证券研究报告

东吴证券 SOOCHOW SECURITIES

灵巧之“手”，解锁人形机器人黄金赛道

——人形机器人深度之七

电新首席证券分析师：曾朵红
执业证书编号：S0600516080001
联系邮箱：zengdh@dwzq.com.cn

电动车首席证券分析师：阮巧燕
执业证书编号：S0600517120002
联系邮箱：ruanqy@dwzq.com.cn

联系电话：021-60199793

2025年4月26日

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

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

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

- Part1 灵巧手打开人形机器人应用上限，快速迭代
- Part2 混合机械方案是趋势，兼具高自由度和承载力
- Part3 手部多维感知是方向，促进手脑协同
- Part4 头部本体厂全栈自研，零部件提供整体解决方案
- PART5 投资建议和风险提示

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

摘要

- **灵巧手打开人形机器人应用上限，多方参与，2025年开启快速迭代。**灵巧手要求具备运动能力、负载能力、控制能力、感知能力、耐用能力、轻量化等，由驱动、传动、控制、感知四大模块构成。灵巧手是人形机器人操作性能的核心，决定机器人功能的上限，是具身智能的核心。25年密集主机厂和零部件厂发布灵巧手方案，且在未来2年灵巧手方案将快速迭代，并投入使用场景中，加速训练人形机器人手脑协同。
- **混合机械方案是趋势，兼具高自由度和承载力。**驱动方案：若电机内置，首选空心杯，部分用步进；腱绳方案，电机集成于手臂，空间大，可选无刷有齿槽电机。传动方案：齿轮负责旋转运动调速，丝杆/蜗轮蜗杆负责直线运动和方向变化。连杆和腱绳是用于连接驱动与关节，用于增加自由度。短期，空心杯电机+行星减速器+滚珠丝杆+连杆方案最先放量，实用性满足当前工业场景需求。中长期趋势是高自由度+负载力，因此机械设计可用融合方案，如近掌关节采用刚性更高的减速器+丝杆、手指末端关节采用腱绳等。
- **手部多维感知是方向，促进手脑协同。**灵巧手需通过触觉传感器、关节力控和编码器等将数据反馈至大脑，从而构建物体物性库和抓握数据库等，并通过仿真平台，扩大数据集，从而优化大脑的运规的泛化性。触觉传感器追求高灵敏度、高集成度、高延展性、成本低，目前多技术路线并行。压阻式力维度低（一维法向力）、灵敏性不足（阈值10g），在低端先放量；而电容式及电磁式性能更优，感知三维力，力分辨<1g，抗干扰能力提升和体积缩小后，放量潜力大；视触觉传感器理论上限高，但对数据和算法要求高。
- **头部本体厂全栈自研，零部件提供整体解决方案。**头部本体厂商选择全栈自研，方案各异，如特斯拉（腱绳）、FigureAI（连杆）、智元（混合）、星动纪元（纯直驱）等，是灵巧手的主力。独立第三方集成商，如因时机器人、强脑、傲意、灵心巧手、灵巧智能等进展较快；此外零部件厂商延伸至整手集成，如兆威、雷赛、帕西尼等，同时兼售模组零部件。目前灵巧手价格差异大，主流价格5-10万/只，中期价格预计降至0.5-3万/只，占本体成本比重20%左右。我们测算2030年人形机器人300万台+，市场空间约900亿，对应零部件市场空间较大的为触觉传感器、空心杯电机、齿轮、丝杆。
- **投资建议：**首推灵巧手兼具整体解决方案和零部件供应商**雷赛智能**、**兆威机电**，其次为绑定核心主机厂的零部件供应商，空心杯电机（**鸣志电器、伟创电气，关注峰岹科技、信捷电气、捷昌驱动**），微型丝杆（**浙江荣泰、北特科技**），减速器（**科达利、斯凌股份**，关注丰立智能），触觉传感器（关注汉威科技、福莱新材），腱绳（关注南山智尚、大业股份）
- **风险提示：**需求不及预期，技术迭代低于预期，竞争加剧

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

Part1 灵巧手打开人形机器人应用上限，快速迭代

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

1 灵巧手决定人形机器人的操作功能，是重中之重

- 人形机器人优势在于通用性，而灵巧手作为机器人的末端执行器，很大程度上决定了机器人的精细操作与执行复杂任务的能力，是人形机器人替代人类工作的关键部件。从远期角度看，灵巧手预计占人形全成本比重20%-30%，仅次于身体执行，是最重要的硬件。同时，灵巧手在精细操作和执行任务的同时，收集数据，训练大脑，手脑协同，加速具身智能。
- **不同场景对灵巧手方案要求不同**：如工业搬运场景，自由度要求低，但负载和握力要求高，而家庭场景反之。

图表：特斯拉人形机器人构成

本体：远期成本12-15万台

远期价格5万/台

14个 ×
- **旋转执行器**
- *无框力矩电机*
- ***谐波减速器***
- *驱动器*
- *扭矩传感器*
- *编码器*

14个 ×
- **直线执行器**
- *无框力矩电机*
- ***行星滚柱丝杠***
- *梯形丝杆*
- *驱动器*
- *力传感器*
- *编码器*

- **手部关节总成**
- *空心杯电机/无刷有齿槽电机*
- *行星减速器/键绳*
- *触觉传感器*
- *编码器*

远期价格3万/台

- **智能硬件**
- *摄像头*
- *扬声器*
- *惯性导航*
- ***芯片***
- *MCU芯片*

远期价格2万/台

- **结构件及配件**
- *金属、碳纤维结构件*
- *线束、面罩剥离*

远期价格0.5万/台

软件费用摊销
- **小脑：运动控制**
- **大脑：大模型和运动规划**

- **电池**

远期价格0.1-0.2万/台

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

2 类比人类的手，灵活、精确、小巧、敏感

- **手的十三种基本的功能：**悬垂、托举、触摸、推压、击打、动态操作、球形掌握、球形指尖握、柱状抓握、勾拉、二指尖捏、多指尖捏、侧捏等。手的功能建立在手与上肢的皮肤、筋膜、关节、肌肉等“执行器官”完整的基础上，并实现于神经系统多层级的精密调控与信息整合处理。
- **人手自由度共有21个（不考虑手腕关节）：**前端四指每个手指有4个自由度，其中掌指关节(MCP)具有2个轴线垂直相交的转动自由度，合计16个；大拇指5个，合计21个。若加上手腕额外的3个自由度的平移和3个自由度的旋转，共计27个自由度。拇指、食指和中指占手部功能80%，拇指占手部功能60%。

图表：人类的手解剖自由度示意图

图表：人类手指功能

	功能占比	特点
大拇指	40%	负责对握和精细操作
食指	20%	高度灵活，用于指向和精细操作
中值	20%	力量较强，用于支撑和稳定
无名指	10%	辅助握持和协同操作
小拇指	10%	功能最少，主要用于辅助和平衡

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

3 灵巧手需高自由度、精确性、耐用性、感知能力

- 从性能角度看，灵巧手需要满足几方面的性能：运动能力、负载能力、控制能力、感知能力、耐用能力、轻量化等。运动能力主要指标为自由度和运动速度，自由度越高越灵活，目前灵巧手自由度从6-24自由度均有。
- 控制能力看中操作的精度和稳定性，感知能力看中其触觉分辨率、力觉感知等，耐用性看中抓握寿命，另外灵巧手还看中体积和质量，需要做到轻巧，同时材料选择上同样关键。

图表：灵巧手的性能要求

性能	运动能力	负载能力	控制能力	感知能力	其他
衡量指标	1）自由度 2）活动范围 3）运动速度	1）单手最大负载	1）精度 2）稳定性 3）响应速度	1）触觉分辨率 2）力觉精度 3）测量精度 4）泛化性	1）耐用能力 2）轻量化
特点	1）自由度：15自由度以上为高自由度，自由度越高越灵活 2）运动速度：决定效率	1）可抓取和操作物体的最大重量及抵抗外部干扰的能力。 2）目前普遍为15kg	1）精确地控制到目标位置、姿态和力度等的能力 2）操作过程保持稳定性，且根据环境等进行调整	1）可精确感知物体的特征、材质等 2）精确控制施加在物体上的力 3）精确控制灵巧手的运动和姿态 4）对不同物体的适应性	1）抓握寿命，目前水平为100万次 2）手体积和质量要精巧，单手重量目前400-600g

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

ot官网，东吴证券研究所

4 灵巧手由驱动、传动、控制、感知四大大部分构成

- 灵巧手核心为机械设计和结构设计，各家方案不一，可分为结构形式、驱动方式、传动方式、感知方式和材料等多方面。厂商灵巧手设计采用多种融合方式。
- 驱动和传动为最核心设计，按照自由度与驱动源数量关系可以分为直驱和欠驱，绝大部分采用电机驱动（空心杯、无刷有齿槽）。传动方式种类多样，包括腱绳传动、蜗轮蜗杆、连杆、齿轮、微型丝杆等。此外触觉材料决定手部的感知能力，结构形式和使用材料影响体积、质量和寿命等。

图表：灵巧手机械运动、感知系统、材料构成

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

5 多方布局，2025年是灵巧手突破大年

- 随着人形机器人下肢行走、跳跃等性能渐趋成熟，上肢灵巧手重要性开始体现。灵巧手是人形机器人操作性能的核心，决定机器人功能的上限，是具身智能的核心，未来2-3年人形机器人工业场景性能突破，依赖于灵巧手性能提升，而3-5年家庭场景突破依赖灵巧手+大脑。
- 25年密集主机厂和零部件厂发布灵巧手方案，且在未来2年灵巧手方案将快速迭代，投入使用场景中，收集数据，用于加速训练人形机器人手脑协同。

图表：主要厂商2025年灵巧手迭代

类型	公司	2025年灵巧手迭代
本体厂商	特斯拉	25年预计发布Gen-4，在腱绳方案上做改进
	FigureAI	25年Figure03定型，预计灵巧手方案跟随改进
	宇树科技	25年4月首次发布5指灵巧手，自由度20个（16个主动）
	优必选	25Q2发将发布第四代灵巧手，采用连杆方案，6个主动自由度
独立集成商	敖意科技	计划2025年小批量生产第二代灵巧手，将具备触觉传感器。并且在研第三代灵巧手，自由度将达到15个每个手指均有3个。
	灵巧智能	计划25H1发布臂手一体27自由度的DexHand021专业版量产机型
零部件厂	兆威机电	25Q2将发布第二代灵巧手，增加触觉传感器使用
	雷赛智能	25Q2发布DH2015高端型，自由度从11个提升至20个；25Q3发布DH2012通用型，自由度20个，轻量化设计，重量550g

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

Part2 混合机械方案是趋势，兼具高自由度和承载力

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

1 直驱与欠驱：精度与集成度的取舍

- 驱动执行器的数目等于其自由度数目，为直驱。驱动执行器的数目小于其自由度数目，为欠驱，欠驱会形成主动自由度和被动自由度，被动自由度即通过如机械结构（连杆、腱绳等）被动调整。
- 直驱方案，易控制、精度高、刚性高。但由于灵巧手追求高自由度，为提高手部设计的集成度、紧凑性，同时也为降低成本，因此通过降低驱动执行器使用，形成欠驱方案，欠驱方案还具备自适应强、功耗低等优势。
- 直驱方案最大优势在于可高精度人手所有动作，但在当前的驱动和传动方式下，存在体积重量大、成本高和发热等各种问题，因此欠驱方式近2年快速发展。

图表：直驱和欠驱方式

	直驱	欠驱
原理	驱动执行器的数目等于其自由度数目	驱动执行器的数目小于其自由度数目
优点	1）高精度：电机直接驱动关节，无传动损耗，定位精度可达±0.1mm 2）高响应速度：无齿轮/皮带延迟，动态响应时间 < 10ms 3）高刚性：传动链短，刚度 > 100 Nm/rad 4）维护简单：无润滑/磨损部件	1）结构紧凑：6自由度手最低仅需1-3电机 2）自适应强：通过凸轮/腱传动实现形状自适配，抓取不同种物体 3）成本低：减少驱动源 4）低功耗：减少发热
缺点	1）体积重量大：每个自由度需要一个驱动源 2）成本高 3）发热严重：持续负载升温快	1）控制复杂：需要建立多体力学模型 2）精度受限：位置重复性±1-2mm 3）负载能力弱

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

2 驱动方式：电机、气动、液压、智能材料

- **电机驱动综合性能最优，是当前灵巧手的主流驱动方案。**气动系统复杂、控制延迟，液压方式存在泄漏风险且体积较大，智能材料SMS响应速度慢且寿命短，均适合用于特定领域。相较而言，电机驱动虽缺乏柔顺性，存在发热等问题，但精度、响应速度、负载等性能均较高，且技术成熟，适合广泛使用。

图表：各类型驱动方式优缺点

	电机驱动	气动驱动	液压驱动	智能材料
原理	通过电动机（直流、交流、步进或伺服电机）将电能转化为机械能，驱动关节运动。直驱电机省略减速器，直接输出扭矩；伺服电机通过编码器反馈实现闭环控制；步进电机以脉冲信号分步转动。	利用压缩空气驱动气缸或气动肌肉。气动肌肉由橡胶/纤维复合材料制成，充气时径向膨胀、轴向收缩产生拉力，类似生物肌肉收缩。	通过高压油液驱动液压缸活塞运动，采用伺服阀精确调节流量和压力，输出超大推力。	1）形状记忆合金（SMA）：镍钛合金丝通电加热触发相变收缩，冷却后恢复原状，模拟肌肉伸缩。 2）电活性聚合物（EAP）：介电弹性体在千伏级电场下厚度收缩、面积扩展，产生驱动应变。 3）压电陶瓷：逆压电效应下微米级形变，经放大机构输出位移。
优点	1）高精度 2）高响应速度 3）负载范围广 4）技术成熟，可兼容主流人形机器人系统	1）高功率密度 2）环境适应性强 3）本质柔顺	1）极限负载能力 2）抗冲击能力强 3）低速稳定性	1）极致轻量化 2）静音无电磁干扰 3）仿生柔顺性
缺点	1）成本高 2）发热严重 3）抗干扰性差	1）系统复杂性：需空压机、储气罐、减压阀等外围设备 2）控制延迟：气压调节响应时间约50-200ms 3）位置精度低：开环控制下重复定位精度仅±1-5mm	1）油液泄漏风险 2）能耗效率低 3）体积庞大	1）响应速度慢 2）驱动条件苛刻 3）寿命短
代表厂商	特斯拉、因时等绝大部分厂商	德国Festo的ExHand系列气动夹爪 美国Soft Robotics的GR1柔性抓取器	美国Soft Robotics的GR1柔性抓取器 美国Parker Hannifin的H系列液	日本Eamex的SMA驱动仿生手 德国PI公司的压电纳米定位手

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

3 电机驱动：主流方式为空心杯和无刷有齿槽电机

- **灵巧手电机要求体积小、扭矩密度高、精度高、寿命长、响应快：**空心杯电机具备超轻量化设计，最新直径可以到3-4mm，且转速快，能量利用率在75%~90%，高功率密度，适合灵巧手使用，是目前的主流驱动电机。其次，无刷有齿槽电机具备扭矩密度高的优势，且成本低、散热好，特斯拉腱绳方案采用该电机。此外，步进电机少部分厂商少量使用，用于手指和手掌连接处；伺服性能好单体积大，在灵巧手上使用少。

图表：各类型电机优缺点

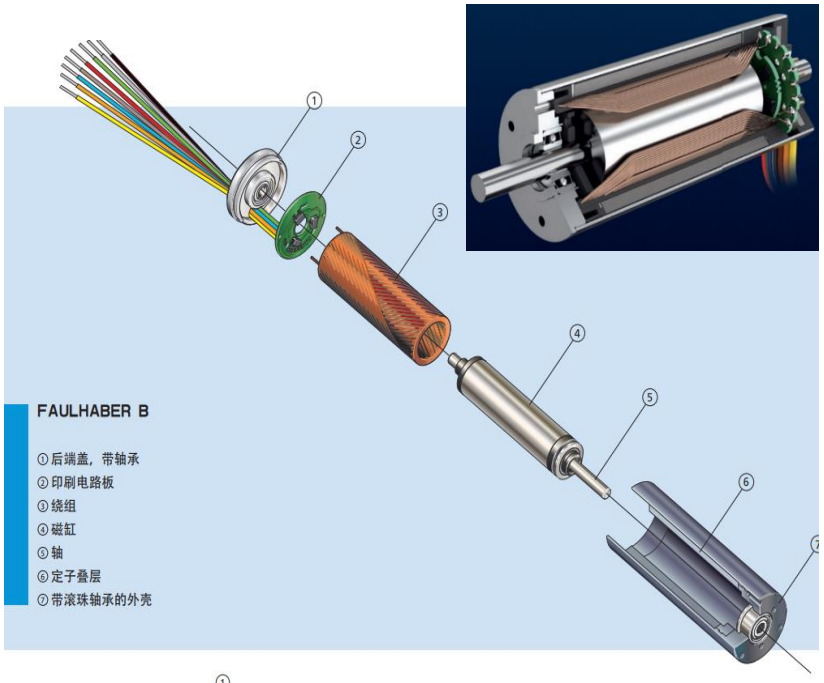
	空心杯电机	无刷有齿槽电机	步进电机	伺服电机
原理	转子采用无铁芯空心杯设计（铜线绕组成杯状），通过电子换向驱动，惯量极低，专为高速响应和轻量化设计。	定子铁芯开槽嵌入绕组，转子永磁体与定子齿槽周期性作用，产生齿槽效应	通过脉冲信号分步转动，开环控制为主，依赖磁阻转矩定位。	闭环控制（编码器反馈）+ 高动态响应电机，通过 PID 算法实时修正误差。
优点	1)超轻量化：直径可小至3-4mm，目前普遍产品为8-10mm 2）响应极快：转速最高＞100,000 rad/s²，适合快速抓取（＜50ms）。 3）无齿槽效应：运动平滑无抖动	1）扭矩密度高：1.5-2.5Nm/kg。 2）成本低：量产工艺成熟，单价200-1000。 3）散热好：铁芯导热快，允许持续负载。	1）低成本：单关节模块200-1000 2）无累积误差：短行程重复精度±0.1mm。 3）结构简单：无需编码器。	1）超高精度：重复定位精度±0.01mm。 2）宽速域调节：0.01-5000rpm无级变速。 3）过载能力强：瞬时扭矩达300% 额定值。
缺点	1)扭矩小：扭矩密度为0.05~0.1Nm/kg 2）散热差：满负载连续工作易发热，需限制空间占比 3）成本高：价格从800-3000元/个不等	1）齿槽效应显著：低速时转矩波动 10%-30%，精度下降至 ±0.1-0.3mm。 2）噪声大：电磁谐波导致工作噪声＞50dB（需隔音处理）。 3）效率损失：铁芯涡流损耗降低能效 5%-10%。	1）易失步：过载或高速时丢步（抓取失败率＞10%）。 2）振动噪声：低速共振明显（需加减速曲线优化）。 3）能效低：保持位置时持续耗电（温升＞30℃）。	1）成本高昂。 2）体积重量大：模块直径常＞30mm。 3）维护复杂：长期使用后齿轮磨损需定期校准。
代表厂商	特斯拉、Figure、因时、兆威、雷赛等	特斯拉	Robotis Dynamixel、兆威部分使用	丰田 T-HR3 人形手

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

4 空心杯电机：无刷空心杯性能优异，更适合灵巧手

- 空心杯关节属于直流永磁伺服微特电机，突破传统直流电机的的结构形式，采用无铁芯转子结构设计。空心杯电机分有刷和无刷两种。有刷空心杯采用机械换向，磁极不动，线圈旋转。无刷空心杯采用电子换向，线圈不动，磁极旋转。
- **无刷空心杯电机更适合用于灵巧手：**无刷空心杯采用电子换向，具有效率高，转矩波动小，使用寿命高，结构精巧，维护方便，易保养的特点。其寿命可达10000h+，好于有刷1000-3000h。

图表：空心杯电机结构爆炸图及实物装配图



图表：空心杯电机性能图

	无刷空心杯	有刷空心杯
驱动方式	电子换向（霍尔传感器/FOC算法）	机械电刷换向
寿命	10000h+	1000-3000h
效率	80%-90%（电子换向损耗低）	40%-50%（电刷摩擦和电弧损耗高）
精度控制	±0.01mm（闭环算法+高分辨率编码器）	±0.1mm（开环控制，以来电压调节）
响应速度	0.1-10ms（高频FOC算法）	10-50ms（机械换向延迟）
扭矩密度	0.1-0.3Nm/kg	0.05-0.15Nm/kg
价格	1000元左右	低至百元

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

4 空心杯电机：核心壁垒在线圈绕组设计和高精度设备

- **产品壁垒一：空心杯线圈绕组成型工艺难，批量后良率难保障。**海外厂商多采用一次成型空心杯绕线技术，龙头厂商绕线设备自研，且绕组设计专利壁垒深厚（通常空心杯电机有集中式、分布式叠绕组等多种绕组形式，龙头企业会设置绕组设计专利门槛）。国内厂商通常采用人工绕线或卷绕式工艺（半自动化），生产效率和线圈质量落后国外。
- **产品壁垒二：高速转动的零部件精密制造要求高。**空心杯电机直径通常在13mm及以下（针对人形机器人应用），且通常以几万-10万转每分钟的高速运动（常规电机通常几千转/min）、各机械件公差配合难度高，考验精密制造能力，通常会采用日本、德国等地进口的机床进行精加工。

图表：线圈绕制结构较为多元化

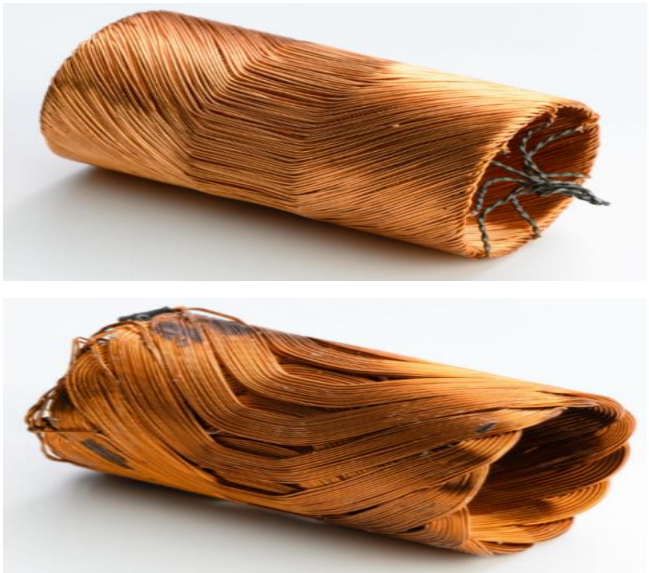
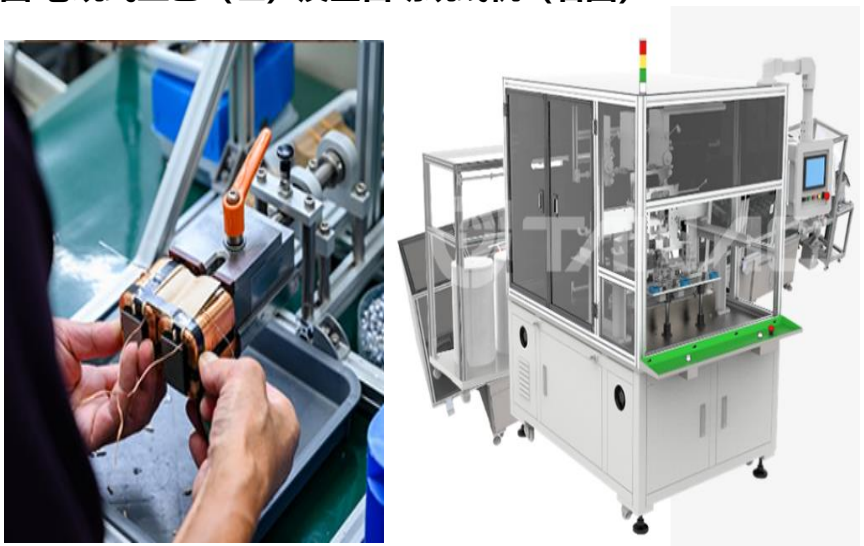


图 卷绕式工艺（左）及全自动绕线机（右图）



更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

4 空心杯电机：海外厂商性能领先，国内逐步突破

- 空心杯电机目前主要应用领域为医疗、物流、工业自动化、航天航空、机器人等。瑞士Maxon和Portescap、德国Faulhaber、美国AlliedMotion、日本NidecCopal占据主要份额。同时国内厂商在空心杯领域技术逐步突破，开始在人形领域拓展。
- 国内鸣志电器空心杯技术领先，同时雷赛智能、兆威等产品已成熟，已推出直径6-8mm产品，用于自研灵巧手上，且开始外供部分客户。

图表：空心杯电机厂商

	产品性能	客户进展
Maxon	ECX 10 Ultra 系列引入石墨烯散热涂层，持续负载温降 15%，寿命延长至 35,000 小时（2024 年 Q1 上市）	已供货特斯拉、波士顿动力
Faulhaber	0615CR 系列（无刷空心杯 + 碳纤维外壳），重量减轻 30%，扭矩密度 0.45 Nm/kg，适配太空机械臂（欧洲火星采样返回任务）	
鸣志电器	2023 年推出新一代 MCL-8Pro 无刷空心杯电机，直径 8mm，扭矩密度提升至 0.35 Nm/kg（上一代 0.25 Nm/kg），寿命达 25,000 小时（通过优化磁路设计和轴承材料）。	与大疆合作、送样北美大客户
雷赛智能	电机采用马鞍型全自动绕线技术，对标全球最优技术水平。无刷空心杯EC系列标准型性价比较高，直径12mm-40mm；ECH系列主打超高转速，直径8mm-22mm，额定转速20000rpm-62000rpm，空载转速28000rpm-65000rpm；ECT系列转矩大幅提升至43.8mNm-92.7mNm，直径6mm-30mm	已发布多个类型灵巧手
兆威机电	MC无刷空心杯系列直径有6、8、10、12mm；扭矩 0.4mNm - 2.38mNm，随着电机尺寸增大相应增加；6mm产品转速可达46800±10%rpm；滚珠轴承和端子型号可定制；正在开发4mm产品	空心杯+齿轮模组已供货Figure，此外和华为云等有合作
伟创电气	空心杯直径10mm，额定转速28170rpm，转矩2.4-10.88mNm; 正在开发8mm产品	已与开普勒合作
江苏雷利	.DC-4N 无刷微型电机（直径 4mm，全球最小国产型号），重量仅 1.8g，扭矩 0.02Nm，目标替代 Namiki 产品。	与小米、埃夫特等合作

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

5 无刷有齿槽电机：高扭矩密度，需AI算法减少齿槽效应

- 无刷有齿槽电机已成熟广泛应用于家电、汽车、工业自动和消费电子领域。其原理是定子由带有齿槽的铁芯和嵌入槽内的绕组构成，转子由永磁体组成，控制器通过霍尔传感器或反电动势检测转子位置，动态切换绕组电流方向，实现无机械电刷的连续运转。
- 无刷有齿槽电机具备高扭矩密度（适合较大抓握力）、散热好、成本低（200-500元/个）、寿命长的优势，但其低速转动时产生齿槽效应，影响精度，同时体积大、噪音大。因此用于灵巧手，需要通过斜槽设计或补偿算法提高精度，同时采用复合轻量化材料和模块化集成设计减小体积，另外还需提高响应速度。
- 北美某公司第二代灵巧手采用无刷有齿槽电机，将电机集成于手臂（空间大），国内鸣志、兆威等均有送样对接。

图表：无刷有齿槽电机特点

项目	特点
工作原理	定子由带有齿槽的铁芯和嵌入槽内的绕组构成，通过通电产生旋转磁场；转子由永磁体组成，磁场与定子磁场相互作用驱动旋转。控制器通过霍尔传感器或反电动势检测转子位置，动态切换绕组电流方向，实现无机械电刷的连续运转。
优点	1）齿槽结构增强了磁场强度，提高扭矩密度，适合需要较大抓握力的场景（如抓取1-5kg物体） 2）散热性能：铁芯导热快，适合长时间运行（工业级温升＜40℃） 3）成本优势：制造工艺成熟，量产成本低于无齿槽电机（低30%-50%）。 4）长寿命：无机械磨损，寿命达1w-5w小时，维护简单，无需更换电刷 5）高效率：无电刷摩擦损耗，效率可达85%-95%（传统有刷电机约75%）
缺点	1）齿槽效应：低速时转矩波动（5%-15%额定扭矩），影响精度（±0.1-0.3mm）。 2）重量较大：铁芯导致体积和重量增加（直径＞10mm，限制微型化）。 3）噪音与振动：电磁谐波引发机械振动（噪音＞50dB），需额外隔音设计。
技术进步	1）齿槽效应抑制：斜槽/斜极设计；磁场优化算法，基于FOC（磁场定向控制）的前馈补偿。 2）轻量化与集成：使用高导磁复合材料，如碳纤维定子骨架（实验阶段，减重30%）；模块化设计，如集成减速器+编码器。 3）智能控制：AI实时补偿，如动态转矩补偿算法。高精度编码，如17位磁编码器（重复定位精度±0.02mm）。 4）动态相应：相应时间<5ms，传统为10-50ms
下游应用	1）家电：空调风机、洗衣机电机；2）汽车：驱动电机；3）工业：机械臂、泵、压缩机；4）消费电子：电脑风扇、无人机旋翼
厂商	日本Nid…

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

传动：行星减速器+滚珠丝杆是主流

东吴证券 SOOCHOW SECURITIES

1 传动方案的类型多样，各有优劣势

- 传动系统是将电机的运动转化为手指关节运动的机构，要求微型化、高扭矩密度、长寿命、抗冲击力强。常见的传动方式包括丝杆、齿轮、连杆、腱绳、蜗轮蜗杆等。其中齿轮用于旋转运动；丝杆、蜗轮蜗杆用于直线运动；连杆和腱绳为用于联动。各类传动方式各有优缺点，**综合性能是齿轮+丝杆商业化进度更快，产业方向是混合传动、AI驱动设计**（根据灵巧手实际操作，实时动态补偿控制）。

图表：各类灵巧手传动方式特点

类型	齿轮	丝杆	连杆	腱绳	蜗轮蜗杆
原理	通过齿轮组传递动力，放大或减速扭矩	通过电机驱动丝杆旋转，螺母沿丝杆轴向移动，将旋转运动转换为直线运动，再通过连杆或铰链驱动关节弯曲。	通过刚性连杆和铰链将电机运动传递至关节	模仿生物肌腱，通过电机收紧或放松绳索驱动关节弯曲。减速比和自锁	
类型	行星齿轮、谐波齿轮	滚珠丝杆、滚柱丝杆、滑动丝杆		钢丝绳、高分子材料绳	
优势	1）高效率：传动效率90%-98%。 2）高扭矩密度：谐波齿轮扭矩放大比可达100:1。 3）紧凑结构	1）高精度：微米级定位（±0.01mm）。 2）高负载：推力可达数百牛（如工业夹爪）。 3）自锁性：断电后保持位置（无需持续耗电）。	1）结构简单：无滑动摩擦，可靠性高。 2）运动轨迹可控：通过几何设计实现复杂动作。 3）高刚性：适合高速、高冲击场景。	1）高灵活性，多自由度协同控制。 2）轻量化，无刚性传动部件，重量减轻30%-50%。 3）柔顺性，天然缓冲，适合抓取脆弱物体。	1）自锁性 2）高减速比 3）低噪音
缺点	1）齿轮间隙导致回差 2）噪声大	1）速度慢 2）体积大 3）摩擦损耗大	1）自由度受限 2）体积较大，难以微型化 3）动作响应慢	1）绳索磨损快，寿命较短 2）控制复杂（需张力传感器） 3）负载能力弱（通常＜5kg）	1）效率低（30-50%） 2）发热严重 3）体积大
精度	高	极高	中	中	低
负载	极高	高	中	低	中
响应速度	中	中	低	快	低
寿命	长（需维护）	长（2wh）	极长	短	中（5k h）
成本	行星减速器价格<100元/个 谐波减速器价格500-2000元/个	滚珠丝杆价格<200元/个 滚柱丝杆价格>2000元/个	价格<100元/个		
技术方向	轻量化、免				集成散热

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

2 齿轮传动：旋转运动，行星适用高负载，谐波适用高精度

- 齿轮传动包括行星减速器、谐波减速器、斜齿轮、直齿轮。目前行星性价比高，生产厂商众多，应用更广泛。谐波减速器较行星减速器，具备高减速比、高精度、体积小的优点，适合用于高精度灵巧手，但目前微型谐波价格高，单个1k元以上，小尺寸制造难度大；行星减速器具备高扭矩容量，更适合用于高负载灵巧手，且寿命时间长，部分厂商开发出10万h寿命产品，直径可小至4mm，常用的为6-10mm。直齿轮、斜齿轮精度较低，适合用于低端领域，灵巧手使用较少。

图表：各类齿轮传动特点

类型	行星减速器	谐波减速器	直齿轮	斜齿轮
减速比	3:1-100:1（多级可达更高，但体积变大）	50:1-160:1（单级）	1:1-10:1（单级）	1:1-20:1（单级）
传动精度	背隙 1-5 arcmin（中高精度）	背隙 0-1 arcmin（零回差）	背隙 5-15 arcmin（低精度）	背隙 3-10 arcmin（中低精度）
扭矩密度	高（50-200 Nm）	中（10-50 Nm）	低（5-30 Nm）	中（20-80 Nm）
寿命	长（10,000-20,000h）	中（8,000-15,000h）	长（15,000-30,000h）	长（15,000-25,000h）
体积	小，微型直径4-12mm	小但难度大，最小可6mm	小	中
噪音	中（50-60dB）	低（40-50dB，柔轮弹性缓冲）	高（60-70dB）	中（50-60dB）
效率	90%-97%	70%-90%	95%-98%	90%-95%
成本	中	高	低	中低
抗冲击性	强（多齿啮合分摊负载）	弱（柔轮易疲劳）	强（刚性结构）	中（齿面倾斜抗冲击略优）
应用	高负载灵巧手	高精度灵巧手	低成本项目	家电、轻型机械臂

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

3 丝杆传动：直线运动，滚珠是主流，滚柱适用于高负载场景

- 丝杆传动优势在于精度高、自锁性和较高负载，主要分为滚珠丝杆、滚柱丝杆和滑动丝杆。滚珠丝杆精度高、结构紧凑、速度快，直径4-6mm，大规模量产后售价50-300元/个，在高精度灵巧手中更适合使用。滚柱丝杆优势在于负载能力极高，但目前微型化较难，最小5.5mm，且价格贵，尚未大规模使用。滑动丝杆精度低、传动效率低，但是成本低，适合用于低端领域。

图表：各类丝杆传动特点

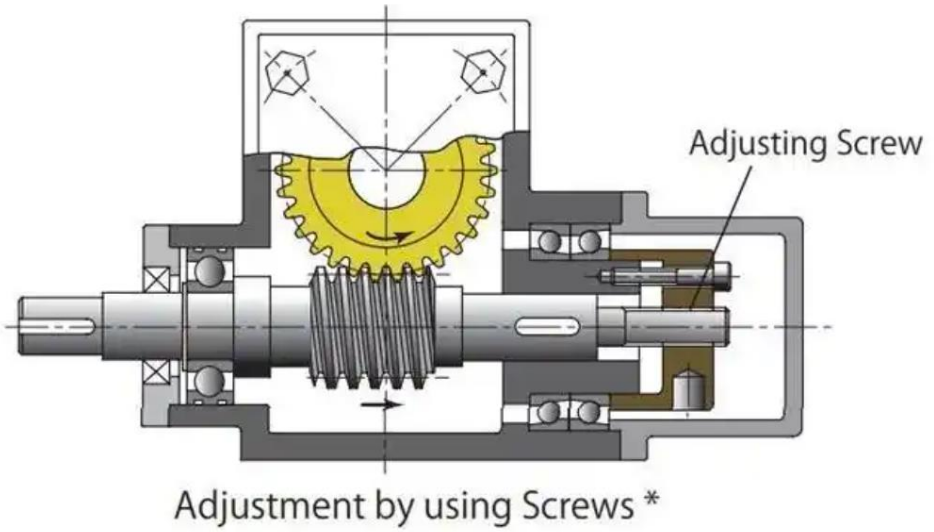
类型	滚珠丝杆	滚柱丝杆	滑动丝杆
原理	通过滚珠在丝杆与螺母间循环滚动，将旋转运动转化为之直线运动	通过滚柱（螺纹滚子）与丝杆啮合传动，接触面积大，承载力更高	通过螺纹副直接滑动摩擦传动，结构简单
精度	±0.01mm（高精度研磨）	±0.02mm	±0.1-0.5mm
负载能力	中高（动态负载50-500N）	极高（动态负载500-5000N）	低（动态负载10-1001N）
速度	快（线速度可达1-2m/s）	中（线速度0.5-1m/s）	慢（线速度<0.5m/s）
体积	紧凑，直径4-20mm	难度大，最小螺母直径5.5mm	小，直径5-30mm
噪音	低	中	高
效率	90-95%	85-90%	30-50%
成本	低端50-300元，高端1k-2k	1k-10k	低端<50元，高端<200元
寿命	2-5万h	5-10万h	0.5-1万h
应用	高精度灵巧手	高负载灵巧手	低端领域

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

4 蜗轮蜗杆：旋转运动方向转换，性能上限低，适用于低速领域

- 蜗轮蜗杆包括圆柱蜗杆传动和平面二次包络蜗杆，后者是面蜗杆与蜗轮双曲面啮合，接触面积增大50%，传动比、效率和刚性都大幅提升。
- 蜗轮蜗杆在灵巧手中作用类似于丝杆，丝杆将旋转运动转为直线，蜗轮蜗杆将实现旋转运动方向变换（通常为90度），蜗轮蜗杆也可满足齿轮的部分功能，但灵巧手中一般搭配减速器使用。蜗轮蜗杆具备低成本（较谐波价格低50%）、高传动比（单级可到50:1-100:1，好于行星减速器）、且自锁功能，但效率低（60%）、响应速度慢（>10ms）、易磨损需经常替换。
- 因此蜗轮蜗杆更适合用于低速高负载的工业场景，或追求低成本动态不敏感的领域。

图表：蜗轮蜗杆示意图



图表：蜗轮蜗杆优劣势

优势	劣势
单级可高达50:1~100:1（行星齿轮需多级串联）	滑动摩擦为主（典型效率60-75%），谐波/行星齿轮可达85-95%，电机功耗增加30%，导致手部发热
可反向自锁，当摩擦角 > 导程角时自锁（无需额外制动器），可防止外力导致关节位移（如抓握时物体重量不会使手指回弹）	青铜蜗轮每10万次循环磨损0.1-0.3mm（精密研磨蜗杆同步损耗），需频繁更换蜗轮
面接触啮合比齿轮线接触承载力高30% ，抗冲击负载强	蜗杆轴向力≈2×圆周力（需加强轴承支撑），导致手机关节厚度增加
比同精度谐波减速器便宜50%	

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

，知乎，东吴证券研究所

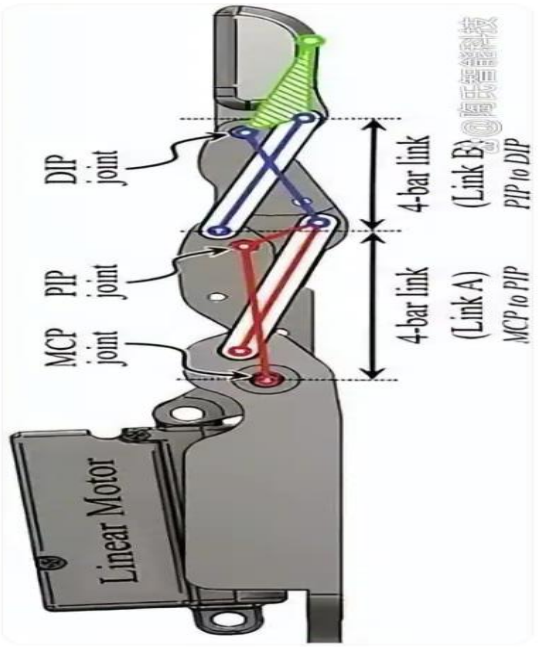
5 连杆传动：灵活度受限，可混合使用提高被动自由度

- 连杆传动是由刚性连杆和驱动源（电机）构成闭环运动链，分为单自由度连杆传动和多级连杆联动。单一连杆驱动单关节运动主要用于工业夹爪，灵活度受限；多级连杆联动，通过串联或并联多组连杆实现多关节协同运动，用于灵巧手3关节联动。
- 连杆传动优势在于刚度高，适合高负载能力场景，但连杆方案自由度受限、不够灵活，且重量大、响应慢。因此连杆传动在灵巧手上通常配合齿轮、丝杆传动使用，用于增加被动自由度。

图表：连杆传动系统的分类和特点

	单自由度连杆	多级联动连杆
负载能力	5-30N	3-15N
控制精度	±0.5mm	±0.2mm
响应速度	50-100ms	100-200ms
自由度	1-2个	3-4个
应用	工业夹爪	灵巧手

图表：连杆传动示意图



更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

6 腱绳传动：最具灵活性，但维护成本高，仍需新的材料开发

- 通过电机收紧或放松绳索驱动关节弯曲，模仿生物肌腱，最大的优势在于灵活性，可大幅提高自由度。但最大问题在于腱绳长期使用易蠕变，需频繁校准预紧力，维护成本高，且平均寿命低，粉尘、高温等加剧损耗，同时布线难度大、算法要求高。
- 腱绳材料，包括金属类材料（304不锈钢丝绳、钛合金丝绳等）和高分子材料（超高分子量聚乙烯、芳纶纤维、PBO等）。高分子材料重量轻、可弯曲，金属腱绳负载高、寿命长，各有优劣势。普通腱绳成本低，按照20个自由度，考虑冗余设计，单手用量预计为5m，对应单手价值量<500元。但腱绳日常维护成本高，实时预紧力校准、替换绳索等。

图表：腱绳传动优劣势

	优势	劣势	技术基本方向
灵活性	自由度高达20个+	腱绳耦合导致运动干扰	1）力传感器+算法校准，提高精度 2）开发新型材料，提高寿命，降低蠕变 3）集成化、热管理
负载		理论5-10N	
精度		易蠕变导致精度下降	
响应速度		存在延迟	
成本	初始成本低	维持成本高（日常校准+寿命短需更换）	

图表：各类腱绳材料对比

	直径 mm	抗拉强度 Mpa	伸长率 %	疲劳寿命（万次）	价格（元/米）
304不锈钢丝绳	0.1-0.5	1500-1800	<1	50-100	5-15
钛合金丝绳	0.08-0.3	1200-1500	0.5-1	200+	80-150
超高分子量聚乙烯	0.2-0.6	2700-3500	2-3	10-20	30-60
芳纶纤维	0.3-0.8	2800-3200	1.5-2.5	5-8	40-80
PBO	0.1-0.4	5800-6200	1.8-2.2	3-5	200-600

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

机械方案总结：混合方案或为趋势

东吴证券 SOOCHOW SECURITIES

1 驱动方案基本定型，传动多样性，混合为趋势

- 驱动方案看，若电机需集成于手内部，基本选用空心杯，部分用步进电机；腱绳方案，电机可集成于手臂，空间大，可选无刷有齿槽电机。传动方案看，齿轮满足运动减速和扭矩放大，丝杆/蜗轮蜗杆负责运动方向变化，可形成直驱方案。连杆和腱绳是用于连接驱动与关节，用于增加自由度。
- 短期，空心杯电机+行星减速器+滚珠丝杆+连杆方案，自由度、承载力、成本等可满足当前工业场景需求，最先放量。中长期趋势是高自由度+负载力，因此机械设计可用融合方案，如近掌关节采用刚性更高的减速器+丝杆、手指末端关节采用腱绳等。

图表：灵巧手机械驱动和传动方案总结

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

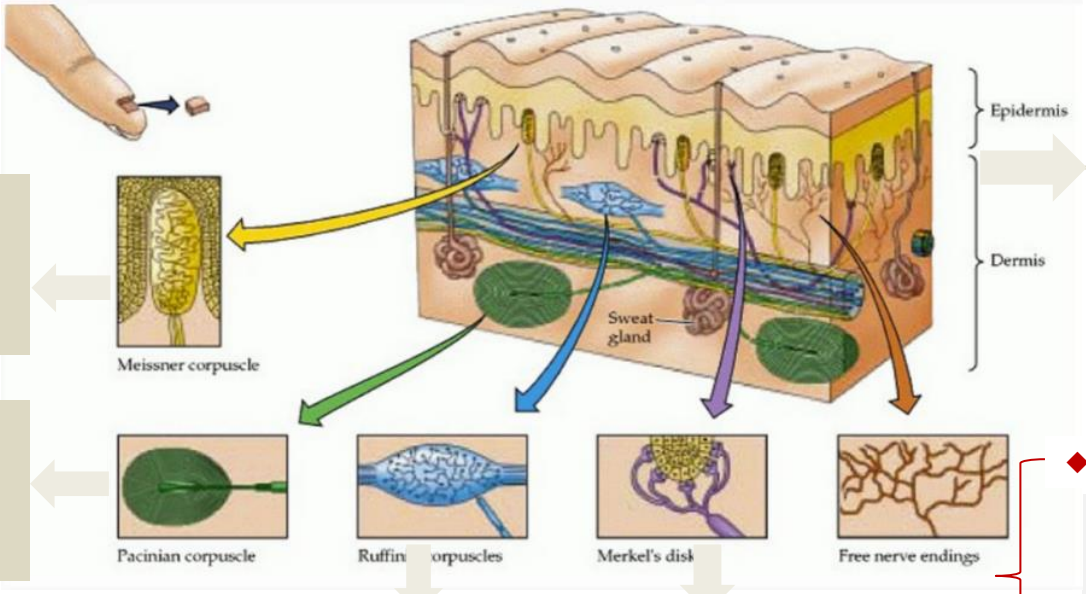
Part3 手部多为感知是方向，促进手脑协同

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

1 人类手部触觉：多维度感知，高灵敏度，高拉伸率

- 人类实际的触觉感知，来自四种机械感受器的皮肤输入，包括迈斯纳小体、帕西尼亚小体、默克尔椎间盘、鲁菲尼小体，其将机械能转为电脉冲，统称为低阈值（高灵敏度）。四种感受器分布于皮肤的浅深层，测量频率低高不同，其中鲁菲尼小体负责动觉/本体感觉，对切向力感知明显。
- **人类手部触觉可感知力觉、温觉、痛觉等多维度感知，且手部灵敏度极高，女性指尖法向压力阈值为0.019g，同时拉伸率高，手腕处皮肤拉伸率超20%，且是三维全向柔性。**

图：人类皮肤触觉感知原理



1.迈斯纳小体
- 占手部感觉神经40%
- 对传递低频振动信息特别敏感

2.帕西尼亚小体
- 允许在高频下的瞬时干扰来激活神经末梢
- 较低的响应阈值，可辨别精细表面纹理物体

4.鲁菲尼小体
- 对手指或肢体运动引起的皮肤**拉伸特别敏感**
- 负责动觉/本体感觉

3.默克尔椎间盘
- 在形状、边缘和粗糙纹理的静态辨别中起着主要作用

力觉/本体感觉
- 低阈值机械感受器
- 拉伸程度

温觉

痛觉

◆ 高灵敏度

	手掌法向压力阈值	指尖法向压力阈值
男性	0.158g	0.055g
女性	0.032g	0.019g

◆ 高拉伸率
- 手腕处拉伸率20.4%
- 三维全向柔性

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

2 机器人触觉方案：多路线布局，寻找性能最优

- **触觉是电子皮肤的功能之一：**电子皮肤是集合“触觉+仿生性+延展性” 的类人类皮肤，仍需长期技术进步。而人形机器人触觉触感器，是电子皮肤性能之一，更倾向于感知物理变化（力、温度等）。
- **触觉传感器多技术路线布局，追求极致性能，实现真正灵巧手：**两类型，一是基于Mems技术集成的触觉传感器，包括压阻式、电容式、光电式、电磁式，其中压阻式技术成熟，目前应用最广；二是视触觉传感器，随着算法及数据模拟，未来潜力巨大。触觉传感器追求，**高灵敏度（多维力感知）、高集成度（单位面积列阵单元多）、高延展性、成本低**，以便获取物体信息，提升灵巧手抓取的力和力矩的控制效果。

图：触觉传感器方案对比

触觉传感器： 1.感应压力、温度、物质变化；2.柔性与延展性

电子皮肤

类别	技术类型	原理	优点	缺点	代表厂商
Mems技术集成	压阻式	单晶硅材料电阻值改变-电压改变	技术成熟，体积小，成本低	柔性差，灵敏度不足（10g）	国内大部分厂商
	电容式	板间距离改变-电容值改变-电压改变	柔性好，灵敏度高（阈值可达1g）	抗干扰差	
	光电式	光源和光强传感器的距离改变-光强值发生改变	灵敏度高（阈值0.5-1g），有一定抗干扰能力	体积大	澳大利亚Contactile
	电磁式	永磁铁和磁传感器的距离改变-磁场强度发生改变	灵敏度价格（阈值1g），成本低	体积大，抗干扰差	日本Robotics的Uskin
视触觉	嵌入式相机	利用微型双目相机的视觉成像技术+深度学习的数据处理方法，去增加触觉信息的测量维度	性能上限高，物料成本低	对算法、数据训练要求高	美国Gelsight

自我修复 一些电子皮肤材料拥有自我修复功能

生物兼容性 痛觉等，与人体组织相容，可用于医疗监测和治疗

发展方向

- 高集成度
- 高灵敏度
- 多维力感知
- 高延展性
- 成本低

应用

- 高空间分辨率触觉阵列（手部或指尖）
- 大面积触觉传感器（大腿、手臂等）

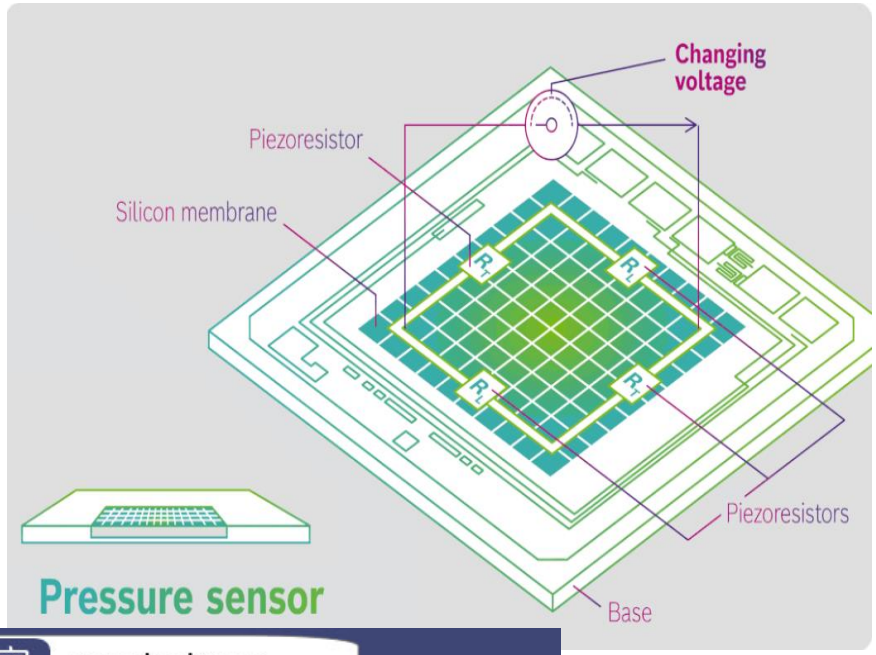
更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

3 MEMS压阻式触觉传感器：技术成熟，低端最先放量

- **MEMS压阻式触觉传感器技术最成熟，目前应用最广，预计短期是机器人触觉传感器最先放量技术。**其原理和应变片类似，但不同的是其敏感元件为半导体（单晶硅），当受到外力挤压时，相应电阻率产生变化，从而测量压力值。其采用MEMS技术排列密集，集成度高，体积小，技术成熟，成本低。制造精度不同，价格从几十至上千不等，进口产品单点售价近千元。
- **MEMS压阻式触觉传感器仍需提升灵敏度、增加软性。**目前压阻式的触觉传感器主流是一维传感器，只能测试法向力，测试灵敏度不足（有效阈值0.1N左右），而三维传感器存在力解耦精度不足；同时，单晶硅和pcb板缺乏柔性，适合列阵式布局，不适合应用于大面积柔性应用，适合在指尖应用。

图：MEMS压阻式触觉传感器成品图

图：MEMS压阻式传感器工作图

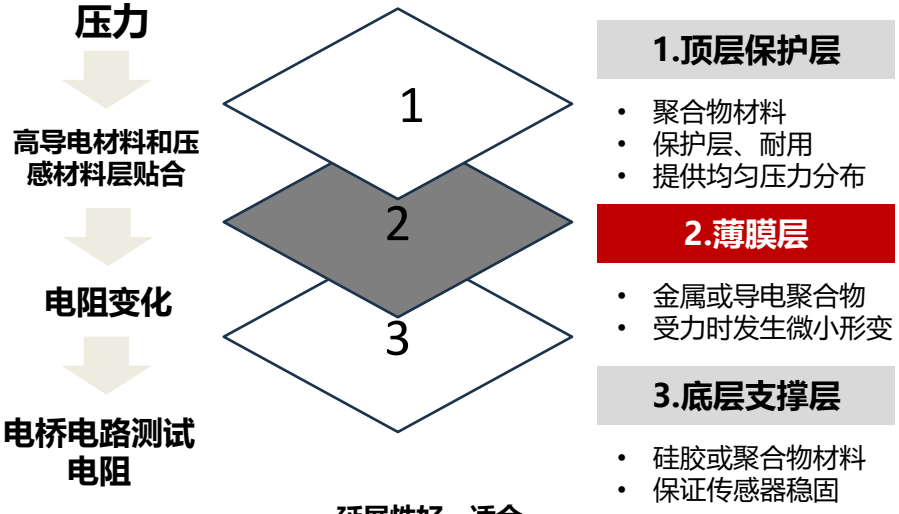


更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

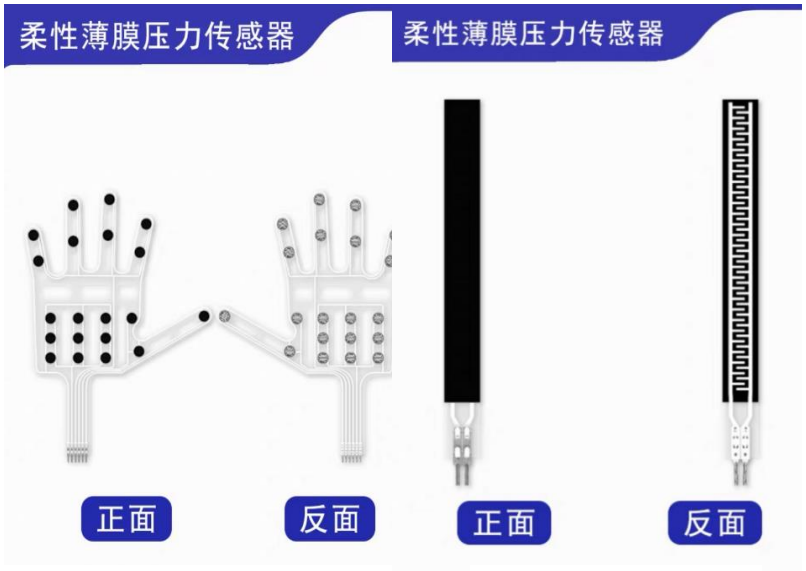
4 柔性压阻式传感器：已成熟应用，但灵敏度仍待提高

- **柔性压阻式传感器原理简单，聚合物材料柔性好：**有三层构成，顶层保护层和底层支撑层，基本由聚合物材料构成（如PET），顶层要求耐用、受力均匀；中间层弹性体聚合物（如聚氨酯等）和导电材料（如碳纳米管）构成的复合材料，弹性层可提供良好形变。原理为当顶层受到压力，薄膜层形变导致电阻变化，四通电路桥渐层监测电阻变化，标定压力，优点在于柔性好、工艺简单成熟，成本低。
- **薄膜式压力传力传感器已经成熟应用，但技术指标难以满足人形机器人灵巧手需求：**薄膜压阻式传感器已在智能可穿戴上成熟应用，售价低，但由于力感知不丰富，一般为一维，同时顶层保护层使用寿命短（多次触摸后灵敏度下降），负载差，因此并不适合用于灵巧手，但适合用于身体大面积皮肤，提供防撞功能。

图：柔性压阻式传感器工作原理



图：柔性薄膜压力传感器产品

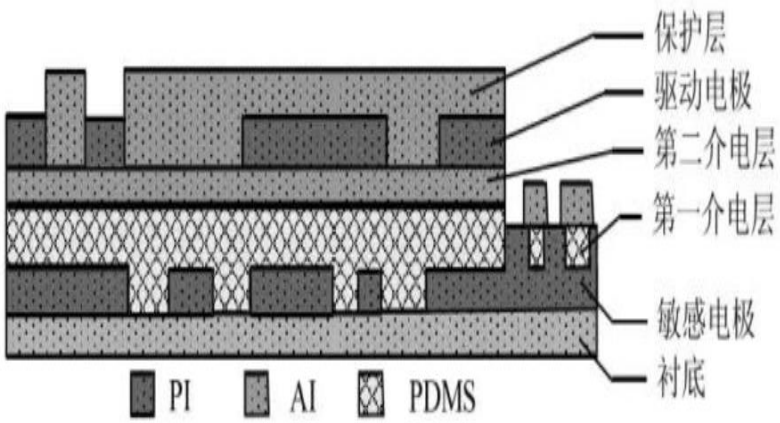


更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

5 MEMS电容式触觉传感器：技术成熟，但抗干扰差

- **电容式传感器备良好的柔性，已在消费领域广泛使用。**由电介质层和电极层组成，是基于有机场效应晶体管(OFETs)的微传感器，OFETs的优势在于除去电极之外，理论上所有部件都可以由柔性材料所制成。在施加外力时，电容上下极板间间距和上下极板正对面积会发生变化，造成相应电容值的改变，从而转为压力变化。
- **电容式触觉传感器具备柔性、灵敏度高优势，已有机器人使用，但抗干扰能力差。**可非接触测量且力灵敏度高（一般有效阈值0.01N），动态响应好；具备柔性适合大面积使用；结构简单、温度稳定性好。但电容式触觉传感器抗干扰差，寄生电容影响较大，需添加有源屏蔽装置，但不适合于人型机器人灵巧手；另一方面，电容式传感器对于切向力测量需大量数据解耦，多维力测量不够直观；第三，输出阻抗高，负载能力差。目前在iit机器人iclub上已有应用。价售价单个几十至上千不等，进口价格高。

图：MEMS电容式触觉传感器工艺图



图：MEMS电容式传感器成品图

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

6 MEMS电磁式触觉传感器：性能较好，但抗干扰差

- **电磁式触觉传感器需永磁体+霍尔式传感器+柔性皮肤：**通过MEMS技术集成永磁体于柔性皮肤内壁，同时集成霍尔式传感器（霍尔元件(半导体材质)+4根引线），当柔性皮肤受到外界挤压时，永磁体与霍尔式传感器之间的距离发生变化，导致磁场强度变化，从而监测压力变化。
- **电磁式触觉传感器灵敏度高、力感知多维、成本可控，但其集成度低，抗干扰力差，海外已量产应用于机器人上：**和电容式类似，力感知灵敏度较高(一般有效阈值能达0.01N)，可测量切向力（但是较难直接精准测量），且技术成熟，成本低；但其抗干扰差，集成度相对较低。日本XELA Robotics公司开发了uSkin已经成熟集成至韩国AllegroHand。2021年Facebook与卡内基梅隆大学合作开发的reskin（嵌入了磁性颗粒的可变形弹性体）也是利用磁感应原理。

图：电磁式触觉传感器工艺图

- 每个手指包括64个三轴触觉传感器
- 每个模块仅需要

图：Uskin典型产品参数

4×4传感器模组参数表

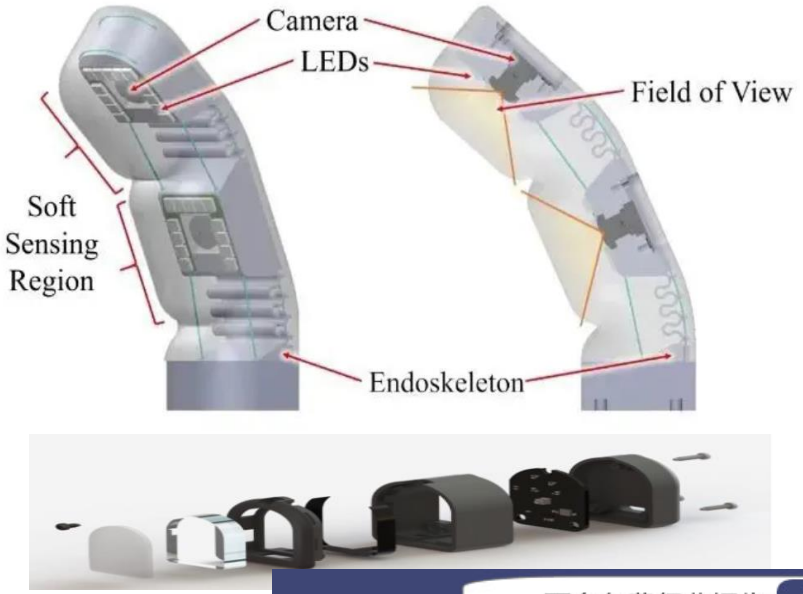
项目	描述
传感器数量	每个模组16个传感器
可测量的轴	独立测量3个轴（X,Y,Z）
数据接口	I2C，附加控制板后支持CAN总线
测量频率	最高250Hz
表面性质	柔软的胶带
单个传感器尺寸	4.7×4.7mm，5.5mm厚
磁滞	4.6%（在中心点施加1800gf（17.65N））
SNR@50Hz	72dB（1800gf（17.65N））
最大切向力	430gf（4.22N）
最大法向力	1800gf（17.65N）
切向分辨率@50Hz	0.1gf（0.0098N）
法向分辨率@50Hz	1gf（0.098N）
漂移补偿	每个3轴传感器含有一个温度传感器用于漂移补偿

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

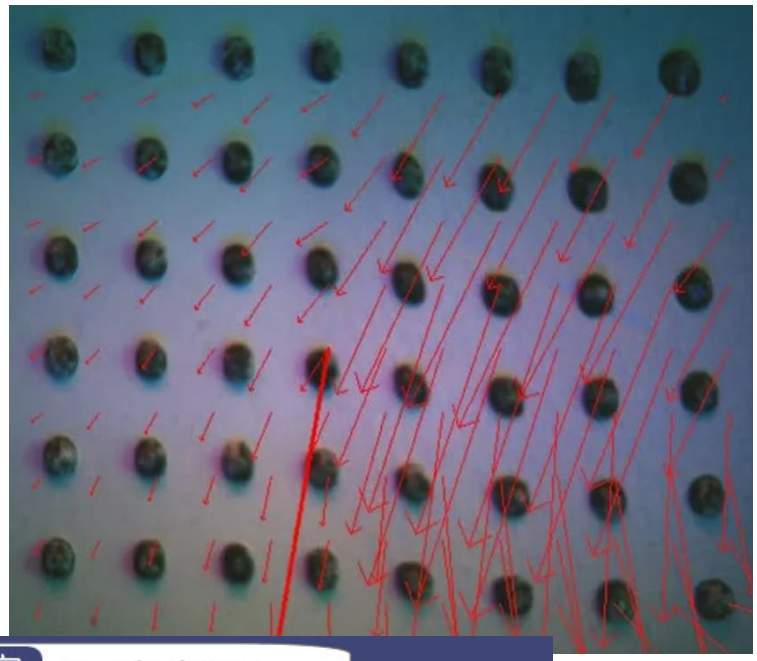
7 视触觉传感器：产业前沿，性能上限高，未来潜力大

- **视触觉传感器本质是视觉+深度学习的数据大模型，建立视觉到触觉信息的映射，该技术理论性能上限高、且材料成本低：**该技术方案，第一步是使用高精度相机拍摄可变柔性材料的形变（Gelsight是用凝胶材料），当受力时，网格形状发生形变，MEMS技术集成的微型双目相机记录该形变，再基于已训练好的深度学习大模型，映射出物体的深度信息和运动趋势。
- 该技术，理论上能够测量各种方向及不同分布位置的力信息，适用性广，在切向摩擦力与滑移等特性上的测量上限也更高，精确度高；同时该方案原材料成本可控，包括凝胶头、微型双目相机（Facebook预测生产1000张的digit每件成本为15美元）。

图：视触觉传感器成品图



图：视触觉传感器柔性材料光流图

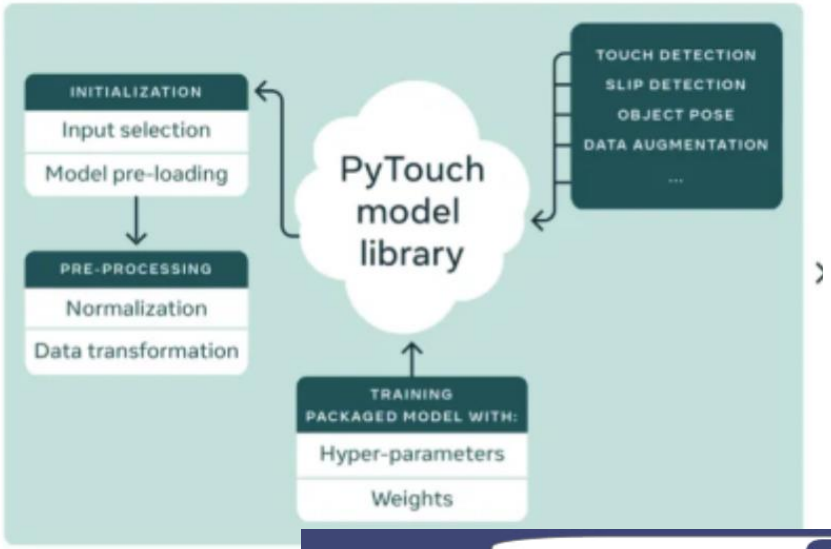


更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

8 视触觉传感器：依赖大模型，科技企业已有布局

- **美国Facebook已产业化该技术、国内智元机器也将自研和使用该技术。** 美国SynTouch也采用视触觉路线，在机器人触觉规模全球第五；Facebook2020年产业化MIT的技术Gelsight，推出Digit视触觉产品，该产品技术开源，性能上结构紧凑、耐用、原材料成本低（电路板$1.5+电子元件$8+塑料$2+凝胶$3）。国内智元机器人明确将在手部上使用基于视觉的触觉方案。
- **视触觉方案依赖大模型，数据积累难，训练成本高：**如Facebook提供Dight高分辨率触觉传感器+Tacto模拟器+PyTouch模型和功能库。Tacto是基于视觉的高分辨率触觉传感器模拟器，可用于机器人技术的原型设计、调试和基准测试，而无需真实实验。其次PyTouch的触觉感应ML模型和功能库可以将原始传感器读数转换为高级属性，如滑动、物体姿态等。Tacto模拟器与PyTouch功能库结合，更好训练Dight性能。

图：DIGIT的训练模型



图：Facebook的Digit性能对比

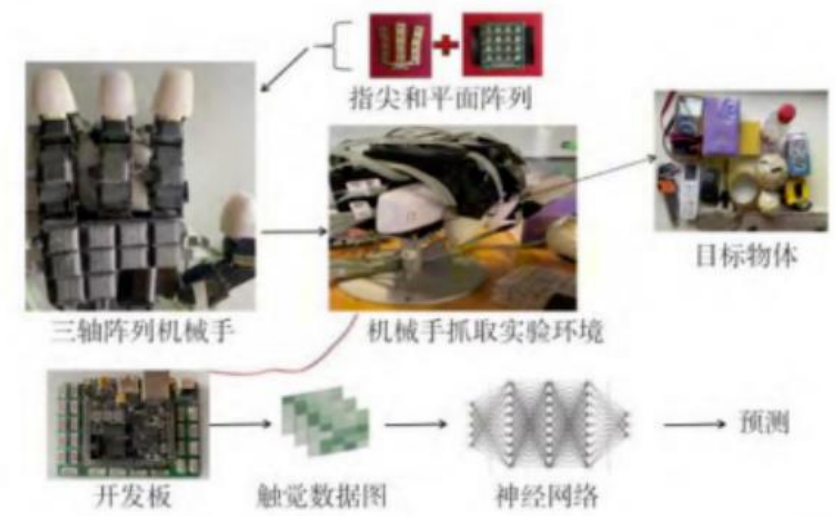
	DIGIT(Ours)	Fingertip GeiSight[11]	GelSlim[12]
Size[mm]	20x27x18	35x60x35	50x205x20
Weight[g]	20	NA	NA
Sensing field [mm]	19x16	18x14	30x40
Image Resolution	640x480	1920x1080	640x480
Image FPS	60	30	60
Cost components	15*	~30	NA

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

9 触觉传感器趋势：多触点高精度，工艺与算法并重

- **多维高精度触觉传感器大批量生产壁垒较高，从材料的选择到生产制造中工艺的把控。**1）柔性材料需满足耐用性和高分辨率，以此满足机器人对物体形变的精确感知，可使用PDMS、PET、PI、PVDF 等聚合物材料，且通过结构优化设计。2）量产中工艺把控和成本控制要求高，为追求高集成度和高精度，单位面积大列阵单元越多越好，因此生产中单元拼接和电子电路走线会相互干扰，影响力测量精度，需要长期工艺积累。
- **触觉传感器是软硬件结合体，对于精准感知多维度力需要算法支撑。**由于机器人手部触觉传感器为集成式列阵传感器，每个单元可测试多维力，且单元之间相互干扰，为获得高精度的力，需要复杂的标定数据模型。

图：触觉感知流程图



图：主流产品性能对比

品牌	Uskin	MBM	Contactile	GelSight
产品名称	XELA矩阵式三轴4*4触觉传感器	MBM指尖六维力触觉传感器	三轴触觉力传感器	GelSight Mini 超高分辨率视触觉
技术路线	电磁式	压阻式	光学式	视触觉
表面材质	软胶带	金属	软体小柱	凝胶头
可测量的轴	独立测量3个轴	6个轴	3个轴	6个轴
测量频率	最高250Hz		1000Hz	
单个传感器尺寸	4.7*4.7mm，5.5mm厚	直径9.6mm*高9mm	直径6mm	4.5*4.5*20mm
最大切向力	4.22N	200N，1.8N*m		
最大法向力	17.66N			
切向分辨率	0.0098N	0.1N,0.001N*m	0.02N	
法向分辨率	0.098N		0.02N	

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

10 触觉传感器技术持续迭代升级，空间广阔

- **产业化技术路线演变，压阻式->电容式及电磁式->视触觉->仿生电子皮肤。**压阻式传感器短期放量，但通常只能测量法向力，更多应用于中低端领域；而电容式及电磁式性能更优，灵敏度高，且可测三维力，抗干扰能力提升后，放量潜力大；视触觉传感器理论上限高，随数据积累及大模型成熟，同时集成度提升后，未来潜力大。
- 触觉传感器融合方案。如智元机器人灵巧手采用电磁式传感器+视触觉传感器融合方案。

图：触觉传感器的性能对比

技术类型	原理	力的阈值	力维度	优点	缺点	代表厂商	应用
压阻式	单晶硅材料电阻值改变-电压改变	3-10g	通常为一维的法向力（垂直）	技术成熟，体积小，成本低	柔性差，灵敏度不足（10g）	汉威科技、墨现科技、福莱新材	特斯拉、普度机器、开普勒
电容式	板间距离改变-电容值改变-电压改变	1g	可为三维，切向力需一定解耦	柔性好，灵敏度高（阈值可达1g）	抗干扰差	他山科技	
光电式	光源和光强传感器的距离改变-光强值发生改变	0.5-1g		灵敏度高（阈值0.5-1g），有一定抗干扰能力	体积大	澳大利亚Contactile	
电磁式	永磁铁和磁传感器的距离改变-磁场强度发生改变	1g	通常为三维力	灵敏度价格（阈值1g），成本低	体积大，抗干扰差	帕西尼 日本Robotics的Uskin	星动纪元
嵌入式相机	利用微型双目相机的视觉成像技术+深度学习的数据处理方法，去增加触觉信息的		三维	性能上限高，物料成本低	对算法、数据训练要求高	美国Gelsight	智元机器人

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

11 机器人触觉传感器格局：美国为主，中国企业未来可期

- **目前机器人触觉传感器市场主要由美国企业占据。**根据QY Research，当前机器人触觉传感器规模上尚小，若未来保持年复合10.2%复合增速，则2029年规模4.3亿美元。22年全球前五大厂商占据76%份额，分别为美国Tekscan、Pressure Profile Systems、Sensor Products、德国Weiss Robotics、美国Syn Touch。
- **中国企业开始加速布局机器人触觉传感器，规模尚小，但未来可期。**目前人形机器人触觉传感器规模尚小，上市公司中汉威科技子公司能斯达主要生产薄膜电容触觉传感器，可应用于机器人身体，产品成熟；初创型公司帕西尼致力于用列阵式柔性触觉传感器应用于机器人领域，技术积累相对扎实。

图：22年全球前五大机器人触觉公司

公司	技术路线	介绍
Tekscan	压阻式	成立于1981年，美国公司，技术来自MIT，致力于触觉传感器和力传感器研发，其官网推出手部触觉传感器，采用Mems压阻式传感器，传感器厚度0.15毫米，双手供390个感应单元，6.2个感应单元/平方厘米。
Pressure Profile Systems	电容式	美国传感器公司，在机器人触觉领域规模第二，拥有25年的传感器经验
Sensor Products inc	压阻式 压电式	美国触觉和力传感器公司，技术方案包括薄膜传感器和压电式方案。
Interlink	压阻式	美国公司，具有30多年历史，专利技术力感电阻器（FSR®）已实现商业化
Syn Touch	视触觉	美国公司，成立于2007年，技术来自南加州大学生物医学工程系，视触觉路线，2013年研发的触觉传感器可以模拟人体多种触感，并收集各种触感信息提供给机器人判断，并收集信息归类，创建一个触

图：国内机器人触觉公司

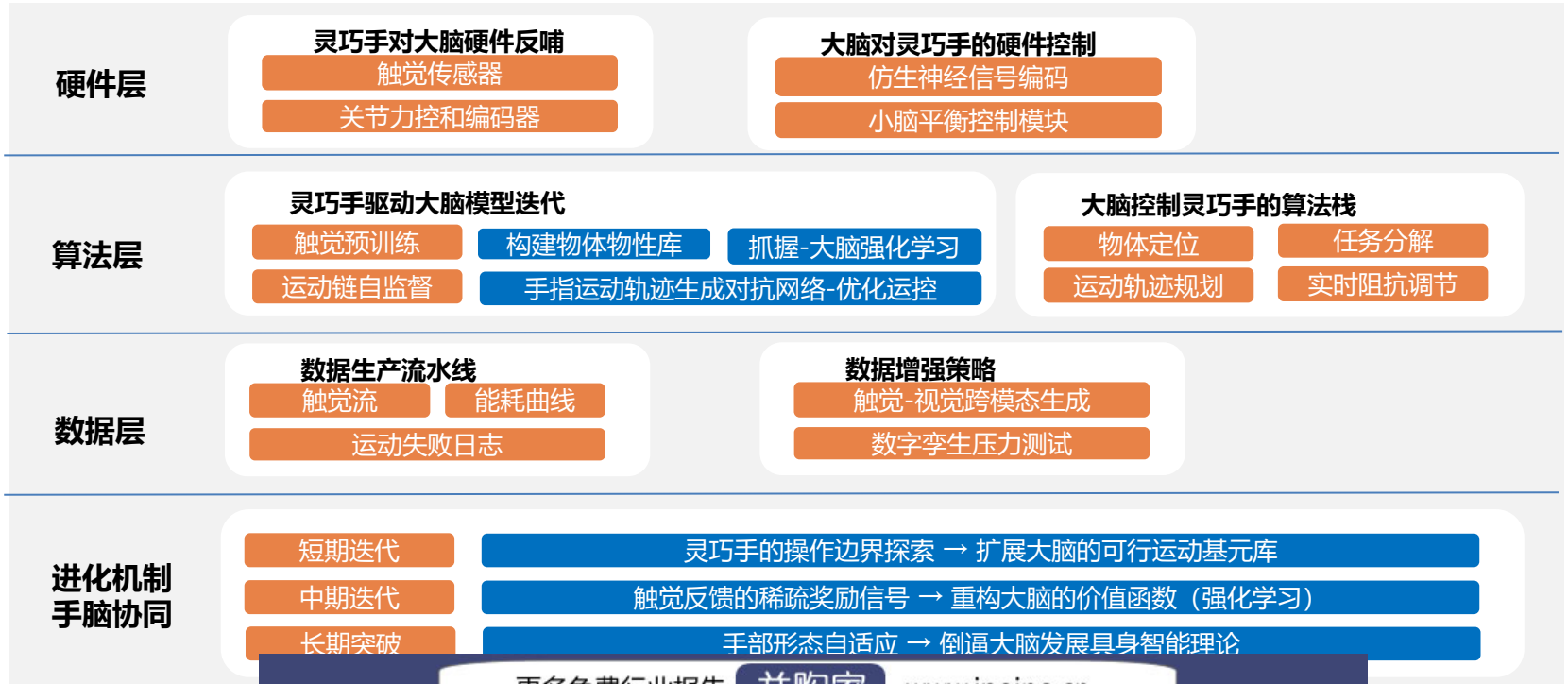
公司	技术路线	介绍
能斯达电子（汉威科技）	压阻式	由中科院知名海归团队2013年成立，公司致力于传柔性电子技术与柔性传感器的研发和产业化公司机器人触觉产品主要为薄膜电容触觉传感器，
墨现科技	压阻式	核心成员来自大疆创新，产品为高适应性柔性压力触觉传感器，产品多应用在智能家居、医疗健康、物联网IOT等消费级电子领域
帕西尼	电磁式	核心团队来自日本早稻田大学机器人实验室，产品包括包含多维度触觉传感器PX-6AX、消费级触觉传感器PX-3A、触觉灵巧手DexH5 以及人形机器人Tora
他山科技	电容式	他山科技成立于2017年，致力于人工智能触觉感知芯片研发及相关类脑芯片产业化
福莱新材	压阻式	从涂布多功能复合材料技术领域拓展至柔性触觉传感器项目，25Q1完成中试线
力感科技	压阻式	成立于2016年，由中国科学院孵化的企业，产 压力传感器等。

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

1 手脑协同构架是硬件、软件、数据、模型迭代的融合

- 从硬件层看，灵巧手的触觉传感器、关节力控和编码器可将数据反馈至大脑；大脑通过小脑运控模块控制灵巧手。从算法层面看，灵巧手通过触觉预训练构建物体物性库，提高视觉模型材质识别准确度，通过反馈抓握数据，促进强化学习，且通过运动链自监督，反向优化大脑运动规划模块。而大脑通过物体定位、任务拆解、运动轨迹规划、实时调整来控制灵巧手。并通过真实采集数据和仿真数据，扩大模型训练数据集。
- 最后手脑协同，快速迭代，加速具身智能。如小脑的精密装配数据，可优化大脑的微控制模块；不同物体抓握反馈数据，用于强化学习训练大脑；手部形态自适应，加速大脑的发展具身智能。

图表：手脑协同构成框架



更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

数据来源：东吴证券研究所

Part4 本体厂全栈自研，零部件提供整体解决方案

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

灵巧手集成商产品对比：技术多样化

东吴证券 SOOCHOW SECURITIES

1 各家技术选择多样化，快速迭代，提供自由度

- 当前阶段考虑实用性，技术方案为6个主动自由度的电机+丝杆+连杆方案，整体成本可控，承载力高，可满足当前机器人操作需要。而操作精密场景，则自由度需提升，厂商逐步引入混合传动方案，但实际重量、负载、使用寿命、控制精度、成本等尚需改进。

图表：主要灵巧手公司技术方案对比

类型	公司	产品	自由度	驱动方式	传动方式	传感器	重量	握力/负载	定位精度	售价
本体厂商	特斯拉	Gen-3	22	无刷有齿槽	腱绳	10指（压阻+视触觉）				
	FigureAI	第四代	16	空心杯电机	连杆			负载25kg		
	星动纪元	XHAND1	12（主动）	空心杯电机	直驱	三维电磁式传感器	1.1kg	负载25kg/握力8kg	±1mm	3万+
	宇树科技	Dex5-1	20（15主动）	电机	连杆	12个压力传感器	1kg	握力3.5kg		
	智元机器人	12自由度五指	19（12主动）	空心杯电机	腱绳+连杆	视触觉和电磁式		负载30kg/握力5kg		
独立集成商	Shadow	标准版	24（20主动）	电机	腱绳	标配食指+拇指	4.3kg	负载4kg		100万+
	北京因时	RH56DFTP系列	12（6主动）	空心杯电机	连杆	17个触觉传感器	800g	单指捏力30N	±0.2mm	
	灵心巧手	L30	25（18主动）	电机	腱绳	有	1.3kg	负载8kg	±0.2mm	8-10万
	强脑科技	智能仿生灵巧手	6（主动）	空心杯	连杆	电容式	530g	负载30kg/握力6kg/单指捏力30N	±0.1mm	
	敖意科技	ROH-A001	6（主动）	空心杯	连杆		550g	负载30kg	±1mm	
	灵巧智能	Dexhand 021	19（12主动）	电机	腱绳	电容式	1kg	负载5kg		6.8万
零部件厂	兆威机电		17（主动）	空心杯+步进	直驱	-	900g		±0.3mm	5万
	雷赛智能	DH116普及型	11（6主动）	空心杯	连杆	6个触觉	490g	负载40kg		长期1万以内

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

1 特斯拉：从蜗轮蜗杆到腱绳，在研下一代手

- Musk曾透露灵巧手占整机开发的60%，且特斯拉每次展示都重视灵巧手的操作功能。
- 2022年10月特斯拉展示第一代灵巧手，2023年11月第二代灵巧手，延续空心杯+蜗轮蜗杆的技术路线，自由度11个，增加触觉传感器，可拿鸡蛋等。2024年11月特斯拉发布第三代灵巧手，采用无刷有齿槽电机+腱绳方案，电机集成于手臂，自由度提升至22个。
- 由于腱绳方案存在蠕变问题、维护成本高、寿命短，预计特斯拉灵巧手仍将继续迭代。

图表：特斯拉灵巧手变化

第一代灵巧手

- 空心杯电机+蜗轮蜗杆
- 11自由度（6个主动自动）

第二代灵巧手

- 空心杯电机+蜗轮蜗杆
- 11自由度
- 指尖增加触觉传感器

第三代灵巧手

- 无刷有齿槽电机+腱绳
- 22自由度
- 指尖增加触觉传感器

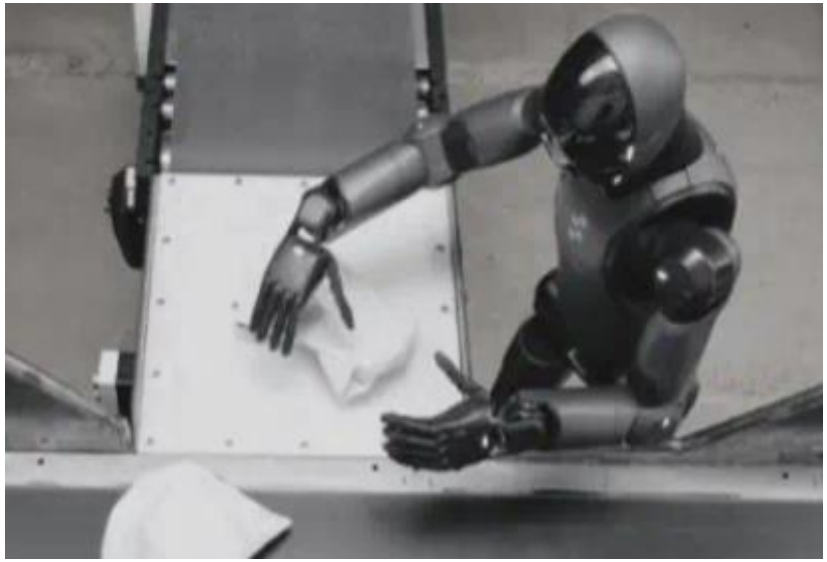
更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

司官网，东吴证券研究所

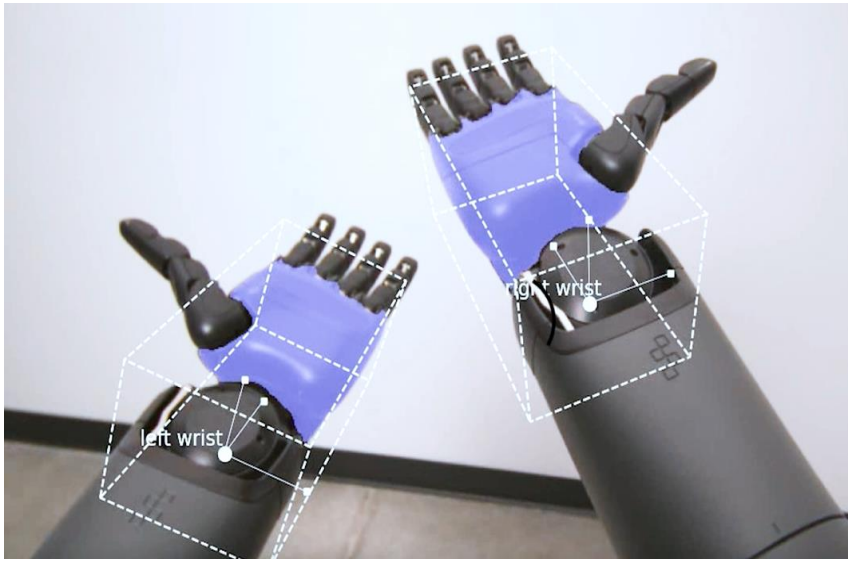
2 Figure AI：采用连杆方案，具备16个自由度

- Figure AI于2022年末创立，总部位于加利福尼亚，2023年3月发布人形机器人Figure 01，2024年8月发布Figure 02。Figure02 搭载第四代灵巧双手拥有16个自由度，可抓取25kg物体，公司已经展示Figure02在家庭场景收纳、工业场景分拣任务等。
- FigureAI类似Tesla采用全栈自研方式，从软件到硬件自主研发。灵巧手为Figure自行设计，方案采用空心杯电机+行星减速器+连杆方案，其中驱动模组与国内兆威机电合作，预计单手主动自由度为6个。

图表：Figure AI用灵巧手分拣



图表：Figure AI灵巧手



更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn
司官网，东吴证券研究所

3 星动纪元：全直驱方案，响应速度快，负载大

- 北京星动纪元科技有限公司成立于2023年8月，由清华大学交叉信息研究院孵化，也是唯一一家清华大学占股的人形机器人企业。已发布人形机器人START1，搭配自研灵巧手XHAND1。XHAND1采用空心杯电机+行星减速器方案，拥有12个全主动、全自驱的自由度，其中大拇指和食指各3个，其余手指各2个，食指多一个可侧摆15度自由度，可以做旋拧的动作；拇指实现和小拇指对指，增强抓握的稳定性。
- XHAND1重量1.1kg，指尖负载5kg、整手负载25kg，指尖搭载帕西尼的三维电磁式触觉传感器，最小翻遍率为0.05N。

图表：星动纪元灵巧手

图表：星动纪元灵巧手参数

	星动XHAND1
自由度（DOF）	12（全直驱）
重复定位精度	±1mm
重量	1.1kg
握力	15N（指尖）/80N（整手）
负载	5kg（指尖）/25kg（整手）
传感器	每个指尖上分布3维电磁式触觉传感器，最小分辨率为0.05N

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn
司官网，东吴证券研究所

4 智元机器人：混合驱动提高自由度

- 2024年8月智元发布了19自由度（12主动）视触觉灵巧手，至此形成全系列灵巧手产品，包含12自由度五指灵巧手、6自由度五指灵巧手、二指夹爪、OmniPicker。
- 12自由度灵巧手*采用混合驱动方式，四指近端关节用丝杆+连杆，远端用腱绳，大拇指掌运动采用齿轮+蜗轮蜗杆，远端关节通过腱绳方案。*性能上看，具备19个自由度，其中12个为主动自由度，整手抓握5kg，自锁提拉30kg，并且集成了高精度的MEMS触觉感知和视触觉感知。
- 6自由度五指灵巧手拥有11个自由度，其中6个位主动自由度，单手可负载1kg。

图表：智元机器人12自由度五指灵巧手

图表：智元机器人6自由度五指灵巧手

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

5 宇树科技：最新发布16主动自由度灵巧手，性能大幅提升

- 2025年4月1日宇树科技发布灵巧手Dex5-1灵巧手，具备20个自由度，其中16个主动自由度，传动方式为12个复合传动关节和4个齿轮传动，整手重量1kg，握力3.5kg（掌心向上）。并且搭载12个（共94个压力触感器）。
- 此外宇树科技还有三指Dex3-1方案，共7个自由度，采用6个直驱+1个齿轮传动，整手重量710g，握力0.5kg，相对而言适用于低端场景。

图表：宇树科技Dex5-1灵巧手

图表：宇树科技灵巧手技术参数

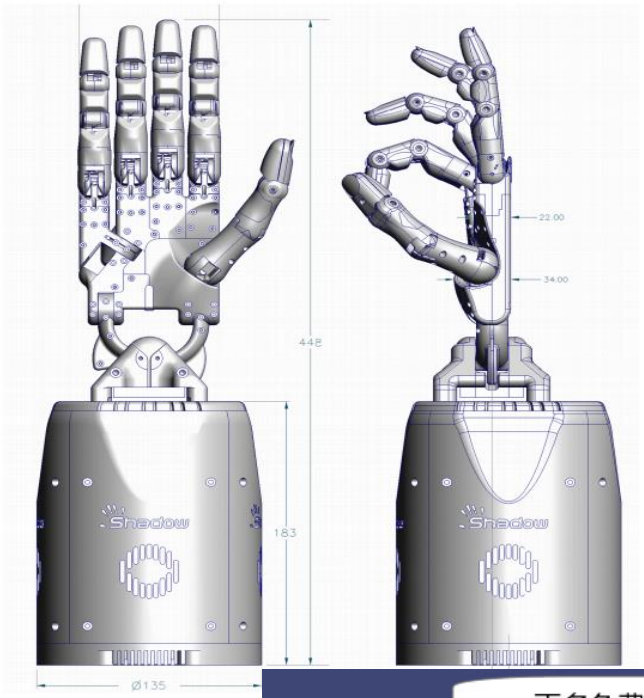
	Dex3-1	Dex5-1P
传动方式	6个微型无刷力控关节直驱 1个微型无刷力控关节齿轮传动	12个自研微型力控复合传动关节 4个微型力控关节齿轮传动
自由度(DOF)	7	20（16个直驱）
重复定位精度		±1mm
重量	710g	1kg
握力	500g（整手）	3.5kg（整手）
传感器	个（共33个压力传感器）	12个（共94个压力传感器）

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

1 英国Shadow：腱绳方案领军者，高自由度

- Shadow在灵巧手领域有20多年的研究历史，其标准版灵巧手采用20个直流无刷伺服Maxon电机（电机集成手臂）+腱绳方案（高分子聚丙烯Dyneema SK75），具备24个自由度（4个欠驱），包括手腕2个。并且食指和拇指分别使用一个17*3点阵的三维触觉电磁式传感器。Shadow提供整体解决方案，包括开源的机器人操作系统ROS，同时提供影子手套和远程操作系统。
- 总体看Shadow灵巧手优势在于自由度高，但重量大，手+臂重量4.3kg，承载低，单手承载4kg，同时腱绳方案需校准维护。目前Shadow手价格超过100万元，目前主要用于科研场景。

图表：Shadow灵巧手示意图



图表：Shadow灵巧手产品性能

	标准版	精简版	超精简版	超超精简版
自由度（DOF）	20 个主动自由度，另有 4 个欠驱动运动，共 24 个关节	16 个关节，共 13 个自由度	12 个关节，共 10 个自由度	8 个关节，共 7 个自由度
总重量	4.3 kg	2.4 kg	2.1 kg	1.8 kg
手指数量	4 根手指 + 1 根拇指	3 根手指 + 1 根拇指	2 根手指 + 1 根拇指	1 根手指 + 1 根拇指
驱动器数量	20 个直流电机	13 个直流电机	10 个直流电机	7 个直流电机
手指关节数量	4	4	4	4
拇指关节数量	5	4	4	4
腕关节数量	2	0	0	0
标准配置的触觉传感器数量	2	2	1	1
触觉传感器最大数量	5	4	3	2
惯性测量单元（IMU）数量	1	1	1	1
肌腱负载传感器数量	40	26	20	14

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

2 因时机器人：具备先发优势，但电缸驱动自由度受限

- 因时机器人成立于2016年，产品为微型伺服电缸、电动夹爪和灵巧手。灵巧手采用微型伺服电缸方案，一个手上集成6个微型伺服电缸。微型电缸是小型一体化直线伺服系统，内部集成了空心杯电机+行星减速器+传感器+精密螺杆机构+闭环控制系统。
- 因时机器人灵巧手目前拥有三个型号，均为6个自由度、12个运动关节，手部握力不同应用于不同场景，DFTP系列重量800g，指尖最大输出力30N，带6个力传感器和17个触觉传感器，更适用于工业场景。因时机器人灵巧手零售价4-5万元/只，由于在国内具备先发优势，目前份额较高。

图表：因时机器人灵巧手示意图

图表：因时机器人灵巧手产品性能

	RH56BFX系列	RH56DFX系列	RH56DFTP系列
自由度（DOF）	6	6	6
关节数	12	12	12
重量	540g	540g	790±10g
重复定位精度	±0.2mm	±0.2mm	±0.2mm
拇指最大抓握力	6N	15N	30N（指尖输出力）
四指最大抓握力	4N	10N	
抓握分辨率	0.5N	0.5N	0.5N
传感器			6个力传感器 17个触觉传感器

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

3 强脑科技：负载力和精度亮眼，自由度有待提升

- 成立于2015年，是首家入选哈佛大学创新实验室的中国团队，致力于非侵入式脑机接口技术整体解决方案。其灵巧手采用6个德国Faulhaber空心杯电机+蜗轮蜗杆+连杆方案，具备6个自由度、10个关节，整手重量530g。
- 抓握和承载能力亮眼，单手最大承载30kg，单指最大承载8kg，单手握力6kg，单指捏力30N，五指握力50N。并且提供高精度控制，操作精度0.1mm，搭载触觉传感器（或为他山科技的电容式），力分辨率为0.1N。

图表：强脑科技灵巧手示意图

图表：强脑科技灵巧手产品性能

	性能
自由度（DOF）	6
关节数	10
重量	530g
重复定位精度	±0.1mm，实时控制频率≥100Hz
单手承载力	30kg
单指最大承载力	8kg
五指最大抓握力	50N
抓握分辨率	0.1N（最大分辨率0.01N）
传感器	触觉传感器，可感知压力、摩擦力、受力方向、接近距离、物体材质

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

司官网，东吴证券研究所

4 傲意科技：具备负载优势，在研产品着重提升触觉和自由度

- 成立于2015年，专注于机器人和脑机接口两大领域。2024年推出灵巧手ROH-A001，采用空心杯电机+连杆驱动方式，具备11个关节6个主动自由度，整手重545±5g。抓握力上，单指指尖力4.4N，最大拇指指尖力9.8N，单手最大负载30kg（钩握）、单指最大负荷10kg。精度上，重复定位精度±1mm。
- 公司计划2025年小批量生产第二代灵巧手，将具备触觉传感器。并且在研第三代灵巧手，自由度将达到15个每个手指均有3个。

图表：傲意科技灵巧手示意图

图表：傲意科技灵巧手产品性能

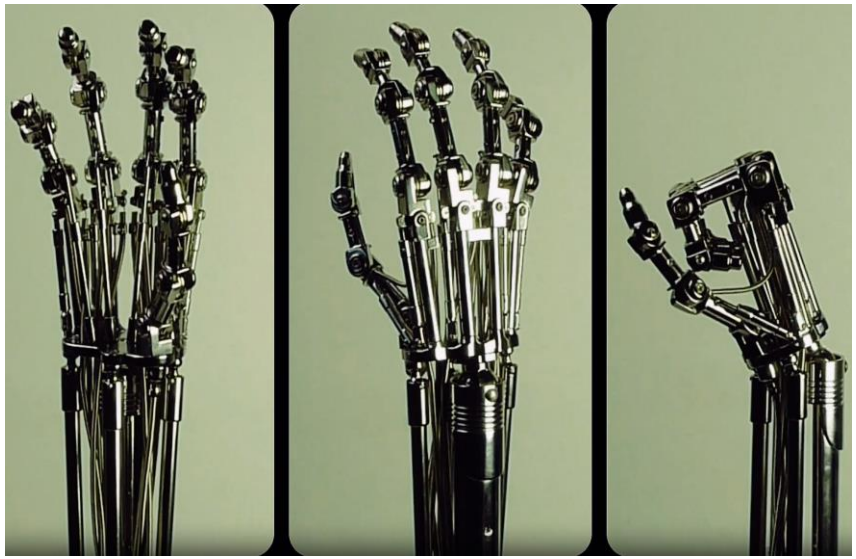
	ROH-A001
自由度（DOF）	6
关节数	11
重量	545±5g
重复定位精度	±1mm
拇指最大抓握力	9.8N
四指最大抓握力	4.4N
单手最大负载	30kg
单指最大负载	10kg

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

5 灵心巧手：连杆/腱绳方案，具备高自由度优势

- 灵心巧手成立于2023年，致力于灵巧手开发，公司Linker Hand有四个系列产品，其中L10/L20/O7均采用连杆方案，驱动器为自研的电机+减速器，主动自由度分别为10/16/7。L30为腱绳方案，具备18个主动自由度（总共25个），驱动器集成于手臂。
- 重量看，L10重750g，L30重1.3KG，最大负载为5kg和8kg，尚有大幅提升空间。另外，传感器方面，公司产品搭配指尖触觉传感器和指内微型三维力传感器。售价方面，价格从2-10万不等，24年12月单月销量破100只手。

图表：灵心巧手L30灵巧手示意图



图表：灵巧智能灵巧手产品性能

	Linker Hand L10	Linker Hand L20	Linker Hand L30	Linker Hand O7
传动方式	连杆	连杆	腱绳	连杆
自由度（DOF）	20（10主动）	21（16主动）	25（18主动）	7
关节数	20	21	25	17
重量	750g	1kg	1.3kg	700g
重复定位精度	±0.2mm	±0.2mm	±0.2mm	±0.2mm
拇指最大抓握力	12N	15N	9-20N	12N
四指最大抓握力	12N	10N	10-20N	12N
最大负载	5kg	5kg	8kg	5kg
传感器	指尖触觉传感器和指内微型三维力传感器	指尖触觉传感器和指内微型三维力传感器		压阻阵列6*12，触发力5g，量程20N

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

6 灵巧智能：腱绳方案自由度是亮点，承载力受限

- 2024年1月成立，依托上海交大科研实力，11月发布Dexhand 021量产版本，体验价6.8万元。Dexhand 021量产版本采购12个电机+腱绳+（或有蜗轮蜗杆）方案，拥有15个关节、19个自由度（12个主动+7个被动），其中拇指和食指各3个电机，其余手指2个。整手重量1kg，单指最大负载1kg，整手负载5kg，使用寿命15万次。传感器方面，或使用他山科技的电容式传感器。
- 并计划25H1发布臂手一体27自由度的DexHand021专业版量产机型。公司与捷昌驱动合资成立 “浙江灵捷机器人零部件有限公司”布局空心杯等零部件生产。并且公司已经建成月产2000只灵巧手重视产线。

图表：灵巧智能灵巧手示意图

图表：灵巧智能灵巧手产品性能

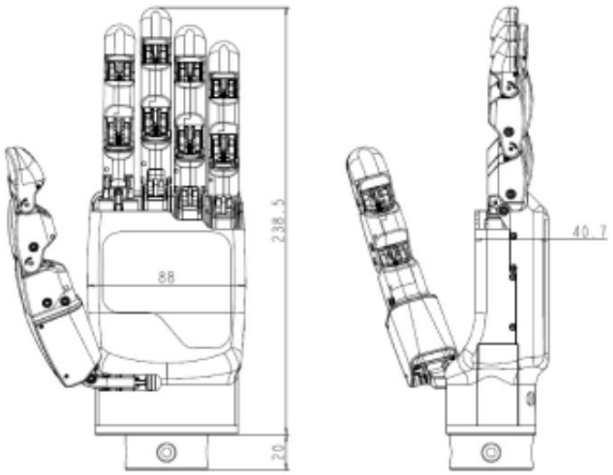
	Dexhand 021量产版本
自由度（DOF）	12主动+7被动
关节数	15
重量	1kg
单指负载	1kg
单手负载	5kg
使用寿命	15万次
传感器	法向力量程：20N 接近觉：≥1cm

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

1 兆威机电：高自由度直驱，体积有待进一步缩小

- 成立于2001年，是一家集设计、研发、制造于一体的微型驱动系统方案解决商，提供包括传动系统+电机系统+电控系统在内的各类产品。
- 其灵巧手产品采用齿轮箱传动方案，通过电机搭配微型减速器+丝杆驱动+指节电机独立驱动技术，使得整手通过仿生学原理设计有15个关节，共17个自由度（7个有刷空心杯+10个步进电机），可灵活扩展至20，单只手指自由度大于等于3个，能更精准地模拟人手的精细动作，传动模组回程差≤1°，电机控制误差≤0.3°。同时核心部件高效高功率密度传动模组设计寿命≥10年，灵巧手的寿命可达数万小时。

图表：兆威机电灵巧手示意图



图表：兆威机电灵巧手产品性能

	性能
自由度（DOF）	17，可扩展至20
关节数	15
手长	238.5mm
手宽	88mm
手厚	40.7mm
运动关节	15
重量	900g
负载	3kg
传动模组回程差	≤1°
电机控制误差	≤0.3°
传感器	≥3 个感知传感器，内含指尖集成传感器

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

2 雷赛智能：多自由度产品布局，负载能力亮眼

- 雷赛智能成立于1997年，深耕智能装备运动控制领域，产品有伺服电机驱动系统、步进电机驱动系统等。灵巧手系列产品预计共有四个型号，覆盖工业、商业与家庭等各类应用场景。系列均采用无刷空心杯伺服电机，搭配FOC电流与触觉融合的力位混合控制算法，传动方式采用行星减速机+滚珠丝杆方案，预计26年推出的旗舰型将采用腱绳方案。
- 首款型号DH116有11个运动关节，具有6个主动自由度（无刷空心杯）和5个被动自由度，标配6个触觉传感器。轻量化设计兼具强大负载能力，机身重量490g，单指握力100N，单手握力最大400N，抓握寿命100万次。

图表：雷赛智能灵巧手示意图

DH116普及型 11DOF/6DOA

图表：雷赛智能灵巧手产品性能

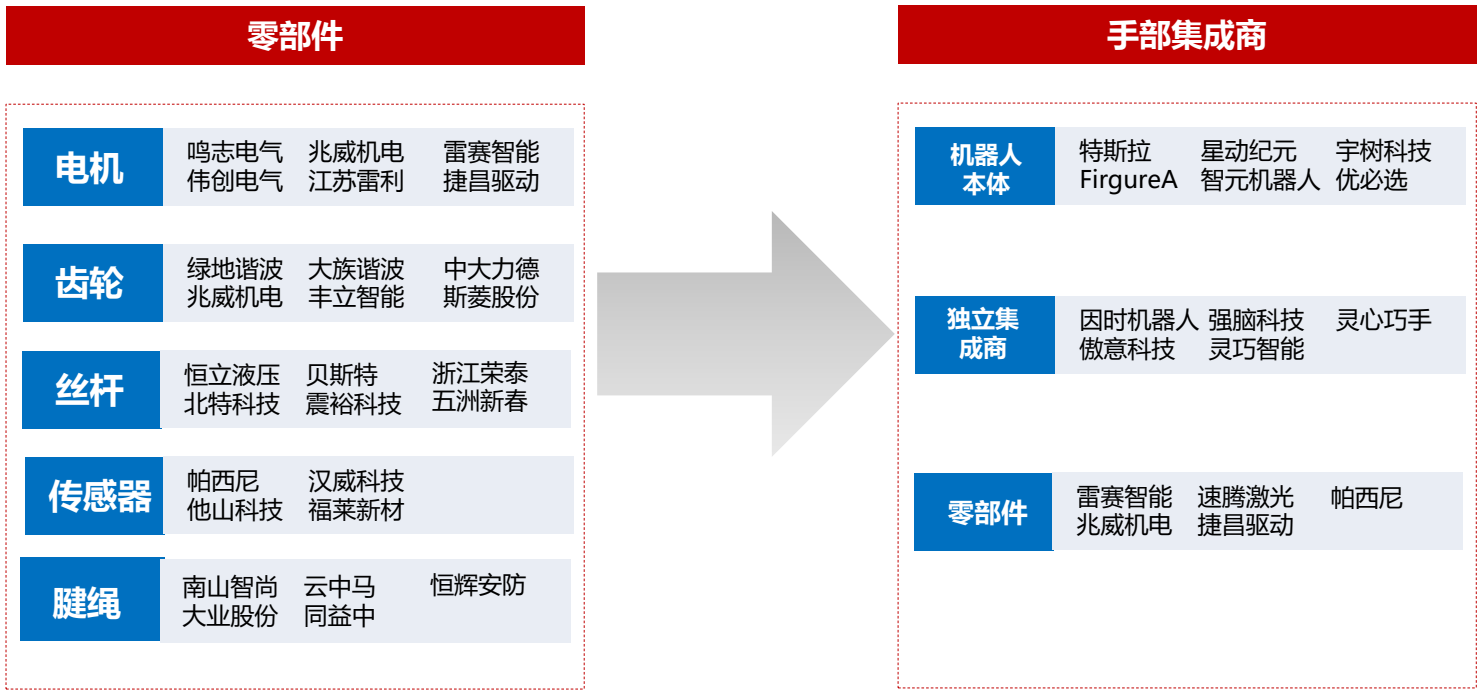
	DH116 普及型	DH2015 高端型	DH2012 通用型	DH2420 旗舰型
自由度（DOF）	11个关节，共11个自由度	20	20	24
驱动器数量	6个空心杯	15个空心杯	12个空心杯	20个空心杯
传感器	6 个触觉传感器	触觉传感器	触觉传感器， 多模态传感器可选	触觉传感器，多模态传感器可选
最大负载（钩握）	40Kg	15Kg	15Kg	15Kg
抓握寿命	100 万次	100 万次	100 万次	100 万次
动作手势数量	20 种	26 种	26 种	33 种
重量	490g	650g	550g	450g
上市时间	2025 Q1	2025 Q2	2025 Q3	2026

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

1 主机厂自研和集成、零部件厂商提供整体方案为趋势

- 灵巧手为人形机器人操作性能的核心，决定机器人功能的上限，是具身智能的核心，因此头部人形机器人厂商选择全栈自研，如特斯拉、FigureAI、智元、宇树、星动纪元等。
- 独立第三方公司多为创业公司，如因时机器人，具备自研零部件技术；强脑科技、傲意科技具备脑机接口技术积累；其外灵心巧手、灵巧智能专注灵巧手。
- 零部件厂商延伸至整体方案解决，如电机/齿轮、驱动器供应商兆威机电、雷赛智能提供整手解决方案。

图表：人形机器人灵巧手产业链



更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

1 灵巧手成本与自由度相关，未来降本空间大

- 我们按照目前典型的三类方案测算成本。6个主动自由度的连杆方案，不考虑传感器Bom成本为1万元/只+，考虑未来零部件降本空间大，成本有望降至0.5万元/只以内。12个自由度的直驱方案，不考虑传感器，bom成本为2.5万元/只，加触觉传感器为3万元/只，未来不考虑传感器，bom成本有望降至0.8万元/只。18个自由度的腱绳方案，若采用无刷有齿槽电机，总体成本与12个自由度的直驱方案相似，但维护成本高。

图表：大规模量产后，典型灵巧手方案成本测算

传动方式		连杆	直驱	腱绳
主动自由度		6	12	18
电机	类型	空心杯	空心杯	无刷有齿槽
	单价（元/个）	300	300	300
	成本合计（元）	1,800	3,600	5,400
齿轮	类型	行星减速器	行星减速器	行星减速器
	单价（元/个）	100	100	100
	成本合计（元）	600	1,200	1,800
丝杆	类型	蜗轮蜗杆	滚珠丝杆	滚珠丝杆
	单价（元/个）	50	100	100
	成本合计（元）	300	1,200	1,800
联动	类型	连杆		腱绳
	单价（元/米）	100		100
	成本合计（元）	600		500
驱动器	成本合计（元）	900	1800	2700
传感器	类型	电磁式	电磁式	电磁式
	单价（元/指尖）	500	500	500
	成本合计（元）	2,500	2,500	2,500
结构件	成本合计（元）	300	300	300
合计bom成本（元/手）		7,000	10,600	15,000

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

数据来源：东吴证券研究所

灵巧手产业链市场空间测算

东吴证券 SOOCHOW SECURITIES

1 灵巧手价值量：触觉传感器、空心杯电机、丝杆、齿轮

图表：灵巧手市场空间测算（只考虑配套人形机器人）

		2025	2026	2027	2028	2029	2030	远期
全球人形机器人销量（万台）		**2.00**	**10**	**50**	**100**	**180**	**300**	**3,000**
同比			*400%*	*400%*	*100%*	*80%*	*67%*	*26%*
灵巧手占比		*40%*	*50%*	*60%*	*70%*	*80%*	*82%*	*92%*
灵巧手需求（万/只）		**1.6**	**10**	**60**	**140**	**288**	**492**	**5,520**
单手价值（万/只）		3.5	3.2	2.7	2.3	2.0	1.8	1.0
灵巧手市场空间（亿元）		**5.6**	**32**	**161**	**319**	**590**	**907**	**5,520**
平均主动自由度		**6**	**8**	**10**	**11**	**12**	**13**	**16**
电机	空心杯需求（亿个）	0.00	0.01	0.05	0.12	0.26	0.47	6.09
	-占比	*83%*	*82%*	*80%*	*78%*	*76%*	*74%*	*69%*
	单价（元/个）	700	630	504	378	321	273	100
	市场空间（亿元）	**0.6**	**4.1**	**24**	**45**	**84**	**129**	**609**
	无刷有齿槽需求（亿个）	0.00	0.00	0.01	0.03	0.08	0.16	2.65
	-占比	15%	17%	19%	21%	23%	25%	30%
	单价（元/个）	300	270	216	162	113	79	50
	市场空间（亿元）	**0.0**	**0.4**	**2**	**5**	**9**	**13**	**132**
齿轮	行星减速器需求（亿个）	0.00	0.01	0.06	0.14	0.29	0.51	6.62
	-占比	*96%*	*94%*	*92%*	*90%*	*85%*	*80%*	*75%*
	单价（元/个）	300	270	216	162	138	117	50
	市场空间（亿元）	**0.3**	**2.0**	**12**	**22**	**40**	**60**	**331**
	谐波减速器需求（亿个）	0.00	0.00	0.00	0.01	0.05	0.12	2.12
	-占比	3%	5%	7%	9%	14%	19%	24%
	单价（元/个）	1,500	1,350	1,080	810	567	397	200
	市场空间（亿元）	**0.0**	**1**	**5**	**11**	**27**	**48**	**424**
丝杆	滚珠丝杆需求（亿个）	0.00	0.01	0.06	0.14	0.29	0.51	6.62
	-占比	*96%*	*94%*	*92%*	*90%*	*85%*	*80%*	*75%*
	单价（元/个）	500	450	360	270	230	195	80
	市场空间（亿元）	**0.5**	**3.4**	**20**	**37**	**67**	**100**	**530**
	滚柱丝杆需求（亿个）	0.00	0.00	0.00	0.01	0.05	0.12	2.12
	-占比	3%	5%	7%	9%	14%	19%	24%
	单价（元/个）	2,000	1,800	1,440	1,080	756	529	200
	市场空间（亿元）	**0.1**	**0.7**	**6**	**15**	**37**	**64**	**424**
腱绳	腱绳需求（亿米）	0.00	0.00	0.01	0.02	0.04	0.07	0.99
	-占比	15%	17%	19%	21%	23%	25%	30%
	单价（元/米）	100	90	72	54	38	36	28
	市场空间（亿元）	**0.0**	**0.1**	**0.5**	**1.0**	**1.5**	**2.7**	**27.6**
传感器	传感器需求（万个）	4	26	162	392	878	1,624	20,976
	-占比	50%	52%	54%	56%	61%	66%	76%
	单价（元/指尖）	1,000	900	720	540	486	462	300
	市场空间（亿元）						**75**	**629**

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

东吴证券研究所预测所得

1 鸣志、兆威、雷赛、荣泰等利润弹性大

图表：相关标的灵巧手业务弹性测算（只考虑灵巧手相关弹性，不考虑机器人其他关节弹性）

标的	产品	2030年份额	2030年灵巧手收入（亿）	2030年灵巧手利润（亿）	2025年主业利润（亿）	利润弹性
鸣志电器	空心杯电机	30%	39	6	1.7	365%
	无刷有齿槽电机	20%	3			
兆威机电	整手（第三方）	10%	10	7	2.8	257%
	空心杯电机	20%	26			
	行星减速器	20%	12			
雷赛智能	整手（第三方）	10%	10	7	2.8	240%
	空心杯电机	25%	32			
	驱动器	20%	3			
伟创电气	空心杯电机	10%	13	2	3.1	63%
浙江荣泰	滚珠丝杆	25%	25	5	3.5	148%
	滚柱丝杆	15%	10			
北特科技	滚珠丝杆	10%	10	3	1.2	245%
	滚柱丝杆	15%	10			
震裕科技	滚珠丝杆	10%	10	2	4.1	61%
	滚柱丝杆	10%	6			
捷昌驱动	空心杯电机	10%	13	3	4.9	54%
	滚珠丝杆	5%	5			
丰立智能	行星减速器	10%	6	2	0.4	438%
	谐波减速器	10%	5			
科达利	谐波减速器	10%	5	1	18.8	4%
斯菱股份	谐波减速器	10%	5	1	2.2	33%

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

Part5 投资建议与风险提示

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

投资建议

◆ **投资建议：**首推灵巧手兼具整体解决方案和零部件供应商**雷赛智能、兆威机电**，其次为绑定核心主机厂的零部件供应商，空心杯电机（**鸣志电器、伟创电气，关注峰岹科技、信捷电气、捷昌驱动**），微型丝杆（**浙江荣泰、北特科技**），减速器（**科达利、斯凌股份**，关注丰立智能），触觉传感器（关注汉威科技、福莱新材），腱绳（关注南山智尚、大业股份）

图表：重点公司估值表（截至2025年4月25日收盘价，未评级标的盈利预测来自wind一致预期）

分类	证券代码	名称	总市值（亿元）	股价	归母净利润（亿元）				PE				评级	来源
					2024E	2025E	2026E	2027E	2024E	2025E	2026E	2027E		
特斯拉链	002050.SZ	三花智控	950	25	31	38	46	65	31	25	21	15	买入	东吴
	601689.SH	拓普集团	892	51	30	36	45	57	30	25	20	16	买入	东吴
	603728.SH	鸣志电器	268	64	1.4	1.7	2.0		186	157	132		买入	东吴
	688017.SH	绿的谐波	262	143	0.7	1.0	1.4		359	254	182		增持	东吴
	002472.SZ	双环传动	273	32	10	13	15		26	22	18		买入	东吴
	603009.SH	北特科技	156	46	0.7	1.2	2.0	5.7	218	128	77	28	买入	东吴
	603119.SH	浙江荣泰	170	47	2.3	3.5	4.9		73	48	34		买入	东吴
	603667.SH	五洲新春	131	36	1.3	1.7	2.0		100	76	66		买入	东吴
	301550.SZ	斯菱股份	116	105	1.9	2.2	2.6		61	52	45		买入	东吴
	300953.SZ	震裕科技	184	148	2.5	4.1	5.7	6.9	72	45	32	27	未评级	
华为及国内链	002979.SZ	雷赛智能	141	46	2.1	2.8	3.7		67	50	38		买入	东吴
	300124.SZ	汇川技术	1749	65	50	60	72		35	29	24		买入	东吴
	601127.SH	赛力斯	2107	129	59	96	142	185	35	22	15	11	买入	东吴
	300432.SZ	富临精工	222	18	4	10	17		54	22	13		买入	东吴
	003021.SZ	兆威机电	306	127	2.2	2.8	3.5		140	110	87		买入	东吴
	002765.SZ	蓝黛科技	95	15	1.2	2.2	2.9	4.0	76	43	33	24	未评级	
	688320.SH	禾川科技	63	42	(1.6)	0.2	0.8		-40	408	84		未评级	
	603809.SH	豪能股份	110	13	3.2	4.3	5.4	6.6	34	26	21	17	未评级	
	300607.SZ	拓斯达	130	27	(2.5)	0.6	0.9	1.2	-53	209	142	113	未评级	
英伟达链	688698.SH	伟创电气	104	49	2.5	3.1	3.8	5.0	42	34	27	21	买入	东吴
	002850.SZ	科达利	368	135	15	19	23	28	25	20	16	13	买入	东吴
宇树科技链	300718.SZ	长盛轴承	233	78	2.5	2.8	3.2		93	84	73		增持	东吴
	600580.SH	卧龙电驱	309	24	9.1	10.9	12.6		34	28	25		未评级	
	688322.SH	奥比中光	247	62	(0.1)	2.1	4.2		-1806	119	59		买入	东吴
	301325.SZ	曼恩斯特	72	50	0.6	1.8	3.1		129	40	23		买入	东吴

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

风险提示

- **人形机器人推广不及预期风险。**人形机器人的推广受到现有技术、用户接受度、具体应用场景需求等多方面的影响，商业化进度具有不确定性，可能对产业链产生不利影响。
- **特斯拉人形机器人量产进展不及预期风险。**特斯拉人形机器人的量产对于行业具有引领作用，若其量产时间点继续推后，对于上游供应商将产生不利影响。
- **产业链降本不及预期风险。**目前人形机器人方案成本较高，各核心零部件均有较大降本空间，降本进度不及预期将影响下游大规模应用。
- **行业关键技术突破不及预期风险。**人形机器人软件、硬件相关关键技术尚在研发当中，需要实现技术突破才能使机器人性能、成本满足需求。
- **市场竞争加剧风险。**人形机器人未来商业价值显著，正处于持续投入、激烈竞争阶段，新进入者入局可能使公司面临竞争加剧的风险。

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

免责声明

- 东吴证券股份有限公司经中国证券监督管理委员会批准，已具备证券投资咨询业务资格。
- 本研究报告仅供东吴证券股份有限公司（以下简称“本公司”）的客户使用。本公司不会因接收人收到本报告而视其为客户。在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见并不构成对任何人的投资建议，本公司及作者不对任何人因使用本报告中的内容所导致的任何后果负任何责任。任何形式的分享证券投资收益或者分担证券投资损失的书面或口头承诺均为无效。
- 在法律许可的情况下，东吴证券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并进行交易，还可能为这些公司提供投资银行服务或其他服务。
- 市场有风险，投资需谨慎。本报告是基于本公司分析师认为可靠且已公开的信息，本公司力求但不保证这些信息的准确性和完整性，也不保证文中观点或陈述不会发生任何变更，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、复制和发布。经授权刊载、转发本报告或者摘要的，应当注明出处为东吴证券研究所，并注明本报告发布人和发布日期，提示使用本报告的风险，且不得对本报告进行有悖原意的引用、删节和修改。 未经授权或未按要求刊载、转发本报告的，应当承担相应的法律责任。本公司将保留向其追究法律责任的权利。
- **东吴证券投资评级标准**
- 资评级基于分析师对报告发布日后6至12个月内行业或公司回报潜力相对基准表现的预期（A 股市场基准为沪深 300 指数，香港市场基准为恒生指数，美国市场基准为标普 500 指数，新三板基准指数为三板成指（针对协议转让标的）或三板做市指数（针对做市转让标的），北交所基准指数为北证50指数），具体如下：
- 公司投资评级：
- 买入：预期未来6个月个股涨跌幅相对基准在15%以上；
- 增持：预期未来6个月个股涨跌幅相对基准介于5%与15%之间；
- 中性：预期未来 6个月个股涨跌幅相对基准介于-5%与5%之间；
- 减持：预期未来 6个月个股涨跌幅相对基准介于-15%与-5%之间；
- 卖出：预期未来 6个月个股涨跌幅相对基准在-15%以下。
- 行业投资评级：
- 增持： 预期未来6个月内，行业指数相对强于基准5%以上；
- 中性： 预期未来6个月内，行业指数相对基准-5%与5%；
- 减持： 预期未来6个月内，行业指数相对弱于基准5%以上。
- 我们在此提醒您，不同证券研究机构采用不同的评级术语及评级标准。我们采用的是相对评级体系，表示投资的相对比重建议。投资者买入或者卖出证券的决定应当充分考虑自身特定状况，如具体投资目的、财务状况以及特定需求等，并完整理解和使用本报告内容，不应视本报告为做出投资决策的唯一因素。

- 东吴证券研究所
- 苏州工业园区星阳街5号
- 邮政编码：215021
- 传真：（0512）62938527

司网址： http://www.dwzq.com.cn

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn

东吴证券
SOOCHOW SECURITIES

东吴证券财富家园

更多免费行业报告 并购家 www.ipoipo.cn