



华安证券  
HUAAN SECURITIES

## 灵巧手：人形机器人应用落地的关键

分析师：张志邦（S0010523120004）邮箱：[zhangzhibang@hazq.com](mailto:zhangzhibang@hazq.com)

分析师：刘千琳（S0010524050002）邮箱：[liuqianlin@hazq.com](mailto:liuqianlin@hazq.com)

2024年9月25日

华安证券研究所

## 灵巧手价值量高，是人形机器人应用落地的关键

- ▶ 灵巧手结构精密复杂，真实人手的单手自由度是21个，机器人的灵巧手会根据特定场景简化功能，平衡成本和自由度的关系，目前特斯拉机器人单手自由度仅11个。灵巧手的性能和成本受其三大核心组件—驱动、传动和传感装置的共同影响。
- ▶ 灵巧手有多种驱动路线，差异主要体现在驱动形式和传动形式。驱动源是影响灵巧手体积和重量的重要因素，灵巧手模块的驱动方式包括电机驱动、气压驱动、液压驱动和形状记忆合金驱动。灵巧手的操作稳定性和灵活性指标主要取决于传动系统，传动模式包括连杆传动、腱绳传动、齿轮传动等。特斯拉目前驱动方案采用的空心杯+行星减速箱+编码器+驱动器+传感器的结构，传动方案采用的是金属腱绳+蜗轮蜗杆传动的结构。
- ▶ 灵巧手电驱动采用的电机方案路线众多，不同电机方案的模组构成不同。最常用的是空心杯电机，其特点是轻量高效，因扭矩相对较低常需要搭配行星齿轮减速器使用，主要供应厂商有Maxon、Faulhaber。无框力矩电机，无背隙可以直接驱动负载，不需要皮带、齿轮等传动装置；无刷有齿槽电机，相比空心杯电机模组转速更低可以节省齿轮箱。除电机方案之外，灵巧手模组其他结构件路线各异，减速器包括谐波减速器、行星减速器等，传感器有力传感器、触觉传感器等多种形式。
- ▶ 灵巧手领域主要的参与者有特斯拉、哈默纳科、Maxon、兆威机电、鸣志电器等。Maxon是精密驱动头部厂商，其定制化模组优势突出。哈默纳科是精密减速器头部厂商，已成功落地灵巧手微型谐波方案。鸣志电器以步进电机起家，目前空心杯电机成本优势凸显。兆威机电是微型传动领域标杆，机器人产品定制化经验丰富。推荐灵巧手国产替代核心标的兆威机电、鸣志电器。

## 目录

### 1 灵巧手结构及功能



### 2 灵巧手发展路径：成本与功能的博弈

### 3 灵巧手重要部件详解

### 4 相关标的

### 5 风险提示

## 1.1 灵巧手结构精密复杂，依据特定场景简化功能

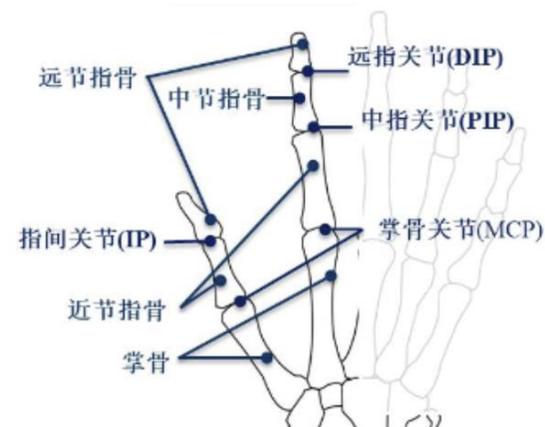
- 就真实人手而言，远指关节和中指关节分别有 1 个自由度，能够完成屈曲/伸展运动；而掌骨关节具有 2 个自由度，可以完成屈曲/伸展和侧向摆动动作。Pitch方向的自由度大拇指、食指、中指、无名指和尾指各有3个，共计15个；Roll方向的自由度大拇指有2个，其他手指各1个，共计6个，总体而言单手自由度为15+6=21个。对比而言，特斯拉人形机器人单手自由度仅11个。
- 灵巧手决定了机器人的应用场景。人形机器人的灵巧手是一种基于人手运动学设计的特殊末端执行器，由于真实人手具备高自由度、结构紧凑等特征，绝大多数机械手无法完美复刻人手的功能，需要依据特定情景权衡简化。

图表1：人手自由度分析



资料来源：小米科技，华安证券研究所

图表2：人手骨骼结构

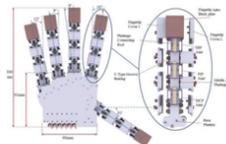


资料来源：郑悦《高仿生性能假肢设计研发及应用研究》，华安证券研究所

## 1.2 手指决定灵巧手的主要功能

- 灵巧手的功能主要由手指决定，灵活的手指可以有效地提高灵巧手的灵活性。因此，对灵巧手的手指研究，尤其是对手指关节结构的研究至关重要。目前，灵巧手有很多分类方式，按照灵巧手的手指关节及其传动方式分类，主要可以分为三种灵巧手：刚性关节灵巧手、柔性关节灵巧手和软体关节灵巧手。
- 机器人灵巧手的自身复杂性主要表现在仿生结构、驱动、传动、感知、复合材料、建模与控制等方面的关键技术。

图表3: 灵巧手按手指关节分类一览

分类	传动方式	特点	主要应用	示意图
刚性关节灵巧手	通过连杆机构与电机连接或者电机直接驱动关节运动，一旦电机位置确定后，所有连杆位置和关节角度都将固定	具有紧凑、高抓持力和高控制精度等优点，但适应性不足，抓取易碎物品时人机交互不友好，研究人员在这类灵巧手表面增加了柔性材料或增加触觉传感器，以期望改变这种状况	i-Limb hand、Bebionic hand、Michelangelo hand、Taska hand、Mia hand和Vincent hand	
柔性关节灵巧手	通过连接两股腱绳并改变其相对位置或使用腱绳和复位弹簧的组合来实现手指关节旋转，当手指第一个关节被阻碍运动时，其余关节能够自适应弯曲，完成手指包络的过程	驱动手指屈曲的腱索需要解耦，接头处的结构复杂，需要安装额外的装置以确保反向支撑	Hannes Hand、KIT Hand、IR2-hand、X-Hand和Soft Hand	
软体关节灵巧手	一般使用气动或液压驱动，通过向手指施加空气或液压压力来使灵巧手指弯曲	在不同气压或液压的影响下，手指可以前后摆动，柔软性和交互性能好。不足之处是关节承受能力差，手指弯曲抓力不足	Soft Neuroprosthetic Hand、RBO Hand2和Pneumatic bionic hand	

资料来源：郑浩贤《基于C形关节的柔性灵巧手设计与控制系统研究》，华安证券研究所

## 1.3 灵巧手的仿生结构

- 从手指和手掌的外形上看，目前已有的各种多指灵巧手多是模仿了人手的结构和外观，具有鲜明的仿生设计特点。然而，现有的多指灵巧手的内部结构，特别是手指关节等运动结构，主要还是采用传统的机械式铰链转动关节设计。机械式转动关节的优点是结构稳定可靠、运动可测可控，然而同时给驱动传动的设计以局限性，虽然外观和形式上实现了仿生，但是在运动功能实现上远远达不到人手的灵活精巧程度和目标适应性。

图表4：灵巧手结构设计方案一览

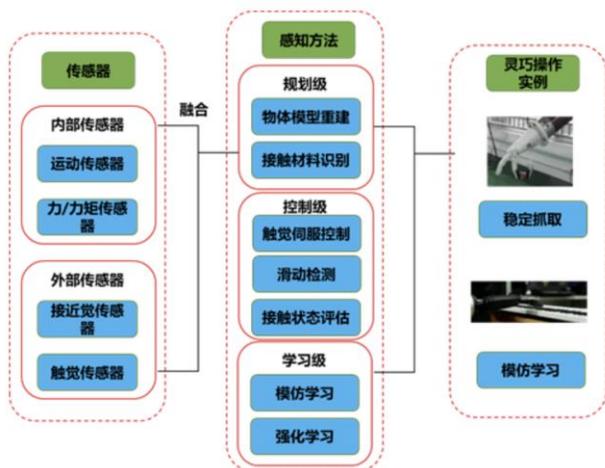
仿生结构设计类别	优点	缺点	示意图
机械式铰链设计	传动效率高，响应快，关节刚度高，输出力稳定且可控	结构冗杂，笨重，柔性不足，抗冲击性能较弱，对手内空间配置要求较高	
腱绳拮抗驱动设计	轻量化，柔顺适用性，与传统结构相适应	关节刚度受腱绳形变影响，腱绳与手指结构摩擦干扰大，传动效率低，寿命较低，维修成本高	
软指手	结构柔性高，交互安全，成本低廉，抗干扰	输出力小，结构刚度低，建模困难，控制精度低	
刚柔混合结构	柔顺，可靠	刚柔材料和结构的融合设计困难，刚性与柔性的跨量级建模困难	
特殊构型	多功能，成本低	通用性差，结构与普通灵巧手差异大，使用学习成本高	
仿生生物关节	高度仿人化，柔顺，抗冲击，可控	成本高，系统复杂，对驱动器要求高	

资料来源：蔡世波等《机器人多指灵巧手的研究现状、趋势与挑战》，华安证券研究所

## 1.4 灵巧手传感器

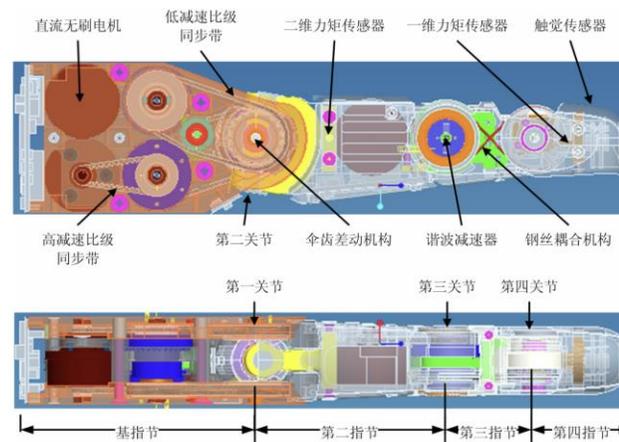
- 感知是执行的前提，感知层的传感器是软件控制和硬件零部件的桥梁，是实现具身智能的关键，多感知能力融合是未来灵巧手的发展方向。灵巧操作要求灵巧手能够准确地反馈自身状态并感知周围环境，据此要求传感器可分为内传感器和外传感器两大类：
- 内部传感器用于反馈灵巧手自身的位置或力等状态信息。三种典型的内部传感器包括位置传感器、弯曲传感器和张力传感器。
- 外部传感器是机器人获取周围环境信息的必要部件。为了实现灵巧操作，灵巧手需要在操作前阶段靠近目标物体，在操作阶段用手形对目标物体进行操作。因此，在操作前阶段，使用近端传感器来检测物体与灵巧手之间的距离。当灵巧手接触到物体时，触觉传感器用于提供物体的物理信息和接触力。

图表5：用于灵巧手的感知，感知方法及其操作



资料来源：CAAI认知系统与信息处理专委会，华安证券研究所

图表6：HIT/DLR Hand II 灵巧手手指机械结构简图

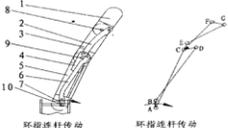
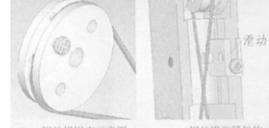
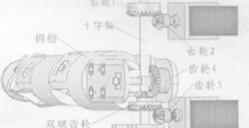


资料来源：张云飞《机器人灵巧指尖柔性触觉传感器研制及操作研究》，华安证券研究所

## 1.5 灵巧手驱动形式和传动形式

- 驱动源是影响灵巧手体积和重量的重要因素，主要驱动方式包括电机驱动、气压驱动、液压驱动和形状记忆合金驱动。电机驱动最为常用，其优点包括使用方便、能量转化率高、机构速度变化范围大，噪声较小，控制灵活、精度高。特斯拉电机驱动方案，单手6个无刷空心杯电机模组，11个自由度，空心杯电机模组由空心杯电机+行星减速箱+编码器+驱动器+传感器构成。
- 灵巧手的操作稳定性和灵活性指标主要取决于传动系统，主要传动方案包括连杆传动、腱绳传动和齿轮传动。腱绳传动控制灵活，传递力的距离长，能实现自适应抓取；连杆传动精度高、效率最高、承载能力大；齿轮传动应用最广，使用周期长、效率高。特斯拉采用了金属腱绳+蜗轮蜗杆传动结合的方案。金属腱绳实现自适应抓取能力；蜗轮蜗杆实现自锁特性，能有效阻止电机发热，且蜗轮蜗杆的不可反驱动特性使得灵巧手可以在抓握完成后实现无功耗保持。

图表7：不同传动方案对比

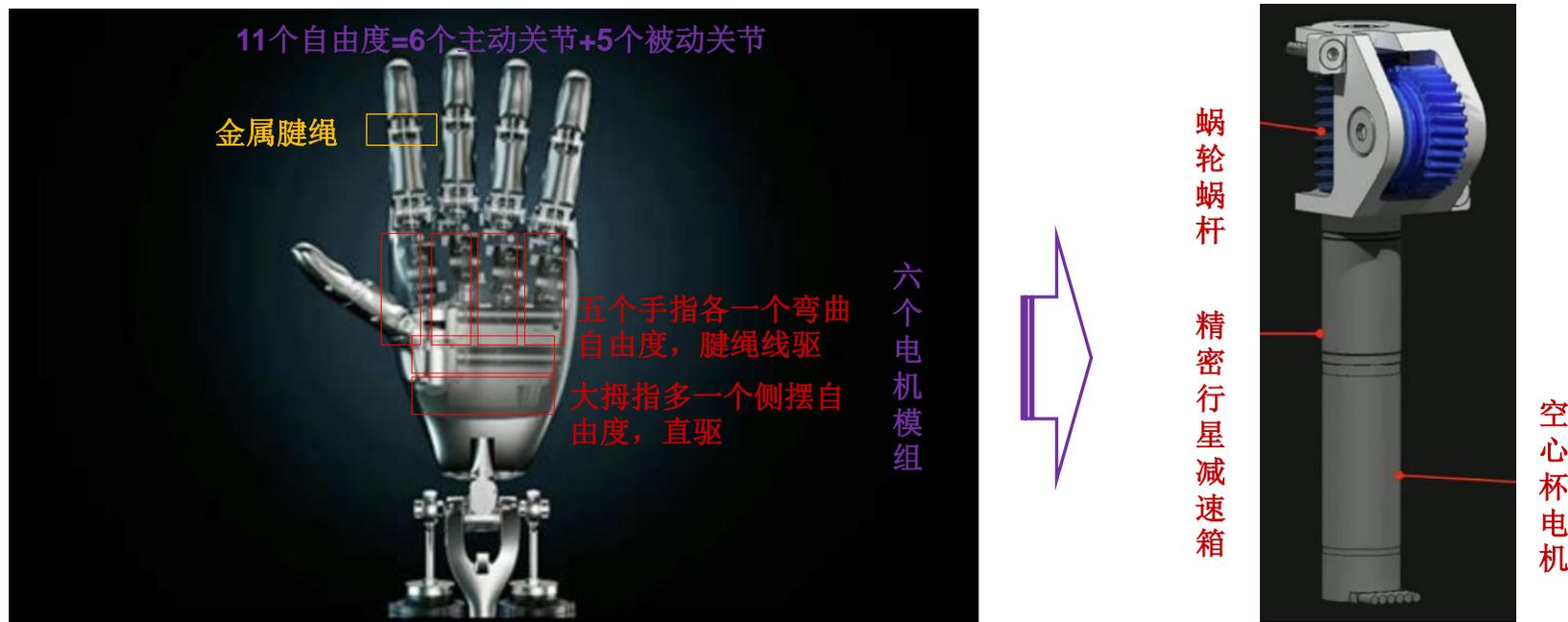
类别	连杆传动	腱绳传动	齿轮传动
传动原理	主要是采用平面四杆机构传动，通过铰链将各构件相互连接，各个连杆除了进行运动变换外，还能将动力传递给执行机构	主要采用腱绳和滑轮搭配作用，根据腱绳与滑轮在灵巧操作手的位置不同，腱传动可有多种结构	通过轮齿间的啮合来传递动力，该种传动应用较为广泛，发展最成熟
适用场景	快速反应	节省空间	高可靠性
优点	精度高、承载能力大、制作加工成本小	质量轻、远距离柔顺传递、极大程度上符合人手传动特征	力控精确、使用寿命长、效率高
缺点	运动抓取稳定性弱、可传递力的距离短	自身刚度具有极限、传动位置精度低	整体的质量和体积偏大、所需加工精度高
传动示意图			

资料来源：李可歌《一种新型灵巧操作手的设计与分析》，李久振等《北航BH-985灵巧手结构设计》，华安证券研究所

## 1.6 特斯拉人形机器人灵巧手电机模组拆分

- 特斯拉人形机器人灵巧手单手6个无刷空心杯电机模组，11个自由度，其中空心杯电机模组构成：空心杯电机+蜗轮蜗杆（自锁、高负载）+精密行星减速机（高精度、动态响应）+编码器+驱动器+传感器
- 空心杯本身低速高扭的特性配合行星减速机，能够达到一个比较可观的功率密度；搭配蜗轮蜗杆的目的是进行90度的动力方向的转换的同时，提升手指的力矩，以及通过自锁提升包络抓取的性能。

图表8：特斯拉灵巧手结构拆分



资料来源：特斯拉AI DAY，华安证券研究所

## 目录

1 灵巧手结构及功能

2 灵巧手发展路径：成本与功能的博弈



3 灵巧手重要部件详解

4 相关标的

5 风险提示

## 2.1 灵巧手成本与功能的博弈

- 灵巧手的性能和成本受其三大核心组件—驱动、传动和传感装置的共同影响。首先，驱动系统为手部提供必要的动力和旋转力，确保其具备足够的操作能力；其次，传动系统负责将动力传递到手指，精确控制其运动轨迹；最后，传感系统则负责监测和响应手部与环境的互动，提供反馈信息以优化抓取动作。灵巧手研制难点可分为“灵巧”和“作业”两部分，灵巧性难题是由于灵巧手关节自由度分布、关节数量要求较高，作业能力难题则由于灵巧手需要具备更强的操作负载能力、力位精度与可靠性。
- 灵巧手需从实际应用场景出发进行结构设计，在追求性能最优化的同时要考虑到成本效益，实现两者之间的合理折中。对于人形机器人的灵巧手，其设计必须考虑到人体工程学的尺寸要求，同时还要兼顾空间限制和重量等实际应用中的实用性因素。

图表9：灵巧手重要评价标准一览

评价标准	含义	阐释
高抓重比	抓重比表示机械臂的负载与自身重量的比重	与人进行对比，一般人单手可以轻松拉起10kg以上的物体，这个重量对于全尺寸人形，甚至是轻量级的工业臂和协作臂来说也是十分吃力的。所以在机械臂的负载十分有限的情况下，需将灵巧手的重量控制在一个十分合理的范围内，这样对灵巧手的结构材料，驱动器的功率密度都有相当高的要求
高灵敏度	灵敏度指代灵巧手对环境的感知能力	传感器也是灵巧手设计中挑战最大的一项，包括位置、力控、温度、粗糙度等。比较容易做到的是在单点，比如在指尖、指腹位置进行反馈，但难以覆盖到整个灵巧手上，目前也有一些如电子皮肤等传感器阵列的形式，但还没有形成大规模的商用
高顺从性	高顺从性指灵巧手遭到冲击时，继续工作的能力	主要是应对外界的冲击，保证机械机构的顺从性，从而减少硬件损坏的风险，因为灵巧手的驱动部分使用的电机较小，却面临与人形机器人其他关节电机受到同样的冲击负载的风险。一般线驱或者欠驱的机械手，会有比较强的顺从性
高集成性	高集成性指灵巧手机电系统体积小、功率密度足够高	因受到重量、尺寸等方面的设计限制，对于机电系统的集成度有相当高的要求，功率密度较高的空心杯电机，方便布线的柔性电路板在灵巧手的设计领域中使用频率非常高。当前的灵巧手设计，为了空间的考虑，通常都采用非常紧凑的硬件布局和设计，从而导致了设计的不标准，难安装校准，难保养维护的现象
丰富的抓取策略	指灵巧手根据物体的形态、重量、材料规划出合理的抓取方式	针对不同形态的物体，需要采用不同的抓取方式，比如球状的物体采用分指的形式，圆柱状的物体采用对指的形式，对于较厚的板材可以采用并指的形式

资料来源：萝卜易机器人，华安证券研究所

图表10：典型灵巧手的比较

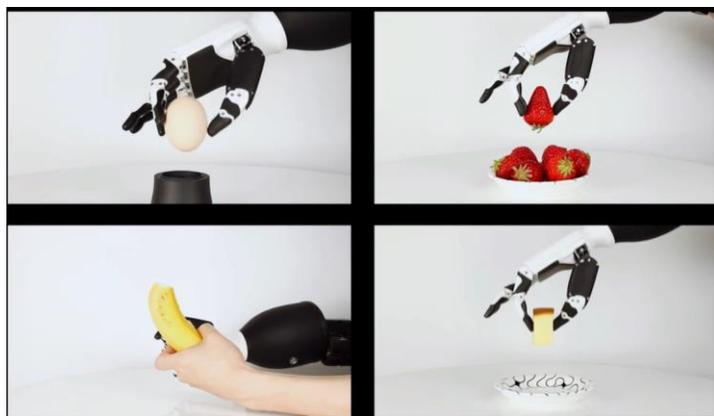
机械手	机构	质量/kg	组成	主要传感器	驱动装置	传动装置
Robonaut 手	NASA	-	手腕：2DOF 手指：5指/11DOF 手掌：1DOF	位置传感器，重力传感器	无刷电机	连杆
Robonaut 2 手	通用汽车公司、NASA	-	手指：5指/12DOF 手腕：2DOF	触觉传感器，肌腱张力传感器	电动机	腱传动
DLR I 手	DLR	-	4指/12DOF	触觉传感器，6维力矩传感器，温度传感器	线性驱动器	腱传动，人工肌肉
DLR II 手	DLR	1.8	4指/12DOF	关节扭矩传感器，6维指尖微型力矩传感器，多个温度传感器	无刷直流电动机	齿形带，谐波传动齿轮和锥齿轮
DexHand	DLR	4	4指/12DOF	12个关节力矩传感器，温度传感器	齿轮电机	腱传动和谐波传动装置
SpaceHand	DLR	5	4指/12DOF	磁传感器，扭矩传感器，温度传感器	无刷直流电机	腱传动
UB 手	博洛尼亚大学	-	5指/20DOF	基于分立式表面安装器件光电组件的触觉传感器，力传感器	双绞线驱动	腱传动
Shadow 手	Shadow 机器人公司	4	5指/24个关节，20个驱动自由度，4个欠驱动关节	指尖超灵敏触觉传感器，力传感器（仅电动手），温度和电流传感器（仅电动手），压力传感器（仅气动手）	智能电机 气阀门驱动器	腱传动 气动肌肉
DLR-HIT I 手	DLR 与 HIT	2.2	4指/12DOF	非接触式磁性关节角度传感器，基于应变仪的关节扭矩传感器，指尖力传感器	带有模拟霍尔传感器的商用无刷直流电动机	锥齿轮、行星齿轮
DLR-HIT II 手	DLR 与 HIT	1.5	5指/15DOF	微型手指6维力矩传感器，压阻式触觉传感器，温度传感器	超薄平无刷直流电机	同步带、钢丝、谐波齿轮
BH-985 手	北京航空航天大学	-	5指/11DOF	6维力/力矩传感器，角位移传感器	电动机	齿轮、钢丝绳传动、连杆传动、十字轴传动

资料来源：薛智慧和刘金国《空间机械臂操控技术研究综述》，华安证券研究所

## 2.2 灵巧手技术路线选择——驱动方式

- **技术路线1：空心杯电机**
- **特点：**具有轻量高效、高转速和长寿命的特点，适合需要高精度和快速响应的场合，但单独空心杯电机扭矩相对较低，需要搭配行星齿轮减速器以降低输出轴的速度并增加扭矩。
- **应用：**因时机器人灵巧手内部装有6个小型伺服驱动器，集成无刷电机、行星减速机、直线导轨、绝对位置检测传感器和力传感器。特斯拉Optimus单手6个无刷空心杯电机模组，由空心杯电机+行星减速机+编码器+驱动器+传感器构成。
- **供应厂商：**Maxon和Faulhaber在技术上处于领先，有刷空心杯电机最小尺寸可做到6mm，无刷空心杯电机直径Maxon和Faulhaber分别可做到4mm和3mm。鸣志电器的无齿槽空心杯电机模组、精密丝杠传动模组等在机器人各主要运动控制功能模块中广泛适用，空心杯电机成本优势凸显，但高端产品在功率、效率等方面与海外三大家仍存在差距。

图表11：因时机器人仿人五指灵巧手



资料来源：因时机器人，华安证券研究所

图表12：空心杯电机主要供应商产品尺寸范围

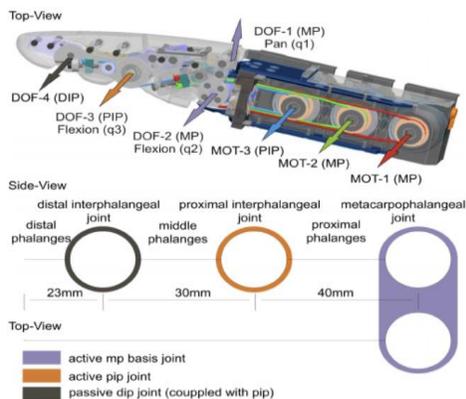
供应商	有刷空心杯直径 (mm)	无刷空心杯直径 (mm)
Maxon	6-65	4-90
Faulhaber	6-38	3-44
Portescap	8-35	12-35
鸣志电器	8-24	13-30
鼎智科技	/	16-42
拓邦股份	16-40	12-40

资料来源：立鼎产业研究，华安证券研究所

## 2.2 灵巧手技术路线选择——驱动方式

- **技术路线2: 无框力矩电机**
- **特点:** 具有低转速大扭矩的特点, 能直接耦合(无背隙), 可以直接驱动负载, 不需要皮带、齿轮等传动装置, 其应用于灵巧手相比空心杯电机模组可节省传动部件, 具备一定成本优势。
- **应用:** Dexhand和Spacehand灵巧手都采用Robodrive ILM 25无框力矩电机, 该电机与传动比为100:1的谐波减速器HFUC 8结合, 组成圆柱体(长约17.5mm, 重约46g), 提供2.4Nm的连续扭矩, 峰值可达9Nm。
- **供应厂商:** 步科股份FMC系列无框力矩电机采用了多槽分瓣式结构, 齿槽定位力矩小, 可对标国际领先产品。禾川科技于24年5月发布hu-mdb系列无框力矩电机, 并宣布正式进军人形机器人赛道。

图表13: Dexhand手指驱动原理示意图



资料来源: IEEE机器人与自动化国际会议, 华安证券研究所

图表14: 步科股份FMC系列无框力矩电机



资料来源: 步科股份官网, 华安证券研究所

## 2.2 灵巧手技术路线选择——驱动方式

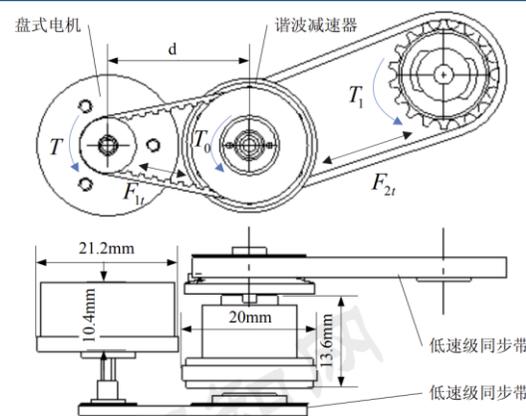
- **技术路线3：无刷有齿槽电机**
- **特点：**无刷电机减少了机械接触和磨损，寿命更长且维护成本较低；有齿槽磁能更集中，相比空心杯电机模组转速更低可以节省齿轮箱，性价比优势较突出。
- **应用：**DLR/HIT Hand II手指基关节模组使用了Maxon的无刷有齿槽电机和谐波减速器。出于人形机器人降本需求，搭载无刷有齿槽电机的灵巧手商业化进度可能更快。
- **供应厂商：**Maxon有EC-i、EC flat等系列无刷有齿槽电机，其中EC-i 30以其高动态性能、低齿槽转矩和高转矩特性而著称。

图表15: Maxon无刷有齿槽电机产品

	EC-i ø 30 - 52 mm	EC-flat ø 62 - 90 mm	EC frameless flat ø 43 - 90 mm	EC frameless DT ø 42 ... 90 mm
空心杯绕组	否	否	否	否
内转子	☑	否	否	☑
可配置	否	否	否	否
尺寸	否	否	否	否
高转速	否	否	否	否
高转矩	☑	☑	☑	☑
动态	☑	否	否	☑
性价比	☑	☑	否	否
其他特征	否	短型 (盘式) 设计	无外壳, 短型 (盘式) 设计	无外壳, 空心轴

资料来源：Maxon官网，华安证券研究所

图表16: DLR/HIT Hand II的驱动和传动系统

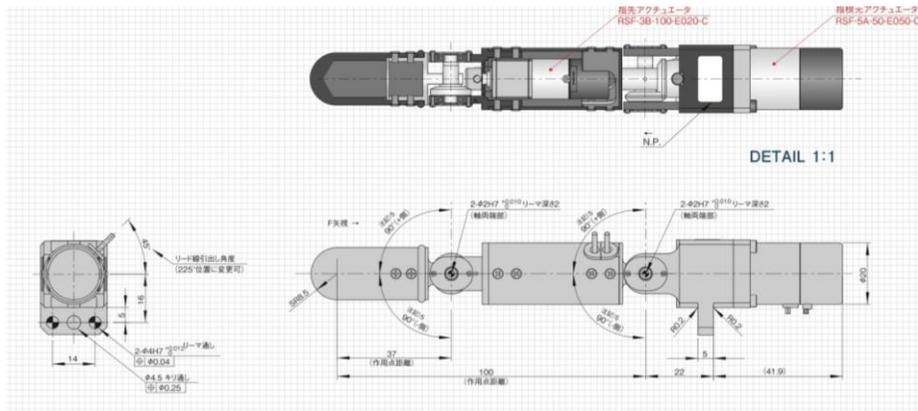


资料来源：樊绍巍《类人型五指灵巧手的设计及抓取规划的研究》，华安证券研究所

## 2.3 灵巧手技术路线选择——减速器

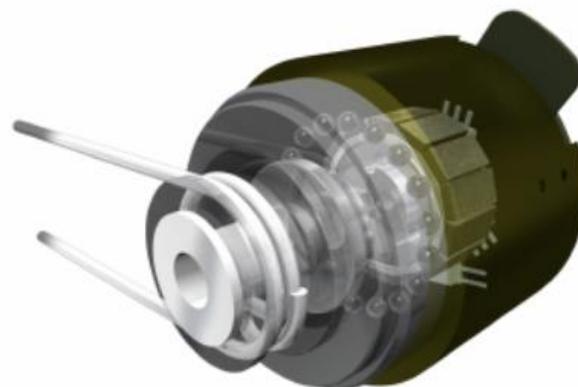
- **技术路线1：谐波减速器：**哈默纳科在2023年东京国际机器人展览会上展示了搭载微型谐波减速器的灵巧手方案，该产品可实现无限模仿人手精密动作处理。
- **特点：**谐波减速器相比行星优势在于精度和背隙，目前微型谐波的问题主要是成本、传动效率和速比上限。
- **供应厂商：**精密传动设备头部厂商日本哈默纳科用于人形机器人手部的迷你执行器RSF-3C及RSF-5B，集成谐波减速器、无刷伺服电机及编码器于一体。绿的谐波KAH系列中空轴旋转执行器采用一体化设计，集成了高精度谐波减速器、无框力矩电机、中空轴高分辨率绝对值编码器、制动器和智能传感器等组件，广泛应用于工业机器人。

图表17：东京大学灵巧手使用微型谐波减速器模组



资料来源：人形机器人研究院，华安证券研究所

图表18：带 ILM 25 和谐波传动装置的驱动单元

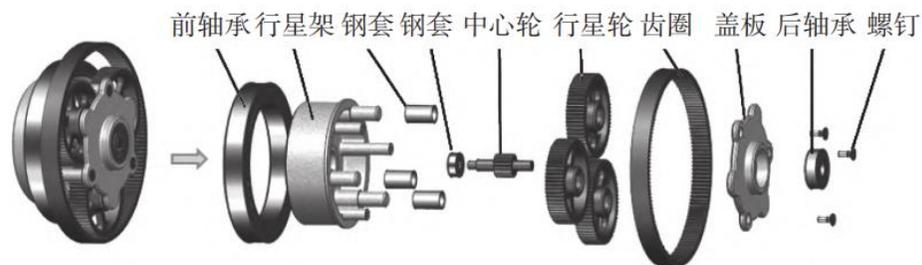


资料来源：IEEE机器人与自动化国际会议，华安证券研究所

## 2.3 灵巧手技术路线选择——减速器

- **技术路线2：精密行星减速器：** 特斯拉Optimus单手6个无刷空心杯电机模组，由空心杯电机+行星减速箱+编码器+驱动器+传感器构成。
- **特点：** 具有更高的扭矩传递能力和更强的刚性，且成本较低。
- **供应厂商：** 日本新宝有VRS、VRSF、VRB等系列精密行星减速器，具有极低的回转间隙和背隙，其中VRSF系列小于间隙 $0.05^\circ$ 的高精度型、使回转间隙 $0.08^\circ$ 系列化。科峰智能S系列行星减速机-SPH齿轮材料选用高级低碳合金锻钢,经过渗碳淬火之深度硬化处理,硬度可达到HRC60，保证齿轮强度和寿命。

图表19：行星减速器结构示意图



资料来源：洪健等《一种高性能移动机器人一体化关节模组设计》，华安证券研究所

图表20：日本新宝VRSF系列精密行星减速器



资料来源：日本新宝，华安证券研究所

## 2.4 灵巧手技术路线选择——传动方式

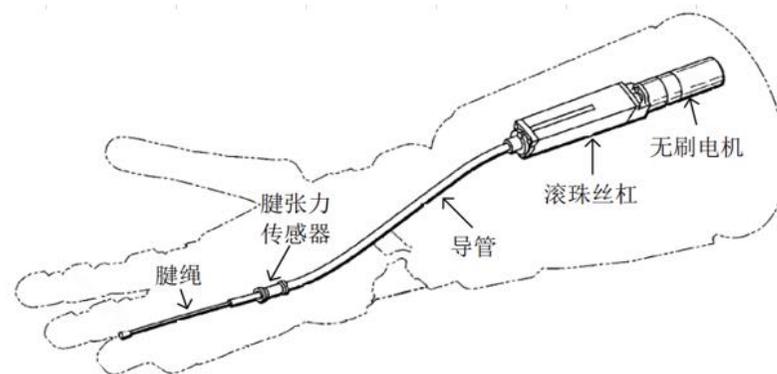
- **技术路线1：腱绳传动**
- **特点：**通过腱绳传动的电驱动方式是最常见的设计方式，能够有效弥补驱动单元置于指关节中带来的减益效果，易于指骨小型化，并能为传感器和电气线路提供足够布局空间，且具有控制灵活、结构简单、柔性高的特点，特别适合自适应的抓取动作。
- **应用：**Shadow 灵巧手采用腱绳传动，所有驱动器放置在灵巧手外部，有效减小了灵巧手的体积和重量。特斯拉Optimus传动采用蜗轮蜗杆+腱绳机构一体化设计，金属腱绳实现自适应抓取能力。

图表21：通过腱绳传动的外置电驱动方式示意图



资料来源：颜文或《多指腱驱动灵巧手机构优化设计及抓取规划研究》，华安证券研究所

图表22：腱绳驱动结构示意图

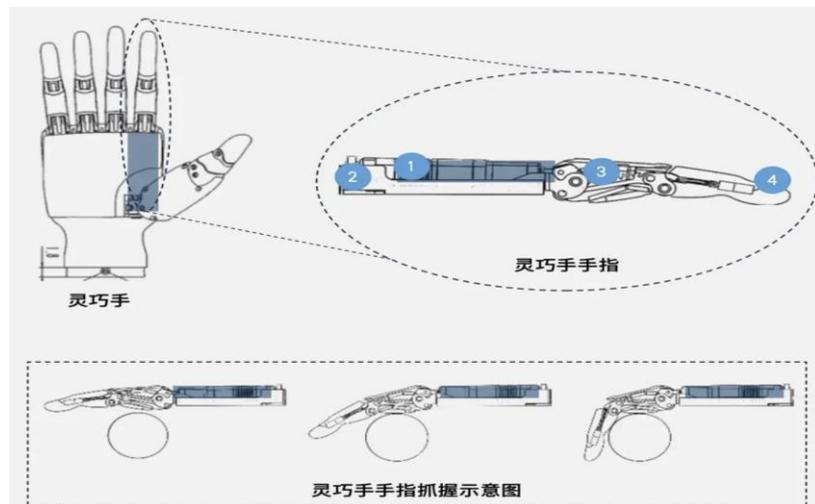


资料来源：徐彤彤《多指灵巧手动力学与操作控制技术研究》，华安证券研究所

## 2.4 灵巧手技术路线选择——传动方式

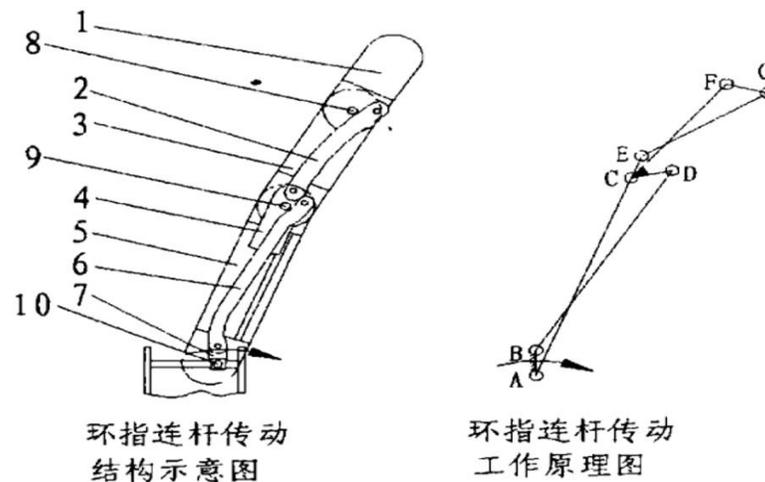
- **技术路线2：连杆传动**
- **特点：**连杆传动具有高动作刚性和负载能力，但柔性较差，多个连杆串并联混合的使用形式较为常见。
- **应用：**国内玩家以杆式结构为主流方案，目前主要以假肢领域应用为主。因时机器人仿人五指灵巧手采用连杆传动方案，具有6个自由度和12个运动关节，结合力位混合控制算法，可以模拟人手实现精准的抓取操作。

图表23：连杆传动灵巧手机械结构图



资料来源：HAPTAC哈普泰克，华安证券研究所

图表24：连杆传动灵巧手机械结构图



资料来源：李久振等《北航BH-985灵巧手结构设计》，华安证券研究所

## 2.4 灵巧手技术路线选择——传动方式

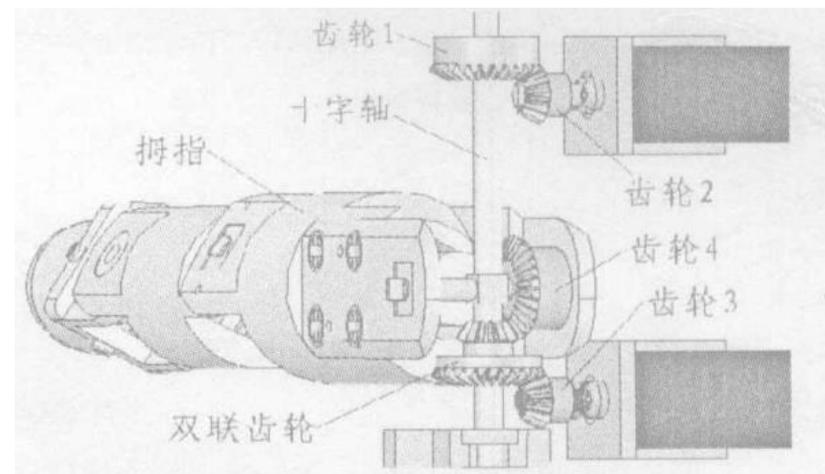
- **技术路线3：齿轮传动**
- **特点：**力控精确，传动精度高，传动扭矩大，可靠性较强；但难以实现远距离传动，通常需要配合耦合方案实现传动。
- **应用：**i-limb ultra Hand在电机和蜗杆传动装置之间使用一组锥齿轮以传递角度，同时在远端关节结合应用了腱绳传动。

图表25: i-limb ultra Hand示意图



资料来源：ossur，华安证券研究所

图表26: 齿轮传动灵巧手机械结构图



资料来源：李久振等《北航BH-985灵巧手结构设计》，华安证券研究所

## 2.5 灵巧手传感器——力传感器

- **力/力矩传感器**测量物体转动力矩并转化为电信号输出，用于精准力控。按测量方向可分为一到六维力传感器。六维力矩传感器是性能最优、技术壁垒最高的力矩传感器，能够同时测量三个轴向力 $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$ 和三个轴向力矩 $M_x$ 、 $M_y$ 、 $M_z$ ，能够满足任何方向上力的检测。目前六维力传感器主要用于手腕和脚踝，灵巧手手指模组搭载的传感器一般为一维力传感器。
- **供应厂商**：国内真正具备批量供应能力的厂商依然较少，宇立仪器、坤维科技、鑫精诚、蓝点触控等厂商相对领先，受制于技术壁垒，暂时未形成大规模的生产优势。宇立仪器在工业机器人磨抛行业和汽车碰撞测试行业应用较多；坤维科技在协作机器人、医疗手术机器人、医疗检测机器人和康复机器人领域优势显著；鑫精诚主要应用在3C行业、机器人行业以及医疗行业为主，凭借苹果供应商的身份已在3C行业起量；蓝点触控在协作机器人及力控打磨领域有较深的积累。

图表27：六维力传感器在人形机器人的布局示意图



资料来源：优必选官网，华安证券研究所

图表28：六维力传感器示意图



资料来源：宇立仪器官网，华安证券研究所

## 2.5 灵巧手传感器——触觉传感器

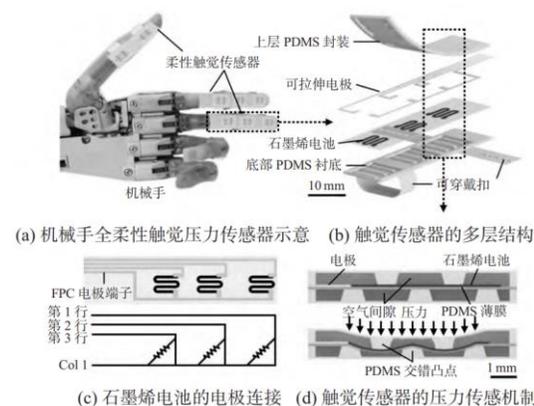
- **柔性传感器（电子皮肤）**：利用柔性材料的物理特性，将外部的力学量转换为电学量从而实现触觉感知，具有高灵敏度、高柔韧性、响应速度快、延展性高、自由弯曲折叠等特点；材料选择包括敏感材料和柔性基底材料。整体价值较高，根据文献若一只灵巧手的五只手指全部配备以硅橡胶为基底的多阵列柔性触觉传感器，需要花费约800美元。
- 特斯拉的传感器主要部署在手指尖和关节处，采用传统的硅基材料，较坚硬且属于较为成熟技术领域。相比之下，电子皮肤侧重于柔韧性和多功能感知能力，旨在模仿人类皮肤的功能。随着量产的实现，电子皮肤的成本理论上可以降至1000元以内。
- **应用**：汉威科技旗下能斯达已成功研发出薄膜电容触觉传感器，可广泛应用于机器人身体部位，已与小米科技、九号科技、深圳科易机器人等多家企业建立合作关系。苏试试验研发的柔性应力振动传感器将作为电子皮肤在机器人、可穿戴设备、假肢等领域应用。墨现科技已实现功能性与可靠性完全解耦的柔性压力传感器量产方案，可满足低触发力度、大量程、低成本的需求。

图表29：柔性薄膜压电传感器示意图



资料来源：能斯达电子官网，华安证券研究所

图表30：全柔性触觉压力传感器



资料来源：吴帅帅等《高灵敏度柔性电子皮肤的研究与应用进展》，华安证券研究所

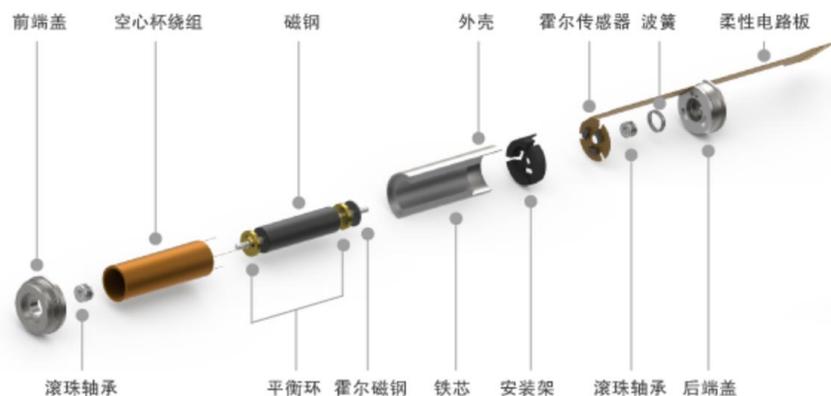
## 目录

- 1 灵巧手结构及功能
- 2 灵巧手发展路径：成本与功能的博弈
- 3 灵巧手重要部件详解 
- 4 相关标的
- 5 风险提示

### 3.1 灵巧手的驱动电机：空心杯电机

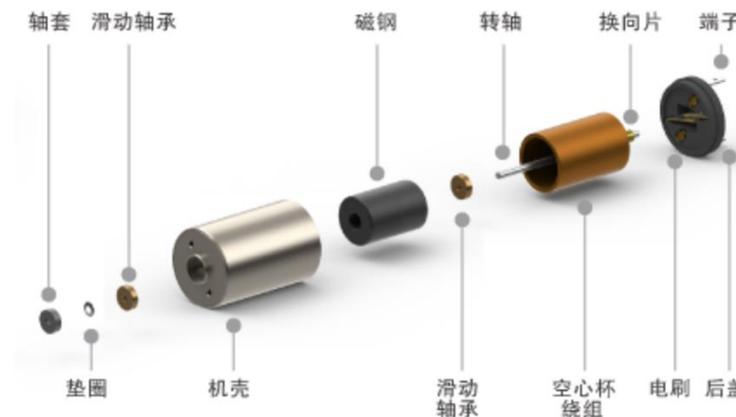
- 灵巧手使用的一般指的是空心杯电机+多级行星减速箱组成的模组，一双特斯拉灵巧手需要12个无刷空心杯电机模组。
- 空心杯电机是一种特殊的直流电机，在结构上突破了传统直流电机的结构形式，采用的是无铁芯转子，其电枢绕组为空心杯线圈，形似水杯，因此被称为“空心杯电机”。
- 空心杯电机具有高速低扭矩的特性，为了在较小空间内获得较大的手指抓握力，需要搭配行星减速箱使用，一般会集成2-3级的行星减速箱。空心杯关节是直流永磁伺服微特电机的一类，从原理上来说属于旋转关节的范畴，具有新颖的转子结构、独特的线圈制造工艺和较小的尺寸。空心杯电机分为有刷和无刷两种，有刷电机转子无铁芯，无刷电机定子无铁芯。

图表31：无刷空心杯电机结构图



资料来源：鸣志电器官网，华安证券研究所

图表32：有刷空心杯电机结构图



资料来源：鸣志电器官网，华安证券研究所

### 3.1.1 空心杯电机技术壁垒：绕线方式和设备线圈制造

- 绕线方式及设备线圈制造是空心杯电机的核心流程。
- 空心杯电机生产近30道工序：前段线圈绕制，中段轴承、芯轴、支撑环等核心零部件安装，后段后盖安装和线路板焊线等。线圈的生产包括：漆包线——绕线——加热整形——出线脱漆、接公共线——线圈安装等环节。无铁芯的自支撑绕组由漆包线制成，这是一根绝缘铜线，制造过程中通过施加压力和温度将相邻电线的漆熔化在一起，适当的粘合（胶带或玻璃纤维）可进一步提高缠绕的强度和形状稳定性，这一点在高电流负载尤为重要。
- 线圈专利多，每家厂商绕组设计不同，绕线工艺决定空心杯电机质量，其中马鞍形和斜绕形工艺简单；绕线设备决定自动化生产水平，国内厂商以半自动化为主，国外领先企业Maxon、Faulhaber实现一体成型自动生产。

图表33：空心杯电机绕组方式



a) 直绕组

b) 斜绕组

c) 菱形绕组

资料来源：张忠强《永磁无刷空心杯电机及控制器研究》，华安证券研究所

图表34：空心杯电机绕组方式特点

直绕组	斜绕组	菱形绕组
端部不产生力矩，且增加了电枢重量和电枢电阻	没有端部绕组，节省了导线，减轻电枢重量，具有转动惯量小、时间常数小、拖动特性好、输出力矩大等优势	

资料来源：张忠强《永磁无刷空心杯电机及控制器研究》，华安证券研究所

### 3.1.2 空心杯电机市场格局：高端产品海外厂商优势明显

- 根据Motor&MagneticExpo数据，空心杯电机份额仍然集中在海外厂商，国内外空心杯电机制造商在软实力和硬实力均有一定差距。硬实力的差距主要集中在电机材料选用、本体设计和机电控制方案配置等方面，国外企业具有先进的加工镀膜工艺与更扎实的电机材料理论研究，小尺寸电机设计能力强，具有上千种方案进行驱动配置；软实力的差距主要集中于市场影响力、客户资源、品牌声誉与市场认可度等方面。
- 海外厂商起步较早，拥有性能优异的设备 and 稳定成熟的工艺。海外三大家成立最早，技术和工艺深厚，价格偏高，目前空心杯电机领先企业为瑞士MAXON、德国FAULHABER和瑞士PORTESCAP，全球市占率70-80%，主要用于医疗领域和电动工具。
- 与海外领先企业产品性能相比，我国空心杯电机部分品类的产品性能接近或达到海外领先企业标准，高端产品在功率、效率等方面存在差距。1) 比较直径为8mm、额定电压6V的有刷空心杯电机产品参数，鸣志电器的产品在功率密度和效率上与Maxon、Faulhaber、Portescap的产品存在差距。鼎智科技、拓邦股份、伟创电气8mm的产品处于验证或者开发阶段。

图表35：国际主要空心杯电机厂商一览

公司名称	公司简介
瑞士MAXON	成立于1961年，产品约1.2w个品种，包括直流有刷、无刷电机，齿轮箱，传感器，编码器，伺服放大器，位置控制器，其空心杯电机主要用于医疗领域
德国FAULHABER	1947年在德国斯图加特附近成立，产品包括高性能直流电机、无刷直流电机、线性电机、步进电机，在德国、瑞士、美国、罗马尼亚、匈牙利等地拥有研发生产基地，其空心杯电机主要用于电动工具
瑞士PORTESCAP	1931年在瑞士成立，1959年推出空心杯电机后进入微型电机行业，产品包括直流有刷、无刷电机，步进电机，齿轮箱，驱动器，编码器，研发中心包括美国、中国、印度和瑞士，制造工厂位于美国、印度，其空心杯电机主要用于医疗领域和电动工具

资料来源：各公司官网，华安证券研究所

图表36：国内主要空心杯电机厂商一览

公司名称	公司简介
鸣志电器	2010年起开始研发空心杯电机，定位高端应用，主要布局慢速移动人工智能、高端医疗器械及生化分析仪器、智能汽车电子、暖通水泵模组系统、半导体生产设备和工控自动化等领域，已有产品包括空心杯电机（本体+驱动器）、减速机、编码器等
鼎智科技	国内第一家能够实现空心杯电机自动化批产厂商，22年推出无刷空心杯电机，电机直径范围 $\phi 16\text{mm}-\phi 42\text{mm}$ ，包括5个产品系列，绕线设备由母公司江苏雷利自动化团队、鼎智科技以及其他合作方共同研发
兆威机电	公司主要产品以微型电机+齿轮箱为主，其中电机主要为外采标准化电机，公司优势在于齿轮箱。如公司的相机调焦驱动系统，由直流空心杯电机+塑胶行星齿轮箱构成，其结构紧凑、占用空间小，质量轻
伟创电气	22Q2成立了机器人行业部，有空心杯电机产品。目前主要是以机器人大配套为出发点，执行端主要以低压伺服、空心杯电机、特种无框力矩电机、谐波减速器等这类产品为主

资料来源：各公司官网，华安证券研究所

## 3.2 灵巧手的驱动电机：无框力矩电机

- 机器人关节所采用的控制电机主要可分为伺服电机和步进电机。步进电机具备易用和成本优势，而伺服电机在精度、过载能力、频距等性能方面的优势更加明显，力矩电机与空心杯电机都属于伺服电机，更适合应用在机器人关节与灵巧手。步进电机通过控制脉冲个数来控制转动角度，从而准确定位；伺服电机通过控制脉冲时间的长短控制转动角度。
- 伺服电机下子类较多，最常见按电流类型来分为直流伺服电机和交流伺服电机。
- 人形机器人关节要求快速响应、高功率密度、高效率、高灵活度，因此直流无刷电机特点最为符合。
- 力矩电机全称为永磁无刷直流力矩电机，无框力矩电机省去了电机的外壳，仅保留了传统电机中转子和定子两个部分，更直接集成到人形机器人关节中，与其他部分（如轴承和外壳）紧密结合。

图表37：科尔摩根无框力矩电机产品图

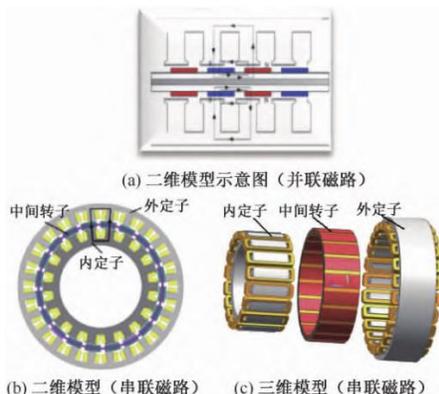


资料来源：工业产业链研究，华安证券研究所

### 3.2.1 无框力矩电机技术壁垒：磁路和工艺设计

- 无框力矩电机的技术壁垒主要在于磁路和工艺设计。机器人关节驱动电机主要关注电机的输出转矩能力和效率，而无框力矩电机要在低压供电的环境下输出较大的功率，因此在磁路和工艺设计方面存在一定的技术能力要求。海外厂商起步较早，工艺技术存在先发优势，如美国科尔摩根采用分布式的分数槽及碳纤维绑扎技术，德国TQRobodrive采用模块化定子和环氧塑封灌胶技术，韩国TMTECH转子采用整体充磁磁环技术。国内企业起步晚，转矩密度和国外高端无框力矩电机相比存在一定差距。
- 国外企业在力矩电机方面占据较大优势，我国力矩电机厂商处于第二梯队。力矩电机全球第一梯队厂商主要有美国Kollmorgen,德国TQ,瑞士Maxon Motor,美国Aerotech,美国Allied Motion等。我国的力矩电机厂商处于第二梯队，目前进展较快的公司包括步科股份、禾川科技、昊志机电、雷赛智能等。

图表38：双定子永磁同步电机



资料来源：李荣等《机器人关节用双定子永磁同步电机设计》，华安证券研究所

图表39：力矩电机主要参与者一览

公司名称	公司简介
美国 Kollmorgen	全球无框力矩电机龙头，在运动控制领域拥有 100 多年的经验，提供高性能、可靠的电机、驱动器、线性执行器、减速机、AGV 控制解决方案和自动化平台。TBMDC 系列是科尔摩根专门为机器人关节开发的无框力矩电机，可在极其紧凑的电磁封装中提供高性能转矩，能够减轻机器人的关节重量，使其拥有更高的负载承载能力，能效更高，温升更低，从而实现更快、更平稳的运行。主要生产直流电动机、无刷直流电动机、三相异步电动机和各种变频器等，其中 TQ-Robo-Drive 无框电机具有市场领先的转矩密度，功率密度、高热过载能力、出色的动态性能、卓越的位置精度、优化的空心轴和极短的轴向长度。
德国 TQ	Aerotech 的线性电机和旋转电机植根于 50 年的电机设计和制造专业技术，S 系列电机是 Aerotech 的高性能无刷无框力矩电机，采用稀土磁铁，可在紧凑的组件中实现最大扭矩和加速度，同时提供出色的速度稳定性。
美国 Aerotech	Maxon 是全球领先的电驱动系统制造商，其无刷 DC 电机（EC 电机）具有转矩特性良好、转速范围广泛以及使用寿命长等优点。
瑞士 Maxon Motor	Allied Motion 主要专注于运动控制应用，并在其在电磁、机械和电子运动技术方面的专业知识而闻名于世，提供多个系列的高性能无框和封闭式无刷力矩电机，无框尺寸范围从 17.3 毫米（0.68 英寸）到 792 毫米（31.2 英寸）。
美国 Allied Motion	步科股份 公司已拥有机器人界面、可编程逻辑控制器、伺服系统、步进系统、低压变频器等完整的工业自动化核心部件产品线，针对机器人关节动力需求，采用独特的磁路设计、绕线并线工艺及传感器安装结构设计，开发高功率密度无框力矩电机，在减小电机体积重量的同时输出较大力矩。
禾川科技	公司具备完整的自动化产品线，包括伺服系统、控制器（PLC）、视觉系统、编码器、变频器、触摸屏等，掌握光编、磁编、新型感编等三种编码器技术，其中磁编在市场上得到广泛应用，将会在无框力矩电机的基础上开发组合式产品。
昊志机电	公司专业从事中高端数控机床、机器人、新能源汽车核心功能部件等的研发设计与生产制造，现有的产品包括谐波减速器、无框力矩电机、驱动器、编码器、力矩传感器等，无框力矩电机和编码器等产品目前主要应用于公司与客户共同开发的按摩机器人。公司人形机器人产品线包括无框力矩电机、空心杯电机、微型伺服系统等产品相继研发成功并开始对客户验证使用，FM1 系列无框电机采用多槽极配合优化的定转子设计以及日系真空灌封工艺，对标全球最优秀无框电机同行，具有转矩密度高、功率密度高、体积小、重量轻、转子内径大、发热小、转矩波动小等众多优点。
雷赛智能	

资料来源：各公司官网，华安证券研究所



### 3.3 灵巧手的重要部件：精密减速器

- 精密减速器是机器人转动关节的核心零部件。精密减速器具备体积小、重量轻、精度高、稳定性强等特点，能够对机械传动实现精准控制，主要可以分为谐波减速器、RV减速器、精密行星减速器。
- 谐波减速器具有体积小、质量小、传动精度高、运转平稳等优点，因此主要应用于机器人小臂、腕部、手部等部件；RV减速器的优点包括传动比范围大、传动效率高、刚性和耐过载冲击性能好等，主要应用于机器人的机座、大臂、肩部等大关节；精密行星减速器具有大扭矩高刚性、高单级传动效率、寿命长等优点，主要与伺服电机、控制器共同组成机器人的驱动装置。

图表40：三种精密减速器特点对比

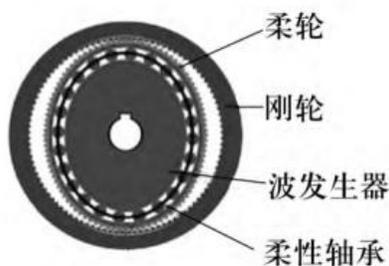
类别	结构特点	优点	缺点	应用
谐波减速器	主要包括波发生器、柔轮与刚轮。减速器工作时，波发生器会发生可控变形，同时依靠柔轮、刚轮的啮合传递动力。	传动精度高，重量和体积小，运转平稳、传动比大。	传递扭矩相对较小，传动效率低、使用寿命有限。	机器人中负载较小的小臂、腕部和手部等关节、航空航天、精密加工设备和医疗设备领域。
RV减速器	主要包括两级传动装置，分别为渐开线行星齿轮传动和摆线针轮行星传动。	传动比范围广至31-171，传动效率高达85%-92%，传动平稳性高，承载能力强，刚性和耐过载冲击性能好，传动精度高。	结构复杂、制造难度大、成本高。	机器人中负载较重的机座、大臂、肩部等大关节。
精密行星减速器	体积比较小，主要包括行星轮、太阳轮和内齿圈。精密行星减速器单级传动比都在10以内，且减速级数一般不会超过3级。	扭矩大、精度可高达1'以内、单级传动效率高达97%、重量轻、寿命可长达2万小时、免保养。	单级传动比范围小。	移动机器人、新能源设备、高端机床、智能交通等行业的精密传动装置。

资料来源：科峰智能招股说明书，华安证券研究所

### 3.3.1 谐波减速器

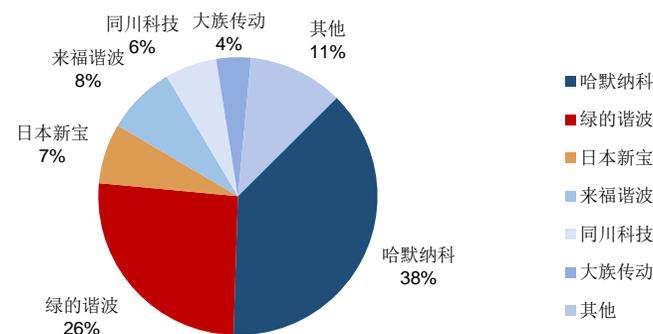
- 谐波减速器是机械传动的核心零部件，具备大传动比、高传动精度、小体积的特点。根据结构形式不同，一般分为杯形和礼帽形谐波减速器。柔轮和轴承是谐波减速器的核心传动零部件，其复杂的变形和应力分布影响了谐波减速器的传动性能和疲劳寿命。
- 中国厂商在国内谐波减速器市场中具备一定竞争力。全球减速器市场中谐波减速器行业头部厂商为哈默纳科，国内参与者主要有绿的谐波、来福谐波、同川科技等，目前国内厂商在减速比、额定扭矩、传动效率、精度方面已接近或达到国际先进水平，但使用寿命方面与国际头部厂商产品仍有一定的差距。

图表41：谐波减速器结构示意图



资料来源：冯戴一楠等《柔性轴承动性能试验技术的研究及展望》，华安证券研究所

图表42：2022年中国谐波减速器行业企业竞争格局

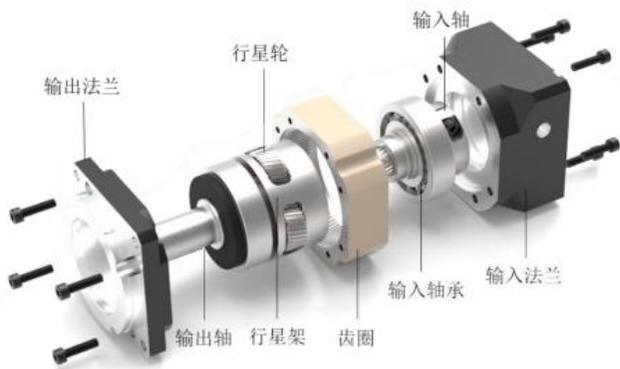


资料来源：华经产业研究院，华安证券研究所

### 3.3.2 行星减速器

- 精密行星减速器具有高传动效率、高承载能力、高扭矩、寿命长及维护简单等特点。其主要传动结构为：行星轮，太阳轮，外齿圈，在工作过程中，通常由伺服电机等原动机驱动太阳轮旋转。太阳轮与行星轮的啮合带动行星轮自转，同时行星轮的另一侧与减速器壳体内壁上的环形内齿圈啮合，使行星轮在自转的同时沿着与太阳轮旋转相同方向在环形内齿圈上滚动，形成围绕太阳轮旋转的“公转”运动。行星轮通过公转驱动行星架旋转，行星架与输出轴连接，从而带动输出轴输出扭矩。
- 全球精密行星减速器市场以日德厂商为主，主要厂商包括日本新宝、纽氏达特等；中国精密行星减速器竞争格局较为分散，高端精密行星减速器的国产化率较低，科峰智能市场占有率相对较高。

图表43：精密行星减速器结构示意图



资料来源：科峰智能招股说明书，华安证券研究所

图表44：精密行星减速器特点一览

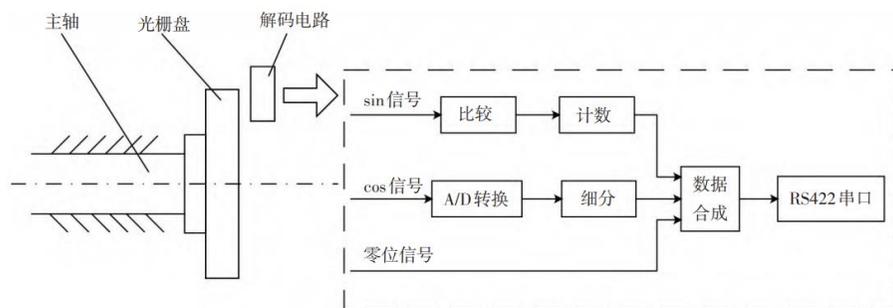
特点	说明
体积重量小	通过精密化设计减小了体积和重量
精度高	严格的制造和装配工艺控制，提供优异的性能指标
传动效率高	由于传动结构的对称性，单级传动效率可达97-98%
承载能力强	多个行星轮分担载荷，提高减速器的承载能力
抗冲击和振动性能好	对称结构使得惯力平衡，运动平稳
结构简单	相比谐波和RV减速器，成本较低

资料来源：焉知人形机器人，华安证券研究所

### 3.4 灵巧手的重要部件：光编码器

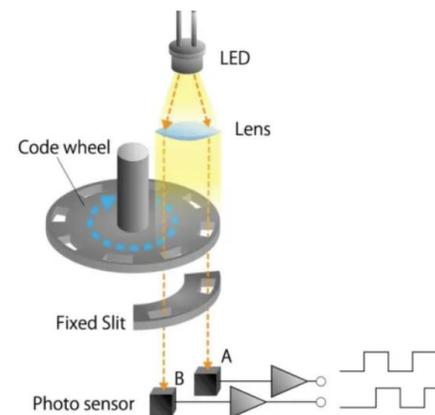
- 编码器用于测量机械部件的旋转或位移，将位移位置或速度等信息转换为电信号输出。根据检测原理不同，编码器可分为光学式、磁式、感应式和电容式等类型。光编码器由发光元件、光敏元件及码盘组成，将旋转位置信息转化为光脉冲信号进行检测。
- 人形机器人对运动精度和稳定性要求极高，光编码器连接伺服电机，提高运行精度，在人形机器人中发挥着重要作用。一双特斯拉灵巧手需要12个光编码器，一台特斯拉人形机器人需要54个光编码器。
- 技术壁垒：光编码器属于高精度测量仪器，外售验证复杂，汇川和禾川的光编码器以自用为主。设计端：研发投入高，集光、机械、电技术一体，人形机器人应用带来的高分辨率及小型化的增量需求，研发需要配合体积和精度，难度较大；加工端：需要确保良品率，同时芯片、码盘等原材料仍需要进口。

图表45：光栅编码器组成



资料来源：隋印和孙艳彬《基于反正切法细分的光栅编码器设计》，华安证券研究所

图表46：光编码器结构示意图

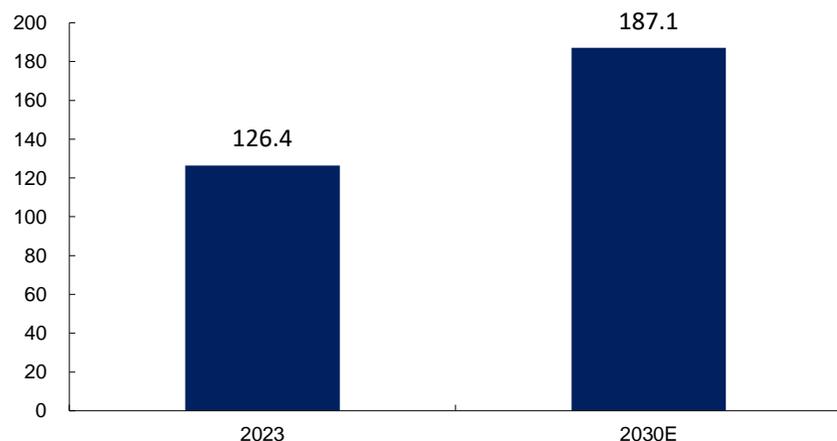


资料来源：AMK，华安证券研究所

### 3.4.1 光编码器市场空间广阔，国内奥普光电领先

- **市场空间：**据DI Research数据，全球光学编码器市场规模呈稳步扩张态势，2023年全球光学编码器市场销售额约126.4亿美元，预计2030年将达到187.1亿美元，2023-2030年复合增长率（CAGR）为5.76%。
- **竞争格局：**国际光学编码器主要制造商包括Broadcom、BEI Sensors、Renishaw、Dynapar、Baumer Group、多摩川、CTS、Allied Motion、EPC、US Digital、CUI、欧姆龙、海德汉等，国内生产光编码器的企业包括奥普光电（持有禹衡光学65%股份）、汇川技术、禾川科技、雷赛智能等。

图表47：光编码器市场空间（亿美元）



资料来源：DI Research，华安证券研究所

图表48：国内光编码器竞争格局

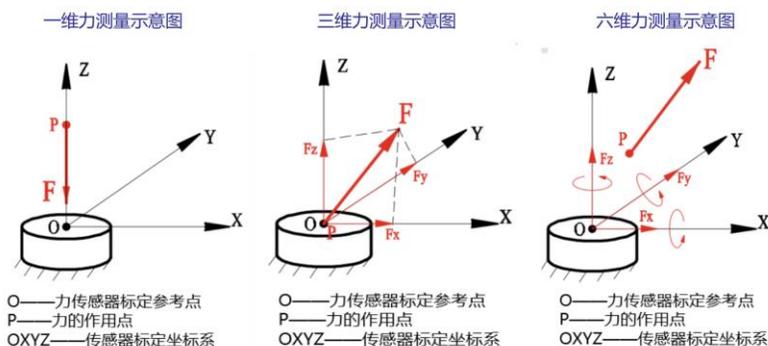
公司	具体进展
奥普光电	控股子公司禹衡光学（持股65%）主导产品光电编码器，公司的技术水平接近国际同行的先进水平。从销量规模和从技术实力上，都优于国内同类的厂家
禾川科技	自主研发的光编码器，分辨率最高可达23bit。同时，公司25bit光编码器也正在研发中，目前已形成研发样机。公司光编码器各核心指标表现优异
雷赛智能	在伺服编码器领域，公司已经成功研发出23位磁编码器以及高精度光学编码器，大幅提升了伺服系统性能，2022年4月宣布扩产160万个编码器产能
汇川技术	国内伺服系统龙头，公司掌握高精度编码器设计和工艺技术的核心技术。公司目前以光编码器为主，未来持续降本能力强

资料来源：各公司官网，华安证券研究所

### 3.5 灵巧手的重要部件：力传感器

- 传感器相当于机器人的触觉，力矩传感器是一种用于测量物体所受到的力矩或扭矩的传感器。力矩是绕轴旋转时的力的效果，可以是静态力矩或动态力矩，力矩传感器的作用是将物体的力矩转化为电信号。
- 按照测量方向分类，可分为一到六维力传感器。六维力矩传感器是性能最优、技术壁垒最高的力矩传感器。在笛卡尔坐标系中，单轴力传感器只能检测一个方向的力值，无法测量其他方向的分量；三维力传感器能够检测X、Y、Z三轴方向的垂直力，但需要保证Z轴方向与重力方向一致，否则力值测量容易引起误差。而六维力矩能够同时测量三个轴向力 $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$ 和三个轴向力矩 $M_x$ 、 $M_y$ 、 $M_z$ ，能够满足任何方向上力的检测，是功能最全面的力矩传感器。
- 六维力传感器的核心技术是弹性体的结构设计，这影响着传感器的灵敏度、动态性能、维间耦合等关键性能参数。六维力/力矩传感器的结构主要有一体化结构和Stewart并联结构两种。一体化结构的六维力传感器包括竖梁式、横梁式、复合梁式、圆筒式等。
- 目前六维力传感器主要用于手腕，灵巧手指模组搭载的传感器一般为一维力传感器。

图表49：不同维度力测量示意图



资料来源：坤维科技公众号，华安证券研究所

图表50：不同弹性体结构的力/力矩传感器的特性比较

机械结构	优点	缺点
竖梁	承载能力强，结构简单，横向效应和抗冲击性能好	纵向灵敏度低，维间耦合严重
圆筒式弹性梁	耦合小	刚度差
十字弹性梁	高对称性，结构紧凑，刚度大，易加工，由于柔性连接简化了力学模型	存在维间耦合和径向效应
非径向梁式	刚度大	输出为强非线性
复合梁型	可实现无耦合测量	结构复杂，受加工和装配精度的影响大
Stewart 并联结构	刚度大，稳定性好，负载能力大	较难实现力和力矩的各向同性，仅适用于静态力/力矩的测量

资料来源：付立悦《多维力传感器的静动态性能研究》，华安证券研究所

## 目录

- 1 灵巧手结构及功能
- 2 灵巧手发展路径：成本与功能的博弈
- 3 灵巧手重要部件详解
- 4 相关标的 
- 5 风险提示

## 4.1 Maxon: 精密驱动头部厂商，定制化模组优势突出

- Maxon Motor成立于1961年，一直专注于精密微型驱动器的开发和制造。Maxon技术领先优势明显，1968年研发出空心杯微电机，采用菱形绕组，获得生产专利。
- Maxon产品矩阵丰富，模组解决方案实力雄厚。**公司拥有超过5000种产品和100万种组合方式，客户可以根据需求选择搭配电机、齿轮箱、传感器、控制器和其他配件。Maxon高品质直流电机配备有强大的永磁体，电机的“核心”是获得世界专利的无铁转子；由于惯性矩小，直流电机的加速度非常高；模块化和可配置的DCX和DC-max程序可根据客户要求灵活调整。

图表51: Maxon产品矩阵一览

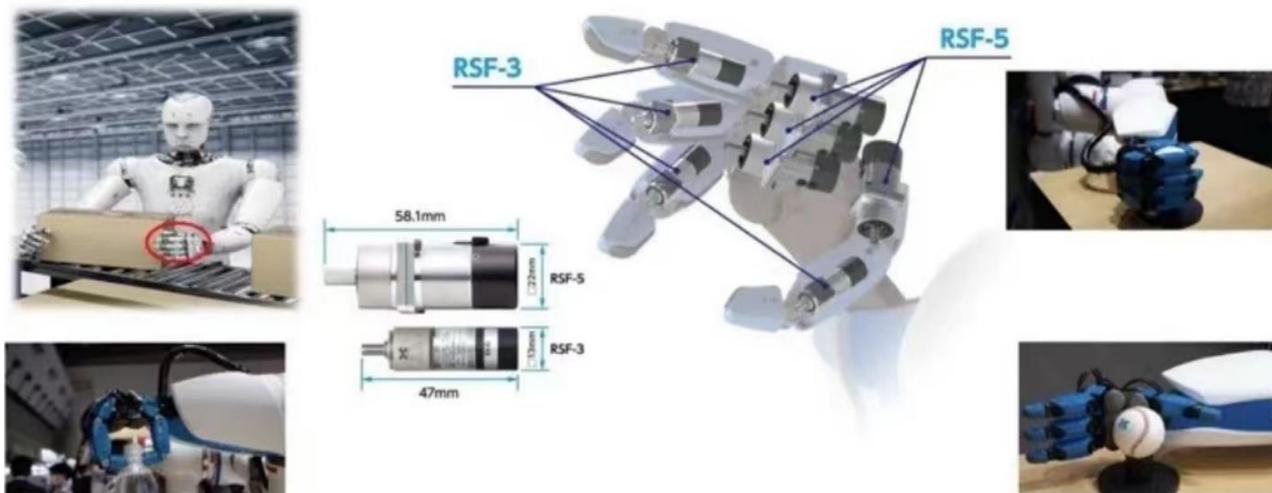
产品类型	示意图	详解
紧凑型驱动装置		无刷EC-i电机与EPOS4位置控制器组合并安装在具备连接器和IP65防护等级的高品质工业外壳中，构成一款具有磁场定向控制(FOC)的免维护紧凑型驱动装置
机电驱动系统		可根据具体项目要求研发驱动解决方案。完全按照个性化规格要求并采用彼此完美配合的部件。作为一个机电一体化单元集成在外壳中，可以大批量生产
有刷DC电机		配备性能强大的永磁体以及获得全球专利的空心杯转子。模块化DCX和DC-max系列可根据客户要求单独进行配置
无刷DC电机		具有转矩特性良好、转速范围广泛以及使用寿命极长等优点
行星齿轮箱/正齿轮箱/丝杠驱动		高精度行星齿轮箱直径4 - 81 mm，最大额定扭矩100 Nm，输入转速> 4000 rpm
传感器		可提供精确的数字编码器以及具有高精度和高分辨率信号的直流测速机和解析器，即使在高负载下也能无故障、精确地运行
控制器		所有电流、速度和位置控制器均专门针对功率高达1000 W的DC电机和EC电机进行优化设计，可通过CANopen或EtherCAT快速联网，并满足性能和精度方面的最高要求

资料来源：Maxon官网，华安证券研究所

## 4.2 哈默纳科：精密减速器头部厂商，落地灵巧手微型谐波方案

- 哈默纳科成立于1970年，由长谷川齿轮株式会社与美国USM公司合资建立。公司以谐波减速机产品起家，后续逐步开拓减速机相关领域的产品，公司于1977年投入机电一体化产品研发生产，其机电一体化产品结合了减速机、电机、传感器、驱动器、控制器和其他系统元件。哈默纳科谐波减速器23年占公司营收约63%，全球市占率达80%。
- 哈默纳科用于人形机器人手部的迷你执行器RSF-3C及RSF-5B，集成了谐波减速器、无刷伺服电机以及编码器等部门。目前公司应用的小型谐波减速器没有竞争对手。公司24财年在人形机器人收入目标34亿日元（约1.6亿人民币），占比10%。

图表52：哈默纳科搭载谐波减速器的人形机器人灵巧手示意图

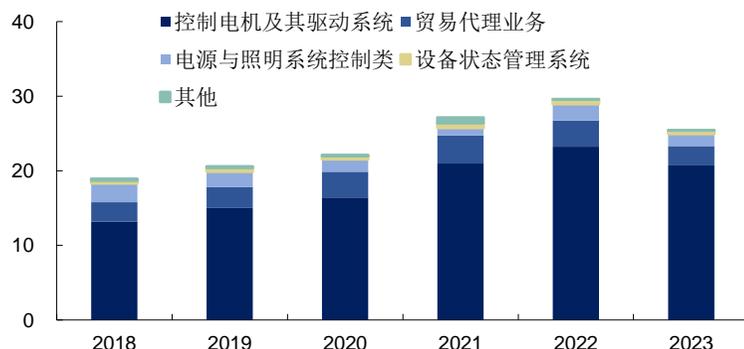


资料来源：哈默纳科24财年总结，华安证券研究所

## 4.3 鸣志电器：深耕步进电机领域，全球化布局完善

- 鸣志电器控制电机及其驱动系统业务产品包括控制电机（包含步进电机/伺服电机/直流无刷电机/空心杯电机）、驱动控制系统、运动控制模组（高精密减速机、高精密丝杠、高精度编码器）。电源与照明系统业务主要包括LED智能照明控制与驱动系统和电源控制系统。控制电机及其驱动业务是公司收入和利润的主要来源，2023年该业务收入占比达82%。
- 鸣志电器积极推进全球化布局。**在北美、欧洲、东亚、东南亚等发达国家和地区拥有 30 余家子公司，为全球各行业的领先客户提供最优秀的运动控制产品和定制化的解决方案。公司通过增强对海外子公司的一体化建设和赋能，发挥海外研发运营机构美国 AMP、瑞士TMotion的技术研发优势，强化驱动控制类产品的创新性研发和迭代，不断完善平台化产品线。

图表53：鸣志电器主营业务收入构成（亿元）



资料来源：iFind，华安证券研究所

图表54：鸣志电器全球化布局

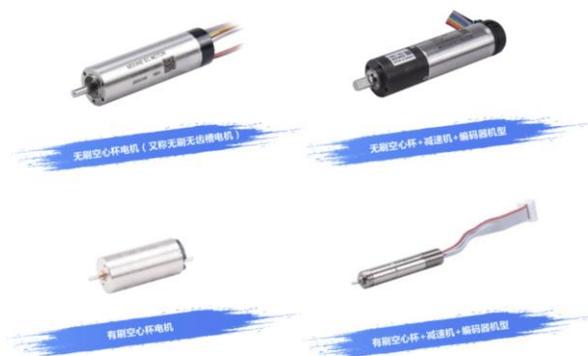


资料来源：鸣志电器官网，华安证券研究所

## 4.3 鸣志电器：积极布局机器人领域，空心杯电机成本优势凸显

- **聚焦机器人领域，整合平台化产品资源。**鸣志电器与机器人下游客户广泛开展技术开发合作，通过对现有的运动控制平台化产品资源有效整合，持续开拓机器人应用新市场。公司的无刷电机模组、无齿槽空心杯电机模组、无框和交流伺服电机及驱动与控制系统、精密丝杠传动模组等在机器人各主要运动控制功能模块中广泛适用。公司及子公司安浦鸣志、美国 AMP、美国 LIN、瑞士 T Motion、鸣志派博思、常州运控等均积极布局机器人应用领域。公司目前已经与T公司进行产品送样沟通。
- **空心杯产品矩阵丰富，规模效应渐显。**2023年鸣志电器按计划推进“无刷电机新增产能项目”，通过优化工装及自动化设备改造提升生产效率，改善产品质量稳定性。空心杯电机家族新增了 ECH6、ECH8、ECH10、ECH13、ECH19、ECT22、ECT30 等多款新规格系列及配套的减速机 and 编码器产品，年销售规模增速超过80%。此外，公司的直流无刷电机、交流伺服电机、空心杯电机产品技术均处于全球前列。经过多年发展，公司在控制电机及其驱动系统产品领域已实现规模效应。

图表55：鸣志电器空心杯电机一览



资料来源：鸣志电器官网，华安证券研究所

图表56：空心杯电机下游应用

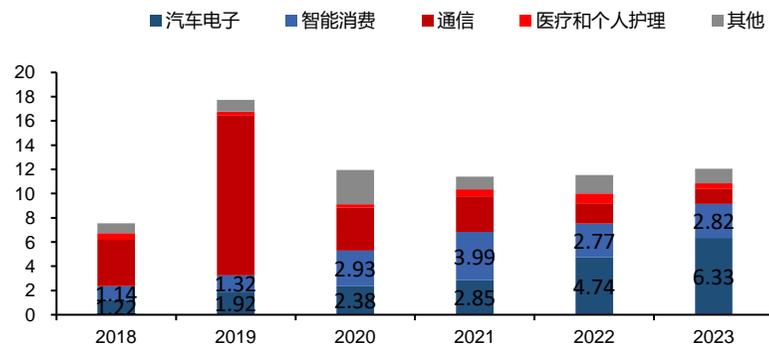


资料来源：鸣志电器官网，华安证券研究所

## 4.4 兆威机电：微型传动标杆，打造垂直一体化产品矩阵，盈利拐点初显

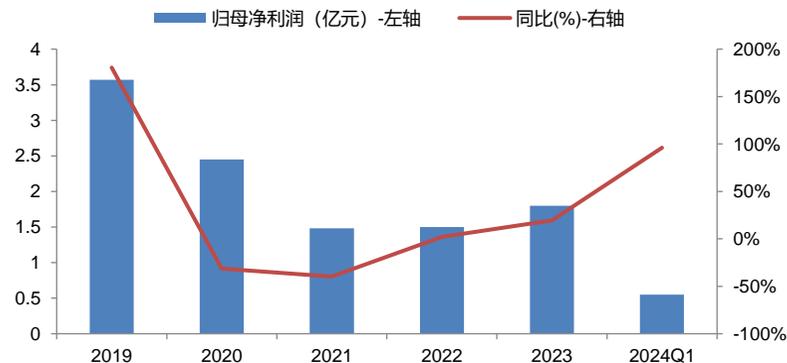
- **汽车电子和XR业务共同发力，24Q1营收及净利润同比高增。**兆威机电2023年实现营业收入12.1亿元，同比+4.6%；实现归母净利润1.8亿元，同比+19.6%；2024年Q1公司实现营业收入3.1亿元，同比+40.7%；实现归母净利润0.6亿元，同比+96.0%；盈利拐点初显。
- **聚焦微型驱动系统，多点布局下游应用场景。**兆威机电专注于微型传动领域，沿产业链自上而下形成“精密模具-精密注塑件-微型传动系统”的垂直一体化产品矩阵，下游应用领域多元，主要覆盖汽车电子、智能消费、通信、医疗及个人护理和工业自动化等方向。其中，汽车电子业务是公司收入的主要来源。2023年公司汽车电子、智能消费、通信、医疗及个人护理和其他业务的营业收入占比分别为52.5%、23.3%、10.2%、4.0%和10.0%。

图表57：兆威机电主营业务收入构成（亿元）



资料来源：iFind，华安证券研究所

图表58：兆威机电归母净利润和占比（亿元/%）



资料来源：iFind，华安证券研究所

## 4.4 兆威机电：机器人产品定制化经验丰富，未来或将拓展布局灵巧手

- 兆威机电从微型驱动领域出发，致力于帮助机器人实现应用落地。公司精密减速箱、高性能电机、电控系统的产品组合适用于机器人头部、手指等运动执行等应用，具有精度高、尺寸小、重量轻等特点。公司生产的机器关节无刷舵机应用于机器人的角度传感器和齿轮驱动装置，提高了机器人的关节控制，让机器人关节转动更具灵活性。公司的高转矩直流电机和无刷空心杯电机均已形成系列产品，成功用于人形机器人领域。
- 兆威机电长期为苹果供应消费电子控制执行模组，产品良率高，成本把控能力较强产品定位高端，定制化研发设计经验丰富，目前已经与T公司进行送样沟通，未来或将进一步整合拓展灵巧手业务，有望增厚机器人板块业绩表现。

图表59：兆威机电机器关节无刷舵机示意图



资料来源：兆威机电官网，华安证券研究所

图表60：兆威机电人形机器人部件示意图

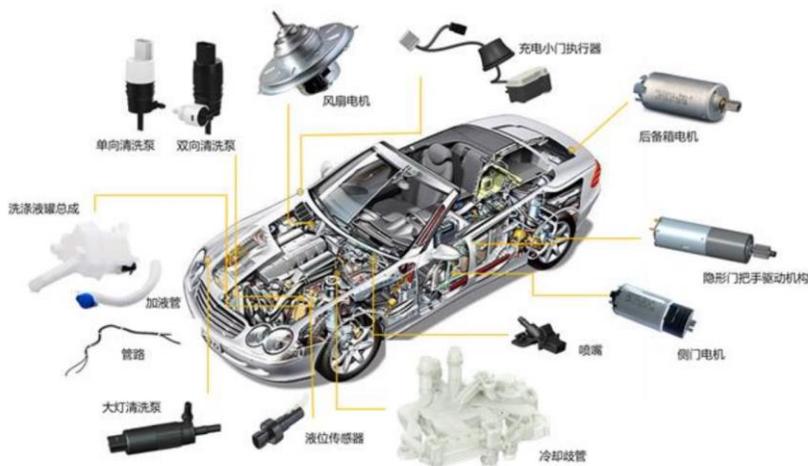


资料来源：兆威机电官网，华安证券研究所

## 4.5 恒帅股份：研发谐波磁场电机技术，拓展人形机器人应用

- 目前磁场电机利用的磁场以基波磁场为主，需要抑制谐波磁场对电机运行的NVH影响，恒帅股份研发的谐波磁场电机技术属于电机底层技术的颠覆性变革，由传统电机利用基波磁场驱动转变为使用谐波磁场驱动。截至2023年末，恒帅股份就谐波磁场电机技术领域已向国家专利局、PCT国际专利组织申报4项电机发明专利和4项电机实用新型专利。
- 恒帅股份的谐波磁场电机具备功率密度高、体积小、成本低等特点，目前公司将重点着力谐波磁场电机技术的场景适配，以新的电机方案思路匹配谐波磁场电机技术与人形机器人所需电机品种（如无框力矩电机、空心杯电机等）定制化需求的结合点。

图表61：恒帅股份主要产品示意图



资料来源：恒帅股份公告，华安证券研究所

图表62：恒帅股份谐波磁场电机技术专利

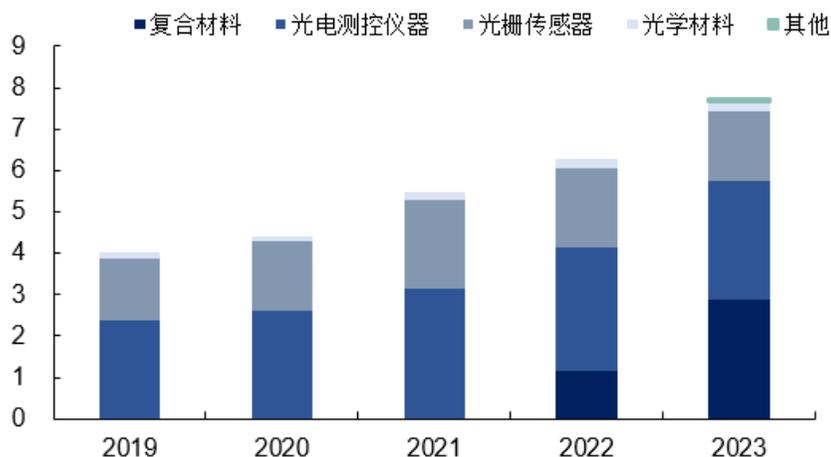
专利名称	专利号	申请日	专利类型	取得方式
一种谐波磁场驱动电机	202121954160.1	2021.08.19	实用新型	原始取得
一种谐波磁场驱动电机	202220465379.3	2022.03.05	实用新型	原始取得
谐波磁场驱动电励磁电机	202221952294.4	2022.07.27	实用新型	原始取得
一种谐波磁场驱动电励磁电机	202221952309.7	2022.07.27	实用新型	原始取得

资料来源：恒帅股份公告，华安证券研究所

## 4.6 奥普光电：高端光栅编码器打破海外垄断，性价比优势突出

- 奥普光电实控人为中科院长春光机所，以军工产品业务为主，主营光电测控、光编码器（禹衡光学）和高性能碳纤维复合材料（长光宇航），参与了“天和遨游太空”等多项国家重大工程项目，技术实力雄厚。民品方面，近年来奥普光电高端光学编码器、绝对式光栅尺在国内数控机床等领域的市场占有率逐步提升，应用于半导体领域的新产品进入用户验证测试。
- 奥普光电控股子公司禹衡光学是国内光电编码器头部厂商，是国家编码器工程唯一中试基地，高端光栅编码器产品性能达到国际先进、国内领先水平，市场份额居前，仅次于外资巨头多摩川、海德汉，且产品相较于外资巨头具备明显的性价比优势。

图表63：奥普光电营收构成（亿元）



资料来源：iFind，华安证券研究所

图表64：禹衡光学、西克、海德汉产品对比



产品型号	西克EDS/EDM35	海德汉EQN1337	禹衡光学ZKD-73
编码器类型	光学编码器	光学编码器	光学编码器
分辨率 (Bit)	24	25	23
最大转速 (rpm)	6000	15000	6000
精确度 (")	±25	±20	±20
工作温度 (°C)	-40 - 115	-40 - 115	-20 - 80
防护等级	IP40	IP40	IP40
价格 (元)	>1000	950	600

资料来源：各公司官网，华安证券研究所

## 目录

- 1 灵巧手结构及功能
- 2 灵巧手发展路径：成本与功能的博弈
- 3 灵巧手重要部件详解
- 4 相关标的
- 5 风险提示



## 5. 风险提示

- **特斯拉机器人量产不及时风险：**人形机器人行业发展尚处于早期，技术方案仍未完全确定。当特斯拉机器人量产不及时，可能导致灵巧手产业的发展不如预期的风险。
- **灵巧手相关技术难以突破的风险：**灵巧手涉及技术众多，如驱动技术、机械传动技术、传感技术等，如果核心技术进步不及预期，将影响行业未来发展的持续性和稳定性。
- **市场竞争加剧：**国内布局相关核心零部件企业众多，有可能面临未来竞争加剧的风险。
- **国内宏观经济下行的风险：**如果因为不可预知的因素导致国内宏观经济下行，可能对灵巧手产业的发展造成负面影响。



## 重要声明

### 分析师声明

本报告署名分析师具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格，以勤勉的执业态度、专业审慎的研究方法，使用合法合规的信息，独立、客观地出具本报告，本报告所采用的数据和信息均来自市场公开信息，本人对这些信息的准确性或完整性不做任何保证，也不保证所包含的信息和建议不会发生任何变更。报告中的信息和意见仅供参考。本人过去不曾与、现在不与、未来也将不会因本报告中的具体推荐意见或观点而直接或间接接收任何形式的补偿，分析结论不受任何第三方的授意或影响，特此声明。

### 免责声明

华安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。本报告中的信息均来源于合规渠道，华安证券研究所力求准确、可靠，但对这些信息的准确性及完整性均不做任何保证，据此投资，责任自负。本报告不构成个人投资建议，也没有考虑到个别客户特殊的投资目标、财务状况或需要。客户应考虑本报告中的任何意见或建议是否符合其特定状况。华安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。

本报告仅向特定客户传送，未经华安证券研究所书面授权，本研究报告的任何部分均不得以任何方式制作任何形式的拷贝、复印件或复制品，或再次分发给任何其他人，或以任何侵犯本公司版权的其他方式使用。如欲引用或转载本文内容，务必联络华安证券研究所并获得许可，并需注明出处为华安证券研究所，且不得对本文进行有悖原意的引用和删改。如未经本公司授权，私自转载或者转发本报告，所引起的一切后果及法律责任由私自转载或转发者承担。本公司并保留追究其法律责任的权利。

## 投资评级说明

以本报告发布之日起6个月内，证券（或行业指数）相对于同期沪深300指数的涨跌幅为标准，定义如下：

### 行业评级体系

增持：未来6个月的投资收益率领先沪深300指数5%以上；

中性：未来6个月的投资收益率与沪深300指数的变动幅度相差-5%至5%；

减持：未来6个月的投资收益率落后沪深300指数5%以上；

### 公司评级体系

买入：未来6-12个月的投资收益率领先市场基准指数15%以上；

增持：未来6-12个月的投资收益率领先市场基准指数5%至15%；

中性：未来6-12个月的投资收益率与市场基准指数的变动幅度相差-5%至5%；

减持：未来6-12个月的投资收益率落后市场基准指数5%至15%；

卖出：未来6-12个月的投资收益率落后市场基准指数15%以上

无评级：因无法获取必要的资料，或者公司面临无法预见结果的重大不确定性事件，或者其他原因，致使无法给出明确的投资评级。市场基准指数为沪深300指数。



# 谢谢！