

人机系列 05：人形机器人能力跃迁关键支点



刘中玉 分析员

SAC 执证编号：S0080521060003
SFC CE Ref: BSP722
zhongyu.liu@cicc.com.cn



王梓琳 分析员

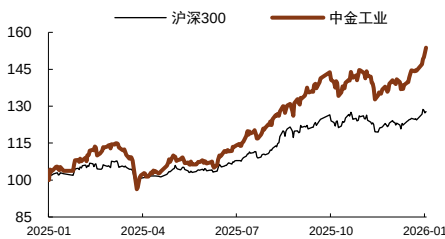
SAC 执证编号：S0080523080005
zilin3.wang@cicc.com.cn



丁健 分析员

SAC 执证编号：S0080520080002
SFC CE Ref: BRQ847
jian3.ding@cicc.com.cn

纵轴：相对值 (%)



中金一级行业：工业

资料来源：Wind，彭博资讯，中金公司研究部

- 机械 | 人机系列01：传感器—高价值量、高壁垒的感知环节 (2025.06.24)
- 机械 | 人机系列02：传动的技术基因及发展趋势 (2025.07.03)
- 机械 | 人机系列03：量产背后的硬件创新 (2025.09.25)
- 机械 | 人机系列04：具身智能大脑的进化之路 (2025.11.11)

更多作者及其他信息请见文末披露页

观点聚焦

投资建议

在人形机器人由“可行走”迈向“可工作”的关键阶段，灵巧手成为决定其功能上限与商业化速度的核心子系统，本文详细梳理灵巧手在传动、驱动、感知方面的发展现状与工程化落地难点。

理由

灵巧手从“原理可行”走向“工程落地”。据中商产业研究院，预计 2030 年全球机器人灵巧手市场规模有望超 30 亿美元。当前灵巧手仍需突破多重瓶颈：1) 高功率密度驱动器在小体积内带来重量增加和热管理压力；2) 工程化与量产规模化难题；3) 感知—驱动—传动方案的协调统一尚未完全成熟。

传动：复合方案成为主流，微型滚珠丝杠加速渗透。旋转传动包括齿轮（含减速器）、连杆、腱绳以及链条等，在灵巧手单手自由度持续提升、高频动作要求、重量约束趋严的背景下，主流厂商普遍采用复合传动方案以兼顾性能与可靠性。其中，腱绳传动因能显著降低指端惯量，支持更高自由度，已成为轻量化灵巧手的重要方向。直线传动中，微型滚珠丝杠则因设计成熟、成本可控，在直线传动中渗透率快速提升。

驱动：无刷直流电机降本趋势显著，特斯拉率先尝试。目前灵巧手驱动以电驱为主，主要包括直流无刷电机、空心杯电机与无框力矩电机。直流无刷电机凭借大功率、高负载特性，在成本敏感型场景中替代趋势增强；空心杯电机则以快速响应、高功率密度优势，仍为高精度、空间受限场景的首选；无框力矩电机具有紧凑结构与高扭矩密度优势，适合大型关节选配。

感知：向多模态融合感知演进。灵巧手感知正从单一力觉感知向“视觉+触觉”多模态感知融合升级，电子皮肤成为多模态感知的标准载体，发展趋势逐渐清晰。当下，电子皮肤仍面临工程化难题，在可靠性、成本和规模化制造方面仍待验证。

估值与建议

我们维持覆盖公司的盈利预测、评级和目标价不变，建议关注在核心部件上具有技术壁垒和量产能力的公司。

风险

人形机器人研发进展不及预期，技术路径不确定带来的投资风险。

目录

引言：人形机器人走向成熟作业的关键抓手	5
灵巧手：多技术路线并行的产业进行曲.....	6
灵巧手决定人形机器人应用天花板.....	6
灵巧手方案升级，步入商业化起点.....	7
多点开花，驱动+传动+感知技术方案尚未收敛	9
多元主体博弈，头部企业开启放量.....	11
驱动系统：关注直流无刷电机的降本趋势	13
直流无刷电机：大功率、高负载，提升机器人力量	13
空心杯电机：快响应、低能耗，实现高精度控制.....	16
无框力矩电机：结构紧凑，适合直接嵌入负载	20
市场空间：预计 2030 年灵巧手空心杯电机市场规模可达 57.6 亿元.....	22
传动系统：多方案技术迭代进行时.....	25
旋转传动：复合方案成为主流选择.....	25
直线传动：微型滚珠丝杠渗透加速.....	27
感知系统：方案通胀时代，多模态融合感知加速	30
力/力矩传感器：柔性力控的基础	31
柔性传感器：材料构筑高壁垒，前沿技术持续迭代	32
视觉传感器：多模态融合的补充技术	34
灵巧手发展趋势：轻量化、高自由度与感知融合	37
轻量化演进：材料替换&拓扑优化	37
高自由度发展：从仿生指标到操作能力的结构性提升.....	38
感知能力升级：传感器加配，缩短感知链路.....	39
产业链梳理	41
风险提示.....	42

图表

图表 1：灵巧手的主要应用场景	6
图表 2：人形机器人灵巧手价值量占比预测（小批量阶段）	7
图表 3：人形机器人灵巧手价值量占比预测（100 万台量产阶段）	7
图表 4：2021-2030 年全球机器人灵巧手市场容量预测	7
图表 5：2021-2030 年全球机器人灵巧手市场规模预测	7
图表 6：灵巧手发展历程	8
图表 7：特斯拉灵巧手方案对比	9
图表 8：灵巧手价值量分布预测	10
图表 9：灵巧手驱动技术路径分类	10
图表 10：灵巧手传动技术路径分类	11
图表 11：灵巧手感知技术路径分类	11
图表 12：主流厂商灵巧手方案	12
图表 13：直流无刷电机、空心杯电机与无框力矩电机对比	13
图表 14：直流无刷电机结构原理	13
图表 15：稳态下 50kHz 产生的低电流纹波	14
图表 16：2024 年全球无刷直流电机市场规模比例	15
图表 17：中国无刷直流电机市场规模及增速	15
图表 18：现直流无刷电机厂商对比	16
图表 19：有刷空心杯电机与无刷空心杯电机的比较	16
图表 20：有刷空心杯电机的结构	16
图表 21：无刷空心杯电机的结构	17
图表 22：空心杯电机的绕线工艺	18
图表 23：空心杯电机市场规模及增速	19
图表 24：国内外空心杯电机性能对比	20
图表 25：无框力矩电机的结构	20
图表 26：科尔摩根 TBM2G 型无框力矩电机可广泛应用于机器人运动轴	21
图表 27：国内外空心杯电机性能对比	22
图表 28：主流灵巧手驱动方案	23
图表 29：灵巧手机电机市场空间预测	24
图表 30：各类旋转传动方式优缺点对比	25
图表 31：齿轮传动方案在灵巧手内部应用示意图	26
图表 32：连杆传动方案在灵巧手内部应用示意图	26
图表 33：连杆结构可实现手指屈伸和左右摇摆动作	26
图表 34：腱绳传动在灵巧手内部应用示意图	27
图表 35：腱绳驱动灵巧手外部示意图	27
图表 36：征和工业微型滚子链条传动在灵巧手内部应用示意图	27
图表 37：灵巧手与假肢机械传动结构分类示例	28
图表 38：微型滚珠丝杠与行星滚柱丝杠性能对比	28
图表 39：陶瓷球与传统钢球性能对比	29

图表 40: 主流人形机器人厂商灵巧手设计	30
图表 41: 力传感器各工作原理对比	31
图表 42: 金属箔传感器与硅应变传感器对比	32
图表 43: 柔性触觉传感器分类优缺点对比	33
图表 44: 2022 年全球触觉传感器竞争格局	34
图表 45: 国内电子皮肤供应商概况（不完全统计）	34
图表 46: 四种视触觉传感器方案	35
图表 47: 帕西尼感知科技——灵巧手 DexH13 GEN2	36
图表 48: 国产阵营灵巧手代表产品自重对比（不含前臂）	37
图表 49: 灵巧手结构件材料类型对比	38
图表 50: 灵巧手代表厂商主动自由度与被动自由度数量对比	38
图表 51: 特斯拉 Optimus Gen3 灵巧手结构示意图	39
图表 52: 智元机器人 OmniHand 灵巧手结构示意图	39
图表 53: 帕西尼 DexH13 灵巧手多维触觉+AI 视觉功能示意图	40
图表 54: 戴盟机器人 DM-Hand1 视触觉灵巧手内部示意图	40
图表 55: Figure 03 灵巧手掌部摄像头示意图	40
图表 56: 国内外布局灵巧手的代表企业	41
图表 57: 可比公司估值表	42

引言：人形机器人走向成熟作业的关键抓手

灵巧手在人形机器人中发挥的战略地位举足轻重。在人形机器人由“可行走”迈向“可工作”的关键阶段，灵巧手已成为决定其功能上限与商业化速度的核心子系统。灵巧手是感知、控制与智能决策的高度集成体，直接决定机器人能否完成抓取、装配、操作工具等高价值任务，据马斯克表示，灵巧手的工程量可能会占到整机开发工程的一半。因此，灵巧手已从“功能模块”升级为人形机器人差异化竞争的关键抓手，其技术成熟度可以被视为衡量人形机器人产业化进程的重要指标。

灵巧手技术路径尚未收敛。从技术演进来看，灵巧手的发展路径仍处于多方案并行探索阶段。在传动层面，腱绳结构具备轻量化与仿生优势，但在耐久性、维护成本和控制复杂度上存在挑战；链条与齿轮方案具备更高的可靠性与力输出，但在体积、噪音和精细操作能力方面存在约束；连杆结构在工程可控性上相对成熟，却面临自由度受限的问题；微型滚珠丝杠则因结构紧凑、控制精准，在直线传动中渗透率快速提升。在驱动层面，多电机并存成为现状。

灵巧手工程化落地在系统层面仍需突破多重瓶颈。1) 散热问题，高功率密度驱动器在小体积内带来重量增加和热管理压力；2) 工程化难题，各硬件组成在可靠性、成本和规模化制造方面仍待验证；3) 感知—驱动—执行的闭环协同尚未完全成熟，对算法与硬件协同设计提出更高要求。整体来看，灵巧手正处于从“原理可行”向“工程可用”跨越的关键阶段。

灵巧手：多技术路线并行的产业进行曲

灵巧手决定人形机器人应用天花板

灵巧手是人形机器人的核心执行末端。末端执行器作为机器人与环境相互作用的最后环节与执行部件，其设计不仅需要模拟人类手部的灵活性，还要实现高度精确的运动控制，灵巧手的突破将直接决定人形机器人的应用边界。灵巧手的突破，意味着机器人可以在制造业、医疗、家庭服务、餐饮、零售等多个行业中实现更广泛的应用。

- **小型化与自由度平衡**：在保持高自由度的同时，如何实现更加紧凑和高效的结构设计，以适应复杂任务和空间限制。
- **灵活性与精准度**：需兼顾高自由度和精准控制，确保在执行复杂任务时具备高效的敏捷性与准确性。
- **感知与数据一致性**：触觉传感器精度和数据一致性问题，以及多模态数据融合技术的挑战，深刻影响了灵巧手的感知能力和操作稳定性。

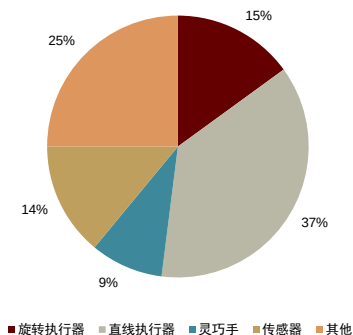
图表 1：灵巧手的主要应用场景



资料来源：因时机器人官网，中金公司研究部

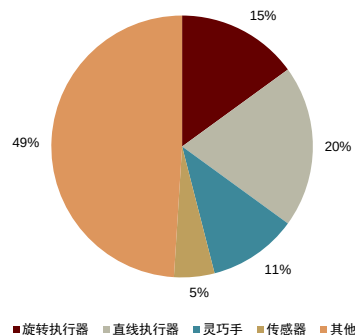
灵巧手技术难度和价值量在机器人中占比较高。特斯拉 CEO 马斯克以及银河通用创始人王鹤等人都一致认为，灵巧手在人形机器人硬件中技术难度最大；根据[新浪财经](#)，马斯克曾表示，灵巧手的工程量可能会占到整机开发工程的一半。根据中金研究部在《[具身智能：AI 下一站](#)》中测算，以特斯拉 Optimus 硬件拆解为例，我们估算灵巧手占机器人成本约 9%。

图表 2：人形机器人灵巧手价值量占比预测（小批量阶段）



注：以特斯拉 Optimus 为例
资料来源：特斯拉 AI Day，中金公司研究部

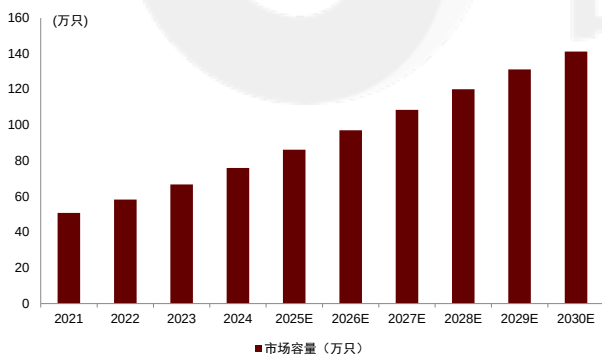
图表 3：人形机器人灵巧手价值量占比预测（100万台量产阶段）



注：以特斯拉 Optimus 为例
资料来源：特斯拉 AI Day，中金公司研究部

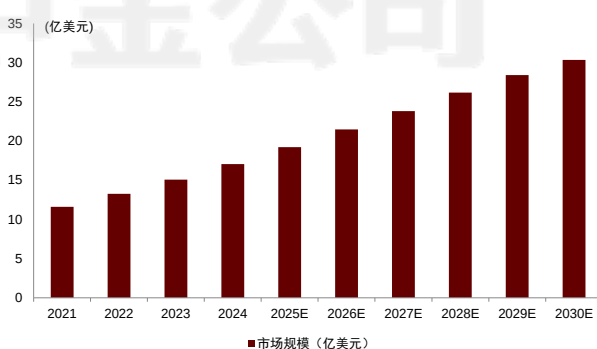
随着人形机器人产业化加速，灵巧手的市场需求有望持续增长。我们观测到越来越多的公司切入灵巧手产业链各环节，产业攻关正在加速。根据中商产业研究院数据，2024 年全球机器人灵巧手市场容量达 76.01 万只/17.06 亿元，预计到 2030 年全球机器人灵巧手市场容量将达 141.21 万只，突破 30 亿美元。

图表 4：2021-2030 年全球机器人灵巧手市场容量预测



资料来源：中商产业研究院，中金公司研究部

图表 5：2021-2030 年全球机器人灵巧手市场规模预测



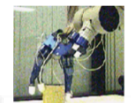
资料来源：中商产业研究院，中金公司研究部

灵巧手方案升级，步入商业化起点

人形机器人灵巧手逐步步入产业化前夕。早期灵巧手进展主要体现为自由度不断提升、指数从 3 指逐步扩展到 4-5 指；21 世纪初，系统的集成度、机电一体化程度进一步提高，开始系统探索软体材料和仿生结构。当前灵巧手进步开启加速，朝工程化和产业化进阶。

- ▶ 1974 年日本电工实验室推出第一款灵巧手 Okada，作为早期灵巧手典型方案，具有三根手指、11 个自由度，采用电机驱动和肌腱传动方式；此阶段主要实现了基本抓握功能，在工业自动化、假肢等领域应用提供了可能性。
- ▶ 20 世纪 80 年代起，随着高校和科研机构的参与以及嵌入式硬件发展，灵巧手数量实现提升，包括 NASA 的 Robonaut Hand 等灵巧手逐步升级为五指；同时，此阶段设计通过引入指尖力觉、关节触觉和直线电机，实现更高精度与多模态操作。
- ▶ 21 世纪初，灵巧手的系统集成度、机电一体化程度进一步提高，代表企业如英国 Shadow Robot 等产品已进入医疗辅具、科研教育、航空航天等高价值场景。

图表 6：灵巧手发展历程

时间	灵巧手	手指数	自由度数	驱动	传动	传感	结构	产品
1974 年	Okada 灵巧手	3	11	电机	腱绳	电机 / 关节位置，电机电流	外置	
1983 年	UTAH/MIT 灵巧手	4	16	气动	腱绳	电机 / 关节位置，张力，触觉	外置	
1983 年	Stanford/JPL 灵巧手	3	9	电机	腱绳	电机位置，张力，指尖力，指尖触觉	外置	
1998 年	DLR I 灵巧手	4	12	直线电机	腱绳	电机 / 关节位置，指尖力	外置	
1999 年	NASA 多指灵巧手	5	14	电机	腱绳	电机 / 关节位置，张力，触觉	外置	
2004 年	Shadow 灵巧手	5	20	电机 / 气动	腱绳	关节位置，指尖触觉，肌腱力，温度	外置	
2008 年	HIT/DLR II 灵巧手	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	

资料来源：《机器人多指灵巧手的研究现状、趋势与挑战》（蔡世波等，2021），中金公司研究部

灵巧手方案呈现向高系统集成、高自由度与零件高精度迭代趋势。以特斯拉 Optimus 为例：1）2022 年 10 月，第一代灵巧手设计方案随 Optimus 原型机的公布同步释出，具备 11 个总自由度，可负载 9 公斤，内置 6 个执行器。2）2023 年 12 月，特斯拉发布 Optimus Gen2，灵巧手升级到第二代，自由度不变，增加了触觉传感器，并改进电机扭矩控制技术。3）2024 年 11 月，第三代灵巧手方案发生三大变化（将驱动器外置，采用丝杠替代蜗杆，采用腱绳替代扭力弹簧），灵巧手提升至总共 22 个自由度，将配置于 Optimus Gen3。

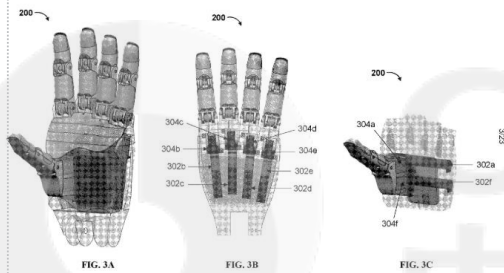
根据 2025 年特斯拉股东大会上释出的灵巧手的多个视频片段，展示了"齿轮箱+丝杠+腱绳"的复合传动方案，丝杠方面采用微型滚珠丝杠方案。同时，据马斯克在

社交平台中表示，新一代灵巧手单手拥有 25 个执行器。

图表 7：特斯拉灵巧手方案对比

	第一/二代灵巧手	第三代灵巧手
发布时间	2022年10月发布一代灵巧手， 2023年12月升级至二代（增加触觉传感）	2024年11月发布，将配备Optimus Gen3
自由度（DOF）	6个主动自由度，11个总自由度	17个主动自由度，22个总自由度
驱动系统	采用空心杯电机（大拇指两个，其余四指各1个）， 体积小、重量轻、响应速度快	仍以空心杯电机为主，可能用部分微型无刷电机取代 电机从手掌移到前臂，手部空间不受限制
传动系统	蜗轮蜗杆+腱绳传动， 保证传动平顺性，也确保力量传递及自锁性能	腱绳+丝杠传动，采用微型滚珠丝杠方案， 在手腕部位增加约22根传动腱绳
感知系统	基础霍尔传感器， 二代在单手五个手指各增一个末端触觉传感器	末端触觉传感器
优势	结构简单，能快速实现基础动作，侧重于理论验证	可精细操作、灵活性好，追求高灵敏度和轻负载特性， 更贴近特斯拉的实际应用场景需求
劣势	无法精密抓取，螺纹丝杠寿命短，抗冲击性差	负载能力有限

示意图

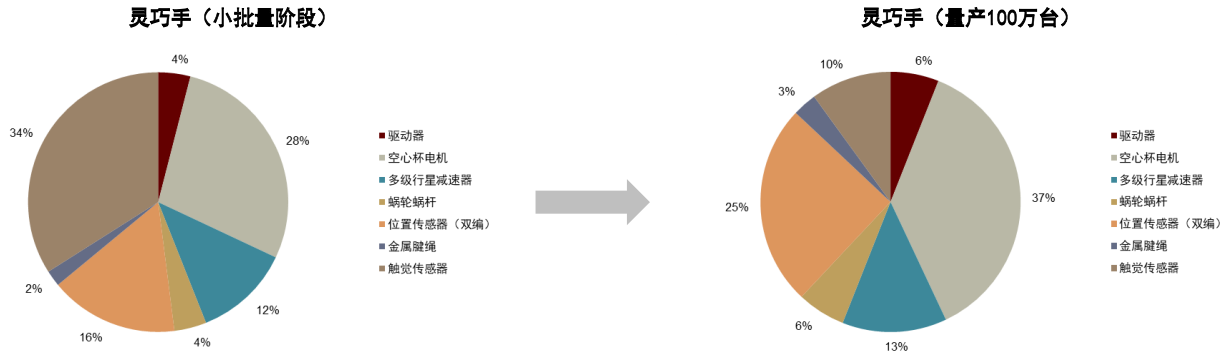


资料来源：特斯拉官网，特斯拉灵巧手专利《UNDERACTUATED HAND WITH CABLE-DRIVEN FINGERS》，中金公司研究部

多点开花，驱动+传动+感知技术方案尚未收敛

灵巧手的核心价值量主要分布在驱动、传动和感知三大系统。驱动系统负责提供动力和扭矩，目前主流方案为电机驱动，其他方案如液压、气压与形状记忆合金亦有实验性探索；传动系统负责将驱动系统的力传递到手指，驱动系统有齿轮、连杆和腱绳等多种技术方案；感知系统负责实时监测灵巧手的位置、力和触觉等状态，并与环境交换，实现闭环控制，其中触觉传感器类型及数量有所增长。

图表 8：灵巧手价值量分布预测



资料来源：特斯拉 AI DAY，中金公司研究部

驱动、传动、感知技术路线均面临不同的工程约束与性能权衡，其优势与弱点直接影响灵巧手的自由度、力量输出、控制精度与耐久性。

- **驱动系统：**目前产业界普遍采用电机驱动，其优势在于响应速度快、控制精确、成熟度高且易于更换维护。缺点集中体现在小体积内难以进一步提升功率密度，同时成本较高，控制复杂。液压驱动、气压驱动、形状记忆合金驱动同样受到学界关注，但因适用场景存在精度不足、疲劳强度低等缺点，尚难完全满足产业级需求。

图表 9：灵巧手驱动技术路径分类

驱动方式			
分类	优点	缺点	应用现状
电机驱动	驱动力大、响应快、控制精度高、输出力矩稳定、易于更换维护	质量体积较大，成本较高，控制复杂	目前应用最广泛，适用于工业、医疗、服务机器人等多场景
液压驱动	输出力矩大，适合大型抓取作业	体积大，成本高，控制精度不足	主要应用于工业机械手，较少用于小型或精密操作
气压驱动	易于控制，能量存储方便，接近人体肌肉驱动方式	刚度低，动态性能差，可操作性不强	广泛用于轻工业和物流分拣抓取
形状记忆合金驱动	体积小，重量轻，反应快速，适合高精度作业	易疲劳，使用寿命低，成本高	适用于需要高精度、小体积的场合，如微型机器人、精密装配等

资料来源：来觅数据公众号，未来智库，《机器人灵巧手研究综述》（刘伟等，2024），中金公司研究部

- **传动系统：**当前灵巧手旋转传动主要采用腱绳、连杆、齿轮、链条四大技术路线。其中，腱绳传动轻量柔顺、布置灵活，是最接近人类肌腱行为的方案，也是 MIT、CMU 等高校研究的主流路径，但仍存在磨损快、张力管理复杂等技术难点。同时，链条传动作为新方向，在研究阶段展现了强耐久、强载荷潜力，打开了新应用可能。此外，直线传动在微小位移控制、力与位移一致性以及双向受力精度方面具备天然优势，滚珠丝杠和行星滚柱丝杠均有主流研发尝试。

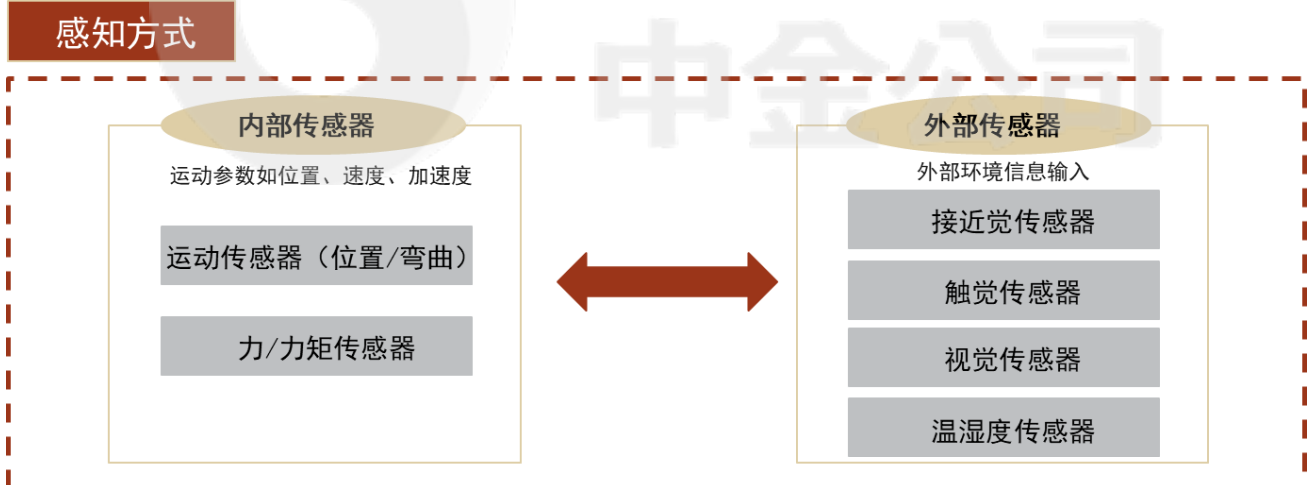
图表 10：灵巧手传动技术路径分类

传动方式			
传动形式	优势	不足	代表实例
连杆传动	结构稳定、易于控制	体积较大、自由度有限	HRI Hand
腱绳传动	轻量化、能提供更多自由度	磨损风险较高、张力调校繁琐	Shadow Hand
齿轮传动	传动紧凑、力学效率较好	成本高、精密制造门槛高	Tesla Optimus
链条传动	耐冲性、寿命长、精度保持好	微型化难度高、行业处于早期	Choho Hand

资料来源：来觅数据公众号，未来智库，《机器人灵巧手研究综述》（刘伟等，2024），中金公司研究部

- **感知系统：**柔性、可大面积覆盖、成本较优的压阻式电子皮肤为当前落地性最强的路线。未来方向指向通过多模态融合与高密度触觉阵列结合，推动灵巧手进一步提升操作精度、稳定性与泛化能力。

图表 11：灵巧手感知技术路径分类



资料来源：来觅数据公众号，未来智库，《机器人灵巧手研究综述》（刘伟等，2024），中金公司研究部

多元主体博弈，头部企业开启放量

主流灵巧手厂商方案呈现多元态势。当前灵巧手的技术方案仍尚未收敛，但目前主流厂商普遍采用 5 指结构，抓握力能够覆盖较广泛的工业与服务型应用；同时，自由度层面，我们认为从商业应用的角度来看，灵巧手主要集中在 10 至 17 个自由度之间，更高自由度的灵巧手更多用于科研领域中。此外，大多数灵巧手产品已附带小面积的电子皮肤，提升灵巧手的精确度和适应性。

三方灵巧手厂商与机器人本体企业共存。1) 第三方灵巧手厂商如灵心巧手等，产品成熟度相对较高，以性价比路线主推，我们预计产品售价普遍在 3 万元左右；目前，灵心巧手的 Linker Hand 系列在全球高自由度灵巧手市场份额已超过 80%，月订单突破千台。2) 机器人本体企业优势在于对具体场景的任务定义能力，反向定义灵巧手参数；比如宇树科技的 Dex5-1P 灵巧手的 94 个触觉传感器阵列，便是以“复杂曲面抓握”为具体任务优化的。

图表 12：主流厂商灵巧手方案

厂商类型	厂商	产品名	重量	尺寸 (mm)	传动技术	手指	关节	自由度	定位精度	抓握力	传感系统
主机厂	宇树科技	Dex5-1P	1000g	217.3*127.5*72.1	齿轮	5	20	20 (16+4)	1mm	垂直3.5kg 水平4.5kg	94 个触觉传感器 (12个阵列式)
	优必选	Walker S1 灵巧手	/	/	齿轮 + 连杆	5	/	主动自由度 6	/	1.5kg	6 个阵列式触觉压力传感器
	傅利叶	GR-2 灵巧手	/	/	连杆	5	/	12	/	/	6 个阵列式触觉传感器
	戴盟机器人	DM-Hand1	/	/	/	5	12	6	/	/	全球首款毫米级厚度视觉触觉传感器
	智元机器人	SkillHand	/	/	/	5	19	19 (12+7)	/	5kg	触觉与视觉触觉传感功能
	灵宝 CASBOT	Casbot 01 灵巧手	800g	/	/	5	/	12	/	5kg	/
	星动纪元	星动 XHAND1	/	/	齿轮	5	/	主动自由度 12	/	/	触觉传感器
	帕西尼感知科技	DexH13 GEN2	/	/	连杆	4	/	主动自由度 13	1mm	5kg	视觉触觉, 1140 个 ITPU 触觉传感单元
	帕西尼感知科技	DexH5 GEN1	700g	/	连杆	4	12	12 (5+7)	0.2mm	5kg	搭载 180 个多维度触觉传感器
灵巧手公司	魔法原子	MagicHand S01	580g	/	连杆	5	/	11	0.2mm	5kg	5 个触觉传感器
	因时机器人	RH56DFX	540g	217.8*80.7*31.2	连杆	5	12	主动自由度 6	0.2mm	/	6 个力传感器
	因时机器人	RH56FTP	790g	/	连杆	5	12	主动自由度 6	/	/	12 个触觉传感器和 6 个力传感器
	大寰机器人	DH-5	700g	/	连杆	5	11	11 (6+5)	/	/	集成力传感器
	钧舵机器人	Mozart	840g	201.12*150*41.5	/	5	16	16 (6+10)	/	/	集成触觉传感器
	强脑科技	Brain	530g	/	/	5	/	主动自由度 6	0.1mm	/	搭载多维触觉传感器
	兆威机电	兆威灵巧手	<1000g	238.5*88.0*40.7	直驱	5	15	主动自由度 17	/	3kg	指尖集成传感器
	灵心巧手	L10	750g	254.0*86.5*50.0	连杆	5	20	20 (10+10)	0.2mm	5kg	指尖触觉传感器 + 选配视觉传感器
	灵心巧手	L20	1000g	263.5*99.5*45.5	连杆	5	21	21 (16+5)	0.2mm	5kg	电子皮肤 + 摄像头, 多模态感知
	灵心巧手	L30	1300g	/	腱绳	5	25	25 (18+7)	0.2mm	8kg	触觉 + 视觉传感器
	灵巧智能	DexHand 021	1000g	292.6*113.2*56.5	腱绳	5	15	19 (12+7)	/	5kg	集成位置、触觉和力觉传感器

资料来源：各公司官网，中金公司研究部

驱动系统：关注直流无刷电机的降本趋势

驱动系统是人形机器人的“肌肉”，目前市场上的驱动以电机驱动为主。用于灵巧手的方案主要包括直流无刷电机、空心杯电机与无框力矩电机。下表针对这三类电机，根据其结构、原理推导出其特点与应用场景，并进行比较。

图表 13：直流无刷电机、空心杯电机与无框力矩电机对比

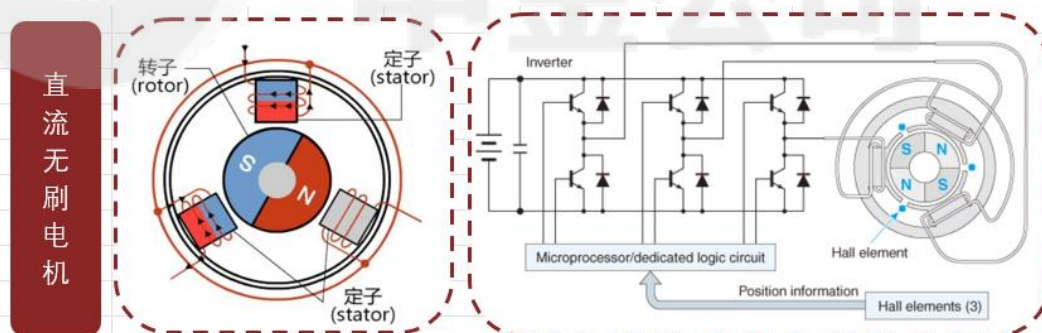
		结构	原理	特点	优势	劣势	应用场景
项目	直流无刷电机	定子（绕组+铁芯）、 转子（永磁体）、 位置传感器	位置传感器实现无接触换向 产生旋转磁场	稳定、转动惯量大	寿命长、成本低、噪音小、 较精确	响应速度慢、体积大	高功率密度、高负载
	空心杯电机	定子（永磁体）、 转子（空心杯绕组）	定子产生恒定磁场，转子绕 组中的电流与磁场相互作用 产生安培力	无铁芯转子消除涡流的电能 损耗、重量和转动惯量显著 减小	响应速度快、功率密度高	成本高、输出扭矩小、工艺 复杂产品良率低	快响应、空间能耗要求高
	无框力矩电机	定子（铜片+铜线绕组）、 转子（永磁体+旋转钢圆环）	定子绕组产生旋转磁场，转 子受到电磁力形成旋转扭矩	直接耦合，无需齿轮等传动 装置即可驱动负载	低转速大扭矩、结构紧凑	散热管理、定制化需求高	高精度、紧凑空间、直接驱 动

资料来源：ittbank, AIP 艾普官网, 兆威机电官网, 久谦资本, 中金公司研究部

直流无刷电机：大功率、高负载，提升机器人力量

结构原理：由转子、定子和位置传感器三部分组成，没有机械电刷或换向器。位置传感器按转子位置的变化，沿着一定的次序对定子绕组的电流进行换流，通过改变定子线圈上的电流波交变频率和波形，在线圈周围形成一个绕电机几何轴心旋转的磁场，驱动转子上的永磁磁钢转动，从而驱动电机。

图表 14：直流无刷电机结构原理



资料来源：电机新视界公众号，尼得科官网，中金公司研究部

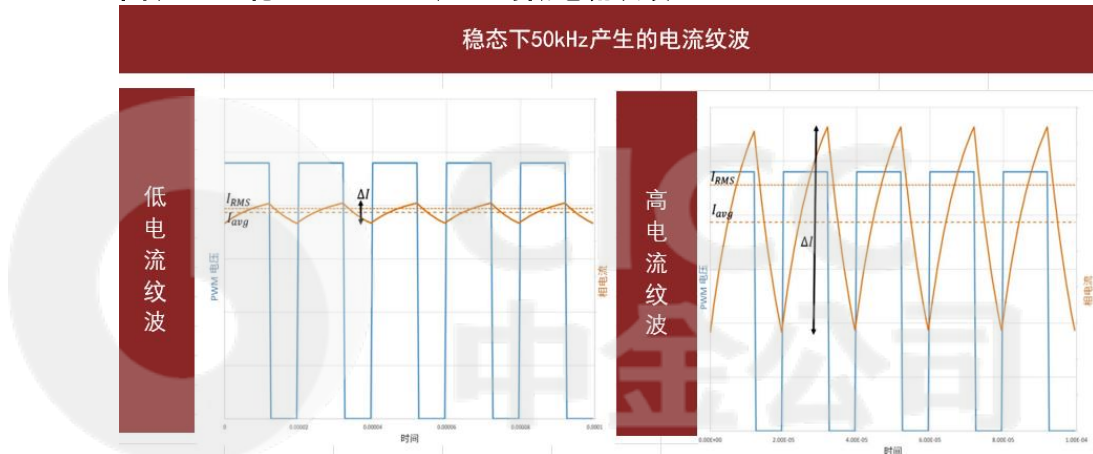
特点与应用场景：直流无刷电机具有高效节能、长寿命低维护、低噪音振动，惯性较大的特点，更适合在大功率、高负载、对动态性能要求不高的场景。

- **高效节能：**由于没有换向器与电刷的摩擦，无刷电机在运行时能量转换效率更高，使用寿命更长，同时运行时具有更低的噪音与更小的振动。
- **具备高精度控制水平：**通过电子控制实现精确调速，转速高且转矩稳定，具备高精度控制需求下的应用能力。
- **惯性较大：**采用传统铁芯转子结构，定子和转子中包含硅钢等导磁材料，导致其体积较大、重量较重。

- **响应较慢：**铁芯转子惯性较大的特点使得直流无刷电机对加速/减速的响应较慢，高速启停时容易出现滞后，根据鸣志电器官网，鸣志电器 R57 系列直流无刷电机转子惯量为 $67\text{g} \cdot \text{cm}^2$ ，而额定功率接近的 ECH13048 无刷空心杯电机转子惯量仅为 3gcm^2 ，差异显著。

技术壁垒：1) **高精度传感器的依赖：**现代直流无刷电机控制系统多依赖霍尔传感器、光电编码器和磁编码器等高精度传感器来实时监测电机位置、转速等参数，这些传感器的精度和可靠性在很大程度上影响了控制系统的性能。2) **故障检测能力：**在无刷电机运行期间，传感器故障、驱动器故障等各类问题时有发生。对于控制技术而言，实现对故障的实时检测与精准诊断，并在故障出现时维持系统稳定运行，是亟待攻克的关键难题。3) **高脉宽调制（PWM）频率：**PWM 方法通过在固定频率下调节脉冲占空比，实现对电压和电流的精准控制，从而达到目标转速。

图表 15：稳态下 50kHz 产生的低电流纹波



资料来源：Portescap 白皮书，中金公司研究部

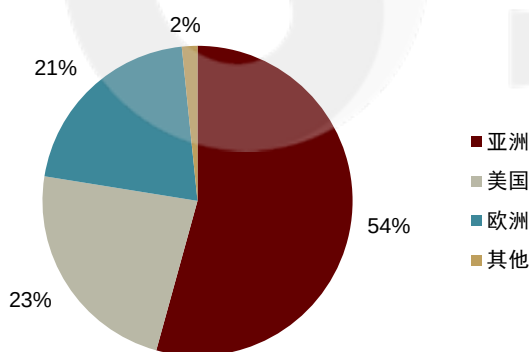
竞争格局：亚洲、美国、欧洲三足鼎立。在工业 4.0 与碳中和目标的双重驱动下，自动化生产线、新能源汽车、智能家居等领域加速迭代，对电机的能效、精度与智能化程度提出严苛要求。作为具备高效率、长寿命、精准控制优势的核心部件，直流无刷电机迎来爆发式增长期。智研咨询数据显示，2024 年全球直流无刷电机市场规模已突破 200 亿美元。从地域分布看，亚洲、美国、欧洲构成行业发展三极。

- **亚洲市场呈现“双强驱动”格局，**日本凭借尼得科等企业 50 多年来的技术积累，在磁编码器、控制器等领域建立技术壁垒。中国虽起步较晚，但凭借完善的产业链和政策红利迅速崛起，2022 年起实施的《电机能效提升计划》，大力加快高效节能电机的推广应用，恒驱电机等直流无刷电机企业已具备国际竞争力，其无刷直流电机实现从 0.1w 到 10kW 全覆盖。智研咨询数据显示，2024 年亚洲直流无刷电机市场规模达 110.2 亿美元。
- **美国构建起“军民融合”的技术体系，**其无刷直流电机在高端制造和国防军工两大板块优势显著，其技术成熟度与可靠性已达到行业领先水平，并在航空器电动动作系统等关键场景实现了直流无刷电机技术的规模化应用与性能

突破。如洛克希德·马丁公司的 F-35 战斗机采用的 270V 高压直流无刷电机驱动系统，有效提升系统效率与电磁兼容性能，成为“第五代战机”的佼佼者。智研咨询数据显示，2024 年美国直流无刷电机市场规模约为 47.2 亿美元。

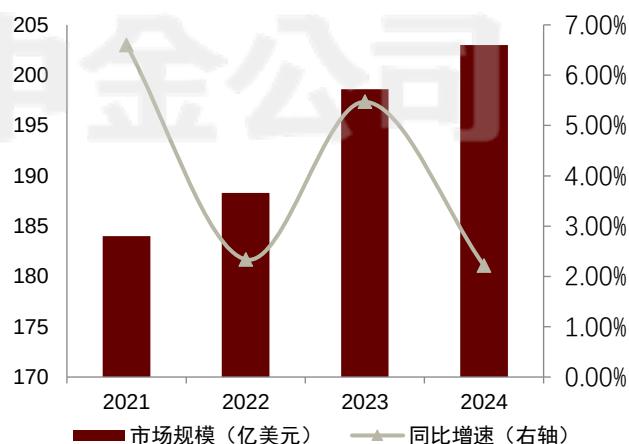
- ▶ **欧洲以“精密制造”著称全球**，德国作为直流无刷电机及其驱动系统的诞生地，始终保持着先发优势与绝对技术优势。从产业格局来看，欧洲直流无刷电机企业经历长久的发展已形成高度集中的成熟格局，主要包括德国施耐德、西门子、瑞士 ABB、科尔摩根、SEW-传动设备、博世集团以及 KAG 电机等企业。智研咨询数据显示，2024 年欧洲直流无刷电机市场规模约为 42.3 亿美元。
- ▶ **中国呈现出多元化竞争格局**，市场参与者既有综合型龙头企业，也有专注于细分领域的特色企业。行业头部企业大洋电机全面覆盖商用车、乘用车、传统应用技术领域，构建了从研发到营销的完整产业链；恒驱电机拥有多项发明专利、数十项实用新型专利和软件著作权，业务已扩展至全球各大洲。部分企业选择深耕特定场景，如方正电机专注于缝纫机驱动电机，其多功能家用缝纫机电机产量稳居全球前茅，全球市场占有率达到 85%。科力尔、金龙机电等公司通过扩展智能家居等业务关联领域，逐步完善行业生态。

图表 16：2024 年全球无刷直流电机市场规模比例



资料来源：智研咨询，贝哲斯咨询，中金公司研究部

图表 17：中国无刷直流电机市场规模及增速



资料来源：观研报告网，贝哲斯咨询，华经情报网，中金公司研究部

图表 18：现直流无刷电机厂商对比

	大洋电机	恒驱电机	方正电机	科力尔	金龙机电	鼎智科技	鸣志电器	拓邦股份
直流无刷电机情况	公司BLDC MOTOR直流无刷电机可提供350~5000RPM转速，1/12~3/4HP的功率	公司打造通用、标准的全系列直流无刷电机，匹配性高	产品可涵盖定子外径35mm到100mm的各型电动工具和吸尘器用电动机，功率可以覆盖从60W到1200W的需求	公司共有19个系列直流无刷电机，额定功率最高可达700W	公司提供1~1500mN.m力矩范围的直流无刷电机	公司提供 12~130mm 11种不同机座号，每个机座号可选配不同的长度，实现了1.6W到837W定轴旋转拖动	公司正式推出三相BLDC新产品，扭矩覆盖20mN.m~2.16Nm	公司提供内转子无刷电机与外转子无刷电机，标称扭矩可达5.6N.m
应用场景	暖通空调、冷冻设备、洗涤设备、家用电器、乘用车与商用车空调	个人护理、汽车、消费电子、家用电器	电动工具、吹风机、吸尘器、缝纫机	5G基站、智能家居、医疗健康护理、电动工具	智能家居、汽车、电脑	机器人、工厂自动化	FA、泵、阀、太阳能、汽车	智能家居、电动工具
营收情况	2024年全年营收121.13亿元，其中建筑和家居用电机70.11亿元，占比57.88%	2020年全年营收0.99亿元，其中无刷电机0.97亿元，占比97.96%	2024年全年营收24.74亿元，其中微特电机4.03亿元，占比16.89%	2024年全年营收16.57亿元，其中智能家居类产品11.80亿元，占比71.21%	2024年全年营收14.93亿元，其中马达2.15亿元，占比14.4%	2024年全年营收2.24亿元，其中直流电机0.19亿元，占比8.48%	2024年全年营收24.16亿元，其中控制电机及其驱动系统产品19.59亿元，占比81.08%	2024年全年营收105.01亿元，其中工具和家电79.81亿元，占比76%，机器人4.68亿元，占比4.46%

资料来源：各公司官网，中金公司研究部

空心杯电机：快响应、低能耗，实现高精度控制

空心杯电机是直流永磁伺服微特电机的一种，由于其在结构上突破了传统直流电机的形式，采用无铁芯转子，电枢绕组为空心杯线圈形似水杯，因此被成为空心杯电机。通过电枢绕组与永磁体磁场的相对运动产生电磁力，推动转子旋转驱动电机。空心杯电机分为有刷空心杯电机与无刷空心杯电机两种。

图表 19：有刷空心杯电机与无刷空心杯电机的比较

		换向方式	能量转换效率	寿命	响应速度	电磁干扰	控制复杂度
项目	有刷空心杯电机	物理碳刷和换向器配合的机械电刷换向	70~85%	1000~3000h	受换向器和电刷惯性影响响应速度略慢	电刷与换向器接触易产生电火花	控制简单，硬件成本低
	无刷空心杯电机	电子换向	90%以上	10000h+	转子惯性低响应速度快	电子换向无火花产生	需要配套驱动电路，硬件成本高

资料来源：AIP 艾普官网，中华工控网，中金公司研究部

有刷空心杯电机

图表 20：有刷空心杯电机的结构



资料来源：AIP 艾普官网，中金公司研究部

结构原理：有刷空心杯电机的驱动原理基于电磁感应和机械换向：通电后，电枢绕组置于永磁体磁场中，电流通过碳刷与换向器的接触导入线圈，产生电磁力驱动线圈旋转；当线圈转动至特定位置时，换向器与碳刷的相对接触位置改变，自

动切换线圈中的电流方向，使电磁力方向保持一致，从而维持转子持续转动。此过程中，碳刷与换向器的机械接触实现电流换向，驱动电机运转。

特点与应用场景：简单易维护、机械噪音大，仅适合低成本、控制简单、寿命较短。

- ▶ **结构简单：**与无刷空心杯电机相比，有刷空心杯电机的优势在于无复杂控制电路、无电子元器件，成本低、易维护同时不受电磁干扰环境影响。
- ▶ **寿命较短：**采用碳刷与换向器接触的机械换向方式，容易造成碳刷磨损寿命较短，一般 1000-3000h，而无刷空心杯电机可达 10000h+。
- ▶ **机械噪音较大：**同时在电机高速运转的过程中，这种摩擦发热量较大造成能量损耗，且极易产生电火花，导致电磁干扰和机械噪音。

结合其简单易维护，但寿命短、电磁干扰和机械噪音较大的特点，有刷空心杯电机仅适合低成本、简单控制、寿命较短的设备。如在一些玩具以及小型自动化机械设备中，有刷空心杯电机凭借低成本、易维护的优势，有着广泛应用。

无刷空心杯电机

图表 21：无刷空心杯电机的结构



资料来源：AIP 艾普官网，中金公司研究部

结构原理：无刷空心杯电机的驱动原理为电流通过定子的电磁绕组，产生旋转磁场，与空心杯形转子永磁体相互作用，产生电磁力驱动转子旋转。同时，电机配备的霍尔传感器或编码器监测转子位置，并将信息反馈给电子控制系统。电子控制系统通过调整电流的相位和大小，周期性地改变电流方向和大小，使磁场在定子周围旋转，确保转子按照预定的速度和方向持续旋转。

特点与应用场景：快速动态响应、高功率密度、精准力控适合机器人等高精度领域。与无刷直流电机、无框力矩电机相比，无刷空心杯电机具有如下优势与应用场景：

- ▶ **快速动态响应：**相比于铁芯转子，空心杯线圈的质量更小，转动惯量仅为传统电机的 1/10~1/5，转矩与电流的响应速度相当，使得转子加速度是传统电机的 2 倍左右。在一些需要快速启停、频繁正反转以及对控制精度要求较高的自动化设备，如工业机器人的关节驱动电机等场景中，无刷空心杯电机能够迅速响应控制信号，实现精准的动作控制。

- ▶ **高功率密度：**功率密度是输出功率与重量或体积的比值。一方面，其采用的空心杯线圈设计，相比传统的有铁芯线圈，重量大幅减轻。另一方面，铜板线圈方式的涡流损耗很小且易于控制，这使得电机的效率得以提高，进而确保了较高的输出转矩和输出功率。
- ▶ **精准力控：**其采用铜板线圈方式，无有槽硅钢片，从根本上杜绝了槽与磁石相互作用产生的齿槽效应，也不存在磁滞损耗。在运转过程中，电机能够保持稳定的输出转矩，转速均匀，不会出现因转矩变化而导致的卡顿或不稳定现象。再配合高精度编码器（如磁编码器），可以实现 0.1nm 以下的微小力矩控制，达到人类手指级别的“触觉反馈”。

技术壁垒：空心杯电机的技术壁垒主要在于高精度绕组的工艺复杂性。空心杯电机的绕组需将铜线绕制成无铁芯杯形结构，漆包线悬空绕制对绕制的几何精度、均匀性要求近乎严苛。传统绕线设备无法完成如此复杂的三维绕线任务，必须研发定制化绕线技术和自动化设备，技术研发门槛高，投入成本大。目前市场上主要有三种绕线工艺：斜绕形、马鞍形（菱形）、直绕形（六边形），主要由两大国外巨头 Maxon（瑞士）和 FAULHABER（德国）制造。

图表 22：空心杯电机的绕线工艺



(a) 斜绕组

(b) 菱形绕组

(c) 六边形绕组

资料来源：瞿谊,黄嵩. 空心杯电机绕组系数的计算与验证 [J]. 微电机, 2023, 56 (04), 中金公司研究部

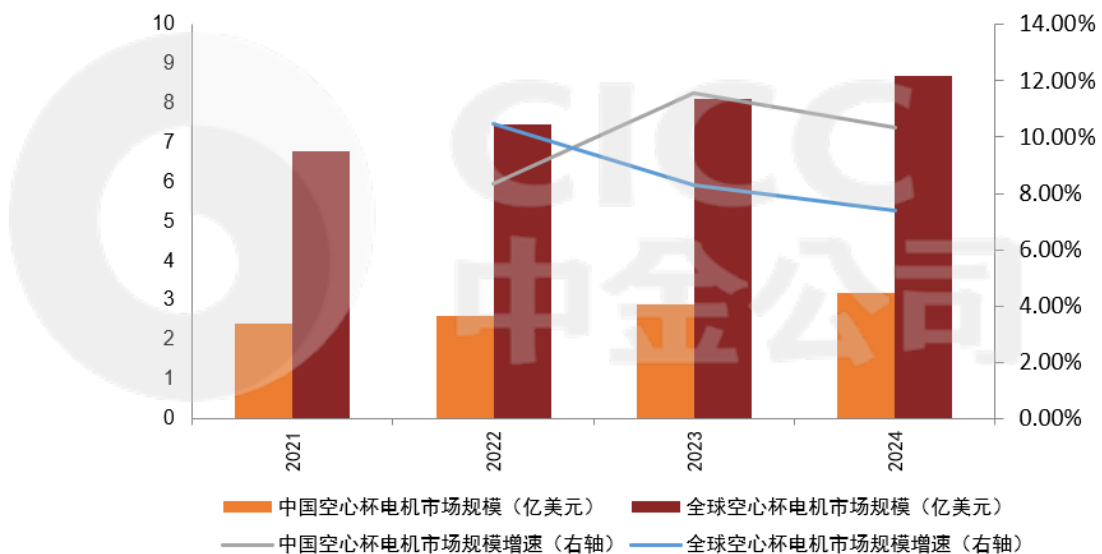
- ▶ **斜绕形：**FAULHABER（德国）的核心技术优势，以一次成型、绕组平整度高著称。该工艺需定制带有两排销钉的专用绕线芯轴，在绕线过程中，芯轴配合绕线机同步回转，引导漆包线呈螺旋状紧密缠绕于芯轴表面。相比传统绕法，斜绕型可显著压缩绕组端部尺寸，优化电机轴向空间布局。
- ▶ **马鞍形：**Maxon（瑞士）的核心技术优势，助力其实现超高功率密度。该工艺先将导线绕制成多个单一菱形线圈，再根据产品设计尺寸等特点进行排线，最后再将成形的线圈加以固定形成杯状结构。这种绕分步线方式既充分利用空间，又提升了绕组模块化精度。

- **直绕形：**工艺相对复杂，需多次绕制，目前应用情况较少。该工艺先按如图红线所示绕制普通环形漆包线，然后将其连在排线芯轴上组成绕组，在两端涂抹粘结剂固化定型。其优势在于槽满率较高，绕线杯中部壁薄；但因漆包线排布无序、存在堆叠现象，致使空心杯线圈整体排列杂乱。此外，为预留走线空间，线圈端部尺寸较大，一定程度上影响电机紧凑性与美观度。

竞争格局：海外头部企业历史悠久，技术积累优势显著。外资空心杯电机厂商占据市场绝大多数份额，根据中商情报网，2022 年全球空心杯电机 CR5 为 67%，包括德国 Faulhaber、美国 AlliedMotion Technologies、瑞士 Maxon Motor、Portescap 及日本 Nidec Copal Corporation。

近年来，中国空心杯电机市场蓬勃发展，市场规模不断扩大。国内厂商如鸣志电器、鼎智科技通过本土化的销售战略逐渐打开市场。

图表 23：空心杯电机市场规模及增速



资料来源：华经情报网，《2024-2029 年中国空心杯电机行业发展趋势及竞争策略研究报告》（中国报告大厅，2024 年），中金公司研究部

鼎智科技已构建起全球销售网络、在欧洲 15 个国家设有经销商；鸣志电器虽成立于 1994 年，但于 2000 年便在芝加哥成立鸣志工业（美洲）公司，目前在上海、美国 and 欧洲均设有研发机构。但受制于外资企业的先发优势与“护城河”壁垒，国内企业目前市场份额较低，市占率约 15%，以下是国内外空心杯电机产品的数据对比：

图表 24：国内外空心杯电机性能对比

国内外空心杯电机性能对比						
国家	典型企业	关键参数				应用场景
国家	公司	机身长度 (mm)	电机直径 (mm)	功率 (W)	额定转矩 (mN/m)	应用场景
海外	德国 Faulhaber	5.5-90	6-38	0.578-138	0.172-222	医疗、工业自动化、航空航天、光学、机器人
	瑞士 Maxon	10-75+	4-90	0.5-900	0.231-3710	医疗、工业自动化、航空航天
	美国 AlliedMotion	16.5-30	12.7-22	13-140	8.5-30.9	医疗、工业自动化、泵、汽车
国内	中国 鸣志电器	25-135.7	10-30	5-128	0.95-5000	医疗、工业自动化
	中国 鼎智科技	25-80	10-42	4.9-160	4-180	生物医学、实验室自动化、工厂自动化、机器人

资料来源：各公司官网，Wind, 中金公司研究部

无框力矩电机：结构紧凑，适合直接嵌入负载

结构原理：无框力矩电机没有传统的机壳、轴、轴承等结构，而是以“定子+转子”的模块化形式存在，需要集成到设备机械结构中去使用，实现直接驱动负载的效果。其工作原理是基于电磁感应定律：定子部分由钢片和铜线绕组组成，用于产生电磁力，通常直接嵌入设备本体（如机械臂关节外壳）；转子部分主要部件是带永磁体的旋转钢圆环，直接安装在机器轴上；当定子绕组通电时，产生旋转磁场，作用于转子，形成电磁动力驱动扭矩。

图表 25：无框力矩电机的结构



资料来源：科尔摩根官网，中金公司研究部

特点与应用场景：大扭矩、结构紧凑，适合直接集成进负载。

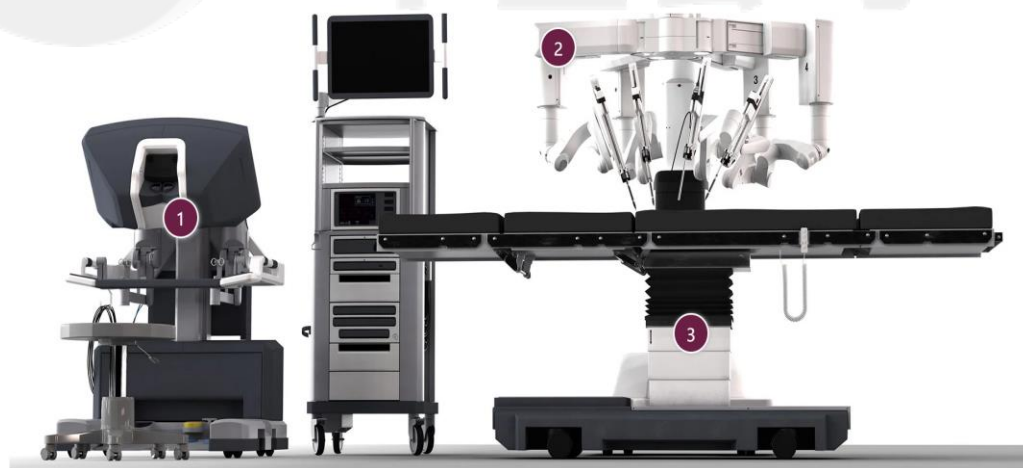
- ▶ **结构紧凑：**无框力矩电机在结构上省去了传统外壳，相比于其他电机减小了必要的尺寸与重量，同时结构更加紧凑。
- ▶ **直接耦合、大扭矩：**直接耦合、直接驱动负载的方式，获得更大的扭矩密度、更强的散热性能，使其集成进负载的方式变得更加灵活，占系统的空间更小，有效提升了机器的效率与性能。

目前，无框力矩电机凭借其大扭矩、小尺寸、小重量、结构紧凑的核心优势，广泛应用于高端领域。在人形机器人领域，无框力矩电机可以有效降低机器人重量，提升其关节的灵活度与运行效率。例如，特斯拉的人形机器人 Optimus 在 14 个线性执行器和 14 个旋转执行器中都使用了无框力矩电机，为机器人完成精密任务提供保障。

技术壁垒：无框力矩电机主要面临磁路设计的挑战。磁路设计作为无框力矩电机技术的核心瓶颈，直接关乎电机的转矩密度、功率密度及能量转换效率等核心性能指标。但该设计过程面临诸多挑战，需综合考量磁场分布均匀性、磁阻大小以及磁滞损耗等多重复杂因素。当前，外资企业在该领域优势明显，例如科尔摩根创新采用分布式分数槽设计，配合碳纤维缠绕技术，有效优化了电机的磁路结构，显著提升了电机性能。

竞争格局：海外厂商创新发明，先发优势显著。同空心杯电机类似，外资无框力矩电机厂商起步早，先发优势显著。目前市场上的主要企业包括美国科尔摩根、Aerotech、Allied Motion、德国 TQ Robodrive、瑞士 Maxon 等。

图表 26：科尔摩根 TBM2G 型无框力矩电机可广泛应用于机器人运动轴



资料来源：科尔摩根官网，中金公司研究部

与海外厂商相比，国内无框力矩厂商起步较晚，产品性能与高端领域应用还需要对标海外厂商。同时，国内无框力矩电机市场集中度较高，行业龙头占据绝大部分市场份额，行业竞争壁垒较高，目前主要企业包括：步科股份、昊志机电、航天电器等。

步科电机是中国机器人与智能设备的运动控制与人机交互部件领军企业。公司于 2016 年推出首代无框力矩电机，2022 年推出第三代 FMC 系列无框力矩电机，首创全灌封定子绕组，更大程度降低温升、提高绝缘性能。凭借高功率密度、高空间利用率、适配性强的优势，步科股份成为特斯拉人形机器人供应商，彰显其产品性能已与海外顶尖厂商具备竞争优势。

图表 27：国内外空心杯电机性能对比

国内外空心杯电机性能对比							
国家	典型企业/代表产品		关键参数			应用场景	
国家	企业	代表产品	直径(mm)	额定功率（W）	转矩（N/m）	应用场景	
海外	美国	科尔摩根	TBM-2G	50-115	205-1430	0.27-6.03	协作机器人（手术机器人、机械臂）
	美国	Aerotech	S	50-240	82.1-1303.4	0.2-29.09	
	美国	Allied Motion	HT	19-127	-	0.008-9	医疗器械、半导体、激光加工、光电、航空航天 机器应用中的直接轴集成
	德国	TQ Robodrive	ILM	25-115	70-570	0.032-2.9	
	荷兰	Tecnotion	QTL	210-485	-	0.29-907	
国内	中国	步科股份	FMC	52-132	-	0.11-3.5	协作机器人
	中国	禾川科技	Hu-MLS	35-70	20-440	0.12-1.5	人形机器人

资料来源：各公司官网，中金公司研究部

市场空间：预计 2030 年灵巧手空心杯电机市场规模可达 57.6 亿元

人形机器人灵巧手电机多品种应用并存，特斯拉率先尝试无刷电机。特斯拉于 2024 年 11 月在其官方账号发布 Optimus 最新视频，其 22 自由度灵巧手正式上线，从其驱动方案来看，驱动装置已完全置入前臂中，相比于手腕具有更多空间，同时其控制精度与负载能力都得到显著提升，推测其产品功能需求偏重大型化，对空间要求利用率较低，未来可能更加偏向负载能力更强，成本更低，对空间要求不敏感的直流无刷电机。我们认为未来灵巧手的驱动电机选择或将出现分领域细化的态势，如在对精细度要求更高，需要快速响应，对价格不敏感的灵巧手可能装配空心杯电机；而以负载为主要功能，以成本优势进入市场的灵巧手可能选配无刷直流电机。

图表 28：主流灵巧手驱动方案

市场主流灵巧手驱动方案对比							
典型企业/代表产品			关键参数	驱动方式			
企业	代表产品	发布时间	自由度	驱动方式	无刷直流电机	空心杯电机	无框力矩电机
海外	特斯拉 Optimus Gen3	2024. 10	22	电机驱动		✓	
	Figure AI Figure 02	2024. 8	16	电机驱动		定制电机，与关节传动系统集成	
	波士顿动力 { HD Atlas Atlas	2024. 4	-	电机驱动		✓	
		2013	-	液压驱动			
	Shadow Robot Dexterous Hand	2024	24	电机驱动		✓	
国内	SCHUNK KSP3	2024. 1	-	气压驱动			
	宇树科技 DEX-5	2025. 4	20	电机驱动		✓	
	星动纪元 Xhand	2024. 11	12	电机驱动		✓	
	开普勒 先行者K2	2024. 10	12	电机驱动		✓	
	因时 FTP系列	2024. 8	6	电机驱动		无刷空心杯电机集成进微型伺服电机缸	
	达闼 小紫XR-4	2024. 7	7	电机驱动		✓	
	小鹏 PX5	2023. 10	11	电机驱动		✓	

资料来源：各公司官网，中金公司研究部

市场空间预测：

基于以下核心假设：

- 1) 人形机器人整机安装量：我们假设 2025/2028 年全球安装量 1.5/50 万台；
- 2) 空心杯电机与无刷直流电机单机加总用量：我们假设未来单个人形机器人两只灵巧手空心杯电机与无刷直流电机加总用量与现有特斯拉 Optimus 人形机器人所使用的数量一致，即为 34 个；
- 3) 我们考虑无刷直流电机的降本替代趋势，在人形机器人出货量达到 50 万台时替代率可达 40%；
- 4) 我们考虑空心杯电机的降本趋势，单价在人形机器人出货量达到 10 万台时降至 1000 元，在出货量达到 50 万台时降至 800 元；
- 5) 我们假设直流无刷电机技术发展已比较成熟，未来价格不会有太大波动，维持在 400 元左右。

综合以上因素，将单价、单机加总用量、替代率、整机安装量四者相乘可以得到灵巧手的无刷直流电机市场规模预测，我们预计在 2028 年达到 27 亿元。同理可以计算出直流无刷电机降本替代趋势下的空心杯电机市场规模，我们预计在 2028 年达到 81.6 亿元。

图表 29：灵巧手电机市场空间预测

	2024	2025E	2026E	2027E	2028E
全球人形机器人销量预测（万台）	0.5	1.5	10	20	50
yoy	-	200%	567%	100%	150%
直流无刷电机与空心杯电机单机加总用（个）	34	34	34	34	34
直流无刷电机替代率	0%	5%	10%	20%	40%
直流无刷电机单价（元）	400	400	400	400	400
直流无刷电机市场规模（亿元）	0.0	0.1	1.4	5.4	27.2
直流无刷电机与空心杯电机单机加总用量（个）	34	34	34	34	34
直流无刷电机替代率	0%	5%	10%	20%	40%
空心杯电机单价（元）	1500	1200	1000	900	800
空心杯电机市场规模（亿元）	2.6	5.8	30.6	49.0	81.6

资料来源：鸣志电器官网，中金公司研究部



传动系统：多方案技术迭代进行时

旋转传动：复合方案成为主流选择

灵巧手旋转传动包括齿轮（含减速器）、连杆、腱绳以及链条等。[在灵巧手单手自由度持续提升、高频动作要求、重量约束趋严的背景下](#)，主流厂商普遍采用复合传动方案以兼顾性能与可靠性。如[宇树 Dex 系列](#)通过齿轮与腱绳混合配置平衡力矩密度与灵活性，均体现出旋转传动走向混合化、分层化应用的明确趋势。

图表 30：各类旋转传动方式优缺点对比

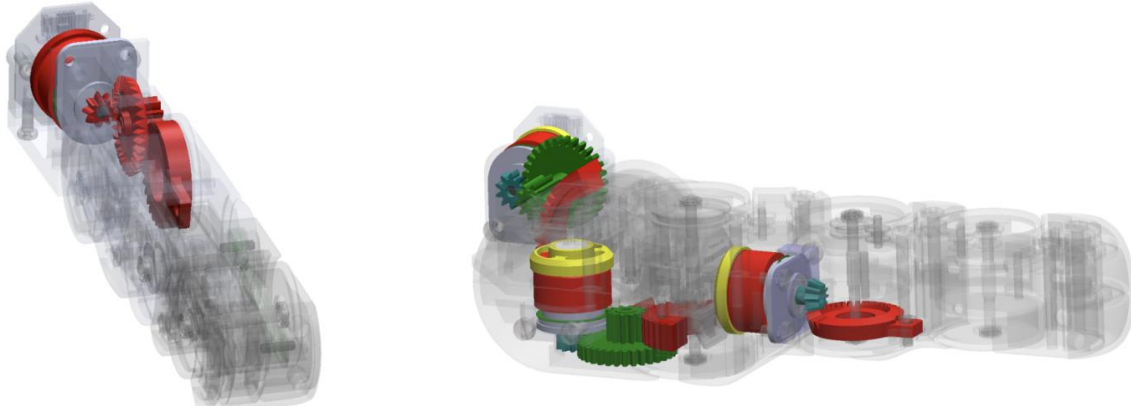
对比维度	齿轮传动	连杆传动	腱绳传动	链条传动（微型）
技术特点	通过微型行星齿轮、多级减速或差动结构放大力矩，多用于 MCP 等主承载关节	基于四连杆或复合连杆实现多关节几何耦合，常与欠驱动、弹性元件结合	电机远置，以钢丝绳/高分子腱绳牵引关节旋转，布线与路径高度灵活	采用微型滚子链与链轮啮合，实现同步或远距离动力传递
核心优势	力矩密度高、刚性强、控制模型成熟，抓握力输出稳定	结构稳定、鲁棒性高、控制复杂度低、寿命长	末端惯量低、自由度扩展性强，最接近人手肌腱结构	刚柔并济、耐冲击、寿命长、精度保持性好、全生命周期成本低
主要约束	回差与磨损难以彻底消除；末端惯量偏大，不利高频精细操作	自由度独立性受限，难以支持精细指间操作；微型化装配精度要求高	张力漂移、摩擦迟滞、蠕变与标定复杂，对系统级工程能力要求高	微型化、张紧与布置难度高，行业应用尚处早期
系统定位	基础力矩供给与主承载关节驱动	稳定抓握与工程可落地方案	高自由度与轻量化的核心支撑路径	特定同步/高耐久场景的补充方案
典型企业案例	宇树科技Dex3-1/Dex5-1	因时机器人RH56系列	Shadow Dexterous Hand	征和工业臻手Choho Hand
				
	星动纪元XHAND1	BeBionic Hand	PISA/IIT Soft Hand	
				
	Vincent Hand	傲意科技ROHand	特斯拉Optimus Gen2/Gen3	
				

资料来源：小米技术公众号，征和工业公众号，中金公司研究部

齿轮传动：用于 MCP 等主承载关节。通过微型行星减速器、多级齿轮或差动结构，该方案能够在有限空间内将电机输出稳定转化为指关节所需的高力矩，从而保障抓握阶段的力矩冗余与响应稳定性。

[齿轮传动约束在于回差、磨损及惯量抬升对精细操作的系统性影响](#)，微型齿轮难以彻底消除背隙，且若驱动单元直接布置于手指内部，会显著增加末端质量并削弱灵巧性。因此，灵巧手齿轮传动通过模块化、驱动后置或与其他传动方式混合使用。例如[宇树科技 Dex 3-1/Dex 5-1](#)、[星动纪元 XHAND1](#) 等灵巧手是让齿轮传动负责力矩供给，而末端精细动作依靠其他结构协同完成。

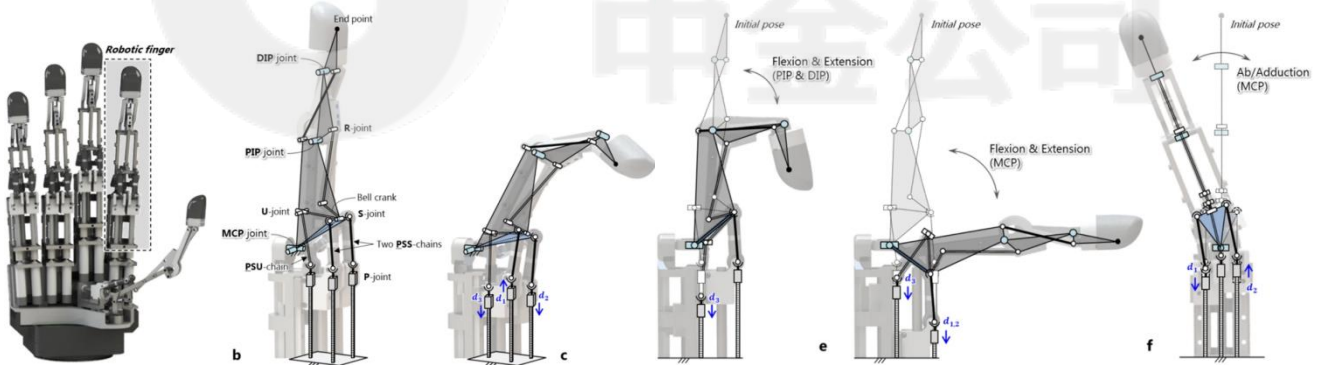
图表 31：齿轮传动方案在灵巧手内部应用示意图



资料来源：《Design and Control of a Dexterous Anthropomorphic Robotic Hand》（Cerruti., 2016），中金公司研究部

连杆传动：稳定性优先的代表路径。 连杆方案通常与欠驱动结构结合使用，利用几何结构将单一旋转输入映射为多个指关节的协同弯曲，可在降低控制复杂度的同时提升抓握鲁棒性。因时机器人、傲意科技等国内厂商的灵巧手产品普遍采用连杆+弹性元件结构，其核心优势在于动作可预测、寿命较长，但代价是自由度独立性不足，难以支持复杂精细操作，因此该方案更多被定位于“工程可落地”的中高端应用，而非追求极限仿生的技术路线。

图表 32：连杆传动方案在灵巧手内部应用示意图 图表 33：连杆结构可实现手指屈伸和左右摇摆动作

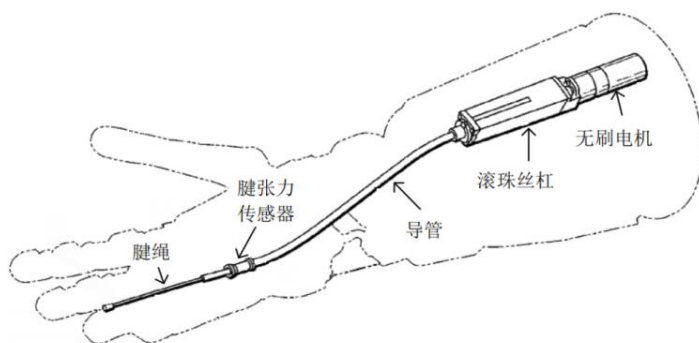


资料来源：《Integrated Linkage-driven Dexterous Anthropomorphic Robotic Hand》（Kim et al., 2021），中金公司研究部

资料来源：《Integrated Linkage-driven Dexterous Anthropomorphic Robotic Hand》（Kim et al., 2021），中金公司研究部

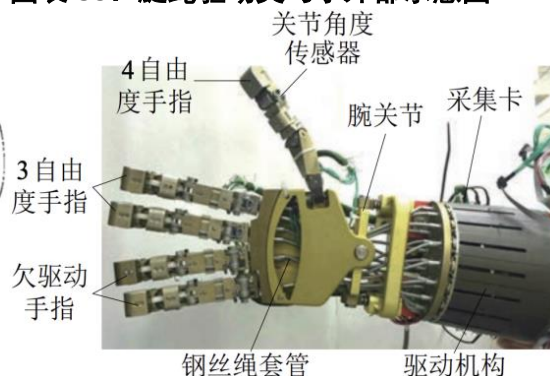
腱绳传动：轻量化灵巧手的发展方向。 腱绳方案通过将驱动源远置于掌部或前臂，以柔性腱绳牵引关节旋转，可显著降低指端惯量，为自由度数量提升和仿生运动提供结构空间。特斯拉 Optimus Gen2/Gen3 灵巧手已从早期齿轮与弹簧方案转向“腱绳+丝杠”的复合结构，腱绳主要承担末端精细动作与顺应性控制功能，支撑手部自由度从 11 个提升至 22 个。国内的灵心巧手 L30 腱驱版与英国 Shadow Robot 灵巧手均采用了该传动方案。但腱绳方案对张力管理、摩擦迟滞和材料蠕变要求较高，技术壁垒更多体现在系统级工程能力而非单一零部件。

图表 34：腱绳传动在灵巧手内部应用示意图



资料来源：《空间五指灵巧手单指控制系统设计》（王小涛 & 韩运岭，2016），中金公司研究部

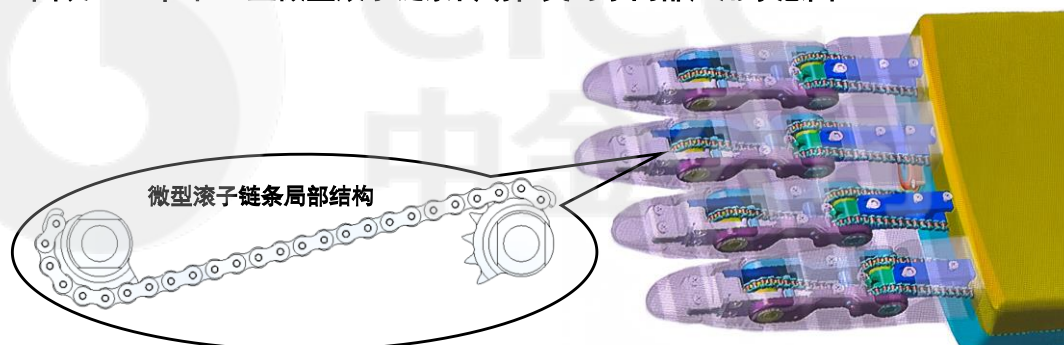
图表 35：腱绳驱动灵巧手外部示意图



资料来源：《腱驱动空间五指灵巧手控制系统研究》（韩冬 et al., 2016），中金公司研究部

链条传动：特定结构的补充方案。目前行业内仅[征和工业](#)研发的[微型滚子链条](#)指节节距可低至 [1.905mm](#)，可嵌入指节结构内部，具备耐磨、蠕变小、寿命长及承载能力较强等优势。

图表 36：征和工业微型滚子链条传动在灵巧手内部应用示意图

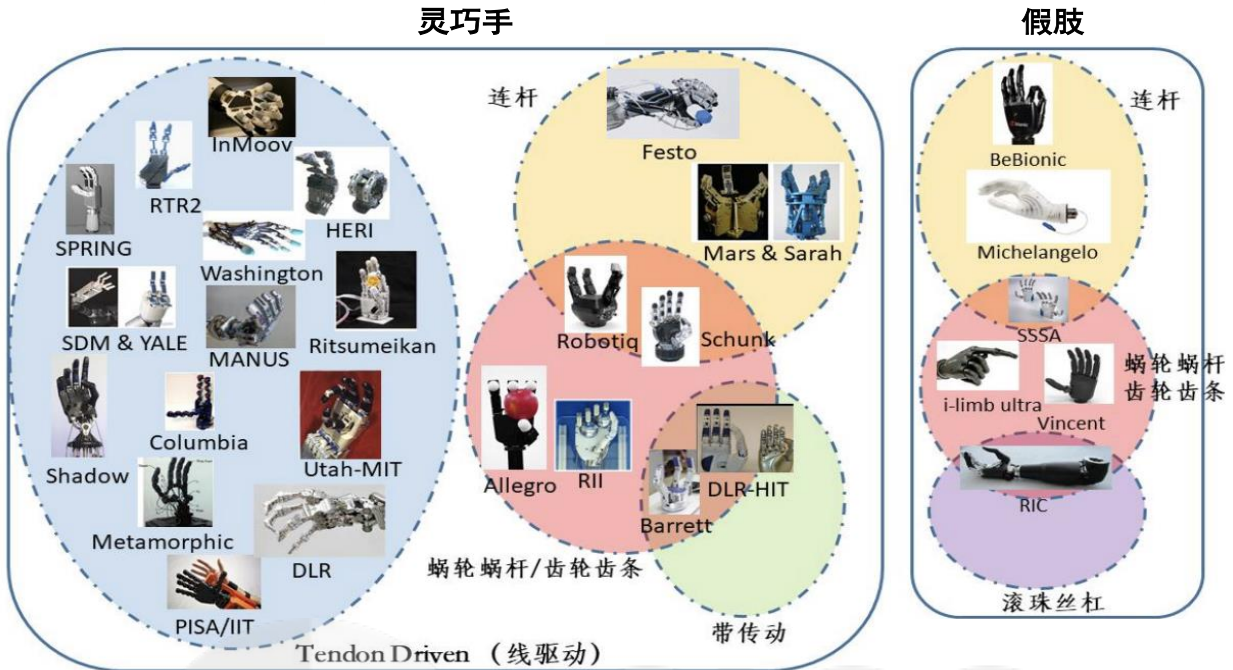


资料来源：征和工业公众号，中金公司研究部

直线传动：微型滚珠丝杠渗透加速

相较于旋转传动，直线传动在微小位移控制、力与位移一致性以及双向受力精度方面具备天然优势，更适合承担精细按压、稳定捏持及持续受力等高可控性动作。[根据机器人零部件头部企业五洲新春 1H25 发布的定增预案公告](#)，单只手部对微型滚珠丝杠的需求量已达到 15 个以上，反映直线传动结构单元在整体传动体系中的占比持续提升。

图表 37：灵巧手与假肢机械传动结构分类示例



资料来源：《对于 30 种机械手的归类与分析——从假肢（Prosthetic）和机器人（Robotics）两个应用领域讨论》（任曠宇，2018），中金公司研究部

微型滚珠丝杠相较于行星滚柱丝杠具有更高性价比。微型滚珠丝杠因结构成熟、成本可控，在中低负载场景下更适配灵巧手对精细控制与运行稳定性的要求。根据《2025 年人形机器人产业发展蓝皮书》，行星滚柱丝杠在灵巧手中的应用未形成规模化。

图表 38：微型滚珠丝杠与行星滚柱丝杠性能对比

对比维度	微型滚珠丝杠	行星滚柱丝杠
基本原理	通过滚珠在丝杠与螺母滚道间循环滚动，实现旋转传动到直线传动的转换	多根螺纹滚柱沿行星方式分布，实现线/面接触滚动传动
接触形式	点接触	线/面接触
传动效率	高且摩擦小	相对略低于滚珠丝杠
承载能力	中低负载	显著高于滚珠丝杠（约3–10倍）
速度能力	较高，但受滚珠循环限制，通常≤1000–1500mm/s	更高，最高线速度可达约2000mm/s
导程能力	受滚珠尺寸限制，一般>0.5mm	可实现<0.5mm，甚至更小
体积/功率密度	同载荷下体积较大	同载荷下体积约为滚珠丝杠的1/3
寿命	中等	可达滚珠丝杠的10–15倍
刚性与一致性	良好	更高，长期一致性更优
成本	相对较低，性价比高	通常为滚珠丝杠的1.3–1.6倍
加工与微型化难度	工艺成熟，微型化可行	加工复杂，微型化难度大
适用负载场景	中低负载、精细控制	高负载、高动态响应
在灵巧手中的定位	当前主流直线传动方案	潜在线性传动方案，仍处探索阶段

资料来源：《2025 年人形机器人产业发展蓝皮书》，前瞻产业研究院，山东理工精密机械公众号，中金公司研究部

陶瓷球逐步替代钢球成为新的技术演进方向。传统钢球在微型丝杠滚动接触中易面临磨损、疲劳剥落及润滑敏感性较高等问题，尤其在灵巧手高频启停和小载荷高精度场景中，性能衰减更为明显。而陶瓷球（如氮化硅）具备硬度高、摩擦系数低、耐磨性强与耐腐蚀性强等特点，可显著降低滚动阻力与摩擦损耗，并延长丝杠寿命。陶瓷球的引入正成为微型滚珠丝杠在灵巧手中面向高精度与高可靠性应用的重要发展方向。

图表 39：陶瓷球与传统钢球性能对比

对比维度	钢球（轴承钢AISI 52100）	陶瓷球（氮化硅Si ₃ N ₄ ）
密度	7.8g/cm ³	3.2g/cm ³ （约为钢球的40%）
硬度（HV）	700–800 HV	1400–1600HV（约为钢球的2倍）
弹性模量	≈210GPa	≈300GPa
摩擦系数（干/弱润滑）	0.05–0.08	0.01–0.03
滚动接触疲劳寿命	较低	约为钢球的5–15倍
耐磨性	中等	显著更高
最高工作转速能力	受离心力限制	更高（低密度、低离心力）
耐高温能力	≤150–200℃（受回火影响）	≥800–1000℃（材料本征稳定）
耐腐蚀性	一般（需防锈）	优异（不生锈）
润滑依赖性	高（润滑不良寿命显著下降）	较低（可在弱润滑工况工作）
热膨胀系数	≈12×10 ⁻⁶ /K	≈3×10 ⁻⁶ /K（热稳定性更好）
抗蠕变/尺寸稳定性	一般	优异
成本	较低	约为钢球的5–10倍，初期成本高，但全寿命成本可下降

资料来源：SKF 官网，力星股份官网，中材高新公众号，中金公司研究部

感知系统：方案通胀时代，多模态融合感知加速

为实现精细操作，灵巧手经历了从单一力觉反馈到多模态融合的跨越式发展。早期灵巧手主要配备简单的力敏电阻和霍尔传感器，仅能检测抓握力的有无和大小；后通过集成触觉传感器与力/力矩传感器，实现动态力控，提升了环境适应性；我们预计灵巧手有望进一步融合电子皮肤与 AI 视觉融合，升级感知能力以实现精密操作。总的来看，灵巧手所需感知能力主要包括：

- **触觉分辨率**：精确感知物体的表面特征、接触位置和力度分布，更好地控制抓取和操作；
- **力觉精度**：精确控制施加在物体上的力，避免因用力过大或过小导致物体损坏或抓取不稳；
- **测量精度**：控制灵巧手的运动和姿态，能保证操作的准确性和重复性；
- **泛化性**：对不同形状、尺寸、重量、材质的物体的适应能力。

目前，机器人灵巧手触觉感知的主流技术路线有三种：力/力矩传感器，柔性传感器与视觉补充。

图表 40：主流人形机器人厂商灵巧手设计

公司	产品	指数（关节数）	自由度	传感器方案
特斯拉	灵巧手	5（5+4×4+1）	22个	力传感器、位置传感器
Figure	灵巧手	5	16个	触觉阵列传感器
智元机器人	SkillHand	5	19个	视触觉传感器
星动纪元	XHand	5（3×2+2×3）	12个	触觉阵列传感器
钛虎机器人	酷手	5（5）	6个	/
优必选	自研第三代仿人灵巧手	5	-	阵列式触觉压力传感器
傅利叶	GR-2搭载	5	12个	触觉传感器
因时机器人	仿人五指灵巧手	5（12）	6个	/
帕西尼感知	DexH13	4（13）	13个	触觉传感器
灵心巧手	Linker Hand	5	42个	视触觉传感器
思灵机器人	Dexterity Hand	5（3×4+2）	15个	力传感器、位置传感器
腾讯robotics	TRX Hand	3（8）	8个	柔性触觉传感器、激光雷达、接近传感器、角度传感器
哈尔滨工业大学	HEU Hand 2(2006)	3（3×3）	9个	位置、速度、角度、力传感器
Shadow	Shadow dexterous hand	5（24）	20个	关节位置、触觉、温度、电流
德国宇航局DLR	DLR-HIT II	5	15个	/
Schunk	SVH	5（20）	20个	扭矩、关节位置、电机位置、力、扭矩、温度传感器

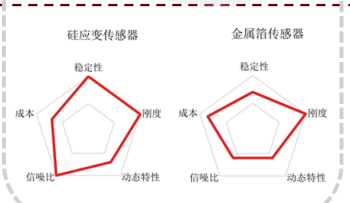
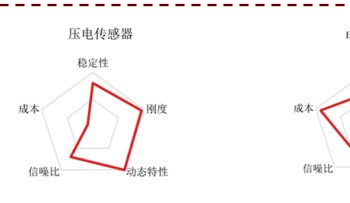
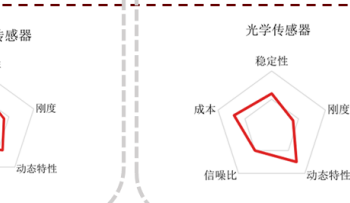
资料来源：Aparobot，各公司官网，中金公司研究部

力/力矩传感器：柔性力控的基础

力/力矩传感器能检测张力、拉力、压力、重量、扭矩、内应力和应变等力学量，能感知外部一维/三维/六维度的力和力矩，具有精度高、量程大、对体积要求低等优点。一般置于手腕处等关节末端，采集与外界环境交互的数据信息，从而调整姿态和动作。另有以因时机器人的五指灵巧手为例，在每个微型伺服电缸的尾端搭配压力传感器，用来反馈灵巧手的实时抓力。

按工作原理划分，力传感器主要包括应变式、压电式、电容式与光电式。其中，应变式力传感器因其高精度、宽测量范围、良好的线性度和成熟的制造工艺成为人形机器人力控的主流方案。相比之下，电容式传感器易受电磁干扰，压电式传感器仅适用于动态测量（静态信号衰减），而光学式传感器虽精度高但成本昂贵且系统复杂，限制了其广泛应用。

图表 41：力传感器各工作原理对比

	应变式	压电式	电容式	光学式
原理及特点	通常采用硅应变片或金属箔，材料本身发生形变进而转化为阻值变化	电容是通过极距的变化导致电压变化，压电则是通过形变改变电荷		通过光纤、光栅反映形变，再转化成为力
优点	精度高、技术成熟 测量范围广、成本低 频响特性好	动态响应好 精确性好、分辨率高 结构紧凑、尺寸小、刚度强	高灵敏度和高分辨率、频率范围宽 结构简单、环境适用性强	可靠性高 测量范围广 抗电磁干扰能力强
缺点	生产工艺复杂 金属箔式应变计输出微弱	存在电荷泄露 静态力测量困难	调理电路复杂 寄生电容影响大	对测试环境要求高 刚性偏弱
代表厂商	ATI、宇立仪器、坤维科技、鑫精诚、蓝点触控、海伯森、神源生智能、Sintokogio、Bota Systems AG、SCHUNK、埃力智能等	Roboing、Robosys、WACOH-TECH、Kistler等		OnRobot、松果体、华为创等
综合性能				

资料来源：GGII，ATI 官网，中金公司研究部

按贴片材料划分，应变式传感器可进一步分为金属箔传感器和硅应变传感器。主要差别在于力传感器贴片方案，前者需将金属箔贴片附在弹性体表面，通过高温固化确保结合强度；而后者直接在硅基底上制作压敏电阻，无需额外贴片，整体集成度更高。

- **金属箔应变片**：线性度、温度稳定性较好、应变范围大，但灵敏度、动态响应略弱于硅应变片。综合性能与技术路线较成熟，是目前人形机器人应用的主流。
- **硅应变**：信噪比、灵敏性及动态特性方面性能更优，但 MEMS 制造工艺相对复杂，材料成本较高，且对温度变化敏感（需集成温度补偿电路），适合微型

化、高灵敏度场景，如人形机器人灵巧手指尖触觉力感知。

图表 42：金属箔传感器与硅应变传感器对比

	金属箔传感器	硅应变传感器
	 	 
贴片差异	采用胶黏剂贴片将金属箔贴片装于弹性体表面，需高温固化	通过 MEMS 工艺直接集成在硅基底上，无需额外贴片
灵敏度	较低（应变系数 $K \approx 2$ ）	极高（ $K=100 \sim 200$ ）
温度稳定性	高（温漂 $< 0.01\%/^{\circ}\text{C}$ ），自补偿合金（如卡玛合金）	较差（需额外温补电路）
动态响应	带宽 1-2kHz	可达 10kHz 以上
线性度	优（ $< 0.1\%FS$ ）	较差（ $0.5\% \sim 1\%FS$ ）
生产工艺	成熟（光刻+蚀刻）	复杂（MEMS 制程）
材料成本	低（铜镍合金箔）	高（高纯硅晶圆）

资料来源：力传感器公司官网，中金公司研究部

按测量维度划分，力传感器可分为一维力/力矩传感器、三维力传感器和六维力传感器。一维力/力矩传感器仅测量单一方向的力或力矩；三维和六维力传感器可同时测量多方向力，其中六维力传感器位列工信部十四五“机器人关键基础升级行动”之列。

六维力传感器在高精度场景具有较大的落地潜力。六维力传感器能同时测量沿三个坐标轴方向的力和绕三个坐标轴方向的力矩，给出较为全面的力觉信息。因此能在要求高度灵敏度和复杂操作的场景中展现出独特优势。但其研发难度大，六维联合加载标定也较为复杂，因而仍在落地阶段。

柔性传感器：材料构筑高壁垒，前沿技术持续迭代

电子皮肤用于灵巧手中，进行力、温度、纹理等多种类感知，实现精准操作。柔性传感器，即电子皮肤，是指采用柔性材料制成的传感器，具有良好的柔韧性、延展性、弯折性等。由于材料和结构灵活，可以根据应用场景任意布置。未来，我们认为电子皮肤应用将从指尖与指腹阶段，向手掌脚掌与关节，乃至全身皮肤阶段跃进，应用范围逐渐扩大。

技术路径来看，目前压阻式、电容式较为主流。按照转换信号原理的不同，目前

厂商采用柔性传感器技术路线包括电阻式、电容式、压电式等，以及较为新型的光电式和电磁式，以实现高灵敏度、多模态感知和柔性贴合。

- **压阻式：**将压力变化转换成电阻或者电流的变化，是目前柔性传感技术中较为成熟的一种。压阻式触觉传感器具有负载能力强、可靠性高、测量便捷等优点，应用广泛。
- **电容式：**上下电极受法向力或切向力作用时，电极间距离或重合面积变化以改变电容值，进而计算受力大小，在测量多维力时有更高的灵敏度。
- **压电式：**压电材料受力时产生正负电荷，经放大后可计算受力大小。压电式触觉传感器具有结构简单、体积小、无需外置电源的优点。

图表 43：柔性触觉传感器分类优缺点对比

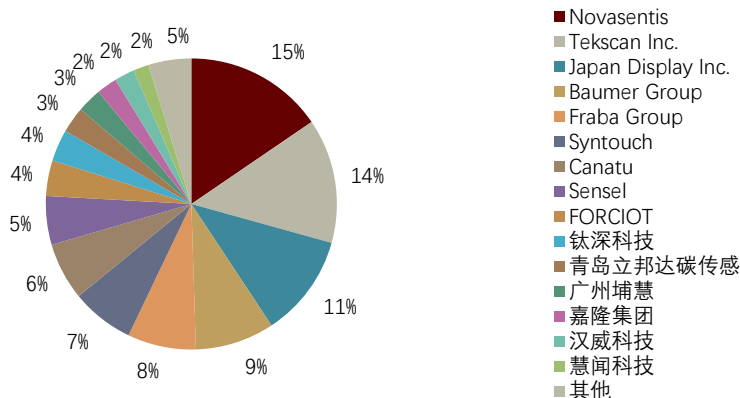
分类	技术	调节参数	优点	缺点
柔性触觉传感器	压阻式 (FSR)	电阻值	动态范围大，频率响应高，空间分辨率高，耐用，原材料易得，测量电路简单	涂层剂纯度低，填料粒径误差大；国内油墨还没有实现量产
	电容式	电容值	灵敏度高，空间分辨率高，动态范围大	存在寄生电容，对噪声敏感，测量电路复杂；可弯曲性不足
	压电式	电荷	灵敏度高，动态范围大，经久耐用，材料机械性能好，同时感应力和温度变化	仅适用性高动态检测；空间分辨率差；灵敏度过高，易受非目标物体和高频信号影响；测量电路复杂；材料特性衰减
	光电式	光强度	空间分辨率高，无电气干扰，响应速度快，成本低	整体结构缺乏柔性，对弹性体依赖性强
	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：X-MAN 创业加速公众号，《柔性触觉传感器在机器人上的应用综述》（何慧娟等，2024），中金公司研究部

材料自研构筑行业壁垒，前沿材料尚在探索中。从基本结构来看，柔性触觉传感器通常上下两层柔性电极（敏感材料+电极，有时集成为一体）和中间一层柔性衬底构成，其中敏感材料（或称薄膜材料）是决定传感器灵敏性、线性响应范围、分辨率等关键性能的核心部件，通常包括金属基材料、碳纳米复合材料、导电高分子材料三大类。一方面，敏感材料的一致性、温度变化环境下的稳定性较难保证。另一方面，当前柔性传感器产品的准确度普遍仅为 $\pm 10\%$ ，学界和业界持续尝试新材料方案，使得维持较好柔性的同时提升测量敏感度、多维力检测兼容性。除了部分方案下可公开采购的材料外（例如压阻式传感器的导电油墨），各个企业自行研发敏感材料的配方，形成材料壁垒。

市场由外资主导，国内企业积极投入研发。据 QY Research，全球头部厂商主要包括 Novasentis、Tekscan、Japan Display、Baumer 和 Fraba，这前五大厂商 2022 年市占率达到 57.1%；根据智研咨询，2022 年中国柔性传感器国产化率为 32.50%，主要参与者包括纽迪瑞科技、苏州能斯达电子（汉威科技）、瑞沅科技（弘信电子）、奥迪威、帕西尼感知等。

图表 44：2022 年全球触觉传感器竞争格局



资料来源：QY Research，中金公司研究部

图表 45：国内电子皮肤供应商概况（不完全统计）

公司	主营业务	柔性触觉产品	技术路线	应用领域
汉威科技（子公司能斯达）	气体传感器及仪表制造商和物联网解决方案提供商	柔性微纳传感器	压电式	医疗器械
弘信电子（子公司瑞沭科技）	FPC 制造	柔性压力传感器、压力感应按键、应变薄膜	-	消费电子等
帕西尼传感	多维触觉传感器	消费级触觉传感器、触觉灵巧手	多模态感知	智能制造、康养医疗、工业生产等
奥迪威	智能传感器和执行器	数字式触觉传感器	压电式	汽车电子、智能仪表、智能家居等
钛深科技	锂电池全生命周期管理	压力分布传感系统	柔性离电式传感技术	新能源锂电池、工业自动化检测
纽迪瑞科技	柔性压感触控产品	柔性 MEMS 压力传感器	压阻式	智能手机、可穿戴、力测量
广州埔慧科技	新型微结构柔性传感器	压力分布检测系统	电阻式	测量设备、触控交互、医疗设备、健康监测

资料来源：芯动联科招股书，中金公司研究部

视觉传感器：多模态融合的补充技术

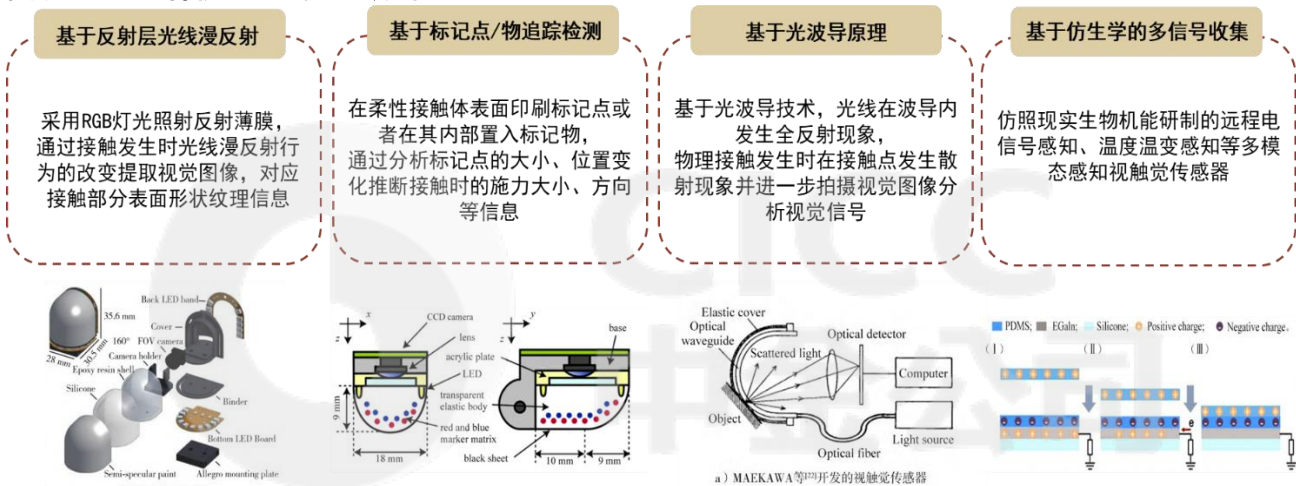
视触觉是灵巧手中一种多模态融合感知技术。受人类视触觉协同调控人体动作行为启发，视触觉方案常通过结合高精度 MEMS 压力传感器和视觉信息，使用集成式传感器仿生技术，实现对接触物体的几何形状、材质属性、受力分布等特征的联合感知。

视触觉方案相对纯触觉方案能进一步提高灵巧手在动态复杂环境下的适应性。方案可以更准确地感知物体的接触情况，弥补纯触觉方案的空白。

- **高维感知力：**同时感知多种物理信息，提供接近人手的丰富触觉感知，增强机器人与环境的交互能力
- **视觉兼容性：**与视觉数据高度兼容，可无缝接入 VLA 大模型，适应端到端 AI 架构需求
- **抗干扰能力：**光学信号不受温度、磁场及电磁干扰的影响，能够在高低温、电磁复杂环境中稳定工作

按照工作原理划分，视触觉传感器可分为基于反射层光线漫反射、基于标记点/物追踪检测、基于光波导原理、基于仿生学的多信号收集视触觉传感器四种。

图表 46：四种视触觉传感器方案



资料来源：《视触融合传感技术发展现状及应用》（魏斌等，2024），中金公司研究部

视触觉方案在当前灵巧手方案中渗透率较低，结合传感器与集成算法发展有望进一步提升。主流灵巧手厂商中，智元机器人、帕西尼感知科技与叠动科技在视触觉方案提前布局。以帕西尼 2024 年 8 月发布的灵巧手 DexH13 GEN2 为例，其搭载 1956 颗专业级 ITPU 多维触觉传感器并集成了 800 万高清 AI 手眼相机，基于先进的零样本位姿估计视觉算法，是市场上首款融合多维触觉与 AI 视觉双模态能力的四指仿生灵巧手，已应用于其最新发布的第二代多维触觉人形机器人 TORA-ONE。

图表 47：帕西尼感知科技——灵巧手 DexH13 GEN2



资料来源：帕西尼感知科技官网，中金公司研究部



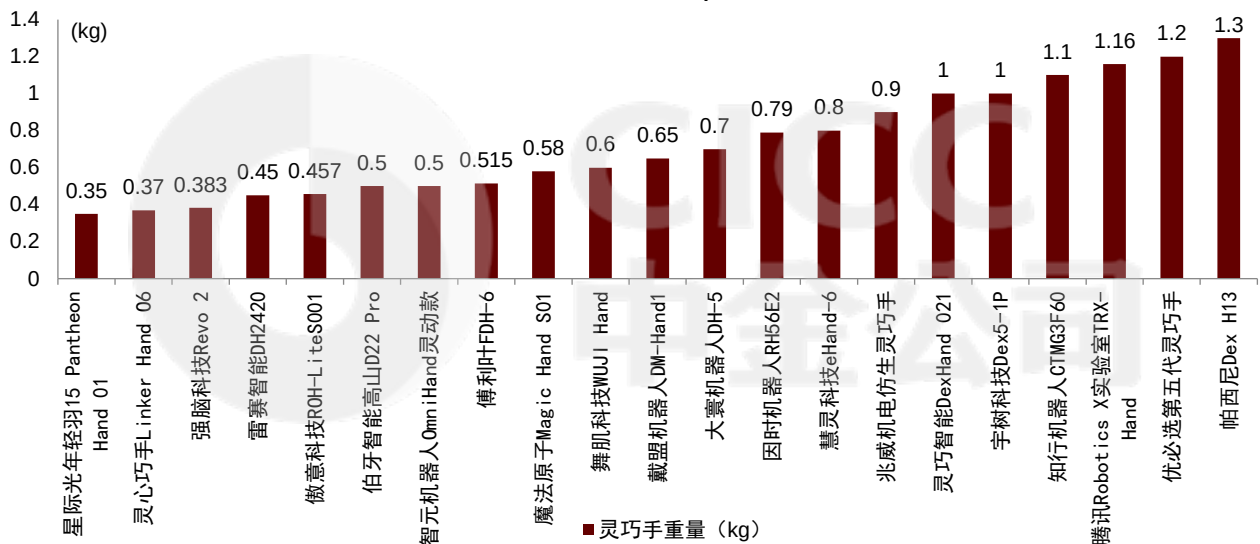
灵巧手发展趋势：轻量化、高自由度与感知融合

轻量化演进：材料替换&拓扑优化

灵巧手轻量化核心在于结构件而非单点零件。末端质量直接放大惯量与碰撞能量，进而抬升力控难度与安全冗余。同时自由度提升会显著增加驱动与传动单元数量，若结构件不做轻量化，灵巧手整体往往会在“尺寸—重量—刚度”三角中失衡。

国际上早期代表产品 [Shadow Dexterous Hand（2024）](#) 虽奠定了高自由度灵巧手技术框架，但其含前臂自重高达 4.3kg，更适配重型机械臂平台。相比之下，国内企业近年来在轻量化方向通过碳纤维或轻合金骨架实现针对性突破，灵巧手自重大部分已控制在 1kg 以内，最轻可低至 350g。

图表 48：国产阵营灵巧手代表产品自重对比（不含前臂）



资料来源：《2025 年具身智能与人形机器人市场研究》，佐思汽研，商汤智能产业研究院，各公司官网，智东西公众号，中金公司研究部

结构件轻量化的主要为材料替换+结构拓扑化。结构件的材料与工艺选择能够将重量降到可控区间，同时为高自由度布线与末端传感器集成释放关键空间。

- ▶ **材料侧：**常以轻合金与复材替代传统钢/厚壁金属，例如[镁合金密度可低至约 1.74g/cm³](#)，密度是铝的 2/3、钢的 1/4，同时具备优异的减振性和散热性；而[钛及钛合金密度约 4.43g/cm³](#)，在如齿牙、轴承/销轴周边承载区等高应力小体积零件上具备强度优势，但成本相对更高。
- ▶ **复材侧：**碳纤维增强体系可将[PEEK 材料密度带到约 1.6g/cm³](#)，比金属材料减重 40%，适合在掌部壳体、指骨外壳、支撑梁等以刚度为主的部位导入。
- ▶ **结构侧：**拓扑优化与轻量化设计方法已在机器人结构研究中形成体系化路径，可[在满足刚度与动态载荷约束下削减冗余材料](#)，从而实现减重不减刚度的效果。
- ▶ **一体化设计：**以 3D 打印技术将原本离散的支架、导向、外壳与局部筋板集

成单体，减少紧固件与重叠壁厚；例如 [Tian \(2017\) 等研发的 3D 打印腱绳驱动轻量灵巧手整手重量仅为 150g。](#)

图表 49：灵巧手结构件材料类型对比

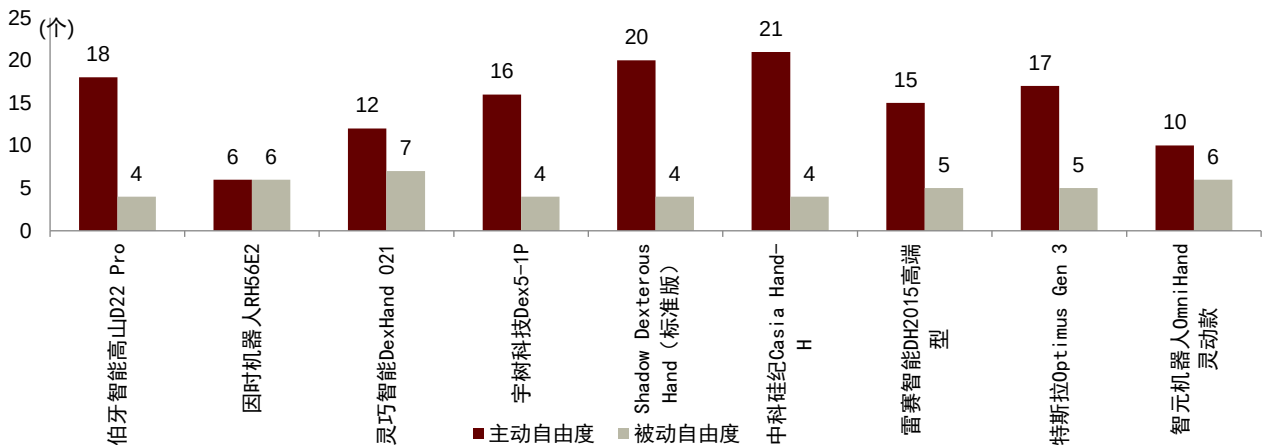
轻量化手段	主要应用部位	工程收益	关键代价	典型应用与依据
轻合金替代传统钢材	掌部骨架、指骨承力框架、关节支座	密度显著降低（如镁合金 $\approx 1.74 \text{ g/cm}^3$ ），在保证刚度前提下降低末端惯量，有利于安全性与力控稳定	刚度与疲劳性能需结构补偿；镁合金耐腐蚀与工艺成熟度要求高	工业机器人与轻量机械臂广泛采用
钛/钛合金局部强化	高应力关节、轴承座、齿轮/销轴周边	在小体积下提供高强度与高疲劳寿命，避免“为强度整体增重”	材料与加工成本高，仅适合关键受力区	航空航天与高端机器人承载结构
复合材料（CFRP/PEEK）	指骨外壳、掌部壳体、支撑梁	密度低（ $\sim 1.6 \text{ g/cm}^3$ ），比刚度高，为高自由度布线和传感器预留空间	各向异性强，连接与装配设计复杂	3D打印灵巧手与科研原型广泛采用
拓扑优化/晶格化结构	掌部骨架、指骨内部	在满足刚度与动态载荷前提下“减材不减刚”，系统性降重	依赖仿真与制造能力，传统工艺难实现	拓扑优化在机器人结构中成熟应用
一体化/增材制造结构	指骨、导向件、壳体、支撑件	减少零件数与紧固件，降低装配冗余重量，同时提升可靠性	量产一致性与成本需随工艺成熟改善	3D打印腱绳手，整手仅重150g

资料来源：《Topology optimization. Theory, methods, and applications. 2nd ed.》(Bendsøe & Sigmund, 2003)，《The Making of a 3D-Printed, Cable-Driven, Single-Model, Lightweight Humanoid Robotic Hand》(Tian et al., 2017)，ASM Handbook，中金公司研究部

高自由度发展：从仿生指标到操作能力的结构性提升

灵巧手自由度（DOF）结构正呈现出主动自由度快速上行、被动自由度相对收敛的趋势。头部企业灵巧手的主动自由度已普遍提升至 15 - 21 DOF 区间，而被动自由度多集中控制在 4 - 6 DOF，主要用于接触顺应与力觉缓冲，非操作能力本身。表明各大厂商正有意识地将结构复杂度向可独立控制、直接提升操作能力的自由度集中。17 个以上主动自由度已被视为接近类人操作能力的关键阈值，可覆盖绝大多数日常抓取与操作任务。

图表 50：灵巧手代表厂商主动自由度与被动自由度数量对比

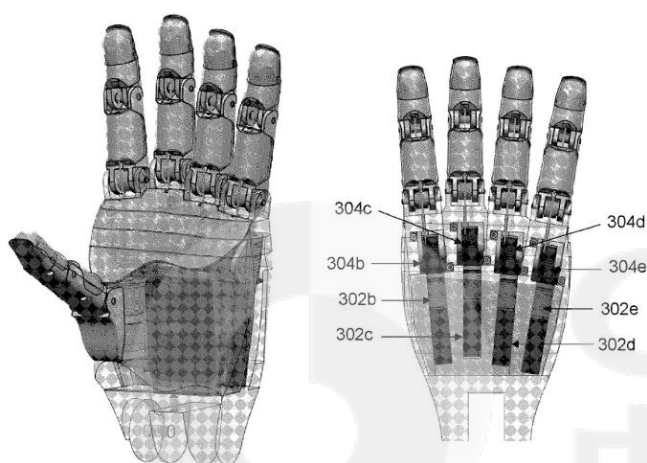


资料来源：《2025 年具身智能与人形机器人市场研究》(水清木华研究中心，2025 年)，佐思汽研，各公司官网，中金公司研究部

灵巧手自由度提升已与整机操作目标深度绑定。以特斯拉 Optimus 系列为代表，其早期版本 Gen1 的手部自由度为 11 DOF，主要覆盖张合与基础抓握；在最新迭代中，Gen3 自由度已提升至 22 DOF，但新增自由度并未均匀分布，而是重点配置于拇指对指、指根侧摆及指尖微调等对操作成功率贡献更高的部位。

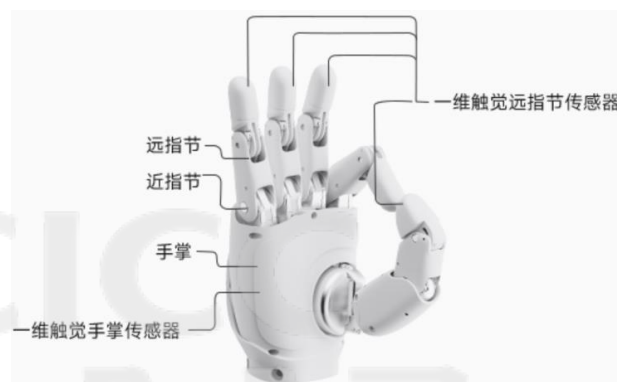
相比之下，国内头部厂商[智元机器人并未一味追求极限 DOF 指标](#)，而是在成本、可靠性与量产可行性约束下，对自由度结构进行工程化取舍，通过提升拇指与食指的独立性和多轴协同能力，在相对可控的自由度规模内显著扩展实际操作能力。

图表 51：特斯拉 Optimus Gen3 灵巧手结构示意图



资料来源：KGG 官网，中金公司研究部

图表 52：智元机器人 OmniHand 灵巧手结构示意图

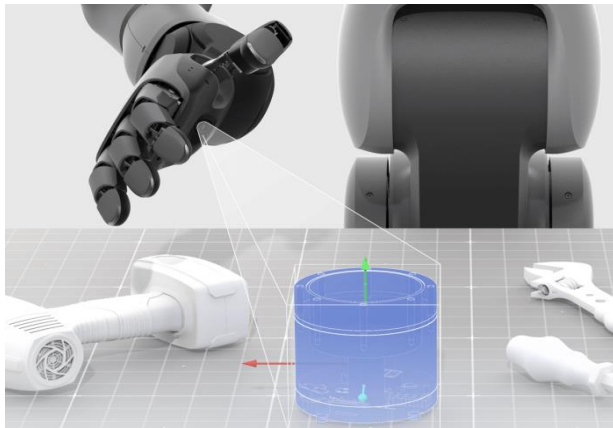


资料来源：智元机器人官网，中金公司研究部

感知能力升级：传感器加配，缩短感知链路

传感器加配正成为灵巧手能力跃迁的决定性变量。随着灵巧手自由度与操作复杂度同步提升，仅依赖头部摄像头或关节编码器等远端感知已难以支撑精细操作与稳定力控。因此，[近年来灵巧手的演进方向](#)正从单一传感器叠加转向围绕末端构建视觉+触觉的感知闭环，通常以掌部或指尖近场视觉缩短感知到执行的链路。例如国内厂商[帕西尼 DexH13 灵巧手](#)通过多维触觉阵列与 AI 手眼视觉实现视触双模态融合，而[戴盟机器人的 DM-Hand1](#) 则以毫米级厚度的视触觉传感器将视觉与触觉能力前移至接触界面。

图表 53：帕西尼 DexH13 灵巧手多维触觉+AI 视觉功能示意图



资料来源：帕西尼官网，中金公司研究部

图表 54：戴盟机器人 DM-Hand1 视触觉灵巧手内部示意图



资料来源：戴盟机器人官网，中金公司研究部

Figure 03 人形机器人将掌部视觉作为末端感知的重要配置。[Figure AI 在其最新发布的 Figure 03 灵巧手掌部](#)呈现了末端视觉传感器集成的位置与视角象限，体现出其为服务于更高层次操作能力的核心组件。掌部视觉数据可用于实时物体重建、边缘/接触面检测与策略修正，使灵巧手在动态环境和不确定接触条件下依然具备强鲁棒性。与仅依赖上方摄像头的方案相比，掌部视觉在遮挡、深度估计与接触后持续感知方面优势明显。

图表 55：Figure 03 灵巧手掌部摄像头示意图



资料来源：Figure AI 官网，中金公司研究部

产业链梳理

我们将国内外布局灵巧手的企业分为四类：

第一类：依托于机械或者电机运动控制技术优势的理解，转型做灵巧手总成。代表企业如雷赛智能、领益智能、科达利、鼎智科技、伟创电气等。

第二类：由人形机器人本体企业自主研发设计，与本体架构适配性更强，自研迭代灵巧手。代表企业如特斯拉、波士顿动力、优必选、Figure AI、宇树科技、智元机器人等。

第三类：专注于结构设计的独立第三方。代表企业如强脑科技、因时机器人、傲意科技、帕西尼感知、灵巧智能、灵心巧手等。

第四类：配套做灵巧手部件，尚未延伸到模组集成环节。代表企业如鸣志电器、绿的谐波、斯菱股份、拓邦股份、五洲新春、汉威科技、柯力传感、长盈精密、蓝思科技等。

图表 56：国内外布局灵巧手的代表企业

分类标准	特点	代表企业
机械或者电机企业转型做灵巧手总成	起源于运动控制、微型电机、减速器、丝杠等环节的理解，沿价值链向上整合，推出整手并量产	雷赛智能、领益智能、科达利、鼎智科技、伟创电气
人形机器人本体自研灵巧手	为实现“手脑协同”和任务上限，把灵巧手作为核心末端执行器自研迭代，强调与本体架构、抓握模型的深度耦合	特斯拉、波士顿动力、优必选、傅里叶、Figure Ai、宇树科技、智元机器人、星动纪元、1X
独立第三方负责结构设计，生产环节由代工厂负责	专注灵巧手产品的第三方公司，面向科研、工业和本体厂配套，在技术未收敛之前，提供多重技术路线的视角	强脑科技、傲意科技、因时机器人、帕西尼感知、灵巧智能、灵心巧手、Shadow Robot（英国）、SCHUNK（德国）、Festo（德国）
配套做灵巧手组件	具备灵巧手某一部分技术能力，未延伸到模组集成环节	鸣志电器、绿的谐波、斯菱股份、拓邦股份、五洲新春、汉威科技、柯力传感、长盈精密、蓝思科技等

资料来源：各公司官网，中金公司研究部

图表 57：可比公司估值表

股票代码	公司名称	财报货币	收盘价 01-09	营业收入 (财报货币 百万)		净利润 (财报货币 百万)		市盈率	
				2025A/E	2026E	2025A/E	2026E	2025A/E	2026E
688698.SH	伟创电气*	CNY	98.57	1,982	2,434	272	386	77.6	54.6
300953.SZ	震裕科技*	CNY	170.03	8,877	10,366	483	850	61.1	34.7
300007.SZ	汉威科技	CNY	59.28	2,369	2,711	136	168	152.5	122.9
603667.SH	五洲新春	CNY	78.11	3,663	4,177	131	173	123.1	94.7
603119.SH	浙江荣泰*	CNY	111.75	1,459	2,365	307	469	132.4	86.6

注：标*公司为中金覆盖，采用中金预测数据；其余使用市场一致预期

资料来源：Wind，彭博资讯，公司公告，中金公司研究部

风险提示

人形机器人研发进展不及预期：目前，国内在机器人的行进速度、负载能力等硬性指标上以及针对地形和扰动的自适应控制技术方面与国外研究水平有一定差距，可能会出现研发进展不及预期的风险。

技术路径不确定带来的投资风险：机器人灵巧手目前传动、驱动、传感的技术方案仍在不断升级，技术路线尚未收敛，未来若市场出现技术路线偏好、完成技术路线收敛，或将导致部分企业竞争力下滑，盈利能力不及预期。

团队信息



刘中玉 分析员

SAC 执证编号: S0080521060003
SFC CE Ref: BSP722
zhongyu.liu@cicc.com.cn



王梓琳 分析员

SAC 执证编号: S0080523080005
zilin3.wang@cicc.com.cn



丁健 分析员

SAC 执证编号: S0080520080002
SFC CE Ref: BRQ847
jian3.ding@cicc.com.cn



郭威秀 分析员

SAC 执证编号: S0080521120004
SFC CE Ref: BSI157
weixiu.guo@cicc.com.cn



鲁烁 分析员

SAC 执证编号: S0080524070023
shuo.lu@cicc.com.cn



孟辞 分析员

SAC 执证编号: S0080525090006
ci.meng@cicc.com.cn



张梓丁 分析员

SAC 执证编号: S0080517090002
SFC CE Ref: BSB840
ziding.zhang@cicc.com.cn



CICC
中金公司

法律声明

一般声明

本报告由中国国际金融股份有限公司（已具备中国证监会批复的证券投资咨询业务资格）制作。本报告中的信息均来源于我们认为可靠的已公开资料，但中国国际金融股份有限公司及其关联机构（以下统称“中金公司”）对这些信息的准确性及完整性不作任何保证。本报告中的信息、意见等均仅供投资者参考之用，不构成对买卖任何证券或其他金融工具的出价或征价或提供任何投资决策建议的服务。该等信息、意见并未考虑到获取本报告人员的具体投资目的、财务状况以及特定需求，在任何时候均不构成对任何人的个人推荐或投资操作性建议。投资者应当对本报告中的信息和意见进行独立评估，自主审慎做出决策并自行承担风险。投资者在依据本报告涉及的内容进行任何决策前，应同时考量各自的投资目的、财务状况和特定需求，并就相关决策咨询专业顾问的意见对依据或者使用本报告所造成的一切后果，中金公司及/或其关联人员均不承担任何责任。

本报告所载的意见、评估及预测仅为本报告出具日的观点和判断，相关证券或金融工具的价格、价值及收益亦可能会波动。该等意见、评估及预测无需通知即可随时更改。在不同时期，中金公司可能会发出与本报告所载意见、评估及预测不一致的研究报告。

本报告署名分析师可能会不时与中金公司的客户、销售交易人员、其他业务人员或在本报告中针对可能对本报告所涉及的标的证券或其他金融工具的市场价格产生短期影响的催化剂或事件进行交易策略的讨论。这种短期影响的分析可能与分析师已发布的关于相关证券或其他金融工具的目标价、评级、估值、预测等观点相反或不一致，相关的交易策略不同于且也不影响分析师关于其所研究标的证券或其他金融工具的基本面评级或评分。

中金公司的销售人员、交易人员以及其他专业人士可能会依据不同假设和标准、采用不同的分析方法而口头或书面发表与本报告意见及建议不一致的市场评论和/或交易观点。中金公司没有将此意见及建议向报告所有接收者进行更新的义务。中金公司的资产管理部门、自营部门以及其他投资业务部门可能独立做出与本报告中的意见不一致的投资决策。

除非另行说明，本报告中所引用的关于业绩的数据代表过往表现。过往的业绩表现亦不应作为日后回报的预示。我们不承诺也不保证，任何所预示的回报会得以实现。分析中所做的预测可能是基于相应的假设。任何假设的变化可能会显著地影响所预测的回报。

本报告提供给某接收人是基于该接收人被认为有能力独立评估投资风险并就投资决策能行使独立判断。投资的独立判断是指，投资决策是投资者自身基于对潜在投资的目标、需求、机会、风险、市场因素及其他投资考虑而独立做出的。

本报告由受香港证券及期货事务监察委员会监管的中国国际金融香港证券有限公司（“中金香港”）于香港提供。香港的投资者若有任何关于中金公司研究报告的问题请直接联系中金香港的销售交易代表。本报告作者所持香港证监会牌照的牌照编号已披露在报告首页的作者姓名旁。

本报告由受新加坡金融管理局监管的中国国际金融（新加坡）有限公司（“中金新加坡”）于新加坡向符合新加坡《证券期货法》定义下的合格投资者及/或机构投资者提供。本报告无意也不应直接或间接地分发或传递给新加坡的任何其他人。提供本报告于合格投资者及/或机构投资者，有关财务顾问将无需根据新加坡之《财务顾问法》第 45 条就任何利益及/或其代表就任何证券利益进行披露。有关本报告之任何查询，在新加坡获得本报告的人员可联系中金新加坡持牌代表。

本报告由受金融行为监管局监管的中国国际金融（英国）有限公司（“中金英国”）于英国提供。本报告有关的投资和服务仅向符合《2000 年金融服务和市场法 2005 年（金融推介）令》第 19（5）条、38 条、47 条以及 49 条规定的人士提供。本报告并未打算提供给零售客户使用。在其他欧洲经济区国家，本报告向被其本国认定为专业投资者（或相当性质）的人士提供。

本报告由中国国际金融日本株式会社（“中金日本”）于日本提供，中金日本是在日本关东财务局（日本关东财务局长（金商）第 3235 号）注册并受日本法律监管的金融机构。本报告有关的投资产品和服务仅向符合日本《金融商品交易法》第 2 条 31 项所规定的专业投资者提供。本报告并未打算提供给日本非专业投资者使用。

本报告亦由中国国际金融股份有限公司向符合日本《金融商品交易法施行令》第 17 条第 3 款第 1 项及《金融商品交易法》第 58 条第 2 款但书前段所规定的日本金融机构提供。在该情形下，本报告有关的投资产品和服务仅向日本受监管的金融机构提供。

本报告将依据其他国家或地区的法律法规和监管要求于该国家或地区提供。

特别声明

在法律许可的情况下，中金公司可能与本报告中提及公司正在建立或争取建立业务关系或服务关系。因此，投资者应当考虑到中金公司及/或其相关人员可能存在影响本报告观点客观性的潜在利益冲突。

与本报告所含具体公司相关的披露信息请访问 <https://research.cicc.com/footer/disclosures>，亦可参见近期已发布的关于该等公司的具体研究报告。

中金研究基本评级体系说明：

分析师采用相对评级体系，股票评级分为跑赢行业、中性、跑输行业（定义见下文）。

除了股票评级外，中金公司对覆盖行业的未来市场表现提供行业评级观点，行业评级分为超配、标配、低配（定义见下文）。

我们在此提醒您，中金公司对研究覆盖的股票不提供买入、卖出评级。跑赢行业、跑输行业不等同于买入、卖出。投资者应仔细阅读中金公司研究报告中的所有评级定义。请投资者仔细阅读研究报告全文，以获取比较完整的观点与信息，不应仅仅依靠评级来推断结论。在任何情形下，评级（或研究观点）都不应被视为或作为投资建议。投资者买卖证券或其他金融产品的决定应基于自身实际具体情况（比如当前的持仓结构）及其他需要考虑的因素。

股票评级定义：

- 跑赢行业（OUTPERFORM）：未来 6~12 个月，分析师预计个股表现超过同期其所属的中金行业指数；
- 中性（NEUTRAL）：未来 6~12 个月，分析师预计个股表现与同期其所属的中金行业指数相比持平；
- 跑输行业（UNDERPERFORM）：未来 6~12 个月，分析师预计个股表现不及同期其所属的中金行业指数。

行业评级定义：

- 超配（OVERWEIGHT）：未来 6~12 个月，分析师预计某行业会跑赢大盘 10%以上；
- 标配（EQUAL-WEIGHT）：未来 6~12 个月，分析师预计某行业表现与大盘的关系在-10%与 10%之间；
- 低配（UNDERWEIGHT）：未来 6~12 个月，分析师预计某行业会跑输大盘 10%以上。

研究报告评级分布可从<https://research.cicc.com/footer/disclosures> 获悉。

本报告的版权仅为中金公司所有，未经书面许可任何机构和个人不得以任何形式转发、翻版、复制、刊登、发表或引用。

V190624
编辑：张莹

北京 中国国际金融股份有限公司

中国北京建国门外大街 1 号国贸写字楼 2 座 28 层

邮编: 100004

电话: (86-10) 6505 1166

传真: (86-10) 6505 1156

上海

中国国际金融股份有限公司上海分公司

上海市浦东新区陆家嘴环路 1233 号

汇亚大厦 29 层

邮编: 200120

电话: (86-21) 5879-6226

传真: (86-21) 5888-8976

深圳

中国国际金融股份有限公司深圳分公司

深圳市南山区科苑南路 2801 号

中金大厦 17-21 层

邮编: 518048

电话: (86-755) 8319 5000

传真: (86-755) 8319-9229

香港

中国国际金融（国际）有限公司

香港中环港景街 1 号

国际金融中心第一期 29 楼

电话: (852) 2872-2000

传真: (852) 2872-2100

东京

中国国际金融日本株式会社

〒100-0005 東京都千代田区丸の内 3 丁目 2 番 3 号

丸の内二重橋ビル 2 1 階

Tel: (+813) 3201 6388

Fax: (+813) 3201 6389

纽约

CICC US Securities, Inc

280 Park Ave, 32nd Floor,

New York, NY 10017, USA

Tel: (+1-646) 7948 800

Fax: (+1-646) 7948 801

新加坡

China International Capital Corporation (Singapore)
Pte. Limited

6 Battery Road, #33-01

Singapore 049909

Tel: (+65) 6572 1999

Fax: (+65) 6327 1718

伦敦

China International Capital Corporation (UK)
Limited

25th Floor, 125 Old Broad Street

London EC2N 1AR, United Kingdom

Tel: (+44-20) 7367 5718

Fax: (+44-20) 7367 5719

法兰克福

China International Capital Corporation (Europe)
GmbH

Neue Mainzer Straße 52-58, 60311

Frankfurt a.M, Germany

Tel: (+49-69) 24437 3560