

## 机器人行业深度报告

## 灵巧手：机器人对外交互的核心硬件模块，新变化孕育新机会

方正证券研究所证券研究报告

## 分析师

李鲁靖

登记编号：S1220523090002

王昊哲

登记编号：S1220524120003

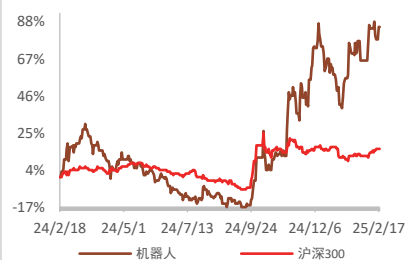
联系人 乐智华

## 行业评级：推荐

## 行业信息

|          |        |
|----------|--------|
| 上市公司总家数  | 22     |
| 总股本(亿股)  | 129.53 |
| 销售收入(亿元) | 453.66 |
| 利润总额(亿元) | 3.98   |
| 行业平均 PE  | 198.83 |
| 平均股价(元)  | 38.41  |

## 行业相对指数表现



数据来源：wind 方正证券研究所

## 相关研究

灵巧手是人形机器人的重要硬件模块，集成化、多自由度发展，或随人形机器人产业落地打开百亿市场。灵巧手是人形机器人的末端执行器、对外交互的重要窗口，其硬件模块包括驱动系统、传动系统及感知系统。类似人手的灵巧手架构更适应人类生活/工作环境，在数据易得性、环境适应性等方面更具优势。灵巧手诞生自 20 世纪 70 年代，回顾其发展历程，其发展趋势是在小体积/重量、低成本、耐用可靠的边界条件下追求【灵活性、抓握力、精度】的提升。特斯拉 Gen3 灵巧手自由度翻倍至 22，预计或采用【电机+丝杠】或【电机+减速器+丝杠】方案。经测算，在百万台销量下，灵巧手市场空间将达近 430 亿元。

**驱动系统：电驱方案为主流，空心杯电机及无刷有齿槽电机或为主要选择。**驱动系统是力量之源，在驱动结构、放置方式、方案选型等方面均存在不同技术路线，结合性能和成本等方面的权衡，产业端基本采用欠驱动下的电机方案。落实到电机选型上，可选方案包括直流无刷电机、空心杯电机及无框力矩电机。空心杯具有响应迅速、转换效率高优势，是灵巧手的优质选择。而从边际上，特斯拉通过将执行器放置于前臂，无刷电机的体积劣势得到缓解，凭借成本优势，其用量或显著提升。

**传动系统：腱绳广泛应用，微型丝杠/微型谐波减速器等新方案产业提速。**传动系统传导来自驱动系统的运动和力，对灵巧手抓取稳定性、精度、灵活性有重要作用。其存在较大路线分歧，我们认为腱绳方案凭借远距传动、灵活柔性等优势，在多自由度趋势下或被广泛采用，其寿命、负载等方面的劣势有望随材料端优化而缓解。微型丝杠、微型谐波减速器为新兴传动结构，在精度、承载力等方面各具优势，随产业成熟推动降本后或广泛应用，五洲新春、绿的谐波等国内企业正积极入局研发。

**感知系统：智能化的重要基础，产业发展步入快车道。**感知系统按照感知区域可分为内部/外部传感器，前者感知手部自身状态，包括力矩/位置/弯曲传感器，后者感知外界环境，包括接近觉/触觉传感器。一维力传感器多用于手指关节处，技术相对成熟。六维力传感器用于手腕、脚踝处，可为机器人提供更精准的力感信息，提升其柔顺控制水平，国内如柯力传感、东华测试等公司积极推进研发及送样进程。柔性触觉传感器具备良好的延展性及柔韧性，或应用于手指及掌部，国内企业及院校积极推进产业提速。

**投资建议：**2025 年为人形机器人量产元年，远期空间广阔。灵巧手是人形机器人对外交互的重要硬件模块，兼具高价值量及高壁垒，其性能提升是人形机器人迭代升级的重要方向，未来不乏新方案、新进展。建议关注：**电机**：鸣志电器、兆威机电、雷赛智能、鼎智科技、拓邦股份、伟创电气、禾川科技、步科股份；**减速器**：绿的谐波、双环传动、斯菱股份、中大力德、豪能股份、国茂股份；**丝杠**：恒立液压、北特科技、贝斯特、五洲新春、震裕科技、双林股份；**腱绳**：大业股份；**传感器**：柯力传感、东华测试、华依科技、安培龙、敏芯股份、华培动力、汉威科技。

**风险提示：**人形机器人终端应用落地不及预期、人形机器人核心部件降本进程不及预期、机器人大小脑训练进程不及预期。

# 并购家 免费行业报告网

IPOIPO.CN 每日更新 不用注册会员 无广告 永久免费

## 正文目录

|                                                  |    |
|--------------------------------------------------|----|
| 1 灵巧手是“五脏俱全”的独立硬件模块，追求一定边界条件下的灵巧、力量、精度的提升 .....  | 4  |
| 1.1 灵巧手是人形机器人对外交互的重要窗口，包含驱动/传动/感知三大细分模块 .....    | 4  |
| 1.2 灵巧手在一定边界条件下追求“灵巧性、抓握力、精度”的提升 .....           | 4  |
| 1.3 特斯拉方案演进：增加自由度与传感单元是趋势，最新款灵巧手自由度与人手基本相当 ..... | 5  |
| 2 驱动系统：电驱方案为主流，空心杯电机及无刷有齿槽电机或为主要选择 .....         | 10 |
| 2.1 驱动结构：可分为全驱动/欠驱动结构，欠驱动方案应用更广泛 .....           | 10 |
| 2.2 放置方式：外置、混合置或为短期优解 .....                      | 11 |
| 2.3 方案选型：电机驱动更契合灵巧手的需求，为当前主流方案 .....             | 12 |
| 2.4 电机选择：可选方案包括直流无刷电机、空心杯电机及无框力矩电机 .....         | 13 |
| 3 传动系统：腱绳为主流方案，微型丝杠、微型谐波产业进程提速 .....             | 14 |
| 3.1 齿轮/连杆传动：传统的传动方案，存在重量/体积大等问题 .....            | 15 |
| 3.2 腱绳传动：多自由度趋势下的必然选择，有望随材料性能提升而广泛应用 .....       | 16 |
| 3.3 丝杠/减速器传动：手部传动新方向，产业进程持续推进 .....              | 19 |
| 4 感知系统：灵巧手智能化的重要基础，产业发展迈入快车道 .....               | 21 |
| 4.1 力传感器：技术逐步走向成熟，多用于指尖、腕部等 .....                | 22 |
| 4.2 触觉传感器：已有少量应用，产业进程迈入快车道 .....                 | 24 |
| 5 投资建议： .....                                    | 24 |
| 6 风险提示： .....                                    | 24 |

## 图表目录

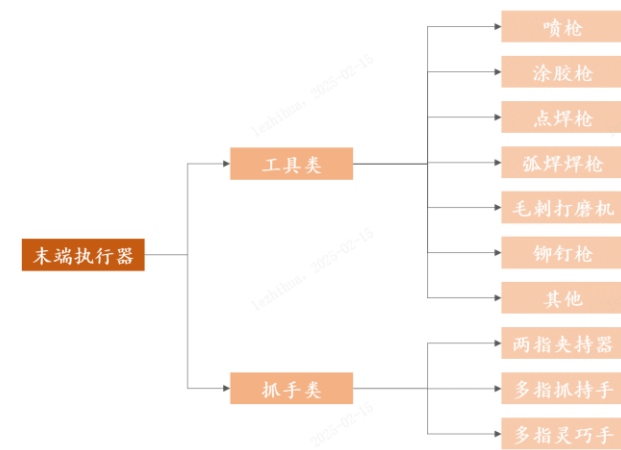
|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| 图表 1: 灵巧手是末端执行器的一种 .....                                               | 4  |
| 图表 2: 多指灵巧手架构更复杂, 但灵活性、自由度等更高.....                                     | 4  |
| 图表 3: 灵巧手发展历程 .....                                                    | 5  |
| 图表 4: 人手骨骼结构 .....                                                     | 6  |
| 图表 5: Feix 分类法三类抓握姿势 .....                                             | 7  |
| 图表 6: 人力常用动作及比例 .....                                                  | 7  |
| 图表 7: 特斯拉 Gen1 灵巧手架构 .....                                             | 8  |
| 图表 8: 特斯拉 Gen1 灵巧手工作原理.....                                            | 8  |
| 图表 9: 特斯拉 Gen2 灵巧手在手指部位采用触觉传感器.....                                    | 8  |
| 图表 10: 特斯拉 Gen3 灵巧手合计 22 自由度.....                                      | 9  |
| 图表 11: Optimus 采用 Gen3 灵巧手可抓取飞行中的网球 .....                              | 9  |
| 图表 12: 特斯拉 Optimus Gen3 灵巧手细分零部件价值量及市场空间测算 (假设单个机器人采用 2 个灵巧手)<br>..... | 10 |
| 图表 13: 全驱动灵巧手和欠驱动灵巧手对比.....                                            | 11 |
| 图表 14: 不同驱动方式下, 灵巧手重量与执行器数量正相关.....                                    | 12 |
| 图表 15: 灵巧手不同驱动方式的优缺点.....                                              | 13 |
| 图表 16: 空心杯电机、无刷电机及无框力矩电机的性能对比.....                                     | 14 |
| 图表 17: 灵巧手主流传动方案的定义及优缺点概览.....                                         | 15 |
| 图表 18: 齿轮传动原理 .....                                                    | 16 |
| 图表 19: 连杆传动原理 .....                                                    | 16 |
| 图表 20: 腱绳传动原理 .....                                                    | 17 |
| 图表 21: 腱绳驱动方案在灵巧手中广泛应用.....                                            | 17 |
| 图表 22: 代表性灵巧手多采用腱绳传动.....                                              | 18 |
| 图表 23: 灵巧手主流腱绳材料性能对比.....                                              | 19 |
| 图表 24: 行星滚柱丝杠结构图例 .....                                                | 20 |
| 图表 25: 三类丝杠性能对比 .....                                                  | 20 |
| 图表 26: 国内厂商积极围绕丝杠进行布局.....                                             | 20 |
| 图表 27: 减速器类别及各自特点 .....                                                | 21 |
| 图表 28: 谐波减速器重要供应商概览.....                                               | 21 |
| 图表 29: 灵巧手的感知系统概览 .....                                                | 22 |
| 图表 30: 六维力/力矩传感器在机器人领域的应用.....                                         | 23 |
| 图表 31: 我国六维力/力矩传感器市场规模预计维持高增.....                                      | 23 |
| 图表 32: 2022 年我国六维力传感器竞争格局 (以销量划分) .....                                | 23 |
| 图表 33: Optimus-Gen2 手指均内置触觉传感器 .....                                   | 24 |
| 图表 34: 柔性触觉传感器各敏感机理优缺点对比.....                                          | 24 |

1 灵巧手是“五脏俱全”的独立硬件模块，追求一定边界条件下的灵巧、力量、精度的提升

1.1 灵巧手是人形机器人对外交互的重要窗口，包含驱动/传动/感知三大细分模块

灵巧手是末端执行器的细分品类，在训练数据易得性、环境适应性等方面更具优势，是人形机器人的重要组成部分。灵巧手是典型的抓手类末端执行器，其形态和功能均类似人类手部，能够进行抓取、捏取等精细多样的操作，是人形机器人与外界环境实现较好交互的重要窗口。手是人类与外界交互的重要渠道，人类的生活、工作环境均基于人手特点而相应构建，因此类似人手的灵巧手架构可利用动作捕捉得到的人手运动数据进行模仿学习、强化学习等训练，从而在远期面对不同环境、不同物件时具有更强的泛化、适应能力，较夹持器、非仿人灵巧手等其他末端执行器具备更强的环境适应性。

图表1: 灵巧手是末端执行器的一种



资料来源：蔡世波等《机器人多指灵巧手的研究现状、趋势和挑战》，方正证券研究所

图表2: 多指灵巧手架构更复杂，但灵活性、自由度等更高



资料来源：蔡世波等《机器人多指灵巧手的研究现状、趋势和挑战》，方正证券研究所

灵巧手的硬件模块包括三部分：驱动系统、传动系统及感知系统。驱动系统的核心作用是产生运动和力，传动系统将运动和力从驱动系统传导至灵巧手各关节，感知系统提供灵巧手内部的运行状态及外部环境感知反馈。根据不同应用场景的特定需求，在驱动结构、驱动方案、传动部件等方面存在多类不同方案。

1.2 灵巧手在一定边界条件下追求“灵巧性、抓握力、精度”的提升

灵巧手诞生自上世纪 70 年代，朝着多自由度、集成化、仿生化发展。灵巧手概念自 20 世纪 70 年代产生，随着计算机技术等领域的发展，朝着集成化、智能化、灵巧化方向持续迭代。灵巧手应用广泛，已在医疗、航空航天、工业等领域实现应用。

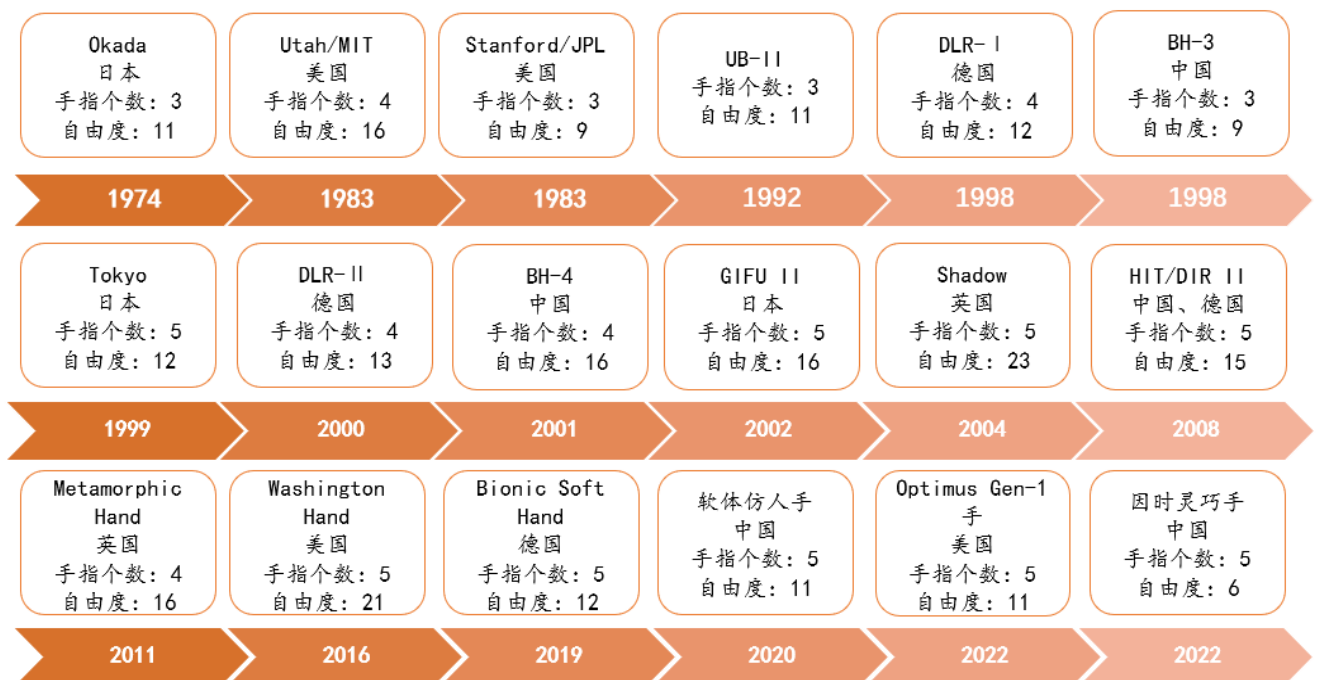
✓ 1970s 之后，灵巧手概念随工业领域发展而兴起：日本电工实验室于 1974 年推出的灵巧手 Okada 是现代意义上第一款灵巧手，配置 3 个手指、11 个自由度，能进行连续抓取运动。麻省理工学院于 1983 年推出的



Utah/MIT、斯坦福大学 1984 年推出的 Stanford/JPL 均采用手指完全相同的模块化结构设计，且灵活性提升，为未来灵巧手研发打下基础。

- ✓ **1990s 之后，灵巧手驱动、控制、感知能力提升，集成化发展：**计算机技术水平提升为灵巧手信号处理能力、控制算法计算能力的提升提供可能，灵巧手向集成化设计发展。在此期间 UB-II Hand、DLR-I Hand、DIST-Hand、BH-3Hand 等新型号层出不穷。
- ✓ **2000s 之后，灵巧手持续迭代，性能强化：**德国宇航中心在 DLR-I Hand 的基础上推出 DLR-II Hand，其驱动-传动系统进一步优化，指尖输出力从 10N 增至 30N，具备集成度高、多传感器等特点，主要面向家庭、航空航天领域。哈尔滨工业大学联合德国宇航中心推出 HIT/DLR-I Hand，采用盘式电机驱动及谐波减速器+齿形皮带的传动方案。

图表3: 灵巧手发展历程



资料来源：吕博瀚《空间机器人多自由度灵巧手关键技术研究》、刘伊威《机器人灵巧手的研究与发展》、方正证券研究所

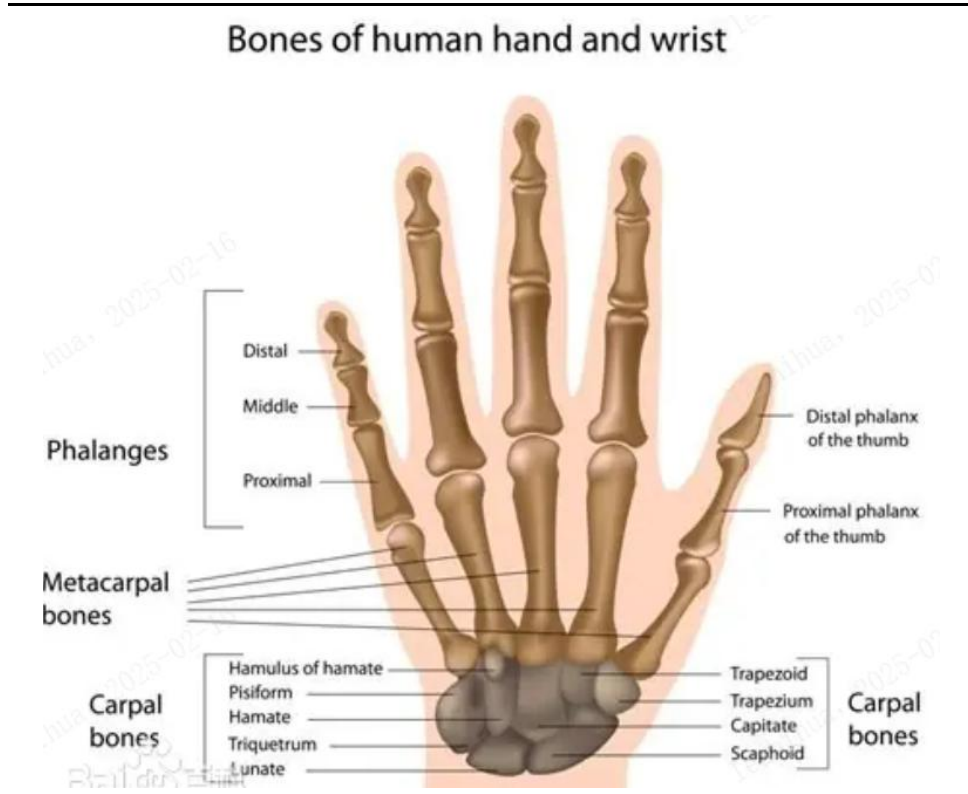
灵巧手的硬件架构底层逻辑在于小体积/重量、低成本、耐用可靠的边界条件下追求“灵巧性、抓握力、精度”的提升。与通用自动化部件不同，人形机器人驱动器的硬件设计和制造需要适应小空间下的集成需求和功率密度需求。结合应用场景、对外交互等因素，我们认为灵巧手的硬件架构选择核心在于在小体积&重量、低成本、可靠耐用的边界条件下，追求灵巧性、抓握力、精度的提升。在现有硬件技术条件下，【灵巧性、抓握力、精度】这三者需求往往存在互斥的情况，需要根据应用场景、远期优化空间等因素综合考量。

1.3 特斯拉方案演进：增加自由度与传感单元是趋势，最新款灵巧手自由度与人手基本相当

从解剖结构来看，人手由 27 块骨头构成，分为腕骨、掌骨和指骨：

- ✓ 腕骨 (CMC)：由 8 块骨头构成，负责手掌和手指的整体运动。
- ✓ 掌骨 (MCP)：由 5 块骨头构成，连接腕骨和指骨，为抓握物体提供支撑。
- ✓ 指骨 (IP)：由 14 块骨头（拇指\*2+其余四指各自\*4）构成，负责抓握物体和做手势，是人手最重要、复杂的部分。

图表4:人手骨骼结构



资料来源：百度百科，方正证券研究所

人手合计包含 24 个自由度，其中拇指、食指和中指的重要性较高。自由度方面，人手合计有 24 自由度，其中除拇指之外的其余四指各自具有 4 自由度（弯曲/伸展\*3+外展/并拢\*1），拇指具有 5 自由度（弯曲/伸展\*2+外展/并拢\*1+掌骨节/旋转\*2），手掌具有 1 自由度（外展/并拢\*1），手腕外展及曲度合计 2 自由度。根据《高仿生性能假肢设计研发及应用研究》，力量抓握、精捏、侧捏占到人手常用动作的 85%，因此拇指、食指及中指具有较高重要性，在灵巧手设计中应分配更多的自由度。

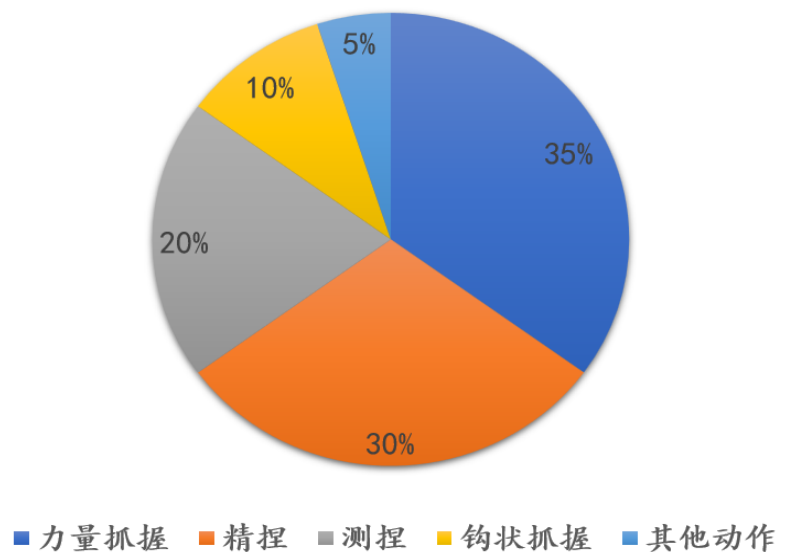
图表5:Feix 分类法三类抓握姿势

|       | 中间握取 |   |     | 精准握取 |     |     |     | 握侧握取 | 强力握取（包括握取） |      |   |     |     |     |
|-------|------|---|-----|------|-----|-----|-----|------|------------|------|---|-----|-----|-----|
|       | 握取主数 |   |     | 握取主数 |     |     |     |      | 握取主数       |      |   |     |     |     |
|       | (1)  | 1 | 1   | 1    | 1   | 1   | 1   |      | 掌面握取       | 握取主数 |   |     |     |     |
| 虚拟手指1 | 2    | 3 | 3-4 | 2    | 2-3 | 2-4 | 2-5 | 3    | 3-5        | 2    | 2 | 2-3 | 2-4 | 2-5 |
| 虚拟手指2 |      |   |     |      |     |     |     |      |            |      |   |     |     |     |
| 虚拟手指3 |      |   |     |      |     |     |     |      |            |      |   |     |     |     |
| 大拇指外展 |      |   |     |      |     |     |     |      |            |      |   |     |     |     |
|       |      |   |     |      |     |     |     |      |            |      |   |     |     |     |
|       |      |   |     |      |     |     |     |      |            |      |   |     |     |     |
|       |      |   |     |      |     |     |     |      |            |      |   |     |     |     |
|       |      |   |     |      |     |     |     |      |            |      |   |     |     |     |
| 大拇指内收 |      |   |     |      |     |     |     |      |            |      |   |     |     |     |
|       |      |   |     |      |     |     |     |      |            |      |   |     |     |     |
|       |      |   |     |      |     |     |     |      |            |      |   |     |     |     |
|       |      |   |     |      |     |     |     |      |            |      |   |     |     |     |
|       |      |   |     |      |     |     |     |      |            |      |   |     |     |     |

资料来源：林辉煌《协同欠驱动仿人灵巧手设计方法研究》，方正证券研究所

图表6:人力常用动作及比例

### 人类常用动作及比例



资料来源：郑悦《高仿生性能假肢设计研发及应用研究》，方正证券研究所

特斯拉 Optimus 是目前全球人形机器人行业标杆，通过复盘知其灵巧手历经多轮架构调整，核心主线是增加自由度、增加感知能力，从而带来硬件结构的变化：

GEN1 方案实现“从 0 到 1”，采用经典的单手 6 执行器 11 自由度架构。根据 TESLA AI DAY 2022，Optimus-Gen1 灵巧手采用欠驱动架构（单手 11 自由度，6 执行器），其中拇指采用 2 个执行器分别实现弯曲/伸展、外展/内收运动，非拇指的四个手指各自采用 1 个执行器，五指末端关节不搭载执行器，进行耦合随



动。执行器方案为【空心杯电机-蜗轮蜗杆-腱绳】。凭借对蜗轮蜗杆的使用，其具有防反驱特点。

图表7: 特斯拉 Gen1 灵巧手架构



资料来源: Tesla AI Day 2022, 方正证券研究所

图表8: 特斯拉 Gen1 灵巧手工作原理



资料来源: Tesla AI Day 2022, 方正证券研究所

**GEN2 方案新增“手指触觉传感器”。**根据 2023 年 12 月特斯拉官媒，Optimus-Gen2 灵巧手在 Gen1 基础上，手指部位新增触觉传感器，从而在操作的连贯性、精细程度上取得显著进步，可用拇指、手指捏取鸡蛋。

图表9: 特斯拉 Gen2 灵巧手在手指部位采用触觉传感器



资料来源: 财联社, 方正证券研究所

**GEN3 方案将执行器集成于前臂，在手部体积近似不变的情况下自由度翻倍至 22，无刷电机用量显著提升，腱绳成为类刚需。**2024 年 10 月 We Robot 会议结束后，特斯拉展出 Gen3 灵巧手，其具备 22 自由度（五指\*4 自由度+拇指/小指根部的对掌关节各一个），结合运动学原理，我们判断单手或采用 17 执行器，从而具备更强的灵活性，自由度基本接近人手水平。从细分硬件架构上，预计或有如下变化：

- ✓ **驱动&传动模块**：采用【电机+丝杠】或【电机+减速器+丝杠】方案，集成于前臂，从而为手部预留更多空间，在此背景下，成本更具优势的无刷电机的体积劣势收窄，在手部的用量显著提升。其中蜗杆被负载、定位精度更高的丝杠替代。由于采用外置式方案，腱绳被广泛应用。
- ✓ **感知模块**：根据特斯拉官媒，Optimus 机器人在 Gen3 灵巧手加持下接住飞来的网球，我们预计手掌或新增压力传感器以提升抓握稳定性。

图表10: 特斯拉 Gen3 灵巧手合计 22 自由度



资料来源:《特斯拉灵巧手硬核深度解析》，方正证券研究所

图表11: Optimus 采用 Gen3 灵巧手可抓取飞行中的网球



资料来源: 财联社, 方正证券研究所

百万台量产下，灵巧手市场规模或将超 400 亿元，带动各细分部件需求增长。根据特斯拉 24Q4 业绩会，内部规划 Optimus 于 25 年量产 10000 台并于 26H2 实现对外交付，产能端按 1000 台/月-1 万台/月-10 万台/月的节奏持续推进，在百万台销量背景下，单人成本预计低于 2 万美元。我们认为人形机器人逐步走向量产，规模效应叠加技术工艺优化下，各零部件成本均将显著降低。我们假设 Optimus Gen3 灵巧手采用 17 个电机/丝杠及 34 根腱绳，初步测算得百万台产量下对应灵巧手市场空间 428 亿元，其中电机、丝杠对应规模超百亿元。

图表12: 特斯拉 Optimus Gen3 灵巧手细分零部件价值量及市场空间测算（假设单个机器人采用 2 个灵巧手）

| 核心部件     | 单手用量 | 单价（元） |       | 单手价值量（元） |       | 人形机器人整机不同产量下的市场规模（亿元） |       |
|----------|------|-------|-------|----------|-------|-----------------------|-------|
|          |      | 2万台   | 100万台 | 2万台      | 100万台 | 2万台                   | 100万台 |
| 电机       | 17   | 1000  | 500   | 17000    | 8500  | 6.8                   | 170   |
| 腱绳       | 34   | 100   | 50    | 3400     | 1700  | 1.36                  | 34    |
| 微型丝杠     | 17   | 1000  | 500   | 17000    | 8500  | 6.8                   | 170   |
| 传感器      | -    | 4000  | 2500  | 4000     | 2500  | 1.6                   | 50    |
| 其他（结构件等） | -    | 400   | 200   | 400      | 200   | 0.16                  | 4     |
| 整手       |      |       |       | 41800    | 21400 | 16.72                 | 428   |

资料来源：方正证券研究所

注：现有主流灵巧手方案仍存较大变动、提升空间，以上测算仅供参考

2 驱动系统：电驱方案为主流，空心杯电机及无刷有齿槽电机或为主要选择

驱动系统是力量之源，产生运动和力，在驱动结构、放置方式、方案选型等方面均存在不同技术路线，但当前方案基本采用欠驱动下的电机方案。落实到电机选型上，可选方案包括直流无刷电机、空心杯电机及无框力矩电机，需根据不同场景的需求进行相应配置。

2.1 驱动结构：可分为全驱动/欠驱动结构，欠驱动方案应用更广泛

根据自由度、驱动源数量的关系，灵巧手驱动结构可分为全驱动及欠驱动：

- ✓ **全驱动灵巧手的驱动源数量等于自由度，操作更精巧，但体积、重量、成本存在劣势：**全驱动灵巧手的所有关节均单独配置驱动器，每个手指关节均能独立控制，整手具备更强的精细操作能力。但全驱动结构下，驱动器等硬件零部件用量更大，整手成本更高、结构复杂、体积更大。
- ✓ **欠驱动灵巧手的驱动源数量少于自由度，在牺牲控制精度的情况下实现更优的体积、重量、成本，应用更为广泛：**欠驱动灵巧手存在部分不配置驱动器的关节（多位于手指末端），进行耦合随动。该结构下驱动器少，结构简单下体积相应较小，成本也较低，且抓取包容性好。但对应的，欠驱动灵巧手的控制精度也较低。



图表13:全驱动灵巧手和欠驱动灵巧手对比

|    | 全驱动灵巧手                       | 欠驱动灵巧手                                     |
|----|------------------------------|--------------------------------------------|
| 架构 |                              |                                            |
| 优点 | 每个手指关节都有驱动器，使其能够实现主动控制；精确度高； | 硬件集成度高；整体系统简洁高效、体积小、质量轻；结构相对简单，控制简单；制造成本低； |
| 缺点 | 使手掌体积变大、安装困难、操作复杂；           | 精确度低；可操作性弱；                                |
| 代表 |                              |                                            |

资料来源：吕博瀚《空间机器人多自由度灵巧手关键技术研究》、刘伟等《机器人灵巧手研究综述》等，方正证券研究所

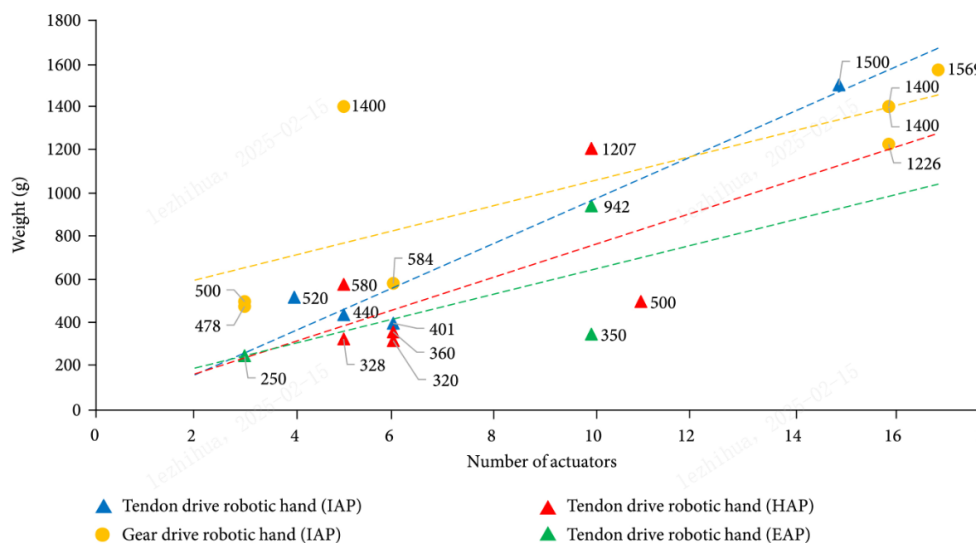
## 2.2 放置方式：外置、混合置或为短期优解

按照驱动系统安装位置的差异，可分为：外置、内置、混合置。在现有电机技术下，内置方案下执行器数量增长往往对应着灵巧手本体重量及体积的增加，因此我们认为短期来看外置、混合置或为较优解，但未来随着驱动/传动系统出现新技术变革，内置亦有广阔发展空间。

- ✓ **外置是早期主要方案，但存在难控制、难维护等问题：**外置方案下，驱动系统安装于灵巧手外部，需要用腱绳连接驱动源与手指末端，可将灵巧手本体做小，采用体积、力矩更大的电机，但传感器难以直接测量手部状态，非模块化设计也导致后期维护困难。
- ✓ **内置随技术发展而逐步应用，但在自由度提升趋势下，可能会导致手部体积、重量的提升：**即驱动系统安装于灵巧手内部，解决了外置存在的系列问题，但手部体积、重量有所提升。
- ✓ **混合置结合内置、外置方案的优点，但仍需采用腱绳传动：**驱动系统在本体及前臂均有安装，此模式下能够结合内置、外置的优势，在提升手指输

出扭矩的同时减少本体体积，但由于部分执行器距离关节的位置较远，仍需采用腱绳传动。

图表14:不同驱动方式下，灵巧手重量与执行器数量正相关



资料来源:《Survey on Main Drive Methods Used in Humanoid Robotic Upper Limbs》, 方正证券研究所

### 2.3 方案选型: 电机驱动更契合灵巧手的需求, 为当前主流方案

- ✓ **电机驱动是当前时点最优方案, 应用最为广泛:** 电机驱动通过电机产生力/力矩, 直接或通过传动机构将力传导至关节促其运动。在电气化率提高背景下, 电能获取及储存相对容易且电-力的转化技术相对成熟, 电机具有输出力矩稳定、精度较高、响应迅速、体积较小等优势, 是当前时点的最优驱动方案, 包括特斯拉、Figure、智元等在内的主流主机厂均采用电机驱动方案。针对人形机器人第一性原理, 电机未来或朝着减重、提功率密度等方向发展。
- ✓ **气压驱动在精度、稳定性、体积存在一定劣势:** 气压驱动通过压缩空气产生的压强差作为动力源, 兼具低成本、操作简易、响应迅速、柔性强等优势, 但气压受温度、海拔等因素影响, 因此精度、稳定性相对受限, 且该方案下的大体积架构不利于远期集成化发展。
- ✓ **液压驱动输出力矩大, 但同样在精度、体积等方面受限:** 液压驱动通过液体介质的静压力作为动力源实现驱动, 输出力矩大。但其在体积、稳定性、液体泄漏/后期维护等方面存在劣势。
- ✓ **形状记忆合金驱动是新兴技术路线, 在灵巧手应用相对较少:** 该方案通过变化温度来对形状记忆合金的形状、机械性能形成影响, 其中镍钛记忆合金材料应用最广泛。其兼具位移大、功率重量比高、方向灵活度高等特点, 但在成本、寿命等方面受限, 更适用于高速/高精度/小负载的装配场景。



图表15:灵巧手不同驱动方式的优缺点

| 驱动方式     | 优点                                                    | 缺点                          |
|----------|-------------------------------------------------------|-----------------------------|
| 电机驱动     | 便于调控，稳定性好，输出力矩稳定；<br>造价低，体积小；<br>运动执行较为精准；            | 质量体积大；<br>成本高；              |
| 气压驱动     | 易于操作、重量轻；<br>造价低；<br>响应速度快；                           | 装配较难；<br>轨迹精度不够；<br>总体体积较大； |
| 液压驱动     | 输出力矩较大；<br>适合大型抓取作业；                                  | 体积大；<br>成本高；<br>控制精度不足；     |
| 形状记忆合金驱动 | 可以较快较强的进行负载驱动；<br>适合小型、高精度机器人装配作业；<br>反应快速，且位移大，变位迅速； | 易疲劳且使用寿命较低；<br>成本高；         |

资料来源：严玺《仿人灵巧手的结构设计及控制研究》、刘伟等《机器人灵巧手研究综述》、蔡世波等《机器人多指灵巧手的研究现状、趋势和挑战》，方正证券研究所

#### 2.4 电机选择：可选方案包括直流无刷电机、空心杯电机及无框力矩电机

用于灵巧手的电机方案主要包括直流无刷电机、空心杯电机及无框力矩电机。

- ✓ **直流无刷电机**使用寿命、成本更优，但响应速度慢、体积大，适用于高功率密度、高负载的场景：其转子结构更稳固，因此在稳定性、寿命更具优势，但其转动惯量较高，因此响应速度慢于空心杯电机。
- ✓ **空心杯电机**的核心优势在响应迅速、能量转换效率高，但成本、输出扭矩存在劣势，适用于快响应、空间/能耗要求高的场景，是当前机器人电驱方案的主要选择：是微型伺服直流电机的一种，其最大特点是采用无铁芯转子，消除铁芯形成涡流而产生的电能损耗影响，同时重量、转动惯量显著更小，在响应速度、功率体积比、运行精度、效率等方面具备优势，能量转换效率普遍超85%。但在输出扭矩等方面较其他两种方案存在劣势，所以常需要行星齿轮箱以提升扭矩，同时其杯型绕组成型工艺复杂，产品良率、成本存在劣势。
- ✓ **无框力矩电机**：其可直接耦合，无需齿轮等传动装置即可驱动负载，具有低转速、大扭矩的优势，较空心杯电机具有一定成本优势。

图表16:空心杯电机、无刷电机及无框力矩电机的性能对比

| 项目    | 无刷空心杯电机                                                            | 直流无刷电机                                                           | 无框力矩电机                                                                    |
|-------|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| 结构    | 采用无铁芯转子，也叫空心杯型转子，属于直流永磁的伺服、控制电动机                                   | 由电动机主体和驱动器组成，电动机的定子绕组通常做成三相对称星形接法，转子上粘有已充磁的永磁体                   | 由转子、定子和力矩控制组件等构成，无外框结构，转子和定子设计特殊，利于实现高精度力矩输出，减少机械限制和转动惯量                  |
| 原理    | 采用的是无铁芯转子，该转子结构彻底消除由于铁芯形成涡流而造成的电能损耗，同时其重量和转动惯量大幅降低。从而减少了转子自身的机械能损耗 | 无刷直流电机由电动机主体和驱动器组成，是一种典型的机电一体化产品，通过电子换向器控制电机的磁场，实现无接触的换向         | 基于电磁感应，精确控制定子绕组电流产生的磁场与转子永磁体磁场相互作用，无框结构优化磁场分布和力矩传递效率                      |
| 效率    | 效率通常在 85%到 90%之间                                                   | 效率可达到 90%以上，部分高性能的直流无刷电机效率能达到 95%左右                              | 一般在 80%-90%左右，受多种因素影响，优化设计可使部分电机达到 90%以上                                  |
| 转速    | 转速非常高，可以达到数万转每分钟                                                   | 可以实现较高的转速，但通常在 10000 转/分钟以下                                      | 通常在每分钟数千转以下，侧重稳定力矩输出，高转速时受散热和机械强度影响                                       |
| 转动惯量  | 转动惯量最低                                                             | 相对较高                                                             | 转动惯量较低，能快速响应力矩变化，实现高精度动态控制                                                |
| 响应速度  | 起动、制动迅速，响应极快，机械时间常数小于 28 毫秒，部分产品可以达到 10 毫秒以内                       | 响应速度相对较慢                                                         | 响应速度极快，能在毫秒级甚至微秒级对控制信号进行精确力矩调整                                            |
| 噪音    | 噪音水平较低                                                             | 噪声较低，没有电刷摩擦和换向电流的噪声                                              | 噪音小，运行平稳，无明显机械振动和电磁噪声                                                     |
| 运行稳定性 | 转速波动很小，作为微型电动机其转速波动易控制在 2%以内                                       | 稳定性好                                                             | 运行稳定，能长时间保持稳定力矩输出，受干扰小，可通过闭环控制提高稳定性                                       |
| 寿命    | 采用无铁芯转子结构，转子强度相对较低，在高速运转或受到较大外力冲击时，可能会出现转子变形、损坏等情况，影响电机正常运行和寿命     | 直流无刷电机的转子结构相对更坚固，能够承受更大的外力和高速旋转产生的离心力，不易发生变形和损坏，因此寿命较长           | 正常使用下寿命较长，但极端工况或长期过载会影响寿命                                                 |
| 控制精度  | 磁场分布相对复杂，使得电机的转矩与电流之间的关系不是简单的线性关系，增加精确控制的难度                        | 磁场分布相对简单，电机的转矩与电流之间的关系比较线性，这使得控制算法能够更准确地根据目标转矩或速度来调节电流，从而实现精确的控制 | 无框力矩电机具备直接耦合特性，加上通常配有的高分辨率绝对值编码器，能够提供极其精确的位置和扭矩控制，几乎不存在背隙问题，因此可以保持极高的控制精度 |
| 功率密度  | 功率体积比最大                                                            | 体积小、重量轻、出力大，功率体积比小于空心杯电机                                         | 功率密度适中，优化功率和体积关系以适应不同场景                                                   |
| 调速范围  | 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，调速范围宽                             | 无级调速，调速范围广                                                       | 调速范围相对较窄，主要工作在低速高精度力矩输出范围，可通过技术扩展调速范围                                     |
| 应用领域  | 精密仪器、医疗设备、消费电子产品、玩具等                                               | 工业自动化、电动汽车、航空航天等                                                 | 机器人关节、高精度自动化设备、航空航天仪器姿态控制等                                                |

资料来源：立鼎产业研究院，WEG 电机官网，电子发烧友，方正证券研究所

### 3 传动系统：腱绳为主流方案，微型丝杠、微型谐波产业进程提速

传动系统将运动和力从驱动系统传导至灵巧手各关节，对灵巧手抓取的稳定性、精度、灵活性具有重要作用。传统系统按传动级别可分为三级。其中一级传动主要用于增强扭矩、提升精度，以蜗轮蜗杆、减速器为主；二级传动包括齿轮、丝杠等；三级传动用于连接关节末端与驱动系统，包括腱绳、连杆等。

传动系统分歧较大，预计腱绳或为未来主要方案，微型丝杠、微型谐波减速器有望随技术成熟而广泛应用。齿轮、连杆、腱绳为传统的传动方式，灵巧手早期广泛应用齿轮、连杆作为传动机构，但二者均存在体积/重量大、柔性程度较差等问题，腱绳成为当前主流方案。而微型丝杠、微型谐波减速器为新兴传动结构，在精度、承载力等方面各具优势，随产业成熟推动降本后或广泛应用。

图表17:灵巧手主流传动方案的定义及优缺点概览

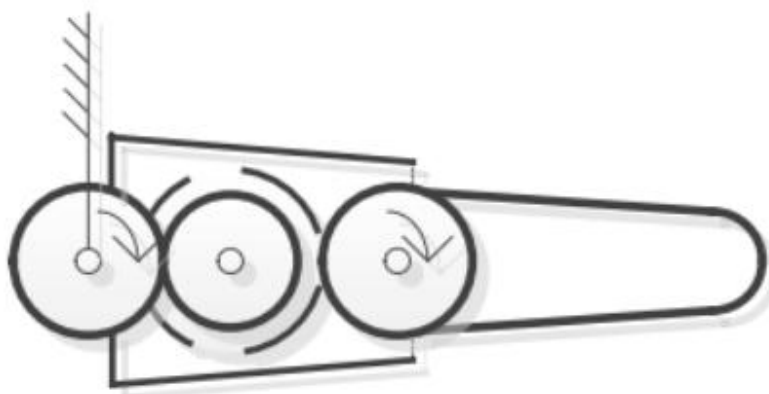
| 传动方式 | 简介                                                          | 优点                                                 | 缺点                           |
|------|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------|
| 连杆传动 | 多用于工业和商业用途，多个连杆串并联混合的使用形式较为常见。                              | 手指的运动和动力由刚性连杆传递，能够抓取大型的物体且结构设计紧凑，可以完成包络抓取。         | 远距离的控制上就比较困难，容易发生弹射，抓取的空间较小。 |
| 齿轮传动 | 通过齿轮或者蜗轮蜗杆将驱动器的旋转运动转换成直线运动，拉动驱动器和手指尖的弹簧来驱动手指产生动作。           | 能获得稳定的传动比，传递效率高，可靠性更强。                             | 齿轮本身的质量加大了整体，的质量和惯性。         |
| 线绳传动 | 线绳在一定程度上模拟了人手的肌腱结构，线绳传动使得大型的驱动器远离了执行机构。                     | 减轻了末端的负载和惯量，提升了抓取的速度，排布灵活，适合空间狭小且需要驱动自由度数目较多的传动场合。 | 带负载能力弱，预紧力变化大，负载越大效率越低等。     |
| 丝杠传动 | 电机和滚珠丝杠外置于手臂中，电机通过减速器带动滚珠丝杠，电机轴的旋转运动被转化为丝杠螺母的平移运动，丝杠螺母拉动腱绳。 | 高传动效率、高精度、长寿命。                                     | 成本较高、结构较复杂、自重较大。             |

资料来源：刘伟等《机器人灵巧手研究综述》，方正证券研究所

### 3.1 齿轮/连杆传动：传统的传动方案，存在重量/体积大等问题

**齿轮传动兼具稳定性、精度、寿命等优势，但重量、成本较高。**原理是将电机旋转经由齿轮传动化为直线运动，再通过拉动弹簧来驱动手指运动，在工业机器人等领域广泛应用。其具有精准度高、稳定性强、寿命高等优势，但结构复杂使得重量、成本较高。根据齿形不同，齿轮可分为直齿轮、锥齿轮和涡轮，其中直齿轮应用最广泛、安装最容易，可实现较大的减速比和扭矩比；锥齿轮可改变传动方向，有传动平稳、噪音小、承载力强等优势；涡轮的核心优势在于在实现最小空间的同事实现较大的运动传动比，且兼具自锁性。

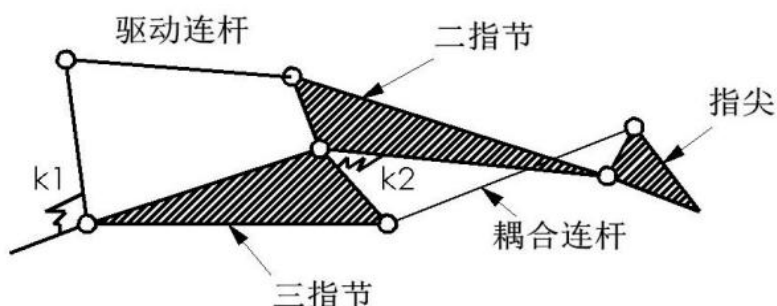
图表18: 齿轮传动原理



资料来源：严奎《仿人灵巧手的结构设计及控制研究》，方正证券研究所

连杆抓取速度较快、承载能力大，但结构复杂、柔性化程度较低。部件包括直线的驱动连杆和耦合连杆，以及复位弹簧，原理是通过多个连杆串并联的形式传递力和运动，在工业、商业（如假肢）等领域均有应用。由于传动部件为连杆，因此其刚性较强，此外还兼具抓取速度快等优势。但其结构复杂、柔性化不足。

图表19: 连杆传动原理



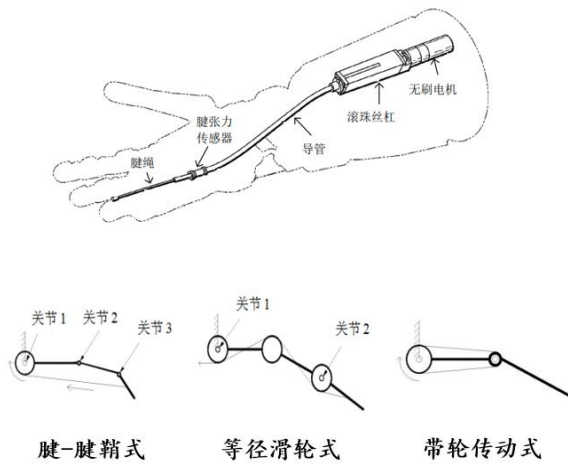
资料来源：严奎《仿人灵巧手的结构设计及控制研究》，方正证券研究所

### 3.2 腱绳传动：多自由度趋势下的必然选择，有望随材料性能提升而广泛应用

腱绳兼具远距传动、灵活柔性等优势，可为传感器等部件预留更多空间，是当前应用较多的传动方案，但在寿命、负载、精度等方面尚存较大改善空间，或搭配其他传动机构以实现更优的综合效果。在腱绳传动中，通过丝杠将电机旋转运动化为直线运动，腱绳一段拉着丝杠螺母，另一端连接灵巧手手指，从而实现手指绕关节轴的转动。腱绳传动方案下驱动器与执行器可保持较远距离，减轻执行器末端的负载和惯量，同时手指运动的柔性程度较好。此外，腱绳可与丝杠、蜗轮蜗杆等其他传动方案配合使用，实现小空间下的多自由度运动。但腱绳在负载、执行精度、寿命等方面有较大提升空间，且预紧力不稳。



图表20:腱绳传动原理



图表21:腱绳驱动方案在灵巧手中广泛应用



资料来源：韩如雪《腱驱动空间多指灵巧手感知与控制关键技术研究》、严玺《仿人灵巧手的结构设计及控制研究》，方正证券研究所

资料来源：刘伟等《机器人灵巧手研究综述》，方正证券研究所

图表22: 代表性灵巧手多采用腱绳传动

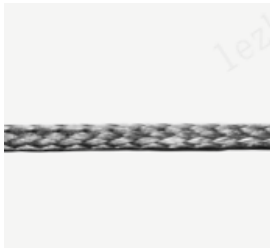
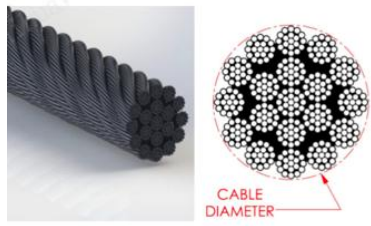
| 时 间  | 灵巧手                    | 手指数 | 自由度数 | 传动形式  | 驱动方式 | 驱动位置 |
|------|------------------------|-----|------|-------|------|------|
| 1974 | Okada Hand             | 3   | 11   | 腱绳    | 腱驱动  | 外置   |
| 1983 | Utah/MIT Hand          | 4   | 16   | 腱绳    | 腱驱动  | 外置   |
| 1984 | Stanford/JPL Hand      | 3   | 9    | 腱绳    | 腱驱动  | 外置   |
| 1988 | Barret Hand            | 3   | 4    | 齿轮    | 直接驱动 | 内置   |
| 1992 | UB-11 Hand             | 3   | 11   | 腱绳    | 腱驱动  | 外置   |
| 1998 | DLR-I Hand             | 4   | 12   | 腱绳    | 腱驱动  | 外置   |
| 1998 | DIST Hand              | 4   | 16   | 腱绳    | 腱驱动  | 外置   |
| 1998 | BH-3 Hand              | 3   | 9    | 腱绳    | 腱驱动  | 内置   |
| 1999 | Tokyo Hand             | 5   | 12   | 腱绳    | 腱驱动  | 外置   |
| 2000 | DLR- II Hand           | 4   | 13   | 齿形带   | 腱驱动  | 内置   |
| 2000 | Ultralight Hand        | 5   | 13   | 齿轮    | 直接驱动 | 内置   |
| 2001 | GIFU- II Hand          | 5   | 16   | 齿轮    | 直接驱动 | 内置   |
| 2001 | BH-4 Hand              | 4   | 16   | 腱绳    | 腱驱动  | 内置   |
| 2004 | UBH3 Hand              | 5   | 24   | 腱绳    | 腱驱动  | 外置   |
| 2004 | HIT/DLR-I Hand         | 4   | 13   | 齿轮    | 直接驱动 | 内置   |
| 2004 | Shadow Hand            | 5   | 21   | 腱绳    | 腱驱动  | 外置   |
| 2009 | HIT/DLR- II Hand       | 5   | 15   | 腱绳    | 腱驱动  | 内置   |
| 2009 | TWENDY-ONE Hand        | 4   | 13   | 齿轮+连杆 | 直接驱动 | 内置   |
| 2010 | DLR HASy Hand          | 5   | 19   | 腱绳    | 腱驱动  | 外置   |
| 2014 | RoboRay Hand           | 5   | 12   | 腱绳    | 腱驱动  | 外置   |
| 2014 | The CEA dexterous Hand | 5   | 20   | 腱绳    | 腱驱动  | 内置   |

资料来源: 孙成远《腱驱动灵巧手指结构设计及其运动分析与试验》, 方正证券研究所

灵巧手腱绳材料主要包括高分子材料和不锈钢材料:

- ✓ **高分子材料**(超高分子量聚乙烯纤维/UHMWPE) 综合性能相对较强, 应用更多, 但成本相对较高。包括 Dyneema 和 Spectra 两类材料, 其兼具长寿命(高强度、耐磨损/腐蚀)、重量低等优势, 但成本较高, 且易发生形变。领先的材料供应商包括荷兰 DSM、美国 Honeywell 等。
- ✓ **不锈钢材料**性能相对偏弱, 技术工艺提升后有望广泛应用于机器人领域。历史上不锈钢腱绳成本相对较低, 但存在寿命较低、安全性差等缺陷, 在灵巧手中的应用相对较少。而以大业股份为代表的厂商正积极研发超高强度、超高扭转、超高延伸为特点的特种钢丝材料, 有望于灵巧手中得到广泛应用。

图表23:灵巧手主流腱绳材料性能对比

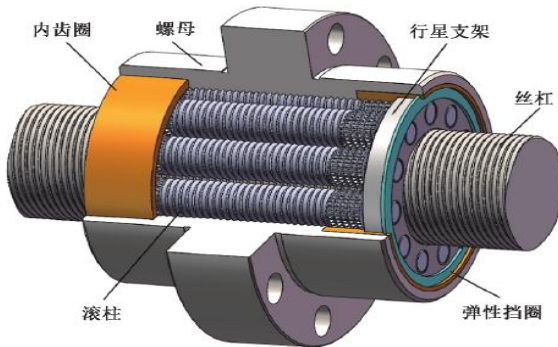
| 性能指标 | UHMWPE (Dyneema/Spectra)                                                          | 钢丝绳                                                                                 |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 图例   |  |  |
| 安全性  | 安全性高，以线性方式断裂                                                                      | 低于高分子纤维绳                                                                            |
| 强度   | 高，同重量下是钢丝的 15 倍                                                                   | 相对较低，同直径下最大载荷低于高分子纤维绳                                                               |
| 重量   | 轻，具有低密度特性                                                                         | 较重，密度高                                                                              |
| 耐磨性  | 优异，适用于耐磨应用                                                                        | 良好                                                                                  |
| 拉伸性  | 低拉伸性，操作平稳                                                                         | -                                                                                   |
| 耐化学性 | 高，能抵御潮湿、紫外光与化学试剂的侵蚀                                                               | 中等，易受腐蚀影响                                                                           |
| 成本   | 当前较高                                                                              | 相对较低                                                                                |
| 耐水性  | 防水，能浮于水面                                                                          | 一般，易受水分影响                                                                           |
| 耐疲劳性 | 优异，适合长期高负载运行                                                                      | 中等，易出现疲劳断裂                                                                          |
| 耐温性  | 熔点相对较低(约 138℃)，并且在极低温度下没有脆点，无法保持性能                                                | 耐温性较好，但易受高温影响                                                                       |
| 抗蠕变性 | 较差，易发生形变                                                                          | 较好，但长期负载下可能发生蠕变                                                                     |

数据来源：李柏毅《腱传动灵巧手指的传动分析与结构设计》，贝泽精密公司官网，accessropes，方正证券研究所

### 3.3 丝杠/减速器传动：手部传动新方向，产业进程持续推进

行星滚柱丝杠兼具高承载、高精度、长寿命、小体积等优势，非常契合人形机器人场景应用，但降本诉求迫切。根据滑动方式不同，丝杠可分为梯形丝杠、滚珠丝杠、行星滚柱丝杠，其中行星滚柱丝杠在主丝杠周围放置若干行星滚子，在作业过程中显著提升受力面积，因此兼具高承载、高精度、高效率、高可靠性、小体积等优势，在空间紧凑的人形机器人上或广泛应用。但其产业化进程尚需推进，在生产效率、成本等方面亟待优化。近年来，贝斯特、北特科技、五洲新春、双林股份等厂商积极布局丝杠业务，加速其产业化落地。

图表24:行星滚柱丝杠结构图例



资料来源:《行星滚柱丝杠电动缸应用现状》, 方正证券研究所

图表25:三类丝杠性能对比

|            | 梯形丝杠             | 滚珠丝杠         | 行星滚柱丝杠          |
|------------|------------------|--------------|-----------------|
| 摩擦方式       | 滑动摩擦             | 滚动摩擦         | 滚动摩擦            |
| 自锁性        | 有                | 无            | 无               |
| 噪音指标       |                  | 较低           | 很低              |
| 导程精度       | 低, 品质参差不齐        | 较高, 通常为毫米级   | 高, 可达微米级        |
| 微进给        | 难以实现, 滑动运动存在爬行现象 | 可实现          | 可实现             |
| 运动平稳性      |                  | 滚珠易冲击, 平稳性较弱 | 平稳              |
| 传动效率       | 26%-46%          | 90%-96%      | 90% (润滑良好时)     |
| 相对成本       | M                | M*(2~3)      | M*(3~5)         |
| 相对寿命       | <<M              | M            | 15M             |
| 相对体积 (同载荷) |                  | M            | 2/3*M           |
| 相对动载       | <M               | M            | >3M             |
| 相对静载       |                  | M            | 3M              |
| 相对旋转速度     |                  | M            | 2M              |
| 工作环境温度范围   |                  | M            | 2M              |
| 应用场景       | 工作要求低的场景         | 需要精密传动的场景    | 高负载、高精度、工况恶劣的场景 |
| 加工及装配工艺性   |                  | 简单           | 复杂              |
| 国产化率       | 高                | 超60%         | 很低              |

资料来源:《行星滚柱丝杠电动缸应用现状》, 《E公司滚柱丝杠产品营销策略研究》, 《精密行星滚柱丝杠副行程误差影响因素试验研究》等, 方正证券研究所

注:表中“M”为便于对比的相对指标

图表26:国内外厂商积极围绕丝杠进行布局

| 供应商  | 国家 | 产品类型        | 产品详情及进度情况                                                             |
|------|----|-------------|-----------------------------------------------------------------------|
| 新剑传动 | 中国 | 灵巧手微分行星滚柱丝杠 | 高承载、长寿命, 可确保直线型电驱动关节的稳定性和可靠性, 使仿生手臂关节更加集成、体积更小, 更具仿生肌肉收缩的特征           |
| 舍弗勒  | 德国 | 行星滚柱丝杠、滚珠丝杠 | 行星滚柱丝杠在 5-25 mm 的范围内实现了最高的功率密度, 滚珠丝杠实施高精度机械装置                         |
| 五洲新春 | 中国 | 灵巧手微型丝杠     | 公司已成功开发出灵巧手微型丝杠产品, 目前灵巧手方面尚未批量供货                                      |
| 贝斯特  | 中国 | 行星滚柱丝杠      | 应用于人形机器人的行星滚柱丝杠工艺不断优化, 已为 2025 年批量供货做好了技术和设备储备                        |
| 双林股份 | 中国 | 行星滚柱丝杠      | 滚柱丝杠产品样品已研发完成, 正处于客户验证阶段, 目前尚未实现营业收入                                  |
| 北特科技 | 中国 | 行星滚柱丝杠      | 公司已在上海嘉定工厂建设了行星滚柱丝杠小批量产线并完成了相关设备的安装调试, 将独立完成生产工序。公司正在推进行星滚柱丝杠研发生产基地项目 |
| 长盛轴承 | 中国 | 滚珠丝杠        | 滚珠丝杠产品可应用于汽车及机器人领域, 部分产品已实现小批量生产销售                                    |
| 鼎智科技 | 中国 | 微型行星滚柱丝杠    | 公司在微型行星滚柱丝杠的研发方面已取得进展                                                 |

资料来源:新剑传动公众号, 舍弗勒公司官网, 各公司公告, 方正证券研究所

微型谐波减速器精度较高、减速比大(可助力增加输出扭矩), 但技术成熟度相对较低, 行业领先企业已纷纷入局。相较于齿轮、行星减速器等方案, 其精度高、体积小、减速比大, 但技术成熟度相对较低, 产业亟待进一步成熟以实现降本。边际上, 哈默纳科、绿的谐波等谐波减速器领先企业正积极加码微型谐波减速器的相关研发, 绿的谐波已推出针对手指关节的 6mm 外径谐波减速器;



哈默纳科于 2023 年东京国际机器人展览会展出搭载微型谐波减速器的灵巧手方案，直径低至 5mm。

图表27:减速器类别及各自特点

| 减速器类别  | 结构特点                                                    | 优点                                              | 缺点                    | 应用领域                               |
|--------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------|------------------------------------|
| 行星减速器  | 体积小，主要包括行星轮、太阳轮和内齿圈。精密行星减速器单级传动比都在 10 以内，且减速级数一般不超过 3 级 | 扭矩大、精度高达 1' 以内、单级传动效率高达 97%、重量轻、寿命可长达 2 万小时、免保养 | 单级传动比范围小              | 移动机器人、新能源设备、高端机床、智能交通等行业的精密传动装置    |
| 谐波减速器  | 由柔轮、刚轮、波发生器三个核心零部件组成，通过柔轮的弹性变形传递运动。使用的材料、体积及重量大幅下降      | 传动精度高、重量和体积小、运转平稳、传动比高                          | 传递扭矩相对较小，传动效率低、使用寿命有限 | 主要应用于机器人小臂腕部或手部、航空航天、精密加工设备和医疗设备领域 |
| RV 减速器 | 包括两级传动装置，分别为渐开线行星齿轮传动和摆线针轮行星传动，零部件较多                    | 传动比范围广，传动效率高，传动平稳性高，承载能力强，刚性和耐过载冲击性能好，传动精度高     | 结构复杂、制造难度大、成本高        | 机器人中负载较重的机座、大臂、肩部等大关节              |

资料来源：各公司公告，方正证券研究所

图表28:谐波减速器重要供应商概览

| 供应商  | 减速器类型 | 产品客户                                                              | 产品特点                                                          |
|------|-------|-------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 哈默纳科 | 谐波减速器 | 特斯拉、东京大学等                                                         | 高精度、轻量化、紧凑型谐波减速器，能够满足不同负载和精度需求                                |
| 绿的谐波 | 谐波减速器 | 新松机器人、华数机器人、新时达、埃夫特、广州数控、遨博智能、亿嘉和、埃斯顿、优必选、配天技术、Universal Robots 等 | 超长寿命、超轻超小型、精度保持寿命国际领先、大承载、高效率、抗冲击能力强                          |
| 来福谐波 | 谐波减速器 | 图灵机器人、尔必地机器人、大族机器人、华数机器人、珞石机器人、节卡机器人、遨博智能等                        | 杯型结构、轻量化结构、无齿隙、输入输出同轴、优良的定位精度和旋转精度                            |
| 昊志机电 | 谐波减速器 | 大族机器人、湖南沁峰机器人、广州数控、深圳众为兴等                                         | 高精度、使用寿命长、体积小、重量轻、传动平稳、承载力大、扭动刚性大、振动小、耐冲击，产品的精度及寿命能够与世界一流品牌竞争 |

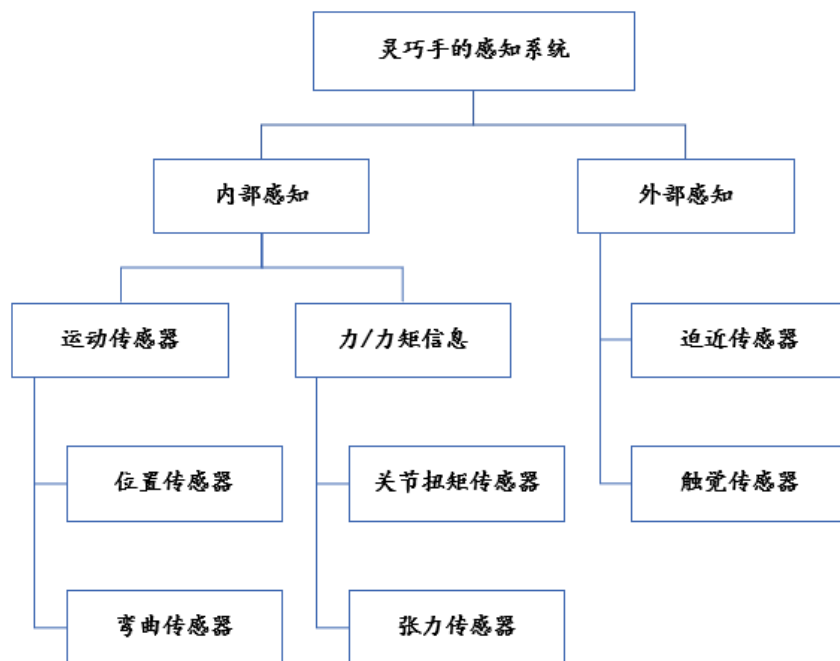
资料来源：哈默纳科官网，各公司公告等，方正证券研究所

#### 4 感知系统：灵巧手智能化的重要基础，产业发展迈入快车道

感知系统是灵巧手接触外界环境信息的重要桥梁，助力机器人做出更优行动，向着多区域/柔性化、多模态发展。按照感知区域划分，灵巧手传感器可分为内部传感器及外部传感器：

- ✓ **内部传感器**用于感知灵巧手自身状态，包括力矩/位置/弯曲传感器。力矩传感器用于感知关节扭矩以对抓取力度大小进行更精准的掌控；位置传感器多采用编码器、霍尔效应传感器；弯曲传感器用于感知关节的转动角度，提升灵巧手运动的控制精度。
- ✓ **外部传感器**用于感知外界环境，包括接近觉/触觉传感器。接近觉传感器用于在触碰之前感知物件与灵巧手的相对位置，而触觉传感器用于感知物件反作用力、质地、温度等信息。

图表29:灵巧手的感知系统概览



资料来源: Ziwei Xia 《Dexhand a Space qualified multi-fingered robotic hand》, 方正证券研究所

#### 4.1 力传感器: 技术逐步走向成熟, 多用于指尖、腕部等

力传感器助力力控精度提升, 可分为一至六维力传感器。力传感器用于将测量得到的力矩转化为电信号, 可感知张力、压力、重量、扭矩等力学量, 提升力控精确度。按测量方向的数量, 可分为一至六维力传感器。其中六维力传感器可同时测量三个轴向力及三个轴向力矩, 性能最优但制备壁垒、定价最高, 在人形机器人中多用于手腕、脚踝处, 而一维力传感器多用于内部关节处。

六维力传感器广泛用于汽车、航空航天等领域, 可为机器人提供更精准的力感信息, 提升其柔顺控制水平。力传感器是将力的量值转换为电信号的器件。根据感力原件的不同, 传感器可分为应变式/光学式/压电/电容式力传感器, 目前市场主要应用应变式方案, 其他方案有一定理论研究, 但尚未广泛应用。六维力传感器壁垒最高, 性能最优异。目前六维力/力矩传感器主要应用于机器人、汽车、航空航天、生物医学等领域。六维力/力矩传感器或应用于人形机器人的手、足部位, 为机器人的力控制和运动控制提供力感信息, 助力其提升柔顺化、智能化控制水平。从长周期维度来看, 随着算法迭代优化, 六维力传感器在人形机器人上的用量或存在一定分歧, 但我们认为在短期层面六维力传感器仍将是机器人的重要组成部分。

图表30: 六维力/力矩传感器在机器人领域的应用

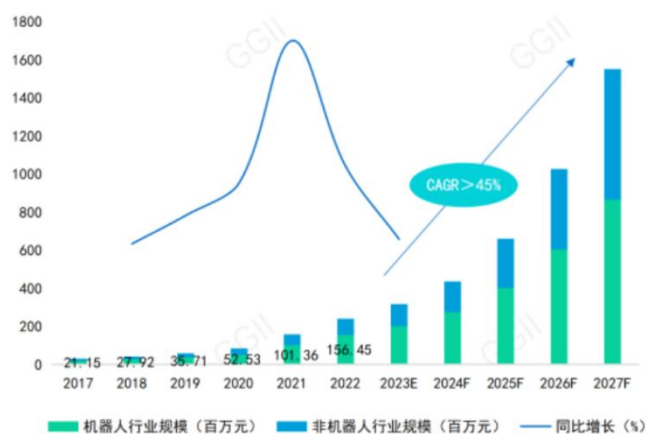


资料来源：高工机器人产业研究所 (GGII)，方正证券研究所

我国六维力传感器市场规模较小，未来或维持高增。根据 GGII，2022 年我国六维力/力矩传感器市场规模同比增 52%至 2.39 亿元，其中来自机器人的需求规模达 1.56 亿元。未来随着应用领域拓展叠加入局者增加，预计到 2027 年，我国六维力/力矩传感器市场将以超 45%的 CAGR 增至超 15 亿元，产品矩阵及单价或进一步优化。

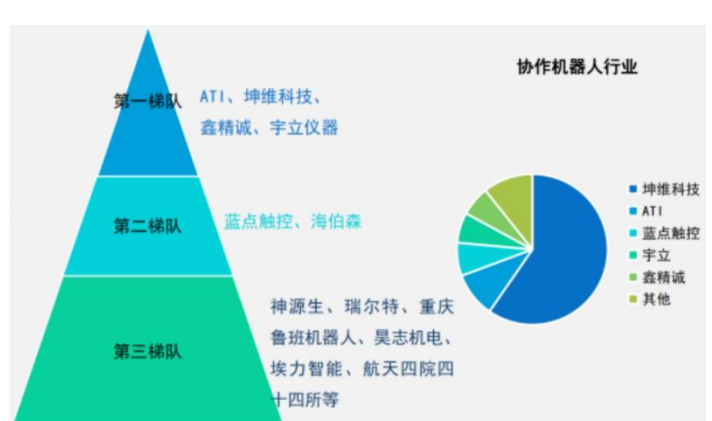
六维力传感器壁垒高，主要由海外主导，国内如坤维科技等企业积极发展。受限于高壁垒，目前六维力/力矩传感器市场仍由 ATI、ROBOTOUS 等海外企业主导，国内具备批量产品供应的企业较少，国内企业主要包括坤维科技、鑫精诚、宇立仪器、蓝点触控、海伯森、昊志机电等。其中宇立产品主要应用于机器人磨抛、汽车碰撞测试等领域，坤维科技在协作机器人、医疗手术机器人、航空航天等领域具备优势，鑫精诚以苹果供应链身份将其产品推广至 3C，在机器人、医疗行业也有布局。其他如柯力传感、东华测试等上市公司也在凭借技术积淀积极推进研发及客户送样进程。

图表31: 我国六维力/力矩传感器市场规模预计维持高增



资料来源：高工机器人产业研究所 (GGII)，方正证券研究所

图表32: 2022 年我国六维力传感器竞争格局 (以销量划分)



资料来源：高工机器人产业研究所 (GGII)，方正证券研究所

#### 4.2 触觉传感器：已有少量应用，产业进程迈入快车道

电子皮肤从泛用性及仿生性角度可能是机器人触觉的终极方案。柔性触觉传感器由柔性材料制成，具备良好延展性、柔韧性，结构形式多样，在医疗电子、机器人、3C 等领域具良好应用前景。根据感知原理的差异，柔性触觉传感器可分为电容式/压阻式/光电式/压电式/磁敏式/超声式传感器，其中电容式/压阻式/压电式传感器应用较为广泛。电子皮肤可实现温度、湿度、压力等多功能感知能力，是触觉传感器的“升级版”。在特斯拉第二代 Optimus 机器人的宣传视频中，其灵巧手搭载触觉传感器，完成精准捏住鸡蛋的操作。未来 Optimus 机器人手指、面部等部位或搭载电子皮肤以获得更优秀的感知交互能力。

国内外企业及院校均积极开展电子皮肤相关研究，其产业化进程或迈入快车道。根据汉威科技公众号，预计 2021-2028 年全球柔性传感器市场规模年复合增速达 6.8%，2028 年可达 84.7 亿美元。目前 MIT、清华大学等科研院校积极就柔性传感器、电子皮肤开展相关研究，国内如能斯达、三三智能均有产品落地。

图表33:Optimus-Gen2 手指均内置触觉传感器



图表34: 柔性触觉传感器各敏感机理优缺点对比

| 传感技术 | 调节参数 | 优点                      | 缺点                     |
|------|------|-------------------------|------------------------|
| 电容式  | 电容值  | 灵敏度高、空间分辨率高、动态范围大       | 存在寄生电容、对噪声敏感、测量电路复杂    |
| 压阻式  | 电阻值  | 频率响应高、空间分辨率高、噪音干扰小、易结构化 | 可重复性差、迟滞、功率消耗高、工艺复杂    |
| 压电式  | 电荷   | 频率响应高、灵敏度高、可靠性高、动态范围大   | 空间分辨率差，测量电路复杂，仅适用动态检测  |
| 光电式  | 光强度  | 空间分辨率高、无电气干扰、响应速度快、成本低  | 整体结构缺乏柔性，对弹性体依赖性较强     |
| 磁敏式  | 磁场强度 | 灵敏度高，体积小                | 结构设计复杂，分辨率低            |
| 超声式  | 超声波  | 空间分辨率高，不受电磁干扰           | 布线困难，存在滞后和非线性，易受外部超声干扰 |

资料来源：特斯拉官方媒体，方正证券研究所

资料来源：《柔性触觉传感器在机器人上的应用综述》，方正证券研究所

#### 5 投资建议：

2025 年为人形机器人量产元年，远期空间广阔。灵巧手是人形机器人对外交互的重要硬件模块，兼具高价值量及高壁垒，其性能提升是人形机器人迭代升级的重要方向，未来不乏新方案、新进展。建议关注：

- ✓ 电机：鸣志电器、兆威机电、雷赛智能、鼎智科技、拓邦股份、伟创电气、禾川科技、步科股份；
- ✓ 减速器：绿的谐波、双环传动、斯菱股份、中大力德、豪能股份、国茂股份；
- ✓ 丝杠：恒立液压、北特科技、贝斯特、五洲新春、震裕科技、双林股份；
- ✓ 腱绳：大业股份；
- ✓ 传感器：柯力传感、东华测试、华依科技、安培龙、敏芯股份、华培动力、汉威科技。

#### 6 风险提示：



**（1）人形机器人终端应用落地不及预期：**人形机器人当前尚未存在明确的应用场景，尽管已有部分主机厂在各类不同场景进行试验性运行，但若在作业效率、运行稳定性等方面未能满足需求，则对产业链相关公司可能会有不利影响。

**（2）人形机器人核心部件降本进程不及预期：**当前人形机器人核心硬件成本相对较高，部分环节在良率、生产效率等方面存在一定供给约束，若技术提升及降本进程不及预期，则高昂的整机造价可能影响销售。

**（3）机器人大小脑训练进程不及预期：**人形机器人是具身智能的最佳载体，要实现多样化的功能需要大小脑训练等软件端的持续推进。

## 分析师声明

作者具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格，保证报告所采用的数据和信息均来自公开合规渠道，分析逻辑基于作者的职业理解，本报告清晰准确地反映了作者的研究观点，力求独立、客观和公正，结论不受任何第三方的授意或影响。研究报告对所涉及的证券或发行人的评价是分析师本人通过财务分析预测、数量化方法、或行业比较分析所得出的结论，但使用以上信息和分析方法存在局限性。特此声明。

## 免责声明

本研究报告由方正证券制作及在中国（香港和澳门特别行政区、台湾省除外）发布。根据《证券期货投资者适当性管理办法》，本报告内容仅供我公司适当性评级为 C3 及以上等级的投资者使用，本公司不会因接收人收到本报告而视其为本公司的当然客户。若您并非前述等级的投资者，为保证服务质量、控制风险，请勿订阅本报告中的信息，本资料难以设置访问权限，若给您造成不便，敬请谅解。

在任何情况下，本报告的内容不构成对任何人的投资建议，也没有考虑到个别客户特殊的投资目标、财务状况或需求，方正证券不对任何人因使用本报告所载任何内容所引致的任何损失负任何责任，投资者需自行承担风险。

本报告版权仅为方正证券所有，本公司对本报告保留一切法律权利。未经本公司事先书面授权，任何机构或个人不得以任何形式复制、转发或公开传播本报告的全部或部分内容，不得将报告内容作为诉讼、仲裁、传媒所引用之证明或依据，不得用于营利或用于未经允许的其它用途。如需引用、刊发或转载本报告，需注明出处且不得进行任何有悖原意的引用、删节和修改。

## 评级说明：

| 类别     | 评级   | 说明                                             |
|--------|------|------------------------------------------------|
| 公司评级   | 强烈推荐 | 分析师预测未来12个月内相对同期基准指数有20%以上的涨幅。                 |
|        | 推荐   | 分析师预测未来12个月内相对同期基准指数有10%以上的涨幅。                 |
|        | 中性   | 分析师预测未来12个月内相对同期基准指数在-10%和10%之间波动。             |
|        | 减持   | 分析师预测未来12个月内相对同期基准指数有10%以上的跌幅。                 |
| 行业评级   | 推荐   | 分析师预测未来12个月内行业表现强于同期基准指数。                      |
|        | 中性   | 分析师预测未来12个月内行业表现与同期基准指数持平。                     |
|        | 减持   | 分析师预测未来12个月内行业表现弱于同期基准指数。                      |
| 基准指数说明 |      | A股市场以沪深300 指数为基准；香港市场以恒生指数为基准，美股市场以标普500指数为基准。 |

## 方正证券研究所联系方式：

北京：朝阳区朝阳门南大街 10 号兆泰国际中心 A 座 17 层

上海：静安区延平路71号延平大厦2楼

深圳：福田区竹子林紫竹七道光银行大厦31层

广州：天河区兴盛路12号楼隼峰苑2期3层方正证券

长沙：天心区湘江中路二段36号华远国际中心37层

网址：<https://www.foundersc.com>

E-mail：yjzx@foundersc.com