

- **灵巧手或为人形机器人多代际更迭最受益环节。**机器类人化发展契合现实世界需求，2025年进入人形机器人量产元年，且行业需求有望高增。参照中商产业研究院数据，2024年全球机器人灵巧手市场规模约76万只/17亿美元，至2030年全球机器人灵巧手市场规模将突破141万只/30亿美元。作为核心部件的灵巧手自由度不断提升，精密操作等能力不断优化，其设计需要满足高度仿生、灵活操作和复杂环境适应性等要求，具备负载能力、运动能力、控制能力、感知能力等。
- **驱动系统：集成智能，灵活动作。**从自由度与驱动源的匹配数量来看，灵巧手驱动方式可分为全驱动和欠驱动，其中欠驱动可借助耦合等提高自由度，具备更高实用性。与液压驱动、气压驱动、SMA等方案对比来看，电机驱动具备较高控制精度和集成性。电机驱动器方面，空心杯电机在控制精度、体积方面更占优势，是灵巧手现有驱动电机的主流选择，有槽无刷电机等更具转矩、成本优势。
- **传动系统：精密高效，路线各异。**灵巧手传动系统正朝着高精度、轻量化、仿生化和智能化方向发展，以满足各种场景的多样化需求。传统刚性传动（齿轮、丝杠等）与柔性传动（腱绳等）优势各异，各厂商对于传动系统技术路线选择不一，以特斯拉Optimus为代表的人形机器人厂商已逐步采用多种传动方案结合的形式。
- **传感系统：高敏多能，进程加速。**灵巧手传感器系统对抓取、操控和感知能力有较大影响，机器人众多环节均大规模采用多种传感器，以使得机器人“拟人化”。力/力矩传感器、触觉传感器、位置/角度传感器（如编码器）等可分别察觉力/力矩、触觉、位置等外部单一变量，传感器正朝着多区域、柔性化、多模态趋势发展，电子皮肤已可集成多种传感功能，综合优势突出，行业成熟后将使得人形机器人朝人类“五感”方向加速发展。
- **特斯拉Optimus代际更迭中灵巧手自由度不断提升。**复盘特斯拉Optimus多代际产品的更新进程，灵巧手的灵活度、精密操作性不断提升。2024年10月，特斯拉已官宣相较于上一代Gen2，第三代Optimus灵巧手已具备22个自由度，较上一代翻倍，我们预计各环节尤其是驱动系统部件个数有望提升。
- **投资建议：**人形机器人赛道发展进入快车道，随特斯拉、宇树、Figure等重磅产品不断更新换代，人形机器人产业链将逐步趋于成熟。参照特斯拉Optimus从Gen1更迭至Gen3，灵巧手自由度不断提升，且精密操作、复杂环境操作能力不断加强，拉动对驱动系统、传动系统、传感系统等核心部件需求。建议关注：**驱动系统**相关标的【鸣志电器】【伟创电气】【汇川技术】【兆威机电】【信捷电气】【雷赛智能】等。**传动系统**相关标的【绿的谐波】【双环传动】【北特科技】【贝斯特】等。**传感系统**相关标的【柯力传感】【东华测试】【汉威科技】等。
- **风险提示：**人形机器人技术迭代不及预期风险、人形机器人降本不及预期风险、政策支持不及预期风险等。

## 推荐

维持评级



## 分析师 邓永康

执业证书: S0100521100006  
邮箱: dengyongkang@mszq.com

## 分析师 李佳

执业证书: S0100523120002  
邮箱: lijia@mszq.com

## 分析师 赵丹

执业证书: S0100524050002  
邮箱: zhaodan@mszq.com

## 分析师 席子屹

执业证书: S0100524070007  
邮箱: xiziyi@mszq.com

## 研究助理 许浚哲

执业证书: S0100123020010  
邮箱: xujunzhe@mszq.com

# 目录

<b>1 灵巧手：人形机器人交互核心部件 .....</b>	<b>3</b>
1.1 灵巧手较普通执行器有更高自由度要求 .....	3
1.2 灵巧手需具备多种功能执行能力 .....	4
<b>2 驱动系统：集成智能，灵活动作 .....</b>	<b>6</b>
2.1 驱动形式：欠驱动具备更高实用性，电机驱动为主流 .....	6
2.2 驱动电机：精密度、成本、轻量化等为核心考量因素 .....	10
<b>3 传动系统：精密高效，路线各异 .....</b>	<b>13</b>
3.1 丝杠传动：滚珠丝杠综合优势突出 .....	13
3.2 齿轮减速装置：因地制宜，多方案优势各异 .....	16
3.3 腱绳传动：轻量化首选方案，腱绳为关键部件 .....	19
3.4 连杆传动：高刚度、较低自由度 .....	20
<b>4 传感装置：高敏多能，进程加速 .....</b>	<b>22</b>
<b>5 产业链现状：Optimus 升级路径为例 .....</b>	<b>26</b>
<b>6 投资建议 .....</b>	<b>28</b>
6.1 驱动系统核心公司 .....	28
6.2 传动系统核心公司 .....	32
6.3 传感系统核心公司 .....	34
<b>7 风险提示 .....</b>	<b>36</b>
<b>插图目录 .....</b>	<b>37</b>
<b>表格目录 .....</b>	<b>38</b>

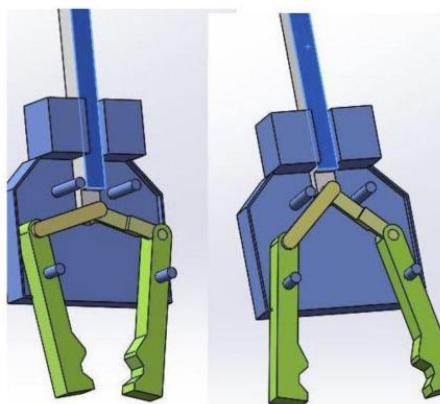
## 1 灵巧手：人形机器人交互核心部件

### 1.1 灵巧手较普通执行器有更高自由度要求

**人形机器人是机器人适应人类环境的最优解。**相比专门为单一任务设计的机器人，人形机器人可以在不同场景之间快速切换，具有高度的通用性和灵活性，能够执行多种不同类型的任务，具有更广阔的商业应用前景。此外，相较于其他形态的机器人，人形机器人能够更好地适应按照人类的身体特征和操作习惯来设计的各类基础设施，无需对现有的环境和设施进行大规模改造。因此，类人化设计的商业化前景、改造成本等因素影响下，人形机器人是目前最优解。

**灵巧手是人形机器人重要的末端执行器。**末端执行器直接安装在机器人手腕上，用于夹持工件、或让工具按照规定的程序完成的工作的机构。相较于普通工业机械手（自由度少、结构简单、易于控制），类人化设计的灵巧手对控制精度、灵活性要求极高。目前，仿人机器人末端执行器有两种：柔性手和仿生多指灵巧手。其中，灵巧手是模拟人类手部功能的高自由度机械装置，具备抓取、操作、感知等能力，是人形机器人实现精细交互的核心执行器。

图1：普通工业机器人夹取式执行器



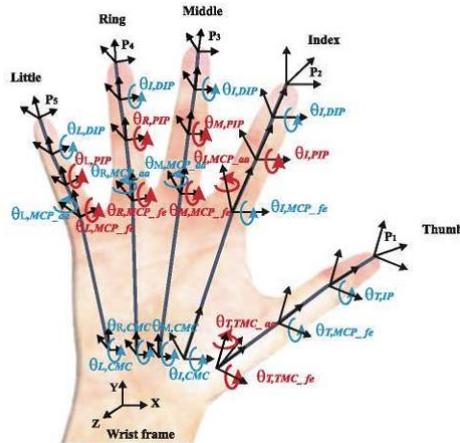
资料来源：维科网，民生证券研究院

图2：Tesla 人形机器人灵巧手

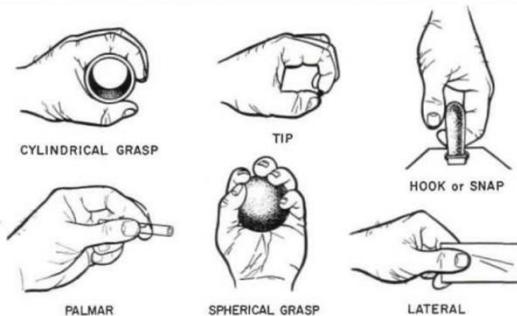


资料来源：Tesla，民生证券研究院

**灵巧手功能设计类人化，具备较高自由度要求。**若参照人类手部的灵活度，手指+腕部共 24 个自由度，抓握、拾取等动作需不同手部环节进行配合。手指环节中，各手指远离手腕的两个关节主要完成弯曲/伸展类动作，各手指靠近手腕的关节则兼备弯曲/伸展类、侧摆类两大动作执行功能。此外，腕掌环节为完成手部抓握等动作也具备独立于手指的自由度。Tesla 于 24 年 11 月公布的 Optimus 最新动态中指出其灵巧手已具备 22 个自由度，较上一版本的 11 个自由度个数大幅提升，已逐步接近人类手部灵活度。

**图3：人类手部共24个自由度**


资料来源：IEEE, 民生证券研究院

**图4：不同动作对手部各环节配合要求不同**


资料来源：ISSN, 民生证券研究院

## 1.2 灵巧手需具备多种功能执行能力

**灵巧手需兼具高灵活性、精准执行及反馈以及自适应等能力。**为高效执行相应动作指令，人形机器人灵巧手的设计需要满足高度仿生、灵活操作和复杂环境适应性等要求，具备负载能力、运动能力、控制能力、感知能力等：

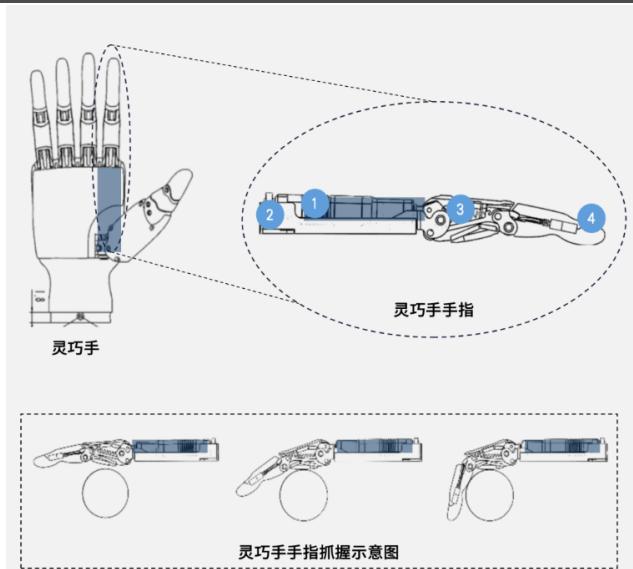
- 1) 高自由度与灵活性：需尽可能匹配人类手部自由度，以实现抓、握、捏、推拉等精细动作，其活动范围需接近人类活动范围（如拇指对掌运动），可通过协同关节运动补偿机械误差等方式实现冗余控制。
- 2) 精准抓握与自适应抓取：具备一定负载能力的同时，可实现抓握力的连续调节（如抓握鸡蛋等轻物过渡至抓握大型负载等重物），稳定抓握住物体，同时灵巧手需兼具自适应能力，基于物体形状、材质（软/硬、光滑/粗糙）自动调整抓取策略（如指尖捏取、包裹式抓握）。
- 3) 环境感知及执行反馈：具备触觉、温度等外部感知能力，力觉等内部感知能力，同时保持毫秒级响应延迟，确保动态操作（如接抛球、拧瓶盖）。

**图5：灵巧手部分抓取场景**


资料来源：EPIC, 民生证券研究院

**灵巧手的性能和成本受其三大核心组件—驱动系统、传动系统和传感装置的共同影响。**驱动系统(各类电机)提供动力来源,驱动手指关节运动;传动系统(齿轮、连杆、腱绳等)将驱动系统的动力高效传递到手指关节,并调节输出的力、速度和行程;传感系统(各类传感器)实时监测手指状态(位置、力、触觉等),反馈给控制系统以实现闭环调节。

**图6：灵巧手手指环节结构示意图**



资料来源：因时机器人官网，民生证券研究院

参照中商产业研究院数据,2024年全球机器人灵巧手市场规模约76万只/17亿美元,至2030年全球机器人灵巧手市场规模将突破141万只/30亿美元。

**图7：全球机器人灵巧手市场空间（单位：万只）**

2021-2030年全球机器人灵巧手市场容量趋势预测图



资料来源：中商产业研究院，民生证券研究院

**图8：全球人形机器人市场空间（单位：亿美元）**

2021-2030年全球机器人灵巧手市场规模趋势预测图



资料来源：中商产业研究院，民生证券研究院

## 2 驱动系统：集成智能，灵活动作

### 2.1 驱动形式：欠驱动具备更高实用性，电机驱动为主流

#### 2.1.1 全驱动、欠驱动：精密性与简化性的取舍

从自由度与驱动源的匹配数量来看，灵巧手驱动方式可分为全驱动和欠驱动。全驱动指的是系统执行器的数目等于其自由度数目，即执行器主动控制自由度  $DoA = \text{自由度 DoF}$ ，可实现系统完全可控稳定。欠驱动方案即  $DoA < DoF$ ，通过相应控制仍可实现对应功能。

**全驱动方案可满足高精度控制，集成性、抗冲击柔性等有待提升。**全驱动方案为机器人灵巧手每个自由度均配置相应执行器进行控制，可做到每个手指关节独立可控，可实现计划人类手指全部功能。兆威机电 24 年 11 月发布的全驱高可靠灵巧手配备 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，准确模拟人手部的抓握等精细动作。但从机电系统硬件角度而言，全驱动方案的系统整体集成性较差，容易造成灵巧手体积庞大，且所需控制关节与执行器众多，容易造成运动控制系统繁琐及冗杂，提升灵巧手相关成本。此外，由于每个关节都由一个电机控制，全驱动方案（尤其是手指关节）缺乏抗外界冲击的柔性，易造成关节部分的电机损坏。

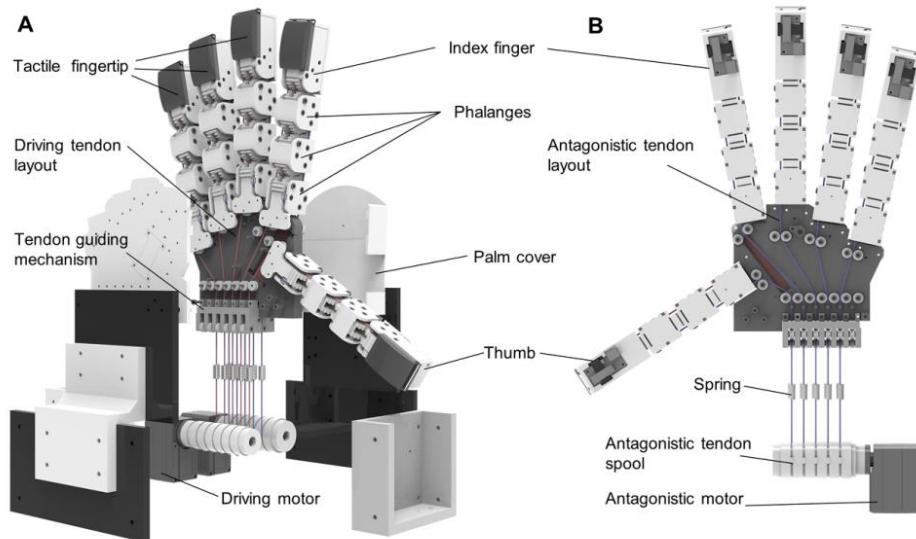
图9：兆威机电全驱动灵巧手



资料来源：兆威机电官网，民生证券研究院

**欠驱动方案控制精度降低，但体积、成本等性能有所提升。**欠驱动灵巧手的驱动源数量少于自由度，在牺牲控制精度的情况下实现更优的体积、重量、成本，应用更为广泛。BRL/Pisa/IIT (BPI) SoftHand 采用欠驱动方案，借助单个执行器+肌腱驱动，低成本设计。该方案中，欠驱动的机械特性能够使得手指自动适应物体的形状，具备很好的形状自适应性，且绝大多数手指关节都具有自由运动的柔性，抗外界冲击性较强。

**图10：BRL/Pisa/IIT (BPI) SoftHand (单驱动器欠驱动方案)**



**Figure 1.** Exploded Front view (A) and back view (B) of the Tactile SoftHand-A. The main components shown include the driving tendons (in red), antagonistic tendons (in blue), differential mechanism due to the tendon layouts and couplings, driving and antagonistic motors, phalanges and tactile fingertips.

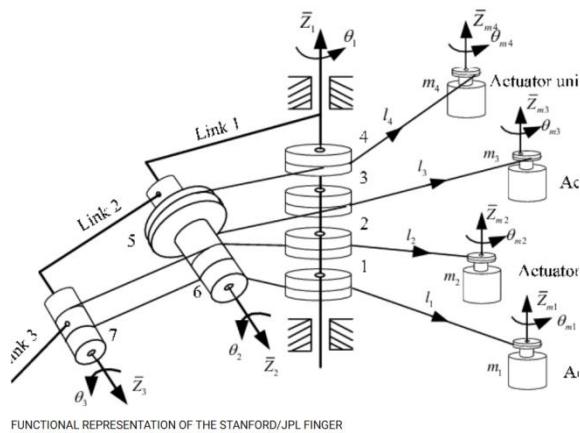
资料来源：ARXIV 官网，民生证券研究院

## 2.1.2 电机驱动为驱动方式的主流趋势

从灵巧手驱动器类型来看，灵巧手驱动方式可分为电机驱动、气压驱动、液压驱动和形状记忆合金驱动 (SMA)。其中电机驱动方案技术较为成熟，应用广泛。

**电机驱动通过电动机产生力/力矩，是目前主流驱动方案。**电机驱动方案通过电动机产生所需的力或力矩驱动相关部件运动，包括旋转型驱动（电机旋转运动，通过丝杠等传动机构转为直线运动）、直线型驱动（直接输出直线运动），通过减速器或直接驱动灵巧手。

**电机驱动方案具备较高控制精度和集成性，但仍具备提升空间。**电机驱动以伺服电机（如空心杯电机）为核心，搭配精密减速器（如谐波/行星减速器）实现关节运动，该方案控制精度较高且可实现模块化设计（如德国 Schunk SVH 系列），可通过编程实现多种运动模式和功能，灵活性较高。此外，电机驱动方案的能量效率较高，且相较于液压驱动等不存在漏液风险。同时，电机驱动方案受到电机功率密度限制，持续高负载时需配备热管理系统且具备自重问题等。

**图11：STANFORD/JPL 手指旋转驱动结构图**


资料来源：researchgate, 民生证券研究院

**图12：因时机器人 RH56 直线驱动系列**


资料来源：因时机器人官网, 民生证券研究院

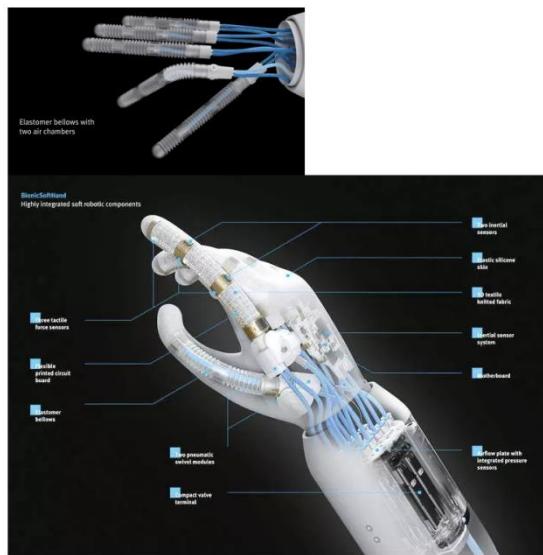
**液压驱动方案功率密度高、可满足高压力场景，但系统复杂且维护成本高。**液压驱动方案通过微型柱塞泵（如压电陶瓷驱动型）建立压力，经微型液压缸传递动力。相较于电机驱动等驱动方案，液压系统具有较高的功率密度，适用于大功率和大负载的应用，且液压系统可以承受较高的压力，适用于高压力要求的应用场景。同时，液压系统相对复杂，需要较多的液压元件和管路，维护和安装相对复杂。由于有液压油的存在，液压系统中存在液体泄漏的风险，液压油的更换和维护也需要额外的成本和工作量。

**图13：The Fluidhand (液压驱动方案)**


**Freedom to move:** The Fluidhand (above) uses lightweight miniature hydraulics to enable the wearer to move each finger individually.

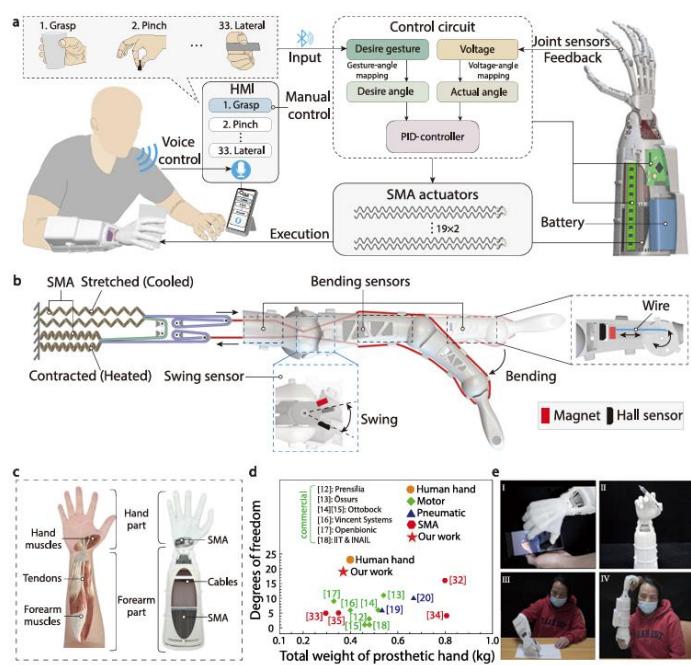
资料来源：MIT Technology Review, 民生证券研究院

**气压驱动方案响应速度快、精度高，但负载、功率密度及能效等偏低。**相较于电机驱动等方案，气压系统具有快速响应和调节性能优势，可以实现精确的动作控制，且气体压力相对较低，因此在泄漏情况下的危险性较低，也不存在电火花风险，适用于易燃易爆环境（如化工车间）。同时，由于气压系统功率密度较低，更适用于较小的负载和功率要求，并在气体的压缩和扩张过程中存在能量损失导致该驱动方案能效偏低。

**图14: Festo BionicSoftHand (气压驱动方案)**


资料来源：瑞贝德科技官网，民生证券研究院

**SMA 方案可满足超小型场景需求，但存在滞后反应、寿命较短等问题。**形状记忆合金 (SMA) 可记住自身形状，当其被加热到特定温度时，可以恢复到原始形状。SMA 丝/弹簧驱动单元可微型化至毫米级，在微创手术器械、软体机器人等超小型场景中均适用。且五电机驱动方案中的机械传动部件，适用于安静环境（如实验室精密操作）。同时，SMA 材料对温度控制要求极高，加热/冷却循环响应慢（秒级）会使其动态性能受限，需配备精准的温控系统，且其寿命较短，反复相变会导致材料晶格损伤。

**图15: 形状记忆合金 (SMA 驱动方案)**


综合对比上述四种驱动方案,电机驱动方案更具综合优势。未来,混合驱动(如电-液复合)与新型材料(如介电弹性体)可能突破单一驱动局限,实现高力-精度-速度的平衡。

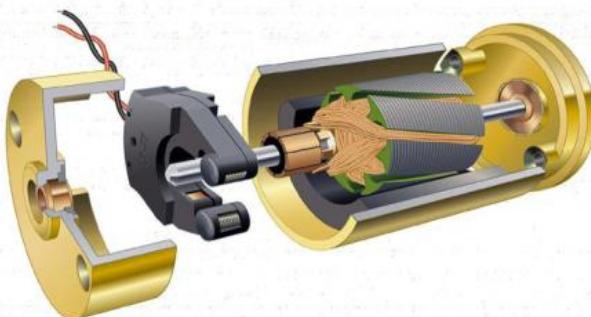
## 2.2 驱动电机: 精密度、成本、轻量化等为核心考量因素

电机驱动方案为灵巧手主流驱动方案,根据不同的性能要求,灵巧手常见的驱动电机类型包括空心杯电机、无刷有齿槽电机、无框力矩电机等,不同厂商、不同应用场景所采用的驱动电机类型也有所差异。

### 2.2.1 空心杯电机: 高速响应、高精度控制

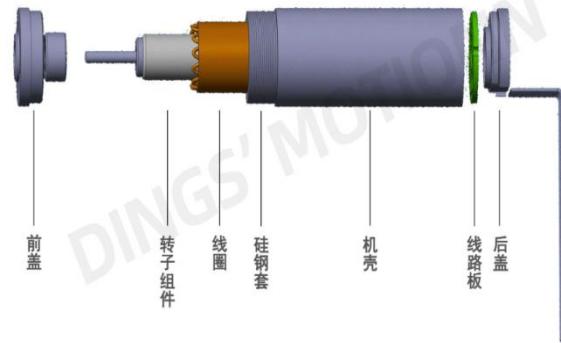
**空心杯电机核心变化在于转子无铁芯设计。**空心杯电机的转子只有转子电枢只有绕组(悬臂形式),采用无铁芯设计(空心杯状线圈),其工作原理为永磁体定子与空心杯转子通过电磁感应产生力矩。空心杯电机通过磁场(可通过外壳提供恒定磁场)直接驱动转子,无传统铁芯叠片,可消除磁滞损耗和涡流损耗。

图16: 传统直流电机结构(直流有刷电机)



资料来源:陈安《空心杯电机定制化管理的应用研究》,民生证券研究院

图17: 空心杯电机结构



资料来源:鼎智科技官网,民生证券研究院

**空心杯电机兼具转速高、响应快、能效高等特点,适用于高速响应场景。**

**1) 能效高。**空心杯电机的铁损很小,具备较高的能量转化效率。大多数空心杯电机的最高效率都超过 80% (大多数有刷直流电机的最高效率一般约 50%)。

**2) 转速高。**电机的涡流损耗损耗和电机转速的平方成正比,普通有刷直流电机的连续力矩会随着转速的上升快速下降,因此无法运行在高转速下,一般设计的最高转速都低于 5000rpm。空心杯电机由于没有涡流损耗,其最高转速一般受限于换向系统,最高可达 16000rpm。

**3) 响应快。**由于空心杯电机的转子无铁芯,导致其惯性极低,适合高频快速响应场景。其机械时间常数通常只有十几毫秒,普通有刷直流电机的机械时间常数一般在 100 毫秒以上。

**4) 运行平稳。**由于空心杯电机采用无铁芯的空心转子设计,完全没有齿槽效

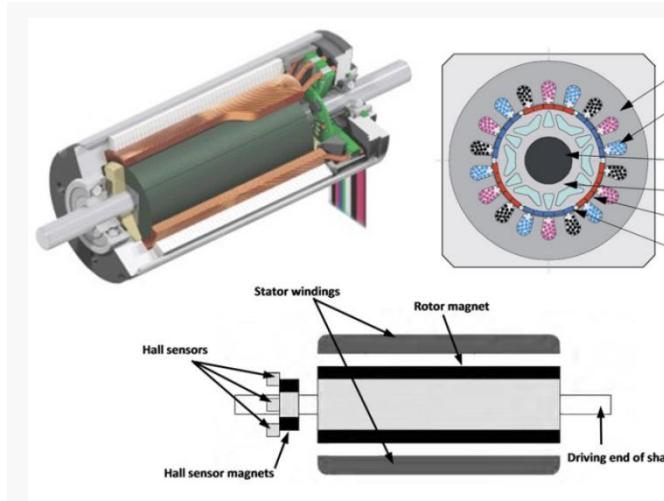
应。同时，其换向片数量比普通有刷直流电机多很多，导致转速非常平稳。

空心杯电机的缺点主要在于其**输出扭矩较小**，适用于负载较轻的场合。由于内部结构较为复杂，**制造成本较高**，因此价格也相对较高。

## 2.2.2 无刷有齿槽电机：高扭矩输出，兼具成本优势

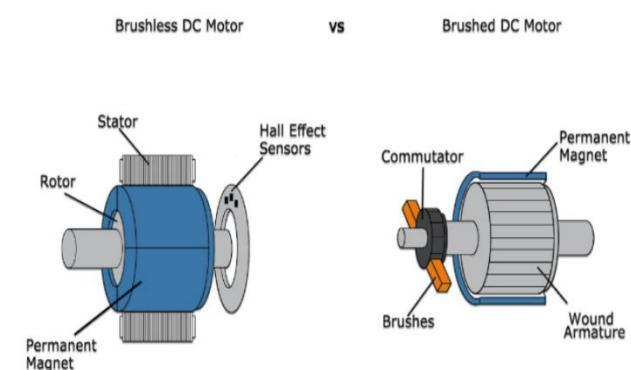
**无刷有齿槽电机定子的齿槽结构可优化磁场、提高扭矩密度。**无刷有齿槽电机定子由叠片硅钢片构成，带有齿槽结构，线圈嵌入槽内以集中磁场（齿部磁阻低，磁通更容易通过，而槽部磁阻高，限制了磁通的扩散。齿槽结构相当于在磁路中形成低磁阻的路径，引导磁通流向转子），转子为永磁体，通过霍尔传感器或编码器实时检测转子位置，控制器切换电流相位实现无刷换向。

图18：无刷有齿槽电机结构图



资料来源：ican-motor 官网，民生证券研究院

图19：无刷电机 VS 有刷电机



资料来源：ican-motor 官网，民生证券研究院

无刷有齿槽电机兼具高转矩密度、高抗冲击性、低成本等优势，适用于高扭矩场景。

**1) 高转矩密度：**无刷有齿槽电机的定子齿槽结构集中磁场，扭矩密度较空心杯电机大幅提升，适合灵巧手抓取重物。如德国 SCHUNK 的 EGP40 灵巧手采用无刷有齿槽电机，单指抓取力达 30N，且借助于集成旋转开关，可以调节夹持力。

**2) 抗冲击与耐用性：**无刷有齿槽电机的铁芯结构提供机械保护，防护等级可达 IP54（防尘防水），具备一定的抗冲击及耐用性。

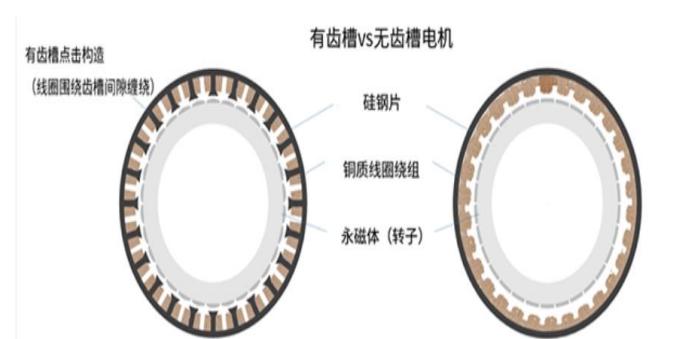
**3) 成本优势：**相较于具备复杂内部结构的空心杯电机，无刷有齿槽电机设计更为简单，成本上更具优势。

无刷有齿槽电机主要缺点在于齿槽结构所产生的**齿槽效应**，在不通电状态时转子上的永磁体与定子叠片齿槽之间产生吸引，旋转时产生“抖动”运动。该问题

容易造成力控精度下降（柔性物体抓取难度较高）及产生高频振动噪音，可以通过定子斜槽或转子斜极等结构优化设计、先进控制算法（利用编码器对电机的电流驱动进行调制，以此补偿齿槽转矩波动，并借助电子驱动技术对其进行平滑处理，如ODrive开源的抗齿槽算法）及材料升级降低齿槽效应影响。

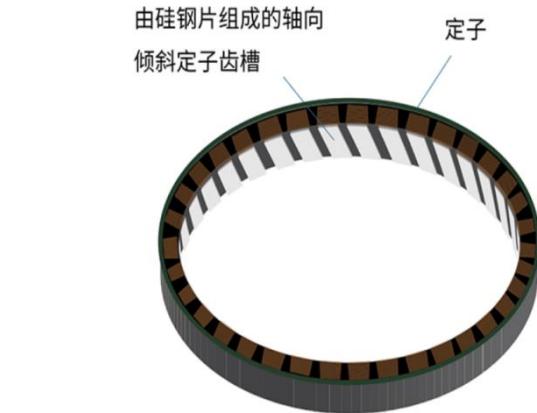
考虑到人形机器人产业化后的降本需求及无刷有齿槽电机结构设计、控制算法等方面不断优化，无刷有齿槽电机在人形机器人灵巧手上的应用优势或将逐步提升。

**图20：有齿槽电机 VS 无齿槽电机**



资料来源：控制工程网，民生证券研究院

**图21：倾斜定子齿槽结构**



资料来源：控制工程网，民生证券研究院

### 3 传动系统：精密高效，路线各异

传动系统主要用于将驱动系统的运动和动力传递给执行机构，使其完成特定动作。在此过程中实现运动速度、运动方向或运动形式的改变。灵巧手传动系统正朝着高精度、轻量化、仿生化和智能化方向发展，以满足工业协作、医疗手术、服务机器人等场景的多样化需求。在结构设计上，传统刚性传动（齿轮、丝杠等）与柔性传动（腱绳等）并存，但受限于体积、成本和性能的权衡，各厂商对于传动系统技术路线选择不一，未来有望采用多种传动方案结合的形式。

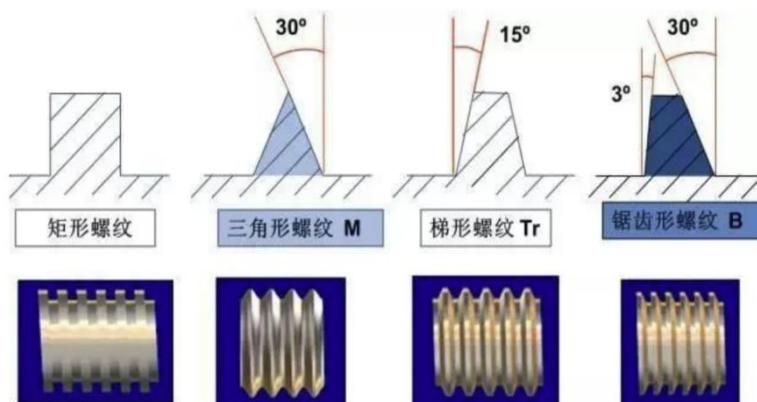
#### 3.1 丝杠传动：滚珠丝杠综合优势突出

丝杠传动是目前刚性传动主流方案，具备高精度、高负载等优势。丝杠主要由螺母（直线运动部件）和螺杆（旋转部件）组成。当螺杆旋转时，螺母会按照设定的导程进行直线运动，从而驱动与之相连的工件实现相应的直线动作，螺母的直线移动也可以驱动螺杆进行旋转。

##### 3.1.1 滑动传动：结构简单，成本较低

滑动丝杠通过滑动摩擦实现直线传动。滑动丝杠传动采用滑动丝杠轴和螺母螺纹，两者之间没有滚珠轴承，螺母和丝杠轴在较大的接触面积上直接相互移动。按照螺纹种类划分，可分为梯形螺纹、锯齿形螺纹、矩形螺纹等，梯形螺纹加工工艺更具优势，加工效率较高，较三角形等其他种类更为主流。

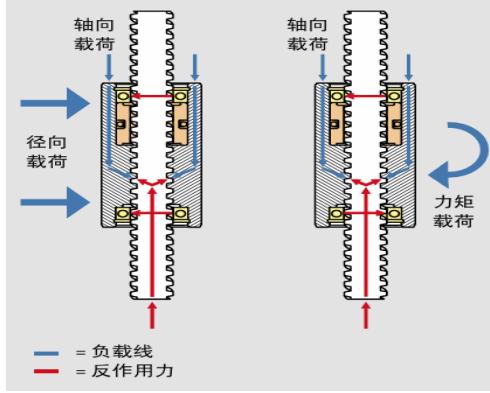
图22：滑动丝杠螺纹种类



资料来源：凤凰网，民生证券研究院

**图23：滑动丝杠结构图**


资料来源：thomsonlinear 官网，民生证券研究院

**图24：滑动丝杠工作原理**


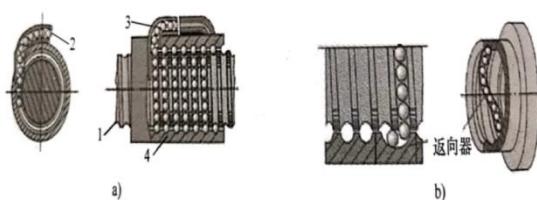
资料来源：thomsonlinear 官网，民生证券研究院

**滑动丝杠简便且成本较低，但传动精度、速度均偏低。**相较于其它传动方式，滑动丝杠结构简单（丝杠+螺母+轴承+润滑组件），在安装及后期维护等环节更为简便、制造成本较低，且可承受轴向、径向和力矩载荷，自锁性能较好，传动高效且节省空间。同时，由于滑动丝杠传动方式为滑动摩擦，摩擦大、效率低，易发热磨损，且传动精度和速度受限，不适合高频次、高精度场景。

### 3.1.2 滚动传动：传动精度高，滚珠丝杠为主流方案

**滚动传动方案核心为滚动接触，传动效率高、精度高。**滚动传动方案通过滚动接触替代滑动摩擦，显著提升灵巧手的精度、效率与寿命，目前已成为高端灵巧手的核心驱动技术。主流滚动传动方案包括滚珠丝杠传动、行星滚柱丝杠传动等。滚珠丝杠载荷传递元件为滚珠，借助众多点接触来支撑负载；滚柱丝杠借助螺纹滚柱作为滚动原件，借助众多线接触进行传动，使得滚柱丝杠传动具备强承载能力。

**滚珠传动：借助滚珠点接触进行直线传动。**当输入旋转运动或线性运动的力传递到螺纹轴时，滚珠滚动在螺纹轴与螺母之间的导槽上，可将旋转运动转为螺母的直线运动，滚珠在此工作过程中循环往复运动，滚珠循环方式按滚珠在循环反向过程中与丝杠表面脱离与否，可分为内循环式（返向器）和外循环式（回珠管）。

**图25：滚珠传动内循环 VS 外循环**

**图 1 滚珠循环方式**

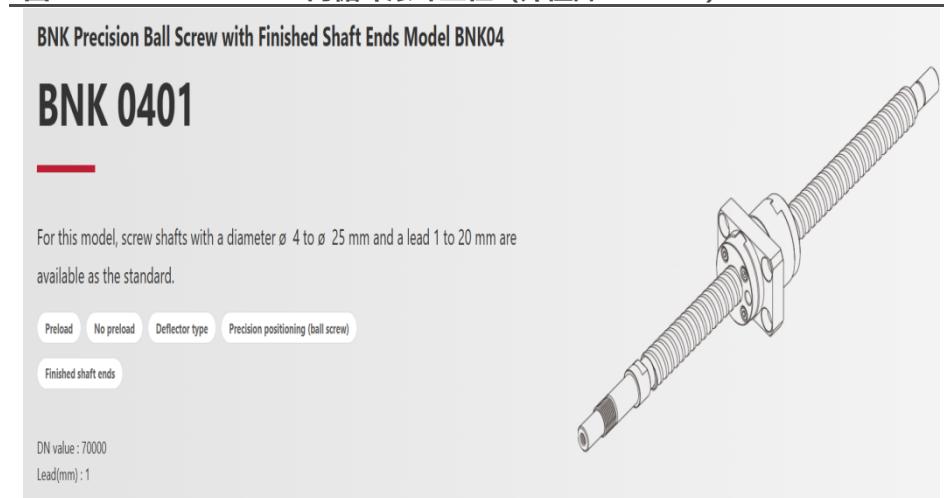
a) 外循环式 b) 内循环式  
1—丝杠 2—滚珠 3—回珠管 4—螺母

资料来源：理工精密官网，民生证券研究院

**内循环滚动传动更具优势，浮动式返向器滚珠丝杠副具备高灵敏度和高刚度。**

外循环滚动传动导管增加径向尺寸，内循环滚动传动则内置返向器，结构紧凑、运行平稳、噪音低，可满足灵巧手高精度、小体积、轻量化需求。内循环滚珠返向器一般安装在螺母的侧孔内，借助于返向器上回珠槽的作用，迫使滚珠沿滚道滚动，翻越丝杠螺纹滚道牙顶后重新回到初始滚道，构成了一个循环的滚珠链。其中，浮动式返向器的优点在于高频“浮动”中实现回珠槽进出口的自动对接，从而为滚珠返回提供流畅的通道口，具有较好的摩擦特性和结构工艺性，装配简便，在高速运转中工作可靠，适用于各种高灵敏度、高刚度要求的精密进给系统，但不适用于重载、多线滚珠丝杠副，以及大导程、小导程的滚珠丝杠副。

图26：THK BNK0401 内循环滚珠丝杠（外径降至4MM）



资料来源：THK 官网，民生证券研究院

**内循环滚珠丝杠的性能是设计、材料、工艺、使用条件等多因素耦合的结果。**滚柱循环方式、反向器设计等均影响滚珠循环过程及丝杠寿命，螺纹加工精度等影响定位精度，实际场景中的动态特性如运动速度、加速度等均影响丝杠性能。在人形机器人灵巧手等高端应用中，需通过精密制造、智能润滑、材料升级综合优化。

**行星滚柱传动：通过线接触扩大接触半径，结构紧凑且承载力更强。**行星滚柱丝杠用滚子（通常带有螺纹）代替滚珠用作螺母和丝杠之间的载荷传递元件。相较于滚珠丝杠传动，行星滚柱丝杠传动方式是在主螺纹丝杠的周围，行星布置多个螺纹滚柱丝杠，将电机的旋转运动转换为丝杠或螺母的直线运动，其众多的接触点使行星滚柱丝杠的承载能力非常强。

**图27：行星滚柱丝杠示意图**


资料来源：Rollvis (北京) 官网，民生证券研究院

**表1：行星滚柱丝杠较滚珠丝杠具备多重优势**

行星滚柱丝杠	
高承载	线接触导致接触面的增加，使承载能力和刚性大大提高，比同规格滚珠丝杠高出3倍以上（最高超过10倍）
耐冲击	承受冲击载荷的能力很强，工作可靠
体积小	相同载荷情况下，行星滚柱丝杠体积比滚珠丝杠小1/3
高速度	最高线速度可达2000mm/s，输入旋转转速可达5000rpm以上，最大加速度可3g
噪音低	避开返向装置对DN值制约，在导程很小的情况下实现高速驱动，振动小、噪音低
高精度	丝杠轴是小导程角的非圆弧螺纹，有利于达到较高的导程精度，可实现精密微进给
长寿命	行星滚柱丝杠能承受的静载为滚珠丝杠的3倍，寿命是滚珠丝杠的15倍

资料来源：方元明科技官网，民生证券研究院

**行星滚柱丝杠优点较多，但需兼顾效率、成本之间的衡量。**相较于滚珠丝杠传动方案，行星滚柱丝杠方案承载力、体积、精度等综合优势凸显，但行星滚柱丝杠优异性能的背后支撑是极高的工艺要求和设备壁垒。**1) 工艺壁垒：**行星滚柱丝杠螺母的内螺纹加工是核心壁垒所在，制造工艺难度较大，人形机器人远期需求较大，对于零部件公司的批量生产能力的一致性保持能力同样提出较高要求。**2) 设备壁垒：**行星滚柱丝杠的高精度特性对设备要求高，国产磨床加工精度不及进口磨床，出品易不稳定，因此目前高端加工设备依赖进口，但海外高端磨床成本更高且采购周期偏长。

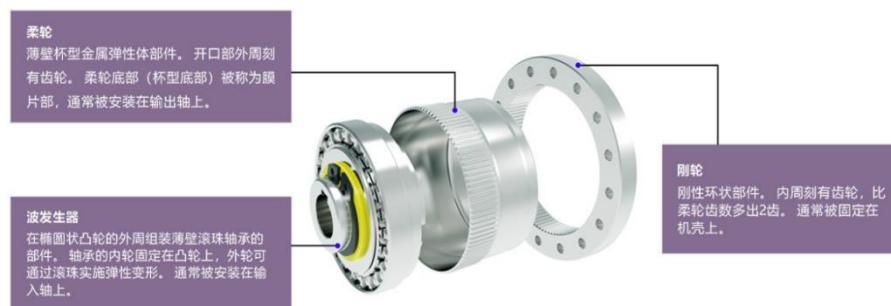
### 3.2 齿轮减速装置：因地制宜，多方案优势各异

齿轮传动目前广泛应用于人形机器人灵巧手中，具备灵活性强、效率高等特点。按齿轮传动结构进行分类，主要传动方案包括行星减速器、谐波减速器及蜗轮蜗杆传动方案等。

### 3.2.1 谐波减速器：高精度且具备体积优势

**谐波减速器：**借助内外柔性齿轮间的相对运动实现减速。谐波减速器由内外两层柔性齿轮和一个柔性轴承组成，谐波齿轮传动减速原理是利用柔轮、刚轮和波发生器的相对运动，主要是柔轮的可控弹性变形来实现运动和动力传递的，内层柔性齿轮转动时产生弯曲变形，变形通过柔性轴承的外圈传递到输出轴，从而实现减速。

图28：柱状图（横）



资料来源：欣凌传动官网，民生证券研究院

表2：谐波齿轮减速器综合优势突出

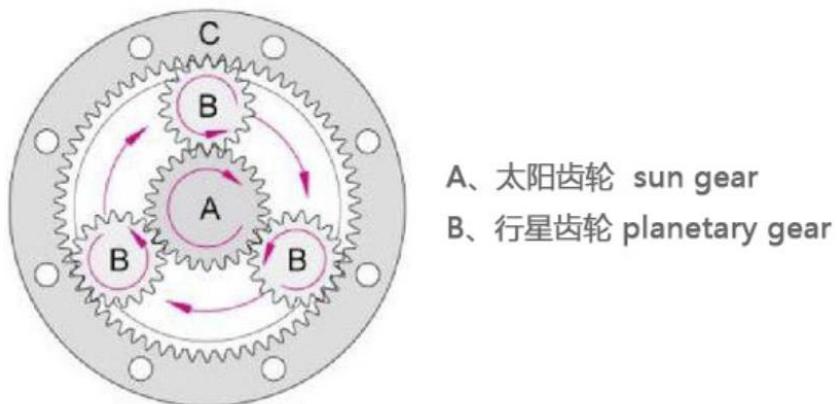
谐波齿轮减速器	
结构简单	体积小、重量轻，在传动比和承载条件相当的情况下，谐波齿轮传动可比一般齿轮减速器的体积和重量减小 1/3 到 1/2 左右
传动比范围大	单级谐波减速器传动比可达 50-160，复式传动的传动比可以更高
传动精度高	在相同的制造精度下，谐波齿轮的传动精度比一般齿轮的传动精度至少可高一级
运动平稳	无冲击，噪声小，啮合过程中齿面接触，滑移速度小，无突然变化
传动效率高	谐波传动由于运动部件数量少，而且啮合齿面的速度很低，因此效率很高，约在 65-90% 左右（谐波复波传动效率较低），齿面的磨损很小

资料来源：欣凌传动官网，CUBEMARS 官网，民生证券研究院

谐波减速器兼具高功率密度、传动效率高等优势，但相较于行星减速器等，谐波减速器由于精密制造和专用零部件，其初始成本较高，因此更适用于**需要高精度和紧凑设计的应用场景**。

### 3.2.2 行星减速器：高扭矩兼具成本优势

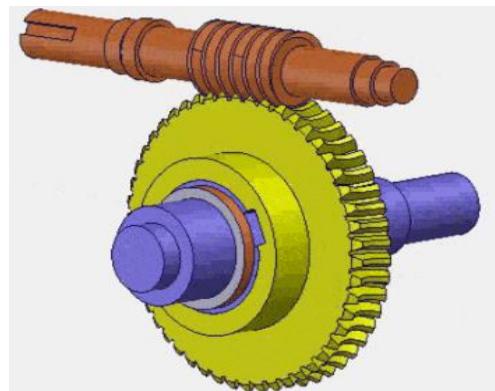
**行星减速器：**通过齿轮外壳与齿轮之间的摩擦来实现传动。行星减速器由太阳轮（A）、行星轮（B）、行星架和内齿圈（C）组成。驱动系统以直接或连接方式启动太阳齿轮，太阳齿轮将组合于行星架上的行星齿轮带动运转。整组行星齿轮系统沿着外齿轮环自动绕行转动，行星架连结出力轴输出达到减速目的。

**图29：行星减速器结构图**

资料来源：合富源官网，民生证券研究院

行星减速器由于简单的结构和广泛可用的零部件，其初始成本较低，且具备高扭矩输出。但若需高减速比则需借由多组阶段齿轮与行星齿轮倍增累计而成，影响传动效率和控制精度。因此行星减速器更适合**大扭矩、重载**等应用场景中。

**蜗轮蜗杆传动装置：**常用来传递两交错轴之间的运动和动力。蜗轮蜗杆机构通常两轴交错角为  $90^\circ$ ，一般是以蜗杆为主动件，工作时蜗轮轮齿沿着蜗杆的螺旋面作滑动和滚动。

**图30：蜗轮蜗杆传动装置结构图**

资料来源：尚为传动官网，民生证券研究院

**蜗轮蜗杆传动比大且具备自锁性，但传动效率偏低。**蜗轮蜗杆传动装置具备较大的传动比，且工作平稳（蜗杆与蜗轮齿为连续啮合），传动过程中没有明显的冲击和振动。同时，蜗轮蜗杆传动具备较好的自锁性（当蜗杆的螺旋角小于轮齿间的当量摩擦角时蜗杆传动可自锁），适用于对安全性较高的场合。此外，为了改善轮齿的接触情况，可将蜗轮沿齿宽方向做成圆弧形，使之将蜗杆部分包住，实现蜗杆蜗轮啮合时通过线接触传动而非点接触，滑动摩擦会影响传动效率。

### 3.3 腱绳传动：轻量化首选方案，腱绳为关键部件

**腱传动模仿人类肌腱系统，通过柔性绳索（腱）传递动力，可实现多关节协同运动。**驱动器（电机、气动肌肉等）集中布置于灵巧手基座或外部，通过腱绳（如超高分子量聚乙烯纤维）绕过滑轮组，牵引远端关节运动。其他辅助需求包括张力反馈：通过力传感器（如应变片、光纤 Bragg 光栅）实时监测腱力，结合 PID 算法调节电机扭矩；位置补偿：针对腱绳弹性变形（导致迟滞误差），采用前馈补偿或神经网络预测。

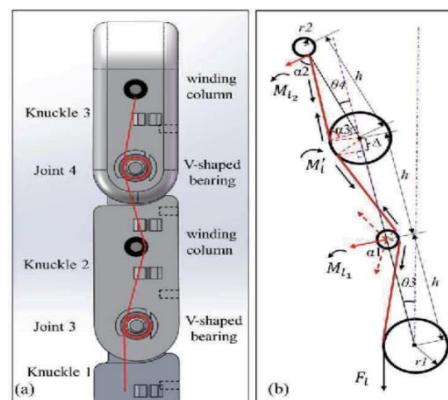
图31：腱绳传动灵巧手



The ACT hand is a tendon-driven robot designed to mimic the tendons and joints of the human hand.

资料来源：researchgate, 民生证券研究院

图32：手指环节腱绳传动结构图



资料来源：semanticscholar, 民生证券研究院

**腱传动方案具备轻量化、高自由度等优势，但受腱绳相关特性影响较大。**相较于齿轮、丝杠等传动方式，腱绳传动主要借助轻量化腱绳实现传动，在重量、体积等方面均占优，且同时可借助欠驱动方案实现多关节驱动（Shadow Hand 腱绳方案具备 20 个电机、24 个自由度）。由于腱绳本身刚度有限，会影响位置精度，并且在控制时需要一定的预紧力，容易产生摩擦。

图33：Shadow Hand 腱绳方案



USES AN  
 Over 20  
 compo  
 and act  
 Shadow  
 to upgr  
 Fully RC  
 hardwa  
 Used wi  
 control

资料来源：researchgate, 民生证券研究院

图34：Shadow Hand 灵活性展示



资料来源：semanticscholar, 民生证券研究院

**腱绳材料的选择对灵巧手的功能执行影响较大。**在对灵巧手腱绳材料选择时，需综合考虑机械性能（抗拉强度、弹性模量等）、环境适应性（温度&湿度耐受性、

化学稳定性等)、耐久性(耐磨性、抗疲劳性、抗蠕变等)及成本等多方面因素。早期,腱绳材料主要是特氟龙、芳纶纤维、涤纶等,随后逐渐出现了更高强度、低密度、耐磨损的新材料,当前腱绳驱动的主流选择主要是两种: **高强度钢丝、超高分子量聚乙烯纤维(UHMWPE)**。

**表3: 钢丝 VS 超高分子量聚乙烯纤维**

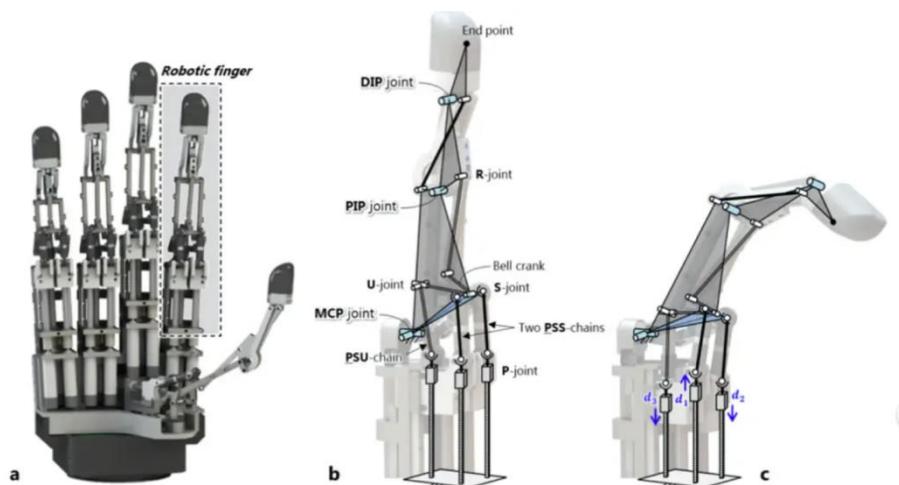
	抗拉强度	密度(g/cm <sup>3</sup> )	抗压强度(MPa)	抗冲击性(J/m)	摩擦系数	化学稳定性
UHMWPE	3400	0.94	32	140	0.05	卓越
碳素钢(A36)	400	7.8	250	27	0.6	较差
不锈钢(316L)	580	8.0	220	40	0.4	较好
高强度钢(A514)	690	7.8	690	40	0.6	较差

资料来源: Ijiuplastics 官网, 民生证券研究院

### 3.4 连杆传动: 高刚度、较低自由度

**连杆结构主要通过刚性连杆机构传递运动和力。**连杆传动通过刚性连杆机构将驱动器的旋转或直线运动转化为灵巧手关节的精确运动,其核心原理基于运动学链与力学放大。驱动器位移通过比例杠杆放大为指尖位移,用于增强抓取力。

**图35: 灵巧手连杆结构原理图 (韩国 ILDA 灵巧手)**

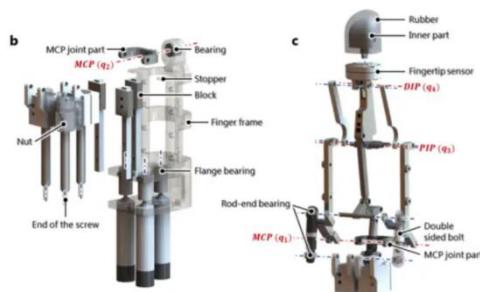


资料来源: 深智联官网, Nature Communications, 民生证券研究院

**连杆机构定位精度更高、低成本,但不适用于高自由度场景。**多连杆方案可通过并联或串联方式实现传动, ILDA 灵巧手连杆方案通过并联和串联机构的融合构建,通过连杆组合实现掌指关节(MCP)的 2 自由度运动和近端指间关节(PIP)的 1 自由度运动。通过多杆并联结构可提升整体刚性,且相较于腱绳方案,连杆

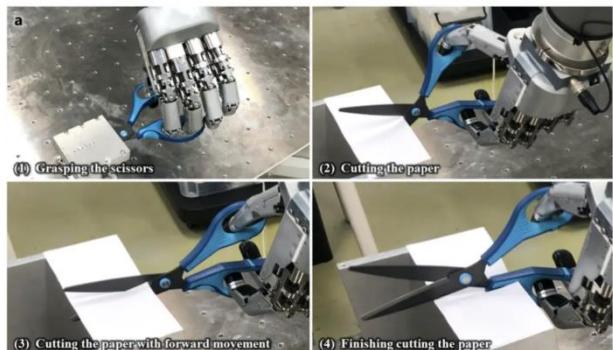
结构重复定位精度更高，无柔性件磨损故使用寿命更具优势。

图36：ILDA 灵巧手连杆组合



资料来源：深智联官网，Nature Communications，民生证券研究院

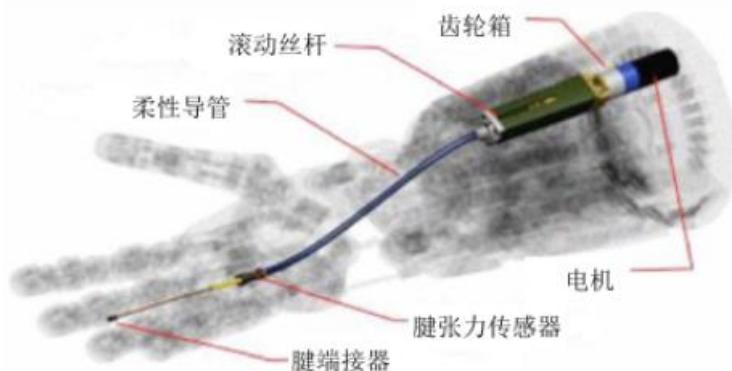
图37：ILDA 灵巧手可实现多种功能



资料来源：深智联官网，Nature Communications，民生证券研究院

**多传动方案配合可发挥多重优势。**丝杠传动、齿轮传动、腱绳传动、连杆传动等都各自具备优势和不足之处，主流人形机器人厂商已采用多方案配合形式，在最新的技术演进中，以特斯拉 Optimus 发布会展示的 22 自由度灵巧手为例，创新性采用了“行星齿轮箱+丝杠+腱绳”结构。下图所示为多传动形式配合方案，在灵巧手的结构设计中，柔性导管的一端固定在驱动器外壳上，另一端与固定在灵巧手手掌前端的腱张力传感器上。腱由驱动器内部活滚珠丝杠上的螺母拉动，穿过导管和腱张力传感器，连接在手指关节部分。

图38：齿轮 + 丝杠 + 腱绳传动方案



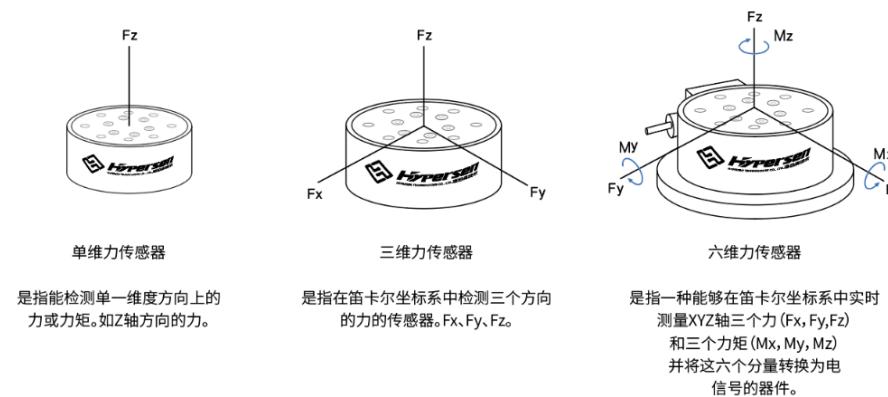
资料来源：韩如雪《腱驱动空间多指灵巧手感知与控制关键技术研究》，民生证券研究院

## 4 传感装置：高敏多能，进程加速

**传感器在灵巧手中广泛使用。**灵巧手作为机器人执行精细操作的核心部件，其传感器系统的设计直接决定了抓取、操控和感知能力。各大人形机器人厂商在灵巧手及机器人其他环节均大规模采用多种传感器，以使得机器人“拟人化”，具备人类五感功能。常见的传感器包括力/力矩传感器、触觉传感器、位置/角度传感器（如编码器）、视觉传感器（摄像头）、惯性测量单元（IMU）、接近传感器、温度传感器等。传感器正朝着多区域、柔性化、多模态趋势发展。

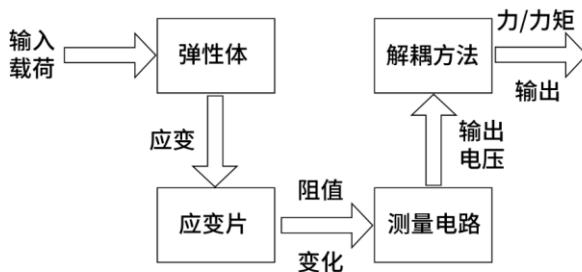
**力/力矩（F/T）传感器：能感知力、力矩并转换成可用输出信号。**力/力矩传感器可实现指尖力检测（测量抓取物体时的接触力，防止过压或滑脱）及关节扭矩反馈（实时监测关节驱动扭矩，优化控制算法）。按测量维度，力矩传感器可分为一维至六维力矩传感器，六维力传感器可同时测量3个力分量和3个力矩分量，是最完整的多维力传感器形式，技术难度、行业壁垒均最高。

**图39：力矩传感器**

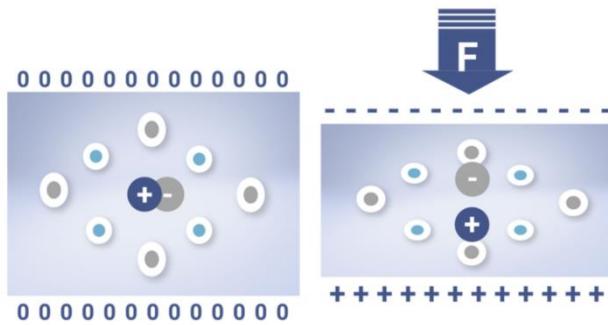


资料来源：海伯森技术官网，民生证券研究院

**六维力传感器通常基于应变效应工作。**六维力矩传感器可感知三个力+三个力矩，是目前最完整的多维力传感器形式，为机器人提供了类似于人类触觉的功能，是机器人柔顺控制和操作的核心部件。六维力传感器通常基于应变效应工作，即通过弹性体上的应变片来检测力或力矩引起的微小形变。部分灵巧手厂商也采用压电式力传感器（借助极化效应，体积小、重量轻），工作频带宽，具备高频响特性，适用于动态力检测（如碰撞），但需定期校准，且成本较高（材料必须具有高质量、精确和均匀的表面）且更容易漂移。

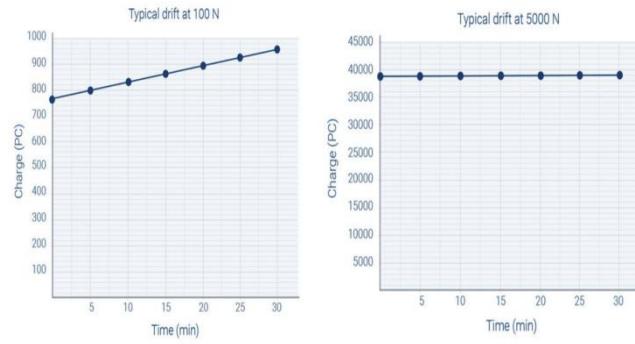
**图40：应变式力矩传感器工作原理**
**电阻应变式六维力传感器力/力矩信息检测原理**


资料来源：海伯森技术官网，民生证券研究院

**图41：压电式力矩传感器极化效应工作原理**


左边，我们可以看到无应力的晶体。右边，晶体受到机械应力；电荷呈对称中心分开，电荷可以在晶体的底部和顶部测量。

资料来源：HBM 官网，民生证券研究院

**图42：压电式力矩传感器漂移效应**


资料来源：HBM 官网，民生证券研究院

**触觉传感器：分布于机器人表面，可检测接触和压力分布。**具备表面压力分布检测（识别物体形状、材质及接触状态）、滑移检测（通过压力变化判断物体是否滑动）等功能。按工作原理可分为压阻式触觉阵列（柔性基底，覆盖手指表面）、电容式触觉传感器（模拟人类皮肤，多模态感知压力、振动、温度等）、光学触觉传感器（通过图像分析压力分布，分辨率极高）。

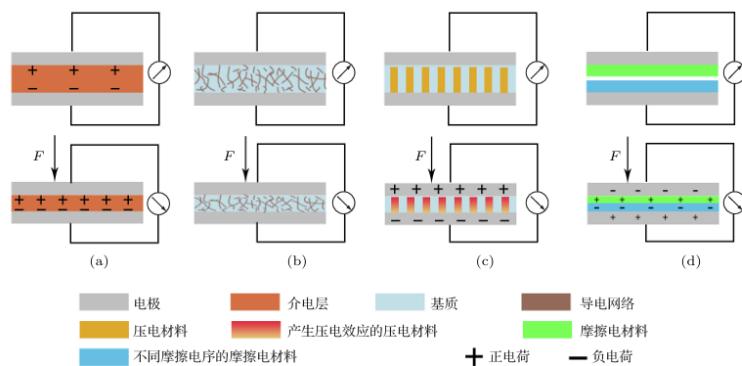
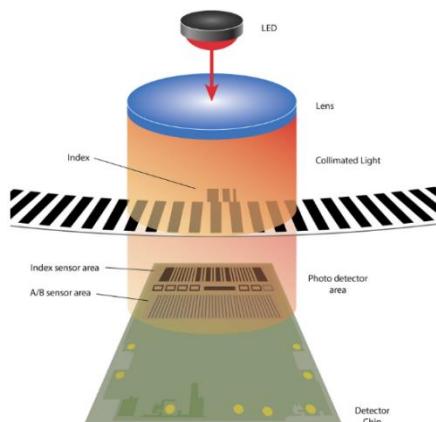
**图43：多种触觉传感器工作原理**


图 1 不同形式的压力传感器 (a) 电容型; (b) 电阻型; (c) 压电型; (d) 摩擦电型

资料来源：侯星宇等《柔性压力传感器的原理及应用》，民生证券研究院

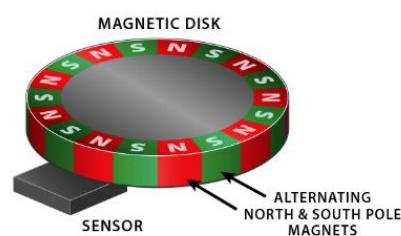
**位置/角度传感器（编码器）**：用于在关节处测量位置和速度。灵巧手位置/角度传感器一般用于关节处，用以完成关节角度反馈（精确控制手指弯曲角度）、速度测量（通过角度变化计算关节运动速度）等功能。主要类型包括光电编码器和磁编码器，光编码器结构相对简单，成本、体积等均占优，不需要进行复杂的算术处理，适用于高速运动控制，但对灰尘等工作场景要求较高；磁编码器精度更高、抗干扰能力更强。

图44：光编码器工作原理



资料来源：Orientalmotor 官网，民生证券研究院

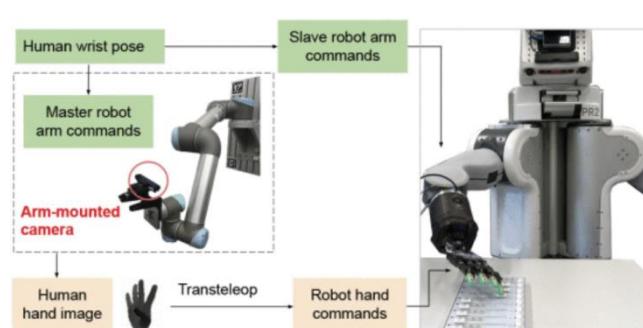
图45：磁编码器工作原理



资料来源：Orientalmotor 官网，民生证券研究院

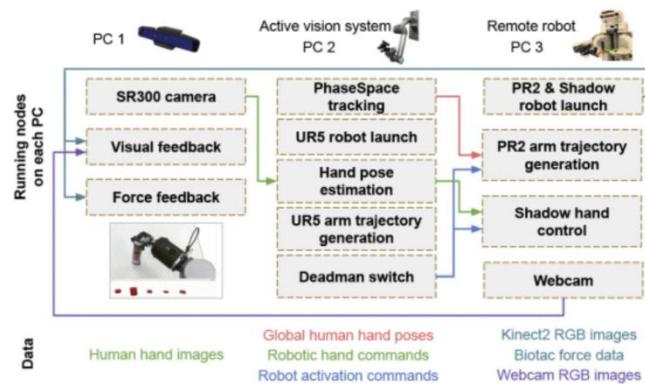
**视觉传感器**：借助摄像头等可实现较为复杂的人机交互。人类学习利用视觉来对手的运动进行规划、控制、状态预测是先于精确的手控制的，遥操作系统能够利用人类的能力仅通过视觉来进行物理操作的规划、运动、预测。英伟达 DexPilot 借助 4 个 Intel RealSense 相机实现低成本的遥操作系统，可完成多种物理任务。

图46：DexPilot 结构图



资料来源：IEEE，英伟达官网，民生证券研究院

图47：DexPilot 工作原理

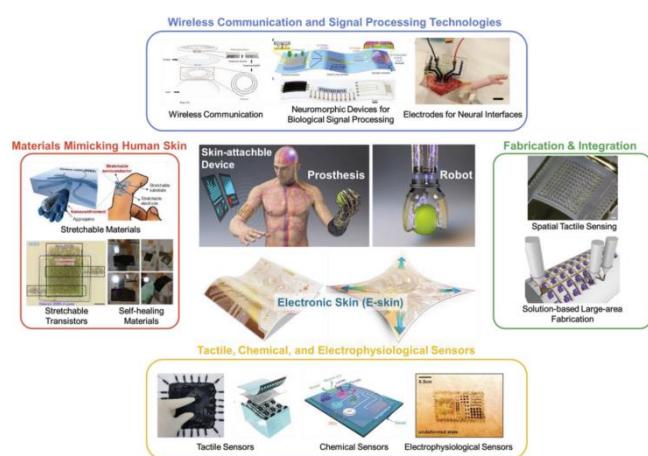


资料来源：IEEE，英伟达官网，民生证券研究院

**柔性/电子皮肤传感器**是机器人传感器的升级版本。电子皮肤为具备仿生性、柔弹性的传感器，借助触觉单元的阵列与集成模仿人类皮肤完成力/力矩、触觉等感知。柔性触觉传感器主要由基底材料、电极材料、功能层材料构成。基底材料决定传感器弹性形变性，电极材料主要用于传输电信号，功能层材料将外部的力、温

度、湿度等物理量转化为电信号。机器人电子皮肤前沿企业技术大多来源于全球知名高校，技术仍处于偏早期阶段。

**图48：机器人柔性/电子皮肤应用**



资料来源：Jun Chang Yang 等《Electronic Skin: Recent Progress and Future Prospects for Skin-Attachable Devices for Health Monitoring, Robotics, and Prosthetics》，民生证券研究院

**图49：人形机器人对电子皮肤性能要求**

Key technology	Skin-attachable devices	Robotics	Prosthetics
Tactile sensor	Pressure sensor	H	H
	Strain sensor	H	H
	Temperature sensor	H	H
	Slip sensor (force vector)	L	H
	Multifunctional sensors	M	H
	Chemical sensor	H	L
	Electrophysiological sensor	H	L
	Spatial tactile sensing	L	H
	Solution-based large-area fabrication	M	H
	Wireless communication	H	M
Sensors for health monitoring	Neuromorphic devices for biological signal processing	L	H
	Electrodes for neural interfaces	L	H

资料来源：Jun Chang Yang 等《Electronic Skin: Recent Progress and Future Prospects for Skin-Attachable Devices for Health Monitoring, Robotics, and Prosthetics》，民生证券研究院

## 5 产业链现状：Optimus 升级路径为例

**特斯拉 Optimus Gen1 至 Gen3，灵巧手自由度不断提升。**2024 年 10 月，Tesla 官方宣布下一代 Optimus (Gen3) 将具备 22 个自由度，较 Gen2 的 11 个自由度大幅提升，特斯拉 Optimus 更迭过程中，灵巧手自由度、量产成本、重量优势、传动优化等均不断提升。

**原型机：**2021 年 8 月 Tesla AI Day 活动中，马斯克首次正式宣布 Tesla 人形机器人—Optimus 的概念，宣布这款人形机器人的**长期目标是实现全面的自动化服务**，包括家庭协助、复杂任务的执行等。

**Gen1：**2022 年 10 月 Tesla AI Day 2022 中，马斯克首次展示 Optimus (Bumble C)，具备行走能力和基础的物体处理能力（搬运、浇水等），成功从概念过渡至初步原型。马斯克表明 **Optimus 的最终设计目标是大规模生产，单台制造成本可能在 2 万美元左右**。特斯拉希望通过模块化和高效的生产流程，将这款机器人打造成广泛可用的劳动力替代品。

**Gen2：**2023 年 12 月，Tesla 发布人形机器人 Optimus 第二代产品 (Gen2)，外观更加符合人形结构，关节和运动部位经过优化，进一步提高手部的灵活度和抓握精度。Gen2 配备更先进的电机和传感器系统，使其在精确运动和环境感知方面表现更优。机械结构更为紧凑，有助于提高耐用性和动作灵活性。

**Gen3：**细节待披露，已官宣相较于上一代 Gen2，第三代 Optimus 灵巧手已具备 22 个自由度，较上一代翻倍，灵巧手灵活度及精密操作性进一步提升。

**表4：Tesla Optimus 历史重要进展**

产品代际		具体进展	
2021 年 8 月	原型机	设计简单，运动速度及负载能力较差，指出 Optimus 设计目的是为了帮助人类执行一些危险、重复和枯燥的任务	
2022 年 9 月	首次展示	具备行走能力和基础的物体处理能力，如搬运箱子和浇水，配备传感部件，指出 Optimus 的最终设计目标是大规模生产，单台制造成本可能 2 万美元左右	
2023 年 3 月	Gen1 升级	整体性能：机器人能够更平稳地行走，转身，甚至进行一些复杂的平衡动作； <b>手部灵活性和抓握能力有所改进</b> ，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 年 9 月	升级	关节灵活性和运动协调性有所提升，自主识别物体和完成任务的能力进一步增强，使机器人能够在复杂的环境中更高效地运作	
2023 年 12 月	首次展示	更为灵活的关节和四肢运动能力； <b>进一步提高手部的灵活度和抓握精度</b> ，可完成双手协作任务，如搬运和组装较精密的部件，其在复杂任务中的适用性提升	
2024 年 1 月	Gen2 升级	执行精细任务，协调性升级，完成折叠衣服（ <b>手部精细操作和感知能力</b> ）、识别不同类型的衣物并进行抓取、拉伸和折叠等（ <b>复杂手部动作、视觉&amp;触觉结合</b> ）	
2024 年 10 月	升级	可自主任务执行拾取物体、协作搬运和轻型组装任务，自主移动能力、避障能力提升； <b>手部能够根据物体的不同形状和重量调整抓握力度和角度</b> ，完成如抓取小工具、整理零件等细致任务	
2024 年 10 月	Gen3 首次展示 (线上)	宣布 Gen3 具备 22 个手部自由度	

资料来源：亿欧网，民生证券研究院

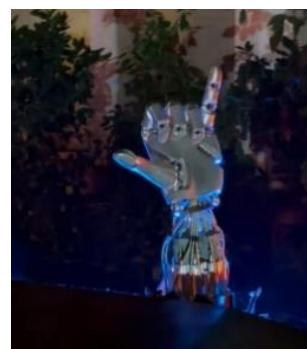
**Optimus 采用多种传动配合方案，Gen3 自由度提升至 22 个。**Gen2 具备 11 个自由度（单手 6 个=大拇指 2 个+其余四个手指各 1 个），采用欠驱动方案进行手部动作驱动，且手指部分（左右手食指、大拇指指尖处）配备有传感器以进行精密动作。若驱动方案无较大变化，我们认为 Optimus Gen3 驱动电机数量有望同步有较大幅度提升。同时，马斯克透露 Optimus Gen3 有望将驱动器外置于手臂环节，驱动器外置将降低对驱动电机体积的要求，成本或为更重要的考量要素。

**图50：Optimus Gen2 灵巧手 11 个自由度**



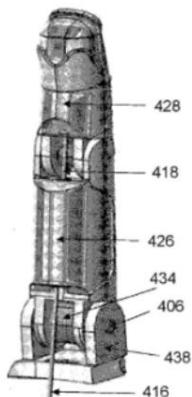
资料来源：Tesla 官媒，民生证券研究院

**图51：Optimus Gen3 灵巧手 22 个自由度**



资料来源：Tesla 官媒，民生证券研究院

**图52：特斯拉机器人手指环节专利（腱绳传动方案，2024 年 4 月）**



资料来源：WIPO《UNDERACTUATED HAND WITH CABLE-DRIVEN FINGERS》，民生证券研究院

**人形机器人行业快速发展，灵巧手或为 Optimus 多代际更迭最受益环节。**马斯克表明，2025 年生产数千台 Optimus 人形机器人，若测试顺利，2026 年预计生产 5 万-10 万台销量，2027 年将达到 50 万台。我们认为，2025 年进入人形机器人量产元年，且未来三年行业需求有望高增。参照 Optimus 多代际更新情况，灵巧手自由度不断提升，且精密操作等能力不断优化。

## 6 投资建议

人形机器人赛道发展进入快车道，随特斯拉、宇树、Figure等重磅产品不断更新换代，我们预计人形机器人产业链将逐步趋于成熟。参照特斯拉Optimus从Gen1更迭至Gen3，灵巧手自由度不断提升，且精密操作、复杂环境操作能力不断加强，拉动对驱动系统、传动系统、传感系统等核心部件需求。

1) **驱动系统**：电机传动综合优势突出。相较于其他传动方式，电机传动具备较高控制精度和集成性，技术成熟且适用范围更广。驱动电机的选择中，需同步考量控制精度、体积、成本等多重因素，空心杯电机优势更为突出，随灵巧手结构不断优化，无刷有齿槽电机优势也在逐步凸显。建议关注【鸣志电器】【伟创电气】【汇川技术】【兆威机电】【信捷电气】【雷赛智能】等。

2) **传动系统**：不同传动方案优势各异。灵巧手传动系统正朝着高精度、轻量化、仿生化和智能化方向发展，以满足不同场景的多样化需求。传统刚性传动（齿轮、丝杠等）与柔性传动（腱绳等）并存，多种传动方案结合方式正不断发展。建议关注【绿的谐波】【双环传动】【北特科技】【贝斯特】等。

3) **传感系统**：传感器在灵巧手多环节均有使用。传感器系统的设计直接决定灵巧手抓取、操控和感知能力。各大人形机器人厂商在灵巧手及机器人其他环节均大规模采用多种传感器，传感系统正朝着多区域、柔性化、多模态趋势发展。建议关注【柯力传感】【东华测试】【汉威科技】等。

### 6.1 驱动系统核心公司

#### 鸣志电器：空心杯电机龙头企业，布局灵巧手整体解决方案

**深耕控制电机及其驱动系统，国内空心杯电机龙头企业。**公司深耕控制电机及驱动系统多年，步进电机等优势产品已跻身全球第一梯队。关于灵巧手驱动电机，公司可提供**空心杯电机、无刷电机、直线电机模组**等产品，并借助北美AMP、美国Lin、T Motion等子公司布局海外高端高精度控制电机和电机驱动控制系统领域。此外，公司已具备**电机、高精密传动机构（减速器、丝杠）、高精度传感器**以及定制化零件等核心部件组成的自动化运动控制一体化解决方案，在机器人、智能驾驶等领域备受客户的青睐。

**图53：鸣志电器控制电机及驱动系统产品（24H1 财报）**

产品大类	产品类别	主营产品系列	主要应用行业	收入占比 (本年度)	
控制电机及其驱动系统类	控制电机	步进电机	医疗器械和生化分析、机器人（包括人形机器人）、光伏、半导体制造、安防监控、新能源储能、汽车电子、热管理流体控制、移动通信、舞台灯光、纺织机械、3D打印等	82.29%	
		伺服电机			
		直流无刷电机			
		空心杯电机			
	驱动控制系统	步进电机驱动			
		步进伺服系统			
		交流伺服系统			
		低压伺服系统			
		直流无刷驱动	3C 电子装备、光伏、锂电装备、半导体制造、新能源储能、汽车电子、热管理流体控制、机器人（包括人形机器人）、医疗器械和生化分析仪器等		
	其他	集成式驱动控制			
		运动控制器			
		减速机			
		丝杠			
		编码器			

资料来源：公司公告，民生证券研究院

### 伟创电气：传统赛道稳步发展，深入持续布局机器人赛道

**已完善工控全层级产品线，享人形机器人赛道成长红利。**公司由变频器产品不断完善，目前已具备变频产品、伺服系统产品（导入自研编码器）、控制系统产品（中小型 PLC）工控全层级产品，传统赛道稳步发展并深入拓展海外市场。公司近年来持续深入机器人赛道布局，**空心杯电机、伺服一体轮、伺服一体机**等产品适用于人形机器人灵巧手、各类移动式机器人以及机器人关节部位。2024 年 9 月，公司与科达利、盟立成立合资公司持股 30% 并派驻高管，机器人赛道布局再进一程。

**图54：伟创电气主要产品**


资料来源：公司公告，民生证券研究院

### 汇川技术：内资工控龙头，机器人领域实力领先

**自动化控制产品线完备，机器人赛道加速布局。**公司产品涵盖通用变频器、伺服系统、PLC&HMI、工业机器人、高性能电机、精密机械（丝杠、直线导轨）、气动等产品及解决方案。公司多项产品如通用伺服、低压变配、小型 PLC 等产品份额均位居行业前二；**工业机器人、SCARA 机器人**份额分别位居第三、第一。

**图55：汇川技术工业自动化&数字化解决方案平台**


资料来源：公司公告，民生证券研究院

### 兆威机电：深耕微型驱动领域，灵巧手新贵

**公司专业从事微型传动系统，已公开发布灵巧手产品。**公司专业从事微型传动系统、微型驱动系统，主要产品具备高精度、小体积、低噪音等特性。2024年11月，公司发布**仿生机器人灵巧手**，集结构、软硬件系统研发于一体。主要应用于机器人领域，可与各种柔性机器人配合使用，具有多自由度和高功率密度的特点，可完成复杂灵巧的抓握动作。

**图56：兆威机电灵巧手发布会**


资料来源：公司官网，民生证券研究院

### 信捷电气：PLC 内资龙头，下延布局全产品线

**产品线已逐步完善，机器人赛道成长性可期。**公司小型PLC产品已居内资龙

头地位，通过不断下延布局，公司目前产品线已贯穿人机交互（HMI）、控制系统（PLC）、驱动系统（伺服驱动系统，变频器）、执行反馈机构（伺服电动机，交流电机）、以及输出（工业机器人）的全过程。公司目前已具备**机器视觉、SCARA机器人、六轴机器人、以及相应的机器人控制系统**并形成收入。

**图57：信捷电气机器人相关产品**

工业控制 运动控制 工业互联网 机器视觉 **工业机器人**

## 工业机器人

信捷机器人产品主要包括机械手、机器人控制器、示教器等



机器人系统  
三大品类，满足...

机器人软件  
包括基于TouchWin平...

机器人配件  
包括RT-7和RT-8系列...

资料来源：公司官网，民生证券研究院

## 雷赛智能：运控领域领军企业，战略布局人形机器人赛道

**公司可提供运控系统级解决方案，定位人形机器人解决方案供应商。**公司目前已具备完备的伺服系统、步进系统、控制技术类产品，以适用面广泛的通用型系列产品为主，并深耕细分行业工艺及终端大客户。公司已积极布局人形机器人领域，**定位于伺服控制产品与解决方案提供商**、为众多整机厂家提供系列化伺服控制核心部件和模组级解决方案。2023年成功研发出高密度无框力矩电机、CD伺服驱动器、中空编码器、空心杯电机及配套的微型伺服系统等核心产品，经过数十家客户测试、验证和试用，已获得数家机器人客户的大批量订单；公司与德国知名自动化公司联合开发的机器人关节模组的产品获得成功，并获得多家客户试用、验证。

**图58：雷赛智能机器人相关产品**

### 4. 空心杯电机、无框电机与微型伺服系统

(1) 无框电机

(2) 无刷空心杯电机



(3) 编码器、微型专用伺服驱动器



资料来源：公司公告，民生证券研究院

## 6.2 传动系统核心公司

### 绿的谐波：国产谐波减速器领军企业，产品系列齐全

**谐波减速器行业龙头，机电一体化产品解决方案供应商。**公司在国内率先实现谐波减速器的工业化生产和规模化应用，打破国际品牌在国内机器人谐波减速器领域的垄断，机电一体化产品（机电传动及电液传动集成模块）可为客户提供更为标准化的解决方案。

图59：绿的谐波超小型谐波产品

产品系列	图例	技术特点及用途
超小型谐波		采用小型化、轻量化设计，外径最小可达6mm，非常适用于对体积、重量有极致要求的医疗、半导体设备，智能机器人手指关节等。

资料来源：公司公告，民生证券研究院

图60：绿的谐波机电一体化谐波产品

产品系列	图例	技术特点及用途
KGU 系列轻量小型化旋转执行器		高转矩密度：超小体积和超轻重量；超薄结构，强抗冲击性；内置中空绝对值编码器和低压伺服驱动器；可配置力矩感知功能；高可靠、长久持续带载运行。适用于智能机器人。

资料来源：公司公告，民生证券研究院

### 双环传动：国产齿轮专业供应商，全方位布局机器人减速领域

**全球高精密齿轮制造第一梯队，人形机器人减速器布局全面。**公司专注于齿轮传动产品制造，凭借其高精密齿轮批量化制造的能力与国内外著名的新能源车企与电驱动厂商形成深度合作，已进入高精密齿轮制造领域国际市场的第一梯队。子公司环动科技作为公司机器人减速器业务的主要实施主体，专注于高精密减速器，提供涵盖3—1000KG负载范围的机器人解决方案，包括**RV减速器、谐波减速器及机电控一体化关节模组、驱动执行器等**，全方位满足客户需求。

图61：双环传动部分产品

公司部分代表产品



资料来源：公司公告，民生证券研究院

### 北特科技：汽零部件优质企业，人形机器人丝杠赋能成长

**公司深耕汽零领域，积极布局人形机器人丝杠产品。**公司深耕汽车底盘领域二十余载，在国内转向器齿条以及减振器活塞杆细分行业内，连续多年保持细分市场

主导地位。公司持续配合客户开发各型号丝杠零部件，包括螺母、行星滚柱、丝杆、齿圈等，应用于人形机器人执行器及汽车后轮转向系统（RWS），重点建设了人形机器人用丝杠产线，相应工序的设备较为完备，实现全工序均由公司独立完成生产，且能实现单工序自动化方案。

**图62：北特科技产品**

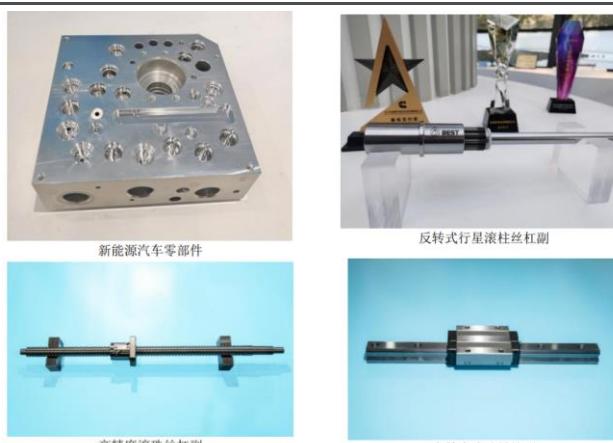
业务板块	产品细分	主要产品名称	代表产品图示	
底盘零部件业务	转向器类零部件	齿条		
		齿轮		
		扭力杆		
		蜗杆		
		输出轴		
		输入轴		
		IPA 总成		
	减振器类零部件	活塞杆		
	差速器类零部件	输出轴		
	高精密类零部件	CDC-evo 控制阀壳体（外置）		
		CDC-ivo 控制阀零部件（内置）		
		IPB	Flange	
			Piston	
		喷油器体		
		泵体		

资料来源：公司公告，民生证券研究院

### 贝斯特：精密零部件龙头，延申布局人形机器人

**公司专注于精密零部件，全面布局直线运动部件。**公司专注于精密零部件和智能装备及工装产品，并围绕公司三梯次产业的战略布局延展新能源汽车零部件业务（新能源汽车轻量化结构件、高附加值精密零部件等产品）及直线运动部件（高精度滚珠/滚柱丝杠副、高精度滚动导轨副等产品），自主研发的行星滚柱丝杠已于2023年顺利出样。公司以全资子公司宇华精机为独立平台，自主研发应用于人形机器人的线性执行器核心部件——标准式、反转式行星滚柱丝杠等。

**图63：贝斯特部分产品**



资料来源：公司公告，民生证券研究院

## 6.3 传感系统核心公司

### 柯力传感：专注智能传感器，积极布局人形机器人领域

公司是力矩传感龙头，重点突破机器人传感器。公司主要提供应变式传感器、仪表等元器件，并围绕主业积极开展投并购，沿着机器人力学、触觉、视觉、惯导传感器的主投方向，布局气体、温湿度、MEMS、压力、扭矩等多种物理量传感器相关产品。公司着力重点突破机器人传感器，**六维力/力矩传感器**已完成人形机器人手腕、脚腕，工业臂、协作臂末端的产品系列开发，并已给多家国内协作机器人、人形机器人客户送样，并将继续向微型、高响应、MEMS 硅基、力控算法集成等方向进行突破。**触觉传感器**已启动与多家企业、院校的合作，同时以自研模式进行研发。

图64：柯力传感部分产品



资料来源：公司公告，民生证券研究院

### 东华测试：智能化测控布局全面，传感器产品实力雄厚

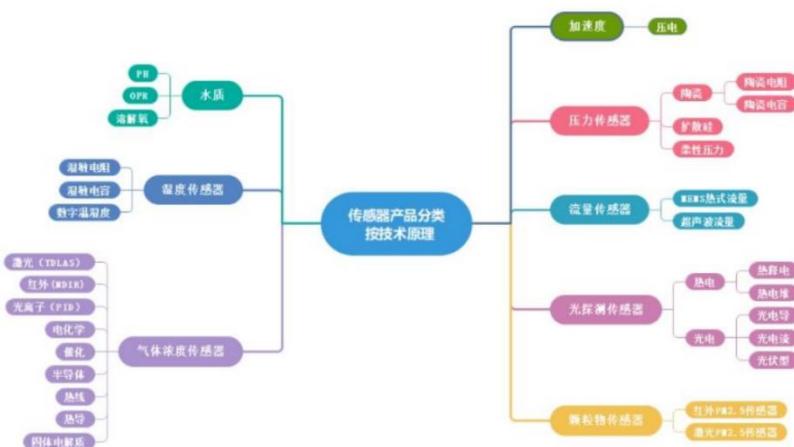
公司专注智能化测控系统，传感器产品种类齐全。公司始终专注于智能化测控系统，公司传感器产品可靠性高、稳定性高、指标优异。公司目前传感器产品包括加速度传感器、速度传感器、位移传感器、应变传感器、多维力传感器、声发射传感器、转速传感器、压力传感器及各类缓变量传感器等多种类型，产品种类齐全。

**图65：东华测试传感器产品**


资料来源：公司公告，民生证券研究院

### 汉威科技：气体传感器领军企业，积极布局新型传感器

**传感器解决方案供应商，积极拓展柔性微纳传感器。**公司坚持“成为以传感器为核心的物联网解决方案引领者”的发展愿景，已形成“传感器+监测终端+数据采集+空间信息技术+云应用+AI”的系统解决方案。公司柔性微纳传感器业务主要由控股子公司苏州能斯达开展，已自研多品种、多量程的柔性微纳传感器（压力、压电、应变、织物），开始给多家机器人整机厂商提供**电子皮肤及指腹类传感器**，供其研发使用，目前也正在持续推进后续合作。

**图66：汉威科技传感器产品**


资料来源：公司公告，民生证券研究院

## 7 风险提示

**1) 人形机器人技术迭代不及预期风险。**以特斯拉、宇树等为代表的人形机器人企业正不断迭代其人形机器人产品，目前大多数人形机器人产品均处于推出时间较短的状态，若人形机器人技术迭代较慢会影响行业商业化进程，进而影响人形机器人灵巧手需求。

**2) 人形机器人降本不及预期风险。**人形机器人未来需在各个场景替代人类工作，尤其是在一些成本敏感性场景，若人形机器人降本不及预期会影响行业商业化进程，进而影响人形机器人灵巧手需求。

**3) 政策支持不及预期风险。**人形机器人受相关行业政策影响较大，若政策支持不及预期会影响人形机器人产业化进程，进而影响人形机器人灵巧手需求。

## 插图目录

图 1: 普通工业机器人夹取式执行器	3
图 2: Tesla 人形机器人灵巧手	3
图 3: 人类手部共 24 个自由度	4
图 4: 不同动作对手部各环节配合要求不同	4
图 5: 灵巧手部分抓取场景	4
图 6: 灵巧手手指环节结构示意图	5
图 7: 全球机器人灵巧手市场空间 (单位: 万只)	5
图 8: 全球人形机器人市场空间 (单位: 亿美元)	5
图 9: 兆威机电全驱动灵巧手	6
图 10: BRL/Pisa/IIT (BPI) SoftHand (单驱动器欠驱动方案)	7
图 11: STANFORD/JPL 手指旋转驱动结构图	8
图 12: 因时机器人 RH56 直线驱动系列	8
图 13: The Fluidhand (液压驱动方案)	8
图 14: Festo BionicSoftHand (气压驱动方案)	9
图 15: 形状记忆合金 (SMA 驱动方案)	9
图 16: 传统直流电机结构 (直流有刷电机)	10
图 17: 空心杯电机结构	10
图 18: 无刷有齿槽电机结构图	11
图 19: 无刷电机 VS 有刷电机	11
图 20: 有齿槽电机 VS 无齿槽电机	12
图 21: 倾斜定子齿槽结构	12
图 22: 滑动丝杠螺纹种类	13
图 23: 滑动丝杠结构图	14
图 24: 滑动丝杠工作原理	14
图 25: 滚珠传动内循环 VS 外循环	14
图 26: THK BNK0401 内循环滚珠丝杠 (外径降至 4MM)	15
图 27: 行星滚柱丝杠示意图	16
图 28: 柱状图 (横)	17
图 29: 行星减速器结构图	18
图 30: 蜗轮蜗杆传动装置结构图	18
图 31: 腱绳传动灵巧手	19
图 32: 手指环节腱绳传动结构图	19
图 33: Shadow Hand 腱绳方案	19
图 34: Shadow Hand 灵活度展示	19
图 35: 灵巧手连杆结构原理图 (韩国 ILDA 灵巧手)	20
图 36: ILDA 灵巧手连杆组合	21
图 37: ILDA 灵巧手可实现多种功能	21
图 38: 齿轮 + 丝杠 + 腱绳传动方案	21
图 39: 力矩传感器	22
图 40: 应变式力矩传感器工作原理	23
图 41: 压电式力矩传感器极化效应工作原理	23
图 42: 压电式力传感器漂移效应	23
图 43: 多种触觉传感器工作原理	23
图 44: 光编码器工作原理	24
图 45: 磁编码器工作原理	24
图 46: DexPilot 结构图	24
图 47: DexPilot 工作原理	24
图 48: 机器人柔性/电子皮肤应用	25
图 49: 人形机器人对电子皮肤性能要求	25
图 50: Optimus Gen2 灵巧手 11 个自由度	27
图 51: Optimus Gen3 灵巧手 22 个自由度	27
图 52: 特斯拉机器人手指环节专利 (腱绳传动方案, 2024 年 4 月)	27
图 53: 鸣志电器控制电机及驱动系统产品 (24H1 财报)	29
图 54: 伟创电气主要产品	29

图 55: 汇川技术工业自动化&数字化解决方案平台 .....	30
图 56: 兆威机电灵巧手发布会 .....	30
图 57: 信捷电气机器人相关产品 .....	31
图 58: 雷赛智能机器人相关产品 .....	31
图 59: 绿的谐波超小型谐波产品 .....	32
图 60: 绿的谐波机电一体化谐波产品 .....	32
图 61: 双环传动部分产品 .....	32
图 62: 北特科技产品 .....	33
图 63: 贝斯特部分产品 .....	33
图 64: 柯力传感部分产品 .....	34
图 65: 东华测试传感器产品 .....	35
图 66: 汉威科技传感器产品 .....	35

## 表格目录

表 1: 行星滚柱丝杠较滚珠丝杠具备多重优势 .....	16
表 2: 谐波齿轮减速器综合优势突出 .....	17
表 3: 钢丝 VS 超高分子量聚乙烯纤维 .....	20
表 4: Tesla Optimus 历史重要进展 .....	26

## 分析师承诺

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并登记为注册分析师，基于认真审慎的工作态度、专业严谨的研究方法与分析逻辑得出研究结论，独立、客观地出具本报告，并对本报告的内容和观点负责。本报告清晰准确地反映了研究人员的研究观点，结论不受任何第三方的授意、影响，研究人员不曾因、不因、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受到任何形式的补偿。

## 评级说明

投资建议评级标准	评级	说明
以报告发布日后的 12 个月内公司股价（或行业指数）相对同期基准指数的涨跌幅为基准。其中：A 股以沪深 300 指数为基准；新三板以三板成指或三板做市指数为基准；港股以恒生指数为基准；美股以纳斯达克综合指数或标普 500 指数为基准。	推荐	相对基准指数涨幅 15%以上
	谨慎推荐	相对基准指数涨幅 5%~15%之间
	中性	相对基准指数涨幅-5%~5%之间
	回避	相对基准指数跌幅 5%以上
行业评级	推荐	相对基准指数涨幅 5%以上
	中性	相对基准指数涨幅-5%~5%之间
	回避	相对基准指数跌幅 5%以上

## 免责声明

民生证券股份有限公司（以下简称“本公司”）具有中国证监会许可的证券投资咨询业务资格。

本报告仅供本公司境内客户使用。本公司不会因接收人收到本报告而视其为客户。本报告仅为参考之用，并不构成对客户的投资建议，不应被视为买卖任何证券、金融工具的要约或要约邀请。本报告所包含的观点及建议并未考虑获取本报告的机构及个人的具体投资目的、财务状况、特殊状况、目标或需要，客户应当充分考虑自身特定状况，进行独立评估，并应同时考量自身的投资目的、财务状况和特定需求，必要时就法律、商业、财务、税收等方面咨询专家的意见，不应单纯依靠本报告所载的内容而取代自身的独立判断。在任何情况下，本公司不对任何人因使用本报告中的任何内容而导致的任何可能的损失负任何责任。

本报告是基于已公开信息撰写，但本公司不保证该等信息的准确性或完整性。本报告所载的资料、意见及预测仅反映本公司于发布本报告当日的判断，且预测方法及结果存在一定程度局限性。在不同时期，本公司可发出与本报告所刊载的意见、预测不一致的报告，但本公司没有义务和责任及时更新本报告所涉及的内容并通知客户。

在法律允许的情况下，本公司及其附属机构可能持有报告中提及的公司所发行证券的头寸并进行交易，也可能为这些公司提供或正在争取提供投资银行、财务顾问、咨询服务等相关服务，本公司的员工可能担任本报告所提及的公司的董事。客户应充分考虑可能存在的利益冲突，勿将本报告作为投资决策的唯一参考依据。

若本公司以外的金融机构发送本报告，则由该金融机构独自为此发送行为负责。该机构的客户应联系该机构以交易本报告提及的证券或要求获悉更详细的信息。本报告不构成本公司向发送本报告金融机构之客户提供的投资建议。本公司不会因任何机构或个人从其他机构获得本报告而将其视为本公司客户。

本报告的版权仅归本公司所有，未经书面许可，任何机构或个人不得以任何形式、任何目的进行翻版、转载、发表、篡改或引用。所有在本报告中使用的商标、服务标识及标记，除非另有说明，均为本公司的商标、服务标识及标记。本公司版权所有并保留一切权利。

## 民生证券研究院：

上海：上海市浦东新区浦明路 8 号财富金融广场 1 幢 5F； 200120

北京：北京市东城区建国门内大街 28 号民生金融中心 A 座 18 层； 100005

深圳：深圳市福田区中心四路 1 号嘉里建设广场 1 座 10 层 01 室； 518048