

灵巧手持持续迭代，关注技术路线收敛中的边际增量 ——人形机器人行业深度报告

证券分析师：黄细里

执业证书编号：S0600520010001

证券分析师：郭雨蒙

执业证书编号：S0600525030002

二零二五年六月二十七日

- **下游场景推动灵巧手向仿人手迭代，市场前景广阔。** 2024 年灵巧手市场规模达 17.06 亿美元，预计 2025/2030 年将增至 19.21/30.36 亿美元。工业机器人常用二指灵巧手执行简单夹取，人形机器人需求促使其向 4 指 / 5 指及高自由度发展。
- **从驱动方案来看，欠驱动、外置/混合置+电驱为主流，电机或由空心杯向无刷有齿槽切换。** 具体来看，1) 欠驱动靠牺牲精度来降本和加速落地，应用更为广泛；2) 外置驱动器和混合置牺牲一定精度短期简单场景落地更快。3) 电驱动因模块化设计、精度高等特点为当前主流方案。4) 特斯拉第三代灵巧手以无刷有齿槽电机替换部分空心杯电机，电机方案或将切换。
- **传动方案涵盖齿轮/蜗轮蜗杆、连杆、丝杠、腱传动杆四类，各有优劣，均可映射至实际产品。** 其中，**腱绳+丝杠复合传动**可在保证灵活性的基础上提高传动精度，映射产品为特斯拉第三代灵巧手，契合未来趋势。
- **从感知方案来看，多模态是既定趋势。** 1) 力/力矩传感器趋于应变片式并向六维发展；2) 柔性传感器（电子皮肤）技术路线多元，聚焦提升灵敏性和稳定性；3) MEMS 压力传感器中，压阻式更成熟，多用于灵巧手指尖部位。
- **特斯拉灵巧手迭代明确绳驱主流，实现自由度翻倍、传动升级、驱动切换及多模态感知突破。** 国内外产品普遍追求高自由度与多模态感知，凸显行业发展趋势。
- **投资建议：** 推荐减速器+丝杠链企业【福达股份】，关注微型丝杠链【浙江荣泰】、【五洲新春】、【震裕科技】，关注腱绳链【大业股份】、【南山智尚】，推荐T链头部企业【拓普集团】。
- **风险提示：** 人形机器人核心技术发展不及预期；人形机器人产业化落地进程不及预期；人形机器人零部件行业竞争加剧；人形机器人技术路线变更。

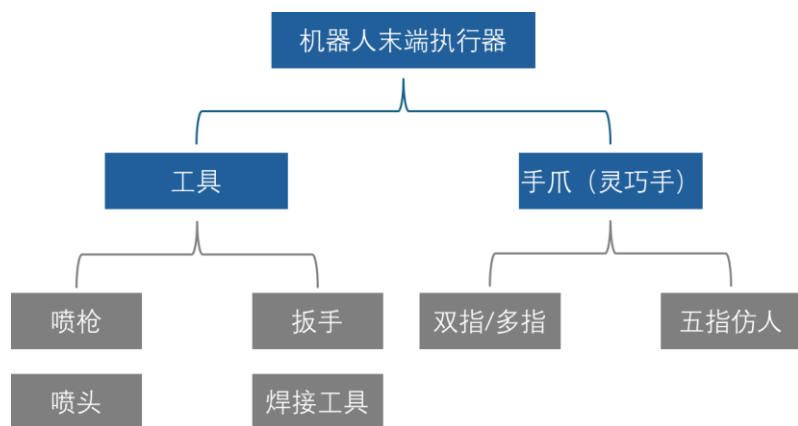


- 1.灵巧手：人形机器人与外界交互的媒介
- 2.灵巧手方案百花齐放，路线仍未收敛
- 3. 从特斯拉灵巧手迭代展望未来趋势
- 4. 投资建议及风险提示

1. 灵巧手：人形机器人与外界交互的媒介

- **灵巧手是一种末端执行器**，相较于传统的工业机器人，其将手腕连接处的工具替换为手爪。
- **人形机器人应用场景更为复杂，对灵巧手精细化提出要求，使得其从双指/多指向五指仿人手进行迭代**。应用于工业机器人的双指/多指手爪功能较为单一，一般只支持夹取、上下料等简单工作；而人形机器人的灵巧手需要实现更为精细化的功能，比如捏取易碎物品、可适应不同物品的特性和形状等，故而要求其仿人手打造。

图：机器人末端执行器分类



图：灵巧手演变

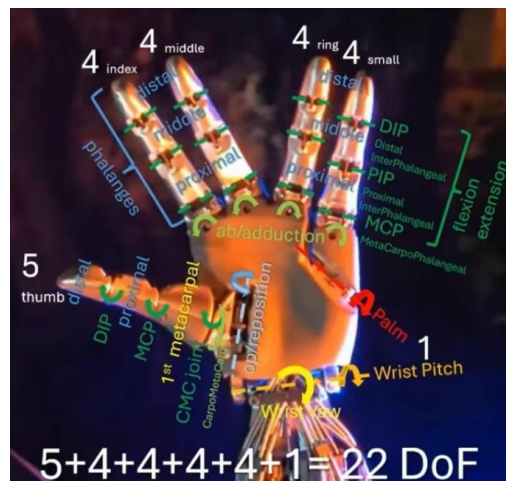


- **手的十三种基本的功能**：悬垂、托举、触摸、推压、击打、动态操作、球形掌握、球形指尖握、柱状抓握、勾拉、二指尖捏、多指尖捏、侧捏等。手的功能建立在手与上肢的皮肤、筋膜、关节、肌肉等“执行器官”完整的基础上，并实现于神经系统多层级的精密调控与信息整合处理。
- **人手自由度共有21个（不考虑手腕关节）**：从解剖学角度看前端四指每个手指有4个自由度，其中掌指关节(MCP)具有2个轴线垂直相交的转动自由度，合计16个；大拇指5个，合计21个。
- 灵巧手为了实现人手所能实现的功能，也要求具备与人手相差无几的自由度，以特斯拉 Optimus Gen3 为例，预计拥有22个自由度。

图：人手自由度

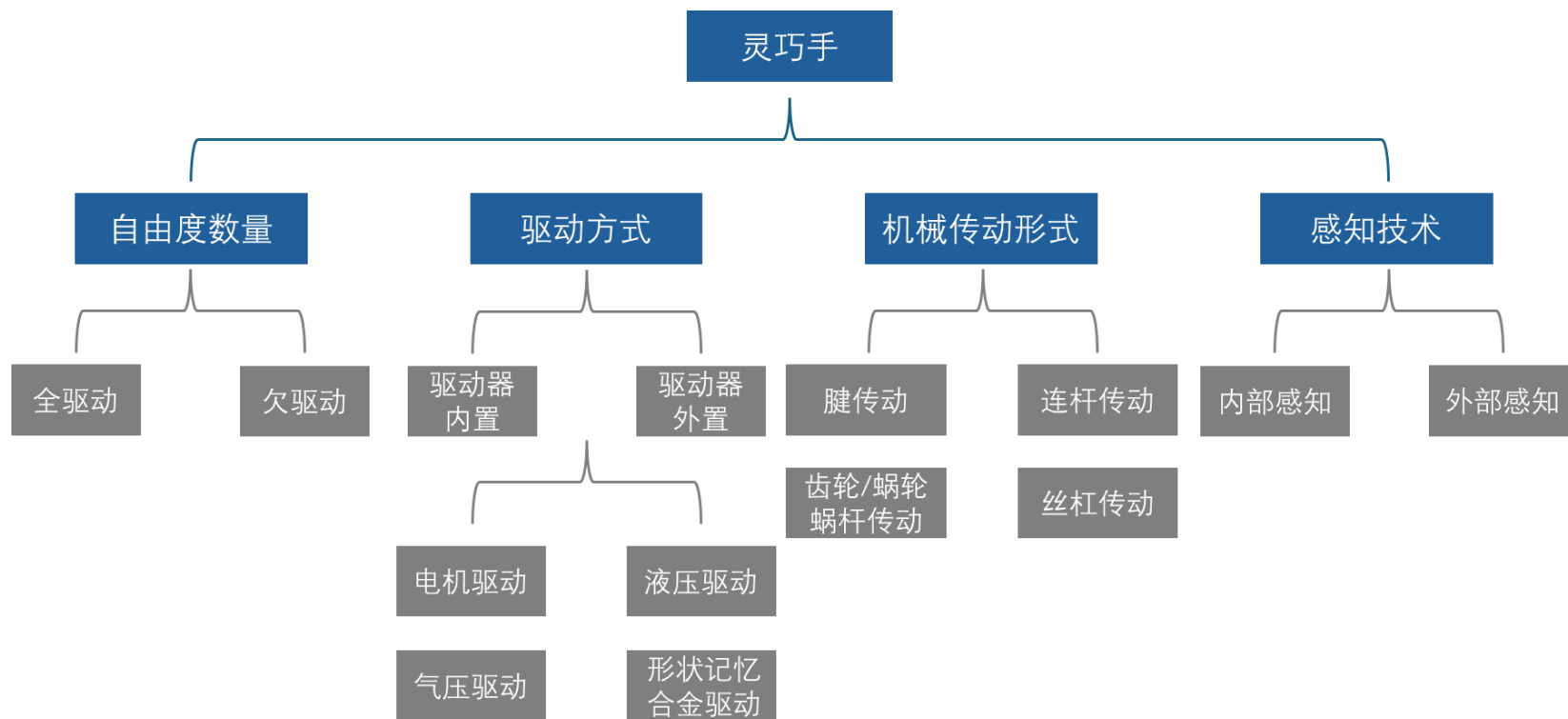


图：特斯拉Optimus灵巧手自由度



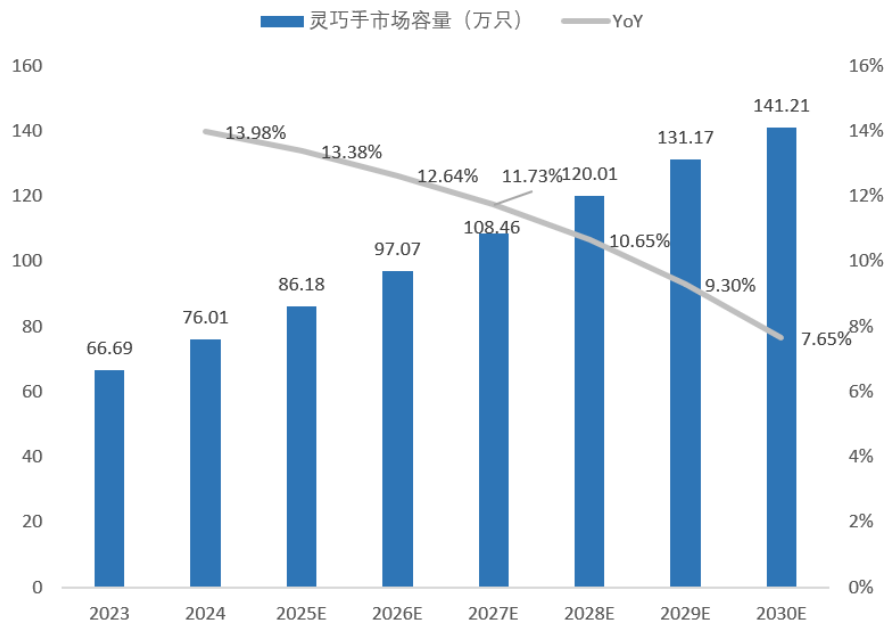
- **灵巧手种类多样，在精度、灵活性、成本等多方面各有优劣：** 1) 按照自由度数量可分为全驱动和欠驱动； 2) 按照驱动结构可分为驱动器外置、内置或混合制；按照具体驱动方式可进一步细分为电机驱动、液压驱动、气压驱动、形状记忆合金驱动； 3) 按照机械传动形式可分为腱传动、连杆传动、齿轮/涡轮蜗杆传动、丝杠传动； 4) 按照感知技术可分为内部感知和外部感知。

图：灵巧手分类

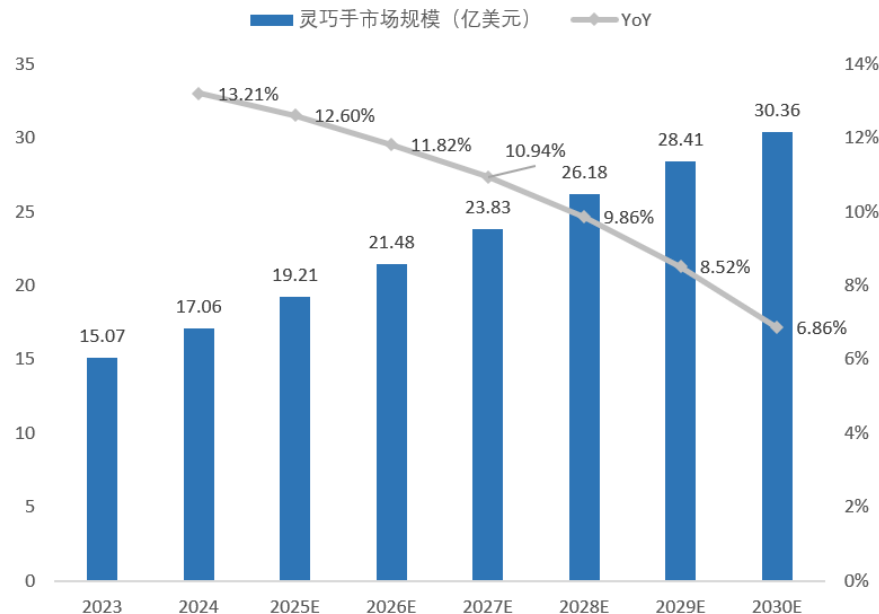


- 灵巧手价值量较高，以前瞻产业研究院数据为基准，预计灵巧手价值量占整机的10-20%左右，是成本占比最高的零部件之一。中商产业研究院数显示，2024年灵巧手市场容量为76.01万只，随着灵巧手功能持续完善，叠加下游人形机器人的放量，预计**2025年灵巧手市场容量将达86.18万只，对应市场规模为19.21亿美元；2030年预计分别为141.21万只、30.36亿美元，5年复合增长率分别为10.38%、9.59%。**

图：灵巧手市场容量预测



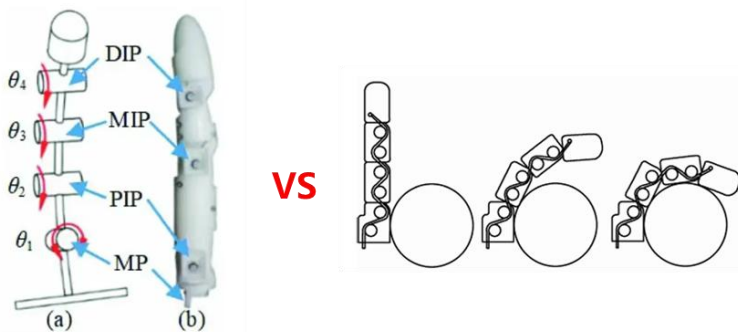
图：灵巧手市场规模预测



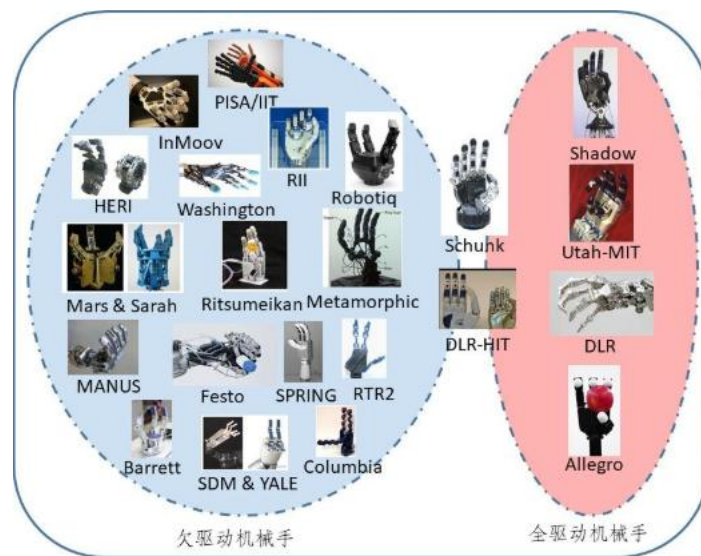
2. 灵巧手方案百花齐放，路线仍未收敛

- **按自由度，灵巧手分为全驱动和欠驱动。**其中，全驱动指灵巧手的每一个自由度都配备一个独立的执行器；欠驱动指灵巧手的自由度数量大于所配备的执行器数量。
- 全驱动灵巧手可通过独立的执行器分别来操纵灵巧手的各个关节臂部位，精度更高，具备更强的适应性，但成本更高、结构更为复杂；欠驱动灵巧手通过有限的驱动单元来拉动其余不具备执行器的部位，精度较低，但结构简单且成本较低，可以满足大部分特定场景。
- **由于全驱动灵巧手壁垒较高，当前，以欠驱动灵巧手为主流方案的厂商更多。**部分厂商将全驱动与欠驱动相结合，在功能性要求较高的手指（食指等）上采用全驱动方案，在功能性要求较低的手指（小拇指等）上采用欠驱动方案，以满足精度和成本要求。

图：全驱动和欠驱动灵巧手构造对比

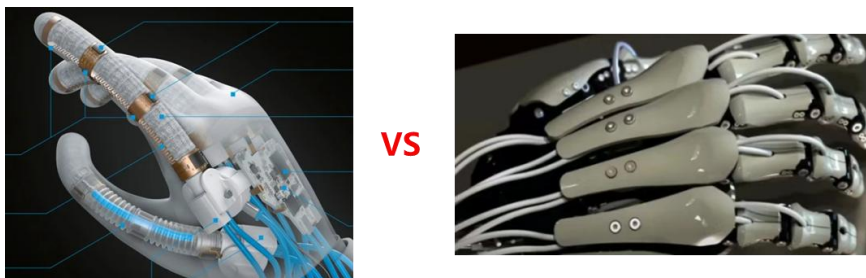


图：全驱动和欠驱动灵巧手厂商对比



- 按驱动器所在位置可以把灵巧手分为外置和内置两种，混合置应运而生。其中，1) 外置指将驱动器放在手部外部或手臂上，使手指更为纤细并且可以采用更大功率的驱动器以满足手指抓取的需求，但同时具有精度较低、无法反映手指关节位置和驱动力的缺点；2) 内置指将驱动器集成在手指内部，具有更高的精度，但集成式驱动器会导致灵巧手的体积变大，会影响其灵活度；3) 混合置指将主要的驱动器内置，便于精确控制，将辅助的驱动器外置便于提高抓取力。虽然混合置结合了内置和外置的一部分优点，但其由于部分驱动器外置，仍需要采用腱传动，结构复杂、重量较大。
- 当前内置虽为当前市场的主流方案，但从短期来看，采用外置和混合置方案的灵巧手负载能力更强，ToB简单场景落地更快。随着后续技术的不断优化，精细化场景需求提升，驱动器内置式灵巧手需求量也将上升

图：内置和外置驱动器灵巧手构造对比



图：驱动器内置和外置厂商



- 按照驱动方式，灵巧手可分为电驱动、气压驱动、液压驱动、形状记忆合金驱动（SMA）。
- 相较于其余驱动方式，当前电机驱动为主流，其具备控制精度高、响应速度快、模块化设计等优点，适用于较为精密的工作场景，与人形机器人更契合。液压驱动虽然工艺成熟，具有负载大的优点，但控制精度较低、响应速度慢，与工业机械更契合。

表：不同驱动种类的灵巧手特性

驱动类型	电驱动	气压驱动	液压驱动	形状记忆合金驱动
优点	控制精度高、响应速度快、模块化设计	易于操作、重量轻、造价低	使用寿命长、质量轻	噪声小、结构紧凑、质量轻
缺点	功率密度低	无法精确运动，气动驱动器装备困难	控制精度低、响应速度慢、体积大	工作效率低、易发生疲软
典型产品	特斯拉Optimus 灵巧手	Shadow灵巧手、Utah/M.I.T.灵巧手	德国卡尔斯鲁厄大学 STEFAN SCHULZ团队产品	Hitachi灵巧手

- 电驱动灵巧手所采用的电机可分为空心杯电机、无刷直流电机、无框力矩电机三大类。
- 空心杯电机因其体积小、转速高等优势为当前灵巧手电机主流方案，典型产品为特斯拉一代灵巧手；无框力矩电机可以提高部件的负载能力，在人形机器人手臂中用量较多，与灵巧手的精细化场景匹配度较低且成本较高，当前应用较少。
- 无刷有齿槽电机是无刷直流电机的一种，是高集成化和成本的折中选择。特斯拉二代灵巧手将电机从手部移到小臂，空间的释放使得无刷有齿槽电机的应用空间显现。虽然其相较空心杯电机而言，在响应速度和精度上略有不足，但成本较低、使用寿命较长，顺应灵巧手降本趋势。

表：灵巧手各类电机区别

	空心杯电机	无刷直流电机	无框力矩电机
结构	采用无铁芯转子，也叫空心杯型转子，属于直流永磁的伺服、控制电机。	永磁体转子 + 绕组定子，无电刷	无外壳设计，转子和定子直接集成到负载轴
原理	线圈与永磁场直接作用，无铁芯摩擦，无涡流造成电能损耗，且因重量和转动惯量低而减少转子自身机械能消耗	电子换向（霍尔传感器/编码器）控制旋转磁场，实现无接触的换向。	基于电磁感应，精确控制定子绕组电流产生的磁场与转子永磁体磁场相互作用，无框结构优化磁场分布和力矩传递效率。
优势	超高响应速度（毫秒级）、轻量化、高效率（一般在80%以上）、低转动惯量	高效率（可达90%以上）、长寿命（无电刷磨损）、低噪音	效率在80%-90%，转动惯量较低
转速	非常高，可达每分钟数万转	转速较高，但通常在10000转以下	通常在每分钟数千转以下，侧重稳定力矩输出，高转速时受散热和机械强度影响。
响应速度	启动、制动迅速，相应极快，机械时间常数小于28ms	小于无刷空心杯电机	响应速度极快，能在毫秒级甚至微秒级对控制信号进行精确力矩调整。
噪音	极低	较低，无电刷摩擦及换向电流噪声	小
运行稳定性	转速波动小，作为微型电动机其转速波动能够容易地控制在2%以内。	稳定性较好	运行稳定，能长时间保持稳定力矩输出，受干扰小，可通过闭环控制提高稳定性。

- **齿轮传动一般由微型减速器带动齿轮组实现传动。**其中，微型减速器主要为谐波减速器和行星减速器。谐波减速器由于传动精度较高，一般用于指关节；行星减速器承载能力强，一般用于手部，且成本较低。
- **蜗轮蜗杆传动由蜗杆和蜗轮组成，**用于传递交错轴之间的运动和动力，具备传动效率高且稳定性好的特点。
- 齿轮/蜗轮蜗杆传动均将旋转变成直线运动，虽然驱动较为灵活，但均有结构冗杂，笨重，柔性不足，抗冲击性能较弱的缺点。

表：谐波减速器和行星减速器对比

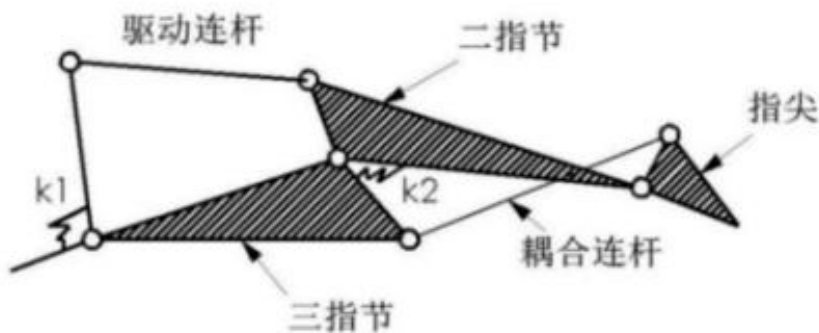
类型	谐波减速器	行星减速器
示意图		
优点	机构简单、零件少，传动比高，传动精度高	承载能力强，成本较低
缺点	周期性形变易产生疲劳损坏，散热条件差，成本高	传动精度较谐波减速器略低
适用部位	指关节	手部

图：蜗轮蜗杆传动示意图



- 连杆传动系统通过一系列刚性或半刚性的连杆组件将动力源的运动传递到末端执行器，并以此实现手指的运动。相较于齿轮/蜗轮蜗杆传动，其通过损失一定的传动效率来提高灵巧手的承载力，具有刚度好、加工制造容易、传动精度较高，可实现多种运动规律和运动轨迹的优点。但与齿轮/蜗轮蜗杆传动类似，连杆传动方案同样具有结构复杂、重量大、抗冲击能力弱的缺点。
- 当前采用连杆传动方案的典型产品有BeBionicHand、因时机器人-RH56DFX等。

图：连杆传动灵巧手构造


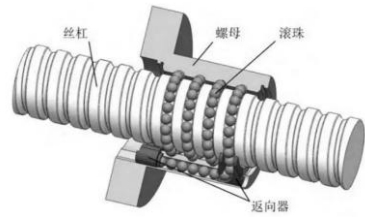



图：BeBionic Hand



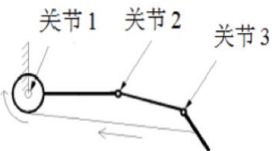
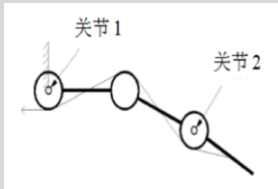
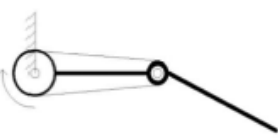
- 丝杠传动与齿轮/蜗轮蜗杆传动相同，也将旋转变成直线运动，方案主要可分为梯形丝杠、滚珠丝杠、行星滚柱丝杠。其中，滚珠丝杠和行星滚柱丝杠在灵巧手中采用较多。
- 相较于梯形丝杠，滚珠丝杠和行星滚柱丝杠在精度和寿命上有显著提升，与当前人形机器人精细化场景相契合，但是成本较高。其中，行星滚柱丝杠成本更高，约为滚柱丝杠的3-5倍。
- 丝杠传动虽然精度较高，但是柔性较差，灵活性有待提高。

表：微型丝杠对比

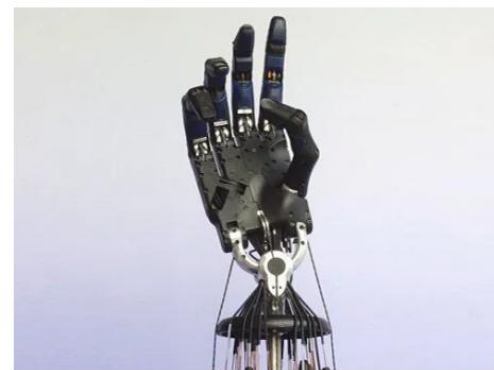
	梯形（滑动）丝杠	滚珠丝杠	行星滚柱丝杠
示意图			
结构特点	采用滑动摩擦原理，螺纹截面为梯形	通过滚珠在丝杠和螺母之间的滚动摩擦传递动力	通过多个行星滚柱分担载荷
优点	自锁性优、结构简单、成本低、抗污染强	高效率、高精度、长寿命、低背隙	承载能力强、长寿面、高刚性、高精度
缺点	效率低、磨损快、精度有限	成本高、自锁性差、抗冲击弱、维护复杂	体积重量大、成本高、噪音多
使用场景	低成本或需自锁的灵巧手，如教育机器人或工业末端执行器	高精度、高动态响应的灵巧手操作，如手术机器人或精密装配	高负载、高可靠性的灵巧手，如救援机器人或重工业操作臂

- 腱传动的工作原理是采用腱绳（如钢丝绳或高分子材料绳）作为传动介质，利用滑轮或卷绕机构实现动力传输。这种方式能够大幅减少系统重量，提高灵活性，同时降低摩擦损耗，使得灵巧手的动作更加平滑自然。
- 腱传动因布置形式多变而具有不同结构，目前常见的结构有腱-腱鞘式、等径滑轮式、带轮传动式三种。腱传动具有结构紧凑、重量轻、灵活性高的优点，但精度相对较低且腱绳易磨损，寿命有限。

表：三种腱绳传动方案对比

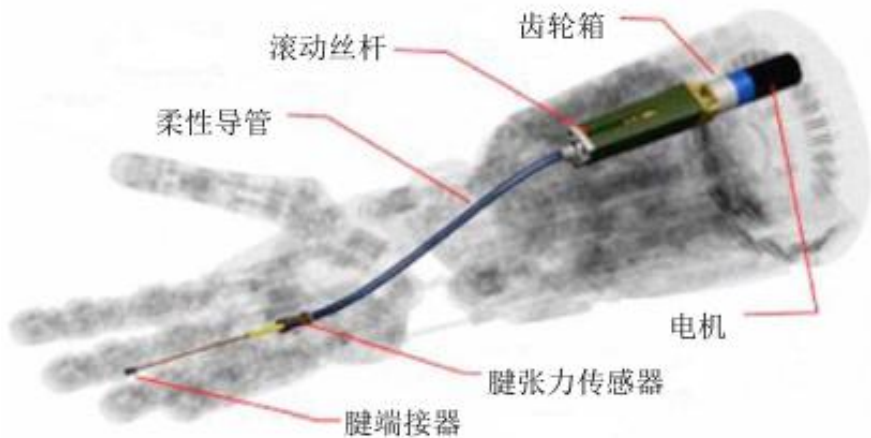
传动方案	原理简图	构成
腱-腱鞘式		三个关节、三根连杆、一个驱动滑轮
等径滑轮式		两个关节、两根连杆、三个滑轮
带轮传动式		两个传动带轮、两根连杆

图：Shadow Hand腱传动示意图



- **微型丝杠+腱传动复合方案实现互补。**在传动方案中，丝杠的传动效率和精度综合能力更强，与人形机器人前期的精密装配应用场景契合，灵活性较差但可通过腱绳来弥补；而腱传动的灵活性更强，符合灵巧手自由度逐步提高的趋势，精度较低但可通过微型丝杠来弥补。因此，微型丝杠+腱传动复合方案应运而生。
- **技术路线逐渐收敛，关注微型丝杠+腱绳企业。**特斯拉Optimus Gen3 灵巧手采用行星齿轮箱+微型丝杠+腱绳传动方案，技术路线进一步迭代。国内微型丝杠+腱绳玩家有望受益。其中，**五洲新春**拟投资10.5亿元建设行星滚柱丝杠、微型滚珠丝杠等产能；**震裕科技**微型丝杠产品实现送样；**大业股份**联合高校和客户开发腱绳新产品。

图：微型丝杠+腱绳复合方案



表：微型丝杠+腱绳部分厂商

产品	公司
微型丝杠	五洲新春
微型丝杠	震裕科技
腱绳	大业股份
腱绳	南山智尚
腱绳	恒辉安防

感知方案：从用途看，分为力觉、触觉感受器

- 传感器是人形机器人模仿人类感知的产品，是人形机器人与外界实现交互的重要零部件，其在灵巧手上的应用可分为力觉传感器——**力/力矩传感器**和触觉传感器——**柔性传感器、MEMS压力传感器**。其中，**1) 力/力矩传感器**主要用于精准抓取和搬运物体；**2) 柔性传感器**又称为“电子皮肤”可以用来感受物体形状；**3) MEMS压力传感器**可用于指尖部位，与柔性传感器的应用场景具有一定的重合度。

表：灵巧手传感器分类

传感器	细分品类	原理	特点	功能
力/力矩传感器	按维度分：一维、三维、六维	检测系统感知本体的应变或形变，通过电路将其转化为相应电压，通过测量电压值来表征力/力矩大小，并转换成可用输出信号	高精度、协调性强、非线性	实时感知力和力矩信息，实现高精度交互、环境适应性及安全控制
	按传感元件分：应变片式、光学式、压电、电容式等			
柔性传感器 (电子皮肤)	压阻式(电阻式)、电容式、电感式、压电式、光电式等	利用柔性材料的物理特性，将外部的力学量转换为电信息	柔韧性、多功能性、延展性、变形性	实现与环境接触力、温度、湿度、震动、材质、软硬等特性的检测
MEMS压力传感器	电容式、电阻式、压电式等	采用微电子和微机械加工技术制造，将这些物理量转化为电信号进行处理	体积小、重量轻、成本低、功耗低、可靠性高、易于集成和实现智能化	集成于指尖，提供高灵敏度接触反馈(如抓取易碎物体时调节力度)

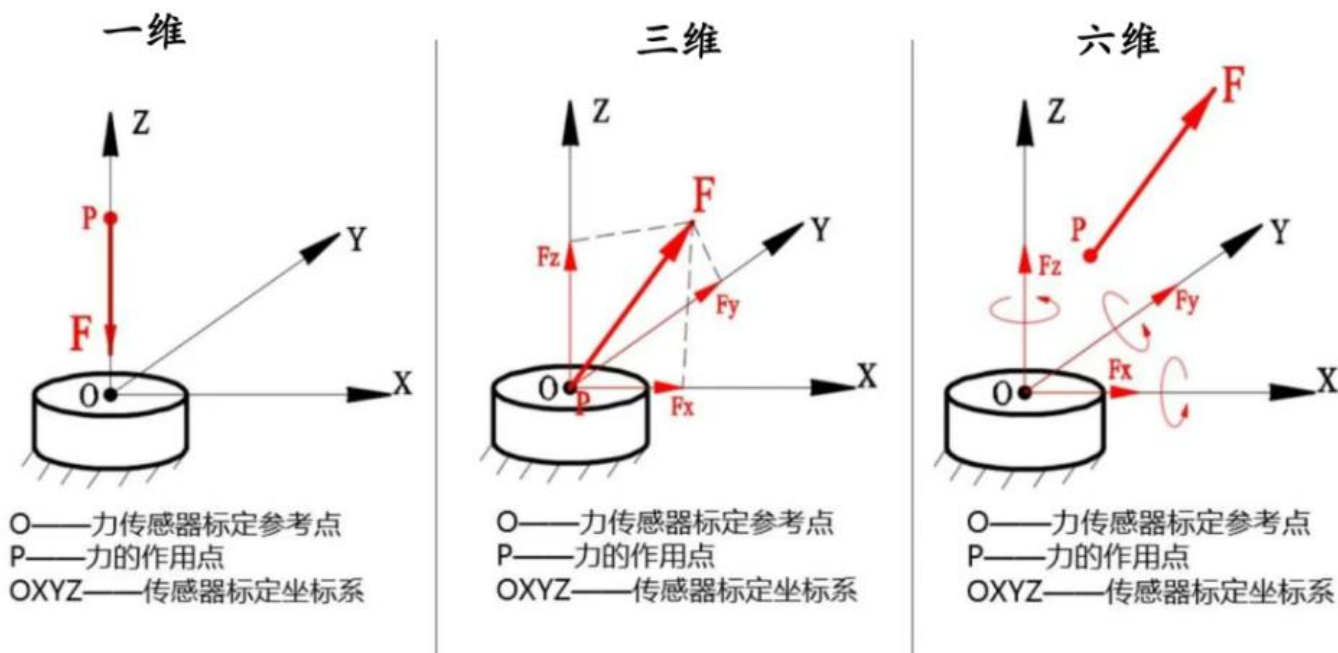
- **力觉、触觉传感器按照原理可分为光电式、压电式、电容式、压阻式、霍尔效应式、摩擦电式、应变式等多种类型。**其中，霍尔效应式和摩擦电式主要应用于柔性传感器中，应变式主要应用于力/力矩传感器中。
- 当前，除了力/力矩传感器的技术路线基本收敛至应变片式，柔性传感器和MEMS压力传感器的技术路线暂未确定，为多轨并行。

表：力觉、触觉传感器按原理分类

类型	原理	优点	缺点
光电式	通过弹性体的变形调制光波，使接收器接收到的光强发生变化	高精度和灵敏度、快速响应、高耐久性	成本较高，受外部光源、温度变化等环境因素的干扰
压电式	在敏感元件上施加压力时，两端产生电压变化	灵敏度高，拥有自供电能力	仅能测量动态力，不适合于静态力测量；阻抗高
电容式	两相对极板间介质层受压变形，从而使极板间距发生变化	线性响应好；低功耗、灵敏度较高	易受静电干扰
压阻式	两个相对（或相邻）电极之间敏感材料的电阻随作用压力载荷的变化而变化	结构简单、成本低	材料形变恢复不完全、温湿度变化容易引起电阻飘逸
霍尔效应式	当电流流过一个导电材料，材料的两侧会产生电压	高精度、稳定性强、耐久性好	成本较高、设计复杂
摩擦电式	两个不同材料在接触和分离时，电子的转移会产生电荷	完全自供电，制造相对简单	信号稳定性差、灵敏度较低
应变式	在外力的作用下，一定形状的弹性元件发生弹性应变，进而引起弹性元件上的应变材料发生阻值的变化	输出线性度好，精度高，耐久性好；刚度大；既可以检测静态量，又能检测动态量	受温度影响较大；存在机械滞后；有蠕变与零漂

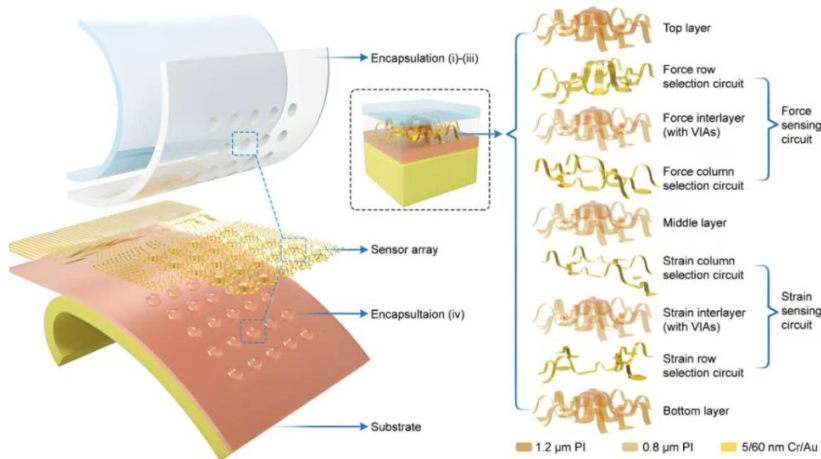
- 应变式六维力矩传感器由于具有良好的线性度、较高的精度，拥有多维解析能力，为当前灵巧手主流力觉传感器方案。
- 力/力矩传感器按照维度可分为一维、三维、六维。一维力传感器专为单向力检测设计，要求受力方向与坐标轴轴线方向完全一致且作用点恒定；三维力传感器可应用于力的方向随机变化的场景，但要求力的作用点固定且与标定参考点重合
- 六维力传感器突破上述两种传感器的限制，适用于力的作用点和方向随机变化的场景，可实现全维度的感知，因而具有最强的解析能力，主要应用于灵巧手的手腕。以特斯拉Optimus为例，其手腕关节需要配置2个六维力传感器。

图：力/力矩传感器分类

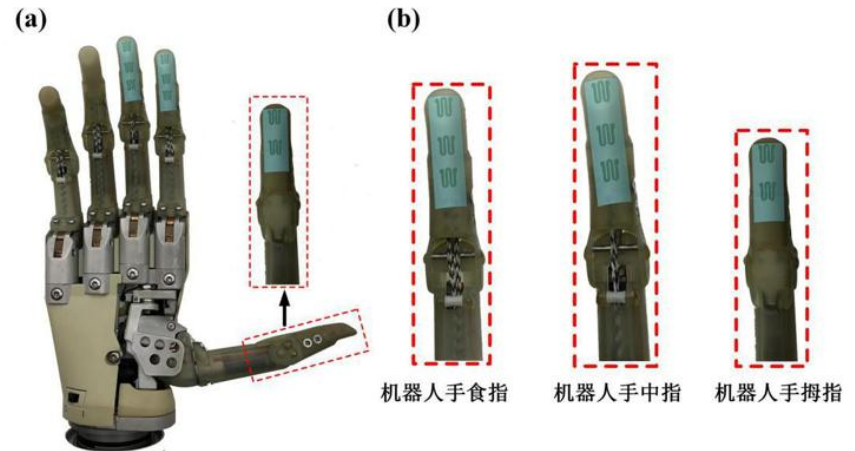


- 柔性传感器是可分为敏感层、电极层、基底层、封装层、粘合层5层，这一结构使得柔性触觉传感器不仅具备高灵敏度和广泛感知范围，还能在动态弯曲、拉伸等极端条件下保持稳定输出。
- 柔性传感器一般被安装在灵巧手每根手指的第一关节和第二关节，根据部位调整传感元件数量。比如中指和食指由于尺寸较大，需要支持的功能较多，因此需要装配3个传感元件，而大拇指只需要装配2个。
- 柔性传感器的核心是提高灵敏度、稳定性和集成化。其中，1) 稳定性是最大的挑战，需要有效的封装材料和策略以解决与温度相关的不稳定性和机械变形带来的损坏和疲劳；2) 阵列集成则要求柔性传感器具有紧凑又简单的设计、高密度集成化、可寻址性等特点，

图：柔性传感器构造

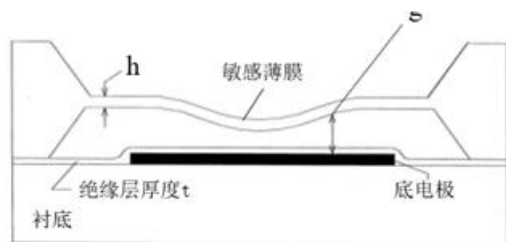


图：柔性传感器构造

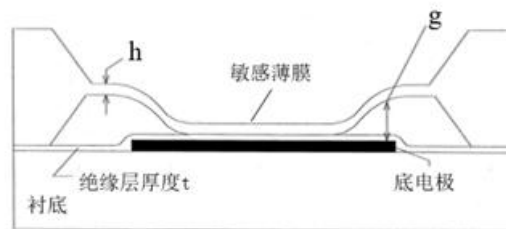


- **MEMS压力传感器基于微机电技术制造**，利用集成化的机械系统测量和感知各种物理量一般由一个薄膜和一个固定电极组成。当压力作用于薄膜时，电路组件之间的电容会改变，并通过传感器转换为电信号，广泛应用于汽车、航空航天等领域。
- 近年来随着人形机器人对触觉传感器提出新要求，MEMS压力传感器开始向机器人领域拓展。相较于柔性传感器，MEMS压力传感器一般采用硅基材料和金属等硬质材料制造，生产成本较高，且缺乏柔性，无法单独大规模应用在整个灵巧手上。
- 常见的MEMS压力传感器技术路线有电容式、压阻式等，后者应用更为广泛，技术更为成熟，多用于灵巧手指尖部位，或为短期落地最快的MEMS压力触觉传感器之一。

图：电容式MEMS压力传感器结构

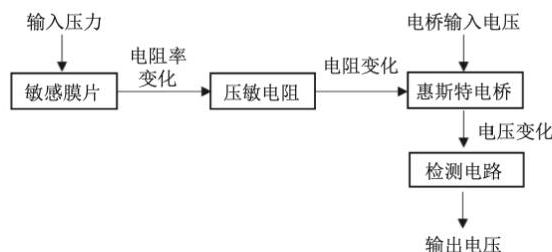


(a) 非接触式

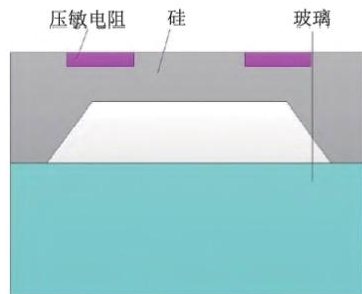


(b) 接触式

图：压阻式MEMS压力传感器结构



a. MEMS压阻式压力传感器工作流程图



b. MEMS压阻式压力传感器原理结构图

图：MEMS指尖传感器产品示意图

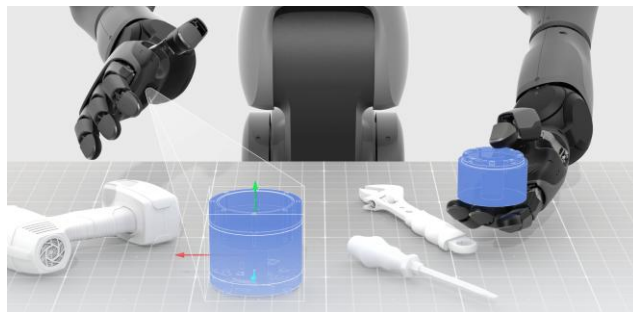


- **一元感知无法满足人形机器人应用场景需求，多模态势在必行。**由于人形机器人的最终目的是走入人类社会，灵巧手作为其与外界社会直接交互的核心部件，需要具备多维感知能力，包括压触觉、温湿度、触觉等。
- **多维触觉+视觉结合，感知能力持续升级。**以帕西尼Dex H13 Gen2 灵巧手为例，其手部新增高清AI手眼相机，使得灵巧手在具备多种触觉感知能力的基础上，拥有视觉感知能力。
- **复合传感器进程提速，实现互补。**当前传感器方案技术仍未收敛，力觉传感器和触觉传感器在一定程度上也可实现互相替换，故而掀起复合传感器研发浪潮。例如将MEMS技术融入应变式六维传感器中，使得其同时实现小型化与高负载特性；将柔性材料融入MEMS压力传感器中，以弥MEMS传感器缺乏柔性的缺点。

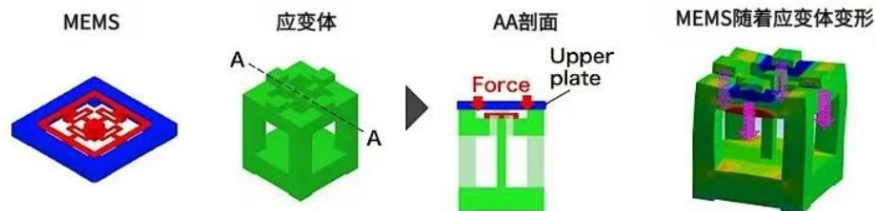
图：帕西尼DexH13 Gen2 灵巧手



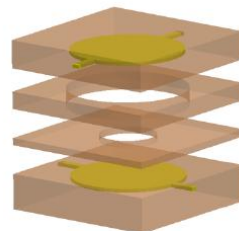
图：帕西尼DexH13 Gen2 灵巧手工作场景



图：“MEMS+应变体”复合传感器



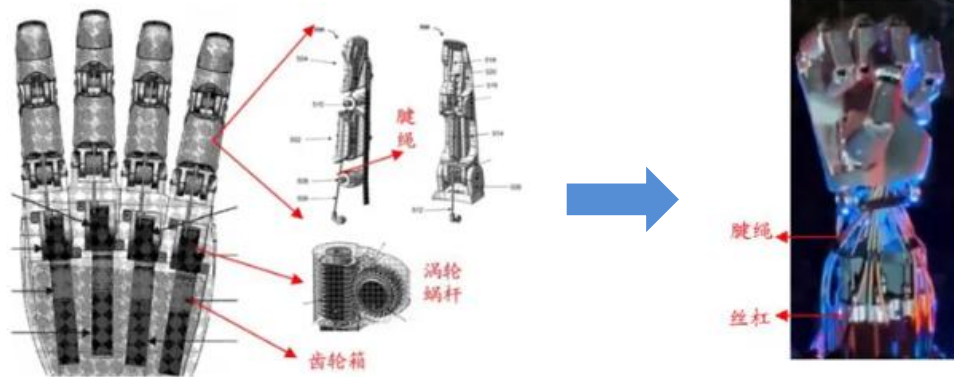
图：采用柔性极板的MEMS压力传感器



3.从特斯拉灵巧手迭代展望未来趋势

- **第三代灵巧手驱动、传动方案有所改变。**2024年11月 Optimus Gen 3 灵巧手更新并展示，灵巧手从单手11个自由度→22个自由度（单手电机数从 $2+1+1+1+1=6$ 变成 $3+2+2+2+2=11$ ）。其中，结构变化点有：**1) 电机**：从手掌内移至手臂小臂里，拓宽空间的同时将部分空心杯电机替换为成本更低的无刷有槽电机；**2) 传动**：采用丝杠+腱绳的复合传动方案，弥补精度的同时保证了高灵活性。
- **迭代进程加速，复杂任务完成度较高。**2024年11月，特斯拉基于第三代灵巧手发布 Optimus接网球视频，主要受益于自由度和精度综合能力的提升，与特斯拉灵巧手技术方案切换相关程度较大。

图：第三代特斯拉灵巧手传动方案切换



图：特斯拉Optimus可完成接网球动作



- 从特斯拉三代灵巧手演变角度看，灵巧手向高自由度、多模态趋势演变，降本步入初期。
- 特斯拉当前第三代灵巧手拥有22个自由度，较第一代和第二代实现翻倍。为了保证高自由度灵巧手的灵活性，其将腱绳+蜗轮蜗杆的传动方案替换为**腱绳+微型丝杠**。相较于蜗轮蜗杆而言，微型丝杠的精度更高，可以提升精细化操作能力。
- 从感知方案看，第二代和第三代较第一代均做了加法：第二代在指尖新增触觉传感器；第三代在第二代的基础上将触觉传感器覆盖整个灵巧手，并集成AI视觉系统。
- 从驱动方案看，得益于执行器的外移，灵巧手空间释放或将使得无刷有齿槽电机+空心杯电机结合的驱动方案被采用，其可在精度牺牲不大的情况下降低灵巧手成本，有益于前期简单场景的量产落地。

表：特斯拉灵巧手迭代历程

	第一代灵巧手	第二代灵巧手	第三代灵巧手
自由度	11个（6个主动+5个被动）	11个（6个主动+5个被动）	22个（17个主动+5个被动）
驱动方案	空心杯电机+行星减速箱	空心杯电机+行星减速箱	执行器外移至前臂，或将采用无刷有齿槽电机+空心杯电机
传动方案	腱绳+蜗轮蜗杆	腱绳+蜗轮蜗杆	腱绳+丝杠
感知方案	力传感器+位置传感器	力传感器+位置传感器+触觉传感器	全手覆盖触觉传感器，集成AI视觉系统
功能场景	应用于工厂环境，支持20磅（约9公斤）物品搬运	新增“抓鸡蛋”、叠衬衫”等精细操作能力	可完成复杂动态任务（如接住飞行网球）

- 国内外主机厂方案基本收敛至电驱动+高自由度；传动方式各异和传感器方案各异，但后者已有向多模态感知发展的趋势。

公司	产品	自由度	手指数量	驱动方式	传动技术	传感器配置
帕西尼	DexH13 GEN2	16	4	空心杯电机		手部摄像机视觉+1140个ITPU触觉传感单元
	DexH5 GEN1	12	4	空心杯电机		396个ITPU触觉感知单元
宇树科技	Dex3-1	7	3	-	齿轮	33个压力传感器
	Dex5-1	20	3	空心杯电机	齿轮	94个触觉传感器
因时机器人	RH56BFX	6	5	微型伺服电机	连杆	-
	RH56DFTP	6	5	微型伺服电机	连杆	6个力传感器+5-17个触觉传感器
优必选	Walker S1	41	5	-	-	6个阵列式触觉压力传感器+手腕六维力矩传感器
雷赛智能	DH116	11	5	空心杯电机	丝杠	6个触觉传感器
灵巧智能	DexHand021	19	5	空心杯电机	腱传动	位置+指尖触觉+力觉
	DexHand021 Pro	22	5	空心杯电机	腱传动	位置+指尖/指腹/手掌感知
特斯拉	第二代灵巧手	11	5	空心杯电机	蜗轮蜗杆+腱传动	触觉传感器
	第三代灵巧手	22	5	空心杯电机+无刷有齿槽	丝杠+腱传动	触觉传感器+集成AI视觉

第四章 投资建议及风险提示

■ **投资建议：**灵巧手作为人形机器人核心零部件，是其融入社会的重要一环。高精度的灵巧手可以使得人形机器人完成更多精细化且复杂的任务。当前，灵巧手价值量较高，电机、微型丝杠、腱绳、传感器4个部分成本占比较高。同时，灵巧手方案多样，大部分路线仍未收敛，因此需要绑定头部厂商，以保证路线的及时切换与更新。推荐减速器+丝杠链企业【福达股份】，关注微型丝杠链【浙江荣泰】、【五洲新春】、【震裕科技】，关注腱绳链【大业股份】、【南山智尚】，推荐T链头部企业【拓普集团】。

表10：相关公司盈利预测及估值评级

公司	证券代码	股价 (元)	总市值 (亿元)	归母净利润 (亿元)			PE			评级
				2025E	2026E	2027E	2025E	2026E	2027E	
福达股份	603166.SH	15.57	100.61	3.01	3.85	4.60	33.39	26.13	21.88	买入
拓普集团	601689.SH	47.01	816.96	35.54	44.60	56.52	22.99	18.32	14.45	买入
浙江荣泰	603119.SH	45.05	163.87	3.30	4.53	6.37	49.62	36.19	25.72	-
五洲新春	603667.SH	33.31	122.03	1.67	2.09	2.52	73.15	58.30	48.41	-
震裕科技	300953.SZ	98.80	171.40	3.96	5.42	6.94	43.27	31.65	24.71	-
大业股份	603278.SH	9.08	31.03	-	-	-	-	-	-	-
南山智尚	300918.SZ	19.27	97.53	2.67	3.38	4.16	36.53	28.86	23.45	-

- **人形机器人核心技术发展不及预期。**若人形机器人的核心技术发展不及预期，则将对人形机器人的后续实际应用落地造成不利影响。
- **人形机器人产业化落地进程不及预期。**若因制造成本过高、下游需求不明朗等因素导致人形机器人产业化落地进程不及预期，则将对供应链企业的发展造成不利影响。
- **人形机器人零部件行业竞争加剧。**如果人形机器人核心零部件如电机、减速器、滚柱丝杠、执行器总成、电池以及热管理系统等环节竞争加剧，则将对供应链企业的盈利造成不利影响。
- **人形机器人技术路线变更。**如果人形机器人部分环节的技术路线发生改变，则将对此前布局该方向的供应链企业造成不利影响。

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

投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

公司网址：<http://www.dwzq.com.cn>

东吴证券 财富家园