球机器人灵巧手市场规模约为 11.6 亿美元，预计在 2030 年增长至 30.35 亿美元，2022-2030 年间 CAGR 为 10.9%。
- **空心杯电机是灵巧手的核心部件，国产替代空间广阔。**空心杯电机是一种特殊的直流电机，采用无铁芯转子性能优异，是电机领域“皇冠上的明珠”。按换向方式分为无刷空心杯电机和有刷空心杯电机，前者寿命和转速优于后者，未来更偏向无刷空心杯电机。欧洲主导中高端市场，国内厂商仍在追赶，根据 QR Research 预测，到 2028 年空心杯电机全球市场将达到 83 亿元。空心杯电机在线圈设计、绕制工艺以及绕制设备三个方面存在高技术壁垒，相关设备厂商国产化替代有望加速。考虑到特斯拉人形机器人未来逐步放量，我们对不同情景进行测算，当特斯拉人形机器人产量达到 50 万、100 万、200 万台时，全球空心杯电机市场空间可能分别新增 48 亿元、84 亿元、144 亿元。
- **传感器是人形机器人感知系统的核心部件，是灵巧手智能化的基础。**特斯拉 Optimus Gen2 人形机器人采用 11 自由度灵巧手和手指触觉传感器，响应更快，要实现捏鸡蛋的操作需要用到多种传感器的技术支撑，包括压力感知、触力感知和柔性微压力感知等。1) 六维力/力矩传感器：应用于人形机器人的手腕处和脚腕处，其中六维联合加载设备是高精度六维力传感器研发和生产的必要条件。根据 GII 预测，2027 年中国六维力/力矩传感器市场规模将超过 15 亿元。2) 柔性触觉传感器/电子皮肤：能够实现与环境接触力、温度、湿度、震动、材质、软硬等特性的检测，是机器人直接感知环境作用的重要传感器。其关键技术包括：材料技术、加工技术、结构设计及扩展、高柔性和多功能。3) MEMS 压力传感器：具有易于批量生产、小型化、成本效益以及易于制造复杂结构的能力等优势，例如 Superior Sensor Technology 的 MEMS 压力传感器集成了包括先进的数字滤波、闭环控制和基于软件的压力开关等先进的功能，可提供精确的运动控制和灵活的物体操纵能力所需的基本内部扭矩和力的反馈。

投资建议与投资标的

灵巧手是人形机器人“小脑”实现灵巧操作、人机交互的重要载体，其中传感器作为灵巧手智能化的基础，是推动人形机器人深度融入人类生活生产的重要器件。2024 年人形机器人有望迎来小批量生产，大产业趋势下中长期维度看，我们认为除了由中国制造赋能硬件端所带来的持续降本趋势，产业链可能还具备潜在的抗通缩环节，如智能化水平的提升离不开传感器的广泛使用。因此我们看好人形机器人的产业趋势，看好灵巧手和传感器的发展，建议关注产业链相关公司：东华测试(300354，未评级)、康斯特(300445，未评级)、柯力传感(603662，未评级)、田中精机(300461，未评级)、万讯自控(300112，未评级)、瀚川智能(688022，未评级)等；军工组：芯动联科(688582，未评级)、高华科技(688539，未评级)等；新能源组：鸣志电器(603728，未评级)、鼎智科技(873593，未评级)、伟创电气(688698，未评级)等；汽车组：凌云股份(600480，未评级)、华依科技(688071，未评级)、华培动力(603121，未评级)等；电子组：汉威科技(300007，未评级)、敏芯股份(688286，未评级)、安培龙(301413，未评级)等；轻工组：福莱新材(605488，未评级)等。

风险提示：下游需求不及预期；人形机器人进展不及预期；国产替代进程不及预期；行业竞争加剧；假设条件变化影响测算结果。

行业评级

看好（维持）

国家/地区

中国

行业

机械设备行业

报告发布日期

2024 年 01 月 21 日



证券分析师

王天一

021-63325888*6126

wangtianyi@orientsec.com.cn

执业证书编号：S0860510120021

杨震

021-63325888*6090

yangzhen@orientsec.com.cn

执业证书编号：S0860520060002

香港证监会牌照：BSW113

丁昊

dinghao@orientsec.com.cn

执业证书编号：S0860522080002

联系人

刘嘉倩

liujiaqian@orientsec.com.cn

相关报告

政策与产业趋势共振，人形机器人产业化 2024-01-06

有望提速：——机械行业周报

精密减速器：国产替代有望提速，人形机器人 2023-12-20

旋转传动的重要纽带：——人形机器人系列报告

复苏可见，海外可期，新兴可为：——机 2023-11-22

械行业 2024 年度投资策略

人形机器人：国内蓝图开启，国产厂商有 2023-11-03

望突围

丝杠：核心传动部件，人形机器人开启成 2023-10-25

长空间：——人形机器人系列报告

目录

1. 灵巧手：向高集成度和智能化发展	7
1.1 灵巧手简介	7
1.2 灵巧手：2030 年全球市场规模约为 30.35 亿美元	9
1.2.1 部分国内灵巧手简介	11
1.2.2 部分海外灵巧手简介	13
2. 空心杯电机：灵巧手核心部件，国产替代空间广阔	13
2.1 简介：空心杯电机性能优异，是电机领域“皇冠上的明珠”	13
2.2 格局：欧洲主导中高端市场，国内厂商仍在追赶	15
2.3 设备：绕线技术成高壁垒，国产化替代有望加速	17
2.4 增量：人形机器人放量在即，有望给空心杯电机带来百亿增长空间	19
3. 传感器：感知系统的核心部件，灵巧手智能化的基础	23
3.1 传感器是人形机器人感知系统的核心部件	23
3.2 特斯拉 Optimus Gen2，为何选择“捏鸡蛋”？	24
3.3 六维力/力矩传感器	26
3.4 柔性触觉传感器/电子皮肤	32
3.5 MEMS 压力传感器	34
4. 相关标的介绍	37
4.1 鸣志电器：世界级运动控制制造商，空心杯电机领跑同行	37
4.2 鼎智科技：微特电机“小巨人”，积极布局空心杯电机和行星滚柱丝杠	38
4.3 伟创电气：工控出海先行者，积极布局机器人领域	39
4.4 田中精机：国内精密绕线设备领导者，空心杯电机绕组设备供应商	39
4.5 汉威科技：国内气体传感器龙头，子公司积极拓展柔性微纳传感器应用场景	40
4.6 柯力传感：国内应变式传感器龙头，多维力传感器处于开发试制阶段	41
4.7 康斯特：高端校准检测设备龙头，引领高精度传感器国产替代	41
4.8 敏芯股份：MEMS 传感器全产业链发展，积极布局六维力矩传感器	42
4.9 万讯自控：自动化仪表引领者，积极布局高端传感器与机器人	43
4.10 东华测试：结构力学测试仪器龙头，力传感器技术领先	44
4.11 凌云股份：汽车管路行业龙头，揭榜人形机器人研发项目	44
4.12 福莱新材：国内功能性涂布复合材料领军者，子公司积极布局电子皮肤	45
4.13 华依科技：汽车动力总成测试龙头，惯导开启增长新引擎	46
4.14 华培动力：汽车总成业务先进企业，拓宽汽车传感器业务版图	46
4.15 瀚川智能：国内智能制造装备领军企业，子公司积极布局六维传感器	47
4.16 芯动联科：MEMS 惯性传感器龙头，国产替代领军者	48

4.17 安培龙：国内陶瓷传感器龙头，积极拓展 MEMS 传感器	48
4.18 高华科技：高可靠传感器标杆龙头，军民双轮共驱成长	49
5. 投资建议	50
6. 风险提示	50

图表目录

图 1: 灵巧手早期典型代表.....	7
图 2: 机器人多指灵巧手分类.....	8
图 3: 2021-2030E 年全球机器人灵巧手市场规模预测（单位：百万美元）.....	9
图 4: 2021-2030E 年全球机器人灵巧手市场容量预测（单位：万只）.....	10
图 5: 主动型肌电假肢手的典型构成组件示意图.....	10
图 6: TRX-Hand 外观图.....	11
图 7: 因时机器人灵巧手 RH56BFX/RH56DFX 系列外观图.....	12
图 8: 智元机器人 SkillHand 灵巧手外观图.....	12
图 9: 帕西尼感知科技-基于视触觉双模态模型控制架构.....	12
图 10: DLR-HIT Hand II 灵巧手外观图.....	13
图 11: SVH 灵巧手外观图.....	13
图 12: 有刷空心杯电机结构图（转子无铁芯）.....	14
图 13: 无刷空心杯电机结构图（定子无铁芯）.....	14
图 14: 空心杯电机下游应用.....	15
图 15: 2022-2028 全球空心杯电机市场规模预测（单位：亿美元）.....	15
图 16: 2021-2028 中国空心杯电机市场规模预测（单位：亿美元）.....	15
图 17: 2021 年全球空心杯电机市场占比.....	15
图 18: 2028 年全球空心杯电机市场占比预测.....	15
图 19: 2021-2028 全球空心杯电机行业细分市场份额占比.....	16
图 20: 三种空心杯电机线圈绕制模型和实物图.....	17
图 21: 绕卷式空心杯和工艺流程图.....	18
图 22: 一次成型绕线过程.....	18
图 23: 绕线机机械结构.....	19
图 24: 特斯拉人形机器人发展历程图.....	19
图 25: 2026-2030 年全球及中国人形机器人行业市场规模预测(单位：亿美元).....	20
图 26: 2023 年人形机器人核心零部件价值量分布图预测.....	20
图 27: 2030 年人形机器人核心零部件价值量分布图预测.....	20
图 28: 特斯拉人形机器人共 52 个自由度.....	21
图 29: 特斯拉人形机器人采用的旋转和线性执行器示意图.....	21
图 30: 特斯拉人形机器人采用的灵巧手示意图.....	22
图 31: 传感器是人形机器人感知系统的核心部件.....	23
图 32: 人形机器人捏鸡蛋.....	24
图 33: 一维、三维、六维力传感器工作示意图.....	26
图 34: 六维力传感器安装部位.....	26

图 35：一维/六维联合加载标定示意图.....	29
图 36：美国和德国的六维力传感器标定及检测设备示意图	29
图 37：全球六维力/力矩传感器主流厂商	30
图 38：2022 年中国六维力/力矩传感器市场竞争格局（按销量划分）	30
图 39：2017-2027 年中国六维力传感器机器人行业销量及预测（单位：套）	30
图 40：2017-2027 年中国六维力传感器机器人行业市场规模及预测（单位：百万元）	30
图 41：六维力/力矩传感器在人形机器人领域的应用场景	31
图 42：柔性触觉传感器	32
图 43：全柔性触觉压力传感器	32
图 44：2017-2022 年中国柔性触觉传感器行业市场规模及区域分布（单位：亿元）	34
图 45：2017-2022 年世界柔性触觉传感器行业市场规模（单位：亿美元）、需求量（单位：亿个）、均价（单位：亿元/个）	34
图 46：监控人体肌肉运动	34
图 47：MEMS 传感器及局部显微放大	35
图 48：MEMS 电阻式压力传感器	35
图 49：MEMS 电容式压力传感器	35
图 50：2023 年 MEMS 压力传感器应用领域占比	35
图 51：2023E 和 2028E 年 MEMS 压力传感器世界市场规模（单位：亿美元）	36
图 52：集成柔性压力传感器阵列的机械手	36
图 53：鸣志电器 2018-2022 年主营业务分产品收入（亿元）	38
图 54：鸣志电器 2018-2022 年主营业务分产品毛利率（%）	38
图 55：鼎智科技 2018-2022 年主营业务分产品收入（亿元）	39
图 56：鼎智科技 2018-2022 年主营业务分产品毛利率（%）	39
图 57：伟创电气 2018-2022 年主营业务分产品收入（亿元）	39
图 58：伟创电气 2018-2022 年主营业务分产品毛利率（%）	39
图 59：田中精机 2018-2022 年主营业务分产品收入（亿元）	40
图 60：田中精机 2018-2022 年主营业务分产品毛利率（%）	40
图 61：汉威科技 2018-2022 年主营业务分产品收入（亿元）	40
图 62：汉威科技 2018-2022 年主营业务分产品毛利率（%）	40
图 63：柯力传感 2018-2022 年主营业务分产品收入（亿元）	41
图 64：柯力传感 2018-2022 年主营业务分产品毛利率（%）	41
图 65：康斯特 2018-2022 年主营业务分产品收入（亿元）	42
图 66：康斯特 2018-2022 年主营业务分产品毛利率（%）	42
图 67：敏芯股份 2018-2022 年主营业务分产品收入（亿元）	42
图 68：敏芯股份 2018-2022 年主营业务分产品毛利率（%）	42
图 69：万讯自控 2018-2022 年主营业务分产品收入（亿元）	43
图 70：万讯自控 2018-2022 年主营业务分产品毛利率（%）	43
图 71：东华测试 2018-2022 年营业收入和归母净利润（亿元）及增速（%）	44

有关分析师的申明，见本报告最后部分。其他重要信息披露见分析师申明之后部分，或请与您的投资代表联系。并阅读本证券研究报告最后一页的免责声明。

图 72: 东华测试 2018-2022 年销售毛利率和销售净利率 (%)	44
图 73: 凌云股份 2018-2022 年主营业务分产品收入 (亿元)	45
图 74: 凌云股份 2018-2022 年主营业务分产品毛利率 (%)	45
图 75: 福莱新材 2018-2022 年主营业务分产品收入 (亿元)	45
图 76: 福莱新材 2018-2022 年主营业务分产品毛利率 (%)	45
图 77: 华依科技 2018-2022 年主营业务分产品收入 (亿元)	46
图 78: 华依科技 2018-2022 年主营业务分产品毛利率 (%)	46
图 79: 华培动力 2018-2022 年主营业务分产品收入 (亿元)	47
图 80: 华培动力 2018-2022 年主营业务分产品毛利率 (%)	47
图 81: 瀚川智能 2018-2022 年主营业务分产品收入 (亿元)	47
图 82: 瀚川智能 2018-2022 年主营业务分产品毛利率 (%)	47
图 83: 芯动联科 2019-2022 年主营业务分产品收入 (亿元)	48
图 84: 芯动联科 2019-2022 年主营业务分产品毛利率 (%)	48
图 85: 安培龙 2018-2022 年主营业务分产品收入 (亿元)	49
图 86: 安培龙 2018-2022 年主营业务分产品毛利率 (%)	49
图 87: 高华科技 2019-2022 年主营业务分产品收入 (亿元)	49
图 88: 高华科技 2019-2022 年主营业务分产品毛利率 (%)	49
表 1: 机器人灵巧手发展历史	7
表 2: 灵巧手结构形式对比 (按照结构形式分类)	8
表 3: 灵巧手驱动方式对比 (按驱动方式分类)	9
表 4: 传统直流电机与空心杯电机性能对比	14
表 5: 有刷空心杯电机与无刷空心杯电机对比	14
表 6: 国内外空心杯电机主要供应商	16
表 7: 中国人形机器人行业核心零部件国产替代空间对比和部分代表企业	20
表 8: 特斯拉人形机器人灵巧手的参数	22
表 9: 特斯拉人形机器人不同产量下的空心杯电机新增市场空间的测算	23
表 10: 机器人的常用传感器	23
表 11: 与人相对应的传感系统	24
表 12: 六维力传感器主要作用及功能	27
表 13: 六维力传感器分类及代表企业	27
表 14: 六维力/力矩传感器海内外部分企业产品准度对比	28
表 15: 六维力/力矩传感器在人形机器人领域的应用场景	31
表 16: 柔性触觉传感器分类	32
表 17: 鸣志电器公司下游应用领域及终端产品	37
表 18: 鼎智科技公司主营产品系列及其主要应用行业情况	38

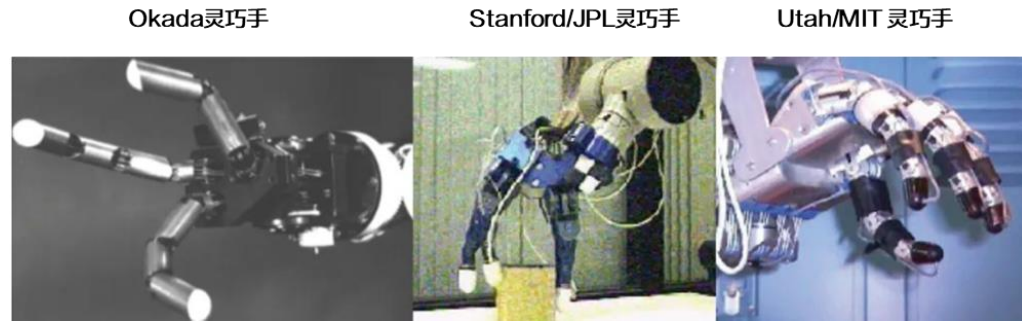
1.灵巧手：向高集成度和智能化发展

1.1 灵巧手简介

机器人灵巧手作为一种新型的末端执行器，在机器人与环境的交互中起着关键作用。自 20 世纪 70 年代起，国内外对灵巧手展开了大量研究，从三指到五指，从工业到生活，从简单的抓取到灵巧操作，以期解决复杂的实际作业问题。灵巧手是为多任务而研究开发的一种智能型通用机械手，灵巧的抓取是任务操作的先决条件。灵巧指的是手的姿势可变性，这种可变性越高，则认为手就越灵巧。机器人灵巧手从结构和功能上参考人手，能够灵活操作对象，实现对物体的灵活抓取，满足多种工作需求。

机器人多指灵巧手的研究始于 20 世纪 70 年代。早期灵巧手多采用腱驱动系统与电机驱动，以日本“电子技术实验室”的 Okada 灵巧手、美国斯坦福大学的 Stanford/JPL 灵巧手、美国麻省理工学院和犹他大学联合研制的 Utah/MIT 灵巧手作为该领域研究初始阶段的典型代表，为后续仿人型多指灵巧手研究建立了理论基础。20 世纪末，随着嵌入式硬件的发展，多指灵巧手的研究向着高系统集成度和丰富的感知能力提升的方向发展，进入了快速发展阶段。如德国宇航中心先后研制的 DLR-I 和 DLR-II 灵巧手，共集成了 25 个传感器，包括类似人工皮肤的触觉传感器、关节扭矩传感器、位置传感器和温度传感器等，使灵巧手在灵活性和感知能力方面都有显著提升。多指灵巧手高系统集成度的灵巧手具有灵活性和功能性的优势，但是复杂的系统导致了高额的制造成本并且降低了系统的可靠性和易维护性。因此近 10 年，多指灵巧手设计的一个重要方向是简化系统与提高鲁棒性。手的研究向着高系统集成度和丰富的感知能力提升的方向发展，进入了快速发展阶段。

图 1：灵巧手早期典型代表



数据来源：小米技术公众号，东方证券研究所

表 1：机器人灵巧手发展历史

年代	灵巧手	指数	自由度	驱动	传动	传感	结构
20 世纪 70 年代	Okada 手 (1974, 日本)	3	11	电机	腱	电机/关节位置、电机电流	外置
20 世纪 80 年代	Utah/MIT 手 (1983, 美国)	4	16	气缸	腱	电机/关节位置、张力、触觉	外置
	Stanford 手 (1983, 美国)	3	9	电机	腱	电机位置、张力、指尖力、指尖触觉	外置
	Barret 手 (1988, 美国)	3	4	电机	齿轮	电机位置、关节力矩	内置
	UB II 手 (1992, 意大利)	3	11	电机	腱	关节位置、触觉	外置

有关分析师的申明，见本报告最后部分。其他重要信息披露见分析师申明之后部分，或请与您的投资代表联系。并请阅读本证券研究报告最后一页的免责申明。

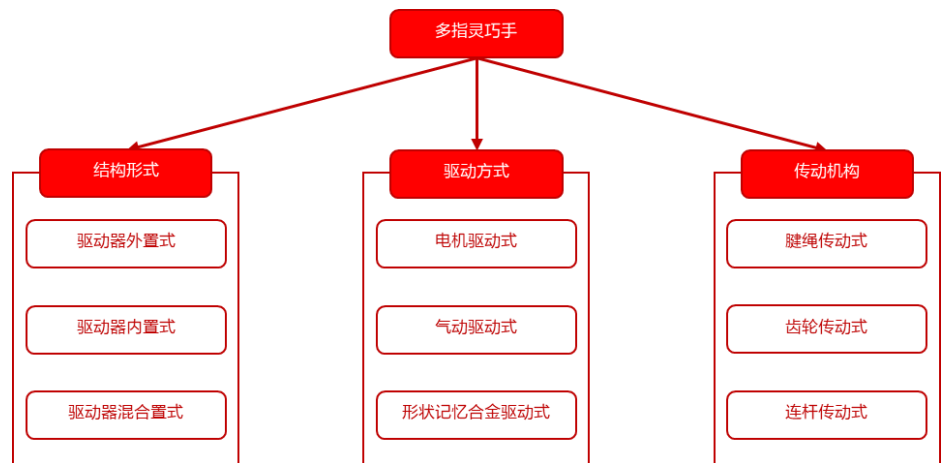
20 世纪 90 年代	DLR I 手 (1998, 德国)	4	12	直线电机	腱	电机/关节位置、指尖力	外置
	NASA 多指灵巧手 (1999, 美国)	5	14	电机	腱	电机/关节位置、张力、触觉	外置
20 世纪初	DLR II (2000, 德国)	4	13	电机	齿形皮带	电机/关节位置、6 维指尖力	内置
	东大的快速手 (2003, 日本)	3	8	电机	齿轮	电机位置、指尖力/力矩、触觉、视觉	内置
	HIT/DLR II (2008, 中国、德国)	5	15	电机	齿形皮带	电机/关节位置、关节力矩、6 维指尖力、触觉	内置

数据来源：刘伊威等《机器人灵巧手的研究与发展》，东方证券研究所

灵巧手种类繁多，可根据结构形式、驱动方式、传动机构进行分类。

- 1) 灵巧手按照结构形式分类可分为驱动器内置式、驱动器外置式与驱动器混合制式。早期机器人驱动器的尺寸较大，故驱动器外置式应用较多。随着工艺的发展与驱动器尺寸的减小，驱动器逐渐走向内置式与混合制式，在保证手指自由度的同时尽量实现体积大小可控。
- 2) 灵巧手按驱动方式分类可分为电机驱动式、气动驱动式与形状记忆合金驱动式。电机驱动具有驱动力大，控制精度高、响应快等优点，但电机体积较大且市场很难匹配到通用电机是目前的发展瓶颈；气动驱动成本较低，但存在刚度低、动态性能差等性能缺陷；形状记忆合金驱动式的驱动速度快，但合金寿命有限，不能长期使用。
- 3) 灵巧手按照传动机构分类可分为腱绳传动式、齿轮驱动式与连杆驱动式。腱绳传动结构简单、控制灵活但控制精度不高、抓取力不足；齿轮驱动式可以实现高控制精度，但结构复杂，成本较高；连杆驱动式能够抓取大型的物体且结构设计紧凑，但是在远距离的控制上就比较困难，抓取的空间较小。

图 2：机器人多指灵巧手分类



数据来源：众星智能官网，东方证券研究所

表 2：灵巧手结构形式对比（按照结构形式分类）

结构形式	优点	缺点	应用
驱动器外置	驱动器选型自由，不用考虑体积空间	传感器不能反应关节信息，控制器难度大；标定难，非模块化设计，可维护性差	Stanford/JPL
驱动器内置	手指各关节刚性较好，更利	通信和控制难度加大，手指尺	HIT/DLR - II

有关分析师的申明，见本报告最后部分。其他重要信息披露见分析师申明之后部分，或请与您的投资代表联系。并请阅读本证券研究报告最后一页的免责申明。

	于传感器的直接测量，且模块化设计利于更换维护。	寸及灵巧手整手尺寸较大，关节灵活度下降	
驱动器混合置式	保证较高自由度的同时，控制体积大小	技术难度高	RoboRay

数据来源：众星智能官网，东方证券研究所

表 3：灵巧手驱动方式对比（按驱动方式分类）

驱动方式	优点	缺点	应用
电机驱动	驱动力大，控制精度高、响应快、模块化设计、易于更换维护	电机本身固有的体积较大	主流驱动方式，如特斯拉 Optimal 所用灵巧手
气动驱动	易于控制、能量储存方便、柔性好	其刚度低、动态性能差	上海交大联合 MIT 开发的气动灵巧手
形状记忆合金驱动	驱动速度快、负载能力强	存在疲劳和寿命问题	中国计量大学基于 SMA 驱动的中国三指灵巧手

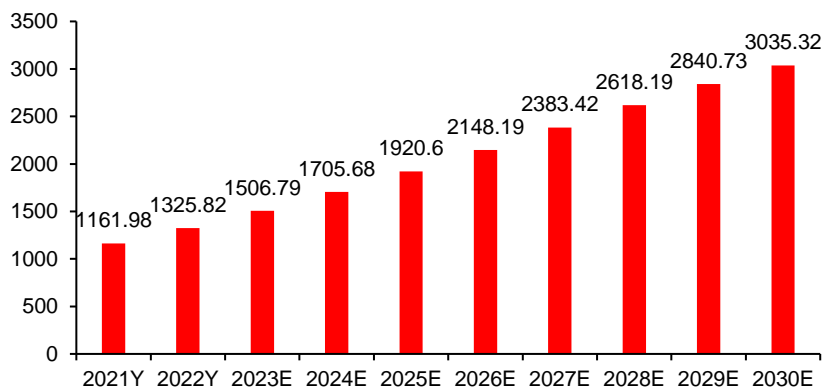
数据来源：众星智能官网，东方证券研究所

电机驱动是目前最主流的机器人灵巧手驱动方式，空心杯电机大放异彩。综合看各种灵巧手驱动方式，电机驱动因其驱动力大，控制精度高、响应快、模块化设计、易于更换维护等优异性能成为市场主流。而面对电机本身固有体积较大的缺点目前行业主流的解决方案是采用尺寸更小的空心杯电机。HIT/DLR II 灵巧手使用的是扁平无刷空心杯电机，Shadow 灵巧手使用的是有刷电机 Maxon 118608，国产因时机器人灵巧手内部有 6 个集成了无刷空心杯电机的微型伺服电机缸作为动力来源。虽然特斯拉机器人灵巧手使用空心杯电机暂未公布型号，**但无刷空心杯电机具有高寿命、高效能、高转速等优势，是未来发展趋势。**

1.2 灵巧手：2030 年全球市场规模约为 30.35 亿美元

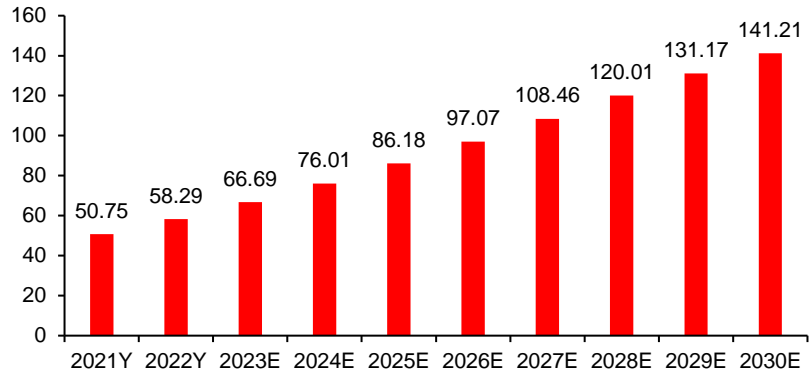
根据 Statista 预测，全球机器人灵巧手 2021 年市场规模约为 11.6 亿美元。随着工业自动化、航空航天、医疗保健等行业对灵巧手需求的不断增加与技术进步对灵巧手的降本效应，灵巧手市场规模有望不断增加。根据 Statista 的预测数据，全球机器人灵巧手市场规模将由 2021 年的 11.6 亿美元增长至 2030 年的 30.35 亿美元，2022-2030 年间 CAGR 为 10.9%。同时，全球机器人灵巧手市场容量将由 2021 年的 50.75 万只增长到 2030 年的 141.21 万只，2022-2030 年间 CAGR 为 11.7%。

图 3：2021-2030E 年全球机器人灵巧手市场规模预测（单位：百万美元）



数据来源：Statista, 东方证券研究所

图 4：2021-2030E 年全球机器人灵巧手市场容量预测（单位：万只）



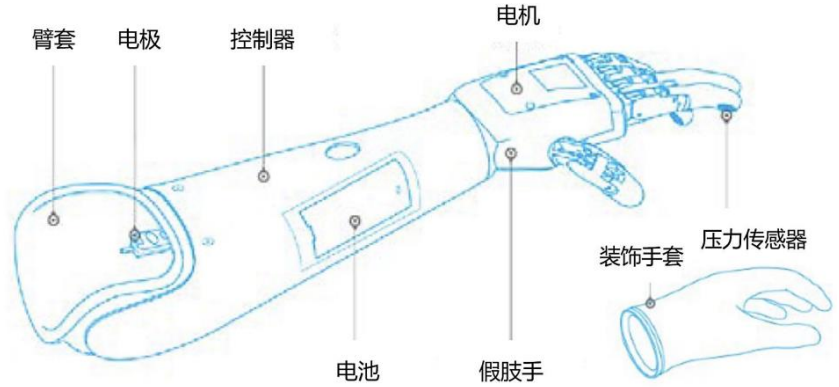
数据来源：Statista, 东方证券研究所

灵巧手目前主要应用在航空航天、医疗、智能制造等领域。如执行航天飞行器的舱外任务、仿生假肢和远程手术、拼装流水线上小尺寸零件等。随着近年来人形机器人技术的突飞猛进，人形机器人用灵巧手有望成为灵巧手未来的主流应用领域。

航天领域：外太空具有超低温、高压、无氧、强辐射等不利于宇航员工作的环境特点，**这时灵巧手就能较好地帮助宇航员完成一些机械性的舱外活动**，如移除和安装多层绝缘材料、操作太空行走工具、样品收集和实验、航天器外部维修等。目前比较成功的案例有美国 NASA（美国航空航天局）的 Robonaut 手和 Robonaut2 手、德国 DLR（德国宇航中心）的 DLR-I 和 DLR-II 手等。DEXHAND 应能够抓住掌握太空行走(EVA)工具，并支持它们的操作：如钳子、剪刀、小型切割器、刷子、锤子、铲子、切割器、缆绳(多个)、内六角扳手和手枪握持的自动螺丝刀（并支持其扳机切换机制）。

医疗领域：灵巧手在医疗领域主要用在仿生假肢手方面。截肢患者特别是上肢残疾患者，因为手部的丧失中断了大脑等中枢神经系统与环境互动的通路。而假肢手的使用能有效地补偿丧失的运动控制和感觉反馈功能，是残疾人康复和功能恢复中的重要手段。目前市售假肢手根据动力来源可分为被动型和主动型两大类，随着假肢技术的发展，仿生主动型假肢手逐渐成为主流。目前市售的高自由度、高性能仿生假肢手，通常使用基于模式识别的控制系统，来实现多自由度假肢手关节的运动控制例如 Ottobock 公司的 SensorHand Speed、Bebionic 和 Michelangelo 假肢手，Open Bionics 公司的 Hero Arm 等。而使用者对于使用舒适度的要求，也将可穿戴式、轻量化以及提供具有高具身认知感的触觉反馈作为了仿生假肢手发展的方向。

图 5：主动型肌电假肢手的典型构成组件示意图



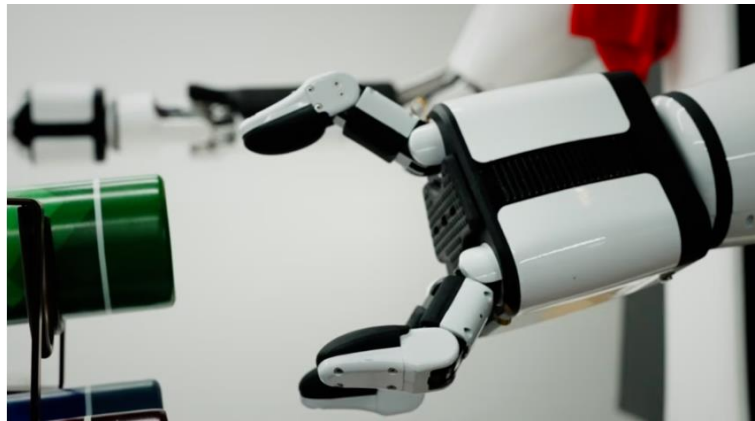
数据来源：高兆龙《仿生假肢手抓握运动中的控制及电触觉反馈方法研究》，东方证券研究所

1.2.1 部分国内灵巧手简介

(1) 腾讯 TRX-Hand 灵巧手

腾讯 Robotics X 实验室于 2023 年 4 月 25 日推出自研机器人灵巧手 TRX-Hand 和机械臂 TRX-Arm。灵巧手 TRX-Hand 拥有像人手一样灵活的操作能力，可适应不同场景，灵活规划动作，自主完成操作。在运动能力上，得益于创新的刚柔混合驱动专利技术和自研高功率密度驱动器 TRX-Hand 兼具高灵巧和高负载速度的特性，拥有 8 个可独立控制关节，自重仅 1.16 千克，最大持续指尖力可达 15 牛，最大关节速度不低于 600 度每秒，可轻松应对不同形状尺寸物体的抓取和操作，对高动态的抛接动作也游刃有余。在感知能力上，灵巧手在指尖、指腹和掌面均覆盖了自研的高灵敏度柔性触觉传感器阵列，掌心处安装有微型激光雷达和接近传感器，同时每一个关节均集成了角度传感器，保证灵巧手在抓取和操作过程中能准确地感知自身与物体状态信息。

图 6：TRX-Hand 外观图

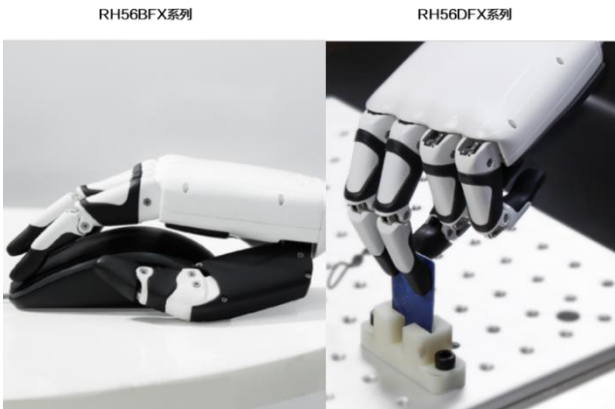


数据来源：腾讯 RoboticsX 实验室公众号，东方证券研究所

(2) 因时机器人灵巧手：RH56BFX/RH56DFX 系列

因时机器人仿人五指灵巧手采用创新型直线驱动设计，具有 6 个自由度和 12 个运动关节，结合力位混合控制算法，可以模拟人手实现精准的抓取操作。其中 RH56BFX 系列灵巧手又称钢琴手，速度快、抓握力稍小，集成力传感器，适用于弹钢琴及手势交互等场景；RH56DFX 系列灵巧手抓握力大，速度适中，适用于机器人或假肢的抓取操作。二者都支持 ROS，可提供 ROS 插件。两款产品适用于人形机器人、协作机器人、医疗机器人、特种机器人及假肢等，可在迎宾接待、无人零售、楼宇服务、家庭服务、助老助残、特种应用等多种应用场景使用。

图 7：因时机器人灵巧手 RH56BFX/RH56DFX 系列外观图



数据来源：因时机器人官网，东方证券研究所

图 8：智元机器人 SkillHand 灵巧手外观图



数据来源：新智元公众号，东方证券研究所

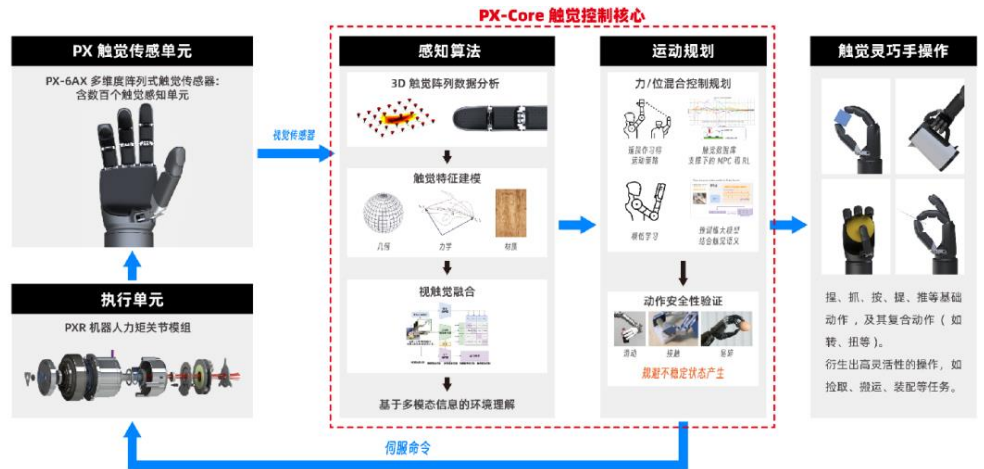
(3) 智元机器人 SkillHand 灵巧手

智元机器人是 2023 年 2 月创立的专注于打造智能机器人与应用场景的高科技企业，于 2023 年 8 月正式发布智能机器人“远征 A1”。该机器人使用了智元自研的 SkillHand 灵巧手，拥有 12 个主动自由度，5 个被动自由度，所有驱动内置。SkillHand 的指尖集成了基于视觉的指尖传感器，可以分辨操作物的颜色、形状、材质，而且可以基于算法的数据融合，做到近似触觉的压力传感器的效果。同时，该灵巧手创新的指尖传感器视觉闭环的设计，可以实现末端的视觉闭环，降低了对于整机电机的精度需求。

(4) 帕西尼 DexH5 灵巧手

帕西尼 DexH5 灵巧手拥有 0.01N 高精度力控和 5KG 高负载能力和三段手指结构和高还原仿人手弯曲角度。帕西尼感知科技专注于多维触觉传感技术的突破和创新，在国内首家落地多维多阵列触觉传感器，通过多维度触觉和机器人技术的深度融合，赋予机器人人体般灵敏的多维感知能力，使机器人能在更复杂、柔性的工作环境里，精准、安全、高效地执行任务，广泛应用于特种环境、制造业、物流、医疗、家政等领域。

图 9：帕西尼感知科技-基于视触觉双模态模型控制架构



数据来源：帕西尼，东方证券研究所

1.2.2 部分海外灵巧手简介

(1) DLR-HIT Hand II(德国&中国)

DLR-HIT Hand II 灵巧手是德国宇航局和哈尔滨工业大学合作开发的科研性质灵巧手。该灵巧手采用高度仿生设计，手指模块化设计带来独立的手指和手掌运动，具备极佳的灵巧性，多种传感器的运用（角度、力矩，指尖力及阵列触觉传感器）给予了机械手良好的反馈能力。此外，该灵巧手秉承 DLR 一贯的风格，具有高度机电系统集成化的特点——所有的电机、减速箱、机械传动结构、传感器、驱动电路都集成在人手大小的系统中。

图 10: DLR-HIT Hand II 灵巧手外观图



数据来源：小米技术公众号，东方证券研究所

图 11: SVH 灵巧手外观图



数据来源：Schunk 公司官网，东方证券研究所

(2) Schunk 公司 SVH 灵巧手(德国)

SVH 灵巧手是德国 Schunk 公司开发的五指伺服电动灵巧手产品。SVH 灵巧手采用高度仿生设计，高度集成化，能够实现绝大部分人手的运动。SVH 灵巧手具有极其紧凑的设计，将完整的控制、调节器和电力电子设备集成在灵巧手手腕上。此外用户可自定义灵巧手的接口，可轻松连接市场标准的工业和轻型机器人。并且，SVH 灵巧手时能耗低，适合移动应用领域。

2.空心杯电机：灵巧手核心部件，国产替代空间广阔

2.1 简介：空心杯电机性能优异，是电机领域“皇冠上的明珠”

空心杯电机是一种特殊的直流电机，在结构上突破了传统直流电机的结构形式。传统直流电机由定子和转子两大核心部分组成，直流电机运行时静止不动的部分称为定子，定子的主要作用是产生磁场，由机座、主磁极、换向极、端盖、轴承和电刷装置等组成。运行时转动的部分称为转子，其主要作用是产生电磁转矩和感应电动势，是直流电机进行能量转换的枢纽。空心杯电机在结构上突破了传统直流电机的结构形式，采用的是无铁芯转子，其电机绕组为空心杯线圈，形状类似水杯，因此被称为“空心杯电机”。

采用无铁芯转子，空心杯电机性能优异。与传统直流电机相比，空心杯电机首先具备节能特性，由于无铁芯设计彻底消除了由于铁芯形成涡流而造成的电能损耗，能量转换效率很高，其最大效率一般在 70%以上，部分产品可达到 90%以上（铁芯电动机一般在 70%）。同时具备控制特性，其启动、制动迅速，响应极快，机械时间常数通常只有十几个毫秒（铁芯电动机一般在 100 毫秒

有关分析师的申明，见本报告最后部分。其他重要信息披露见分析师申明之后部分，或请与您的投资代表联系。并请阅读本证券研究报告最后一页的免责申明。

以上)；在推荐运行区域内的高速运转状态下，可以方便地对转速进行灵敏的调节。此外还有拖动特性，即运行稳定性十分可靠，转速的波动很小，作为微型电动机其转速波动能够容易的控制 在 2%以内；以及轻量化特性，与同等功率的铁芯电动机相比，其重量、体积减轻 1/3-1/2，能量密度大幅度提高。

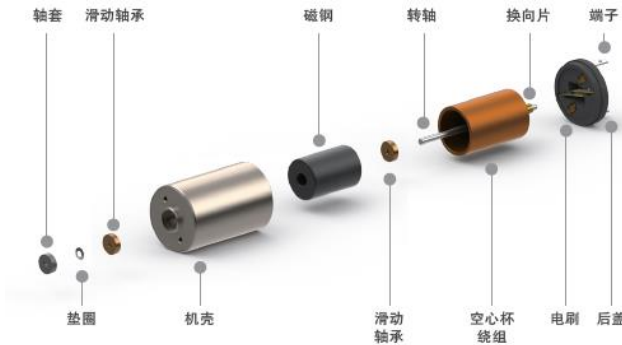
表 4: 传统直流电机与空心杯电机性能对比

性能	传统直流电机	空心杯电机
能效	50%左右	80%以上
转速	5000rpm 以下	10000rpm 左右，最高可达 16000rpm
响应速度	慢，机械时间常数 100 毫秒以上	快，机械时间常数只有十几毫秒
运行稳定性	一般	非常平稳
寿命	几百小时	1000-3000 小时

数据来源：陈安《空心杯电机定制化管理的应用研究》，东方证券研究所

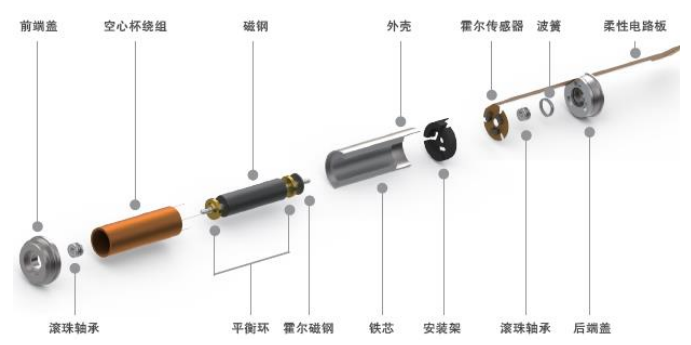
按换向方式分类，空心杯电机可分为有刷空心杯电机与无刷空心杯电机两大类。有刷电机采用机械换向，随着电机旋转，电刷沿着换向器滑动，产生动态的磁场，但也由于电刷和换向器存在相对滑动，容易损耗。无刷空心杯电机：又名无刷无齿槽电机，其定子部分使用空心杯绕组，采用无齿槽铁芯设计。该型电机具有传统直流无刷电机高转速、长寿命、低噪音的特性，又兼具有刷空心杯电机高功率密度、高效率的优势。无刷空心杯电机需要搭配电机驱动器，实现驱动控制；有刷空心杯电机电流控制即可。无刷空心杯电机寿命、转速优于有刷空心杯电机，从发展趋势上看，未来更偏向无刷空心杯电机。

图 12: 有刷空心杯电机结构图（转子无铁芯）



数据来源：鸣志电器官网，东方证券研究所

图 13: 无刷空心杯电机结构图（定子无铁芯）



数据来源：鸣志电器官网，东方证券研究所

表 5: 有刷空心杯电机与无刷空心杯电机对比

项目	无刷空心杯电机	有刷空心杯电机
寿命	长寿命 (10000h+)	电机寿命受限 (1000-3000h)
转速	高转速	低转速
电磁干扰	可忽略	有电火花
铁损	有	无
控制	需要驱动控制	控制简单

数据来源：电机通微信公众号，东方证券研究所

有关分析师的申明，见本报告最后部分。其他重要信息披露见分析师申明之后部分，或请与您的投资代表联系。并请阅读本证券研究报告最后一页的免责申明。

受益于优良的性能，空心杯电机下游应用场景广泛。在产业链方面，空心杯电机属于微特电机，上游原材料与微特电机原材料类似，包括铜、钢材、磁钢、轴承、塑料等。空心杯电机由于响应快、能耗低等优良性能，最初被应用于航空、航天、军事等高端产业；最近也在医疗装置、消费类电子产品、工业自动化、测绘等民用领域拓展新应用场景。

图 14：空心杯电机下游应用



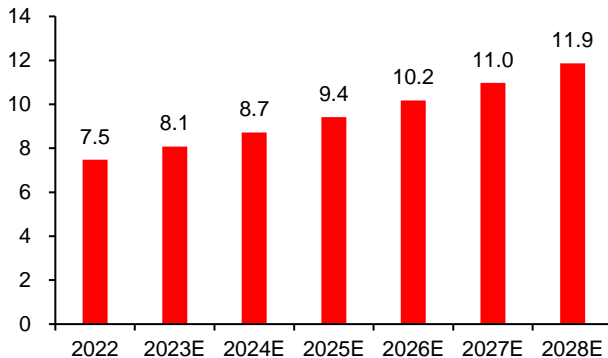
数据来源：鸣志电器官网，东方证券研究所

2.2 格局：欧洲主导中高端市场，国内厂商仍在追赶

空心杯电机产业蓬勃发展，QY RESEARCH 预计至 2028 年全球市场将达到 83 亿元。随着工业技术飞速发展及下游需求不断增加，全球空心杯电机行业市场规模持续不断扩大。根据 QY RESEARCH 的预测数据，2022 年全球空心杯电机行业市场规模预计为 7.48 亿美元，预计 2028 年市场规模将达到 11.9 亿美元，2022-2028 年 CAGR 约 7.98%。

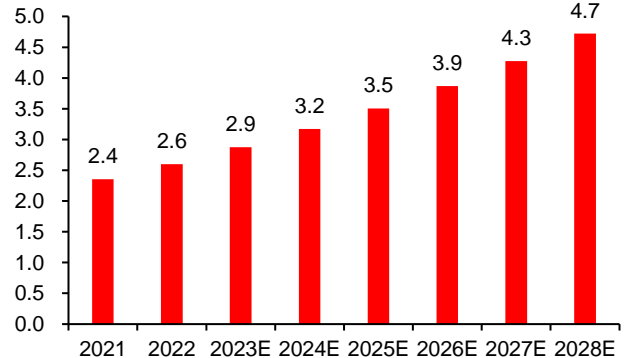
中国空心杯电机市场占全球份额持续提升，QY RESEARCH 预计至 2028 年提升至 40%。中国是全球最大的空心杯电机市场，发展前景广阔。根据 QY Research 的预测数据，中国 2021 年空心杯电机市场为 2.36 亿美元，占全球份额 34.8%，并预测 2028 年中国市场规模达到 4.7 亿美元，占全球份额 39.8%。2022-2028 年 CAGR 约 10.44%。

图 15：2022-2028 全球空心杯电机市场规模预测（单位：亿美元）



数据来源：QR Research，东方证券研究所

图 16：2021-2028 中国空心杯电机市场规模预测（单位：亿美元）



数据来源：QR Research，东方证券研究所

图 17：2021 年全球空心杯电机市场占比

图 18：2028 年全球空心杯电机市场占比预测

有关分析师的申明，见本报告最后部分。其他重要信息披露见分析师申明之后部分，或请与您的投资代表联系。并请阅读本证券研究报告最后一页的免责申明。

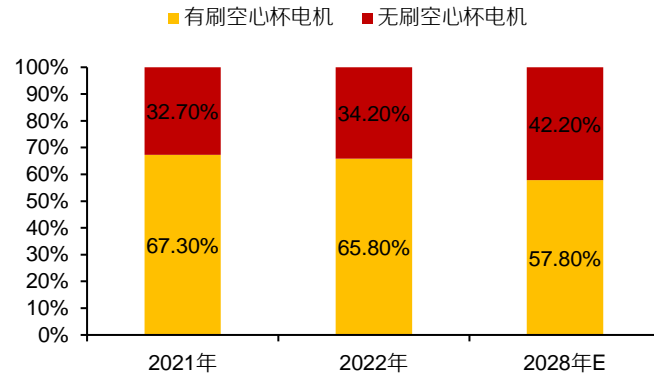


数据来源: QR Research, 东方证券研究所

数据来源: QR Research, 东方证券研究所

分产品类别看，无刷空心杯电机占比持续提升。2022 年全球有刷空心杯电机市场规模 4.92 亿美元，占比 65.8%，无刷空心杯电机市场规模 2.56 亿美元，占比 34.2%。无刷空心杯电机寿命、转速、可靠性等性能均优于有刷空心杯电机，但需要搭配电机驱动器实现驱动控制。目前由于驱动器价格较高，市场份额不及有刷电机。但随着电子控制技术的发展与普及，驱动器的价格有望降低，无刷空心杯电机的市场份额将会持续提升。根据观研报告网的预测，至 2028 年无刷空心杯电机的市场份额将上升至 42.2%。

图 19: 2021-2028 全球空心杯电机行业细分市场占比



数据来源: 观研报告网, 东方证券研究所

欧洲老牌龙头企业主导全球市场，全球 CR3 占 55.43% 的市场份额。空心杯电机起源于德国和日本，德国、瑞典、日本和其他欧洲厂商起步较早，现已具备完整成熟的工艺和性能优良的设备。目前全球主要的空心杯电机厂商有德国的 Faulhaber（福尔哈贝），瑞士的 Maxon Motor、Portescap，美国的 Allied Motion Technologies（艾莱德摩斯）等。根据 QY Research 的数据，2021 年全球前三大厂商占据空心杯电机市场 55.43% 的市场份额，市场集中度较高。海外厂商如德国 Faulhaber 和瑞士的 Maxon 等企业深耕行业多年，行业地位较高，且掌握了大批量生产的核心工艺。国内厂商如鸣志电器、鼎智科技等通过本土化的销售战略逐渐打开国内市场，但核心技术与海外老牌龙头企业比仍有差距。

表 6: 国内外空心杯电机主要供应商

公司名称	注册地	主要产品种类	应用领域
Maxon	瑞士	电机、DC 电机、无刷 DC 电机、齿轮箱、传感器、控制电子系统等	工业自动化、医疗技术、安全技术、仪器仪表、通讯技术、日用消费等等
Faulhaber	德国	编码器、微型电机、伺服电机、减速箱、减速机	医疗及实验设备、仪器仪表、工人自动化及机器人、工业机械及

有关分析师的申明，见本报告最后部分。其他重要信息披露见分析师申明之后部分，或请与您的投资代表联系。并请阅读本证券研究报告最后一页的免责申明。

		等	设备、办公、安全及通讯设备、宇航及国防、光学、声频及视频产品、环境及保健、模型火车、赛车、航模及优质成型等
Portescap	瑞典	直流无刷电机、直流有刷电机、步电机、配件	医疗设备、自动化、航空航天、工业机械、汽车和消费类电子等
Allied Motion	美国	直流无刷电机、有刷电机、步进电机、伺服电机、减速器和电子控制器	航空航天、国防、汽车、商业、太空、工业自动化、医疗设备、图像和打印、泵、半导体设备等
鸣志电器	中国	步进电机、无刷电机、伺服电机、空心杯电机、驱动器、控制器等	运动控制、智能 LED 照明控制和工业设备管理等
鼎智科技		线性执行器、混合式步进电机、音圈电机以及智能驱控器等	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等
江苏雷利		微型步进电机、同步电机、直流有刷电机、直流无刷电机、微型水泵多种电机产品等	家用电器、汽车零部件、工业、运动健康等
伟创电气		变频器、伺服系统以及控制系统、空心杯电机、无框电机、光伏储能逆变器、手术动力系统	重工、轻工、高端装备、机器人、新能源、医疗等
雷赛智能		伺服系统、步进系统、可编程运动控制器	电子制造装备（含 3C、半导体、锂电、光伏设备）、特种机床、喷绘印刷设备、纺织服装设备、物流装备、工业机器人、医疗健康装备等

数据来源：各公司官网，东方证券研究所

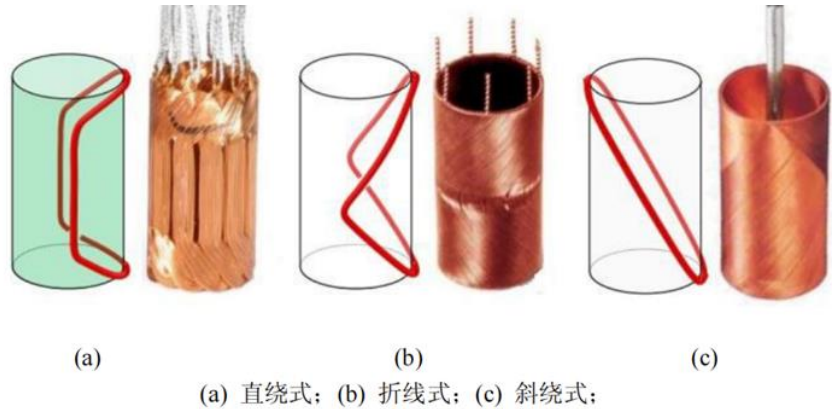
2.3 设备：绕线技术成高壁垒，国产化替代有望加速

受限于材料设备、本体设计、驱动配置等方面，国内厂商相比海外龙头仍有差距。材料方面，国外企业具有先进的加工镀膜工艺与更扎实的电机材料理论研究，使得电机材料丰富多样，可应用于抗腐蚀、抗高温、抗辐射等专业领域。并且国外企业具有先进的加工镀膜工艺与更扎实的电机材料理论研究，使得电机材料丰富多样，可应用于抗腐蚀、抗高温、抗辐射等专业领域。本体设计方面，国外企业小尺寸电机设计能力强，直径最小尺寸可至 6mm，而国内企业少有 12mm 以下尺寸的空心杯电机产品，且输出特性不如外企产品。驱动配置方面，Faulhaber 具备上千种方案进行驱动配置，由于未形成体系化的正向理论设计流程，多以仿制为主，电机配置方面很难根据实际需求的变化进行定制化设计，也是国内发展的劣势。然而，国内厂商也在加大研发投入，加紧攻破技术壁垒与技术封锁，有望在未来追赶上海外龙头的制造水平。

空心杯电机的一个核心技术在于电机绕组。导线粗细、绕组匝数的不同，使得绕组电阻值，启动电流以及速度常数等电机参数存在较大的差异。电机绕组是电机的重要组成部分，绕组的质量决定了空心杯电机的质量，直接影响到电机可靠性和运行性。具体分为**线圈设计、绕制工艺以及绕制设备**三个方面。

壁垒 1：线圈设计各有不同。直绕式由于受其自身工艺的影响，往往用于线圈匝数要求较少的绕制；而斜绕式和马鞍式是当前国外先进空心杯电机厂最主流的线型设计。根据《马鞍形空心杯电机线圈绕制设备研究》Faulhaber 采用的是斜绕形线圈，瑞士 Maxon 电机采用马鞍形绕制方法。

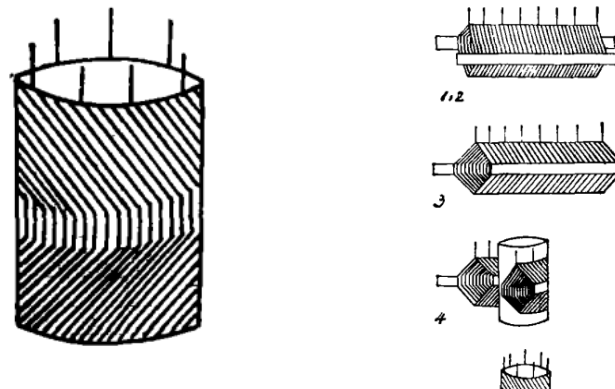
图 20：三种空心杯电机线圈绕制模型和实物图



数据来源：温纯《空心杯线圈绕线机控制系统设计》，东方证券研究所

壁垒 2：绕卷式简单但低效，一次成型提效显著。绕卷式工艺分为三步，首先在斜绕组绕线机上绕制线坯线圈，然后借助于胶带粘结把线坯线圈展平成为扁平线坯。局限性在于生产方式工艺比较繁琐，工人劳动强度大，废品率高，而且只能生产线径为 0.2 以下的线圈，而较大功率电机线径较粗无法生产。

图 21：绕卷式空心杯和工艺流程图



数据来源：赵秉生《绕卷式空心杯电机制作工艺及其设备》，东方证券研究所

一次成型是绕线机将铜线按照既定的规则缠绕在主轴上，一次成型，不需要卷圆压扁等多道工序。

图 22：一次成型绕线过程



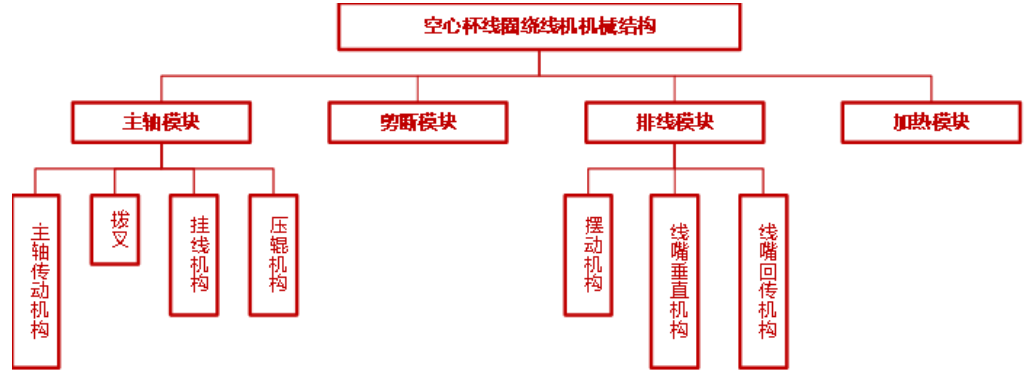
数据来源：张忠强《永磁无刷空心杯电机及控制器研究》，东方证券研究所

壁垒 3：设备水平决定工艺水平。绕线机机械结构主要分为主轴模块、排线模块、剪断模块、加热模块。而主轴模块又可以细分为主轴传动装置、挂线装置、拨叉、压辊装置，排线模块分为摆动机构、线嘴垂直运动机构、线嘴回转机构。四大模块通过绕线机总体结构框架结合在一起，满

有关分析师的申明，见本报告最后部分。其他重要信息披露见分析师申明之后部分，或请与您的投资代表联系。并阅读本证券研究报告最后一页的免责声明。

足线圈技术指标对设备的要求。

图 23：绕线机机械结构

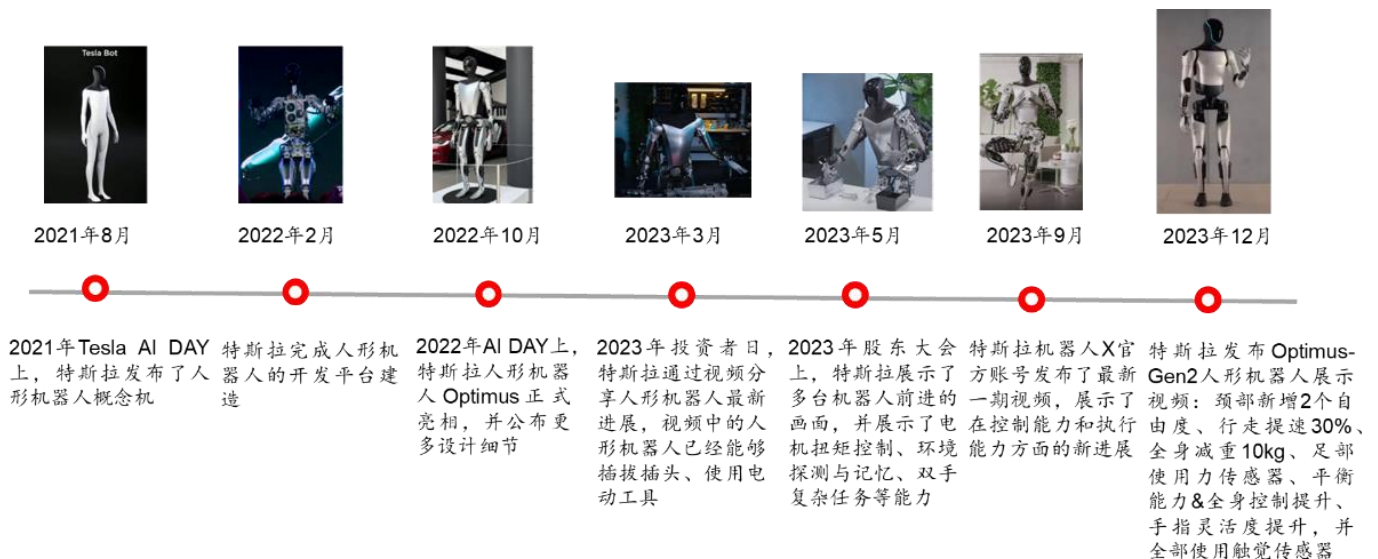


数据来源：温纯《空心杯线圈绕线机控制系统设计》，东方证券研究所

2.4 增量：人形机器人放量在即，有望给空心杯电机带来百亿增长空间

海外看，特斯拉人形机器人进展迅速，在两年不到的时间内实现了快速迭代，完成了开发平台建造、Optimus 产品亮相以及电机扭矩控制、环境探测与记忆、双手复杂任务等能力的实现。2021年首届特斯拉 AI DAY 上其首席执行官马斯克首次公布特斯拉机器人 Tesla Optimus 概念图。2022 年特斯拉 AI DAY 上特斯拉公布了 Optimus 原型机的首秀，实现了自主行走，转身，挥手等动作。2023 年 5 月的股东大会提到特斯拉自研超算 Dojo 为 Optimus 提供算力支持，可加快训练速度并降低训练成本，加快人形机器人的产业化落地。截至 2023 年 8 月，至少有五个特斯拉 Optimus 机器人原型已经建成并能够行走，使用的电机、控制器和电子设备均由特斯拉设计和制造。马斯克预计 Optimus 将大规模量产至“百万”量级，预计其单台成本或将低于 2 万美元。

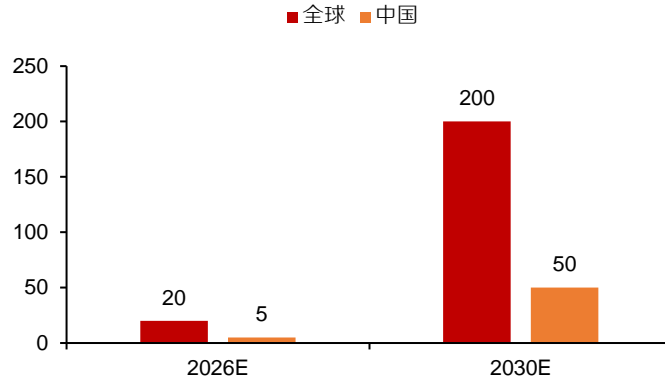
图 24：特斯拉人形机器人发展历程图



数据来源：特斯拉公司官网，前瞻产业研究院，东方证券研究所

根据 2023 年 5 月 GII 发布的报告预测，预计到 2026 年全球人形机器人在服务机器人中的渗透率有望达到 3.5%，市场规模超 20 亿美元，到 2030 年全球市场规模有望突破 200 亿美元。参考中国服务机器人市场约占全球市场 25% 的数值测算，2030 年中国人形机器人市场规模将达 50 亿美元。

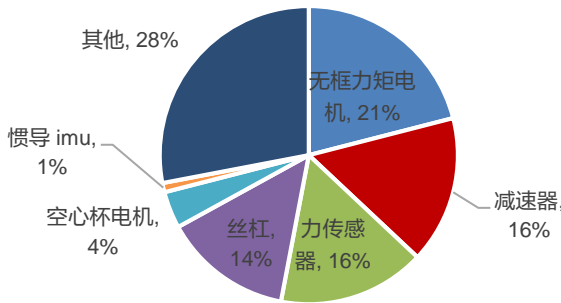
图 25：2026-2030 年全球及中国人形机器人行业市场规模预测(单位：亿美元)



数据来源：GGII，前瞻产业研究院，东方证券研究所

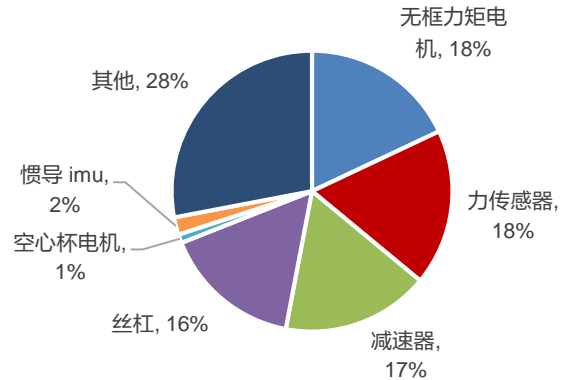
根据 Tesla AI Day 的预测数据，以特斯拉 Optimus 为例，2023 年人形机器人核心零部件价值量排名前三的是无框力矩电机、减速器和力传感器；2030 年无框力矩电机价值量占比下降，力传感器、减速器价值量占比上升，且力传感器将超过减速器，排名第二，三者合计占比仍超过 50%。

图 26：2023 年人形机器人核心零部件价值量分布图预测



数据来源：Tesla AI Day，前瞻产业研究院，东方证券研究所

图 27：2030 年人形机器人核心零部件价值量分布图预测



数据来源：前瞻经济学人 APT，东方证券研究所

从单机价值量占比来看，无框力矩电机、减速器和力传感器价值量占比较高；从降本空间来看，空心杯电机、无框力矩电机等降本空间较大；而从国产替代空间来看，行星滚柱丝杠、空心杯电机、惯导 imu 等国产化率较低，国产替代空间大。

表 7：中国人形机器人行业核心零部件国产替代空间对比和部分代表企业

核心零部件	2023 单机价值量占比	国产化率	部分代表企业
无框力矩电机	21%	中等	步科股份、禾川科技、昊志机电、雷赛智能、伟创电气等
减速器	16%	较高	绿的谐波、双环传动、昊志机电、国茂股份、秦川机床、丰立智能、中大力德、科峰智能、夏厦精密、豪能股份等
力传感器	16%	中等	柯力传感、昊志机电、东华测试等

有关分析师的申明，见本报告最后部分。其他重要信息披露见分析师申明之后部分，或请与您的投资代表联系。并请阅读本证券研究报告最后一页的免责申明。

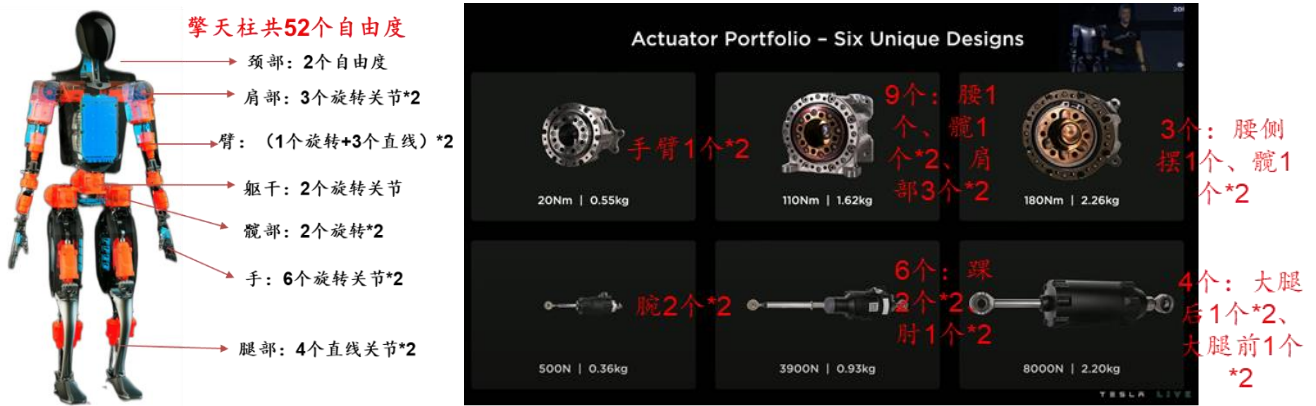
丝杠	14%	低	五洲新春、新剑传动、贝斯特、北特科技、斯菱股份、恒立液压、秦川机床、鼎智科技、禾川科技、长盛轴承、南京工艺等
空心杯电机	4%	低	鸣志电器、鼎智科技（江苏雷利）、拓邦股份等
惯导 imu	1%	低	芯动联科、华依科技、苏州固得等

数据来源：Tesla AI Day，各公司官网，前瞻产业研究院，东方证券研究所

特斯拉人形机器人自由度：共 52 个，手以外有 28 个关节（躯干 2 个、肩臂 14 个、髌腿 12 个）、灵巧手 6 个主动关节（两只 22 个自由度）、脖颈 2 个自由度。身体 28 个运动关节方案：分为旋转和线性 2 大类执行器，每类包括 3 种旋转执行器和 3 种线性执行器。

- 14 个旋转执行器：由电机+谐波减速器+力矩传感器+位置传感器+交叉滚子轴承+向心止推滚珠轴承构成。
- 14 个线性执行器：由电机+行星滚柱/梯形/滚珠丝杠+力矩传感器+位置传感器构成。

图 28：特斯拉人形机器人共 52 个自由度



数据来源：Tesla AI Day，东方证券研究所

旋转执行器主要分布于肩髌等需要大角度旋转的关节，线性执行器分布于肘膝等摆动角度不大的单自由度关节和腕踝两个双自由度但是体积紧凑的关节。擎天柱腿部的线性执行器主要分布负责支撑和承力的髌关节、膝关节及踝关节，具有前后摆动自由度，采用线性执行器驱动器关节的第一个优势是空间利用率高，第二个优势是线性执行器的螺杆传动机构通过合理设计可以具备自锁能力；上肢的肘关节屈伸采用线性执行器的理由和腿部原理一致，低耗能高推力，让擎天柱拥有强壮的二头肌；前臂的两个线性执行器构成并联关节主要目的是降低腕关节的尺寸。

图 29：特斯拉人形机器人采用的旋转和线性执行器示意图

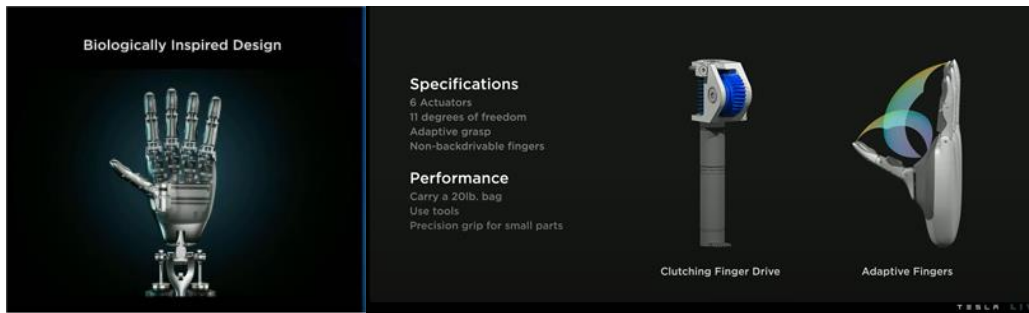


有关分析师的申明，见本报告最后部分。其他重要信息披露见分析师申明之后部分，或请与您的投资代表联系。并请阅读本证券研究报告最后一页的免责申明。

数据来源：Tesla AI Day，东方证券研究所

灵巧手作为机器人实现操作的终端工具，十分重要且复杂，目前设计面临的主要难题是空间极小而驱动自由度极多，人手（不含腕关节 2 个自由度及 4 个被动自由度）共有 21 个主动自由度，如果将 21 个执行器完全布置于掌内，现有技术根本无法实现。当下解决这个难题有两个方向：一种是采用欠驱动方式，牺牲一定灵活性减少电机数量。另一种是将电机布置转移至前臂，采用拉线方式从远端控制灵巧手的关节，如英国的 shadow 手，但这个方案的缺陷是拉线机构随着使用，精度会逐渐变化，机构复杂易损坏，因此尚不具备实用性。特斯拉机器人灵巧手采取了折中的方案，使用较为经典的六电机驱动方式，拇指采用双电机驱动弯曲和侧摆，其它四指各用一个电机带动。电机采用蜗杆传动机构的目的是与腿部直线伺服如出一辙，采用机构自锁降低能耗。为追求形态美观及自适应性，手指采用拉线的传动机构。

图 30：特斯拉人形机器人采用的灵巧手示意图



数据来源：Tesla AI Day，东方证券研究所

特斯拉人形机器人的灵巧手主要包括空心杯电机、蜗轮蜗杆、绳驱，能够携带 20 磅重的背包、使用工具、精确抓取小型零件。手指执行器一共有 12 个，单个手拥有 6 个执行器。每个手 6 个主动自由度，由空心杯电机+螺纹丝杠+精密行星齿轮箱+编码器构成；还有 5 个被动自由度（各个手指各 1 个，线驱动），可负重 20 磅和自适应抓取的能力。

表 8：特斯拉人形机器人灵巧手的参数

参数	内容
手部自由度	11DOF×2(5 根手指每根 2DOF+大拇指侧向摆动)
执行器	6 个×2:大拇指 2 个，其余 4 个手指 4 个(执行器为螺杆旋转带动齿轮旋转进而使手指关节旋转的结构)
负载能力	20 磅(约 9 千克)
仿生性	自适应抓握，仿生性较好
自锁能力	反向自锁(利用蜗轮蜗杆实现反向自锁)

数据来源：Tesla AI Day，东方证券研究所

假设人形机器人进展顺利逐步放量，或将为空心杯电机新增百亿市场空间。考虑到特斯拉人形机器人未来逐步放量，或将打开空心杯电机市场的天花板，同时考虑到未来产业入局者可能会增多，在旺盛需求下我们假设单个空心杯电机价格会呈现下降趋势。我们假设特斯拉人形机器人产量 1 万台时，单个空心杯电机的价格约 1000 元；随着特斯拉人形机器人大规模量产，达到 200 万台产量时，单个空心杯电机价格约降至 600 元。我们对不同情景进行测算，当特斯拉人形机器人产量达到 50 万、100 万、200 万台时，全球空心杯电机市场空间可能分别新增 48 亿元、84 亿元、144 亿元。

有关分析师的申明，见本报告最后部分。其他重要信息披露见分析师申明之后部分，或请与您的投资代表联系。并请阅读本证券研究报告最后一页的免责申明。

表 9：特斯拉人形机器人不同产量下的空心杯电机新增市场空间的测算

	空心杯电机市场规模测算				
	情景 1	情景 2	情景 3	情景 4	情景 5
特斯拉人形机器人产量（万台）	1	10	50	100	200
单机空心杯电机用量（个）	12	12	12	12	12
空心杯电机需求量（万个）	12	120	600	1200	2400
空心杯电机单价（元）	1000	900	800	700	600
空心杯电机市场空间（亿元）	1	11	48	84	144

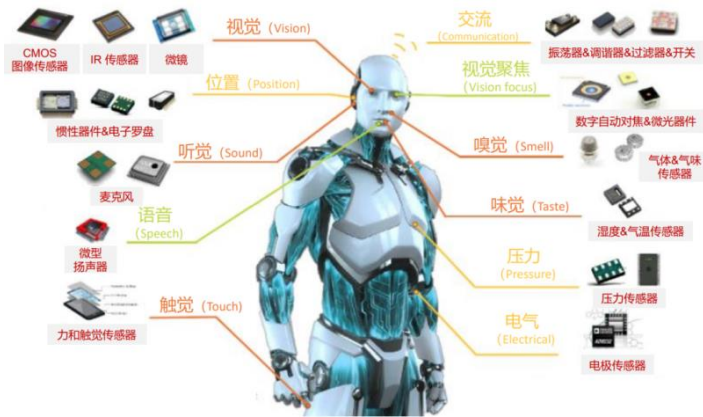
数据来源：Tesla AI Day，东方证券研究所

3. 传感器：感知系统的核心部件，灵巧手智能化的基础

3.1 传感器是人形机器人感知系统的核心部件

人形机器人传感器检测对象不同分为内部传感器和外部传感器。内部传感器：用来感知机器人的自身状态的传感器，比如位置、速度、加速度。外部传感器：用以感受机器人周围环境、目标物的状态信息的传感器，比如视觉、触觉、听觉、嗅觉、温度、力觉等。

图 31：传感器是人形机器人感知系统的核心部件



数据来源：传感器专家网，东方证券研究所

表 10：机器人的常用传感器

传感器	检测元件	应用举例
位置	光电开关、限位开关	运动平台限位与规定位置检测
速度	光电编码管、测速发电机	轮式机器人里程计算 机械臂关节转动及操作控制
加速度	皮变式、微电容、压电式，压阻式加速度计	振动控制与飞行加速度控制
平衡	陀螺仪、惯性传感器组、GPS	移动机器人空间定位与导航 飞行机器人姿态控制；
力觉	应变片、压阻、压电	腕力、指力控制；柔性装配；
触觉	导电橡胶、PVDF、光纤	抓取判断防止冲击抓取物体轮廓与材质识别
视觉	CGD 摄像机、激光雷达	目标识别、定位、导航
听觉	麦克风，超声波传感器	语音识别与交互

有关分析师的申明，见本报告最后部分。其他重要信息披露见分析师申明之后部分，或请与您的投资代表联系。并请阅读本证券研究报告最后一页的免责申明。

接近觉	电涡流、电容式、红外、超声，光电接近传感器	避障、探索与轨迹控制
距离	超声、红外、激光距离传感器	障碍物定位、自身标的物定位:
嗅觉	气敏元件	嗅觉定位

数据来源：传感器专家网，东方证券研究所

人形机器人需要用到多种传感器，包括力矩传感器，拉压力传感器、编码器、温度传感器、六维力传感器和惯导传感器等。其中，惯导传感器（IMU）是实现人形机器人姿态控制的核心，六维力传感器是力控、摆动稳定控制的核心，可精准测量随机变化的力。

表 11：与人相对应的传感系统

人类	功能	机器人传感器
视觉	物体的大小、明暗、颜色、动静	CCD CMOS LiDar 深度相机等
听觉	音高(音调)音响(音强)音色(音质)	Mic 振动传感器等
味觉	酸甜苦辣咸	味觉传感器
触觉	触摸的压迫感	触觉传感器
嗅觉	各种气味	气敏传感器
痛觉	机械/温度/化学等刺激导致疼痛	力传感器、温度传感器等
前庭觉	平衡觉	IMU
本体觉	本体的位置与姿态	码盘、超声波距离传感器等

数据来源：传感器专家网，东方证券研究所

3.2 特斯拉 Optimus Gen2，为何选择“捏鸡蛋”？

2023 年 12 月 12 日，特斯拉发布了第二代人形机器人擎天柱 Optimus Gen2。演示视频中，机器人用手指捏起鸡蛋的能力受到广泛关注：机器人用左手的拇指和食指把鸡蛋从纸浆蛋托里拿起来，再用右手的食指和拇指捏住，将鸡蛋稳稳地放到锅里。这个看似简单而日常的动作，背后需要动用的技术却一点也不简单。

图 32：人形机器人捏鸡蛋



数据来源：中国电子报，东方证券研究所

有那么多物品可以展示，特斯拉为什么偏偏选择了鸡蛋？根据中国电子报的报道，他们推测之所以做这样的选择，是因为鸡蛋易碎的特点：力气小了会滑落，力气大了会捏破。显然，鸡蛋这种重量轻、质地薄且易碎、表面平滑且易落的物品，对机器人感知系统的识别能力和抓取动作精细度提出了更高的要求。可能这也是特斯拉希望借助视频传达出来一条信息：二代擎天柱连抓握鸡蛋的功能都能实现，那么也能轻松完成日常生活所涉及的其他动作手部。

机械手捏鸡蛋，背后需要什么样的技术支撑？完成抓取的动作，首先要具备感知能力。关于机器人指尖的感知方式，有如下几种：

- 其一是压力感知。相较于工业机器人，人形机器人手部的受力方向更复杂。因此，有业界人士认为，手部的力量感知应该用六维力传感器实现。根据中国电子报的报道，坤维科技CTO 袁明论介绍称：“如果力的方向是固定的，可以采用一维力传感器；如果力作用点与传感器标定参考点重合，但力的方向随机变化，可以用三维力传感器；而如果力的方向和作用点都在三维空间里随机变化，就应该选用六维力传感器进行测量。”人形机器人的手部抓握力的测量，就属于这第三种情况。且不仅要求测量的方位更多，也要求其测量精度更准，需要控制在 mN（毫牛）级。
- 其二是触力感知。根据中国电子报的报道，霍尼韦尔技术支持工程师王海军介绍了以触力传感器探测机器人指尖力大小的解决方案。他表示，霍尼韦尔可以检测触碰到的地方的力的大小。触力传感器和压力传感器的工作原理比较类似，区别在于，触力计算出来是力的大小，压力传感检测出来的是压强。例如汽车刹车系统是通过液压的方式感知，如果需要，再通过计算转化为力的大小。王海军表示，触力传感器的适应的量程数值较小，一般在 25N 以下，精度可达到 1% 左右，因此能够适应人形机器人用机械手抓取精细物品的需求。该技术现已在医疗手术机器人等领域实现应用。
- 其三是柔性微压力感知。与压力感知类似，柔性微压力传感器同样感知的是传感器表面受到的压力。而区别在于，柔性传感器采用更轻薄的薄膜材料，可更灵活地配置在机器人表面，并实现对来自不同方向的压力的感知。根据中国电子报的报道，汉威传感器研究院副院长刘建钢曾表示，柔性微压力传感器也能够实现阵列功能，也就是说，能够实现特斯拉二代机器人在视频中展示的——呈现机器人指尖不同位置感受到的不同压力值的功能。

对于机器人取蛋这个动作而言，精细化感知只是这个复杂系统中非常微小的一步。取蛋动作是毫秒间的多轮信号交换。取蛋——将鸡蛋放置到另一只手中——再放置到特定容器内，在特斯拉发布的 Optimus Gen2 宣传视频中，整个过程仅耗时 10 秒。但如果将这个技术流程拆解开，我们看到的在几秒钟的时间内发生的取蛋、传蛋、放蛋的过程，**背后经历了非常长的技术流程：**

- 1) 首先，机器需要通过视觉判断待抓取的物体的物理位置、表面材质和大小，以此选定抓取物品所需力量的初步参数；
- 2) 此后，机器人需要调动机械手靠近物品，并放慢速度进行抓取；
- 3) 抓取过程中，机械手首先需要缓慢抓握物体，同时感受过程中物体的力反馈，并将该信息传递给上位处理器，以此判断是否要继续施力；
- 4) 经过抓握、力反馈、信号处理，再将机械手执行指令信息传回到手指的多轮信号交换之后，机械手最终确定抓握力度，抓住物体并移动。
- 5) 放置鸡蛋的动作，背后同样有很长的计算流程：从判断放置点位置，到机械手松开的幅度调试，其中又将经历获取视觉信息、获取力反馈信息等多轮信息交换。

人形机器人，必须经历多次的“判断”和“计算”来完成拿取动作。原因就在于：以服务人类、成为人类工作和生活助手为目标的人形机器人，其面临的应用场景、面对的工作环境与生活的环境高度类似：人手接触的物体多种多样，其表面质地、大小、质量都各不相同，而非标准化的工业物件，人每一次拿取背后，其实都蕴含着复杂的经验——这是人类从婴幼儿时期逐渐培养起来的。

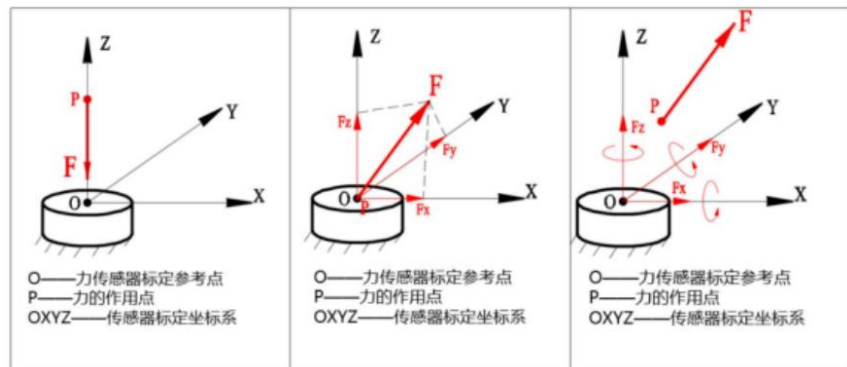
“对于机器人而言，任何一个在人们看来很简单的动作，都是一个复杂场景，需要机器人具备多维度数据感知能力与算法模型支撑，还需要完整的时序控制软件设计，多项技术相互协同的基础上瞬间输出运算结果形成‘指令’，才呈现出机器人在视频中表现的流畅动作。”北京理工大学前沿技术研究院首席专家郭源生表示。人体的手部与皮肤是一个精妙的系统，对物体的感知包含粗糙度、硬度、导热性、温度、湿度、锐利性、振动、触觉力、触觉压力等诸多维度。而对于人形机器人而言，要模仿人类的行为举动，就要将上述人类对物体的感知转化为物理参数指标，经过机器人多次与物体接触、反复验证，最终将这些物理参数转化为机器人不断学习，修正模型的基础数据。“从技术上来看，软硬件协同能力是关键。”北京理工大学前沿技术研究院首席专家郭源生表示。

3.3 六维力/力矩传感器

力传感器是测量物体因受力变形而产生的应变传感器，将力信号转变为电信号输出的电子元件，可以检测张力、压力、重量、扭矩、应变和内应力等机械量。按照测量维度，力觉传感器可以分为一至六维力传感器。一般传感器能测几个维度，它就是几维力传感器。一维、三维和六维力传感器最常见，二维和五维的力传感器较少见。六维力传感器也是维度最高的力觉传感器，它能给出最为全面的力觉信息，因此六维力传感器的技术难度和使用难度都相对较大。

六维力传感器也称为六维力矩传感器、F/T 传感器，用于精确测量 X、Y、Z 三个方向的力信息和 F_x 、 F_y 、 F_z 三个维度的力矩信息。六维力传感器的内部算法，会解耦各方向力和力矩间的干扰，使力的测量更为精准；这类传感器更适用于参考点的距离较远，且随机变化情景，测量精度要求较高；目前，六维力传感器主要用于检测、预防、控制、示教、测量、保护等场景，通常安装在机器人的底座或者末端，可以提供应用过程中的力交互信息，对于下游客户而言，有效且可靠的数据至关重要；随着智能制造和机器人产业的发展，力觉传感器逐渐上升到国家战略发展层面，六维力传感器作为新型传感器被列入到机器人关键基础提升行动中。

图 33：一维、三维、六维力传感器工作示意图



数据来源：高工机器人，东方证券研究所

图 34：六维力传感器安装部位

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/026042231022010040>