下载日志已记录，仅供内部参考

财通证券 CAITONG SECURITIES

人形机器人系列研究二（灵巧手）

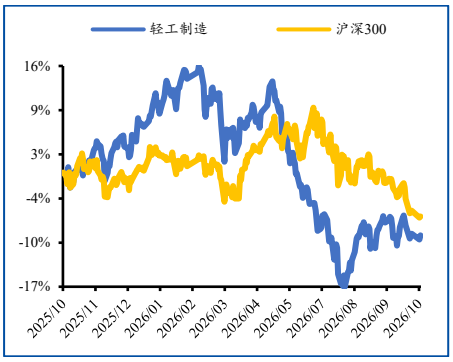
轻工制造

证券研究报告

行业专题报告 / 2026.10.10

投资评级:看好（维持）

最近 12 月市场表现



分析师 孙谦
SAC 证书编号：S0160525060001
sunqian@ctsec.com

分析师 邢瀚文
SAC 证书编号：S0160525050001
xinghw@ctsec.com

分析师 戚志圣
SAC 证书编号：S0160525110003
qizs@ctsec.com

分析师 赵嘉宁
SAC 证书编号：S0160525120004
zhaojn@ctsec.com

分析师 谢铭
SAC 证书编号：S0160523010001
xieming@ctsec.com

相关报告

1. 《人形机器人系列研究一（大丝杠）》2026-08-25
2. 《轻工纺服 2026 年二季度前瞻报告》2026-08-04
3. 《2026 轻工聚焦品效&纺服关注国内量价》 2026-04-06

从参数比拼到场景落地，规模化发展关键期

核心观点

- **灵巧手：通用交互核心载体，产业初启框架渐成。**灵巧手是具身智能的通用交互核心载体，凭借无外部支撑下的手内操纵能力形成与传统夹爪的核心差异，二者将长期互补共存。当前国内灵巧手产业处规模化早期，据高工产业研究院，2025 年销量约 1.92 万只且增速显著。全球灵巧手已形成三级价格梯队，入门级 1 万元以内（eg.灵心巧手 O7 入门款 0.88 万元）、工业中端 1-5 万元（eg.兆威机电 DM17 不带触觉/带触觉为 4/5 万元）、科研高端级 5 万元及以上（eg.Shadow 产品超 10 万瑞士法郎、Wonik 产品约 1.9 万美元，灵心巧手 O30 切入 5.9-6.9 万元价格带），伴随国产供应链突破与规模化放量价格中枢有望持续下移。成本端，灵巧手约占人形机器人整机成本的 14%，其 BOM 成本以驱动系统为核心（微型电机占比达 38%，海外厂商占主导、国产替代加速推进），触觉传感为第二大成本项（占比超 25%），传动系统成本随技术方案差异显著。

- **技术架构：多维架构组合，非单一路线。**灵巧手无脱离应用场景的单一最优架构，性能由驱动源、驱动器位置、传动方式、驱动程度、感知控制五大维度协同决定，量产产品普遍采用混合架构。当前电机为主流动力源，驱动器有指关节、掌内、前臂三类布置路径，分别在传动响应、系统集成度、自由度密度上各有取舍。

- **技术路线：传动路线各具优劣，感知闭环价值凸显。**灵巧手传动路线呈现多元技术并行、分层适配场景的发展格局，丝杠、腱绳、纯电机驱动三大主流路线与液压、人工肌肉、气动、形状记忆合金等新型探索路线，在承载精度、轻量化、独立控制与柔顺交互等核心维度各有技术取舍，分别适配工业重载、高自由度仿人、模块化集成及仿生柔顺等差异化应用需求，海内外已逐步形成分层配套的零部件供应链体系。同时，行业竞争正由机械执行能力向“感知-控制-数据”一体化延伸，多模态数据闭环成为长期核心竞争壁垒。

- **展望：顶层政策指引&行业标准落地，推动产业进入规范化发展。**近年来行业融资规模持续增长，但产业仍处发展早期，面临性能、成本、稳定性的平衡难题。行业评价标准已从硬件参数比拼转向真实场景作业能力，依托本体矩阵与高保真数据采集的双轮驱动，头部制造企业工艺赋能，产业有望逐步突破量产瓶颈并打通商业化落地闭环。

- **建议关注：1）整机自研一体化**：宇树科技（复合刚性传动+整机生态）、Tesla（欠驱腱绳绑定 Optimus 量产）等；**2）独立外售平台：**雷赛智能（蜗杆/丝杠多传动路线）等；**3）零部件企业延伸：**兆威机电（滚珠丝杠动力链整手集成）、舍弗勒（精密制造向系统级模组延伸）；**4）核心上游环节：**电机（鸣志电器、兆威机电、雷赛智能、江苏雷利/鼎智科技等），滚柱丝杠（北特科技、五洲新春、新坐标、双林股份等），腱绳（南山智尚、恒辉安防等）。

- **风险提示：**技术路线迭代与选型风险；规模化量产不及预期风险；核心零部件降本不及预期风险；市场竞争加剧风险；下游应用场景拓展不及预期风险。

下载日志已记录，仅供内部参考

内容目录

1 灵巧手：通用交互核心载体，产业初启框架渐成 5
1.1 什么是灵巧手：聚焦物体行为，四系统协同机电一体化 5
1.2 成本结构：驱动与传动为核心，丝杠与触觉价值量居前 6
1.3 灵巧手 vs 传统夹爪：灵巧手以柔顺见长，夹爪重载刚性&成本占优 7
1.4 销量高增&价格梯队清晰，产业循序迈向规模化 8
1.4.1 量：行业规模快速扩容，供给端能力持续提升 8
1.4.2 价：价格梯队分层清晰，国产化加速价格下探 9
1.4.3 产业化进展：核心约束尚存，限定性通用先行逐步规模化 10
1.5 评价体系：性能精度和力控可靠性，场景分级明确落地标尺 11
2 技术架构：多维架构组合，非单一路线 12
2.1 驱动源和驱动器位置：电机驱动为主流，三类布置位置各有权衡 13
2.2 传动方式与驱动程度：性能上限与系统复杂度的权衡 15
2.3 感知与控制：感知定参数、控制定成败，数据入口延展竞争边界 16
2.4 典型架构组合：不同产品形态对应差异化应用定位 17
3 技术路线：传动路线各具优劣，感知闭环价值凸显 17
3.1 路线一：丝杠方案（电机+微型丝杠直线传动） 18
3.2 路线二：腱绳传动方案 20
3.3 路线三：纯电机驱动方案（直驱/微型齿轮箱+刚性传动） 23
3.4 其他方案：液压、人工肌肉、气动、SMA 等 24
4 感知与数据：触觉由硬件配置走向控制闭环 25
5 企业：多主体多路线并行，海内外产业格局分化 26
5.1 海外企业：整机/科研/零部件并行，共筑海外灵巧手产业生态 26
5.2 国内公司：整机/外售/传动延伸，国内产业梯队清晰 28
6 展望：政策标准筑牢产业底座，技术市场共振加速规模化落地 32
6.1 政策与标准底座：顶层设计引领产业规范化发展 32
6.2 市场扩容与技术共振：头部集聚加速降本，手脑协同破解量产瓶颈 33
6.3 场景与生态拓宽：跨越“最后一厘米”，重塑实体经济 33
7 风险提示 33

图表目录

图 1：多指灵巧手系统分类及关键技术概览 5

下载日志已记录，仅供内部参考

图 2：特斯拉机器人价值量拆分：灵巧手占价值量比重约 14% 6
图 3：普通夹爪与多指灵巧手 7
图 4：2024-2030 年中国灵巧手销量及预测 9
图 5：灵巧手不同价格带代表产品对比 10
图 6：采取经典直线驱动+腱传动方案的机器人灵巧手单指执行器 12
图 7：掌内集成驱动缩短传动链，提升灵巧手系统集成度 14
图 8：前臂驱动有利于追求高自由度和低指端惯量 14
图 9：“电机-减速器-丝杠-腱绳”动力链将驱动源输出转化为指节运动 15
图 10：丝杠路线能够形成清晰、紧凑的运动转换链 19
图 11：腱绳传动方案原理图 21
图 12：2025 年全球机器人腱绳市场规模约 1.25 亿美元且有望延续双位数增长势头 21
图 13：2025 年 UHMWPE 纤维是机器人用腱绳主导材料，全球市场份额约 43.7% 22
图 14：刚性与复合传动模块化优势突出 24
图 15：灵巧手多模态感知-控制闭环架构（以 Helix 02 为例） 25
图 16：Dex5-1 产品图 29
图 17：RH56F1 系列产品图 29
图 18：ZWHAND 全系列产品图 30
图 19：Linker Hand 全系列产品图 31
图 20：雷赛智能灵巧手产品图 31
图 21：ROHAND 全系列产品图 32

表 1：灵巧手核心产业链环节 BOM 拆分 7
表 2：传统夹爪与灵巧手对比 8
表 3：2026 年人形机器人多指灵巧手（机械手）测试规范细则 11
表 4：五个维度描述灵巧手技术架构 12
表 5：灵巧手驱动路线多元，电机驱动兼顾精度与集成性成为主流方向 13
表 6：灵巧手全驱动与欠驱动方案：控制能力与系统复杂度的权衡 16
表 7：不同驱动程度、布置位置和接口配置形成差异化产品形态 17
表 8：灵巧手主要传动路线对比 18
表 9：丝杠路线灵巧手相关零部件及代表企业 20
表 10：灵巧手腱绳材料对比——钢丝绳与超高分子量聚乙烯（UHMWPE）纤维 20
表 11：腱绳路线灵巧手相关零部件及代表企业 23
表 12：海外灵巧手产业包含整机厂自研、专业科研平台和零部件企业延伸三类 26

下载日志已记录，仅供内部参考

表 13：国内灵巧手企业已形成整机生态、独立外售和精密传动上移三类布局 28

下载日志已记录，仅供内部参考

1 灵巧手：通用交互核心载体，产业初启框架渐成

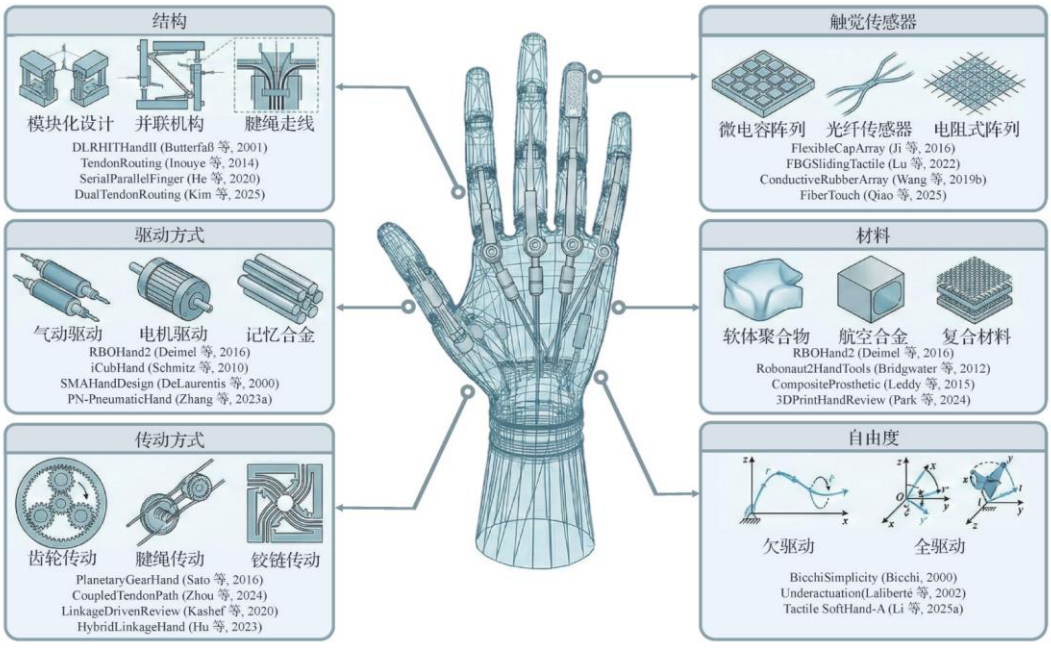
灵巧手定位为通用交互接口，需求弹性受场景与量产瓶颈约束。灵巧手凭借手内操纵能力构成了区别于传统夹爪的本质边界。其通用泛化优势突出，但面临高成本、高控制复杂度与负载限制等挑战。当前产品在寿命与稳定性上仍有短板，处于小规模送测的早期阶段。

1.1 什么是灵巧手：聚焦物体行为，四系统协同机电一体化

机器人灵巧手是能在无外部辅助下实现手内操作的机械手。根据经典的学术定义，机器人多指灵巧手是一种高度灵活、复杂的末端执行器，它能够在完全不依赖任何外部环境（如桌面、墙壁）物理支撑的前提下，通过协调多个手指的运动和精确控制接触力，在手内可控地调整和操作物体。该定义最早由学者 A. Bicchi 于 2000 年发表在 IEEE 相关期刊上，现已被学术与产业界广泛引用。这种对接触力的精确控制和复杂的“手内操纵”（In-hand manipulation）能力，构成了灵巧手最核心、最基础的动作闭环。

机器人灵巧手主要由结构、驱动、传动与感知等核心系统组成。作为一种精密耦合的机电一体化系统，灵巧手的本体架构高度依赖于这些维度的系统级协同配合。具体而言，其骨架结构决定了手指构型与自由度配置，是实现物理包络与指尖接触的基础；驱动系统作为动力源，主要采用电磁、流体或智能材料作为致动源将能量转化为机械运动；传动系统则决定了执行器力如何在关节和接触点之间分配，灵巧手的传动机构大致可分为腱绳驱动、连杆机构、齿轮传动、丝杠传动、带轮传动以及一体化传动架构；各类方案在负载能力、精度、柔顺性、结构复杂度以及欠驱动设计适配性上各有取舍；感知系统是一套通过板载传感器采集数据的系统，相关算法随后处理该信息，以感知灵巧手自身及其外部环境，感知系统已从单传感器发展至多传感器应用，进而演进至“本体感受-触觉-视觉”三协同融合模式。

图1: 多指灵巧手系统分类及关键技术概览



数据来源：《机器人灵巧手：迈向通用操作的关键技术》梁姝彤等，财通证券研究所

下载日志已记录，仅供内部参考

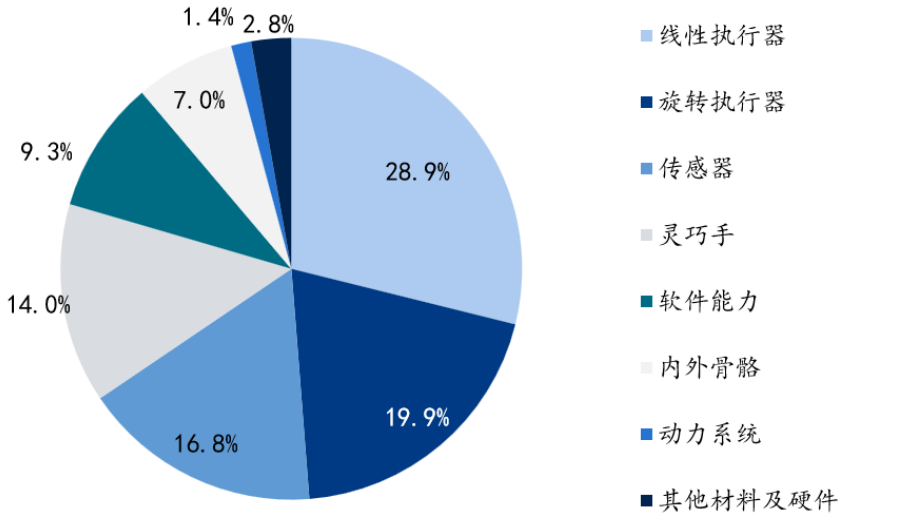
灵巧手并非单纯对人手的外形模仿，而应聚焦物体行为。尽管多数灵巧手在物理结构上模仿人手，但受限于关节分布、几何形态及运动学差异，简单的动作轨迹克隆无法实现高精度的手内操纵。当前灵巧操作的显著特征是以物体为中心，即建模围绕待操作物体、物体期望运动状态以及需要施加在物体上的作用力展开。故该表征方式不受本体形态约束：人类与机器人的接触位置、接触点数量、手部结构可以完全不同，但仍然可以在力旋量空间中，依据二者能够实现的物体运动效果，对接触行为做对比分析。

用软件层面的统一力学抽象，解决硬件碎片化带来的通用化难题，是灵巧手从“专用工业工具”走向“通用操作平台”的技术路径。不同任务和机器人平台对自由度的要求以及结构布局差异显著，具体而言，形态、自由度和运动学布局的差异使得在一种机械手设计上训练得到的策略难以迁移到另一种设计上，这种互操作性的缺失增加了数据收集的成本，也阻碍了跨平台异构数据集的利用。因此，灵巧手作为具身智能泛化操作的底层载体，其核心竞争力在于通过规范统一的力学表征来适配多元任务。

1.2 成本结构：驱动与传动为核心，丝杠与触觉价值量居前

灵巧手占人形机器人整机成本约 14%，是整机硬件的重要价值构成。以特斯拉人形机器人为例，其成本结构分为四大板块：执行器系统、传感器系统、灵巧手和其他核心部件，其中灵巧手占整机成本比重约为 14%。

图2: 特斯拉机器人价值量拆分：灵巧手占价值量比重约 14%



数据来源：四川省机器人工程学会，财通证券研究所

1）驱动系统为灵巧手 BOM 成本的核心，空心杯电机在特斯拉 Optimus 灵巧手中的成本占比达 38%。驱动系统主要包括电机（空心杯/无框力矩）+减速器（行星为主，手臂旋转关节配谐波）等。其中，空心杯电机因响应快、体积小，是主流选择，全球市场长期被瑞士 Maxon、德国 Faulhaber 等海外巨头占据 85%以上份额，国产替代正加速突围。据 21 世纪经济报道，国产空心杯电机单价约 1200-2300 元/台，按单只灵巧手配置 12 个驱动单元估算，仅电机成本即达 1-3 万元量级。

2）触觉传感为第二大成本项，占灵巧手 BOM 比重超 25%。据深圳市产业转移促进中心产业研究院，触觉传感的价值量占灵巧手产业链的 25.27%；当前触觉传感器行业正处于从“选配”向“标配”渗透的阶段，单只灵巧手传感器数量最多

下载日志已记录，仅供内部参考

可达 23 个。从终端产品定价看，兆威机电 DM17 京东官方定价带触觉与不带触觉版本价差约 1 万元。

3）传动系统成本差异显著，取决于传动方案。以丝杠传动为例，按一只灵巧手需要 13-24 根微型丝杠计算，单手专用微型丝杠价值约数千元至上万元；腱绳传动用量则由自由度配置和牵引方式决定，以特斯拉 Optimus GEN 3 灵巧手为例，单台人形机器人约需要 44 根腱绳，按超高分子量聚乙烯纤维绳单根价格约 60 元计算，且成本测算需进一步计入绳长、材料、端部固定、导轮及张紧组件等价值，预估单手价值量在千元区间。

4）其余为结构件与辅助系统。包括手部骨架（铝合金、PEEK 等材质）、外壳、轴承、线束、散热及密封件等。

表1: 灵巧手核心产业链环节 BOM 拆分

核心环节	BOM 占比预估	核心看点
驱动系统	空心杯电机价值量占灵巧手 38%	空心杯电机国产替代空间最大（海外占 85%份额）；单台人形机器人微型电机价值约 1-3 万元；谐波减速器、微型丝杠、磁编码器为精密传动关键支撑
触觉传感	价值量占 25.27%，随灵巧手量产指数增长	第三代产品量产在即；从“可选配”向“标配”升级，单只灵巧手传感器数量可达 23 个。兆威机电 DM17 京东定价带触觉&不带触觉价差约 1 万元
传动系统	取决于传动方案	腱绳传动成本相对较低，预估单手价值量在千元区间；丝杠传动成本较高，灵巧手专用微型丝杠单价为数千元至上万元/套
结构件与辅助系统	预估较低	包括手部骨架（铝合金、PEEK 等材质）、外壳、轴承、线束、散热及密封件等

数据来源：深圳市产业转移促进中心产业研究院，财通证券研究所

1.3 灵巧手 vs 传统夹爪：灵巧手以柔顺见长，夹爪重载刚性&成本占优

手内操纵能力是区分灵巧手与普通夹爪的核心边界。传统的平行两指或联动多指夹爪，其功能主要停留在“抓持-搬运-松开”的低维抓取范畴，无法实现物体姿态的精细调整。普通夹具的设计理念通常围绕行程、夹持力等基础指标展开，以优先满足稳定夹持为目标，高度依赖场景和工件的结构化。相比之下，多指灵巧手拥有多指多关节的冗余构型，其核心能力是在无外部支撑时，仅通过指间的细微运动，在保持稳定的同时连续调整物体的三维朝向与姿态，这正是高阶智能操作与简单机械夹持的本质边界。

图3: 普通夹爪与多指灵巧手



数据来源：《机器人多指灵巧手的研究现状、趋势与挑战》蔡世波等，财通证券研究所

下载日志已记录，仅供内部参考

灵巧手凭借多自由度与动态感知实现精细自适应操作，而高系统集成度带来了成本、算法门槛及负载等限制。相比运动轨迹与力度固定的传统夹爪，灵巧手拥有多个独立调控的自由度，无需调整机械臂整体姿态即可进行微调。其集成高精度传感器与全闭环控制，能实时感知并自动调节夹持力度与贴合角度。这种多触点均匀受力的柔性包裹模式，能有效避免两点刚性挤压导致的物料损伤，大幅提升对异形、易碎及精密工件的抓取与装配精度。由于灵巧手高度集成了微型驱动、高精度感知与精密传动，对应核心零部件技术壁垒高，因此初期采购与部署成本显著高于传统夹爪。在应用推广上，其自适应等功能的发挥高度依赖配套的控制系统与算法支持，系统集成与调试周期更长。此外，受轻量化、柔性结构限制，灵巧手在超高负荷的重载场景中适配性不足，仍无法完全替代传统刚性重载夹爪。

表2: 传统夹爪与灵巧手对比

对比维度	传统夹爪	灵巧手
机械结构与自由度	刚性结构为主，自由度低，仅能执行固定限值内的简单开合与夹持。	仿生多指构型，多自由度集成，单指可独立弯曲、旋转与微调。
控制与自适应能力	开环或简易闭环控制，力度与行程固定，无法根据工况实时反馈调整。	高精度全闭环控制，通过传感模块与算法自主微调夹持力和贴合角度。
物料保护性	两点刚性夹持且缺乏缓冲，针对易碎、易变形工件容易造成表面损伤或破损。	多触点柔性包裹，配有力度缓冲与过载保护，最大程度规避碰撞和过度挤压。
多品类产线泛化	适配性局限，更换工件规格时需频繁定制并停机更换工装夹具，重调程序流程繁琐。	通用适配性强，无需更换硬件配件即可自适应规则、异形、柔质及微小工件。
重载作业能力	刚性好，重载夹持与抗冲击能力强，契合超大重量、超高负荷的粗犷场景。	受轻量化与柔性结构限制，重载夹持和高负荷作业能力较弱。
初期采购与部署	结构成熟、量产度高，初期采购价格低，配套调试简单、部署周期短。	核心零部件集成度与研发门槛高，硬件单价高，前期系统与算法调试周期长。
长期综合运维	备件便宜且易更换，但针对多品类生产时需储备和管理极其繁杂的定制工装备件。	采用模块化集成设计，支持局部快速更换；高通用性使企业仅需储备少量标准化核心模块。

数据来源：大寰机器人，财通证券研究所

两类末端执行器各有适配场景，在产业中呈现互补共存关系。传统夹爪在工序固定、产品单一的大批量标准化生产中，凭借较低成本、成熟运维与高短期性价比占据优势。而在多品类混线生产、精密装配等复杂工况下，灵巧手虽初期投入高，但凭借免换工装、低返修率及高迭代价值，能有效降低长期综合生产成本。因此，行业不存在绝对替代，两者将根据具体负载和精细度要求长期并存。

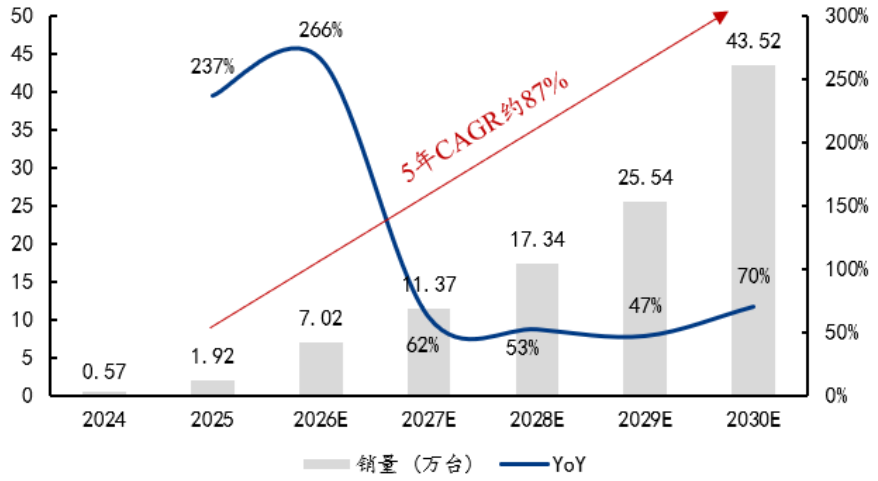
1.4 销量高增&价格梯队清晰，产业循序迈向规模化

1.4.1 量：行业规模快速扩容，供给端能力持续提升

灵巧手绝对规模仍处于早期阶段，近年来出货量快速增长。据高工产业研究院，2025 年中国灵巧手市场销量约 1.92 万只，同比增长 236.84%；高工产业研究院预计 2026 年将达 7.02 万只，2030 年或超 43 万只。虽然增速显著，但当前整体出货量较远期市场空间仍有数量级差距，在出货量攀升的同时产品未来价格亦将逐步下探。

下载日志已记录，仅供内部参考

图4: 2024-2030 年中国灵巧手销量及预测



数据来源：《2026 年 H1 中国灵巧手行业调研报告》高工产业研究院，财通证券研究所

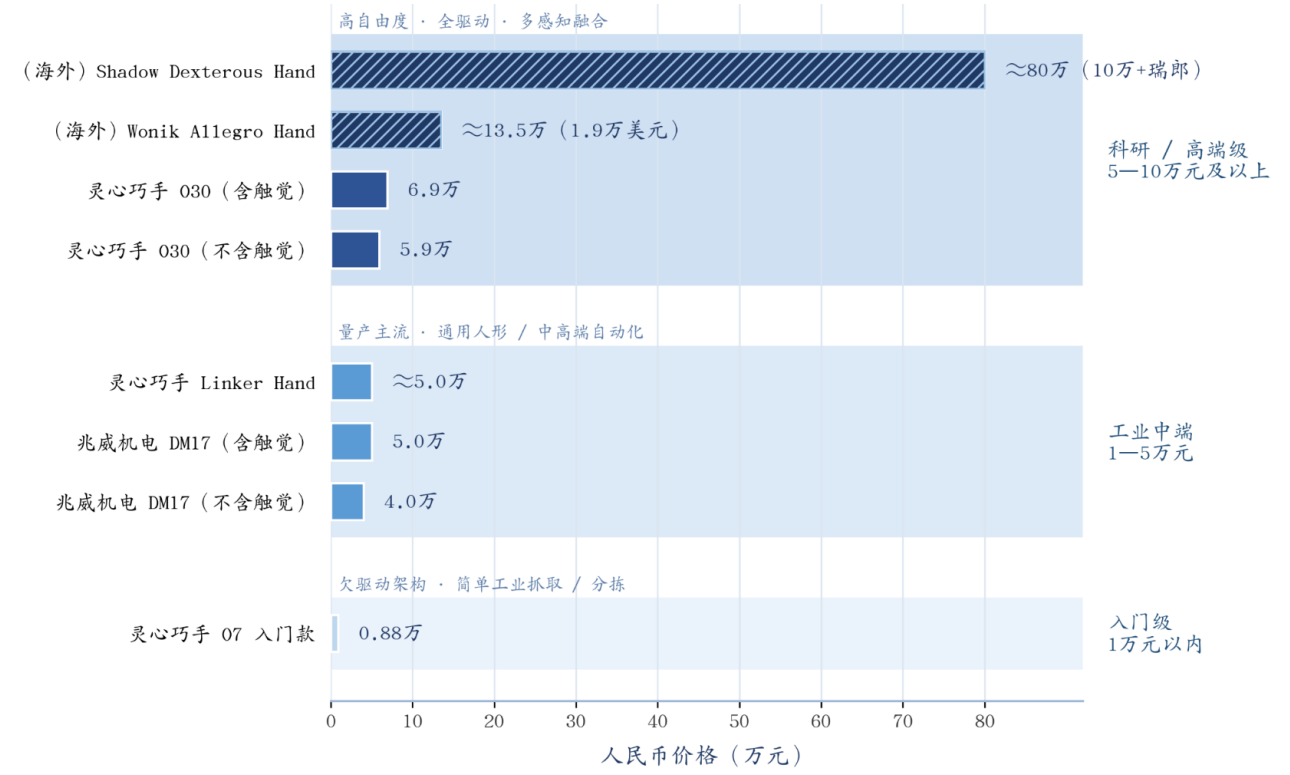
企业层面供给与交付能力加速释放，部分独立厂商已实现规模化出货并进入验证阶段。目前，行业已具备多款灵巧手产品的供给能力：2026 年 8 月，中科慧思发布了覆盖轻量化、高自由度通用、模块化等路线的 L1、D1、M1 三款灵巧手并预发布 F 系列绳驱仿生产品。在 WAIC 2026，万拿机器人推出工业实战型灵巧手 Std16A、轻量拟人型灵巧手 Eco12；均胜电子亦发布灵巧手、固液混合电池、第三代 AI 头部总成、电子皮肤和具身智能体大脑等多个核心部件总成方案。在实际交付中，独立厂商产品正加速进入客户验证阶段：临界点自 2026 年 1 月成立以来全产品矩阵灵巧手+夹爪累计销量已超过 2 万台（其中来自非智元的外部订单占比超过 40%）；傲意科技 2025 年的订单达数千台，今年 H1 则已突破万台，今年预计达到数万台。

1.4.2 价：价格梯队分层清晰，国产化加速价格下探

全球灵巧手市场各梯队均有产品作为明确价格锚点，伴随国产供应链突破与规模化放量，整体价格下探节奏显著加快。入门级（1 万元以内）以欠驱动架构为主，核心面向简单工业抓取、分拣场景，代表产品包括灵心巧手 O7 入门款（0.88 万元），有望对传统工业夹爪的替代渗透；工业中端（1-5 万元）为当前量产主流价格带，适配通用人形机器人与中高端工业自动化需求，代表产品兆威机电 DM17 灵巧手不带触觉版本售价 4 万元、带触觉版本售价 5 万元，灵心巧手 Linker Hand 客单价约 5 万元；科研/高端级（5-10 万元及以上）以高自由度、全驱动、多感知融合的科研与高端定制场景为主，海外厂商长期占据主导，代表产品包括 Shadow Dexterous Hand（其拥有 20 个自由度、超过 100 个传感器，是 NASA 和 OpenAI 的标配工具，价格超 10 万瑞士法郎）、Wonik Allegro Hand（约 1.9 万美元，直驱设计，但体积大、形态受限）等，国内灵心巧手主流款灵巧手已切入该价格带下限（以灵心巧手的 O30 为例，该产品不含触觉模组版本售价为 5.9 万元，搭载触觉模组版本售价为 6.9 万元）。

下载日志已记录，仅供内部参考

图5: 灵巧手不同价格带代表产品对比



数据来源：21 经济新闻，新浪财经，中国新闻周刊等，财通证券研究所
注：海外产品按 1 美元≈7.1 元、1 瑞士法郎≈8.0 元 折算为人民币万元；价格为厂商公开报价/客单价，实际因配置而异。

整体来看，全球灵巧手价格中枢持续下移，海外产品仍占据高端科研市场定价高地，国内厂商已完成从入门级到中端的全覆盖并逐步向高端渗透，我们认为，伴随规模化量产与零部件国产化率提升，全价格带产品降价速度或将较快，中端与入门级市场的渗透率有望加速提升。

1.4.3 产业化进展：核心约束尚存，限定性通用先行逐步规模化

当前灵巧手产品在成本、寿命与稳定性层面存在显著产业化短板，核心技术路线尚未收敛，行业统计口径亦待统一，共同构成量产落地的核心制约。成本端，海外标杆特斯拉 Optimus 配套灵巧手单台成本约 6000 美元，高企的硬件成本直接制约下游应用场景的批量渗透。寿命与可靠性层面，工业连续作业场景下产品实际服役寿命偏短，触觉传感器胶皮约 10 万次抓握后即需更换，电机持续发热问题亦限制整机使用年限；同时 20~30 个自由度的精密集成方案仍难以实现大规模商业化落地，构成产业量产爬坡的核心工程瓶颈。技术路线方面，全直驱、绳驱、连杆三大传动路线各有优劣，分别适配不同场景与产品定位，短期内暂无统一收敛趋势，不同技术路径的量产节奏与成本下探速度存在分化。此外，当前行业统计口径尚不规范，产品自由度统计范围从 6 个至 42 个不等，终端产品价格跨度超 25 倍，各家企业对出货量、市场占有率的定义与统计口径存在差异，导致不同来源的市场数据可比性较弱。

行业预计将经历“限定性通用”后再向规模化过渡。中科慧思管理层判断，灵巧手率先实现的将是限定性通用，未来一两年在一两个工序先干起活来，三五年内才可能大规模推广。当前行业竞争焦点正从自由度、重量等参数指标转向任务完成能力评价，但距离稳定、低成本、可复制的批量化部署仍有距离。

下载日志已记录，仅供内部参考

1.5 评价体系：性能精度和力控可靠性，场景分级明确落地标尺

灵巧手评价需立足于多维量化指标与控制可靠性闭环。评价体系将竞争维度从单一参数转向系统可用性，这种场景分级评定，是引导技术在性能、成本与落地间寻找平衡的统一标尺。物理上，确立了自由度、被动负载及定位精度底线；控制上，强调 10ms 内力控响应、滑移微调、超 10 万次循环寿命及标准化开发接口。

性能与精度指标：多维量化灵巧手的基础能力。量化灵巧手性能需基于统一的测试环境与前置条件，行业规范要求测试在 23℃±2℃、湿度 45%~65%的无干扰标准环境中进行，且测试前需空载跑合超 30 分钟以确保热机稳定。在基础物理指标上，合格灵巧手被要求整机总自由度≥15 个，且单指静态被动负载需达到 78.4N 以上，这确立了末端执行器进行物理操作的刚性底线。运动响应、定位精度是衡量作业精细度的核心，根据测试规范，空载满行程到位时间与绝对定位偏差等指标，均按照家用、工业与精密场景进行了分级设定。例如，在最严苛的精密装配场景下，单指到位时间需≤60ms，绝对定位偏差需控制在±0.02mm 以内，重复定位精度需达到±0.01mm。这些高精度物理指标是机器人完成精密对位与高精抓取任务的重要保障。

力控与可靠性指标：保障高阶应用与商业化部署。高精度的力控响应是实现人机协作安全的前提，规范要求灵巧手常规力控范围需稳定覆盖 0.1N 至 50N，稳态误差≤±5%，且阶跃力控响应时间需控制在 10ms 以内。为实现安全交互，系统需在 5ms 内响应碰撞检测。同时，灵巧手还需具备在 20ms 内快速响应的滑移检测与力控动态微调能力，确保在无外部支撑下稳定操控不同材质物体。可靠的耐久寿命与标准接口是商业落地的关键，灵巧手需通过 72 小时连续稳定作业测试，且其核心关节往复运动寿命需≥10 万次，抓取循环需≥15 万次。在数据与软硬件集成方面，规范强制要求支持 Ether CAT 等主流工业总线，数据单向传输延迟≤1ms，并提供支持 C++与 Python 的标准化开发 SDK，从而降低系统适配门槛。

表3: 2026 年人形机器人多指灵巧手（机械手）测试规范细则

评价维度	考核测试项	家用服务场景	工业协作场景	精密装配场景
基础物理结构	自由度与负载能力	自由度≥15 个；单指被动负载≥78.4N，整手承载≥294N（全场景统一基准）		
运动响应性能	单指满行程到位时间	≤100ms	≤80ms	≤60ms
	整机运动响应延迟	≤60ms	≤50ms	≤40ms
空间定位精度	绝对定位精度(TCP)	≤±0.5mm	≤±0.1mm	≤±0.02mm
	重复定位精度(TCP)	≤±0.2mm	≤±0.05mm	≤±0.01mm
精细力控水平	力控精度与响应	力控范围 0.1N~50N，误差≤±5%，力控响应≤10ms（全场景统一基准）		
环境适应等级	工作温度适应范围	0∘C~40∘C	−10∘C~55∘C	18∘C~28∘C(恒温
	防尘防水防护等级	≥IP40	≥IP54	≥IP54
作业可靠寿命	核心关节循环寿命	≥10 万次循环（测试后精度衰减≤15%，无损坏）		
	抓取动作循环寿命	≥15 万次循环		

数据来源：寰识机器人，财通证券研究所

注：本规范基于工信部《人形机器人与具身智能标准体系（2026 版）》、ISO 10218-1:2025、ISO 10218-2:2025 机器人安全系列标准及现行有效 GB/T 机器人相关国家标准制定。

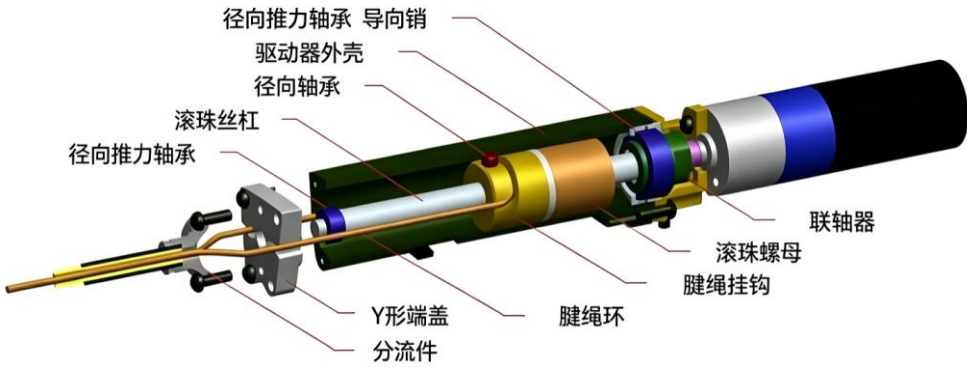
下载日志已记录，仅供内部参考

2 技术架构：多维架构组合，非单一路线

灵巧手不存在脱离应用场景的单一最优架构，产品性能由驱动源、驱动器位置、传动方式、驱动程度及感知控制共同决定。市场通常使用“纯电机、腱绳、丝杠、齿轮”等标签描述产品路线，但上述概念并不处于同一技术层级：电机负责产生动力，丝杠负责将旋转运动转换为直线运动，腱绳负责远程传力，齿轮和连杆则负责减速或关节运动映射，一只灵巧手可能同时采用多种结构。

灵巧手技术路线需按完整动力传递链分层分析，单一部件标签难以准确反映整手架构。纯电机路线通常只能说明产品以电机为动力源，并不代表电机可以直接驱动全部指关节；实际系统往往还需要齿轮、丝杠、腱绳或连杆完成减速、运动转换和动力分配。同样，丝杠“灵巧手”也不意味着整只手仅依靠丝杠传动，丝杠后端仍可能连接腱绳或连杆。Tesla 相关机械手专利展示了电机、机械传动、腱绳及欠驱结构组合使用的可能性，说明量产产品更可能采用混合架构，而非单一零部件路线。

图6: 采取经典直线驱动+腱传动方案的机器人灵巧手单指执行器



数据来源：《The Robonaut 2 Hand - Designed To Do Work With Tools》L. B. Bridgwater 等，财通证券研究所

完整的灵巧手技术架构从五个维度进行描述，共同构成系统性能边界。驱动源决定动力密度、效率和热管理能力；驱动器位置决定手部重量、指端惯量、布线方式和模块独立性；传动方式决定刚度、反驱性、传动间隙和使用寿命；驱动程度决定关节独立控制能力与执行器数量；感知控制则决定机械结构能否在真实环境中稳定完成接触、抓取和操作任务。

表4: 五个维度描述灵巧手技术架构

架构维度	主要选项	核心权衡
驱动源	空心杯/无槽电机、有齿槽电机、液压、人工肌肉	功率密度、效率、成本、热管理
驱动器位置	指关节、掌内、腕部、前臂	手部惯量、布线、散热、模块独立性
传动方式	齿轮、连杆、丝杠、腱绳及混合结构	刚度、反驱性、自由度密度
驱动程度	全驱动、欠驱动	独立控制上限与执行器数量
感知控制	位置、关节力矩、腱张力、触觉、视觉	控制透明度、标定难度和数据闭环

数据来源：新财富产业研究院，MDPI，frontiers，财通证券研究所

下载日志已记录，仅供内部参考

灵巧手技术架构的核心在于多维协同，而非单项参数最优。例如，将电机放置在前臂可以降低指端惯量并容纳更多执行器，但需要更长的腱绳路径，可能增加摩擦、蠕变、张力漂移和腕部过线难度；提高减速比可以增加指尖输出力，却可能降低反驱性和力透明度；增加主动自由度可以拓展动作空间，但也会增加电机、编码器、控制通道和故障点。因此，技术评价应从任务成功率、循环寿命、维护时间和单位有效操作成本出发，而非追求单项参数最大化。

2.1 驱动源和驱动器位置：电机驱动为主流，三类布置位置各有权衡

驱动源：电机是灵巧手主流动力源。空心杯和无槽电机驱动具有体积小、响应速度快、转矩波动较低等特点，适合布置在空间受限且需要精细控制的手部系统；有齿槽电机驱动成本相对较低，但需要在体积、转矩波动和控制平顺性之间权衡；液压驱动在功率密度或柔顺性方面具有潜在优势，但泵阀、压力管路、材料寿命和控制复杂度限制了其短期规模化；气压驱动结构简单、响应快、柔性好，清洁无污染且具备过载保护能力，但定位精度低、输出力有限、依赖外部气源、噪声较大，更适用于对精度要求不高的柔性抓取场景；人工肌肉驱动结构极致紧凑、无噪声、柔顺性好、设计灵活，但驱动力小、响应慢、寿命有限、控制难度较高，目前仍以科研探索和原型验证为主。

表5: 灵巧手驱动路线多元，电机驱动兼顾精度与集成性成为主流方向

驱动类型	核心优势	核心限制
电机驱动	精度高、响应快、结构紧凑、易集成，适合小型化灵巧手	力矩有限，功率密度较低，高速运行需散热
液压驱动	输出力矩大、运动平稳、功率密度高、抗过载能力强	制造精度要求高，存在漏油风险，存在能量损失故不宜远距离输送
气压驱动	结构简单、响应快、柔性好，清洁无污染，具备过载保护	定位精度低，输出力有限，依赖外部气源，噪声较大
人工肌肉驱动	结构极致紧凑、无噪声、柔顺性好、设计灵活	驱动力小、响应慢、寿命有限，控制难度较高

数据来源：维科网，机械传动，清华大学出版社《液压传动概述》，Target Hydraulics，财通证券研究所

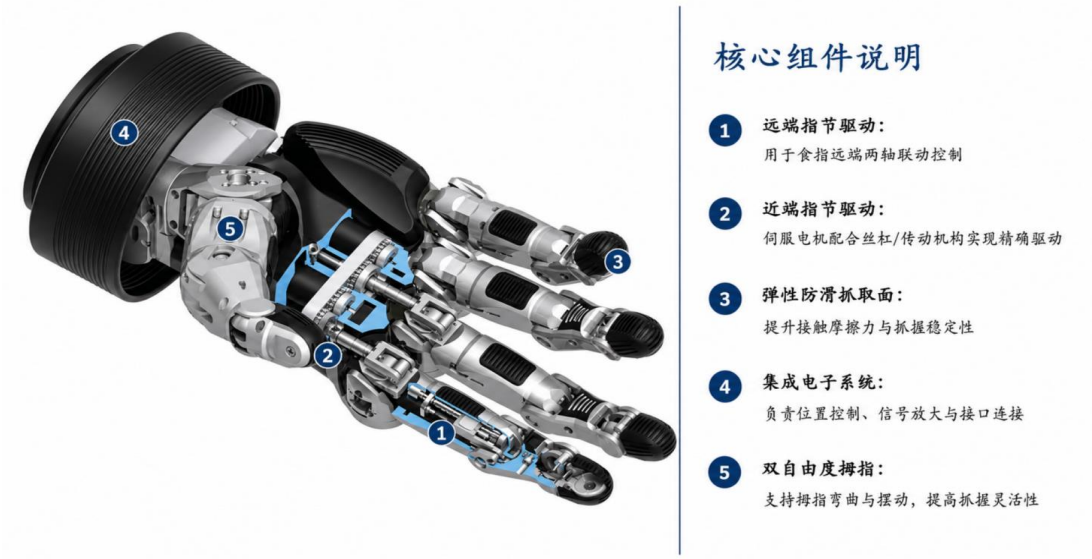
驱动器位置：指关节、掌内与前臂三种部署路径各有权衡。1）指关节驱动将驱动器向手指端集成可缩短传动链、提升控制响应，可以缩短传动路径、减少远程传动误差，但对电机微型化、减速机构、编码器布置和散热能力提出较高要求。2）掌内驱动可以把电机、传动、传感器和控制板集成在独立手体内，但受到掌内空间、整手重量和持续发热约束。例如，ZWHAND 兆威灵巧手将 17 个微型电机、位置和力传感器、控制模块等全部封装于掌心之间。Frontiers 综述指出，将电机布置于手指或手掌能够缩短传动路径并形成紧凑手体，但掌内空间和散热条件会限制电机功率与效率。3）腕部&前臂驱动能够释放手掌空间并布置更多执行器，但需通过腱绳或其他远程结构跨越腕部传力，布线、张力标定和维护难度随之提高。采用前臂驱动有利于在降低指端惯量的同时实现高自由度配置，例如，1X NEO 将电机布置于前臂，通过低减速比腱绳跨越腕部驱动手指；实现手指及掌部 22 个全驱动自由度、腕部 3 个自由度，并支持原生力控与完全反驱；Shadow 全部自由度均由安装在前臂机架上的 20 台电机阵列提供动力，每台电机驱动两根腱绳，实现双向对拉控制，力传感模块集成于电机端的腱绳上，用于实现柔性运动。两者均体现了以系统集成换取低指端惯量和高自由度的设计思路。二者不同点在于，1X 采用整机垂直整合模式，Shadow 则以可接入第三方平台的独立产品形式供货。

我们认为，指内和掌内集成有利于降低第三方整机厂的接口开发工作量，并增强灵巧手作为独立部件跨平台供货的可行性，而适配周期和换装效率仍需结合机械接口标准、兼容平台数量及实际测试结果进行评价；前臂驱动则会模糊灵巧手与

下载日志已记录，仅供内部参考

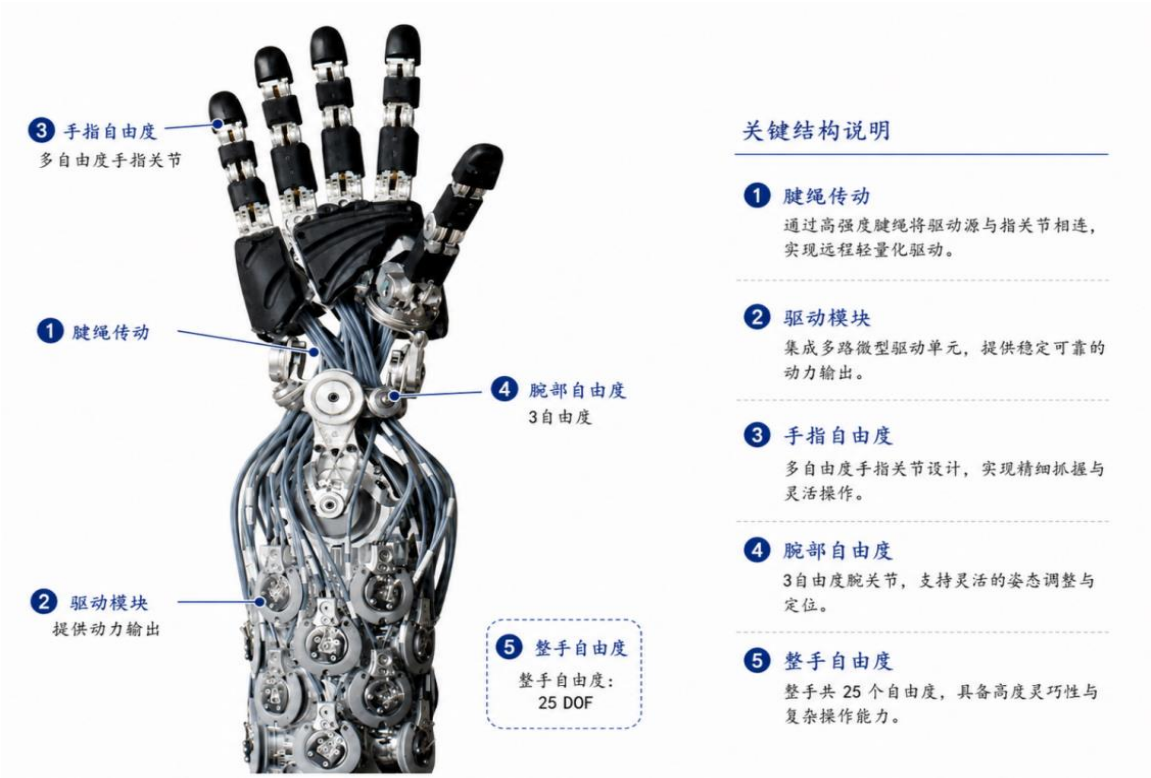
前臂执行系统的 BOM 边界，独立整手市场空间最终取决于整机厂的技术路线和外购比例，而非理论零部件价值量。因此，驱动器位置不仅影响整手重量、传动效率和热管理，也会影响灵巧手与机器人本体之间的产品边界。

图7: 掌内集成驱动缩短传动链，提升灵巧手系统集成度



数据来源：Schunk 官网，财通证券研究所

图8: 前臂驱动有利于追求高自由度和低指端惯量



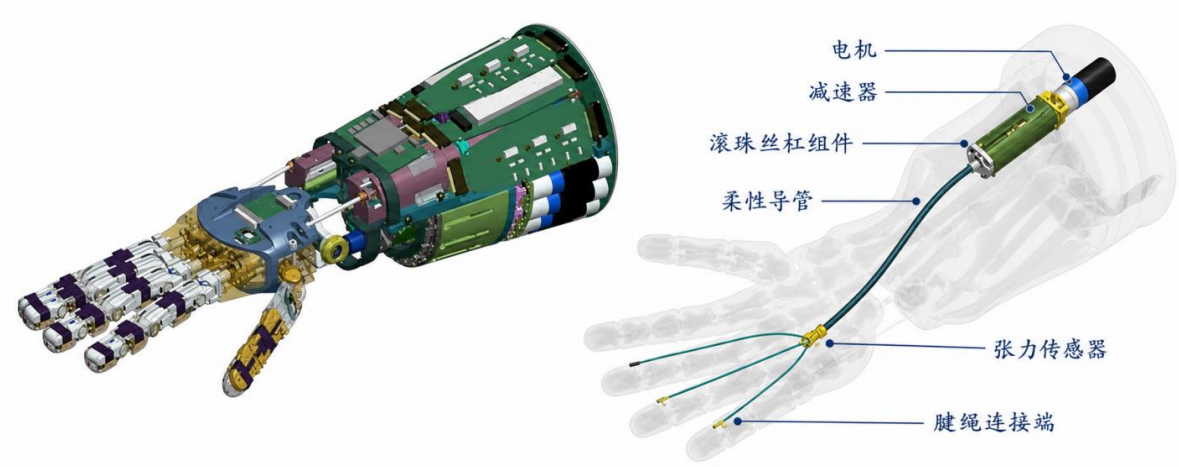
数据来源：1X 官网，财通证券研究所

下载日志已记录，仅供内部参考

2.2 传动方式与驱动程度：性能上限与系统复杂度的权衡

传动方式的核心作用是将驱动源输出转化为关节运动。传动方式的评价标准包括效率、刚度、反驱性、间隙、寿命和维护成本。齿轮主要用于减速和转矩放大，连杆负责建立多个关节之间的运动关系，丝杠负责将旋转运动转换为直线位移，腱绳则适合将动力从前臂或手掌远程传递至指节。实际产品采用“电机-齿轮-丝杠-腱绳-指节”或其他混合动力链。

图9：“电机-减速器-丝杠-腱绳”动力链将驱动源输出转化为指节运动



数据来源：NASA 官网，财通证券研究所

驱动程度：全驱动与欠驱动分别侧重关节独立控制和系统复杂度优化。1）全驱动架构为主要关节配置独立执行器，能够扩大动作空间、提高控制粒度，并形成更细粒度的关节状态与控制数据，但电机、编码器和控制通道数量增加也会推高重量、功耗、成本及标定难度。例如，1X NEO 新一代灵巧手的手指及掌部配置 22 个全驱动自由度，叠加 3 个腕部自由度，全部支持力控和反驱，产品定位明显面向复杂操作与数据采集；Shadow 灵巧手则采用混合架构，20 个为独立驱动自由度，其余 4 个为耦合/欠驱动（每根手指最远端的两个关节由腱绳联动、同步弯曲），在控制能力与系统复杂度之间进行折中。2）欠驱动则以部分关节独立控制能力换取更低硬件复杂度和更强被动适应性，其执行器数量少于机械自由度，通常利用腱绳、弹簧、连杆及物体接触关系带动多个关节协同运动，使手指能够被动贴合不同形状的物体。该类架构更适合包络抓取、假肢和成本敏感型应用。例如，Tesla 机械手专利明确采用单个执行器驱动手指两个关节的欠驱动结构，以降低执行器数量并改善自适应抓取能力。

下载日志已记录，仅供内部参考

表6: 灵巧手全驱动与欠驱动方案：控制能力与系统复杂度的权衡

对比维度	全驱动	欠驱动
技术定义	每个可控自由度原则上配置独立执行器，可分别接收控制指令	执行器数量少于机械自由度，一个执行器通过腱绳、连杆、弹簧等结构带动多个关节
控制能力	关节独立性强，能够实现精细轨迹控制、手内操作和复杂手势	关节运动受机械耦合关系约束，难以任意控制单个关节姿态
抓取适应性	主要依靠传感器和控制算法适应物体形状，对感知与实时控制要求较高	可借助弹簧、柔性腱绳和物体接触被动调整关节，更容易形成包络抓取
动作空间	动作空间较大，适合旋转、移位、工具操作等复杂任务	更适合开合、捏取和包络抓取，复杂手内操作能力相对受限
硬件配置	通常需要更多独立驱动及控制资源	执行器和控制通道数量较少，但需要设计机械耦合及复位结构
重量与功耗	电机数量增加通常推高重量、功耗和散热压力	有利于降低执行器重量和能耗，适合空间及续航受限场景
成本与维护	零部件数量多，制造、标定和故障管理成本较高	硬件成本相对较低，但腱绳、弹簧和连杆可能产生磨损、迟滞及维护需求
数据采集价值	可获得更细粒度的关节状态和控制指令	控制维度较低
代表方案	1X NEO：手指及掌部 22 个全驱动自由度，叠加 3 个腕部自由度，全部支持力控和反驱	Tesla 机械手专利：单个执行器同时驱动手指两个关节，利用腱绳和弹簧实现欠驱动抓取
适用方向	高性能机器人、复杂操作、遥操作和高质量训练数据采集	假肢、标准化抓取、成本敏感型机器人及强调可靠性的应用

数据来源：Frontiers in Neurorobotics，1X 官网，Shadow Robot 官方技术规格书，Tesla 专利，财通证券研究所

全驱与欠驱不存在绝对优劣，技术选型取决于操作复杂度与系统成本的权衡。科研、遥操作、复杂灵巧操作和具身智能数据采集强调关节独立性与动作可控性，更适合采用较高全驱程度；标准化抓取、假肢及成本敏感型工业场景则更关注重量、能耗、可靠性与维护成本，欠驱动方案的综合优势更为突出。对于仅需完成包络抓取和稳定搬运的任务，增加主动自由度未必能够转化为更高生产效率；而在物体旋转、工具姿态调整和手内操作等复杂任务中，更高的独立控制维度能够拓展动作空间。因此，灵巧手产品的竞争重点并非单纯增加自由度，而是围绕目标场景实现性能、成本与可靠性的平衡。

2.3 感知与控制：感知定参数、控制定成败，数据入口延展竞争边界

感知能力：灵巧手的力觉与触觉反馈依赖多类型传感器协同配置，其性能核心在于关键参数指标而非传感点数量。缺少力觉和触觉反馈的高自由度灵巧手难以适应真实环境中的位置误差和接触变化。为此，需通过多类传感器分工协作来实现完整感知：关节编码器用于识别电机或指节位置，电流和力矩传感器用于估计输出力，腱张力传感器用于判断远程传动状态，指尖及掌面触觉则用于识别接触位置、压力分布和滑移。不同传感器解决的问题并不相同，传感点数量也不能直接代表触觉能力，真正有价值的指标是量程、分辨率、采样频率、迟滞、漂移、标定难度和耐久性。

控制系统：灵巧手硬件能力转化为稳定任务成功率的核心，其性能与开发工具链完整性共同构成产品商业竞争力。在控制架构上，灵巧手需要在位置控制、力矩控制、张力控制和触觉反馈之间建立闭环，并与机器人视觉、运动规划和具身模型协同。而一旦控制频率不足、通信延迟过高或传感器漂移，就会导致抓取不稳、物体滑落或输出力失控，因此内部传感采样率不能等同于整机有效控制频率。同时，对于独立灵巧手产品而言，通信接口、SDK、标定工具和故障诊断能力同样构成商业竞争力，客户最终采购的不是孤立硬件，而是一套能够接入整机并持续运行的操作系统。

感知控制能力决定灵巧手能否成为机器人高质量操作数据的采集入口，推动行业

下载日志已记录，仅供内部参考

竞争边界从机械结构向算法与工具链延伸。高质量操作数据不仅需要视觉信息，还需要关节位置、输出力、腱张力、触觉接触及任务结果等多模态状态，并且只有完成时间同步、坐标统一和长期标定，数据才能用于模仿学习和策略训练。由此，灵巧手的竞争边界将从机械结构延伸到传感器、控制算法、数据接口和开发工具链。

2.4 典型架构组合：不同产品形态对应差异化应用定位

我们认为，现阶段灵巧手可按设计目标大致归纳为高自由度研究型、独立模块型和工业自适应型三类，技术路线优劣更多取决于具体任务需求，而非单一性能指标：

1）高自由度研究型，以 1X NEO 和 Shadow Dexterous Hand 为代表，通常采用较高主动自由度、腱绳传动及丰富感知，以提升复杂抓取、手内操作和遥操作能力。该方案通常能提供更多独立关节控制和感知信息，适合复杂手内操作及数据采集。

2）独立模块型，以 SCHUNK SVH 和 Allegro Hand 为代表，更强调手部内部集成、标准接口和跨平台适配，便于作为独立末端执行器接入不同机器人平台。掌内或手根集成方案有利于形成独立整手模块，提升跨平台适配能力。

3）工业自适应型，以 qb SoftHand Industry 等产品为代表，通过较少执行器配合欠驱或协同结构，实现对不同物体形状的自适应抓取，并以简化控制和工业适配为主要特征。欠驱和协同驱动方案更适合以稳定抓取为主要目标的工业场景。

表7: 不同驱动程度、布置位置和接口配置形成差异化产品形态

对比维度	高自由度型	独立模块型	工业自适应型
代表产品	1X NEO、Shadow	Allegro、SCHUNK SVH	qb SoftHand Industry
自由度	25、24	16、20	19
驱动程度	高主动自由度	多驱动，部分欠驱动/耦合	单电机协同驱动
典型传动	腱绳	电机+机械传动	腱绳
电机位置	NEO：前臂	SVH：电子元件完全集成于手腕	手部模块
官方应用	人形机器人、研究/遥操作	研究、工业机器人	测试、抓取、装配、上下料

数据来源：1X、Shadow Robot、SCHUNK、Wonik Robotics（Allegro Hand）、qbrobotics 官网，财通证券研究所

综上所述，灵巧手技术竞争的本质是多维架构约束下的系统优化，而非单一传动部件之间的替代。驱动源决定动力基础，驱动器位置影响质量分布和系统集成，传动方式决定动力传递特征，驱动自由度影响独立控制能力，感知与控制系统则共同决定最终操作表现。

3 技术路线：传动路线各具优劣，感知闭环价值凸显

灵巧手的不同传动路线在承载精度、轻量化、独立控制与柔顺交互之间各有取舍：丝杠及齿轮路线侧重刚性传动与精准控制，腱绳路线突出指端轻量化与高自由度，掌内耦合路线兼顾抓握负载与成本，流体驱动及形状记忆合金路线则分别探索高出力、仿生柔顺与紧凑集成。具体来看，丝杠传动承载能力较强、定位精度较高且易于模块化，但受执行器空间及微型丝杠加工难度约束；腱绳传动通过近端布置电机降低指端重量，有利于高自由度和仿人设计，但磨损、张力漂移及摩擦迟滞增加维护与控制难度；关节集成电机-齿轮路线传动路径短、关节独立控制能力强，但手部重量、空间占用及散热约束较大；掌内电机-机械耦合路线以较少执行器兼顾抓握负载与成本，但部分关节耦合限制精细操作能力。新型驱动方面，微型液压具备较强输出力和手内操作潜力，但密封、供压及维护较为复杂；水压人

下载日志已记录，仅供内部参考

工肌肉仿生形态突出、运动柔顺，但系统集成与多肌肉协同控制难度较高；气动软体路线柔顺接触与安全性较好，但受气源体积及精确控制能力约束；形状记忆合金结构紧凑、运行轻声，但热管理与循环性能仍构成主要制约。

表8: 灵巧手主要传动路线对比

路线	丝杠传动	腱绳传动	关节集成电机-齿轮	掌内电机-机械耦合	微型液压	水压人工肌肉	气动软体	形状记忆合金
核心结构	电机+减速器+微型丝杠+连杆	近端电机+腱绳+导轮/过线机构	电机与微型减速器置于指关节附近	掌内电机+齿轮/蜗轮蜗杆/连杆	微型阀+液压执行器+供压系统	水泵+流体回路+人工肌肉	气泵+阀组+软执行器	温控驱动材料形变
主要优势	承载能力较强，定位精度较高，易于模块化	指端轻，利于高自由度和仿人设计	传动路径短，关节独立控制能力强	执行器数量较少，兼顾抓握负载与成本	输出力和手内操作能力较强	仿生形态突出，运动柔顺	柔顺接触、安全性较好	结构紧凑、轻量
主要约束	执行器占空间，微型丝杠加工难	磨损、张力漂移及摩擦串扰增加维护和控制难度	手部重量、空间和散热约束较大	部分关节耦合，精细操作能力受限	密封、供压及维护复杂	系统集成与多肌肉控制难	气源体积和精确控制约束	热管理和循环性能约束
代表企业	因时机器人	特斯拉、1X、Shadow	星动纪元、Wonik、兆威机电	雷赛智能、兆威机电	Sanctuary AI	Clone Robotics	哈佛大学研究方案	研究方案

数据来源：各公司官网，芯语，智行时代，36氪，艾邦机器人，特斯拉专利，兆威机电年报，Harvard Biodesign Lab 等，财通证券研究所

3.1 路线一：丝杠方案（电机+微型丝杠直线传动）

丝杠方案的核心是“微型直线执行器”。空心杯电机（或无刷有齿槽电机）经微型行星减速器增扭后，驱动微型丝杠副将旋转运动转化为直线推拉运动，推杆再经连杆或腱绳带动指节屈伸。其中丝杠副有三种细分：

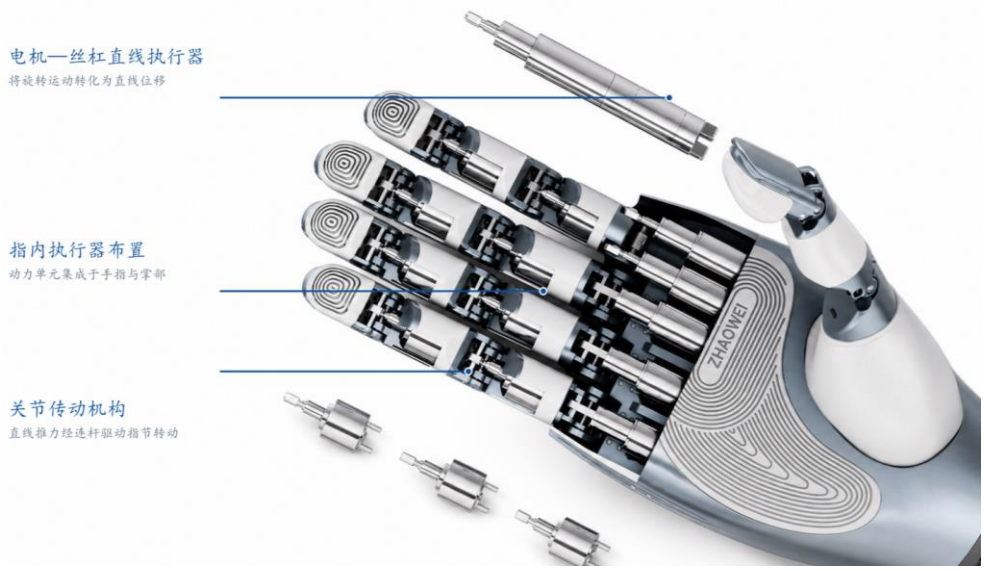
1）梯形丝杠（Lead Screw）：梯形丝杠（也叫滑动丝杠、T 型丝杠）为螺母直接与丝杠螺纹面接触，靠滑动摩擦传递运动。其结构简单、成本最低，具备良好的自锁特性；传动效率通常在 25%-50%区间，摩擦损耗大、磨损速度快，仅适合低频、低负载的低端应用场景。

2）滚珠丝杠（Ball Screw）：滚珠丝杠采用循环滚珠实现滚动摩擦传动，传动效率高达 90%以上，远高于梯形丝杠的 30%-50%；技术成熟度高，成本可控；因滚珠与滚道为点接触结构，其承载能力与使用寿命优于普通丝杠但仍存在物理上限。

3）行星滚柱丝杠（Planetary Roller Screw，PRS）：以多根带螺纹的行星滚柱代替滚珠，与丝杠成线接触。同尺寸下承载可达滚珠丝杠的 3 倍、自带自锁能力，能大幅降低电机发热和能耗。同时，可做反向式（螺母外转、丝杠平动，利于集成）与差动式（以大螺距实现小导程输入）等形态。限制在于结构复杂、微型化加工难度和成本高。

下载日志已记录，仅供内部参考

图10：丝杠路线能够形成清晰、紧凑的运动转换链



数据来源：兆威机电官网，财通证券研究所

优势：丝杠方案（电机+微型丝杠直线传动）具备传动精密、承载性强、可靠性高等显著优势，是工业负载型灵巧手的主流技术路线。该方案传动刚性优异，力控精度与位置精度表现突出（因时RH56系列微型电缸可达±0.2mm的重复精度）；其中行星滚柱丝杠承载能力更强，充分适配提重物等重载工业场景需求。同时，滚柱丝杠产品寿命更长、可靠性可预测性佳，便于工业客户开展验证；由空心杯电机搭配行星减速器组成的微型电缸可实现模块化、标准化生产。

约束：丝杠方案同时存在成本高企、空间受限与量产工艺壁垒等短板。微型丝杠加工精度要求高，灵巧手专用微型行星滚柱丝杠是整机BOM中价值量最高的单一部件之一；且直线执行器需要一定安装长度，挤占手掌与前臂内部空间，限制了整机自由度密度。此外，微型滚珠丝杠在极小直径下滚珠尺寸受限，承载能力与寿命均有所折扣；产品量产一致性高度依赖高端磨床与工艺积累，产能扩张周期相对较长。

代表企业：兆威灵巧手、因时机器人等。兆威采用全驱直驱架构，针对传统灵巧手腱绳或齿轮驱动存在的能量损耗大、响应延迟高等痛点，将微型步进电机或空心杯电机直接嵌入指节，结合滚珠丝杠推杆实现直线驱动，既将传动效率提升至95%以上，又通过电机、减速器、丝杠驱动单元的高度微型化集成，缩短了传动链长度、提升了响应速度与力控精度，同时保障了单指抓握力并实现了整体减重。因时机器人是国内首家实现灵巧手商业化量产的企业，核心驱动单元为标准化微型伺服电缸，内部集成空心杯电机、行星减速器、丝杠传动与传感模块，部件功能边界清晰、可模块化替换，已推出多系列量产灵巧手产品。

所需核心零部件与全球供应商：丝杠传动系统主要包括微型电机、减速器、滚珠/行星滚柱丝杠及编码器等部件。海外方面，Maxon、FAULHABER布局微型无刷电机及减速器；THK、NSK、KSS生产微型滚珠丝杠；Rollvis、GSA、Ewellix、Moog和Bosch Rexroth布局行星滚柱丝杠；ams OSRAM、Renishaw提供位置传感器或编码器。国内方面，鸣志电器、兆威机电、雷赛智能及江苏雷利体系布局空心杯电机；兆威机电、中大力德及双环传动体系覆盖行星齿轮箱、精密行星、RV或谐波减速器；贝斯特、恒立液压和南京工艺已形成滚珠丝杠产品或产能；恒

下载日志已记录，仅供内部参考

立液压、五洲新春、新坐标、贝斯特、北特科技、鼎智科技、南京工艺、新剑传动及双林股份等布局行星滚柱丝杠，整体处于研发验证、送样至初步量产阶段。编码器及位置传感方面，禹衡光学、禾川科技布局编码器产品，纳芯微、灿瑞科技布局磁性或电感位置传感芯片。

表9: 丝杠路线灵巧手相关零部件及代表企业

零部件	海外代表企业	国内代表企业
空心杯电机/无槽无刷电机	Maxon（瑞士）、Faulhaber（德国）	鸣志电器、兆威机电、雷赛智能、江苏雷利（鼎智科技）
微型行星减速器/齿轮箱	Maxon（瑞士）、Faulhaber（德国）	兆威机电（金属行星齿轮箱）、中大力德（精密行星减速器）、双环传动（RV、谐波减速器）
微型滚珠丝杠	THK、NSK、KSS（日本）	贝斯特（宇华精机）、恒立液压、南京工艺
微型行星滚柱丝杠	Rollvis（瑞士）、GSA（瑞士）、Ewellix/舍弗勒（瑞典品牌/德国集团）、Moog（美国）、Bosch Rexroth（德国）	北特科技、恒立液压、新坐标(合资玖月捌传动)、贝斯特、五洲新春、新剑传动、鼎智科技、南京工艺、双林股份
编码器/位置传感	amsOSRAM、Renishaw	禹衡光学、禾川科技；纳芯微、灿瑞科技

数据来源：各公司官网，各公司公告，财通证券研究所

3.2 路线二：腱绳传动方案

腱绳传动允许驱动器远离指关节布置，是当前高自由度灵巧手的重要实现方式。腱绳作为键盘按键连接与固定组件，一般采用高强度基材制备，产品体系主要划分为钢丝绳、高分子纤维两大类别，保障按键长期工况下的稳定性与耐久性能。钢丝绳品类包含钨钢丝绳、不锈钢丝绳等；高分子纤维赛道以 Dyneema、Spectra 为主流材料，二者分别为帝斯曼、霍尼韦尔推出的超高分子量聚乙烯（UHMWPE）纤维。人形机器人腱绳特指适配人形机器人场景的 UHMWPE 纤维或钢丝绳材料，核心应用于人形机器人灵巧手模块，灵巧手腱绳方案通常将执行器布置在前臂，再通过腱绳向手指关节传递驱动力。

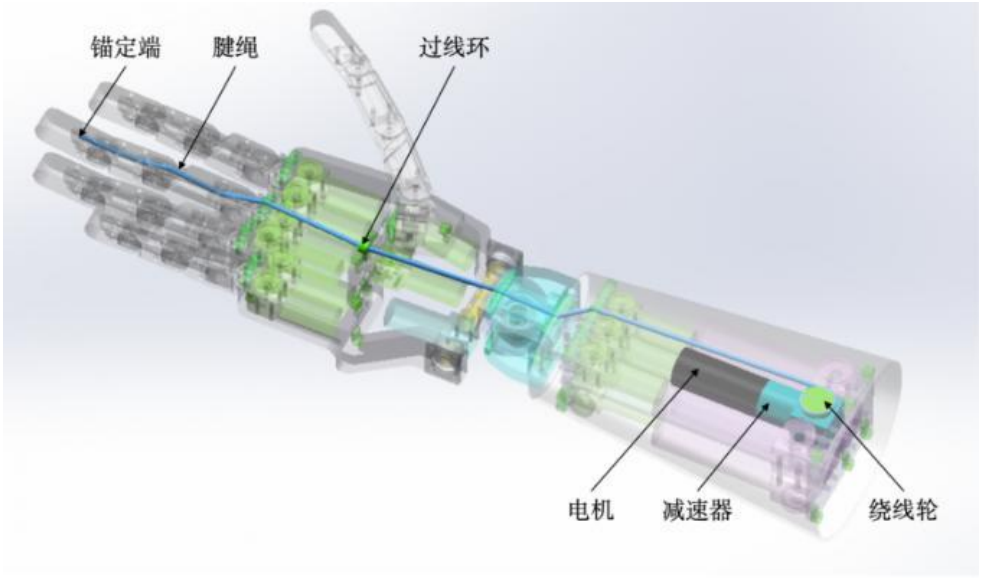
表10: 灵巧手腱绳材料对比——钢丝绳与超高分子量聚乙烯（UHMWPE）纤维

对比维度	钢丝绳	超高分子量聚乙烯（UHMWPE）纤维
材料类别	金属类腱绳材料，主要包括碳钢丝绳、不锈钢丝绳等	高性能聚合物纤维，又称高强高模聚乙烯纤维
核心性能	强度高、承载能力较强	高强度、高模量、低密度
强度与重量	以高强度支撑较大载荷	比强度优势突出，有利于轻量化设计
摩擦表现	摩擦表现取决于绳股结构、润滑条件及接触表面	具有耐磨特性，实际表现仍需结合绳体结构及工况验证
柔性&冲击性能	弯曲性能受钢丝直径及绳股结构影响	柔韧性较好，冲击能量吸收能力较强
环境适应性	不锈钢等方案可满足不同耐腐蚀需求	具有耐低温、耐紫外线及耐化学腐蚀等特性
应用价值	为腱绳传动提供较强承载能力	兼顾强度与轻量化，适用于对运动部件质量敏感的设计
选型验证重点	最小弯曲半径、弯曲疲劳、摩擦损耗及端部固定可靠性	蠕变与伸长、反复弯曲磨损、温度适应性及端部固定可靠性

数据来源：艾邦机器人，财通证券研究所

下载日志已记录，仅供内部参考

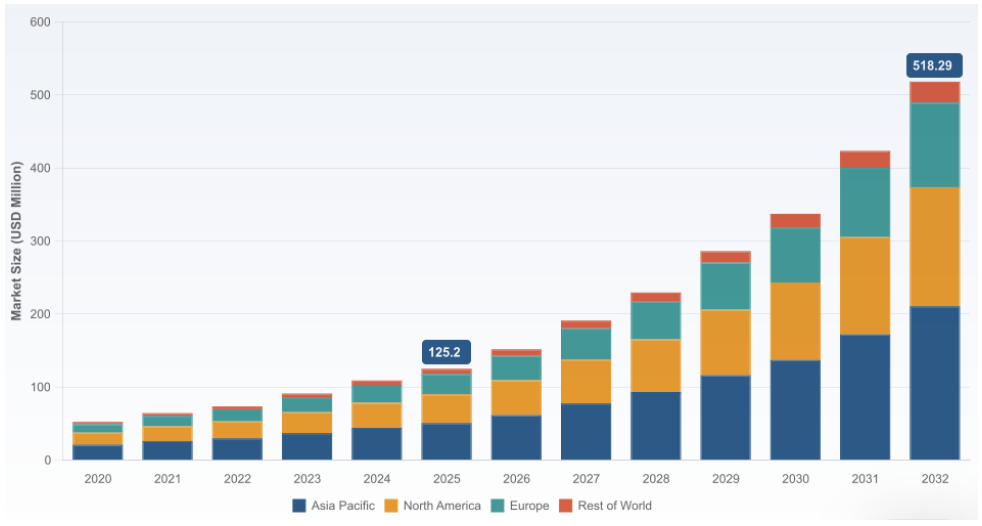
图11: 腱绳传动方案原理图



数据来源：36Kr，财通证券研究所

全球机器人腱绳市场正处于商业化加速的关键成长阶段。据 PW 咨询化学与能源研究中心，2025 年全球机器人腱绳市场规模约 1.25 亿美元，预计 2025-2032 年将以 22.5%的年复合增长率持续扩容，2032 年市场总规模有望达到 5.18 亿美元，核心驱动来自全球各领域从传统刚性链机构向柔性电驱机器人系统的转型趋势。分材料结构来看，UHMWPE 纤维占据市场主导地位，2025 年份额达 43.7%，对应规模约 0.55 亿美元，凭借优异的强度重量比与可靠性成为人形机器人腱绳驱动的核心材料；Vectran 和 LCP 纤维、芳纶纤维则分别占比 25.0%、18.3%，不锈钢及混合绳索占比 13.0%，高端纤维材料制备壁垒较高，产能集中于成熟供应链企业。

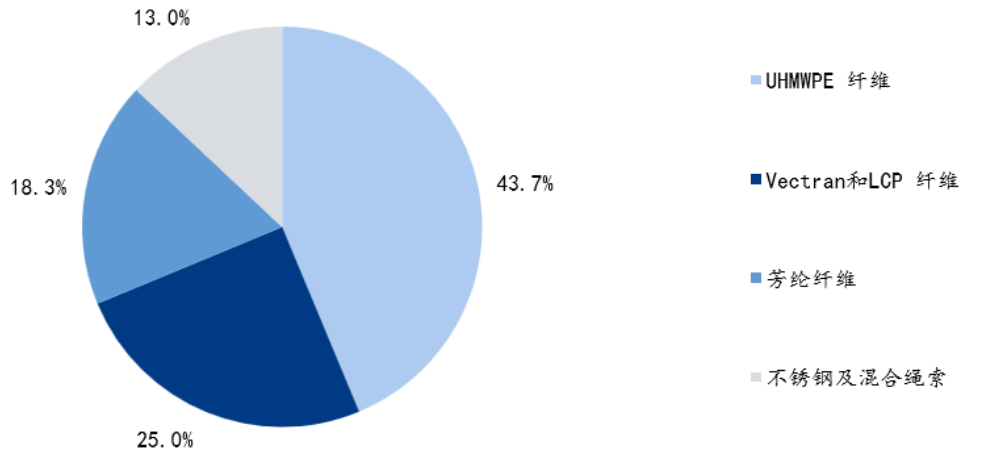
图12: 2025 年全球机器人腱绳市场规模约 1.25 亿美元且有望延续双位数增长势头



数据来源：PW 咨询化学与能源研究中心，财通证券研究所

下载日志已记录，仅供内部参考

图13: 2025 年 UHMWPE 纤维是机器人用腱绳主导材料，全球市场份额约 43.7%



数据来源：PW 咨询化学与能源研究中心，财通证券研究所

优势：腱绳路线的核心价值在于以近端驱动换取更高的手部自由度集成空间和更低的末端惯量。电机布置于前臂等近端位置后，手指内部可减少驱动器占用，为细长、仿人的手指结构及多关节设计创造条件；1X NEO 灵巧手已披露手指和掌部具有 22 个全驱动自由度，Shadow Dexterous Hand 具有 20 个主动自由度。此外，腱绳传动与低惯量、可回驱的驱动机构结合，有助于手指在接触或受到冲击时顺应外力。

约束：腱绳路线的主要瓶颈在于长期可靠性、传动精度及维护复杂度。腱绳反复弯折和受拉可能带来磨损、伸长及预张力漂移，过孔、过腕布线产生的摩擦和多腱串扰则会增加位置与力控制的难度。厂商正通过结构和测试改善这些问题：1X 披露了部件及完整手指组件的数百万次循环测试；特斯拉公开专利提出优化腕部线缆排布以减少弯折、摩擦和串扰。

代表企业：特斯拉、1X Technologies 和 Shadow 等。特斯拉在 2022 年 AI Day 展示的第一代 Optimus 灵巧手采用欠驱动腱绳方案，单手配置 6 个执行器，实现 11 个自由度，并表示其在比较合成材料腱绳与金属绳方案后选择了强度更高的金属缆绳；特斯拉最新公开的灵巧手专利进一步将腱绳材料范围扩展至聚合物、金属及金属合金，并涵盖聚合物涂层和编织结构等方案。1X NEO 新一代灵巧手采用 25 自由度腱绳架构，其中手指及掌部 22 个自由度完全驱动、腕部 3 个自由度，电机布置于前臂，并采用约 5:1-15:1 的低减速比腱绳传动实现力控和反驱；Shadow Dexterous Hand 则采用 20 个直流电机和腱绳传动，具备 20 个主动自由度及 4 个欠驱运动。

所需核心零部件与全球供应商：腱绳传动系统主要包括腱绳/高强纤维、驱动电机、力/张力传感器，以及导轮、套管、腕部过线机构、卷线轮、绞盘和张紧模组等部件。海外方面，Carl Stahl Technocables 提供金属腱绳类产品；Maxon、FAULHABER 布局驱动电机；Shadow Robot 在整手系统中集成腱绳或荷载传感器（主要体现为整机集成能力，非独立传感器供应商）。国内方面，南山智尚、恒辉安防布局超高分子量聚乙烯（UHMWPE）腱绳，高测股份布局金属腱绳；鸣志电器、兆威机电、雷赛智能及江苏雷利旗下鼎智科技布局驱动电机；柯力传感拥有微型力、张力检测等相关产品。导轮、套管、腕部过线机构及卷线、张紧组件则多由整机厂商自主研发，围绕具体手型及传动路径进行定制设计，其中特斯拉专利中已体现了腕部过线机构方面设计。

下载日志已记录，仅供内部参考

表11: 腱绳路线灵巧手相关零部件及代表企业

零部件	海外代表企业	国内代表企业
腱绳/高强纤维	Carl Stahl Technocables GmbH（德国，金属腱绳类）	南山智尚（UHMWPE 腱绳）、恒辉安防（UHMWPE 腱绳）、高测股份（金属腱绳）
驱动电机（同丝杠路线）	Maxon（瑞士）、Faulhaber（德国）	鸣志电器、兆威机电、雷赛智能、江苏雷利（鼎智科技）
力/张力传感器	Shadow Robot（整手集成腱绳载荷传感器，非独立传感器供应商）	柯力传感（微型力、张力检测等相关产品）
导轮/套管/腕部过线机构/卷线轮/绞盘/张紧模组	多为整机厂自研（特斯拉已专利化）	

数据来源：PW 咨询化学与能源研究中心，南山智尚公告，恒辉安防公告，柯力传感官网，特斯拉专利，财通证券研究所

3.3 路线三：纯电机驱动方案（直驱/微型齿轮箱+刚性传动）

纯电机驱动分为两条子路线：1）关节集成电机-齿轮驱动：面向高自由度的方案，其将电机及必要的减速机构布置在指关节附近，通过齿轮等刚性部件传递动力，减少对跨关节腱绳的依赖，使各关节能够独立控制。星动纪元 XHAND1 官方资料披露，其各手指关节由电机和齿轮驱动，具有 12 个主动自由度；星动纪元于 2026 年 6 月发布 XHAND 1 PRO，显示其具有 21 个主动自由度，采用全直驱高自由度设计，侧掌搭载独立自由度，大幅提升小拇指对指精度和整手抓握能力。2）掌内电机经刚性机构驱动多个关节：侧重紧凑集成或机械耦合的另一类方案。兆威机电披露，其 DM17 采用全直驱方案，集成了微型减速器、电机、控制单元及电子皮肤传感器等，具备 17 个主动自由度；LM06 采用连杆方案。

优势：凭借关节级集成设计，具备更优的力控稳定性与模块化价值。相较于腱绳远程传动，关节内置或掌内集成的刚性/复合方案可将力控、反馈与通信能力封装进关节级模块，减少了长腱绳带来的张力漂移变量，若产品定位为独立外售、工业换型或标准化开发平台，其模块化价值更容易被客户识别。

约束：存在明确的产品化约束，需在重量、空间与性能间做系统性权衡。该路线同样存在产品化约束，其将电机和减速器内置在手部会增加手部的质量与惯性、占用内部空间，同时降低散热性能和抗冲击能力，因此高集成关节方案需要在手部空间、执行器数量、传感反馈与整手重量之间做系统权衡。以宇树 Dex5-1 为例，其单手共 20 个自由度（含 16 个主动自由度），手指可独立更换，搭载 12 个自研微型力控复合传动关节与 4 个微型力控关节齿轮传动，指尖力达 10N，通讯速率 1000Hz，本体重量 1100g，正是高集成路线下多维度权衡的典型体现。而若目标为极高自由度遥操作与大规模操作数据采集，低惯量、力透明度更高的腱绳方案仍具备相对优势。

下载日志已记录，仅供内部参考

图14: 刚性与复合传动模块化优势突出



数据来源：宇树科技官网，财通证券研究所

所需核心零部件与全球供应商：上游相关部件包括无刷/空心杯电机、微型行星或谐波减速器、精密齿轮副及微型轴承等（相关部件生产商可参考表 8）。

3.4 其他方案：液压、人工肌肉、气动、SMA 等

微型液压驱动：兼具较高输出力与灵巧操作能力，是电驱方案之外的重要探索方向。Sanctuary AI 的 Phoenix 平台采用微型液压阀驱动灵巧手，公司披露的手部版本具有 21 个自由度，并展示了手内操作及仿真策略向真实手部的零样本迁移。液压系统需要集成供压、阀组与管路，对整机的小型化、密封和维护提出较高要求。公司目前正将液压灵巧手面向工业操作场景推进。

水压人工肌肉：以仿生结构和柔顺运动为主要特点。Clone Robotics 以水驱动 Myofiber 人工肌肉模拟人体肌腱-肌肉系统，其 2023 年展示的 CloneHandv18 原型采用 37 条人工肌肉、具有 27 个自由度。公司披露单根约 3 克的 Myofiber 可产生至少 1 千克收缩力。该方案可形成接近人手的骨骼与软组织形态，但水泵、流体回路及多肌肉协同控制增加了系统集成难度。

气动驱动：具备柔顺、安全接触优势，主要用于软体手部装置和特定研究场景。哈佛大学研究团队展示了利用气动软执行器辅助抓握的手部装置。气动路线需配置气泵、阀组等供气系统，气体压缩性及压力动态也增加了高精度控制难度。

形状记忆合金（SMA）代表轻量化柔性驱动方向。SMA 通过温度变化产生形变，结构紧凑，但连续工作性能受热管理和循环疲劳影响。

总体来看，以上路线拓展了灵巧手的设计空间，在重载操作、柔顺接触与仿生形态等细分方向各具特点，其产业化进展取决于执行器性能与供能、控制、维护系统的整体匹配。

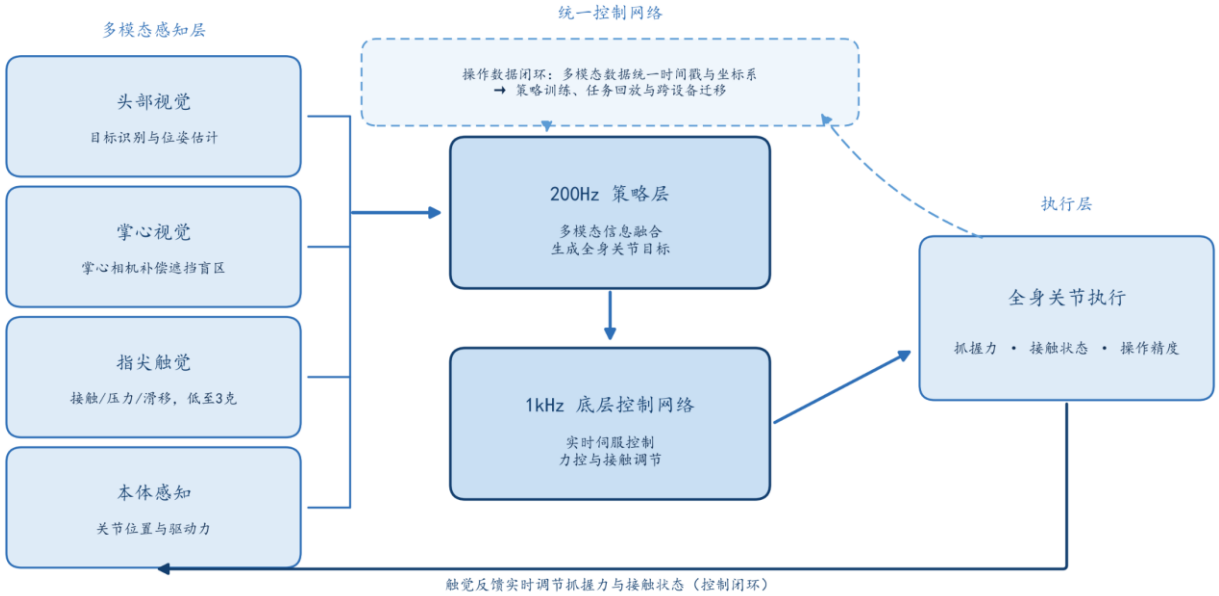
下载日志已记录，仅供内部参考

4 感知与数据：触觉由硬件配置走向控制闭环

多模态感知是灵巧手实现稳定操作与沉淀训练数据的基础。视觉负责目标识别与位姿估计，触觉用于判断接触、压力和滑移，本体感知则记录关节位置与驱动力；只有将多类传感信息接入统一控制链，灵巧手才能根据环境变化实时调整动作，并形成可用于策略训练的操作数据。Figure、Meta 及宇树等企业相继强化掌心视觉、指尖触觉和标准化数据接口，表明行业竞争正在由机械执行能力向“感知-控制-数据”一体化延伸。

多模态补盲赋能触觉，评价从重数到重效。触觉正由感知配置升级为遮挡条件下的控制输入，Figure 03 在每只手中集成掌心相机，利用近距离视觉补充头部相机在柜体、狭窄空间及手部遮挡下的感知盲区；其指尖触觉传感器可检测低至 3 克的压力，为接触判断和抓取力调节提供反馈。据 Figure 演示，Helix 02 已将头部视觉、掌心视觉、指尖触觉及全身本体感知接入统一控制网络，并完成旋开瓶盖、从药盒中取出单颗药片、推动注射器精确排出 5 毫升液体等任务，表明触觉开始直接参与抓握力、接触状态和操作精度控制。

图15: 灵巧手多模态感知-控制闭环架构（以 Helix 02 为例）



数据来源：Figure 官网，财通证券研究所

传感点数量仅反映感知覆盖度，触觉能力仍需结合系统指标评价。据官网披露，宇树 Dex5-1 系列单手配置 94 个触觉传感器，说明高密度感知已成为高端灵巧手的重要配置。我们认为，触觉的产业化评价应由硬件点数转向任务收益，重点考察视觉遮挡条件下的操作成功率、滑移识别能力、易损物损伤率、抓取力控制精度及长期标定稳定性；若触觉数据不能稳定进入控制环，增加传感点反而可能提高线束、通信、标定和故障管理成本。

科研平台正成为触觉硬件、数据接口和算法工具链的标准化入口。Meta 已公开 Digit 360 触觉传感器及 Digit Plexus 软硬件平台，其中 Digit Plexus 能够将指尖、手指和掌面的多类触觉传感器接入统一控制板，并通过单根线缆完成数据采集、控制和分析。同时，Meta 与 GelSight 合作推进 Digit 360 制造与分发，并与 Wonik Robotics 开发集成触觉传感器的新一代 Allegro Hand，表明触觉产业正由单一传感

下载日志已记录，仅供内部参考

器供应向“传感器-灵巧手-数据接口-开发工具”一体化平台演进。

灵巧手竞争壁垒将由传感器硬件延伸至多模态数据闭环。Helix 02 将视觉、触觉和本体感知输入统一网络，由 200Hz 策略层生成全身关节目标，并由 1kHz 底层控制网络执行，体现了多模态感知进入实时控制的技术路径；Meta Digit Plexus 则通过统一硬件接口降低不同触觉传感器的数据采集和分析门槛。高质量操作数据需要同步记录视觉、触觉、关节位置、驱动力、控制指令和任务结果，并统一时间戳、坐标系、标定协议及数据格式，才能支持策略训练、任务回放和跨设备迁移。由此，触觉平台的长期价值不仅在于销售传感器，更在于建立可复用的数据接口、控制工具和开发生态。

5 企业：多主体多路线并行，海内外产业格局分化

5.1 海外企业：整机/科研/零部件并行，共筑海外灵巧手产业生态

海外灵巧手产业由整机厂自研、专业科研平台和零部件企业上移三类力量共同推动。Tesla、1X 和 Figure 将手部纳入自有整机体系，核心目标是掌握运动控制、触觉反馈和操作数据；Shadow Robot、Wonik Robotics 面向科研机构提供独立灵巧手、软件接口和实验生态；舍弗勒则依托电机、传动、传感器和制造体系进入整手，为成熟零部件企业向系统级产品延伸的代表。

表12: 海外灵巧手产业包含整机厂自研、专业科研平台和零部件企业延伸三类

企业	技术路线	核心架构	驱动配置	产品定位	核心优势	产能进展
Tesla	电机驱动+欠驱腱绳	单执行器经腱绳带同指两关节，扭簧复位，欠驱设计	正式规格未披露	Optimus 整机内置，非独立外售	减少执行器数量，兼顾抓取与机械自适应	Gen3 为首款量产设计，计划 2026 年底投产
1X	前臂电机+全驱腱绳	电机前置前臂，低减速比腱绳传力，配指面触觉	25 个全主动自由度（指掌 22+腕 3），原生力控+反驱	整机感知核心接口，与 NEO 体系深度绑定	传动-驱动-感知-控制闭环，提升数据质量	年产能 1 万只，腕部超 200 万次循环测试
Figure	感知控制强化	掌心相机+指尖触觉（最低 3g 检测），多模态接入统一网络	未披露	设计/算法/制造协同，主打端到端操作	多模态补盲，触觉直接参与精度控制	首代产线年产能 1.2 万台，四年目标 10 万台
Shadow Robot	前臂电机+混合腱绳	20 电机集中前臂，腱绳传动；集成百余个传感器与 ROS 工具	20 主动+4 欠驱自由度	科研级遥操作与具身智能研究平台	复杂操作能力强，科研生态成熟	无量产规划，主打工具属性
Wonik Robotics	关节独立驱动	关节独立电流控制，多自由度同步；联合 Meta 补强触觉	未披露，侧重关节独立性	跨平台研发用标准整手模组	跨机构适配性强，接口稳定可复现	180+研究伙伴；与 Meta 合作开发新品
舍弗勒	电机驱动+腱绳传动	模块化手指，集成触觉；依托内部精密制造能力	20 自由度	零部件平台向系统级模组延伸	垂直集成与批量制造能力突出	已披露方案，量产节奏未明

数据来源：各公司官网等，财通证券研究所

➢ Tesla：欠驱腱绳技术路线，绑定整机聚焦量产兑现

灵巧手定位为 Optimus 整机操作系统的一部分，采取电机驱动+欠驱腱绳路线。公司官网将 Optimus 定义为面向危险、重复或枯燥任务的通用自主双足人形机器人，并围绕平衡、导航、感知和物理交互建设软硬件栈。从公开产品形态看，手部并非独立对外销售的通用模组，而是与视觉、控制、AI 推理及整机制造共同迭代，其商业价值首先取决于 Optimus 的量产与任务落地。公司专利披露单个执行器通过腱绳带动同一手指两个关节，并以扭簧复位，驱动程度属于执行器数量少于机械自由度的欠驱结构，该结构通过降低执行器数量换取包络抓取与机械自适

下载日志已记录，仅供内部参考

应，但最新 Optimus 的执行器位置、整手自由度及触觉配置尚未由正式规格确认。

竞争焦点正在逐步转向量产设计兑现。公司 2025Q4 更新中表示，Optimus Gen 3 将采用最新手部设计，并把该代产品定义为首个面向规模生产的设计，计划在 2026 年底前启动生产。上述时间与产能均属于公司规划，后续判断应重点观察正式手部规格、产线建设、循环寿命、实际产量和工厂任务部署，而非以专利数量替代商业化验证。

➢ 1X：前臂电机与全驱腱绳支撑数据闭环

将 NEO 手部定位为机器人作用并感知物理世界的核心接口，采用前臂电机、低减速比腱绳远程传动和高全驱程度的组合路线。一代手部拥有 25 个自由度（其中手指及掌部 22 个自由度全部主动驱动，腕部配置 3 个自由度），各关节支持原生力控和反驱。该产品与 NEO 整机、电机、固件和训练体系深度绑定，公司的竞争重点并非单独销售硬件，而是通过手部提高遥操作、策略训练和自主操作的数据质量。**1X** 电机布置在前臂，通过约 5:1 至 15:1 的腱绳系统向手指传力；手指及掌部 22 个自由度与腕部 3 个自由度全部主动驱动，并支持原生力控和反驱。指面触觉可测量法向力、接触位置和剪切力，使执行器位置、传动方式、驱动程度与感知控制在同一系统中形成闭环。

进入制造能力验证阶段，但产能披露尚不能等同于规模交付。公司称已有数百只手下线、具备当年生产 1 万只手的能力，并披露腕部完成超过 200 万次高载循环测试。后续应重点跟踪 NEO 实际交付、手部良率、现场寿命与腱绳维护频率，以判断全驱高自由度架构能否兼顾性能和全生命周期成本。

➢ Figure：感知控制路线强化端到端操作

当前可明确归入感知控制强化路线，差异化在于产品设计、算法和制造同步推进。Figure 03 披露掌心近距相机和可检测约 3 克压力的指尖触觉，Helix 02 则将视觉、触觉与本体感知接入统一神经网络并形成分层控制。公司披露 Figure 03 减少零件与装配步骤，并由较多 CNC 加工转向压铸、注塑和冲压，以适配更高规模的制造。BotQ 首代产线最高 1.2 万台整机的年产能以及四年 10 万台目标均为企业规划，实际竞争力仍需由产线爬坡、客户验收和复杂任务成功率验证。

➢ Shadow Robot：前臂电机与混合腱绳服务科研遥操作

Shadow Robot 定位于高自由度机器人操作、遥操作和具身智能研究平台，采用前臂电机、腱绳远程传动和全驱与欠驱并存的混合架构。其经典灵巧手配置 20 个电机布置于前臂驱动系统，通过腱绳驱动 20 个主动自由度，同时保留 4 个欠驱运动，以较高自由度密度换取更长传动链和张力维护需求。产品集成 100 余个传感器、ROS 和遥操作工具，体现腱绳路线需要与位置、张力及触觉反馈共同构成控制系统。其客户价值主要来自成熟控制能力、实验工具与长期科研生态。

Shadow 的优势集中在复杂操作能力和跨项目复用，而非轻量化与低成本量产。前臂电机阵列与腱绳远程传动为手部保留较高自由度密度，但 4.3 千克的公开重量与面向轻量化人形整机的产品边界不同。公司后续扩张取决于科研工具链能否向具身数据采集和商业机器人平台延伸，同时降低系统重量、成本与维护门槛。

➢ Wonik Robotics：关节独立驱动构建标准研究平台

以 Allegro Hand 服务机器人操作和人形机器人研发，公开产品可明确归入关节独立驱动路线。公司具备硬件、软件和执行器控制的内部开发能力，产品采用关节独立电流控制，并披露已有 180 余家研究伙伴使用该平台。Allegro Hand 强调关

下载日志已记录，仅供内部参考

节独立电流控制和多自由度同步，表明其驱动程度更侧重关节独立性，产品形态则适合作为跨平台整手模组。官网未披露内部减速器属于齿轮、丝杠或其他形式，因此我们将其归为关节独立驱动平台。同时，其与 Meta 合作集成 Digit Plexus 则进一步补强感知控制维度。相较整机厂自研手部，Allegro Hand 的核心价值在于跨机构使用、开发接口稳定和实验结果可复现。

Wonik 正通过 Meta 合作把成熟研究平台延伸至触觉生态。Meta 披露双方将开发集成 Digit Plexus 的新一代 Allegro Hand，并由 Wonik 负责制造和分发。该合作有望强化触觉数据接口和开发者覆盖，商业化仍需观察正式发布和客户导入。

➢ 舍弗勒：腱绳整手与精密制造平台协同

以精密传动、电机、传感器和规模制造能力切入灵巧手，电机驱动+腱绳传动+模块化手指+集成触觉构建整手方案。舍弗勒将灵巧手纳入人形机器人产品组合，披露方案采用模块化手指、20 自由度腱绳驱动和集成触觉传感器，并强调内部传动与电机驱动能力。其定位更接近能够提供零部件及系统级模组的制造平台，而非以操作模型和机器人整机为主的公司，体现成熟零部件平台向系统级手部集成上移。

潜在优势在于垂直集成和批量制造体系。公司同时展示高效滚珠丝杠、钣金成形和内部生产技术，表明可围绕不同关节需求组织电机、线性传动、腱绳与传感器方案。但整手业务能否形成新增量仍取决于外部客户定点、产品定型和量产节拍。

5.2 国内公司：整机/外售/传动延伸，国内产业梯队清晰

国内灵巧手企业已形成整机生态、独立外售和精密传动上移三类布局。宇树依托机器人整机和算法生态布局高自由度产品，因时、灵心巧手、雷赛智能与傲意通过多型号、标准接口和开发工具服务跨平台客户，兆威则把微型传动能力向整手系统集成延伸。国内产品参数披露相对丰富，但规模收入、出货量、良率、返修率和客户复购仍较少公开，商业化判断应区分产品发布、客户测试与批量交付。

表13: 国内灵巧手企业已形成整机生态、独立外售和精密传动上移三类布局

企业	技术路线	核心架构	驱动配置	产品定位	核心优势
宇树科技	电机驱动+关节级复合刚性传动	12 个复合传动关节+4 个齿轮传动关节；Dex5-1P 配 94 个触觉传感器，掌内闭环	20 个机械自由度，16 个主动自由度；支持力控、反驱，1000Hz 通信	高自由度操作、强化学习、整机配套	整机算法生态协同，手指可独立更换，支持二次开发
因时机器人	掌内微型伺服电缸+耦合驱动	微型伺服执行器；配触觉/力/位置/温度 4 类 24 组传感器	6 个主动自由度，12 个关节，欠驱耦合设计	跨平台客户服务，标准抓取与工业集成	规格完整度高，快速集成能力强，接口标准
兆威机电	掌内高集成滚珠丝杠路线	空心杯电机+行星齿轮箱+滚珠丝杠等动力链	17 个主动自由度，集成位置、力传感器与控制模块	微型传动业务向系统级产品延伸，切入人形供应链	垂直集成能力强，依托电机、传动、精密制造基础
灵心巧手	连杆/直驱/腱绳多路线矩阵	多传动形式布局，部分型号配电子皮肤与多位置摄像头	O6（6 主动+5 被动）、R30（20 全主动）、L30（22 自由度腱驱）	覆盖科研、工业、具身数据采集，分层匹配任务	产品矩阵全，开发工具完善，适配不同预算场景
雷赛智能	蜗轮蜗杆与丝杠传动双路线	DH116 采用无刷空心杯电机及蜗轮蜗杆传动；DH2116 采用无刷空心杯电机及丝杠传动	DH116、DH116S（11 自由度、6 主动自由度）；DH2116(21 自由度、16 主动自由度)	DH116 定位普及型，DH116S 面向中小型人形机器人，DH2116 定位高自由度操作	自研电机、减速机、编码器及驱动器等核心部件，提供多协议通信与开发资料
傲意科技	掌内电机+低自由度耦合驱动	6 个电机带动 11 个关节，耦合方案；部分型号配逐指力传感器与 PID 控制	6 个主动自由度，11 个运动关节，欠驱耦合	轻量化标准化外售，基本抓取与快速部署场景	跨平台适配性强，通信与软件接口丰富

数据来源：各公司官网等，财通证券研究所

下载日志已记录，仅供内部参考

➢ 宇树科技（688836）：复合刚性传动与触觉协同

采取电机驱动、关节级复合刚性传动的高主动自由度路线，定位于高自由度操作、强化学习与机器人整机配套场景。宇树 Dex5-1 产品搭载 12 个微型力控复合传动关节与 4 个微型力控齿轮传动关节，共实现 20 个机械自由度（其中 16 个为主动自由度，部分关节仍保留机械耦合），本体重量 1100g，指尖力 10N，重复定位精度±1mm，通信频率达 1000Hz。其配置 94 个触觉传感器，推动关节模块、力控与触觉在掌内形成较完整闭环，表明宇树更重视关节独立控制、反驱和实时通信，产品定位高于基本开合抓取型末端，相应带来重量、散热与零件一致性约束。

图16: Dex5-1 产品图



数据来源：宇树科技官网，财通证券研究所

整机与开发生态协同是宇树灵巧手的主要竞争基础。Dex5-1P 单手配置 94 个触觉传感器并支持触觉算法二次开发，五根手指可以独立更换，有利于算法迭代和局部维护。产品的主要约束在于 1100 克重量、复杂关节数量和触觉长期标定，后续应以整手寿命、任务成功率、批量交付质量及实际客户应用验证其商业化能力。

➢ 因时机器人：微型伺服电缸与耦合驱动并重

因时机器人采用掌内集成的微型伺服电缸与耦合驱动路线，以微型伺服执行器、标准通信接口服务跨平台灵巧手客户。RH56F1 系列拥有 6 个主动自由度和 12 个关节，驱动程度低于机械自由度，体现以较少执行器完成多关节协同的产品取向；本体重量 620±10 克，重复定位精度±0.2 毫米，拇指指尖抓握力不低于 15 牛、其余四指不低于 10 牛。相较 20 自由度级产品，该路线减少独立控制维度，换取更清晰的重量、输出力、接口和验收边界，更适合标准抓取与工业集成。

图17: RH56F1 系列产品图



数据来源：因时官网，财通证券研究所

下载日志已记录，仅供内部参考

规格完整度和快速集成能力是因时产品化的核心特征。RH56F1 配置触觉、力、位置和温度 4 类 24 组传感器，支持 Ether CAT 与 RS485 或 CAN FD 组合通信，触觉量程为 30 牛、精度为 5%满量程，闭合时间不超过 0.8 秒。公开参数有利于客户选型和系统验收，但公司官网尚未披露该型号的规模出货、寿命数据和独立收入，后续应关注客户复购与批量一致性。

➢ 兆威机电（003021.SZ）：滚珠丝杠动力链向整手系统延伸

兆威 ZWHAND 是掌内高集成丝杠路线的代表性产品，其灵巧手业务本质是微型传动能力向系统级产品的延伸。ZWHAND 产品动力链由空心杯无刷电机、微型行星齿轮箱、精密滚珠丝杠构成，依次完成动力输出、减速增矩、旋转-直线运动转换等功能，该路线动力链清晰，便于围绕位移、推力和速度建立标定。整手配置 17 个主动自由度，集成位置、力传感器与控制模块，该路线更便于量化位移、推力与响应，但产品化能力取决于丝杠精度、同轴度、润滑及批量装配一致性。公司 2025 年实现营业收入 17.16 亿元、归母净利润 2.54 亿元，既有业务为灵巧手研发提供了电机、减速器、精密零件与制造工艺基础；与以算法和整机为核心的机器人公司不同，兆威的产业定位更偏向通过核心动力单元与整手方案切入人形机器人供应链。

图18: ZWHAND 全系列产品图



数据来源：兆威官网，财通证券研究所

从研发设计到了量产阶段，逐步走向 C 端用户与工业端应用。其高性能仿生灵巧手具备 17 个主动自由度、整手重量 1000g、全开或全闭最快时间 0.45 秒、整手握力 30 牛、静态电流不高于 300 毫安。2025 年 7 月 5 日，兆威机电旗下新品牌 ZWHAND 新一代仿生灵巧手 DM17 和 LM06 系列发布，并同步在京东发售。

➢ 灵心巧手：连杆、直驱与腱绳形成多路线矩阵

灵心巧手以多产品矩阵同时覆盖连杆、直驱和腱绳路线，通过多自由度和多传动形式覆盖科研、工业与具身数据采集。公司官网列示 O6、L6、L20、R30 和 L30 等产品，其中 O6 采用 6 个主动加 5 个被动自由度，体现低执行器数量的连杆耦合取向；R30 直驱产品拥有 20 个全主动自由度，强调关节独立控制；L30 腱驱产品则以 22 自由度提高动作空间。部分型号还配置电子皮肤及指尖、掌心和手腕摄像头，使公司能够按任务在传动方式、驱动程度和感知配置之间提供分层选择。从产品结构看，公司以连杆、直驱和腱绳三条路线分别匹配成本敏感、独立控制和高自由度任务。

产品覆盖和开发工具是灵心巧手扩大客户群的主要抓手。公司提供 ROS、ROS2、Python、协议和产品模型等开发资料，部分型号可配置指尖、掌心和手腕摄像头

下载日志已记录，仅供内部参考

及电子皮肤（触觉）。多路线有利于适配不同预算和任务，但也增加研发平台、供应链和售后复杂度；官网披露的市场份额与量产规模尚缺少法定信息交叉验证，后续应重点观察各型号实际出货和客户复购。

图19: Linker Hand 全系列产品图

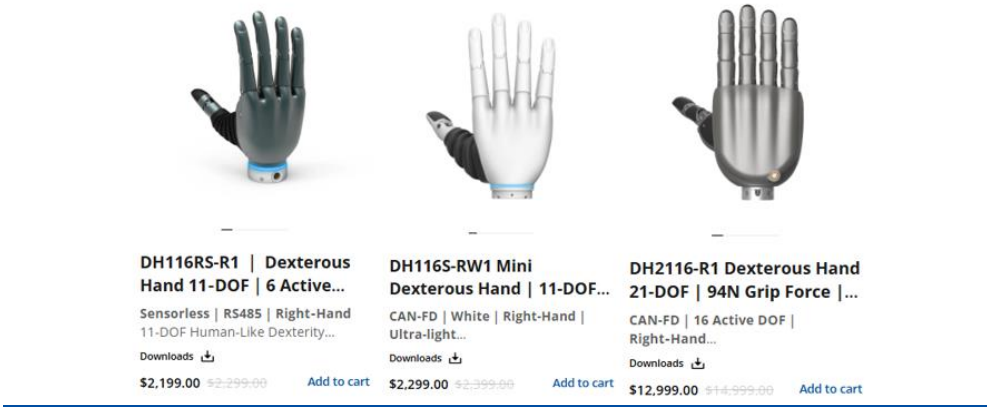


数据来源：灵心巧手官网，财通证券研究所

➢ 雷赛智能：涵盖普及型、轻薄型与高自由度产品

雷赛智能的灵巧手产品在普及型轻量化与高自由度操作之间形成分层布局。定位通用量产的 DH116 系列采用无刷空心杯电机及蜗轮蜗杆传动，具有 11 个自由度、其中 6 个为主动自由度，并可配置指尖和掌心触觉传感器；DH116S 系列面向中小型人形机器人，同为 11 自由度、6 主动自由度，官网所列型号重量为 359g±10g；定位高自由度的 DH2116 系列则采用丝杠传动，具有 21 个自由度、其中 16 个为主动自由度，整手最大握力为 94N。

图20: 雷赛智能灵巧手产品图



数据来源：雷赛智能官网，财通证券研究所

核心部件自研与开发资料配套支撑产品集成。雷赛智能披露，DH116 系列基于自研无刷空心杯电机、行星减速机、微型编码器及多合一驱动器等技术，并兼容 EtherCAT、CAN、RS485 等通信协议；DH2116 产品提供适配 Windows、Linux、ROS2 的开发支持，以及 C++、Python 开发接口、SDK 和模型文件，有助于客户开展机器人本体集成与二次开发。

➢ 傲意科技：掌内电机与低自由度耦合驱动

傲意 RO Hand 采用掌内电机、低主动自由度耦合和逐指力反馈路线，以轻量化、六主动自由度和开放接口切入标准化外售市场。傲意产品 ROH-A002 与 ROH-AP001 内部配置 6 个电机驱动器，带动 11 个运动关节，驱动程度属于执行器数量少于机械自由度的耦合方案。其中 ROH-A002 重量为 545±5 克、重复定位精度±1 毫米、

下载日志已记录，仅供内部参考

单指抓握力不低于 4.41 牛、拇指不低于 9.8 牛，开合时间不超过 0.7 秒。较低主动自由度有助于压缩重量、成本和控制复杂度，适合基本抓取与快速部署，但复杂手内操作能力相对受限。

图21: ROHAND 全系列产品图



数据来源：傲意科技官网，财通证券研究所

通信与软件接口构成傲意产品跨平台适配的主要优势。产品支持 UART、RS485、CAN、Mod Bus-RTU、SDK、ROS、ROS2 和 URDF，ROH-AP001 还配置逐指力传感器和内部 PID 控制。产品手册同时明确不具备防水能力并限制潮湿、粉尘、摔落与超载工况，后续商业化应重点观察现场寿命、环境适应性和机器人客户复购。

6 展望：政策标准筑牢产业底座，技术市场共振加速规模化落地

顶层政策指引与首项行业标准的发布实施，标志着国内灵巧手产业正式进入规范化、规模化发展阶段。在市场需求快速释放与产业资本持续投入的背景下，底层硬件成本下探与大模型技术赋能形成技术协同，行业正沿着末端执行与智能决策协同演进的路径，逐步破解量产初期面临的性能、成本与可靠性之间的平衡难题。当前来看，作为制约具身智能落地的核心末端执行环节，灵巧手的产业评价标准已全面转向真实场景下的作业效能；长期来看，随着作业数据的持续迭代与头部制造企业的工艺赋能，产业有望加速打通商业化落地闭环，推动实体经济生产场景的智能化升级。

6.1 政策与标准底座：顶层设计引领产业规范化发展

顶层政策确立战略地位，地方配套资金夯实产业协同底座。2023 年 11 月，工信部印发《人形机器人创新发展指导意见》，提出到 2025 年，人形机器人创新体系初步建立，“大脑、小脑、肢体”等一批关键技术取得突破，整机产品达到国际先进水平，并实现批量生产；到 2027 年，人形机器人技术创新能力显著提升，构建具有国际竞争力的产业生态，综合实力达到世界先进水平。各级政府通过专项基金、示范产线等政策矩阵提供实质性支撑，加速前沿技术向真实产线转化。此举有望降低硬科技企业长周期研发的资金风险，构建政企研资协同的宏观发展框架，将灵巧手产业正式纳入国家未来产业核心培育梯队。

标准体系的正式发布，标志着行业正式迈入规范化发展新阶段。2026 年，工业和信息化部人形机器人与具身智能标准化技术委员会正式发布了《人形机器人与具身智能标准体系（2026 版）》。这是我国首个覆盖全产业链、全生命周期的国家级标准顶层设计，填补了国内该领域标准体系的空白。该体系由工信部牵头，联合 120 余家科研院所、企业和行业用户单位共同编制，涵盖基础共性、类脑与智算、肢体与部组件、整机与系统、应用及安全伦理等六个核心部分。其中，“肢

下载日志已记录，仅供内部参考

体与部组件标准”重点规范了包括灵巧手、类人躯干、臂与腿足在内的核心硬件与感知通信模块，为产业模块化发展提供指导。

6.2 市场扩容与技术共振：头部集聚加速降本，手脑协同破解量产瓶颈

灵巧手市场呈爆发式增长，头部企业集聚效应显著。GGII 数据显示，2025 年中国灵巧手销量达 1.92 万只，预计 2030 年有望突破 43 万只。资本市场端，2023 至 2026 年 5 月期间行业共发生约 57 笔融资，总额达 128 亿元，少数头部企业估值已突破 200 亿元。然而，行业目前仍处于发展早期，面临“低成本、高性能、高稳定性”的不可能三角，中游路线尚未收敛，下游场景闭环亦尚未成型。未来，硬件厂商需与具身模型企业协同，打造手脑协同的数据飞轮，以突破系统瓶颈，真正走向成熟期。

国产核心器件技术迭代突破成本掣肘，手脑协同算法赋能硬件自主决策。针对供应链零部件技术瓶颈，国产行星滚柱丝杠依靠冷锻等工艺创新加速降本，低成本连杆方案价格已下探至万元以下，重塑了底层传动的成本结构；VLA 等智能大模型的深度融合，驱动末端执行器自主习得复杂技能，由刚性预设动作向非结构化泛化操作迭代；基于人体骨骼肌肉系统的仿生多层多级刚柔耦合系统设计，可以实现系统级的动力传输、能量管理和环境交互；高频自适应触觉感知阵列与手脑协同控制深度耦合，有望拓宽机器人的复杂作业边界。

6.3 场景与生态拓宽：跨越“最后一厘米”，重塑实体经济

灵巧手是制约具身智能场景落地的核心末端执行瓶颈。当前人形机器人产业正从行走、跳跃等基础运动能力的技术验证阶段，向工业生产、商业服务、家庭服务等真实场景渗透，其商业价值的核心评判标准已转向精密微操任务的执行能力。作为机器人与外部环境开展高维度复杂物理交互的末端执行载体，灵巧手是推动机器人从“基础移动能力验证”向“实际作业执行”升级的核心环节，也是当前产业迈向规模化落地过程中亟待突破的关键工程难点之一。

行业评价体系正由硬件参数导向往实际作业能力导向切换。长期以来，产品评价多聚焦于自由度、负载、定位精度等核心硬件指标，但高参数无法直接转化为精细作业能力。工业装配、日常微操等真实场景（如线缆连接、粉末称量、电动工具装配等），需要微距视觉、高精度触觉与力控算法形成完整控制闭环。当前行业竞争已突破单纯的硬件规格比拼，开始全面考量复杂非结构化环境下的实际任务完成率与综合作业表现。

本体矩阵与高保真数据采集构成的双轮驱动模式，正加速打通产业商业化闭环。手脑协同难点的突破高度依赖“多构型本体×规模化数据采集”的双向驱动，遵循硬件定义数据采集上限、数据反哺硬件价值提升的演进逻辑。以差异化配置的系列化本体为载体，搭配数据手套等工具链积累同源作业数据，可反向推动软硬件持续迭代。此外，引入具备精密制造与规模化交付优势的头部制造企业（如蓝思科技等）开展产品工艺优化、保障量产一致性，是技术从样机验证迈向大规模商业落地的重要支撑。

7 风险提示

技术路线迭代与选型风险：当前灵巧手行业传动路径、驱动布局、感知方案均未形成统一技术共识，路线仍处于快速迭代阶段；若企业技术选型偏离产业主流演进方向，或核心技术突破进度不及预期，可能面临研发投入效率偏低、产品竞争

下载日志已记录，仅供内部参考

力弱化的风险。

规模化量产不及预期风险：行业整体处于产业化验证早期，多数企业尚未披露稳定批量出货数据，产品良率、循环寿命、返修率等关键商业化指标仍待市场验证；若精密制造工艺、批量装配一致性等瓶颈突破缓慢，可能导致规模化量产节奏延后。

核心零部件降本不及预期风险：灵巧手高度集成微型驱动、精密传动、高精度传感器等高壁垒零部件，当前终端产品售价偏高；若上游核心器件国产化突破、规模化降本进度不及预期，可能制约产品在更多应用场景的渗透率提升。

市场竞争加剧风险：海内外整机自研、独立外售、零部件延伸三类主体多元布局，行业新进入者持续增加，部分赛道或出现产品同质化倾向；若市场竞争进一步加剧，可能引发价格竞争，挤压行业内企业的盈利空间。

下游应用场景拓展不及预期风险：人形机器人等下游应用仍处于发展初期，灵巧手市场需求依赖终端场景落地进度；若下游场景商业化渗透缓慢，或灵巧手实际作业能力无法满足真实工况要求，可能导致市场需求释放不及预期。

下载日志已记录，仅供内部参考

信息披露

● 分析师承诺

作者具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格，并注册为证券分析师，具备专业胜任能力，保证报告所采用的数据均来自合规渠道，分析逻辑基于作者的职业理解。本报告清晰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，作者也不会因本报告中的具体推荐意见或观点而直接或间接收到任何形式的补偿。

● 资质声明

财通证券股份有限公司具备中国证券监督管理委员会许可的证券投资咨询业务资格。

● 公司评级

以报告发布日后 6 个月内，证券相对于市场基准指数的涨跌幅为标准：
买入：相对同期相关证券市场代表性指数涨幅大于 10%；
增持：相对同期相关证券市场代表性指数涨幅在 5%～10%之间；
中性：相对同期相关证券市场代表性指数涨幅在-5%～5%之间；
减持：相对同期相关证券市场代表性指数涨幅小于-5%；
无评级：由于我们无法获取必要的资料，或者公司面临无法预见结果的重大不确定性事件，或者其他原因，致使我们无法给出明确的投资评级。
A 股市场代表性指数以沪深 300 指数为基准；中国香港市场代表性指数以恒生指数为基准；美国市场代表性指数以标普 500 指数为基准。

● 行业评级

以报告发布日后 6 个月内，行业相对于市场基准指数的涨跌幅为标准：
看好：相对表现优于同期相关证券市场代表性指数；
中性：相对表现与同期相关证券市场代表性指数持平；
看淡：相对表现弱于同期相关证券市场代表性指数。
A 股市场代表性指数以沪深 300 指数为基准；中国香港市场代表性指数以恒生指数为基准；美国市场代表性指数以标普 500 指数为基准。

● 免责声明

本报告仅供财通证券股份有限公司的客户使用。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。
本报告的信息来源于已公开的资料，本公司不保证该等信息的准确性、完整性。本报告所载的资料、工具、意见及推测只提供给客户作参考之用，并非作为或被视为出售或购买证券或其他投资标的邀请或向他人作出邀请。
本报告所载的资料、意见及推测仅反映本公司于发布本报告当日的判断，本报告所指的证券或投资标的价格、价值及投资收入可能会波动。在不同时期，本公司可发出与本报告所载资料、意见及推测不一致的报告。
本公司通过信息隔离墙对可能存在利益冲突的业务部门或关联机构之间的信息流动进行控制。因此，客户应注意，在法律许可的情况下，本公司及其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相关服务。在法律许可的情况下，本公司的员工可能担任本报告所提到的公司的董事。
本报告中所指的投资及服务可能不适合个别客户，不构成客户私人咨询建议。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。在任何情况下，本公司不对任何人使用本报告中的任何内容所引致的任何损失负任何责任。
本报告仅作为客户作出投资决策和公司投资顾问为客户提供投资建议的参考。客户应当独立作出投资决策，而基于本报告作出任何投资决定或就本报告要求任何解释前应咨询所在证券机构投资顾问和服务人员的意见；
本报告的版权归本公司所有，未经书面许可，任何机构和个人不得以任何形式翻版、复制、发表或引用，或再次分发给任何其他人，或以任何侵犯本公司版权的其他方式使用。