

芯跑科技 | 月报资讯

2025 年 6 月，第 056 期：持续迭代的灵巧手，人形机器人产业化关键瓶颈



持续迭代的灵巧手，人形机器人产业化关键瓶颈

● 本文仅供参考，不构成任何投资建议或推荐。

人形机器人集成人工智能、高端制造、新材料等先进技术，有望成为继计算机、智能手机、新能源汽车后的颠覆性产品，将深刻变革人类生产生活方式，重塑全球产业发展格局。当前，人形机器人技术加速演进，已成为科技竞争的新高地、未来产业的新赛道、经济发展的新引擎。

作为人形机器人核心部件的灵巧手，因其高度模拟人类手部精细操作能力，成为推动机器人功能升级及产业化的关键瓶颈。由于人们赋予了人形机器人拟人化灵活操作的预期，因此需要末端执行器具备高灵巧性、强适应性、高智能化的特征。灵巧手以人手的结构和功能为模仿对象，是机器人实现精细操作的基础，其需要完成抓、握、捏、拧、旋转等不同动作，以满足多元化的场景需求。灵巧手在机器人研发工程和整机成本中占据重要份额。国内外企业均在积极布局，灵巧手产品处于持续迭代过程中。本报告聚焦灵巧手产业链，分析其技术、市场及投资潜力，为将来寻找投资机会提供依据。

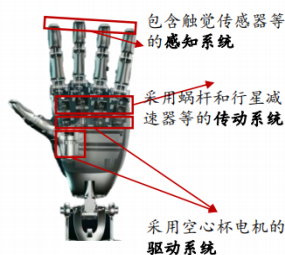
一、 灵巧手行业概况

1、 灵巧手的定义与功能

灵巧手是一种基于人手运动学设计的特殊末端执行器，相较于仅能完成焊接、喷漆等特定任务的工业机器人传统末端执行器，人形机器人的多场景&复杂任务通用性需求要求其具备更复杂的结构和自由。一般来说灵巧手至少具有 3 个手指，每指至少具有 3 个轴线不完全平行的自由度，通常还集成力觉、接近觉等多种传感器。

灵巧手是由驱动、传动和感知三系统构成的末端执行器。驱动系统负责提供动力和扭矩，目前主流方案为电机驱动，但在驱动结构、放置方式和方案选型等方面均存在不同技术路线；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，存在替代/组合关系；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。

图1：Optimus Gen-2灵巧手结构



数据来源：痛点设计，华龙证券研究所

表1：灵巧手驱动系统和传动系统各技术路线的优缺点以及代表产品

组成部分	技术路线	优点	缺点	代表灵巧手
驱动系统	电机驱动	体积小、响应快，调控方便、稳定性好、精度高、输出扭矩稳定	所需电机数量较多，成本较高且存在散热问题	当前灵巧手的主流方案
	液压驱动	力/扭矩输出较大，适合强力抓取场景，结构相对简单，成本较低	控制精确度较低，体积和重量难以缩小，维护成本较高	Sanctuary AI 液压灵巧手
	气压驱动	操作方便、质量轻巧、价格适中、维护简便	可操作性不强，轨道精度不够	Festo 气动灵巧手
	形状记忆合金驱动	可以进行负载运动、反应迅速、位移大、变位迅速	无法长时间工作，疲劳强度较低	中国计量大学记忆形状合金灵巧手
传动系统	连杆传动	刚度高、负载大、制造简单、成本较低	自重较大，柔性不足，抗冲击能力弱	国时机器人RH56DFX
	齿轮传动	可通过主动关节解耦实现关节反驱，增强抗冲击能力，传动效率高	齿轮自重较重，占空间较大，制造和维护成本较高	星动纪元XHAND1
	腱绳传动	可实现更多自由度，重量轻	对腱绳材料要求较高，易磨损且操作精度较低	Optimus Bot Gen-3

数据来源：《机器人灵巧手研究综述》，华龙证券研究所

根据自由度与驱动源数量，可将灵巧手分为全驱动和欠驱动两大类。

- 全驱动灵巧手：驱动源数量=自由度数量。每个手指关节都有驱动器，使其能够实现主动控制，但结构复杂、成本较高。

- 欠驱动灵巧手：驱动源数量<自由度数量。缺少驱动源的部分进行耦合随动，硬件集成度较高，但限制了精度，不适用于对精细化操作要求比较高的场景。

根据驱动器布局，灵巧手驱动方式可分为驱动器内置、驱动器外置、驱动器混合置式。

- 驱动器内置：电机位于灵巧手内部，手指的体积较大，控制精度较高，但不同手指均可使用同样的模块化设计，可维修性较强。
- 驱动器外置：电机位于手臂，空间较大，可以选用更大的驱动电机，且手指可以设计的更纤细，但控制精度较低。
- 驱动器混合置式：以韩国 RoboRay hand 为代表，大功率驱动器布置在前臂中，其余小功率驱动器则布置在手掌中。其优点在于能充分地利用电机功率、手部尺寸与人手相近、可自由配置各个手指关节的自由度，但是腱绳引线较难而且驱动系统和控制系统比较分散。

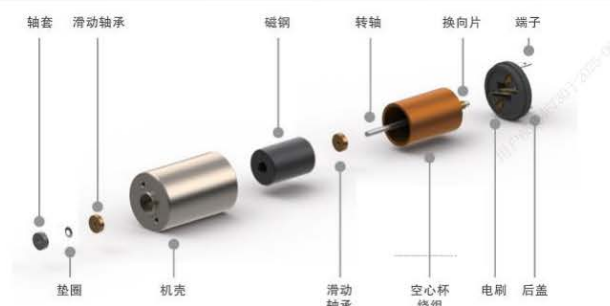
驱动系统的关键是微型电机，空心杯电机为目前主流方案，无刷有齿槽电机具备明显成本优势。

空心杯电机

① 定义&结构：属于一种新型微特电机，其采用了无铁芯转子，也叫空心杯型转子，这种新颖的转子结构彻底消除了因铁芯形成涡流而造成的电能损耗；同时空心杯电机重量和转动惯量大幅降低，从而减少转子自身的机械能损耗，由于转子结构变化而使电机的运转特性得到极大改善，不但具有突出的节能特点，更为重要的是具备了铁芯电机所无法达到的控制和拖动特性。

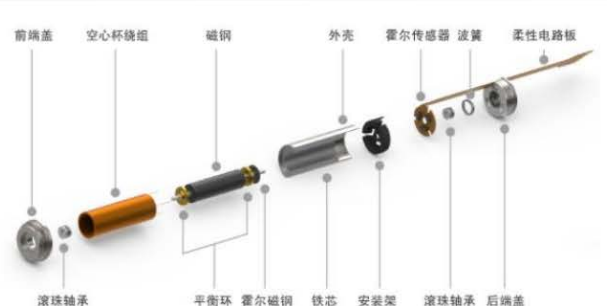
② 分类：按照其换向方式可以分为两种，分别为采用机械电刷换向的空心杯有刷电机和采用电子换向的空心杯无刷电机。空心杯无刷电机使用电子器件代替了电刷实现换相，避免了有刷电机运行时产生的电火花，减少了噪声，增加了电机的使用寿命，并且空心杯无刷电机具有无需维护和保养等特点，目前灵巧手主流方案为无刷空心杯电机，无刷空心杯电机又称为直流无刷无齿槽电机。

图：空心杯有刷电机结构



资料来源：鸣志电器官网，华西证券研究所

图：空心杯无刷电机结构



资料来源：鸣志电器官网，华西证券研究所

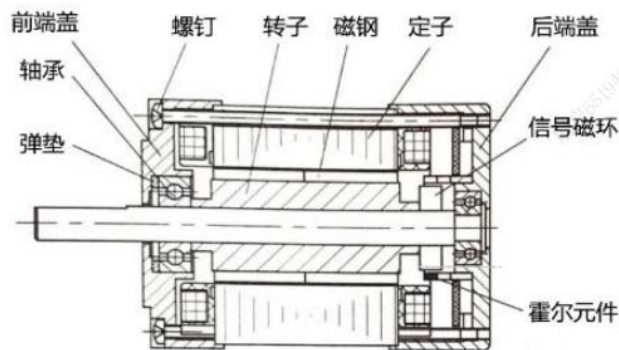
无刷有齿槽电机

① 定义&结构：直流无刷电机系统是由转子、定子以及电机控制部分组成。其中，转子主要由永磁体等构成，定子则由线圈绕组和铁心组成，电机控制部分由换相和检相元件以及无刷电机控制器组成。

② 分类：直流无刷电机分为有槽和无槽。最初的直流无刷电机是有槽设计，目前市场上大多数直流无刷电机仍是这种设计。相比于无槽，有槽设计的主要缺点在于存在齿槽扭矩效应的影响，导致电机转速不平稳，使平滑运动较难实现，尤其在低速运动时；其优点在于磁流量密度更高，扭矩生产更有效、更高效。

考虑性价比，无刷有齿槽电机应用有可能提升。Ø 8mm、Ø 10mm 空心杯电机单价大部分在 1000-2000 元不等，而直流无刷电机的单价范围大部分在 500 元以下，直流无刷电机具备明显的成本优势。后续若机器人降本需求迫切，无刷有齿槽电机的应用有可能提升，但仍需要综合考虑价格因素、平滑运行和齿轮消除因素对应用的影响等。

图：直流无刷电机结构图



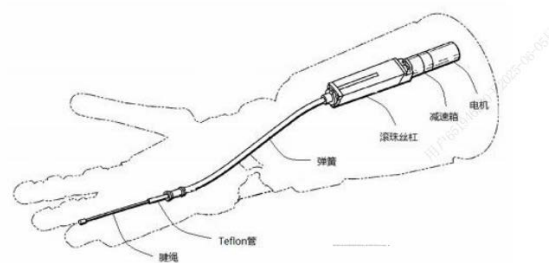
资料来源：鸣志电器官网，华西证券研究所

传动系统是将动力转化为手指关节运动。腱绳传动是目前应用最广泛的传动方式之一。灵巧手的传动方式较多，包括连杆传动、齿轮/蜗轮蜗杆传动、腱绳传动等，腱绳传动是目前灵巧手研究中应用最为广泛的一种传动方式。与其他传动形式相比，腱绳传动的最突出的优势在于它适用于远距离传动，在驱动器外置的腱驱动灵巧手指内，腱绳传动能够利用有限的空间进行远距离传动。

表：灵巧手不同传动方式对比

传动方式	特点
连杆传动	多用于工业和商业用途，多个连杆串并联混合的使用形式较为常见。手指的运动和动力由刚性连杆传递，能够抓取大型的物体且结构设计紧凑，可以完成包络抓取。但是在远距离的控制上就比较困难，容易发生弹射，抓取的空间较小。
齿轮传动	在工业机器人中应用比较广泛，它能获得稳定的传动比，传递效率高，可靠性更强。但齿轮本身的质量加大了整体的质量和惯性。
带传动	结构简单且传动平稳、可以起到缓冲作用，能在大的轴间距和多轴间传递动力，同时具有价格便宜、不需润滑和维护便利等优点
线绳驱动	线绳在一定程度上模拟了人手的肌腱结构，线绳传动使得大型的驱动器远离了执行机构，减轻末端的负载和惯量，提升了抓取的速度，它排布灵活，适合空间狭小且需要驱动自由度数目较多的传动场合。但它也有自身的局限性，如带负载能力弱，预紧力变化大，负载越大效率越低等

图：腱驱动原理



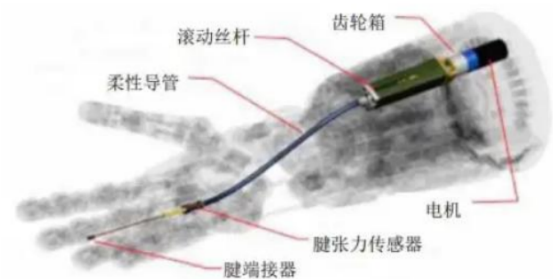
资料来源：冯敦超《腱驱动空间多指灵巧手控制技术研究》，华西证券研究所

腱绳传动使用腱绳传递动力。一般电机通过齿轮箱驱动滚珠丝杠，通过滚珠丝杠上的螺母把旋转运动转换为直线运动，腱绳形成一个腱环套在螺母上，螺母拉动连接在灵巧手指指骨上的腱绳，实现手指绕关节轴的转动运动。其中为了引导腱绳的走线，避免腱绳之间的干扰，采用腱绳外包装导管的形式。**腱绳传动系统中其他核心零部件有微型丝杠、腱绳、微型减速器等。**

图：灵巧手的腱绳传动方案介绍

传动方式	特点介绍
腱绳传动	优点： 腱一般具有很高的抗拉强度和很轻的重量，容易实现多自由度和远距离动力传输，节省空间和成本，是一种柔顺传动方式。 缺点： 腱本身的刚度有限，影响位置精度；控制时需要一定的预紧力，容易产生摩擦；腱的布局容易产生力矩和运动的耦合。这些因素都增加了手爪抓取控制的难度和复杂性。
	典型案例
	 Shadow Hand  PISA/IIT SoftHand

图：腱绳传动方案原理图

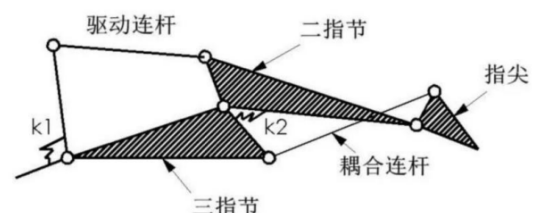


连杆传动系统通过一系列连杆和铰链连接来传递和转换力，并以此实现手指的运动。驱动器通过连杆系统直接作用于手指的关节。连杆传动中的指尖、二指节、三指节均为不同形状的三角形连杆，驱动连杆以及耦合连杆为直线形式，K1、K2 为复位弹簧，当 K1 处的驱动连杆顺/逆时针转动时，手指便相应做屈曲/前伸运动。目前 BeBionic Hand、因时机器人-RH56DFX 等使用连杆传动灵巧手方案。

图：目前夹爪or灵巧手常用方案

传动方式	特点介绍
连杆传动	优点： 采用平面连杆机构传动，刚度好、出力大、负载能力强、加工制造容易、易获得较高的精度，构件之间的接触可以依靠几何封闭来实现，能够较好实现多种运动规律和运动轨迹的要求。 缺点： 结构冗杂，笨重，柔性不足，抗冲击性能较弱，对手内空间配置要求较高
	典型案例
	 BeBionic Hand  因时机器人-RH56DFX

图：腱传动结构示意图



齿轮/蜗轮蜗杆传动中，驱动器通过齿轮或蜗轮蜗杆将旋转变成直线运动，拉动驱动器和手指之间的弹簧来驱动手指产生动作，手指部分采用金属连接，各个手指动作相互独立，具有多种的抓取构形，和别的多指灵巧手相比，驱动更加灵活，但是手指的闭合时间较长。但该传动方式结构冗杂，笨重，柔性不足，抗冲击性能较弱，对手内空间配置要求较高，手指的结构比较复杂，容易出现故障。

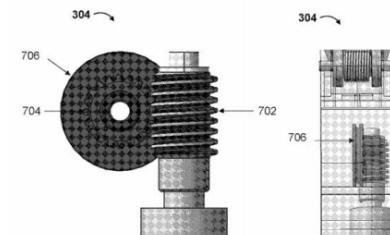
图：灵巧手齿轮/蜗轮蜗杆传动方案介绍

传动方式	特点介绍
齿轮/蜗轮蜗杆传动	优点：驱动器通过齿轮或蜗轮蜗杆将旋转变成直线运动，拉动驱动器和手指之间的弹簧来驱动手指产生动作，手指部分采用金属连接，各个手指动作相互独立，具有多种的抓取构形，和别的多指灵巧手相比，驱动更加灵活，但是手指的闭合时间较长。 缺点：结构冗杂，笨重，柔性不足，抗冲击性能较弱，对手内空间配置要求较高，手指的结构比较复杂，容易出现故障
	典型案例   Vincent Hand i-limb ultra Hand

图：灵巧手齿轮传动原理



图：灵巧手蜗轮蜗杆传动原理



感知系统是灵巧手的核心，需要配置传感器实现感知能力。

触觉感知技术对确保灵巧手与人、环境之间的安全交互以及智能控制起着至关重要的作用，其核心是触觉传感器。触觉传感器能够在非结构化的场景中为人们提供多模态信息感知，如接触状态（稳态、滑动、扭转等）、表面特征（粗糙度、纹理、曲率等）以及物理属性（温度、形状、重量、刚度等）。

为使灵巧手实现拟人化灵活操作，国内外灵巧手产品均呈现触觉传感器用量提升的趋势，比如宇树新一代灵巧手 Dex 5 应用的触觉传感器达 94 个，较上一代的 33 个，用量大幅提升；特斯拉也表示其新一代 Optimus 灵巧手的触觉传感器需求增加。

目前市场上灵巧手感知系统呈现“触觉+”的多模态发展趋势，例如帕西尼 DexH13 搭载了 1140 颗专业级 ITPU 多维触觉传感器，同时还集成了 800 万高清 AI 手眼相机；智元 SkillHand 引入基于 MEMS 原理的触觉感知和视触觉感知技术。

电子皮肤可通过高密度传感器、柔性材料与多模态感知能力的有机结合，赋予灵巧手近似人类皮肤的感知与交互能力。根据电子发烧友网，兆威机电表示在与触觉传感器厂商合作定制电子皮肤，实现力反馈数据融合。

触觉传感器市场以海外企业为主导，国内企业有所突破。据中商产业研究院，全球范围内柔性触觉传感器生产商主要包括 NovasentisTekscan,Inc.、JapanDisplayInc.(JDI)、BaumerGroup、FrabaGroup 等，2022 年，全球前五大厂商占约 57.1% 的市场份额。国内企业在技术研发和市场开拓方面不断努力，逐渐崭露头角；汉威科技在 250401 投资者关系活动记录表中表示，公司旗下控股子公司能斯达是国内柔性触觉传感工程化程度最好的公司之一，成功解决了柔性传感器的可靠性、一致性和批量供货问题。

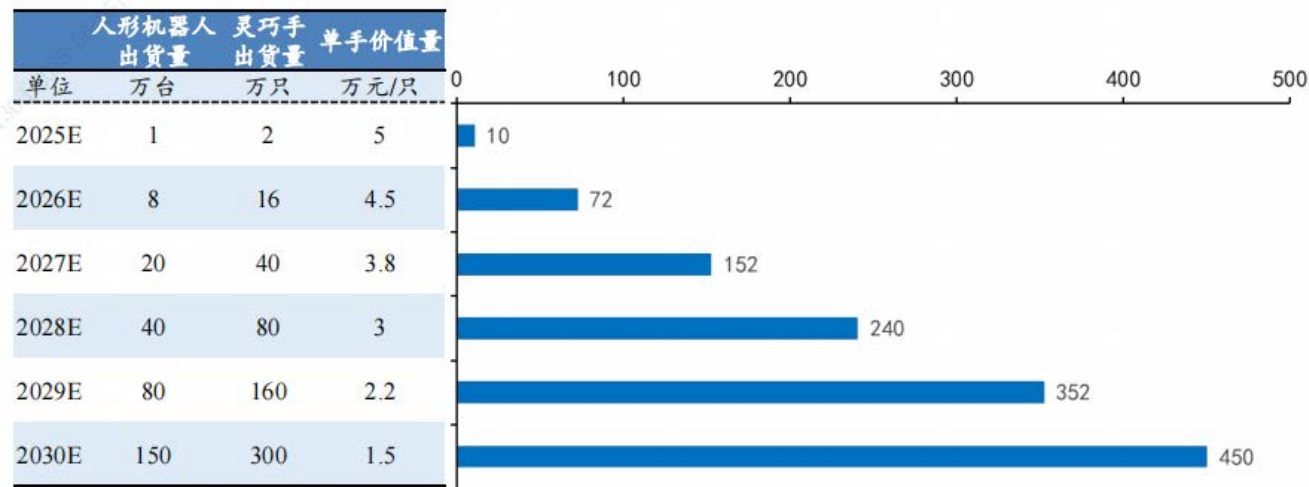
表：不同传感器优缺点对比

传感方式	原理	优点	缺点
压阻式	导电材料的电阻值与施加的力/压力成比例	1) 适合大批量生产 2) 设计简单	1) 脆弱性 2) 信号漂移滞后
压电式	压电材料生成的电荷与施加的力/压力成比例	1) 灵活性强 2) 适用于动态触觉感知	对温度敏感
电容式	压力使电容极板间介质压紧，导致电容变化	1) 灵敏度非常好 2) 可以设计为非常轻薄小巧	信号滞后，电路复杂
光学式	利用不同折射率介质的光强变化来测量压力	1) 不受电磁干扰 2) 灵活、灵敏、快速	1) 体积较大 2) 微弯曲造成信号失真
超声式	通过超声波监测表面的运动和滑动	1) 动态响应快 2) 分辨率高	传感器材料造成电路小型化困难
磁式	施加的力会引起磁通量密度的变化	1) 灵敏度高 2) 动态范围好 3) 无机械滞后性	使用仅限于非磁性介质

2、 市场潜在规模及市场驱动因素

根据华龙证券估计，参考特斯拉 Optimus Bot 出货指引，预计 2025/2030 年全年人形机器人出货量有望 1/150 万台，对应灵巧手出货量 2/300 万只，随着出货量增加，规模效应释放有望拉低灵巧手成本，由当前的 5 万元/只左右降至 1.5 万元/只。据此计算，预计 2030 年人形机器人灵巧手市场规模有望达 450 亿元，2025 到 2030 年 CAGR=114.11%。

图3：人形机器人灵巧手市场规模



数据来源：TechWeb，华龙证券研究所预测

■ 灵巧手市场规模（亿元）

根据 Statista 的预测数据，全球机器人灵巧手市场规模将由 2021 年的 11.6 亿美元增长至 2030 年的 30.35 亿美元，2022-2030 年间 CAGR 为 10.9%。同时，全球机器人灵巧手市场容量将由 2021 年的 50.75 万只增长到 2030 年的 141.21 万只，2022-2030 年间 CAGR 为 11.7%。

当前灵巧手技术路线尚未完全收敛，仍处于迭代阶段，以特斯拉 Optimus BotGen1 到 Gen3 的灵巧手为例，自由度从 11 个提升至 22 个，驱动电机选择、传动系统技术路线、传感器类型和数量和结构设计等方面均有巨大变化，性能表现也由仅能完成低精度的基础抓取和放置迭代为可实现自主接球等复杂、灵活操作。当前灵巧手在性能、成本等方面离最终大规模量产并在家用等复杂场景完美执行任务还有较大差距，在设计迭代过程中边际变化空间较大。

表2：特斯拉灵巧手代际变化

技术路线	发布时间	自由度	驱动方式	传动系统	感知系统	结构设计	性能表现	应用场景
Optimus Gen1	2022.9	11	6空心杯电机驱动	蜗轮蜗杆+腱绳	指节间霍尔效应传感器	欠驱动设计，6个执行器模块纵向分布于手掌内，具备防反驱特性	基础抓取和放置，负载20磅（约9公斤）	工业原型和实验室测试搬运等粗放型操作
Optimus Gen2	2023.12	11	混合驱动（无刷电机+空心杯）	腱绳长度增加10倍	新增全手指触觉传感器	增加触觉传感器，并改进了电机扭矩控制技术	精细化操作：可精准抓取鸡蛋、分拣电池、在遥控下叠衣服等；力反馈控制：触觉传感器提供实时力感信息，可处理易碎物品	工业：微小零件精准抓取与放置；家庭：传递饮料、零食；医疗：拿取药品、辅助器械操作
Optimus Gen3	2024.10	22	17线性执行器（电机+丝杠）	线性执行器+腱绳	触觉传感器全域覆盖	驱动器移至手腕，手部空间更大，灵活性更高	灵活性大幅提升，能完成更复杂操作，如自主接住、抓取物品等	复杂工业操作：拧螺丝、线性装配；复杂家务：叠衣服、切菜等；医疗护理：康复训练等；特种环境适应：灾害救援等；

虽然技术路线尚未完全确定，但整体的方向是往轻量化、高自由度、多模态感知和复合传动方向走。

表3：国内主要主机厂及灵巧手公司人形机器人灵巧手技术参数

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	抓握承载力	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	垂直方向3.5kg 水平方向4.5kg	单手94个触觉传感器，其中阵列式传感器数量12个
	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	触觉与视觉传感功能
	灵宝CASBOT	Casbot 01灵巧手	800g	/	/	5		12	/	5kg	/
	星动纪元	星动XIHAND1	/	/	齿轮	5		主动自由度12	/	/	触觉传感器
灵巧手公司	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HTPU触觉传感单元
	兆威机电	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
	魔法原子	MagicHand S01	580g	/	连杆	5		11	0.2mm	5kg	5个触觉传感器
	固时机器人	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
		RII56FTP	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
	大霍机器人	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
		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
		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

数据来源：宇树科技，魔法原子，高工机器人，智元机器人，傅利叶，钧舵机器人，大霍机器人，亿欧网，灵巧手，兆威机电，灵巧智能，帕西尼感知，Daimon Robotics 戴盟，强脑科技BrainCo，华龙证券研究所；注：自由度处括号外数字为总自由度，括号内数字为主动自由度+被动自由度

从目前技术方案上来看，更灵活，更智能，更柔性具备一定的指向性。

更灵活：高自由度+轻量化。灵活性的提升是灵巧手未来长时间完成复杂任务的必然需求，也是主流方案的迭代的方向，主要体现在两方面，一是自由度提升，灵巧手单手自由度由 6 个逐步提升至 12-20 个，部分方案达到 20 个以上，宇树自研灵巧手自由度由 Dex3 的 6 个提升至 Dex5 的 20 个；傅利叶 GR-2 灵巧手自由度由一代的 6 个翻倍至 12 个；二是电机等自重较大的部件配置位置向手掌或小臂移动，降低双手重量并优化空间配置，留出更多空间以搭载传感器等部件。

更智能：多模态感知能力进化。当前绝大多数灵巧手都搭载触觉传感器或提供配置选项，灵巧手的 L20、帕西尼感知的 DexH13GEN2 和智元机器人 Skill Hand 等可实现多模态感知，拥有更强的环境理解能

力，能够更好地处理柔软、不规则物体的识别与操作。

更柔性：复合传动方案上手。以 Optimus 灵巧手方案为例，蜗轮蜗杆的单一传动转向丝杠+腱绳的复合传动方案，一是可实现更高的自由度，二是自重更小的腱绳有助于提升灵活性，灵心巧手在研的 L30 由前两代的连杆传动转向腱绳传动，自由度提升至 25 个。

图：主机厂及灵巧手公司方案迭代和自由度提升



数据来源：傅利叶，宇树科技，灵心巧手，华龙证券研究所

除此之外，成本因素毫无疑问是未来发展的决定因素，在性能和成本之间寻找市场增量，才是制胜之道。

二、灵巧手产业链分析

1、上游：核心零部

灵巧手的核心零部件可以大致分为四部分：驱动模块、减速模块、传动模块和感知模块。

A：驱动模块：电机驱动是目前灵巧手主流的驱动方案，空心杯电机、无刷直流电机、无框力矩电机均有应用，目前空心杯电机为主流方案。

主动自由度提升带动驱动电机用量增加。Optimus Bot 以及国内主流灵巧手设计方案均为提升灵活性而增加自由度，主动自由度的提升需要增加对应的驱动电机以提供动力。在自由度提升的趋势下，灵巧手驱动电机用量增加。

性能角度出发，高精度+高功率密度+快速响应成为优选指标。考虑到实际应用场景需求，灵巧手驱动电机需要做到高功率密度、快速响应以及高控制精度，其他需要考虑的指标还包括自重水平、耐用性和噪音水平等；目前灵巧手方案多应用空心杯电机、直流无刷电机两类，其中空心杯电机无转子设计大幅提升了功率密度，但缺点是力矩输出不足以及成本较高；直流无刷电机（BLDC）虽然在功率密度、自重等方面不及空心杯电机，但功率更高，符合高负载设计需求，电机效率高，耐用性更强且成本较低。

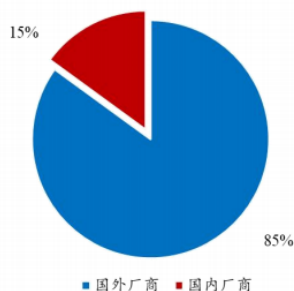
表：人形机器人主要应用电机类型对比

电机种类	图例	控制精度	低频特性	转矩特性	过载能力	运行性能	响应速度	悬停能力	经济性
步进电机		两相混合式步进电机的步距角一般为1.8°/0.9°	低速时易出现低频振动现象	输出力矩随转速升高而下降，低速时转矩较高，高速时转矩会急剧下降	一般不具过载能力	开环控制，启动频率过高或负载过大易出现失步或堵转的现象，停止时转速过高易出现过冲现象	200~400 毫秒	保持力矩较大，可以在不使用刹车的情况下保持在停止位置	结构简单，成本较低
无框力矩电机		高精度的无框力矩电机控制精度可以达到小于0.1°	转矩产生相对平滑，无显著的转矩脉动	具有高转矩输出，且随着频率增加，转矩性能逐渐减小	具有较强的过载能力	闭环控制，一般不会出现失步或过冲现象	几毫秒到十几毫秒	在无外部扭矩作用下能够保持稳定的转速	结构相对简单，成本高
永磁同步电机		高性能永磁同步电机可以达到小于0.1°	具备良好的低频特性	具有较高的转矩密度，使其在高速运行时仍然能够输出较大的转矩	具有较强的过载能力	闭环控制，一般不会出现失步或过冲现象	20~50 毫秒	悬停状态下能够保持稳定的输出，为悬停运动提供强大的支持	结构相对简单，成本高
空心杯电机		高性能的空心杯电机可以达到小于0.1°	具备良好的低频特性	具有较高的功率密度，温升低，效率高	具有较强的过载能力	闭环控制，一般不会出现失步或过冲现象	<28 毫秒	悬停状态下能够保持稳定的输出，为悬停运动提供强大的支持	结构相对简单，成本高

数据来源：《中国人形机器人产业发展蓝皮书（2024）》，华龙证券研究所

海外巨头占据超 8 成市场份额，人形机器人领域需求有望重塑市场格局。Maxon、FAULHABER 等海外巨头占据约 85% 的市场份额，国内主要厂商包括鸣志电器、鼎智科技、兆威机电、伟创电气、江苏雷利和雷赛智能等，国内厂商具备价格优势，有望随着工艺及设备突破，在人形机器人需求走强中抢占市场份额。

图：2023 年全球空心杯电机市场份额



表：国产空心杯电机厂商产品参数

厂商	直径范围	具体产品	直径	最高转速	价格
鸣志电器	10-30mm	ECH13048	13mm	70000rpm	1766-2020元 (13mm)
鼎智科技	10-42mm	10ZWWC25	10mm	40000rpm	-
兆威机电	6-42mm	MC1028	10mm	34300rpm	-
伟创电气	10-16mm	13mm 系列	13mm	87000rpm	-
江苏雷利	16-42mm	16ZWWC40	16mm	58000rpm	-

降本&国产替代关键在于绕线环节突破。绕线环节式空心杯电机生产的关键技术壁垒，也是降本以及国产化替代的核心。工艺方面，目前国产厂商普遍使用半自动化的卷绕生产，工艺繁琐，耗时较长，良品率低且线圈直径较小，限制其成本及性能，Maxon 等海外领先厂商多使用高度自动化的一次成型生产，随着国产厂商技术突破与改进，有望大幅提升生产效率，实现降本；设备方面，我国自主生产的空心杯电机绕线设备相对空缺，多为外采海外设备，固定成本较高。随着中特科技、勤联科技等国产设备厂商产品应用，有望降低空心杯电机厂商的生产成本。

考虑成本因素，**直流无刷电机有望成为空心杯电机的替代方案。**相较于有刷电机，直流无刷电机有高输出功率、低电噪声、高可靠性、高动态响应、电磁干扰少、更好的转速-转矩等优点，虽然体积较空心杯电机仍大，但内转子结构的直流无刷电机能够较好地满足对空间结构要求较高的灵巧手，而且其结构相对简单，在制造和维护方面也具备成本优势。电机后置对空间要求降低，直流无刷电机有望得到更广泛应用。在 Optimus Gen3 方案中，灵巧手驱动电机由 Gen2 的手掌转移至 Gen3 的小臂中，对驱动电机所占空间和自重要求有一定程度降低，在该方案中，Tesla 也采用了空心杯电机+直流无刷电机混用的路线。若该方案得到推广，直流无刷电机有望更多地应用于灵巧手驱动当中，帮助降低整机 BOM 成本。

表：鸣志电器空心杯电机与直流无刷电机价格对比

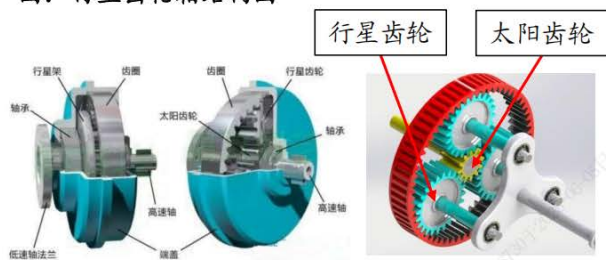
电机类型	型号	规格	目前单价	大规模量产单价预测
空心杯电机	DCU08017	8mm	1433-2530元	1000元以下
	DCU10017	10mm	1060-1767元	
	DCU10025	10mm	1007-1794元	
直流无刷电机	R16	16mm	418元	200元以下
	R22	22mm	307元	

B：减速模块：降低电机的转速从而输出更大的扭矩，主要包括行星减速器和谐波减速器，目前行星减速器为主流方案。

行星齿轮箱即行星减速机，是多个行星齿轮围绕一个太阳轮转动的机构，其传动比可以通过调整太阳轮、行星齿轮和内齿圈的齿数来实现，结构简单，易于设计和制造。而且，由于行星齿轮在传动过程中能够均匀地分担载荷，使得齿轮箱具有较高的传动效率和可靠性。行星齿轮箱的难点主要在于微型化和长寿

命。目前行星齿轮箱的低寿命是限制灵巧手寿命的核心因素。兆威机电自主研发核心工艺技术，在特定测试条件下齿轮箱寿命可达 5 万小时。

图：行星齿轮箱结构图



数据来源：鹏元科艺网站，东吴证券研究所

图：兆威机电6mm行星减速齿轮箱产品



数据来源：兆威机电官网，东吴证券研究所

减速器在传动系统中起到关键作用，它将电机的高转速低扭矩输出转化为低转速高扭矩输出，以驱动更大的终端负载。常见的减速器类型包括行星减速器、谐波减速器和 RV 减速器。

谐波减速器主要由波发生器、柔轮和刚轮三个基本构件组成，当波发生器转动时，会使柔轮产生弹性变形，从而与刚轮实现啮合和脱开的过程，进而实现减速传动。谐波减速器的核心难点在于柔轮材料配方与热处理工艺，以及对噪音、震动、精度和漏油等性能指标的严格把控。日本哈默纳科在谐波减速器领域拥有深厚的技术积累，竞争优势明显。目前精密减速器头部厂商哈默纳科已经成功落地灵巧手微型谐波方案。微型谐波方案在每个手指指关节分别采用 RSF-3B 和 RSF-5A 的 2 种微型谐波减速器，手指根部直径仅有 20mm。

表：目前灵巧手减速方案对比

减速方案	优点	缺点	代表方案厂商
行星减速器	1、结构简单 2、价格便宜	寿命较短，灵巧手维护成本较高	特斯拉灵巧手
谐波减速器	1、谐波传动精准 2、减速比高 3、结构紧凑	成本过高，抗冲击性低	哈默纳科全谐波方案 灵巧智能DexHand

C：传动模块：若电机直驱则仅需减速器，非直驱方案传动方案包括微型丝杠或蜗轮蜗杆（将旋转运动转为直线）搭配腱绳或连杆（将直线运动传递至关节），目前微型滚珠丝杠+腱绳为主流方案。

Optimus Gen3 有望提升丝杠+腱绳复合传动方案渗透率。Optimus 采用微型丝杠+腱绳的传动方案，自由度由 Gen2 的 11 个增加至 22 个，且从工厂整理、分拣以及小球抛接等实际表现来看，灵活度及承载力均表现不错，有望带动丝杠+腱绳的复合传动方案渗透率提升。

腱绳方案逐步成为国内外共识，UHMWPE 材料受青睐。腱绳传动是 Tesla、Shadow Robot 等海外厂商普遍采用的传动方案，国内厂商今年也逐步从齿轮/连杆等方案向腱绳传动过渡，灵巧手 Linkerbot 的 L30 以及灵巧智能的 DexHand 021 均采用腱绳传动方案，分别拥有 25/19 个自由度。

腱绳材料的选择直接影响灵巧手的操控精度、抗冲击能力和使用寿命等，当前主流的腱绳材料是高强度钢丝和超高分子量聚乙烯纤维（Ultra High Molecular Weight Polyethylene Fiber，即 UHMWPE 纤维），其中 UHMWPE 纤维强度高、自重低，模量较大，契合灵巧手对腱绳材料的需求。但缺点是抗蠕变性能以及

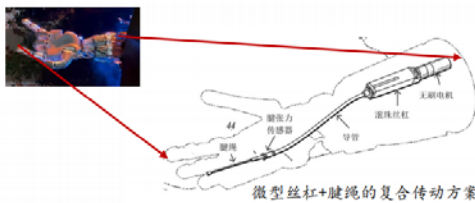
图：微型电机和齿轮箱构成的微型传动系统



数据来源：兆威机电招股说明书，东吴证券研究所

抗高温能力不及高强度钢丝，有望通过材料技术升级或 UHMWPE&高强度钢丝共用解决。

图10: Optimus Gen3灵巧手内部传动方案



数据来源：《腱驱动空间多指灵巧手感知与控制关键技术研究》，华龙证券研究所

表8: UHMWPE与其他高性能纤维主要参数对比

性能指标	UHMWPE	碳纤维	对位芳纶	间位芳纶	E-玻璃纤维
密度 g/cm ³	0.97	1.8	1.44	1.38	2.54
强度 cN/dtex	26.8-46.4	19.4-38.9	18.8-22.9	4.0-4.8	13.6
模量 cN/dtex	897-1773	1278-2556	486-833	100-200	287
断裂伸长率%	3.5	0.5-1.4	2.4	20.0-22.0	4.5
分解温度℃	140	3700	570	430	-
使用温度℃	<90	2000	250	204	-
成本（万元/吨）	约 10.97	约 65-70	20-30	10-20	0.4-0.5

数据来源：新材料纵横，华龙证券研究所

2030 年人形机器人灵巧手用 UHMWPE 市场规模或超 52.8 亿元。参考《腱驱动灵巧手指结构设计及其运动分析与试验》，假设驱动单个自由度所需腱绳为 2 根，按单手 22 个自由度、2030 年 150 万台人形机器人出货量计算，2030 年人形机器人灵巧手用 UHMWPE 市场规模有望达 39.6-66 亿元，取中值 52.8 亿元。除灵巧手外，UHMWPE 还可用于机器人关节、外壳增强、骨架材料等领域，人形机器人大规模应用后带动的需求量有望进一步提升。

中国 UHMWPE 纤维产能占比近 5 成，关注复合灵巧手要求的高端产能。中国是 UHMWPE 的主要生产基地之一，2023 年产量达 1.33 万吨，占全球总产量 2.68 万吨的 49.7%。UHMWPE 纤维全球市场集中度较高，2023 年 CR3 达 75.16%，头部企业包括美国埃万特、美国霍尼韦尔、日本 Toyobo 以及中国的九州星际、同益中、南山智尚等，其中南山智尚拥有自研抗蠕变型 UHMWPE 专利，拉伸强度达 42cN/dtex，处于国内第一梯队。

表：国内UHMWPE纤维主要厂商产能及性能指标

公司	产能	拉伸强度	产品规格	技术特点	机器人领域拓展
南山智尚	3600吨	42cN/dtex	100D-2400D	自研抗蠕变专利	高强度、耐磨损特性能够满足机器人传动系统要求
恒辉安防	3000吨 在建4800吨	42cN/dtex	50D-2400D	核心技术自研，拥有国际国内数十项专利	积极拓展机器人灵巧手腱绳以及外壳刚性材质应用
同益中	近8000吨	42.5cN/dtex	5D-6000D	参与制定抗蠕变UHMWPE标准	公司积极推进灵巧手腱绳材料的研发
九州星际	超30000吨	39cN/dtex	10D-3200D	-	-

数据来源：各公司公告，Wind，九州星际，华龙证券研究所

作为理想的刚性传动元件，行星滚柱丝杠应用仍受制于成本。滑动丝杠由于连续工作发热严重且传动效率较低，不符合灵巧手的使用需求。行星滚柱丝杠转速高、载荷高且体积小，是灵巧手的理想刚性传动元件，但其生产对原材料、加工工艺以及精度要求极高，叠加市场需求有限，无法形成规模效应，其成本维持高位，瑞士 Rollvis 旗下行星滚柱丝杠单价约为 2000 元。同为滚动丝杠的滚珠丝杠性能次之，但价格远低于行星滚柱丝杠。据 B 端采购网站数据，博特精工滚珠丝杠单价低至 112 元。

国产滚珠丝杠已形成批量供货能力，行星滚柱丝杠仍处于小批量试制阶段。国产厂商已形成滚珠丝杠批量供货能力，贝斯特高精度滚动丝杠副已于 2024 年达成小批量订单的滚动交付；浙江荣泰通过收购狄兹公司获得滚珠丝杠量产能力，后者已成熟应用机器人灵巧手所需的 3-5mm 滚珠丝杠工艺。随着下游需求提升以及国产厂商产能布局，行星滚柱丝杠有望通过降本提高渗透率及国产化率。

图：丝杠分类



数据来源：传动网，华龙证券研究所

表：不同类型丝杠优缺点

丝杠类型	优势	缺点	应用领域	相关公司
滑动丝杠	结构简单，制造方便，具有自锁性	连续工作发热严重，传动效率较低(30-50%)	智能家居、电动工具和汽车等消费类工具	机械领域常用传动元件，具备生产能力的公司较多
滚珠丝杠	与滑动丝杠相比摩擦力小，传动效率高，精度高	原材料、设计、生产工艺和制造成本均提高	工业设备、机床、汽车/飞机部件运动控制等	NSK THK HIWIN SKF AV 南京化纤 BEST
行星滚柱丝杠	传动效率高，高转速、高载荷、高刚度、高范围导程且体积更小，更方便维护	加工精度要求高，制造成本高	航空航天、武器装备、高精数控机床、机器人	Qinghai Zengji AG Hengli SCHAEFFLER

数据来源：传动网，华龙证券研究所

D：感知模块：触觉传感在灵巧手上的功能主要分为输入和输出两大类，1) 输入端：识别、输入信息，如：操作对象的状态和形状、大小和刚度等特征；灵巧手和操作对象的接触状态；检测操作对象的物理性质；2) 进行力的检测；3) 输出端：实现力的控制。装配触觉传感器后，灵巧手可以实现更复杂的操作任务，实现输出力（做功）+根据力的反馈做精细运动。如：“拖地”这一操作需要识别拖把本身和拖把的大小，还需要用力拖地；抓取拖把时需要判断和控制抓握力的大小，如果抓握力过小，拖把可能会滑落；如果抓握力过大，可能会损坏物体。基于不同的工作原理，可以将触觉传感器分为压阻式、电容式、压电式、光学式和磁触觉感知式等。

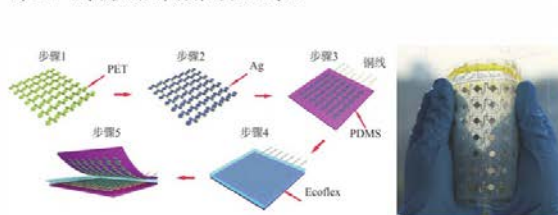
前灵巧手主流搭载高分辨率传感触觉技术并逐步迭代至电子皮肤，其中宇树科技、优必选和傅利叶 3 家主机厂的自研方案均采用阵列式触觉传感器排布。

表：不同原理触觉传感器对比分析

分类	机制示意图	优点	缺点
压阻式		灵敏度较高，过载承受能力强，频率响应高，空间分辨率高，噪音干扰小，结构简单，成本低	体积大，不易实现微型化，可重复性差，功率消耗高，存在温度敏感和滞后现象
压容式		线性度好，制造成本低，实时性高，灵敏度低，空间分辨率高，动态范围宽，功耗低	物理尺寸大，不易集成化，易受噪声影响，稳定性差，测量电路复杂
压电式		动态范围宽，灵敏度高，动态特性好，响应时间快，结构简单和稳定性好	空间分辨率差，测量电路复杂，仅适用动态力检测
摩擦电式		制作成本低，结构简单，输出电压高，高灵敏度，检测范围宽，响应速度快，线性度好	只能检测动态力，对放大电路的性能有较高要求

数据来源：《柔性触觉传感器智能感知技术与应用研究进展》，华龙证券研究所

图：电子皮肤器件制备过程及成品



数据来源：尹宝凡，杨静等《柔性触觉传感器智能感知技术与应用研究进展》，华龙证券研究所

柔性触觉传感器仍由海外厂商主导。受限于起步时间、材料供应、芯片设计和需求不足等，国产触觉传感器技术相对滞后。柔性触觉传感器市场由海外厂商领导且市场集中度较高，2022 年 CR5 约 57.1%，头部厂商包括 Tekscan、Pressure Profile Systems 和 Sensor ProductsInc.等。

国产替代进行中，关注自主厂商机器人领域应用落地。部分国产厂商布局柔性触觉传感器，申昊科技旗下用于人形机器人的电子皮肤产品已处于小批量适用阶段，汉威科技开发的柔性压力温度一体化传感器可应用于消费电子、泛医疗和人形机器人领域；非上市公司帕西尼感知研发的多维触觉传感器已小批量应用于机器人和车机等场景。

表：部分厂商柔性触觉传感器产品布局

厂商	相关产品	应用领域	产品进展
纽迪瑞	柔性压力传感器	消费电子、家居家电、汽车、机器人等	产品已上市
钛深科技	柔性电容式传感技术	医疗、消费电子、机器人及智能汽车	获小米长江产业基金投资
汉威科技	柔性压力温度一体化传感器	消费电子、泛医疗、人形机器人等	子公司能斯达专注柔性微纳传感器研发，与小米、比亚迪、宇树科技进行技术合作
申昊科技	电子皮肤	机器人	处于小批量适用阶段
奥迪威	压电式电子皮肤技术储备	汽车、人形机器人	成立合资子公司奥感微，专注新型柔性传感器的研究、生产、销售
柯力传感	柔性触觉传感器	机器人、医疗设备等	国内应变式传感器龙头，公司开发了三轴力、六轴力等多维力传感器，可用于机器人手臂运动与工作载荷监测
帕西尼	多维触觉传感器	3C电子、车机产线、物流仓储、医疗康养、工业制造、商业服务等	产品已小批量应用于机器人、车机等场景

数据来源：佐思汽研，华龙证券研究所

2、 中游：灵巧手制造

中游企业专注于灵巧手的设计与生产，以下介绍几个典型的灵巧手厂商案例：

A：因时机器人-RH56BFX/RH56DFX/FTP 系列

- 因时机器人灵巧手具备6个自由度、12个关节数、驱动方式为电机、传动方式为连杆。RH56BFX、RH56DFX系列灵巧手产品的主要区别在于，前者抓握力小但手指弯曲速度快，而后者抓握力大但手指弯曲速度慢。据高工机器人公众号，2024年8月，因时机器人正式发布了灵巧手产品的全新系列“FTP系列仿人五指灵巧手”，单只零售价为4.8万元；相较于之前的系列，FTP系列的创新升级主要在于触觉感知、指尖抓握力和寿命方面：①**触觉感知**，相较于以往两个系列灵巧手仅内置力传感器的设计方案，FTP系列在此基础上首次集成了触觉传感器模块，单手指3个、四指各含2个、手掌1个，共计12个触觉传感器布置于手掌表面；②**指尖抓握力**，五指指尖输出力均达到了3kg；③**寿命方面**，可达百万次以上。

表：因时机器人灵巧手参数、性能情况

产品名称	RH56BFX系列	RH56DFX系列	FTP系列
手指数	5	5	/
自由度	6	6	/
关节数	12	12	/
驱动方式	电机	电机	电机
传动方式	连杆	连杆	/
拇指最大抓握力	6N	15N	五指指尖输出力均达到了3kg
四指最大抓握力	4N	10N	
拇指弯曲速度	150度/S	70度/S	/
四指弯曲速度	570度/S	260度/S	/
感知技术	6个压力传感器	6个压力传感器	力传感器+触觉传感器

资料来源：因时机器人官网、因时机器人公众号、高工机器人公众号，华西证券研究所

B：帕西尼-DexH5/DexH13 系列

- 帕西尼灵巧手有DexH5、DexH13系列，均为4指灵巧手。相较于DexH5系列，DexH13系列的创新升级主要在于自由度、感知技术、寿命方面，具体来看：①**自由度**，DexH5仅有5个主动自由度，DexH13增加至13个；②**感知技术**，DexH5有180个多维度触觉传感器，而DexH13搭载了1140个ITPU触觉传感单元、800万像素高清AI手眼相机，实现了多维触觉+AI视觉双模态；③**寿命方面**，DexH5使用寿命为10万次，而DexH13可进行超百万次按压使用。

表：帕西尼灵巧手相关参数/说明

产品名称	DexH5系列	DexH13系列
手指数	4	4
主动自由度	5	13
自由度	12	/
驱动方式	直线电机驱动	电机驱动
感知技术	多维度触觉传感器 180 个	1140个ITPU触觉传感单元； 多维触觉+AI视觉双模态

资料来源：帕西尼官网，华西证券研究所

图：DexH13系列产品示意图



资料来源：帕西尼官网，华西证券研究所

C：灵巧智能-DexHand 021 量产版

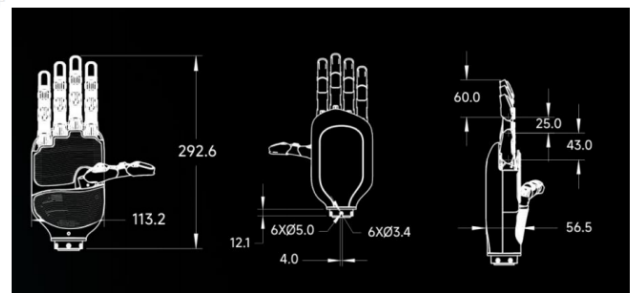
- 灵巧智能2024年10月宣布灵巧手DexHand 021全球发售，首批50只体验价为6.8万元/只。DexHand 021量产版为5指灵巧手，共有15个关节，19个自由度（含12个主动自由度和7个被动自由度），23个传感器（位置、触觉、力觉），采用电机驱动、腱绳传动的方式，使用寿命超15万次。据灵巧智能公众号，捷昌驱动与灵巧智能达成合作联合投资成立了浙江灵捷机器人零部件有限公司，专注于机器人科技领域内零部件，如机器人灵巧手、关节模组及驱动器等核心零部件的研发与制造，目前已与国内外下游的主机厂积极合作开发相关产品；已建成一条具备月产2000只灵巧手的中试线，为大规模量产做好充分准备。

表：DexHand 021相关参数

产品名称	DexHand 021量产版
手指数	5
主动自由度	12
自由度	19
关节数	15
驱动方式	电机
传动方式	腱绳
负载	5kg
感知技术	位置、触觉、力觉

资料来源：灵巧智能官网，华西证券研究所

图：DexHand 021结构尺寸示意图



资料来源：灵巧智能官网，华西证券研究所

D：星动纪元-XHAND1

- 星动纪元于2024年11月发布XHAND1，具体情况如下：①**自由度&手指情况**：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，食指多一个侧摆自由度，可以做旋转的动作；拇指实现和小拇指对指，增强抓握的稳定性。②**驱动/传动方式**：采用纯齿轮准直驱传动，主动关节均在本位且全部解耦，同时每个关节均可以反驱；关节高反驱透明度与低阻尼的特性，可以直接采用电流环做力控。③**感知技术方面**：五个指尖均配有阵列式高精度高分辨率触觉传感器，每个指尖上采集120-300个均匀分布的三维力信息，最小分辨率为0.05N，可以支持机器人做更精准的力控，同时拥有更多的感知能力比如接触觉、滑动感知，并通过面阵力的解算可以得到接触面表面纹理更多信息；每个触觉传感器上有20个分布的温度阵列，可以感知到接触物体的温度。

表：XHAND1相关参数

产品名称	XHAND1
手指数	5
主动自由度	12（拇指和食指3个、其他三指均2个）
最大握力	15N（指尖）；80N（整手）
最大负载	5kg（指尖）；25kg（整手）
驱动方/传动方式	齿轮和电机驱动
感知技术	每个手指配备一个高分辨率(>100点)触觉阵列传感器提供精确的三维力触觉和温度信息

资料来源：XHAND1官网，华西证券研究所

图：XHAND1示意图-12个自由度分布



资料来源：XHAND1官网，华西证券研究所

➤ 兆威机电于2024年11月发布灵巧手ZW hand，配备17个主动执行单元，其中单指节拥有3个及以上主动执行单元，整手的关键部组件全自主研制。每个指节的控制采用电机搭配微型减速器和丝杆驱动；微驱控制器主频高达600M，结合高密度、高集成与布局优化的PCB设计，实现精确的动力输出和快速响应，充分提升仿人灵巧手的灵巧性。

	相关参数/说明
手长	238.5mm
手宽	88mm
手厚	40.7mm
手指数	5
自由度	17或20个自由度（17个主动执行单元，其中单指可达3个及以上主动执行单元）
驱动/传动系统	每个指节的控制采用 电机搭配微型减速器和丝杆驱动
感知系统	*公司将继续研究更符合人体工学的 电子皮肤

17	3	15
整手自由度 >	单指自由度 >	活动关节



命名规则:

D	H	11	6	200A
品牌	系列	系列	系列	系列

① 品牌
 ② 系列
 ③ 系列
 ④ 系列
 ⑤ 系列

D: Dev(定制)
 H: Hand(手)
 11: 11自由度
 6: 6主动自由度

成本

2025 Q1

DH11H6普及型 11DOF/6DOA

价值主张: 11自由度、高性价比、高性价比

关键特性:

- 6主动自由度(4个机电+2个磁致伸缩)
- FOC电机与磁致伸缩力位置混合控制算法
- 400个磁致伸缩线圈
- 400个磁致伸缩线圈 (90度)
- 控制带宽1000次/秒
- 20种动作手势
- 轻量化设计, 整机重量490g
- 支持手势识别

性能与功能

2025 Q2

DH2015高端型 20DOF/15DOA

价值主张: 20自由度、高度灵巧、高精度

关键特性:

- 15主动自由度(4个机电+11个磁致伸缩)
- FOC电机与磁致伸缩力位置混合控制算法
- 400个磁致伸缩线圈
- 15kg负载(100度)
- 控制带宽1000次/秒
- 26种动作手势
- 轻量化设计, 整机重量650g
- 支持手势识别

性能与功能

2025 Q3

DH2012通用型 20DOF/12DOA

价值主张: 20自由度、高度灵巧、高性价比

关键特性:

- 12主动自由度(4个机电+8个磁致伸缩)
- FOC电机与磁致伸缩力位置混合控制算法
- 400个磁致伸缩线圈
- 15kg负载(100度)
- 控制带宽1000次/秒
- 26种动作手势
- 轻量化设计, 整机重量550g
- 支持手势识别

15

G：宇树科技-Dex 5 灵巧手

- 宇树科技于2025年4月1日发布Dex 5灵巧手，以Dex 5-1P为例，具体情况如下：①**自由度&手指情况**：单手有20个自由度（16个主动自由度+4个被动自由度）；其中，拇指4个自由度均为主动的、剩余手指均为3主动自由度+1被动自由度；②**驱动/传动方式**：采用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；应用的零部件包括高功率密度空心杯电机、高功率密度驱动器与高精度编码器、低阻尼小间隙减速器等。③**感知技术方面**：单手有94个触觉传感器，覆盖指尖、指腹、指根、掌心。
- 相较于宇树科技之前发布的Dex3-1，主要区别体现在：
 - 自由度增加**：Dex3-1的单手自由度为7个，而Dex 5-1P自由度达20个。
 - 驱动/传动方式变化**：Dex3-1采用的是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；而Dex 5-1P采用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。我们认为，其中复合传动方式的应用值得关注。
 - 传感器数量增加&覆盖范围更广**：Dex3-1单手应用33个压力传感器、分布于掌心、指腹、指尖；Dex 5-1P单手覆盖应用94个触觉传感器，除掌心、指腹、指尖外，还覆盖了指根。

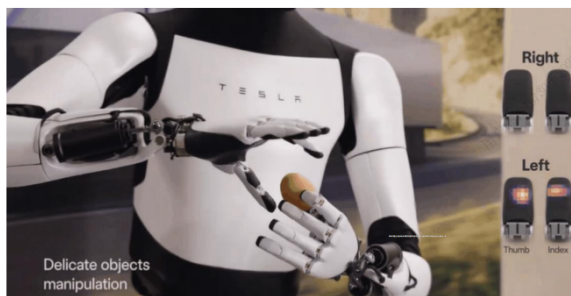
表：宇树科技灵巧手产品参数对比图

产品名称	Dex 3-1	Dex 5-1	Dex 5-1P
手指数	3	5	5
自由度	7自由度	20自由度(16主动+4被动)	
传动机构	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	
负载情况（常温掌面向下，抓5cm的圆形硬性物体）	最大重量500g	最大重量3.5kg	
负载情况（常温掌面向左，抓5cm的圆形硬性物体）	最大重量500g	最大重量4.5kg	
阵列传感器数量	9个（共33个压力传感器）	/	12个（共94个压力传感器）
阵列分辨率	2*2（掌心）*3 2*2（单指腹）*3 3*1（单指尖）*3	/	2*5（掌心） 2*3（单指腹）*5 2*3（单指尖）*5 2*3（单指根）*5
示意图			

H：特斯拉 Optimus 灵巧手

- Optimus灵巧手持续进行迭代更新**。据EVH1000机器人公众号，2024年11月28日，特斯拉机器人官方账号发布Optimus可接住扔给它的网球的视频新动态，特斯拉Optimus工程师Milan Kovac解释，Optimus灵巧手的主要变化：
 - 自由度增加**，由原来的11个增加至22个；
 - 驱动装置前置**；
 - 触觉传感器需求增加**；
 - 需要通过**肌腱**实现更精细的控制等。

图：特斯拉第二代Optimus可实现用手捏鸡蛋



资料来源：36氪，华西证券研究所

表：特斯拉Optimus灵巧手迭代进程

时间	详细说明
2022/10	Optimus原型机发布，手部有6个电机、11个自由度。
2023/03	Optimus 的手部灵活性和抓握能力有所改进，使其能够处理较小的物体和执行更精细的操作，如拾取杯子、使用工具等。
2023/09	Optimus 的手部功能增强，能够执行更复杂的操作，如精细抓取和轻拿轻放物体。视频中展示了机器人在复杂任务中的灵活性，例如处理易碎物品和完成精细的机械任务。
2023/12	发布第二代 Optimus，配备了全新的双手，能够抓握更重的物体并进行更加精细的操作；演示视频中，机器人用手指捏起鸡蛋的能力受到广泛关注。
2024/11	特斯拉机器人官方账号发布视频新动态：Optimus已经可以稳稳地接住迎面抛来的网球并放下，手指可相对灵活地弯曲；自由度由11个增加至22个。

资料来源：智东西公众号、EVH1000机器人公众号、人形机器人联盟公众号，华西证券研究所

3、下游：应用场景

灵巧手作为人形机器人与环境交互的核心部件，直接决定其在实际场景中的应用效果。随着人形机器人技术从实验室走向商业化，灵巧手的下游应用场景迅速拓展，覆盖工业制造、医疗及家庭服务等领域。

工业制造领域

- **装配作业**
 - 在电子设备制造中，灵巧手可以精确地拿起微小的电子元件，如芯片、电阻、电容等，并按照设计要求将其准确地安装到电路板上。其高精度的操作能力能够避免元件的损坏和安装错误，提高产品的质量和生产效率。例如，在智能手机的生产线上，灵巧手可以完成摄像头模组、指纹识别模块等精密部件的装配工作。
 - 在汽车制造行业，灵巧手可用于发动机、变速器等复杂零部件的装配。它能够适应不同形状和尺寸的零件，灵活地进行拧紧螺丝、插接线路等操作，大大提高了装配的自动化程度和生产效率。
- **物料搬运与分拣**
 - 在物流仓储中心，灵巧手可以与自动化搬运设备（如 AGV 小车、机械臂等）配合，实现对不同类型货物的抓取、搬运和分拣。它能够根据货物的重量、形状和材质，自动调整抓取力度和方式，确保货物在搬运过程中的安全。例如，在电商仓库中，灵巧手可以快速准确地从货架上抓取商品，并将其放置到指定的包装区域。
 - 在制造业的原材料仓库中，灵巧手可以对金属板材、塑料颗粒等原材料进行分拣和搬运。它能够识别不同规格和型号的原材料，并将其准确地送到相应的生产线上，提高了原材料的供应效率和准确性。
- **质量检测**
 - 灵巧手可以配备各种传感器，如视觉传感器、力传感器等，对产品进行质量检测。在机械加工领域，灵巧手可以拿起加工好的零件，通过视觉传感器检查零件的尺寸精度、表面质量等，同时利用力传感器检测零件的硬度和强度等物理性能。如果发现产品存在质量问题，灵巧手可以将其标记出来，以便进行后续的处理。

医疗领域

- **手术辅助**
 - 在微创手术中，灵巧手可以作为医生的得力助手，进入人体内部进行精细的操作。它能够模拟人类手指的灵活运动，完成切割、缝合、夹取等手术动作，减少了手术创伤和出血量，提高了手术的安全性和成功率。例如，在心脏搭桥手术中，灵巧手可以在医生的操控下，精确地完成血管的吻合操作。
 - 在神经外科手术中，灵巧手的高精度操作能力尤为重要。它可以避开重要的神经和血管，对脑部病变组织进行切除或修复，降低了手术风险。
- **康复治疗**
 - 对于手部功能障碍的患者，灵巧手可以作为康复训练设备，帮助患者恢复手部的运动功能。它可以根据患者的康复进度和需求，设置不同的训练模式和难度，引导患者进行手指的屈伸、抓握等动作训练。通过反复的训练，患者的肌肉力量和关节活动度可以得到逐渐恢复。
 - 灵巧手还可以配备生物反馈系统，实时监测患者的肌肉电信号和运动状态，为康复治疗提供科学依据。医生可以根据监测结果，调整康复治疗方案，提高康复效果。
- **假肢制造**
 - 现代假肢技术中，灵巧手的应用为截肢患者带来了更好的使用体验。灵巧手假肢可以根据患者的残肢情况和个人需求进行定制，具备多种抓取模式和力度调节功能。患者可以通过肌电信号或其他控制方式，灵活地控制假肢手的动作，实现抓取物品、书写、打字等日常生活操作。

家庭服务领域

- **家务协助**
 - 在家庭清洁方面，灵巧手可以与清洁机器人配合，完成一些精细的清洁任务。例如，它可

以拿起抹布擦拭家具表面、窗户玻璃等，或者清理一些狭窄缝隙中的灰尘和杂物。

- o 在厨房中，灵巧手可以帮助人们完成食材的处理工作，如削皮、切菜、搅拌等。它能够根据预设的程序或用户的语音指令，准确地完成各项操作，减轻了人们的家务负担。
- **老人与儿童照护**
 - o 对于行动不便的老人，灵巧手可以协助他们完成一些日常生活中的小事，如拿取物品、开关门窗等。它还可以配备健康监测设备，实时监测老人的生命体征，如心率、血压等，并将数据传输给家属或医护人员。
 - o 在儿童照护方面，灵巧手可以作为玩具或教育工具，陪伴儿童玩耍和学习。它可以与儿童进行互动游戏，如搭积木、拼图等，激发儿童的创造力和想象力。同时，灵巧手还可以通过语音交互功能，为儿童讲故事、教知识，促进儿童的智力发展。
- **智能交互**
 - o 灵巧手可以与智能家居系统集成，实现更加自然和便捷的人机交互。用户可以通过手势或语音指令，让灵巧手控制家中的电器设备、灯光、窗帘等。例如，用户只需做一个打开窗帘的手势，灵巧手就可以识别并执行相应的操作，为用户带来更加智能化的生活体验。

三、 技术趋势及投资机会

灵巧手在机器人研发工程和整机成本中占据重要份额。国内外企业均在积极布局，灵巧手产品处于持续迭代过程中。灵巧手是人形机器人的落地关键，后续的更新迭代仍具备较高的技术难度，具备灵巧手本体设计、生产能力的厂商有望在产业链中具备较大的话语权，盈利能力或处于领先水平。此外，为了提升灵巧手的功能性，关键零部件例如丝杠、减速器、电机、腱绳、触觉传感器等的应用需求也将增加，持续看好产业布局领先的技术优势企业。

当前时点关注灵巧手主要点是技术路线尚未完全收敛，仍处于持续迭代阶段，方案边际变化或带来核心零部件的边际增量。从当前主流方案迭代方向出发，重点关注以下灵巧手核心环节：

驱动电机：高价值量环节，自由度提升带动单手数量增加。随着自由度提升，灵巧手单手所需驱动电机数量增加。空心杯电机体积小、功率密度高、响应速度快，是灵巧手的理想驱动电机，但当前成本较高，有望在国产设备突破和下游需求拉动下实现降本以及国产替代；直流无刷电机技术指标逊于空心杯电机，但成本较低，Optimus Gen3 将驱动电机位置从手掌转移至小臂，空间要求降低，直流无刷电机应用率有望提升。

传动系统：丝杠+腱绳复合传动方案有望成为主流。在 Optimus Gen3 引领下，腱绳+丝杠的复合方案有望成为灵巧手传动系统迭代方向。其中腱绳传动能够为灵巧手提供更高的自由度和灵活性并减少空间占用和重量，UHMWPE 是腱绳的理想材料，2030 年灵巧手用

UHMWPE 市场规模有望达 52.8 亿元，国产厂商南山智尚等已有可用于灵巧手的产品；行星滚柱丝杠是理想的灵巧手传动元件，但仍受制于成本过高，国产厂商仍处于小批量试制阶段，滚珠丝杠作为低成本替代方案，国产厂商已形成批量供货能力。

触觉传感器：高技术壁垒的灵巧手必备环节。触觉传感器逐步成为灵巧手的必备部件，且逐步从指尖搭载向全手阵列式搭载的电子皮肤迭代。国产厂商有望在灵巧手下游需求拉动下逐步实现国产替代，国内领先的厂商包括非上市公司的帕西尼科技以及汉威科技和申昊科技等。

从风险角度而言，当前人形机器人还处于研发阶段，虽然部分机器人已经展现出较好的商业应用前景，但总体成本仍然偏高，存在人形机器人降本速度及量产推进速度不及预期的风险。灵巧手作末端执行器，需要搭载在人形机器人本体上，整体需求空间与人形机器人本体需求空间保持一致。若人形机器人量产不及预期，则灵巧手需求可能不及预期。人形机器人发展仍面临大脑模型性能不足、小脑运控算法表现欠佳、硬件耐久度及表现不及预期和成本较高等障碍，若其大规模量产时间不及预期，可能影响产业链相关公司

业绩表现；目前灵巧手行业仍处在多技术路线并行的时期，技术路径尚未收敛，若灵巧手技术进步不及预期，则可能影响产业链公司发展。

参考资料：

- 1、2025-04-23_东吴证券_灵巧手行业深度报告：灵巧手赛道百花齐放，关注工艺收敛进程中的产业链机遇；
- 2、2025-05-19_华龙证券_人形机器人行业深度报告：灵巧手技术路线逐步收敛，关注边际增量环节；
- 3、2025-05-19_国海证券_灵巧手专题系列报告 2：传感器-从第一性原理出发，灵巧手如何获得多模态“感觉”；
- 4、2025-05-27_华西证券_灵巧手：人形机器人核心执行末端；
- 5、2024 年中国机器人灵巧手产业链图谱研究分析-中商产业研究院