



华安证券

HUAAN SECURITIES

人形机器人深度：产业化渐行渐近，未来前景广阔

分析师：张志邦（S0010523120004）

分析师：刘千琳（S0010524050002）

2024年7月16日

华安证券研究所



引言：作为AI与物理世界交互的载体，人形机器人迎来产业发展窗口期

- **人形机器人是人工智能与物理世界交互的优质载体。**大模型问世是人工智能发展的分水岭，以人工智能大模型为代表的人工智能第三发展阶段未来会有一段较长的发展红利期，将成为新一轮科技革命和产业变革的重要驱动力量。人形机器人作为人工智能落地物理世界的优质载体，将受益于人工智能的快速发展，其拥有感知、思考、决策等能力不再遥不可及。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。当前人形机器人正处于从实验室研发到产业化转化的关键时期，产业规模快速增长，生态活力不断提升。
- **应用场景多元化，劳动力缺口加速机器人产业化进程。**人形机器人下游应用场景丰富，包括生产制造、应急救援、家庭陪护、教育、医疗等。在产业场景中，人形机器人主要在智能制造领域发力，如IBM结合AI、遥感和边缘计算的力量打造新一代安防巡检机器人，亚马逊采用AI技术驱动机器人用于自动化的仓库操作和物流处理等。劳动力缺口扩大导致用工成本上升，工厂机器替人需求逐渐增加，有望进一步加速机器人产业化进程。
- **多方入局，人形机器人正迎来产业高速发展窗口期。**外资巨头纷纷加速推进人形机器人业务进程，2024年3月，OpenAI与FigureAI合作推出通用型机器人Figure01，全球AI算力头部厂商英伟达发布人形机器人通用基础模型ProjectGR00T；4月，波士顿动力新版Atlas人形机器人亮相；5月，特斯拉发布人形机器人Optimus最新进展视频，展现其已具备分拣电池、行走、执行工厂任务的能力。在激烈竞争的市场环境下，我国人形机器人产业也呈现出蓬勃发展的态势。优必选Walker、小米CyberOne、达闼Ginger、傅利叶GR-1等一批国产人形机器人陆续面市，全球人形机器人产业竞争按下加速键。



目录

1人形机器人行业复盘和投资方法总结

2人形机器人关键技术：运控算法

3人形机器人产业链拆解

4投资建议

5风险提示



目录

1人形机器人行业复盘和投资方法总结



2人形机器人关键技术：运控算法

3人形机器人产业链拆解

4投资建议

5风险提示



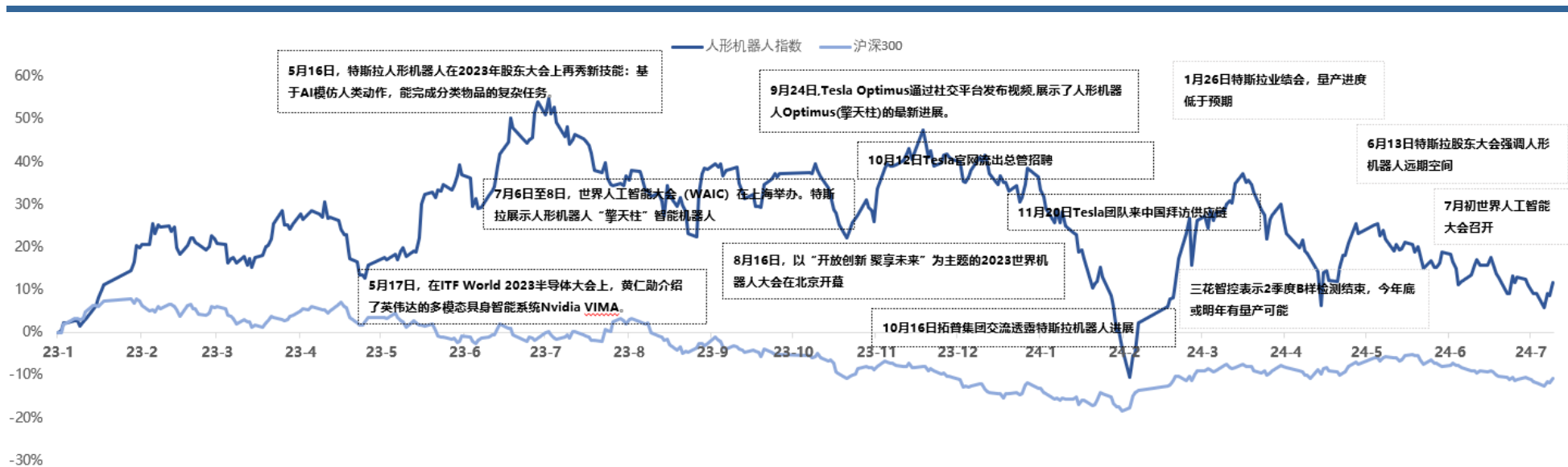
1.1 复盘：人形机器人行业复盘

- **事件驱动型投资，关注头部厂商技术突破。**人形机器人属于强预期板块，主要是事件驱动，板块行情和特斯拉、英伟达、优必选等本体头部厂商进展高度相关。
- **2023年人形机器人行情在5月16日启动：**主因特斯拉和英伟达相继发布人形机器人最新技术，机器人板块作为AI大模型的重要应用端受到市场重视。
- **2023年10月，机器人板块经过调整之后迎来第二波涨势：**主因拓普集团等潜在供应商透露特斯拉机器人最新进展以及特斯拉团队来中国拜访供应链。
- **2024年1月以来人形机器人板块迅速下跌：**主因市场流动性较差，中小股票下跌较多，1月进入业绩预告期，板块公司业绩频频低于预期，叠加1月26日特斯拉在交流会上表示2025年才可能量产机器人，进度低于预期。
- **从2月7日开始板块迎来超跌反弹：**主因市场流动性和风险偏好的改善。2月20日，三花智控等头部供应商表示2季度B样检测有望结束，24年底或者25年初有望进入量产阶段。
- **2024年3月中旬开始板块迅速下跌：**主因人形机器人板块利好落地，加之年报业绩期来临，板块小幅调整。
- **从4月中旬开始板块迎来反弹：**特斯拉、英伟达等头部厂商释放利好信息，业绩期逐渐步入尾声，美股特斯拉、英伟达、谷歌等AI头部厂商表现较好，带动A股AI板块回暖，机器人板块也随之反弹。

1.1 复盘：人形机器人行业复盘

- 事件驱动型投资，关注头部厂商技术突破。人形机器人属于强预期板块，主要是事件驱动，板块行情和特斯拉、英伟达、优必选等本体头部厂商进展高度相关。

图表1：人形机器人指数及沪深300指数对比分析

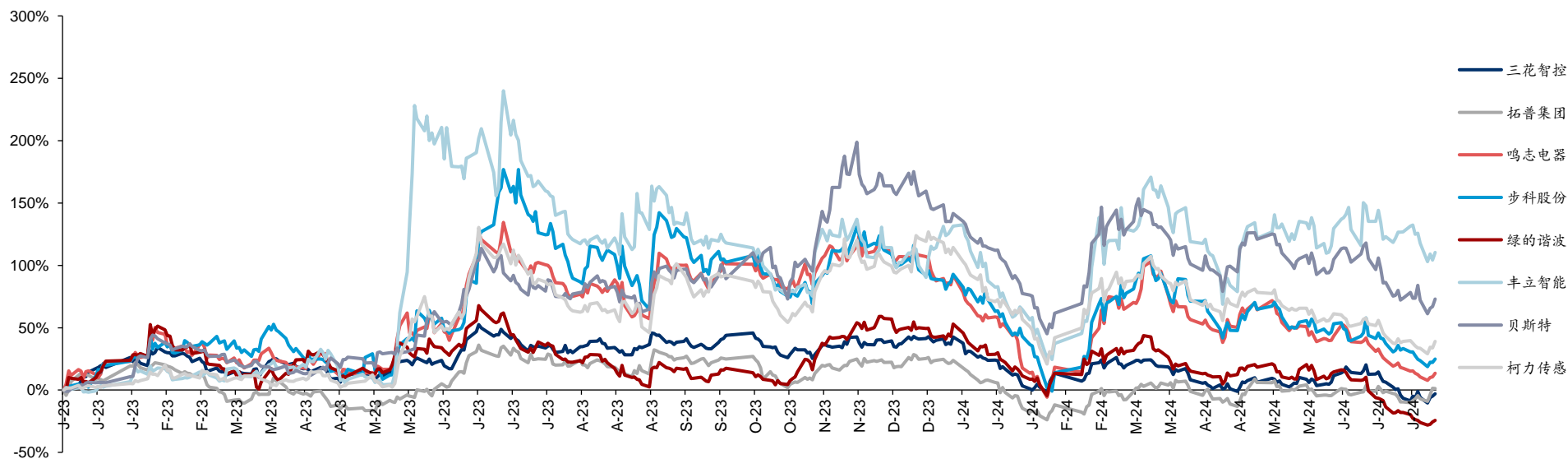


资料来源：Wind，华安证券研究所

1.2 重点个股复盘：从炒小炒新逐步收敛到核心标的

- 2023年，受市场风格影响，在人形机器人板块中，小市值标的涨幅显著高于大市值标的；谐波减速器供应商丰立智能、丝杠供应商贝斯特、力感传感器供应商柯力传感涨幅居前；机构持仓较多的三花智控、拓普集团弹性弱于小市值标的。
- 2024年，我们通过复盘发现有业绩支撑的大市值股票抗跌性较好，小市值股票反弹弹性大。板块从炒小炒新逐步收敛到有进入头部厂商产业链的核心标的。

图表2：主要个股行情复盘

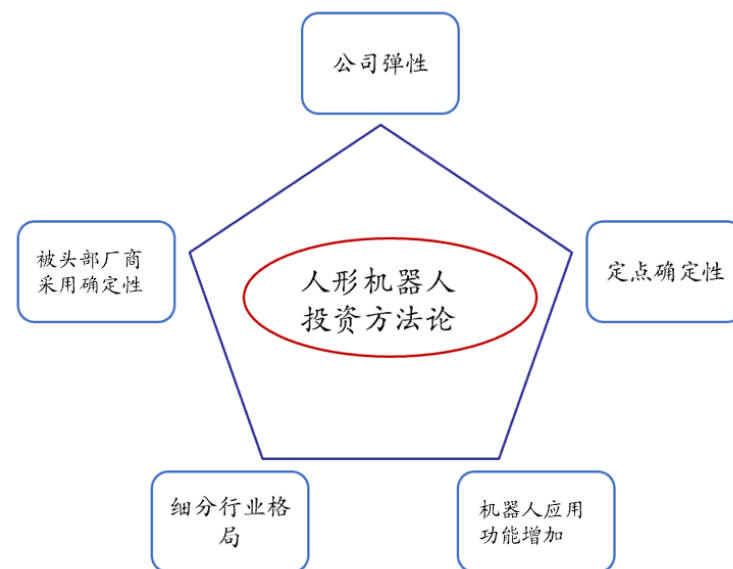


资料来源：Wind，华安证券研究所

1.3 人形机器人投资方法论——五大维度择选优质公司

- 复盘总结：人形机器人产业链表现为事件驱动和炒小炒新，主要原因为这是一个终局能看清，但是中间节奏看不清，短期没有业绩的行业。股价上涨的核心都是围绕增加的期权价值，我们总结了五大维度帮助把握人形机器人产业链的投资机会。
- **机器人应用功能增加**：事件催化背后是头部厂商技术进步，增加机器人应用功能，增加潜在销量和加快量产进展，确定性和行业潜在空间提升，股价上涨；
- **被头部厂商采用确定性**：环节被头部厂商采用的概率增加增强了确定性和潜在空间，股价上涨；
- **细分行业格局**：细分环节的壁垒越高，格局越好，最终落实到终局可以获得较高的市占率以及净利率；
- **定点确定性**：过往与头部厂商有合作的企业获得定点概率更大；
- **公司弹性**：机器人业务占比高，受其他业务影响的公司，弹性更大。

图表3：五大维度择选优质公司



资料来源：华安证券研究所整理

1.4 催化剂：关注特斯拉、英伟达、figure的技术进展

- 2024年3月18日，英伟达GTC大会发布GT001机器人平台
- 2024年3月29-31日，中国具身智能大会（CEAI2024）在上海市徐汇区西岸智塔召开
- 2024年4月，中国人形机器人生态大会在上海举行
- 2024年5月，特斯拉发布二代optimus最新进展
- 2024年6月，特斯拉召开股东大会
- 2024年7月，世界人工智能大会在上海举办
- 2024年Q2末，特斯拉Optimus的零部件B样测试结束，可能会有公司定点，然后再进入C样
- 2024年8月15日-8月19日，2024年世界机器人大会（北京）博览会将在北京举办
- 2024年Q3，特斯拉产业链或有定点消息
- 2024年底或者2025年初，特斯拉Optimus准备量产。

目录

1人形机器人行业复盘和投资方法总结

2人形机器人关键技术：运控算法



3人形机器人产业链拆解

4投资建议

5风险提示



2.1 人形机器人关键技术：运控算法

- **人形机器人对工业机器人的优势：**工业机器人和机械臂等更多在标准工业场景下使用，功能有限，设计人形机器人的意义在于机器人可以像人一样，在各种非结构化的场景下应用，实现多种功能的整合。
- **运控算法是人形机器人大规模量产的关键要素。**运动控制能力是人形机器人的核心能力，在机器人执行具体任务时候，需要解决准确性和实时性问题，AI在机器人的任务和步态规划是其中最大的难点，其他的比如人形机器人行动的速度、步幅、稳定性和路径规划也都是难点。
- **人形机器人算法可供练习数据相对较少。**人形机器人最终仍然需要往与人交互的层面上发展，要确保人形机器人在与人类做物理交互的安全不能仅依靠纯位置控制，最终能决定机器人人机交互能力的主要是AI算法及软件平台能力。相对自动驾驶和ChatGPT等人工智能算法，人形机器人的算法难度在于可获取用于练习的数据较少。
- **技术发展遵循“工业——2B商业——2C家用”的路线。**完全2C需要应用的场景太多样，算法和AI技术都难以满足要求。全通用场景的人形机器人实现难度较大，2B工业是最先应用的场景。2B场景更标准化、更简单，场景结构化程度高，尤其是工业场景，它更加标准，有利于标准数据收集及算法和产品迭代。



2.2人形机器人重点发展方向

● 1) 具身智能——专用大模型与人形机器人融合

- ✓ 打造具身智能人形机器人，推动专用大模型与人形机器人深度融合，提升人形机器人环境感知、行为控制、人机交互，为人形机器人注入语言理解、视觉泛化、常识推理等关键能力，加速大模型训练迭代和产品应用，提高人形机器人的“人-机-环境”共融交互能力，支撑人形机器人全场景落地应用。

● 2) 人形机器人核心部件：感知、驱动、结构

- ✓ 聚焦人形机器人专用传感器，突破关键核心技术，提升人形机器人视、听、力、触、嗅等综合感知能力；提升减速器、电机、关节总成、伺服驱动器等驱动执行模块的高爆发移动和高精度作业能力，提升人形机器人运动控制能力；打造仿人机械臂、灵巧手和腿足，突破本体轻量化，研究人体力学特征及运动机理，形成人形机器人新型本体结构，实现多元化。

● 3) 应用场景落地：制造业、矿山、军警

- ✓ 聚焦3C、汽车等制造业重点领域，提升人形机器人工具操作与任务执行能力，打造人形机器人示范产线和工厂，在典型制造场景实现深度应用；加快人形机器人在矿山环境应用，强化复杂环境下本体控制、快速移动、精确感知等能力，实现高效、安全的矿山作业；面向要地警戒守卫场景，强化人形机器人本体安全防护能力、复杂任务智慧生成与高精度操作能力，降低作业人员危险性。

2.3 人形机器人主要零部件构成

人形机器人关键零部件企业

关键零部件是人形机器人实现感知、控制、执行的基础，直接关系到人形机器人的性能、稳定性和安全性，为人形机器人更广泛应用和发展提供有力支持

芯片

华为海思、中环股份、华天科技、寒武纪、阿普奇、芯擎科技、中兴微电子

新型传感器

宇立仪器、华威科、鑫精诚、远行时空、伟景智能、度量科技、柯力传感、他山科技、吴志机电、晶品特装、坤维科技、能斯达

运动控制

国讯芯微、卓誉电气、绿的谐波、环动科技、清能德创、三花智控、鼎智智能、拓普集团、鸣志电器、汇川技术、雷赛智能、步科股份、江苏雷利、埃斯顿、禾川科技、恒力液压、意优机器人、巨舰科技、诺万特

肢体

傲意科技、因时机器人、睿尔曼智能、大寰机器人、钧舵机器人

人形机器人整机企业

产业蓬勃发展，产业氛围浓厚，出现一批致力于发展人形机器人整机技术与产品的创新型创业公司，助力我国未来产业发展新赛道

感知决策

智元机器人、戴盟机器人、松延动力、开普勒、追觅科技

运动控制

星动纪元、加速进化、中兵智能、伟景智能、睿尔曼智能、灵心巧手、优宝特、理工华汇、傅利叶智能、宇树科技、达奇月泉、天太机器人、西木科技

肢体执行

优必选、天链机器人、高擎机电、中电科机器人、小鹏鹏行、钢铁侠、纯米科技

人形机器人+大模型企业

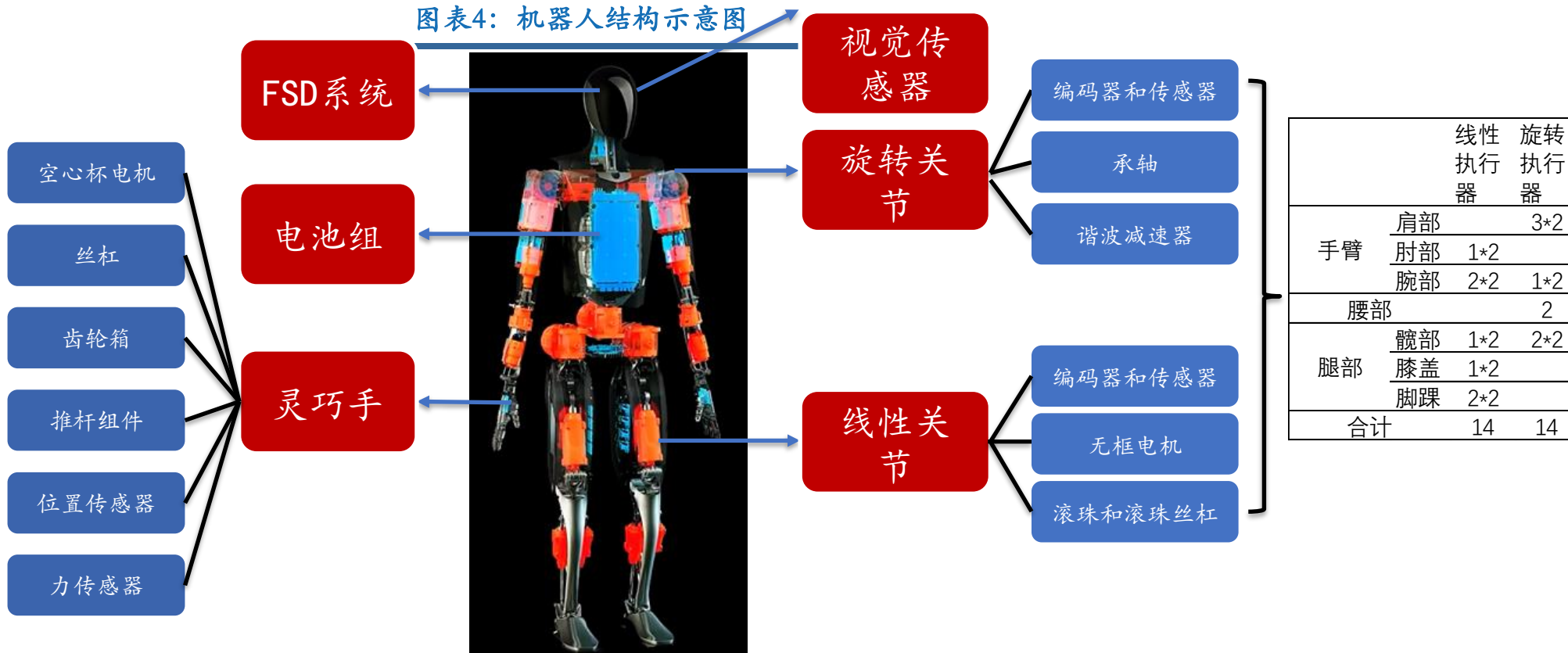
大模型有望快速推动人形机器人在各大场景的商业化落地进程

具身智能

科大讯飞、达闼机器人、银河通用、小米科技、乐聚机器人

2.4 机器人构成：14个旋转执行器和14个直线执行器

图表4：机器人结构示意图



资料来源：汽车之家，华安证券研究所

2.5 产业链价值及降本空间测算

- 硬件降本是人形机器人大规模量产的关键要素，六维力传感器、谐波减速器、行星滚柱丝杠和空心杯电机价值量最大，未来降本空间较大。

图表5: 产业链价值及降本空间测算

产品	数量(个/台)	当前售价(元)	单体价值(万元)	占比	未来售价(元)	未来单体价值(万元)	占比	降幅
手部模组	12	3700	4.44	13%	1250	1.50	10%	-66%
空心杯电机	12	2000	2.40	7%	600	0.72	5%	-70%
行星减速器	12	500	0.60	2%	100	0.12	1%	-80%
编码器	12	200	0.24	1%	50	0.06	0%	-75%
驱动器	4	200	0.08	0%	100	0.04	0%	-50%
单维力传感器	12	800	0.96	3%	400	0.48	3%	-50%
旋转关节	14	3050	4.27	12%	1730	2.42	16%	-43%
无框力矩电机	14	500	0.70	2%	250	0.35	2%	-50%
谐波减速器	14	1200	1.68	5%	800	1.12	7%	-33%
单维力传感器	14	800	1.12	3%	400	0.56	4%	-50%
驱动器	14	200	0.28	1%	100	0.14	1%	-50%
十字交叉轴承	14	150	0.21	1%	80	0.11	1%	-47%
柔性轴承	14	100	0.14	0%	50	0.07	0%	-50%
编码器	14	100	0.14	0%	50	0.07	0%	-50%
线性关节	14	15086	21.12	60%	5857	8.20	53%	-61%
无框力矩电机	14	500	0.70	2%	250	0.35	2%	-50%
梯形丝杠	6	400	0.24	1%	300	0.18	1%	-25%
行星滚柱丝杠	8	3000	2.40	7%	1200	0.96	6%	-60%
驱动器	14	200	0.28	1%	100	0.14	1%	-50%
编码器	14	100	0.14	0%	50	0.07	0%	-50%
单维力传感器	10	800	0.80	2%	400	0.40	3%	-50%
六维力传感器	4	15000	6.00	17%	5000	2.00	13%	-67%
电池	2.5kwh	1000	0.25	1%	800	0.20	1%	-20%
连接器	120	20	0.24	1%	15	0.18	1%	-25%
FSD	1	10000	1.00	3%	8000	0.80	5%	-20%
IMU(惯性测量单元)	1	2000	0.20	1%	1500	0.15	1%	-25%
其他(壳体、控制器、摄像头、热管理、电子皮肤等)			4.00	11%		2.00	13%	-50%
硬件成本			35.36			15.37		-57%

资料来源: 各公司公告, 特斯拉, 华安证券研究所

目录

1人形机器人行业复盘和投资方法总结

2人形机器人关键技术：运控算法

3人形机器人产业链拆解



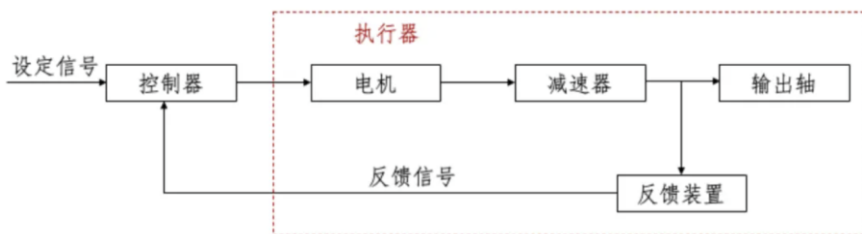
4投资建议

5风险提示

3.1 机器人核心部件：执行器

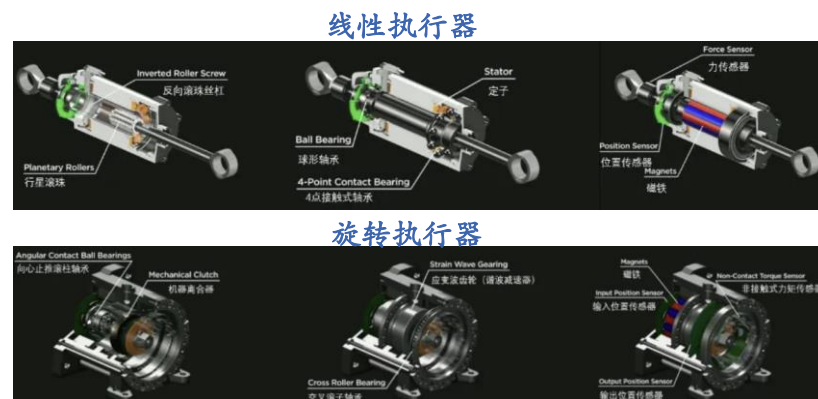
- 人形机器人的执行器主要负责将能量转化为机器人的机械运动。执行器按运动类型可分为旋转执行器和线性执行器。旋转执行器相对于中点（即沿圆）以角度移动，主要用于使机器人的关节进行旋转运动，而线性执行器则用于推拉动作，如手臂的伸展。
- 执行器核心零部件包括电机、减速器、丝杠、编码器、力矩传感器等。特斯拉Optimus线性执行器的配置为：无框力矩电机*1+行星滚柱丝杠*1+力传感器*1+编码器*1+驱动器+球轴承*1+四点接触球轴承*1；特斯拉Optimus旋转执行器的配置为：无框力矩电机*1+谐波减速器*1+力矩传感器*1+编码器*2+驱动器*1+交叉滚子轴承*1+角接触球轴承*1。

图表6：执行器原理示意图



资料来源：《智能电动执行器关键技术的研究和开发（2012年）》，华安证券研究所

图表7：特斯拉线性执行器与旋转执行器构造图

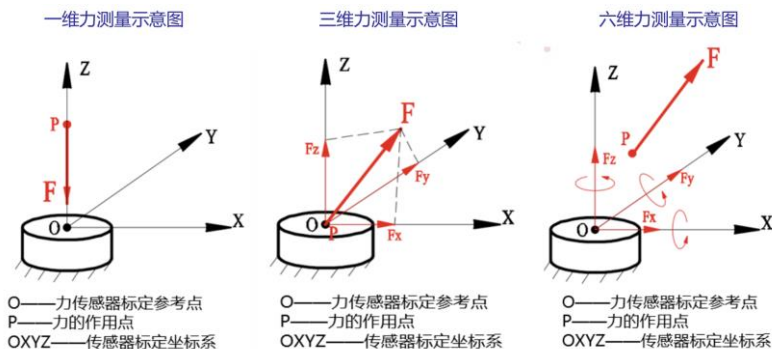


资料来源：特斯拉，华安证券研究所

3.2 机器人触觉：力矩传感器

- 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（未产生旋转的力矩）或动态力矩（产生旋转的力矩）。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。

图表8：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9：不同弹性体结构的力/力矩传感器的特性比较

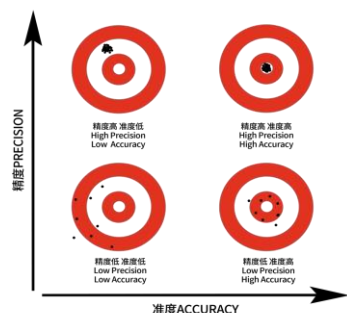
机械结构	优点	缺点
竖梁	承载能力强，结构简单，横向效应和抗冲击性能好	纵向灵敏度低，维间耦合严重
圆筒式弹性梁	耦合小	刚度差
十字弹性梁	高对称性，结构紧凑，刚度大，易加工，由于柔性连接简化了力学模型	存在维间耦合和径向效应
非径向梁式	刚度大	输出为强非线性
复合梁型	可实现无耦合测量	结构复杂，受加工和装配精度的影响大
Stewart 并联结构	刚度大，稳定性好，负载能力大	较难实现力和力矩的各向同性，仅适用于静态力/力矩的测量

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

3.2.1 六维力传感器技术壁垒：消除维间耦合，六维联合加载

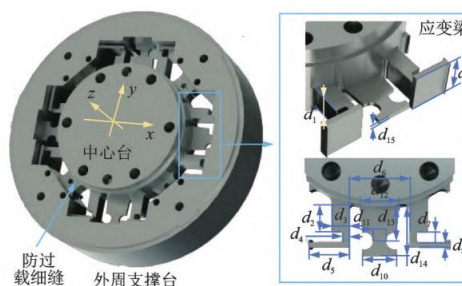
- 六维力传感器测量的准确度通常由串扰、精度、准度等指标表示。1) 串扰：用来衡量多维力传感器各测量方向间的耦合影响，可以反映测量误差水平，是体现产品性能的关键指标之一；2) 精度：衡量测量结果之间的重复性；3) 准度：衡量测量结果与理论真值的偏离程度，更能体现产品的综合性能，是多维力传感器最为核心的技术指标之一。
- 六维力传感器的技术壁垒较高。六维力/力矩传感器提升性能、降低误差的关键是消除维间耦合，目前消除维间耦合的解耦方法常见有硬件解耦和软件解耦两种。多维测力传感器的加载标定是制约其研制的技术瓶颈，对六维力传感器而言，标定需要同时考虑六个维度，其在承受多个维度力的同时作用时非线性特征显著，需要应用六维联合加载。
- 六维联合加载设备是高精度六维力传感器研发和生产的必要条件。六维力传感器标定检测设备可以对力觉传感器实现正交三个方向力和三个方向力矩的同时精确加载，只有在传感器标定和检测过程中采用这种六维联合加载的方式，才能实现0.5%FS准度。六维联合加载设备的研发涉及到空间光学定位、载荷位移补偿、机电一体化等多项综合技术，非常依赖工程经验。

图表10：精度与准度指标的详释图



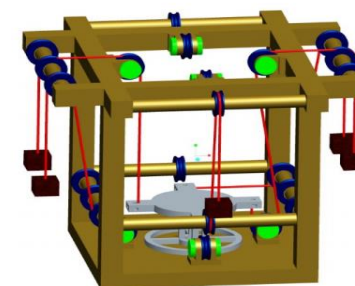
资料来源：坤维科技公众号，华安证券研究所

图表11：六维力传感器弹性体结构示意图



资料来源：宋逸等《一种低耦合高精度六维力传感器设计及应用》，华安证券研究所

图表12：传感器标定装置



资料来源：张思远《一种新型高精度六维力传感器的设计与研究》，华安证券研究所

3.2.2 六维力传感器的市场空间：目标市场空间200亿元

- 人形机器人通常在手腕、脚踝处安装六维力传感器共4个，在其余旋转执行器、线性执行器以及灵巧手关节部位安装1个单维力传感器。
- 六维力矩传感器单价昂贵是其无法广泛普及的重要原因之一。根据MIR调研，六维力传感器产品单价可达2-4万元。六维力传感器利润率较高，存在较大的降价空间。出于谨慎性考虑，假设2025-2030年六维力传感器价格由1.5万元/个降至0.5万元/个。
- 目前六维力传感器市场空间不足20亿元，当人形机器人销量达到100万台时，市场空间有望达到200亿元。

图表13：力传感器市场空间测算

力传感器空间测算	2025E	2026E	2027E	2028E	2029E	2030E
全球机器人新增需求(万台)	3	6	15	30	60	100
单维力传感器需求量(万套)	102	204	510	1020	2040	3400
-单价(元/套)	800	800	700	600	500	400
市场空间(亿元)	8	16	36	61	102	136
六维力传感器需求量(万套)	12	24	60	120	240	400
-单价(元/套)	15000	12000	10000	8000	6000	5000
市场空间	18	29	60	96	144	200

资料来源：MIR，华安证券研究所

3.2.3 六维力传感器格局：国外ATI等厂商技术较先进

图表14：全球力和力矩传感器主要参与者一览

- 全球六维力和力矩传感器厂商主要分为欧美、日韩、国产三大阵营：
 - 1) 欧美地区厂商：分为传统传感器制造商如ATI、Bota、Kistler等和全球知名机器人末端工具生产商如OnRobot、Robotiq等，后者主要和本地机器人厂商合作，包括优傲机器人、达明机器人等。
 - 2) 日韩厂商：六维力和力矩传感器厂商主要有Wacoh-Tech、Robotous等，主要配套本地区机器人厂商发那科、安川等。
 - 3) 国内厂商：以宇立仪器为代表，已经在全球市场开始和欧美、日韩厂商同台竞技，国内厂商还有坤维科技、鑫精诚、蓝点触控等。

品牌	业务简介
Baumer	1952年以电器开关起家，后逐渐开发光学传感器、编码器、力矩、温度、压力传感器等产品，业务领域覆盖食品饮料、钢铁冶金、工程机械、轨道交通、生物制药、工业自动化等领域的测量与控制。
Interface	1968年以称重传感器起家，逐渐开发矩补偿器、力矩校准器、多维力和力矩传感器等全套力矩测试产品技术，成为力测量解决方案集成商，业务领域覆盖工业自动化、航空航天、汽车等众多领域。
ATI	1989年成立，主营工具快换装置、多维力矩传感器、抛光打磨工具等机器人末端执行器，2021年被NOVANTA以2.239亿美金收购ATI，作为集团进军工业自动化的技术支撑。
HBM	1950年以位移传感器起家，不断拓展应变片、称重、力和力矩传感器产品，并开展传感器OEM代工业务。2000年被Spetris收购，并与Brüel&Kjær合并成HBK公司，作为硬件技术辅助集团进军航空航天、汽车、轨道交通等领域的力测试业务。
Optoforce (onrobot)	2012年以机器人力矩传感器起家，2018年与PerceptionRobotics、onrobot三家公司合并而成现在的onrobot，成为协作机器人解决方案集成商，Optoforce主要负责六维力矩传感器的研发生产。
Bota	衍生于苏黎世联邦理工学院机器人系和NTUA控制系统实验，目前专营面向抛光打磨、组装示教场景的协作机器人传感器。
AIDIN	衍生于韩国Sungkyunkwan大学机器人创新实验室，以力矩、近觉传感器、智能抓手为主，主营协作机器人的力控解决方案。

资料来源：前瞻产业研究院，华安证券研究所

3.2.3 六维力传感器格局：国内宇立仪器相对领先

- 力矩传感器领域国内外头部厂商差距较大，国内宇立仪器和坤维科技相对领先。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。
- 近年来中国力矩传感器市场入局者逐年增加，但受限于该行业的高技术壁垒，真正具备批量供应能力的厂商依然较少。
- 从行业集中度来看，目前行业内出现少数头部厂商企业，但是受制于技术壁垒，暂时未形成大规模的生产优势，因此行业集中度处于中等偏高水平。

图表15：国内力和力矩传感器主要参与者一览

品牌	业务简介
宇立仪器	主营多轴力传感器、力控打磨设备和汽车测试设备，围绕力测量和力控制，为全球客户提供系列化的解决方案。多轴力传感器包括六维力传感器、三维力传感器、一维力传感器和关节扭矩传感器。
蓝点触控	从事高精度、高性能力传感器以及力控产品研发和生产，在多维力传感器、关节扭矩传感器、机器人力控技术等方面拥有深厚的经验积累和技术优势，现已形成了Wrist六维力传感器、Joint关节扭矩传感器、力控应用软件包等多个产品系列。
坤维科技	从事智能型多轴力传感器研发、生产及应用，掌握力觉测量核心技术，具备自主知识产权。公司的六维力传感器以先进的力敏元件及其固化技术、标定检测技术、核心算法、智能化硬件，赋予机器人、精密制造、测试与测量、航空航天、大健康等领域革命性的机器力觉产品及解决方案，产品性能稳定，准度（含串扰）可优于0.5%FS。
鑫精诚	成立于2021年，专注于微型压力、称重、多轴力、扭力等多样化的智能传感器与控制仪表等工业级产品的创新研发和精益生产。为3C自动化设备、精密医疗、农业、新能源锂电、机器人、半导体、航空铁路等领域提供“力控系统解决方案”与技术创新，以及高校产学研合作。
神源生智能	致力于力测试技术的研究及产业化，主营产品包括多维力传感器、力矩传感器、测力平台、测力仪等，已应用于航空航天、机器人、自动化、科研教学等行业，并已经销售至美国、德国、丹麦、瑞典等欧美国家。
瑞尔特测控	致力于提供力测与自动化控制解决方案，研发、生产精密微小型测力传感器、扭矩传感器、多维力传感器、称重传感器等产品，同时提供包括风洞、拧紧力、电动起，电动工具、六分量天平、桥梁、核电、贴片膜应力分析、高速称重测力数据采集、多通道数据采集等一系列专业技术服务。

资料来源：各公司官网，华安证券研究所

3.3 机器人关节传动：丝杠

- 丝杠是一种机械传动元件，由螺杆、螺母和滚珠组成，用于将旋转运动转为直线运动，可分为梯形、滚珠、滚柱丝杠等。
- 从性能及壁垒排序，**滚柱丝杠>滚珠丝杠>梯形丝杠**，滚柱及梯形丝杠将受益于人形机器人爆发。
- 梯形丝杠是一种滑动运动，适用于慢速、精度要求不高等领域，主要为切削工艺，已经成熟广泛推广，价格低。
- 滚珠丝杠和滚柱丝杠的运动原理类似，均是滚动运动，且加工设备基本相同，工艺具备同源性，但滚柱丝杠综合性能更优，具备承载力大、寿命长、体积小、速度快等优点，在高速、高承载等极端工况下具备优势。目前滚柱丝杠市场需求远不及滚珠，成本远高于滚珠丝杠，但随着大规模量产带来的规模效应，未来滚柱丝杠成本有望显著降低。

图表16：滚珠丝杠副与滚柱丝杠副比较

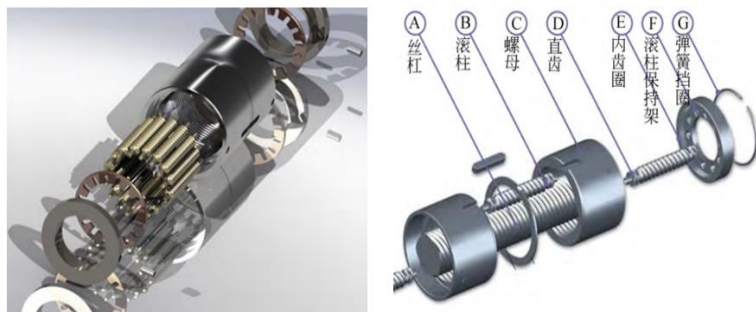
	滚珠丝杠副	行星滚柱丝杠副
结构构成	结构简单，由丝杠、螺母、钢球、导球管等组成，丝杠和螺母螺纹为单头或多头，丝杠、螺母螺纹滚道为单圆弧滚道或双圆弧滚道	结构复杂，由丝杠、螺母、滚柱、内齿圈、压盖、挡圈等构成，丝杠、螺母为齿形角90°三角形多头螺纹，滚柱为双凸圆弧齿形单头螺纹
循环方式特点	丝杠、螺母滚道通过导球管组成滚珠循环回路，每一个导球管组成1.5圈或多圈滚珠链，丝杠副可以由多个导球管组成多个滚珠链	滚柱丝杠副结构类似于行星齿轮结构。丝杠副有多个滚柱，且滚柱与丝杠、螺母呈多点接触
运动平稳性	由于滚珠在丝杠副循环滚珠链中运动要通过返向机构，容易产生冲击，影响丝杠副平稳性	滚柱在丝杠副中滚动没有返向机构，不产生冲击、震动，因而丝杠副运行平稳
传动效率	由于滚珠外表面粗糙度高且精度高，滚动摩擦系数小，传动效率高，可以大于90%。	虽滚柱与丝杠、螺母接触为点接触及滚动摩擦，基于螺母、丝杠及滚柱加工误差及表面粗糙度等原因，传动效率一般低于90%
承载	小规格、小导程承载小，大规格、大导程承载大	滚柱接触点多，接触承载大。小规格、小导程行星滚柱丝杠副承载大于滚珠丝杠副承载
加工及装配工艺性	简单	复杂
可靠性	结构简单，零件加工及装配精度易于保证，因此可靠性高	丝杠、螺母为多头细牙螺纹，由于螺纹分度误差及牙型强度等原因，实际承载远小于理论承载，且可靠性差

资料来源：肖正义《行星滚柱丝杠副的研究》，华安证券研究所

3.3.1 滚柱丝杠重要指标：精度

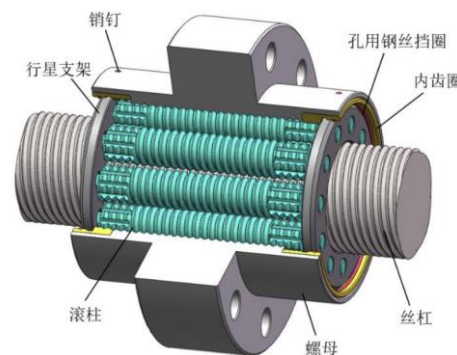
- 精度是滚柱丝杠重要指标，在人形机器人应用时同时追求运动丝滑性。滚柱丝杠评估指标众多，人形机器人主要关注高精度、负载大、结构紧凑等性能。滚柱丝杠选型时重点关注几个指标：精度等级、效率、速度、负载、额定寿命及刚度等。
- 按照ISO、DIN及JIS规定，精度一般分为C0、C1、C3、C5、C7、C10，通用机械选C7或以下，高精度数控机械选C3-C5，光学或检测机械选C3以上，机器人机械手臂（精密级）精度要求在C1-C4级，机床高精度磨床要求在C0-C2级。在人形机器人应用中，滚柱的精度与滚珠不同，滚珠追求导轨精度，而滚柱同时追求运动的流畅性。目前滚柱丝杠精度可达C1级别（ $\pm 5\mu\text{m}/300\text{mm}$ ），由于结构设计其实际精度表现优于滚珠同等级标定。

图表17：行星滚柱丝杠实物图及结构图



资料来源：李凯等《精密行星滚柱丝杠的传动特性》，华安证券研究所

图表18：行星滚柱丝杠副结构

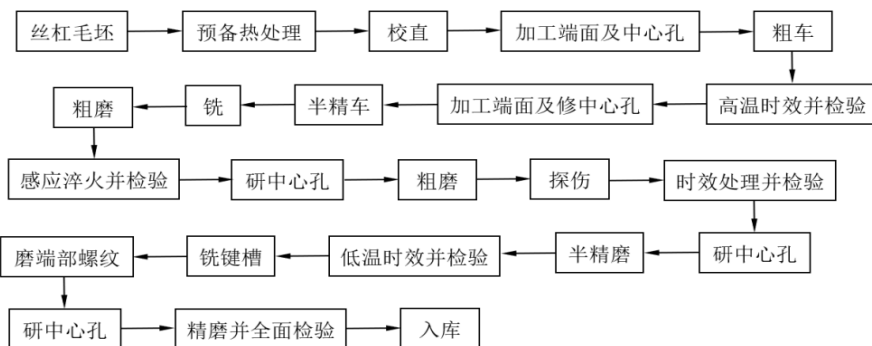


资料来源：郑伟《精密行星滚柱丝杠副工艺制造与传动性能研究》，华安证券研究所

3.3.1 滚柱丝杠核心壁垒：设备与工艺

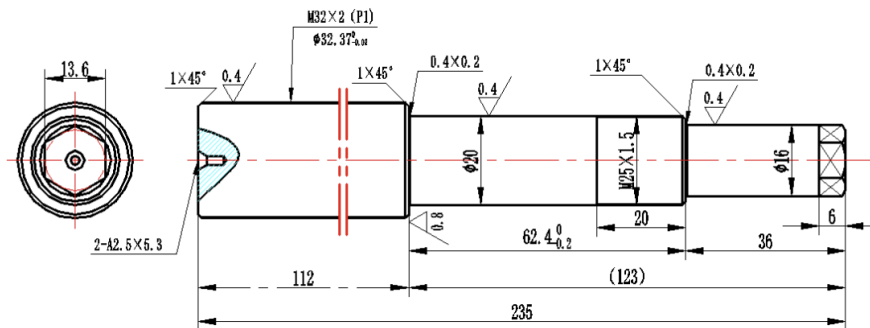
- 加工设备的精良和可靠的工艺是滚柱丝杠制造的前提。
- 行星滚柱丝杠核心三大部件为丝杆、滚柱、螺母行星，行星滚柱丝杠加工工艺分为冷轧和研磨，核心在于螺纹加工，特别是人形机器人使用反转式滚柱丝杠，螺纹长且是内螺纹，需用研磨工艺，难度大。研磨工艺工序长、但精度高，工序包括预热处理、粗加工（车、铣、粗磨）、半精磨、精磨，前后工序共10-20道，耗时10h以上，其中热处理和精磨是核心环节，特别是精磨对滚珠丝杠的精度起到绝对性影响。
- 精磨对设备与工艺要求高，需要经验积累。在小批量阶段，通常为高精度而牺牲效率。目前国内滚柱丝杠厂开发阶段，一个零部件精磨需2h，一个磨床一天最多磨一套滚柱丝杠，且良率低，成本居高不下。目前高精度螺纹磨床依赖进口，订货周期长达1-2年，厂商包括日本三井、美国Drake、德国SMS等。

图表19：丝杠工艺流程



资料来源：郑伟《精密行星滚柱丝杠副工艺制造与传动性能研究》，华安证券研究所

图表20：丝杠加工工程图



资料来源：邢思《循环式行星滚柱丝杠副的设计与工作特性研究》，华安证券研究所

3.3.2 滚柱丝杠市场空间：目前不足10亿元，目标市场空间100亿元

- 目前滚柱丝杠市场空间不足10亿元，当人形机器人销量达到100万台时，市场空间有望达到100亿元。人形机器人为丝杠新增放量点。梯形丝杠和滚珠丝杠在机械机床领域已成熟应用，行星滚柱丝杠目前仅在航空等高端领域应用。特斯拉人形机器人14个线性关节将使用8个行星滚柱丝杠和6个梯形丝杠，国内大部分人形机器人采用电流环方案，无需使用丝杠。预计当人形机器人销量100万台时候，滚柱丝杠单台价值量价格可能跌至1200元，对应空间有望达100亿元。

图表21：滚柱丝杠市场空间测算

滚柱丝杠市场空间测算	2025E	2026E	2027E	2028E	2029E	2030E
全球机器人新增需求(万台)	3	6	15	30	60	100
行星滚柱丝杠需求量(万套)	24	48	120	240	480	800
-单价(元/套)	3000	2500	2000	1800	1500	1200
市场空间(亿元)	7	12	24	43	72	96
梯形丝杠需求量(万套)	18	36	90	180	360	600
-单价(元/套)	400	400	400	400	300	300
市场空间	1	1	4	7	11	18

资料来源：高工机器人，华安证券研究所

3.3.3 滚柱丝杠格局：国外舍弗勒领先，国内加大研发和布局

- 德国舍弗勒依托子公司瑞士GSA，并先后收购瑞士ROLLVIS、Ewellix公司，几乎垄断滚柱丝杠市场，其余厂商均未形成大规模。参考滚珠丝杠发展历程，随着需求爆发，技术外溢至东亚，形成较分散的格局。
- 国内企业在行星滚柱丝杠产品方面布局较为稀缺，且在导程精度、最大动载荷、最大静载荷等性能方面与国外同规格产品目前仍然存在差距，目前国内厂商正加大滚柱丝杠研发与布局。

图表22：国内外滚柱丝杠主要参与方一览

滚柱丝杠生产商	业务简介
瑞士GSA	瑞士GSA公司专业致力于精密行星滚柱丝杠和精密锁紧螺母等机械零部件的研发、制造及推广，以生产制造行星滚柱丝杠为主，产品型号齐全，包括滚柱非循环式(RGT系列和RGTB系列)、滚柱循环式(RGTR系列)，导程精度等级从KL5至KL10(标准)
瑞士ROLLVIS	Rollvis SA于1970年在日内瓦成立，其卫星滚柱丝杠已成为高精度直线运动应用的标杆，产品包括四大系列滚柱丝杠。2016年被瑞士GSA收购。
瑞典EWELLIX	Ewellix公司提供3种不同类型的滚柱丝杠：行星滚柱丝杠、循环滚柱丝杠和反向滚柱丝杠，2023年被舍弗勒集团收购。
鼎智科技	公司在传动方面布局精密减速机、T型丝杆、滚珠丝杆、行星滚柱丝杆，掌握反式梯形丝杆独特的工艺技术，目前行星滚柱丝杆已送样。
贝斯特	承载公司第三梯次产业的全资子公司宇华精机生产的滚珠丝杠副最高精度可达C0级，直线导轨副最高精度可达UP级。高精度滚珠丝杠副和导轨副产品在知名机床厂商的部分型号机床上验证，并成功研发了行星滚柱丝杠。
秦川机床	子公司汉江机床拥有滚柱丝杠产品的研发、制造基础，现已逐步开始小批量生产，并进行了应用验证。
恒立液压	滚珠丝杠、滚柱丝杠、导轨等部分样品在试制中，于2024年一季度试生产。

资料来源：各公司官网，华安证券研究所

3.4 机器人关节动力：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23：科尔摩根无框力矩电机产品图

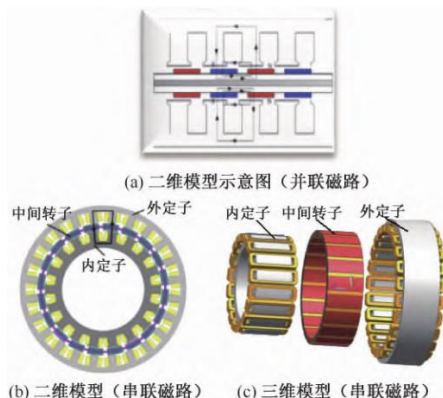


资料来源：工业产业链研究，华安证券研究所

3.4.1 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24：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25：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 公司已拥有有人机界面、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。
步科股份	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。
禾川科技	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被客户验证使用，FM1 系列无框电机采用多槽极配合优化的定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。
昊志机电	雷赛智能

资料来源：各公司官网，华安证券研究所

3.4.2无框力矩电机市场空间：目标市场空间70亿元

- 以特斯拉人形机器人为例：
 - 1) 每个关节都配备一台直流无刷力矩电机，单台人形机器人需配置直流无刷力矩电机28个；
 - 2) 根据AIOT大数据，无框力矩电机价格随量产进程逐年下降，目前关节电机均价500元，当人形机器人销量达到100万台时，无框力矩电机价值250元，对应市场规模70亿元。

图表26：无框力矩电机市场空间测算

无框力矩电机市场空间测算	2025E	2026E	2027E	2028E	2029E	2030E
全球机器人新增需求(万台)	3	6	15	30	60	100
无框力矩电机需求量(万套)	84	168	420	840	1680	2800
-单价(元/套)	500	450	400	300	250	250
市场空间(亿元)	4	8	17	25	42	70

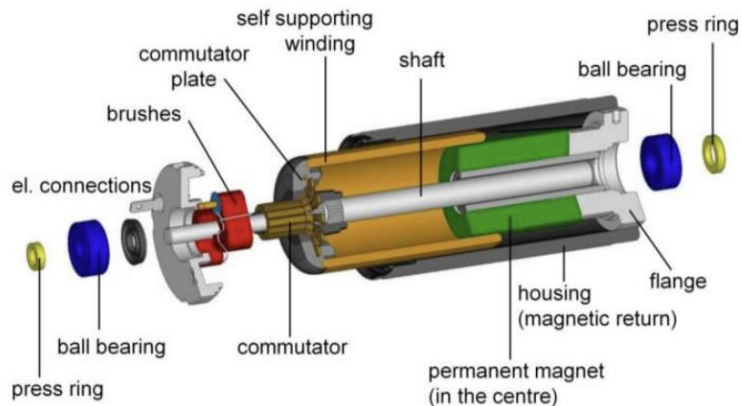
资料来源：AIOT大数据，华安证券研究所



3.5 灵巧手的重要部件：空心杯电机

- 在灵巧手使用的空心杯电机一般指的是空心杯电机+多级行星减速机组成的模组。
- 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，需要搭配行星减速机使用，一般会集成2-3级的行星减速机。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。

图表27：空心杯电机结构图



资料来源：Maxon官网，华安证券研究所

图表28：空心杯电机特点一览

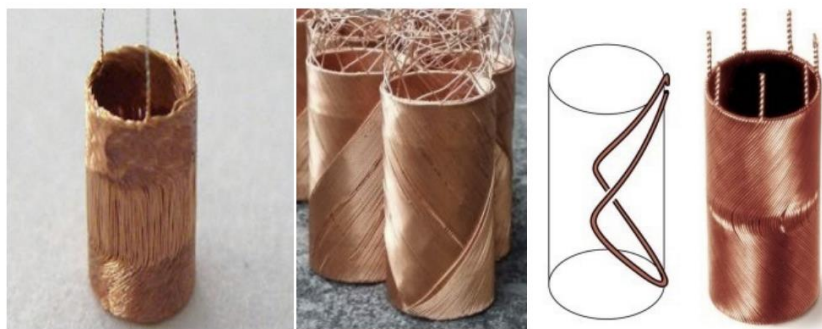
特点	补充说明
启动速度快	采用空心杯型绕组，减低转动惯量，启动速度快
高效率低损耗	消除了铁芯产生的磁阻力距和涡流效应造成的损耗，效率可达85%以上
	灵敏度高，响应速度快
	具有较大的功率体积比，一般达 30mW/cm ³
	转矩波动小，噪声小
	散热性能好，可取线负荷大
	电枢电感小，换相性能好，寿命高

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

3.5.1 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融化在一起，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29：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30：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

3.5.2空心杯电机市场空间：人形机器人带来百亿市场空间

- 空心杯电机属于微特电机的细分产品。据工业产业链研究，海外头部厂商Maxon仅单只空心杯电机售价就约2000元左右，国内空心杯电机头部厂商企业鸣志电器空心杯电机+精密减速器的产品组合售价约为1100~1200元，未来随着产品规模的扩大和在制造工艺上的不断创新，价格有较大下降空间，我们假设2025-2030年空心杯电机单价由2000元/套下降至1000元/套。
- 我们测算了人形机器人不同量产规模下，对空心杯电机的需求弹性。当人形机器人年销量分别为15/60/100万台时，空心杯电机市场规模分别为29/79/120亿元。

图表31：空心杯市场空间测算

空心杯市场空间测算	2025E	2026E	2027E	2028E	2029E	2030E
全球机器人新增需求(万台)	3	6	15	30	60	100
空心杯电机需求量(万套)	36	72	180	360	720	1200
-单价(元/套)	2,000	1,900	1,600	1,300	1,100	1,000
市场空间(亿元)	7	14	29	47	79	120

资料来源：工业产业链研究，华安证券研究所

3.5.3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。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%，价格偏高，主要用于医疗领域和电动工具领域。
- 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32：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：公司官网，华安证券研究所

图表33：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：公司官网，华安证券研究所

3.6 机器人转动关节核心部件：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34：三种精密减速器特点对比

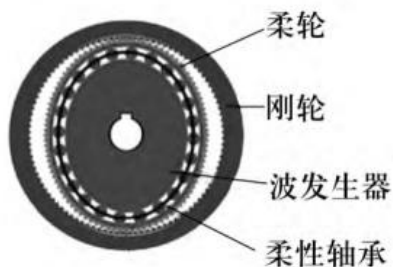
类别	结构特点	优点	缺点	应用
谐波减速器	主要包括波发生器、柔轮与刚轮。减速器工作时，波发生器会发生可控变形，同时依靠柔轮、刚轮的啮合传递动力。	传动精度高，重量和体积小，运转平稳、传动比大。	传递扭矩相对较小，传动效率低、使用寿命有限。	机器人中负载较小的小臂、腕部和手部等关节、航空航天、精密加工设备和医疗设备领域。
RV减速器	主要包括两级传动装置，分别为渐开线行星齿轮传动和摆线针轮行星传动。	传动比范围广至31-171，传动效率高达85%-92%，传动平稳性高，承载能力强，刚性和耐过载冲击性能好，传动精度高。	结构复杂、制造难度大、成本高。	机器人中负载较重的机座、大臂、肩部等大关节。
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%、质量轻、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

3.6.1 谐波减速器

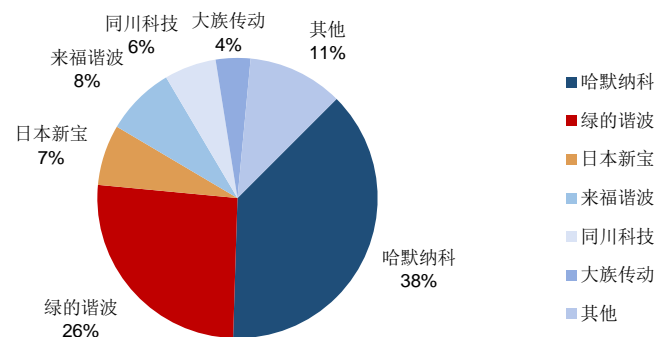
- 谐波减速器是机械传动领域的一种核心零部件。根据结构形式不同，一般分为杯形和礼帽形谐波减速器。柔轮和轴承是谐波减速器的核心传动零部件，其复杂的变形和应力分布影响了谐波减速器的传动性能和疲劳寿命。
- 中国厂商在国内谐波减速器市场中具备一定竞争力。全球减速器市场中谐波减速器行业头部厂商为哈默纳科，国内参与者主要有绿的谐波、来福谐波、同川科技等，目前国内厂商在减速比、额定扭矩、传动效率、精度方面已接近或达到国际先进水平，但使用寿命方面与国际头部厂商产品仍有一定的差距。

图表35：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36：2022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

3.6.2 谐波减速器市场空间：人形机器人有望带来百亿市场规模

- 据绿的谐波招股说明书，公司谐波减速器单价约1000-5000元不等，出于谨慎性考虑，我们假设谐波减速器单价为1200元，并随着后续规模效应显现及技术优化逐步下降至800元。2023年底特斯拉发布Optimus二代，我们推测单台机器人需要谐波减速器14台。
- 马斯克曾在特斯拉AI DAY上预估Optimus机器人产量将达百万台量级，在100万台Optimus机器人销量的假设下，谐波减速器对应的市场空间约为112亿元。

图表37：谐波减速器市场空间测算

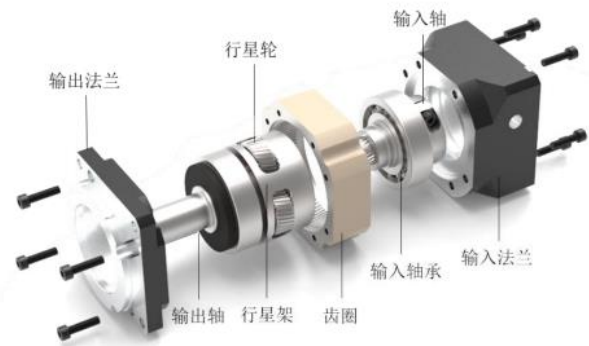
谐波减速器市场空间测算	2025E	2026E	2027E	2028E	2029E	2030E
全球机器人新增需求(万台)	3	6	15	30	60	100
谐波减速器需求量(万套)	42	84	210	420	840	1400
-单价(元/套)	1,200	1,100	1,000	900	800	800
市场空间(亿元)	5	9	21	38	67	112

资料来源：绿的谐波招股说明书，华安证券研究所

3.6.3行星减速器

- 精密行星减速器主要传动结构为：行星轮，太阳轮，外齿圈。在精密行星减速器的工作过程中，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。
- 相对其他减速机，精密行星减速器结构较为简单，传动比都在10以内，且减速级数一般不会超过3级。精密行星减速器具有高刚性、高精度(单级可做到1'以内)、高传动效率(单级在97%~98%)、高扭矩/体积比、终身免维护等特点。

图表38：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39：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

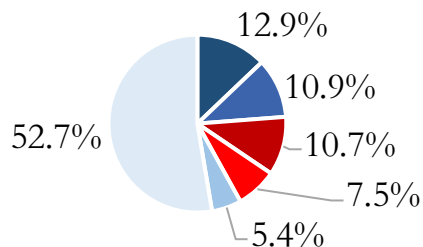
资料来源：焉知人形机器人，华安证券研究所

3.6.4行星减速器市场格局：全球市场以日德厂商为主

- 全球精密行星减速器市场以日德厂商为主。根据QY Research数据，2022年全球精密行星减速器市场中，日本新宝、纽卡特、威腾斯坦份额分别为12.9%、10.9%、10.7%，国内厂商精锐科技、科峰智能份额分别为7.5%、5.4%。
- 中国精密行星减速器市场较为分散。根据QY Research数据，2022年中国精密行星减速器市场中，日本新宝占比20.4%，科峰智能占比11.7%，CR5为53.9%。

图表40：2022年全球精密行星减速器市场格局

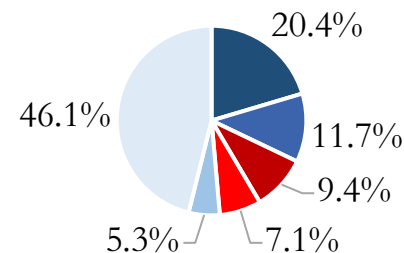
■ 日本新宝 ■ 纽卡特 ■ 威腾斯坦
■ 精锐科技 ■ 科峰智能 ■ 其他



资料来源：QY Research，华安证券研究所

图表41：2022年中国精密行星减速器市场格局

■ 日本新宝 ■ 科峰智能 ■ 纽卡特
■ 精锐科技 ■ 利茗 ■ 其他



资料来源：QY Research，华安证券研究所

3.6.5行星减速器市场空间：目标市场空间12亿元

- 根据Tesla AI Day的信息，参考Tesla Bot结构，假设单台人形机器人需要14个旋转关节：1) 假设每个关节需要1个精密减速器；2) 假设在肩部、腕部精度要求较高的部分采用谐波减速器，腰部、髋部采用精密行星减速器。根据中大力德招股说明书，并假设规模效应下减速器价格有所下降，我们假设行星减速器2025-2030年的单价由500元下降至100元。
- 根据测算，在100万台人形机器人销量的假设下，我们预计行星减速器市场规模约12亿元。

图表42：行星减速器市场空间测算

行星减速器市场空间测算	2025E	2026E	2027E	2028E	2029E	2030E
全球机器人新增需求(万台)	3	6	15	30	60	100
行星减速器需求量(万套)	36	72	180	360	720	1200
-单价(元/套)	500	450	400	300	150	100
市场空间(亿元)	2	3	7	11	11	12

资料来源：中大力德招股说明书，华安证券研究所

目录

1人形机器人行业复盘和投资方法总结

2人形机器人关键技术：运控算法

3人形机器人产业链拆解

4投资建议



5风险提示

4.投资建议

- 根据机器人应用增加、技术被头部厂商采用确定性、细分行业格局、定点确定性、公司弹性，择选出优质标的。
- 执行器总成：三花智控、拓普集团；行星滚柱丝杠：贝斯特、北特科技、双环传动；力传感器：凌云股份、柯力传感；空心杯电机：鸣志电器、伟创电气、兆威机电

图表43：主要标的机器人弹性测算

产业链环节	证券代码	公司	总市值 (亿元)	市占率假设	单价/万元	人形机器人 用量(个/ 台)	总价值量 (万元/ 台)	机器人业务营 收(亿元)	净利率	净利润 (亿元)	机器人PE	机器人市值 (亿元)	24年主业 净利润 (亿元)	主业PE	主业市值 (亿元)	主业+机器人总 市值(亿元)	弹性空间	机器人弹性
旋转/线性关节集成	002050.SZ	三花智控	738	50%	0.18	28	5.04	252	10%	25.2	30	756	35.2	20.0	704.1	1460.1	97.8%	51.8%
	601689.SH	拓普集团	699	50%	0.18	28	5.04	252	10%	25.2	30	756	28.8	20.0	575.2	1331.2	90.5%	56.8%
空心杯电机	603728.SH	鸣志电器	163	50%	0.08	12	0.96	48	15%	7.2	30	216	2.1	20.0	43.0	259.0	58.9%	83.4%
	688698.SH	伟创电气	50	10%	0.08	12	0.96	9.6	12%	1.2	30	35	2.5	20.0	50.9	85.5	71.8%	40.4%
无框力矩电机	003021.SZ	兆威机电	109	10%	0.08	12	0.96	9.6	15%	1.4	30	43	2.3	20.0	46.7	89.9	-17.3%	48.1%
	688160.SH	步科股份	31	10%	0.07	28	1.96	19.6	10%	2.0	30	59	0.9	20.0	17.5	76.3	142.7%	77.1%
谐波减速器	002979.SZ	雷赛智能	61	10%	0.07	28	1.96	19.6	10%	2.0	30	59	2.2	20.0	44.3	103.1	68.7%	57.0%
行星减速器	688017.SH	绿的谐波	128	50%	0.08	14	1.12	56	10%	5.6	30	168	1.2	20.0	25.0	193.0	50.9%	87.1%
丝杠	002896.SZ	中大力德	40	30%	0.05	10	0.50	15	10%	1.5	30	45	1.0	20.0	19.2	64.2	58.4%	70.1%
	603667.SH	五洲新春	55	20%	0.05	14	0.63	12.6	10%	1.3	30	38	1.9	20.0	38.9	76.7	39.1%	49.3%
力传感器	603009.SH	北特科技	60	20%	0.05	14	0.63	12.6	10%	1.3	30	38	0.7	20.0	14.2	52.0	-13.8%	72.7%
	002472.SZ	双环传动	184	20%	0.08	10	0.80	16	10%	1.6	30	48	10.2	20.0	204.7	252.7	37.3%	19.0%
IMU	300580.SZ	贝斯特	73	20%	0.10	14	1.40	28	10%	2.8	30	84	3.4	20.0	68.6	152.6	108.8%	55.1%
	301550.SZ	斯菱股份	49	10%	0.10	14	1.40	14	10%	1.4	30	42	2.1	20.0	42.3	84.3	70.8%	49.9%
力传感器	603662.SH	柯力传感	65	10%	0.05	28	1.40	14	10%	1.4	30	42	3.7	20.0	73.3	115.3	77.5%	36.4%
	600480.SH	凌云股份	93	10%	0.05	28	1.40	14	10%	1.4	30	42	7.5	20.0	150.9	192.9	107.4%	21.8%
IMU	689009.SH	九号公司	267	10%	0.05	28	1.40	14	10%	1.4	30	42	7.8	20.0	156.5	198.5	-25.8%	21.2%
	688071.SH	华依科技	17	10%	0.02	28	0.56	5.6	10%	0.6	30	17	0.9	20.0	18.5	35.3	106.4%	47.6%

资料来源：Wind，华安证券研究所

注：以上测算基于人形机器人出货量为100万台的假设进行测算，总市值为2024年7月11日的市值，24年主业利润为wind一致预期

目录

1人形机器人行业复盘和投资方法总结

2人形机器人关键技术：运控算法

3人形机器人产业链拆解

4投资建议

5风险提示



5. 风险提示

- **产业政策不及预期：**人形机器人产业发展尚处于早期，政策扶持起到重要作用。如果后续政策支持力度不及预期，则可能导致行业发展迟滞。
- **技术创新不及预期：**技术研发创新是行业不断发展壮大的基础，如果人工智能技术、运控水平、零部件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。
- **人形机器人渗透率不及预期：**人形机器人行业发展尚处于早期，技术方案仍未完全确定。除产品性能外限制机器人商业化的核心原因仍然是成本问题，若技术方案达不到降本增效的预期，或影响人形机器人的渗透率。
- **相关零部件无法大规模量产：**部分核心零部件生产需要用到海外高端工艺设备。受制于国际关系的影响，相关设备可能面临无法买入或延期交货的风险，导致核心零部件无法大规模量产。
- **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。



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！