

行业报告：机器人

2024年9月20日



中航证券有限公司

AVIC SECURITIES CO., LTD.

## 人形机器人：黎明破晓，AI 归宿

行业评级：增持

分析师：邹润芳  
证券执业证书号：S0640521040001

分析师：闫智  
证券执业证书号：S0640524070001

分析师：卢正羽  
证券执业证书号：S0640521060001

- **人形机器人：行则将至，量产可期。**人形机器人是AI技术落地物理世界的优质载体，近两年通用大模型的发展赋予人形机器人强大的泛化能力，产业进入商业化落地的初级阶段，特斯拉、Open AI、英伟达、三星等科技巨头纷纷入局抢占行业高地。以特斯拉为例，马斯克于2021年提出人形机器人概念机Tesla Bot，2022年推出原型机Optimus，2023年12月推出Optimus-Gen2，相比一代进化显著，感知、大脑、运控能力明显提升。伴随特斯拉Optimus落地，2025年人形机器人将步入量产元年，其应用场景有望经历“汽车工厂应用—制造业开始全面渗透铺开—成熟后走进千家万户”三个阶段。据我们测算，至2030年全球人形机器人需求有望达200万台，对应市场空间超5700亿元。
- **执行系统：灵活关节，丝杠、电机、减速器是关键。**硬件决定人形机器人的运动灵活程度，特斯拉Optimus关节由40个执行器组成，核心零部件包括丝杠、电机、减速器，旋转关节、直线关节、灵巧手合计成本占比超过50%，降本诉求下国内产业链更具优势。1) 丝杠：用于直线关节，主要种类包括梯形丝杠和滚柱丝杠，常见的加工工艺包括车削、铣削、磨削，其中磨床是粗加工和精加工环节的重要设备；目前成本占比23.4%，降本需求最为迫切。2) 电机：无框力矩电机用于旋转关节和直线关节，空心杯电机/无刷有齿槽电机用于灵巧手，电机合计成本占比约8.9%。3) 减速器：用于旋转关节，谐波减速器为当前主流方案，部分精度要求较低的关节也可用行星减速器，目前成本占比约4.1%。
- **感知系统：交互之媒，多传感器综合赋能。**传感器是将机器人对内外部环境感知的物理量变换为电量输出的装置，可分为内部传感器和外部传感器，人形机器人核心的传感器包括力矩传感器、视觉传感器、触觉传感器，目前传感器成本占比约24.7%。1) 力矩传感器：旋转关节和直线关节应用扭矩传感器，手腕、脚腕可使用六维力矩传感器增加柔顺控制能力。六维力/力矩传感器成本及制造难度远高于单维力矩传感器，早期应用场景以航天领域的空间机械臂为主。2) 视觉传感器：特斯拉Optimus采用纯视觉方案，小米、宇树等大多使用多传感器融合方案。3) 触觉传感器：特斯拉Optimus-Gen2手部搭配触觉传感器，是相比上一代最大的边际变化之一，有望引领行业新趋势。
- **控制系统：智能“小脑”，核心算法自研为主。**运动控制是指对机械运动部件的位置、速度、方向等进行实时控制，使其按照预期的运动轨迹和规定的运动参数进行运动。一般控制器需要根据机器人的任务场景与需求具体设计开发，需要满足低功耗、高算力、高集成度等要求，目前各家人形机器人场景应用多样，且算力需求存在差异，因此控制器以自研为主。
- **投资建议：**人形机器人产业趋势明确，目前产业进入从0到1的重要突破阶段，2024年是突破量产的关键一年，后续应重视技术迭代、定点、新品发布等事件催化，我们建议重点关注以下投资方向：1) Tier 1：三花智控、拓普集团；2) 丝杠：北特科技、贝斯特、五洲新春；3) 传感器：柯力传感、东华测试、汉威科技；4) 减速器：绿的谐波、中大力德、双环传动；5) 电机：鸣志电器、步科股份；6) 国内整机：博实股份。
- **风险提示：**AI技术迭代不及预期、人形机器人量产进度不及预期、国产替代不及预期、宏观经济波动等。

## 1. 人形机器人：行则将至，量产可期

### 2. 人形机器人拆解及产业链总览

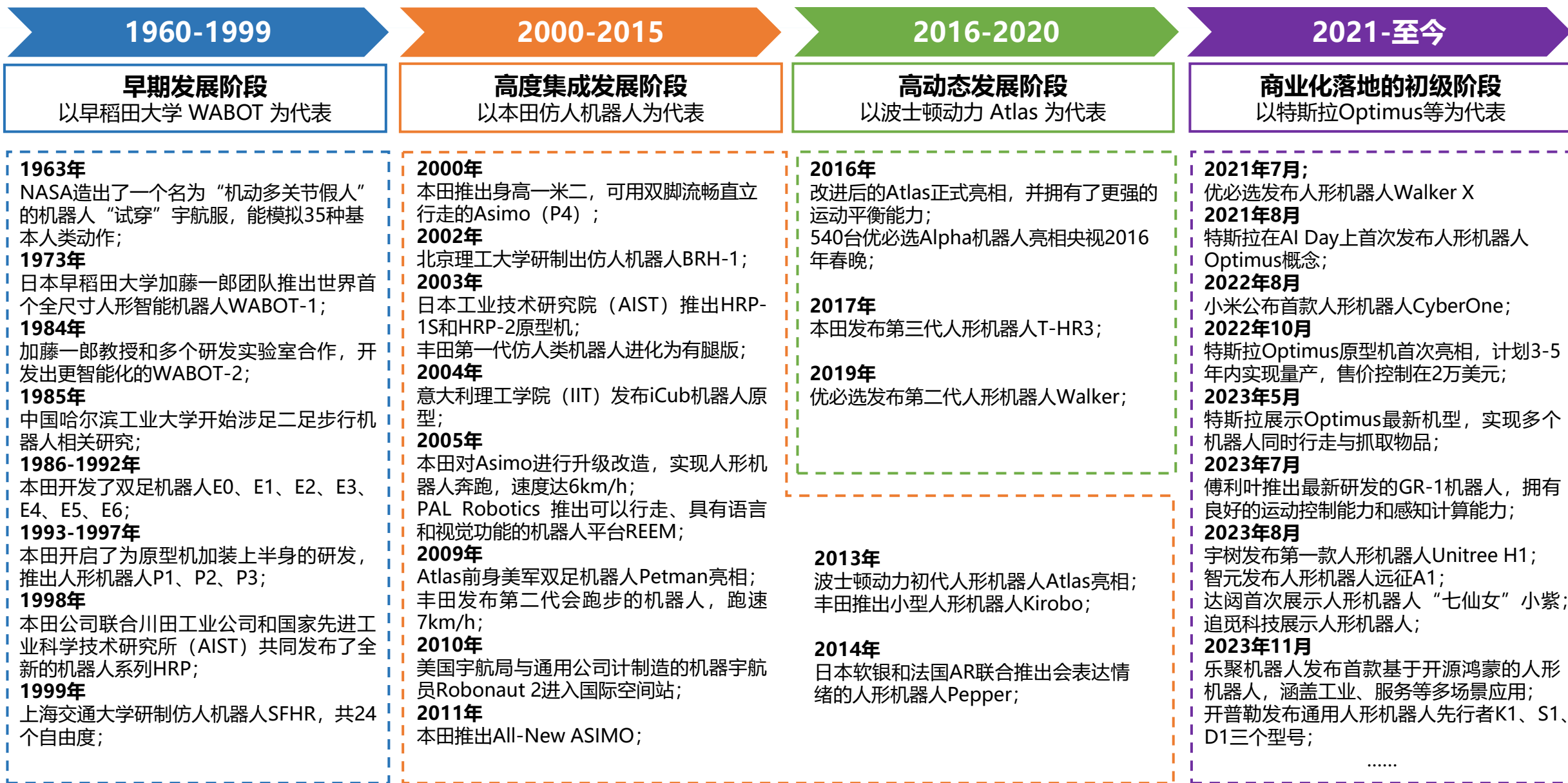
### 3. 执行系统：灵活关节，丝杠、电机、减速器是关键

### 4. 感知系统：交互之媒，多传感器综合赋能

### 5. 控制系统：智能“小脑”，核心算法自研为主

### 6. 投资建议

# 1.1 人形机器人发展历程：当梦想照进现实，商业化行则将至



# 1.1 人形机器人天然适应人类生活场景，成本与技术为制约其量产的主要因素

- **为什么机器人要做成人形？** 1) 现实世界的工作、生活场景多数是为人类专门设计的，人形机器人可以很好地适应场景而无需改变现有设施。2) 因为具备人的形状，人形机器人在人机交互过程中更容易被人接受，更具有情感价值。
- **为什么人形机器人还未大规模商业化？** 人形机器人有着几十年的发展历程，在特斯拉 Optimus 受到广泛关注之前，日本本田和美国波士顿都有人形机器人推出，但没有商业化量产，原因在于：**1) 成本居高不下：**波士顿动力 Atlas 与本田 Asimo 的成本均达到了百万美元以上；**2) 技术难点尚未完全攻克：**如软件端不能适应复杂应用场景、交互能力差、运控平衡能力有待提升，硬件端续航能力不足、执行器的精度和功率密度/力矩密度仍需提升。

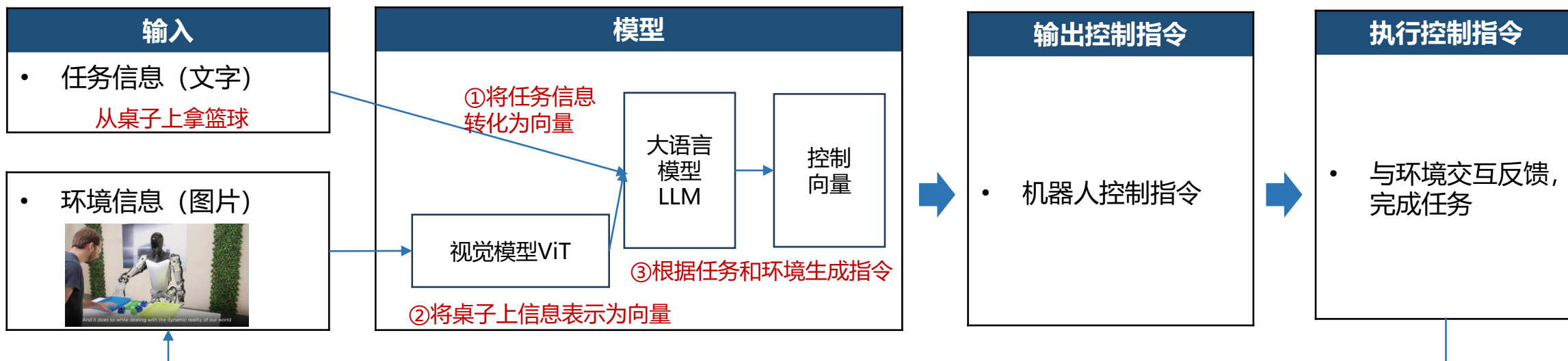
图表：本田 Asimo 和波士顿动力 Atlas 受限于成本与软硬件等功能尚未大规模商业化

	本田 第三代 ASIMO	波士顿动力 Atlas
产品示意图		
发布时间	2011年	2016年
体重	48kg	80kg
身高	130cm	150cm
步行速度	9km/h	5.4km/h
续航时间	40min (步行)	90min
全身自由度	共57个DOF 头3+腕14+手24+腰2+腿12	共28个DOF 臂12+颈2+腰2+腿12
腿部自由度	单腿6个DOF 髌3+膝1+踝2	单腿6个DOF 髌3+膝1+踝2
双手	有十指	无十指
负载	1kg	约20.41kg
商业化情况	目前暂无商业化对象，出席会展/表演等	目前暂无商业化对象
售价	没有进行大规模商业化，只租不卖，租用一天约200万日元 (约合12万人民币)	200万美元

## 1.2 多模态大模型赋予机器人泛化能力，具身智能曙光初现

- 通用大模型为具身智能带来革命性潜力。** 人形机器人的硬件决定运动的灵活程度，零部件多为其他行业的应用迁移，成本痛点可通过产业链规模生产解决；而软件算法充当机器人的“大脑”，决定机器人的应用上限，是机器人商业化拓展的主要瓶颈。此前，机器人依赖固有的程序设定执行任务，难有在各类场景通用的算法，机器人的落地应用受限。近年来LLM、VLM、VNM等通用大模型的发展赋予了机器人本体强大的泛化能力，机器人可以适用于更多复杂场景、非专业人员不需编程即可实现操作，人形机器人商业化进程提速。“具身智能”的机器人不再是机械式地完成单一任务，而是能够基于感知到的任务和环境进行自主规划、决策、行动、执行的新个体，语言交互、智能决策、自主学习、多模态感知等能力全面提升。

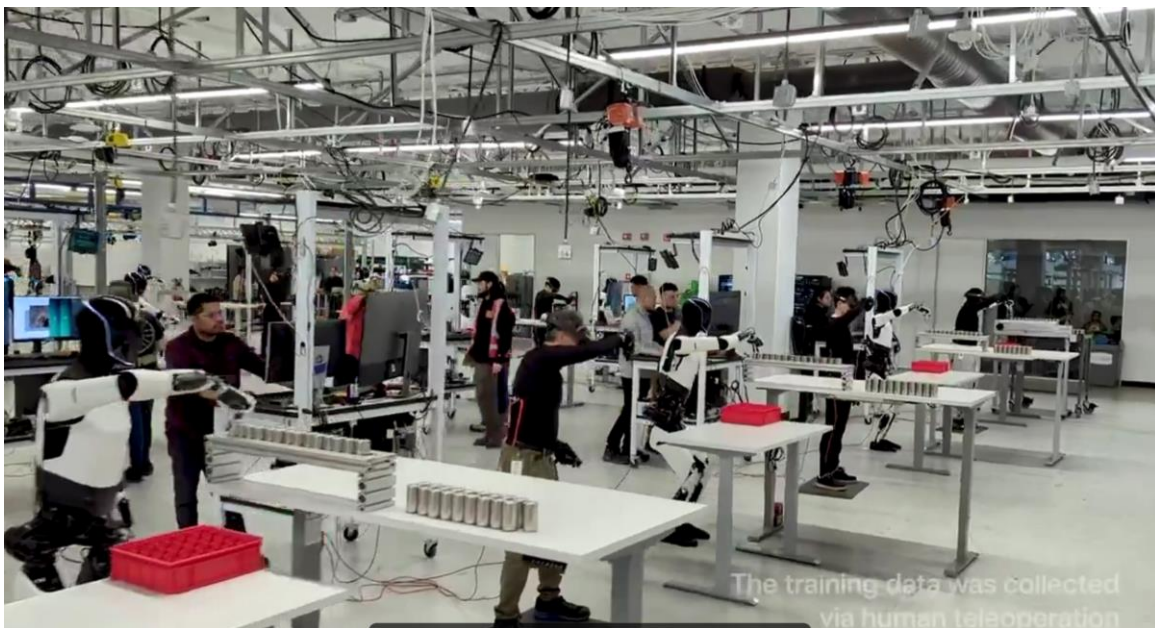
图表：多模态大模型加速机器人智能迭代



## 1.3 特斯拉引领，科技巨头加速入局推动产业革新

- **科技巨头加速入局推动产业革新。** 1) **特斯拉**：2022年9月30日特斯拉推出人形机器人Optimus原型机，2023年马斯克表示特斯拉的长期价值将来自AI和机器人； 2) **OpenAI**：2023年3月，OpenAI投资挪威人形机器人公司1X Technologies；2024年5月，OpenAI称已重启机器人团队两个月； 3) **三星**：2023年1月，三星向韩国机器人厂商Rainbow Robotics投资590亿韩元； 4) **英伟达**：2023年5月，黄仁勋表示，人工智能的下一个浪潮将是具身智能；2024年2月，英伟达成立通用具身智能体研究部门；2024年3月，英伟达发布人形机器人模型Project GR00T；2024年6月，黄仁勋强调“下一波AI的浪潮是物理AI，机器人时代已经到来”； 5) **Figure AI**：2022年成立，2024年2月获英伟达、微软、OpenAI、英特尔等科技公司共计6.75亿美元的投资。

图表：特斯拉机器人泛化能力显著提升



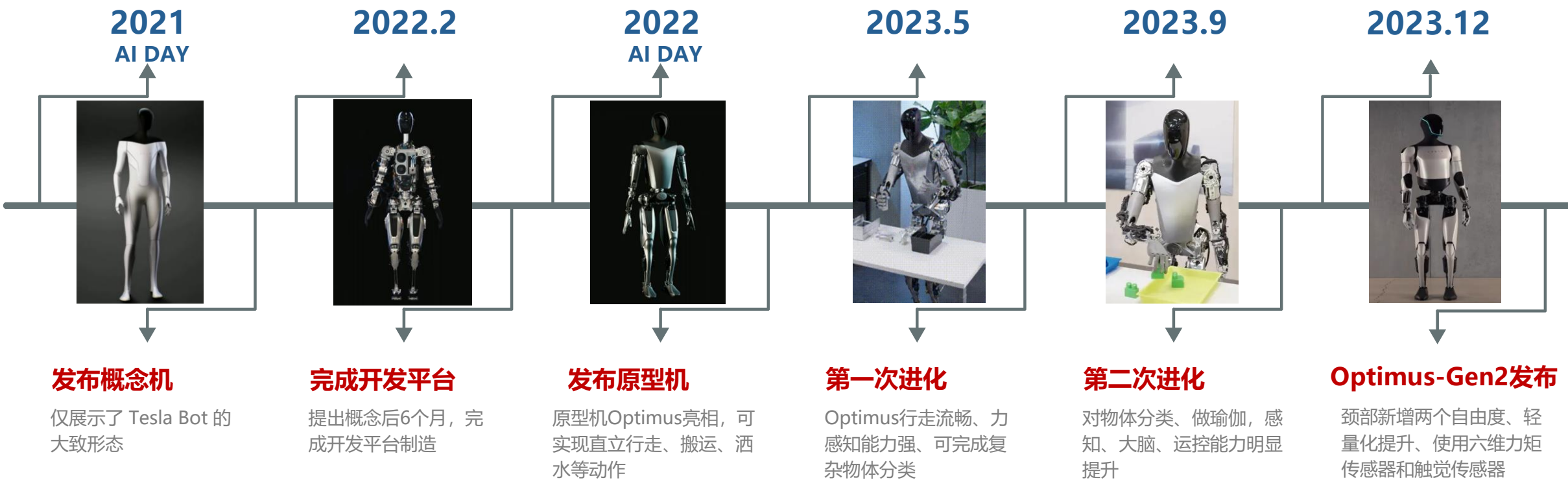
图表：英伟达GR00T项目可与多款人形机器人集成



# 1.3 特斯拉Optimus进展超预期，行业开启新一轮“军备竞赛”

■ **特斯拉Optimus快速迭代，引领新一轮科技革命浪潮。** 马斯克在2021年AI DAY上提出人形机器人概念机Tesla Bot，随后开始快速发展迭代，2022年2月搭建完成开发平台，2022年10月在AI DAY上正式推出原型机Optimus，此时可实现行走、搬运、洒水等简单动作，2023年12月推出Optimus-Gen2，相比一代显著进化，感知、大脑、运控能力明显提升。**特斯拉人形机器人可形成完整的产业闭环，商业化落地值得期待：**Optimus复用自动驾驶相关技术，快速实现了从概念机到智能灵活机器人的进化，特斯拉汽车的工厂生产和门店销售也为人形机器人提供了商业化落地的初步场景，产业链优势为降本提供了可能，远期量产价格目标为2万美元/台。

图表：特斯拉Optimus快速迭代升级，感知、学习、运控能力明显提升








# 1.3 特斯拉Optimus进展超预期，行业开启新一轮“军备竞赛”



图表：近两年主要人形机器人产品对比

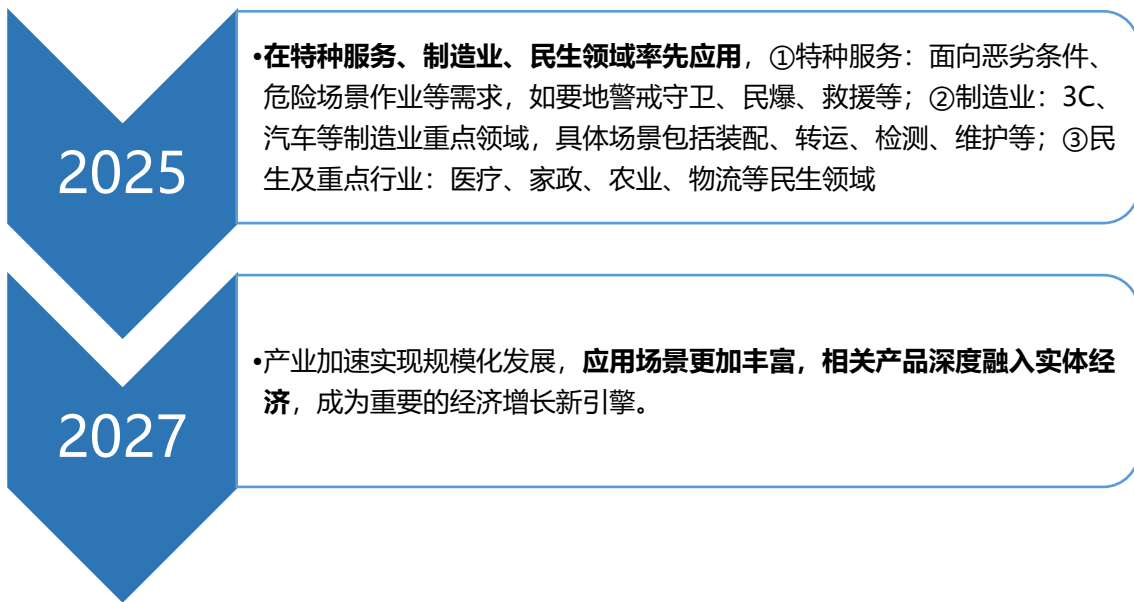
公司产品名	特斯拉 Optimus	优必选 WalkerX	小米 CyberOne	傅利叶 GR-1	智元 远征A1	宇树 Unitree H1	开普勒 先行者K1
产品示意图							
发布时间	2021年8月19日	2021年7月7日	2022年8月11日	2023年7月6日	2023年8月18日	2023年8月15日	2023年11月17日
体重	56.7kg	63kg	52kg	55kg	55kg	47kg	85kg
身高	173cm	130cm	177cm	165cm	175cm	180cm	178cm
步行速度	8km/h	3km/h	3.6km/h	5km/h	7km/h	1.5m/s	/
全身自由度	共40个DOF 臂12+颈2+腰2+腿12+手12	共41个DOF 臂12+颈3+腿14+手12	共21个DOF 臂10+颈1+腿10	共40个DOF	共49个DOF 其中手12	共19个DOF 手8+腰1+腿10	共40个DOF, 其中手12
腿部自由度	单腿6个DOF 髌3+膝1+踝2	单腿6个DOF 髌3+膝1+踝2	单腿5个DOF 髌3+膝1+踝1	/	/	单腿5个DOF 髌3+膝1+踝1	/
双手	有十指	有十指	无十指	无十指	有十指	灵巧手选配	有十指
负载	硬拉68kg 扛重20.41kg	伸展状态单臂1.5kg 双手3kg	1.5kg	50kg	整机承重80kg, 单臂最大负载5kg	/	/
商业化情况	对外出售	目前无商业化对象, 暂时出席会展/表演等	/	预计2024-2025年量产交付	目前无商业化对象, 暂时出席会展/表演等	预计2023年四季度量产交付	对外出售
售价	预计售价2万美元 (约合14万人民币) 明年投入工厂测试, 3-5年内实现量产	/	/	/	目标成本20万元以内	预计售价低于9万美元 (约合65万人民币)	预计2024年对外发售, 预计售价2-3万美元 (约合14-21万人民币)

资料来源：各公司官网及微信公众号、人形机器人大讲坛公众号、中国机器人网、中航证券研究所

## 1.4 人形机器人将在工厂率先落地，未来将应用于商业服务、家庭陪伴

- **人形机器人将逐渐从工厂走向家庭，从to B走向 to C。**从主流机器人厂商的战略规划来看，人形机器人将率先应用于工业制造领域，积累成熟后将拓展至商用服务、家庭陪伴等场景。这主要是因为工厂制造场景相对简单、机器替人需求更加迫切，而商业和家庭场景复杂，对人形机器人的软硬件要求高。
- **《人形机器人创新发展指导意见》指明特种服务、制造业、民生三大示范场景，擘画2027深度融合实体经济。**我国人形机器人应用分两步走：第一阶段目标为2025年在特种服务、制造业、民生领域率先应用；第二阶段目标是，至2027年产业加速实现规模化发展，应用场景更加丰富，相关产品深度融入实体经济，成为重要的经济增长新引擎，人形机器人深入生活未来可期。

图表：《人形机器人创新发展指导意见》提出我国人形机器人两阶段应用目标



图表：优必选人形机器人制造业应用规划



## 1.5 2025年为量产元年，至2030年全球累计需求量有望达200万台

- **2030年人形机器人累计需求有望达200万台，对应市场空间约5700亿元。** 伴随特斯拉Optimus落地，2025年人形机器人将步入量产元年，其应用场景有望经历“特斯拉引领在特定领域工厂应用—制造业开始全面渗透铺开—成熟后走进千家万户”三个阶段。我们对人形机器人销量进行预测，考虑到人形机器人前期供应以特斯拉等头部厂商为主、随后在制造业渗透应用，基于此，我们做出如下核心假设和测算逻辑：**1) 第一阶段 (2025-2027年)**：以特斯拉等工厂应用为核心，假设①特斯拉工厂工人数量每年增长15%；②人形机器人在其工厂中的渗透率分别为5%、20%、50%；③特斯拉工厂人形机器人在全球的市占率分别为90%、75%、55%；**2) 第二阶段 (2028-2030年)**：①据UNIDO数据，2015-2021年全球制造业人数年均降低0.075%，假设2024-2030年仍保持这一速度降低；②参考新能源车渗透率提升速度，假设2028-2030年全球制造业人形机器人渗透率分别为0.07%、0.19%、0.45%。**3) 单价**：成本将随规模效应逐渐降低，根据优必选、宇树、小米等厂商价格，我们估计2023年人形机器人单价约80万元，随后每年以15%的幅度递减。根据以上假设，我们预计2030年人形机器人新增需求量有望达114万台，对应新增市场空间约3000亿元。

图表：至2030年全球人形机器人累计需求量有望达约200万台

	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
<b>第一阶段：2025-2027，以特斯拉工厂应用为测算基础</b>	特斯拉工厂工人数量预计 (人)	76000	87400	100510	115587	132924		
	特斯拉工厂人形机器人渗透率 (人机比)			5%	20%	50%		
	特斯拉工厂人形机器人市占率			90%	75%	55%		
<b>第二阶段：2028-2030，在全球制造业范围内渗透</b>	全球制造业人数预计 (亿人)	4.42	4.41	4.41	4.41	4.40	4.40	4.39
	全球制造业人形机器人渗透率				0.01%	0.02%	0.07%	0.19%
人形机器人需求量 (万台)	0.005	0.008	0.57	2.98	10.86	30.80	83.54	197.71
人形机器人新增需求量 (万台)		0.003	0.56	2.41	7.88	19.94	52.74	114.17
单价 (万元)	80	68	58	49	42	35	30	26
人形机器人累计市场规模 (亿元)	0.40	0.60	32.88	151.39	480.50	1188.35	2779.60	5707.61
人形机器人新增市场规模 (亿元)		0.20	32.27	118.51	329.11	707.85	1591.24	2928.01

## 1.6 政策持续发力，剑指2025年量产、2027年深度应用

- **人形机器人国家顶层方案出台，更多落地政策值得期待。** 2023年9月，工信部组织的2023未来产业创新任务揭榜挂帅工作中对人形机器人的核心基础、重点产品、公共支撑、示范应用等方面提出了发展任务和目标。2023年11月，工业和信息化部印发《人形机器人创新发展指导意见》，提出人形机器人有望成为继计算机、智能手机、新能源汽车后的颠覆性产品，并明确2025年实现批量生产、2027年相关产品深度融入实体经济，成为重要的经济增长新引擎；指导意见是国家层面首个仅针对人形机器人政策方案，后续更多地方和产业政策值得期待。

**图表：《人形机器人创新发展指导意见》明确提出2025年量产、2027年深度应用的发展目标**

政策名称	发布时间	主要目标/内容
《人形机器人创新发展指导意见》	2023.10	到2025年，我国人形机器人创新体系初步建立，“大脑、小脑、肢体”等一批关键技术取得突破，确保核心部件安全有效供给。整机产品达到国际先进水平，并实现批量生产，在特种、制造、民生服务等场景得到示范应用，探索形成有效的治理机制和手段。到2027年，人形机器人技术创新能力显著提升形成安全可靠的产业链供应链体系，构建具有国际竞争力的产业生态，综合实力达到世界先进水平。产业加速实现规模化发展，应用场景更加丰富，相关产品深度融入实体经济，成为重要的经济增长新引擎。
《上海市促进智能机器人产业高质量创新发展行动方案(2023-2025年)》	2023.10	到2025年，明确一个总体目标，即打造具有全球影响力的机器人产业创新高地；促进三个突破，在品牌、应用场景和产业规模方面实现“十百千”突破——打造10家行业一流的机器人头部品牌、100个标杆示范的机器人应用场景、1000亿元机器人关联产业规模；建设三个公共服务平台，智能机器人检测与中试验证创新中心、人形机器人制造业创新中心、通用机器人产业研究院等；推动制造业重点产业工业机器人密度达500台/万人，机器人行业应用深度和广度显著提升。
《2023年未来产业创新任务揭榜挂帅工作》	2023.9	面向元宇宙、人形机器人、脑机接口、通用人工智能4个重点方向，聚焦核心基础、重点产品、公共支撑、示范应用等创新任务，发掘培育一批掌握关键核心技术、具备较强创新能力的优势单位，突破一批标志性技术产品，加速新技术、新产品落地应用。（以2025年为目标）
《北京市促进机器人产业创新发展的若干措施》	2023.8	加快机器人技术体系创新突破、推动机器人产业集聚发展、加快“机器人+”场景创新应用、强化机器人产业创新要素保障
《北京市机器人产业创新发展行动方案(2023-2025年)》	2023.6	到2025年，本市机器人产业创新能力大幅提升，培育100种高技术高附加值机器人产品、100种具有全国推广价值的应用场景，万人机器人拥有量达到世界领先水平，形成创新要素集聚、创新创业活跃的发展生态。全市机器人核心产业收入达到300亿元以上，打造国内领先、国际先进的机器人产业集群。
《深圳市加快推动人工智能高质量发展高水平应用行动方案(2023—2024年)》	2023.5	聚焦通用大模型、智能算力芯片、智能传感器、智能机器人、智能网联汽车等领域，实施人工智能科技重大专项扶持计划，重点支持打造基于国内外芯片和算法的开源通用大模型；支持重点企业持续研发和迭代商用通用大模型；开展通用型具身智能机器人的研发和应用。实施核心技术攻关载体扶持计划，支持科研机构与企业共建5家以上人工智能联合实验室，加快组建广东省人形机器人制造业创新中心。
《“机器人+”应用行动实施方案》	2023.1	到2025年，制造业机器人密度较2020年实现翻番，服务机器人、特种机器人行业应用深度和广度显著提升，机器人促进经济社会高质量发展的能力明显增强。聚焦10大应用重点领域，突破100种以上机器人创新应用技术及解决方案，推广200个以上具有较高技术水平、创新应用模式和显著应用成效的机器人典型应用场景。

1. 人形机器人：行则将至，量产可期

## 2. 人形机器人拆解及产业链总览

3. 执行系统：灵活关节，丝杠、电机、减速器是关键

4. 感知系统：交互之媒，多传感器综合赋能

5. 控制系统：智能“小脑”，核心算法自研为主

6. 投资建议

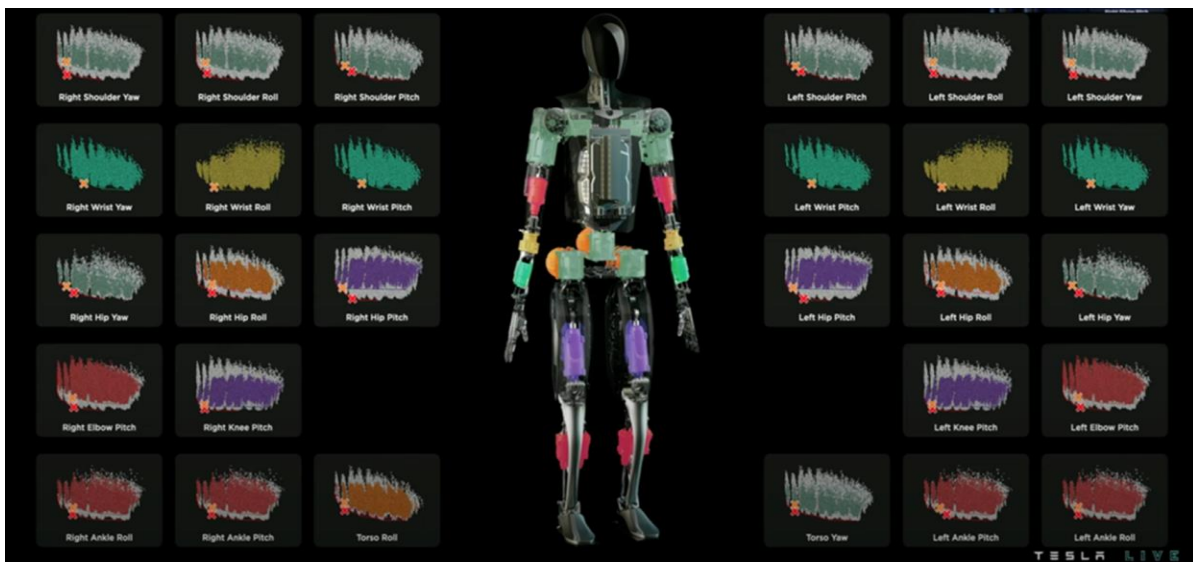
## 2.1 特斯拉人形机器人拆解：14个旋转关节+14个直线关节+12个手部关节

- 根据特斯拉AI Day示意图，特斯拉机器人包括40个自由度，其中有14个旋转关节、14个线性关节、12个手部关节。
- **旋转关节**：执行器分为三类，扭矩/质量分别为20Nm/0.55kg、110Nm/1.62kg、180Nm/2.26kg；具体应用部位包括肩部、大臂、小臂、腰部；
- **线性关节**：执行器分为三类，出力/重量分别为500N/0.36kg、3900N/0.93kg、8000N/2.20kg；具体应用部分包括大臂、小臂、大腿、小腿。
- **手部关节**：单只手由6个执行器构成，其中大拇指对应2个执行器，其余每个手指对应1个执行器。

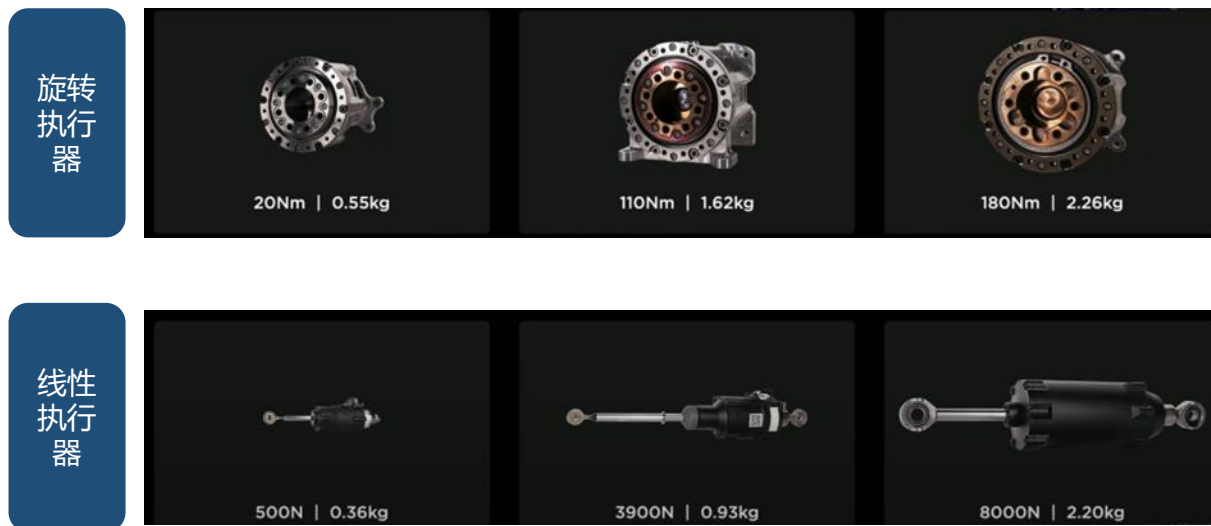
图表：特斯拉人形机器人包括14个旋转关节、14个直线关节、12个手部关节

自由度	旋转关节	手部关节	直线关节
灵巧手 6 (*2)		6 (*2)	
手臂 7 (*2)	肩部	3 (*2)	
	大臂	1 (*2)	1 (*2)
	小臂		2 (*2)
腰部 2	2		
腿部 6 (*2)	髌部	2 (*2)	
	大腿		2 (*2)
	小腿		2 (*2)
合计	14	12	14
		40	

图表：特斯拉人形机器人线性关节与旋转关节分布示意图



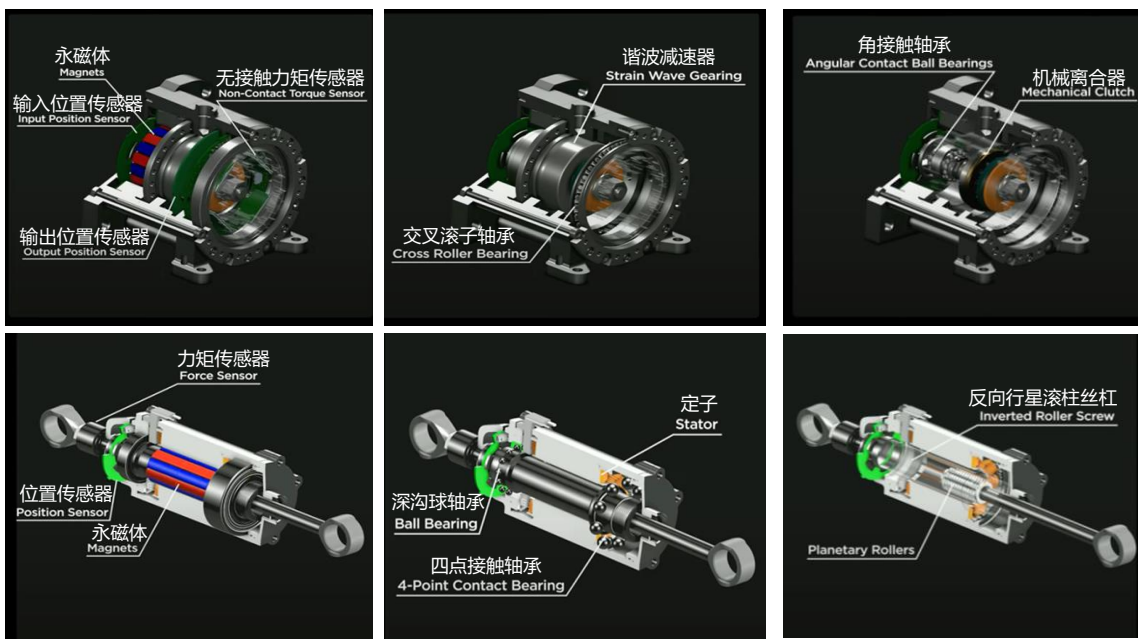
图表：特斯拉人形机器人执行器分为旋转执行器（3小类）和线性执行器（3小类）



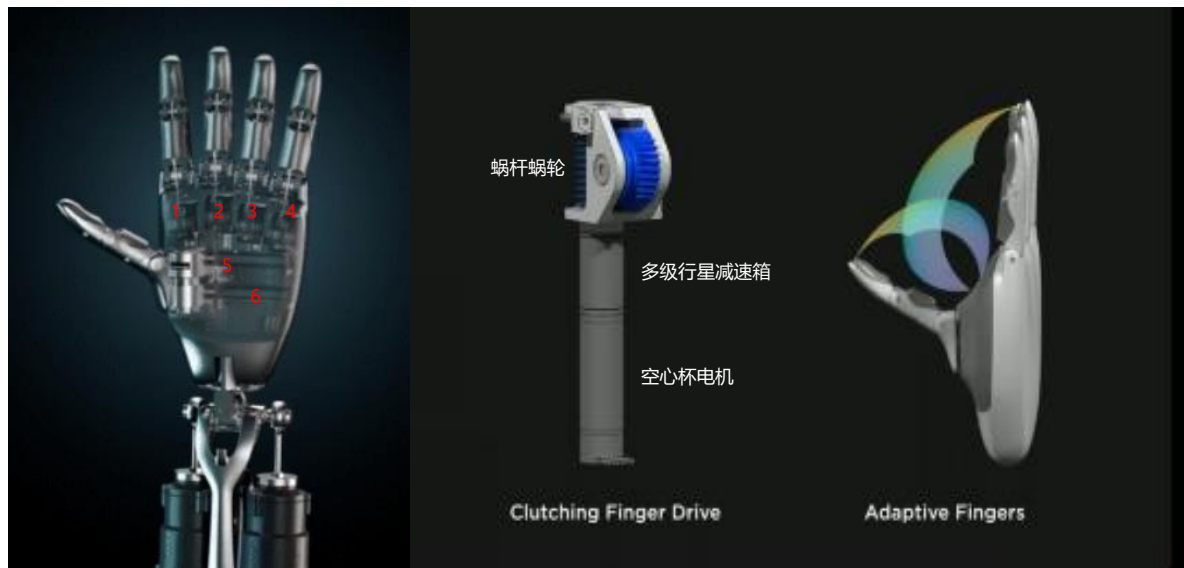
## 2.1 特斯拉人形机器人拆解：旋转关节、直线关节、手部关节拆解

- 旋转关节：**主要由“驱动器+力矩传感器+编码器+无框力矩电机+谐波减速器+轴承+机械离合器”组成，与协作机器人关节模块类似，通过输入传感器传输数据到驱动器，进而控制电机，并由谐波减速器放大输出力矩，输出传感器再作位置反馈、优化算法。
- 直线关节：**主要由“驱动器+力矩传感器+编码器+无框力矩电机+丝杠+轴承”组成，通过驱动器带动无框力矩电机旋转，再由减速元件丝杠将旋转运动转化为直线运动。
- 手部关节：**主要由“驱动器+编码器+传感器+空心杯电机+行星减速箱+蜗杆蜗轮”组成，具备自适应能力和非可逆驱动能力，可承重20磅、使用工具、精确抓取零件。

图表：特斯拉人形机器人旋转、直线执行器示意图

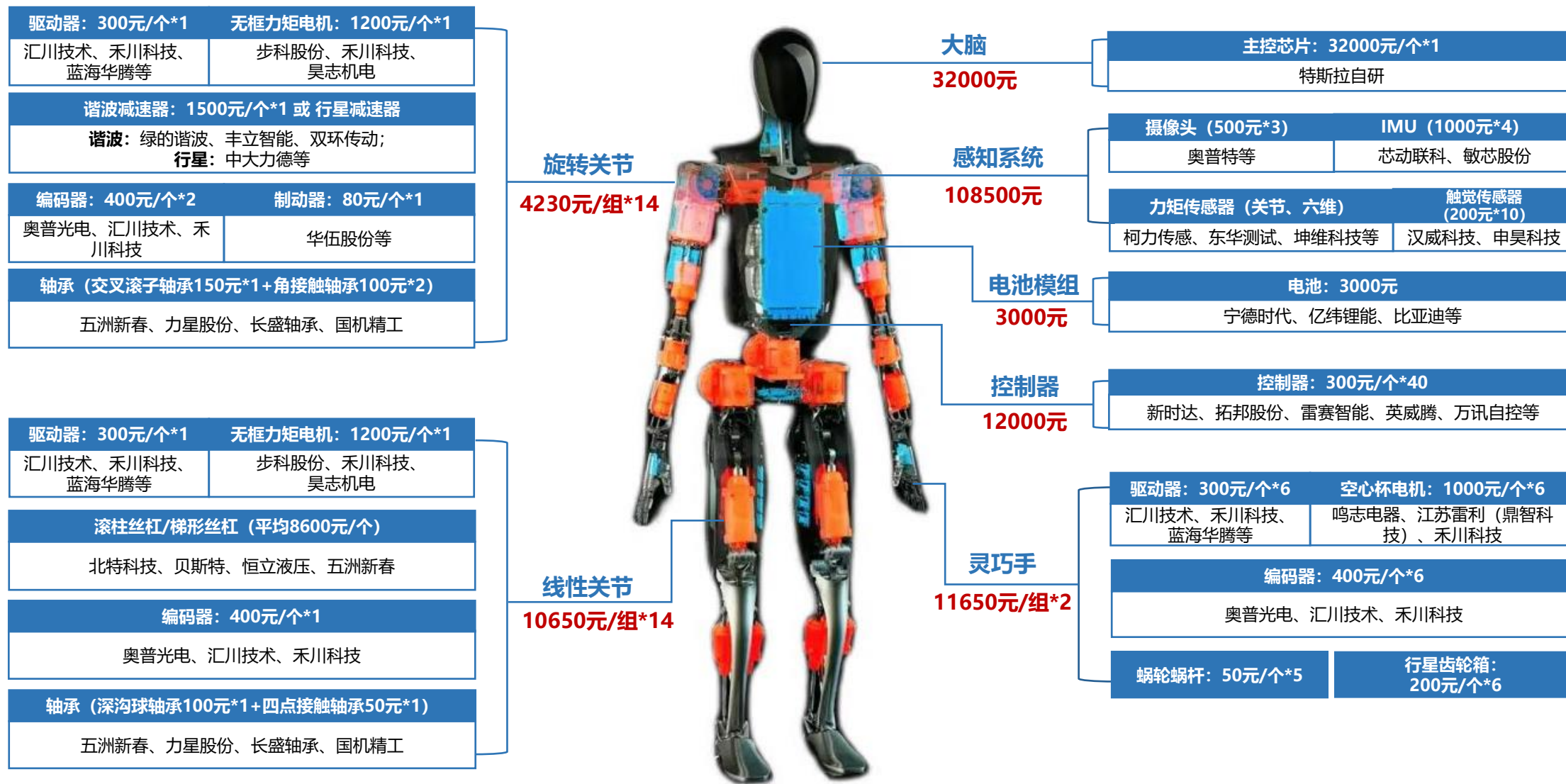


图表：特斯拉人形机器人手部关节示意图



## 2.2 人形机器人单机成本预估及潜在供应商概览 (以Tesla Bot及国内相关零件为例)

图表：人形机器人成本拆解及潜在供应商概览 (以Tesla Bot为例)





## 2.2 特斯拉人形机器人BOM成本预估 (以国内零件价格为例)

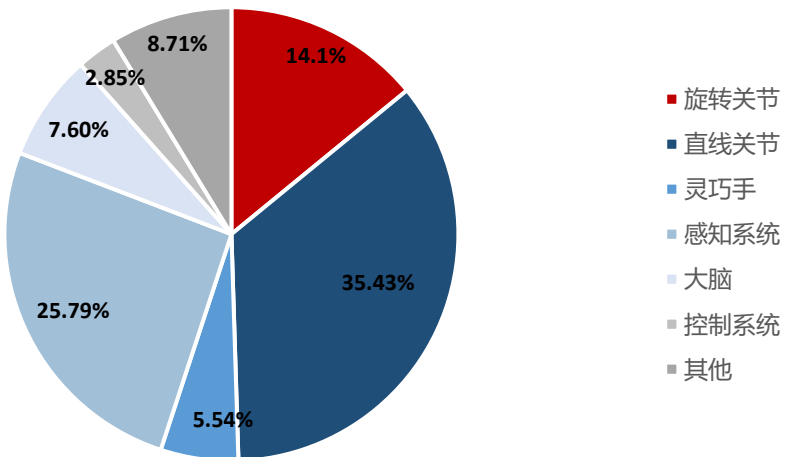
图表：特斯拉人形机器人BOM成本预估 (以国产对应零件为例)

机器人关节/结构分类		现阶段成本				终局成本				
		数量	单价	单机价值量	成本占比	数量	单价	单机价值量	成本占比	
关节	旋转关节*14	驱动器	1	300	4200	1.0%	1	100	1400	1.0%
		无框力矩电机	1	1200	16800	4.0%	1	500	7000	4.9%
		谐波减速器	1	1500	21000	5.0%	1	600	8400	5.9%
		编码器 (位置传感器)	2	400	11200	2.7%	2	200	5600	4.0%
		机械离合器	1	80	1120	0.3%	1	50	700	0.5%
		交叉滚子轴承	1	150	2100	0.5%	1	100	1400	1.0%
		角接触轴承	2	100	2800	0.7%	2	50	1400	1.0%
		14个旋转关节合计		4230	59220	14.1%		1850	25900	18.3%
	直线关节*14	驱动器	1	300	4200	1.0%	1	100	1400	1.0%
		无框力矩电机	1	1200	16800	4.0%	1	500	7000	4.9%
		行星滚柱丝杠/梯形丝杠	1	8600	120400	28.6%	1	1500	21000	14.8%
		编码器 (位置传感器)	1	400	5600	1.3%	1	200	2800	2.0%
		深沟球轴承	1	100	1400	0.3%	1	50	700	0.5%
		四点接触轴承	1	50	700	0.2%	1	30	420	0.3%
		14个直线关节合计		10650	149100	35.4%		2380	33320	23.5%
	灵巧手*2	驱动器	6	300	3600	0.9%	6	100	8400	5.9%
		空心杯电机/无刷有齿槽电机	6	1000	12000	2.9%	11	300	6600	4.7%
		行星齿轮箱	6	200	2400	0.6%	6	100	1200	0.8%
		编码器 (位置传感器)	6	400	4800	1.1%	6	200	2400	1.7%
		蜗轮蜗杆	5	50	500	0.1%	5	20	200	0.1%
		2个手部关节合计		11650	23300	5.5%		9400	18800	13.3%
关节部分合计				231620	55.0%			78020	55.1%	
能源动力	电池模组	1	3000	3000	0.7%	1	2500	2500	1.8%	
感知系统	摄像头	3	500	1500	0.4%	3	300	900	0.6%	
	IMU	4	1000	4000	1.0%	4	600	2400	1.7%	
	关节力矩传感器	28	750	21000	5.0%	28	300	8400	5.9%	
	六维力矩传感器	4	20000	80000	19.0%	4	3000	12000	8.5%	
	触觉传感器	10	200	2000	0.5%	10	100	1000	0.7%	
	感知系统合计			108500	25.8%			23700	16.7%	
控制系统	控制器	40	300	12000	2.9%	40	150	6000	4.2%	
大脑	FSD	1	32000	32000	7.6%	1	15000	18000	12.7%	
其他				33663	8.0%			13465	9.5%	
成本合计				420782.6				141685		

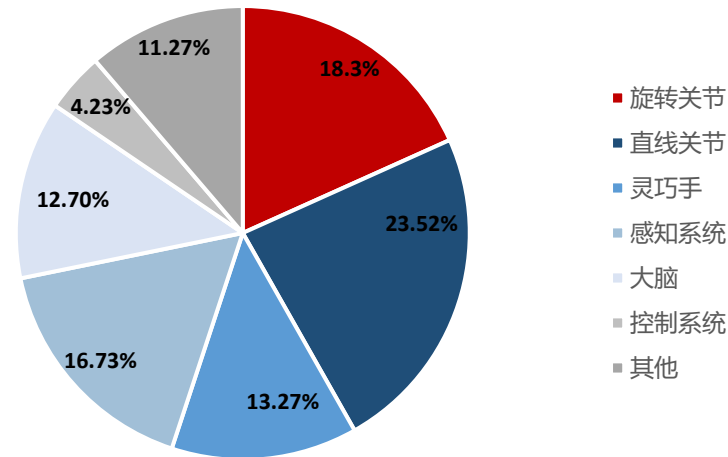
## 2.2 特斯拉人形机器人各环节/零部件成本占比预估（以国内零件价格为例）



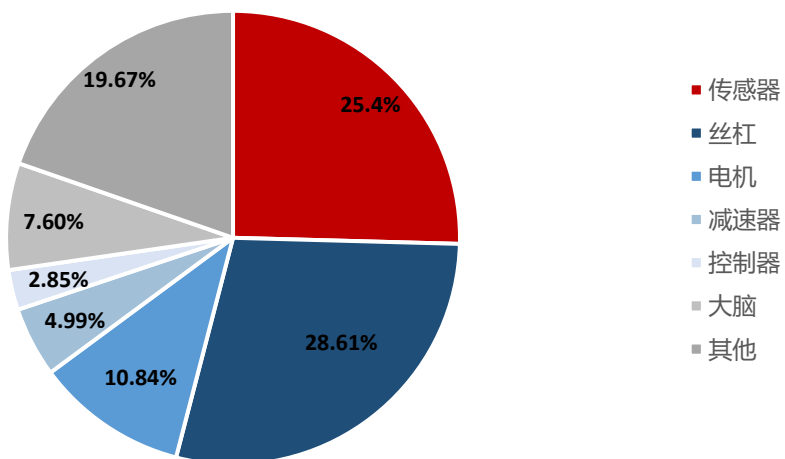
图表：现阶段人形机器人各环节成本占比



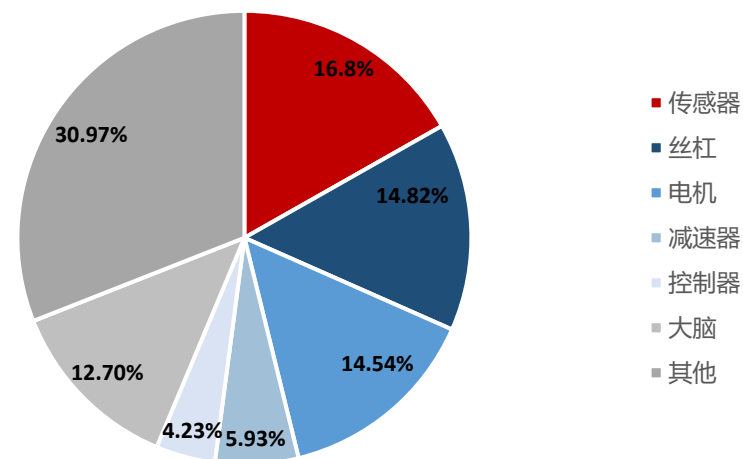
图表：终局人形机器人各环节成本占比



图表：现阶段人形机器人各零部件成本占比



图表：终局人形机器人各零部件成本占比



1. 人形机器人：行则将至，量产可期

2. 人形机器人拆解及产业链总览

**3. 执行系统：灵活关节，丝杠、电机、减速器是关键**

4. 感知系统：交互之媒，多传感器综合赋能

5. 控制系统：智能“小脑”，核心算法自研为主

6. 投资建议

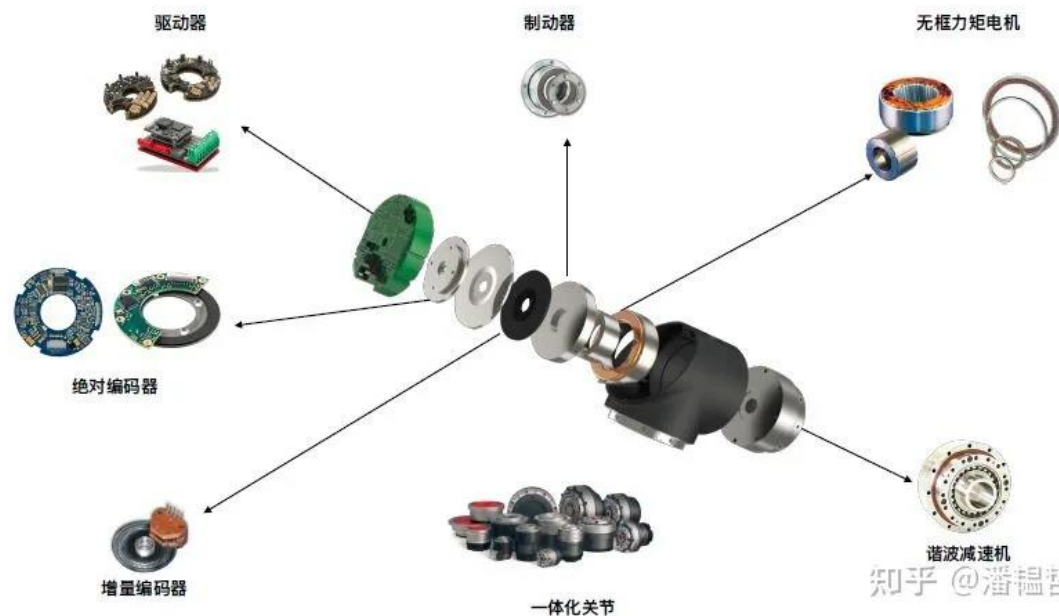
### 3.1 无框力矩电机：高效率、结构紧凑、易维护，用于人形机器人线性关节和旋转关节

- **无框力矩电机用于人形机器人线性关节和旋转关节。** 无框力矩电机是一种特殊类型的永磁无刷同步电机，没有轴、轴承、外壳、反馈或端盖，仅包含定子和转子两个部件，内部部件转子由带永磁体的旋转钢圆环组件构成，直接安装在机器轴上；定子是外部部件，齿轮外部环绕钢片和铜绕组，以产生紧密攀附在机器壳体内部的电磁力。
- **无框力矩电机具有高效率、结构紧凑、易维护等优势。** 1) 高效率：将电机直接集成到转轴元件上，可降低整体系统惯量，进而降低电机加减速所需扭矩，使得电机的运动和稳定时间更好控制、增加系统管带宽，提高机器效率；2) 结构紧凑：增大转矩密度，进而减少占地面积、降低重量；3) 易维护：机械部件更少、没有易磨损或需维护的组件。

图表：无框力矩电机示意图



图表：机器人旋转关节模组拆解示意图



## 3.1 无框力矩电机：外资企业主导，国内部分企业具备竞争实力

- **国内供应商已具备一定竞争实力。**无框力矩电机在磁路和工艺设计方面有一定技术壁垒，需要在低压供电的环境下输出更大功率，当前主要应用在协作机器人关节模组，市场规模较小，国外技术较为领先。国外主要供应商包括科尔摩根、TQ Robodrive、Nidec、Parker等；国内步科股份进度较为靠前，2016年推出的首代无框力矩电机已经可以媲美国外龙头，目前公司的第三代无框力矩电机产品可以对标国际领先产品，部分型号具备一定优势，此外，伟创电气、禾川科技等均有相关产品布局。

图表：国内外主要无框力矩电机公司及产品情况

公司名称	公司简介	无框力矩电机产品情况
科尔摩根	全球领先的运动控制系统和配件供应商，主要产品包括高性能、高可靠性的电机、驱动器、直线执行器、AGV 控制解决方案和自动化平台，拥有逾百万款标准和定制产品。	七种框架尺寸，可适应主流嵌入式设备和协作机器人设计；48 伏及以下直流电压工作；绕组针对 3.5kg 和 15kg 协作机器人应用的速度和转矩要求进行了优化；在不超过 85°C 的条件下性能最佳，但在高达 155°C 的绕组温度下依然能够连续充分维持性能表现。
步科股份	公司的自动化设备控制核心部件主要包括工业人机界面、伺服系统、步进系统、可编程逻辑控制器、变频器等，且广泛应用于物流设备、机器人、包装设备、食品设备、服装设备、医疗设备等自动化设备行业。	专业化：通过深入优化电磁方案，获得更高的转矩密度； 精细化：目前有52mm-132mm10种框架尺寸，覆盖3-25kg 负载需求，相同转矩下，尺寸更小，温升更低； 特色化：首创无框灌封工艺，轻量化设计、更薄机身，运动速度更快，更平稳，与市场产品相比，铜损下降率高达20%； 新颖化：与市场主流的谐波减速机尺寸匹配，更大的中空内径满足客户多样化的穿线需求
昊志机电	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、生产制造、销售与维修服务的国家高新技术企业，主要产品包括电主轴、伺服电机、驱动器、转矩波动 $\leq 1\%$ ，更利于机器人力矩控制；3.5倍过载能力，使得机器人负载能力大大加强。传感器等。	
禾川科技	公司是一家技术驱动的工业自动化控制核心部件及整体解决方案提供商，主要产品包括伺服系统、PLC等，并在近年沿产业链上下游不断延伸，涉足上游的工控芯片、传感器和下游的高端精密数控机床等领域。2020年公司伺服系统的市场占有率约为3%，伺服产品在国内有较高的市场占有率，其他产品均有实现量产，但销售占比较少。国产品牌中位列第二。	公司有较成熟的伺服电机、步进电机、空心杯电机、无框电机等各类电机及相关传感器产品，其中

## 3.2 减速器：人形机器人旋转关节或将应用谐波减速器，手部或部分身体关节或将应用行星减速器

- **精密减速器包括RV减速器、谐波减速器、行星减速器。** 减速器是多个齿轮组成的传动零部件，利用齿轮的啮合改变电机转速、扭矩及承载能力，也可实现精密控制。减速器种类及型号繁多，按照控制精度划分，可分为一般传动减速器和精密减速器。一般传动精密减速器控制精度低，可满足机械设备基本的动力传动需求。精密减速器回程间隙小、精度较高、使用寿命长，更加可靠稳定，应用于机器人、数控机床等高端领域，具体包括RV减速器、谐波减速器、行星减速器。
- **人形机器人旋转关节将应用谐波减速器，手部或部分低精度身体关节或将应用行星减速器。** RV减速器体积较大，在人形机器人领域应用有限。谐波减速器体积小、减速比大、精密度高，将用于人形机器人身体旋转关节；行星减速器体积小、重量轻、传动效率高、寿命长，但精度较谐波减速器低，将用于人形机器人手部关节或对精度要求较低的部分身体关节。

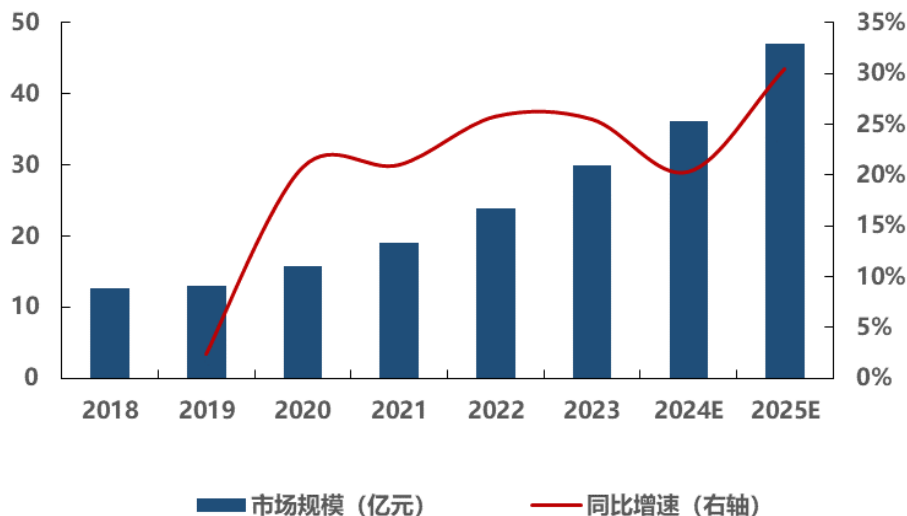
图表：三类精密减速器比较

	RV 减速器	谐波减速器	行星减速器
技术特点	通过多级减速实现传动，一般由行星齿轮减速器的前级和摆线针轮减速器的后级组成，组成的零部件较多，结构较复杂。	通过柔轮的弹性变形传递运动，主要由柔轮、刚轮、波发生器三个核心零部件组成。与RV及其他精密减速器相比，谐波减速器使用的材料、体积及重量大幅度下降。	由一个中心太阳齿轮、多个行星齿轮和一个内圈齿轮组成。行星齿轮围绕太阳齿轮转动，并同步与内圈齿轮进行啮合。
产品性能	大体积、高负载能力、高刚度。	小体积、低负载能力、高精密度、耐冲击。	小体积、轻重量、高承载能力、高精度、长寿命、平稳运动、低噪音、具有功率分流和多齿啮合独用的特性、较大输出扭矩。
主要缺点	体积较大，精度略低于谐波减速器。	柔轮寿命有限，输入转速不宜过高。	结构复杂、散热困难、材料要求高。
应用场景	一般应用于多关节机器人中机座、大臂、肩部等重负载的位置。	主要应用于小负载工业机器人小臂、腕部或手部；协作和SCARA 机器人大部分动力关节。	主要应用于直角坐标机器人；保证工业机器人的定位精度和重复定位精度，传递更多的扭矩。
终端领域	汽车、运输、港口码头等行业中通常使用配有RV减速器的重负载机器人。	3C、半导体、食品、注塑、模具、医疗等行业中通常使用由谐波减速器组成的30kg负载以下的机器人。	包装、印刷、切割、涂胶、灌装、流水线等自动化设备。
价格区间	5,000-8,000 元/台。	1,000-5,000 元/台。	300-2500元/台。

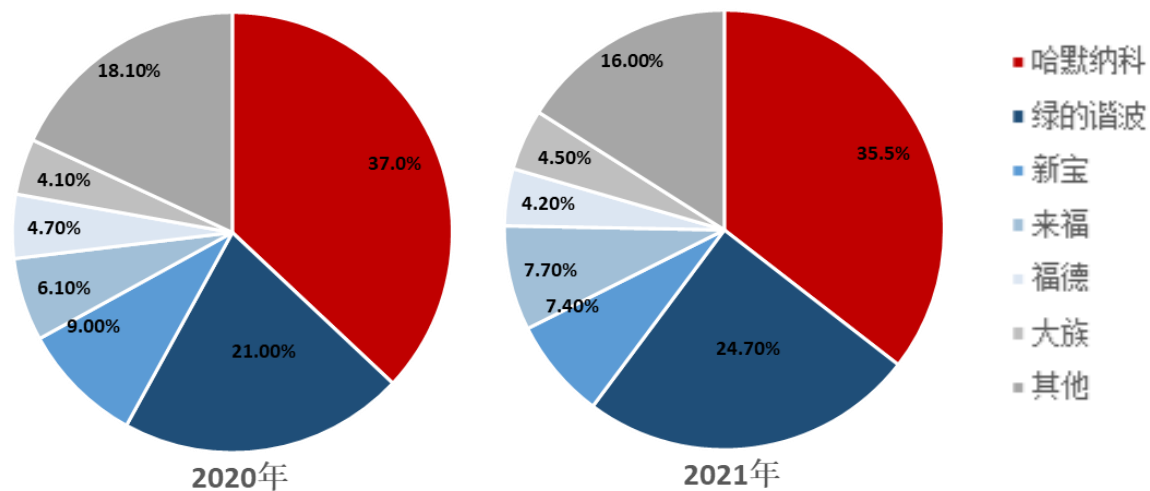
## 3.2 减速器：谐波减速器中期增量空间有望超400亿元，国产替代加速进行

- **谐波减速器目前下游以工业机器人为主，人形机器人中期或将带来400亿元空间增量。**谐波减速器具有单级传动比大、体积小、质量小、运动精度高并能在密闭空间和介质辐射的工况下正常工作的优点。与一般减速器相比，在输出力矩相同时，谐波减速器的体积可减小2/3、重量可减轻1/2，在机器人小臂、腕部、手部等部件具有较强优势，目前下游应用以工业/协作机器人为主。据宇博智业产业研究数据，2023年我国谐波减速器市场规模约30亿元，预计2025年有望达到近50亿元。若以2030年人形机器人累计需求200万台计算，谐波减速器增量市场有望超过400亿元。
- **人形机器人将加速谐波减速器国产替代。**国内减速器厂商进步明显，部分产品关键技术指标已赶超国外，国内谐波减速器龙头绿的谐波市占率2021年同比提升3.7pcts至24.7%；此外，来福谐波、福德机器人、同川精密、国茂股份等厂商加速布局谐波产能，未来国产替代有望加速。

图表：2018-2025年我国谐波减速器市场规模



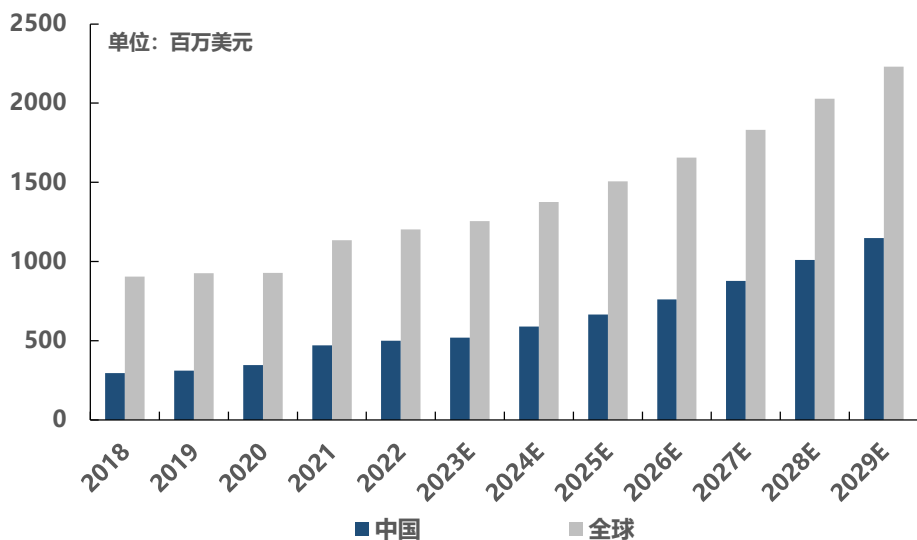
图表：2020-2021年我国谐波减速器竞争格局



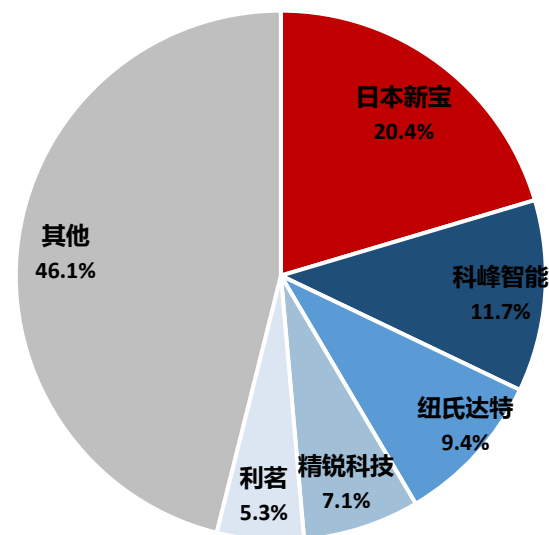
## 3.2 减速器：行星减速器或替代部分谐波减速器，国产化率相对较高

- 行星减速器可在人形机器人部分关节替代谐波减速器。**行星减速器具有高刚性、高精度、高传动效率、高扭矩、高传动效率、高扭矩、体积小等特点，单级行星减速器减速比一般不小于3，最大一般不超过10；行星减速器的级数（即行星齿轮套数）一般不超过3级。据QY Research数据，2022年全球行星减速器销量为540.15万台，销售金额为12.03亿美元，其中我国境内销量231.91万台，销售金额为5亿美元；预计2029年全球行星减速器销售规模达22.31亿美元，我国市场规模达11.49亿美元。
- 行星减速器整体技术难度低于谐波减速器，国内企业具有竞争实力。**行星减速器全球主要供应商包括日本新宝、纽卡特、威滕斯坦；国内科峰智能、纽氏达特、中大力德等本土供应商竞争实力不断提升，相比外资企业性价比高，2022年科峰智能、纽氏达特在国内市占率分别为11.7%、9.4%。

图表：2022年我国行星减速器销售金额约5亿美元



图表：2022年我国精密行星减速器竞争格局

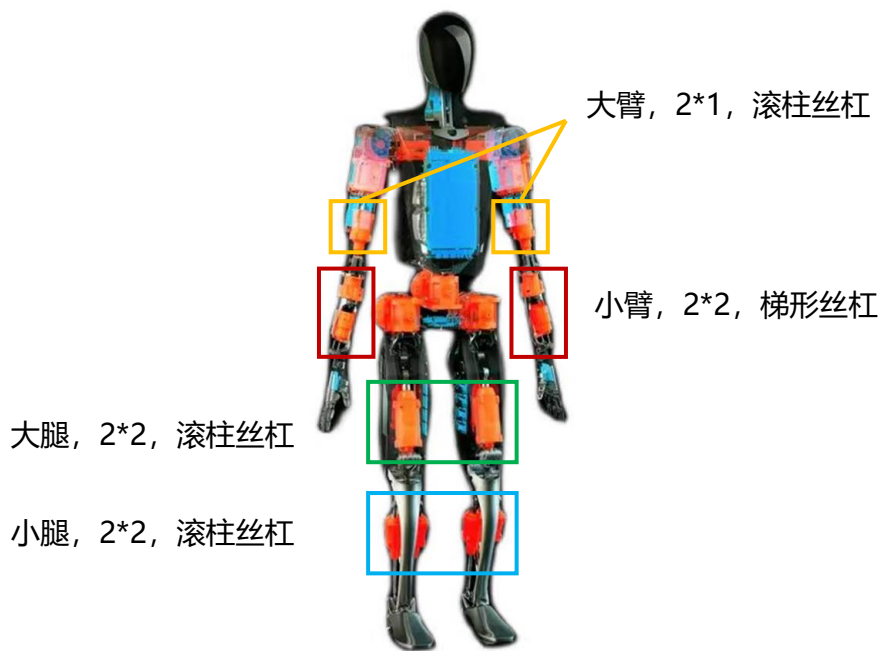




### 3.3 丝杠：人形机器人线性执行器的重要组成部分

- **特斯拉人形机器人包括三类共14个线性执行器，分布在手臂和腿部。** 特斯拉Optimus有14个线性执行器，具体包含三种类型，出力/重量分别为500N/0.36kg、3900N/0.93kg、8000N/2.20kg；分布位置位于大臂（2\*1）、小臂（2\*2）、大腿（2\*2）、小腿（2\*2）。
- **丝杠现阶段成本较高，未来有下降空间。** 线性执行器由“驱动器+无框力矩电机+丝杠+力矩传感器+编码器+轴承”组成，其中丝杠为其重要组成部分。根据我们估算，现阶段丝杠在特斯拉人形机器人成本中占比约为23.4%，终局成本占比预计为13.9%。从种类上来看，人形机器人用丝杠分为梯形丝杠和滚柱丝杠两类，其中梯形丝杠用于小臂，滚柱丝杠用于承载要求更高的大臂、大腿、小腿。

图表：特斯拉Optimus线性关节使用4个梯形丝杠和10个滚柱丝杠



图表：特斯拉人形机器人线性关节及结构示意图



### 3.3 丝杠：行星滚柱丝杠负载高、寿命长、速度大，更适用于人形机器人场景

■ **与滚珠丝杠相比，滚柱丝杠负载高、寿命长、转速与加速度大、导程小，更适合应用于人形机器人。**丝杠是将旋转运动变成直线运动的传动附件，根据摩擦特性可分为滑动丝杠、滚动丝杠和静压丝杠三类，其中滚动丝杠又可以分为滚珠丝杠和行星滚柱丝杠两大类，区别在于行星滚柱丝杠负载传递单元为螺纹滚柱，是典型的线接触；而滚珠丝杠负载传递单元为滚珠，是点接触。与滚珠丝杠相比，行星滚柱丝杠拥有更多接触点，因而能够承受更高静态负载和动态负载，静载为滚珠丝杠的3倍，寿命为滚珠丝杠的15倍；刚度和抗冲击能力更强，因而转速和加速度更大；螺距设计范围更广，导程可设计更小。

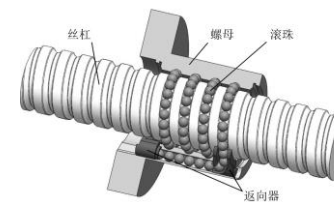

图表：行星滚柱丝杠与滚珠丝杠对比示意图



行星滚柱丝杠与滚珠丝杠对比图

Comparison of planetary roller screw and ball screw

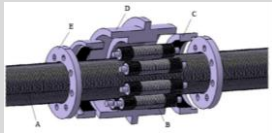
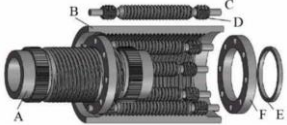
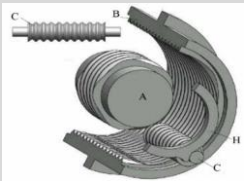
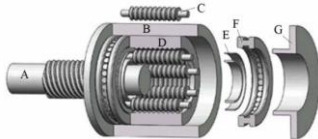
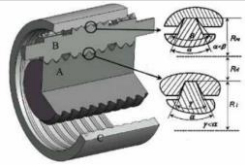
图表：滚柱丝杠与滚珠丝杠运动机理和受力状态对比

分类	行星滚柱丝杠	滚珠丝杠
示意图		
滚动体	滚柱	滚珠
滚动体循环运动方式	滚柱围绕丝杠轴心做行星运动	借助反向机构实现循环滚动
滚动体受力状态	滚动体受载面积大，任何时候都同时受载，无循环交变力。	滚珠受载面积小，且轮流受载，产生循环交变应力。
滚动体的离心力	行星机构阻止离心力	高速运转时会产生较大离心力
纯滚动比率	很高	较高

### 3.3 丝杠：标准式滚柱丝杠适用于高负载、高速等场景，应用最为广泛

- 行星滚柱丝杠根据其结构组成和零部件相对运动关系的不同，可分为标准式、反向式、循环式、轴承环式、差动式五大类。标准式滚柱丝杠适用于环境恶劣、高负载、高速等场景，主要应用于精密机床、机器人、军工装备等领域，是目前主要的应用类型。

图表：滚柱丝杠可分为标准式、反向式、循环式、轴承环式、差动式五大类

分类	示意图	结构组成	运动方式	适用场景
标准式		丝杠、滚柱、内齿圈、螺母、保持架	以丝杠旋转为驱动，通过丝杠与滚柱之间的螺旋运动带动螺母做直线运动。	适用于环境恶劣、高负载、高速等场景，主要应用于精密机床、机器人、军工装备等领域，是目前应用最广泛的类型。
反向式		丝杠、螺母、滚柱、弹簧挡圈	通过螺母的旋转运动输入动力源，以丝杠运动直线运动作为输出，滚柱和丝杠之间没用相对轴向位移。	多用于恶劣环境、较大负载、要求高速度和大传动比的场合，如航空、航天、船舶、电力等领域。
循环式		丝杠、螺母、滚柱（螺纹升角为零的圆弧沟槽）、凸轮环	当发生旋转运动时，滚柱被凸轮环推入凹槽，完成一个循环运动，而整个国产滚柱始终与螺母保持啮合，使得滚柱回到开始啮合的位置。	适用于高刚度、高承载、高精度、中低速运行场合，如医疗器械、光学精密仪器等领域。
轴承环式		丝杠、滚柱、轴承环、圆柱滚子轴承、螺母	由丝杠将动力传递给滚柱，再由滚柱通过轴承环的自由旋转运动将动力传递到推力圆柱滚子轴承上，最后再传输到螺母壳体表面。	主要适用于高承载、高效率等场合，如石油化工、重型机械等领域。
差动式		丝杠、滚柱、螺母（均采用不同牙型角的螺纹）	通过改变丝杠与滚柱、滚柱与螺母的啮合接触位置，来改变整个结构的导程（传动比）。	更适应高速重载的工作场合

### 3.3 丝杠：切削工艺制造精度高，包括车削、铣削、磨削等核心工序

■ 滚柱丝杠的核心部件丝杠、滚柱和螺母都是小螺距的精密螺纹件，加工工序基本一致，传统的加工方式可分为切削和滚压两大类：

- ✓ 切削：以两端中心孔为加工工艺工序基准，通过热处理、车削、磨削等10-20余道工序逐一完成，制造精度高达P1级，可实现定位和传动功能；
- ✓ 滚压：用成形滚压模具使工件产生塑性变形以获得螺纹的加工方法，开模工艺自动化程度高，批量生产后成本低、效率高，但制造精度较低，一般在P7级左右，仅实现传动功能。

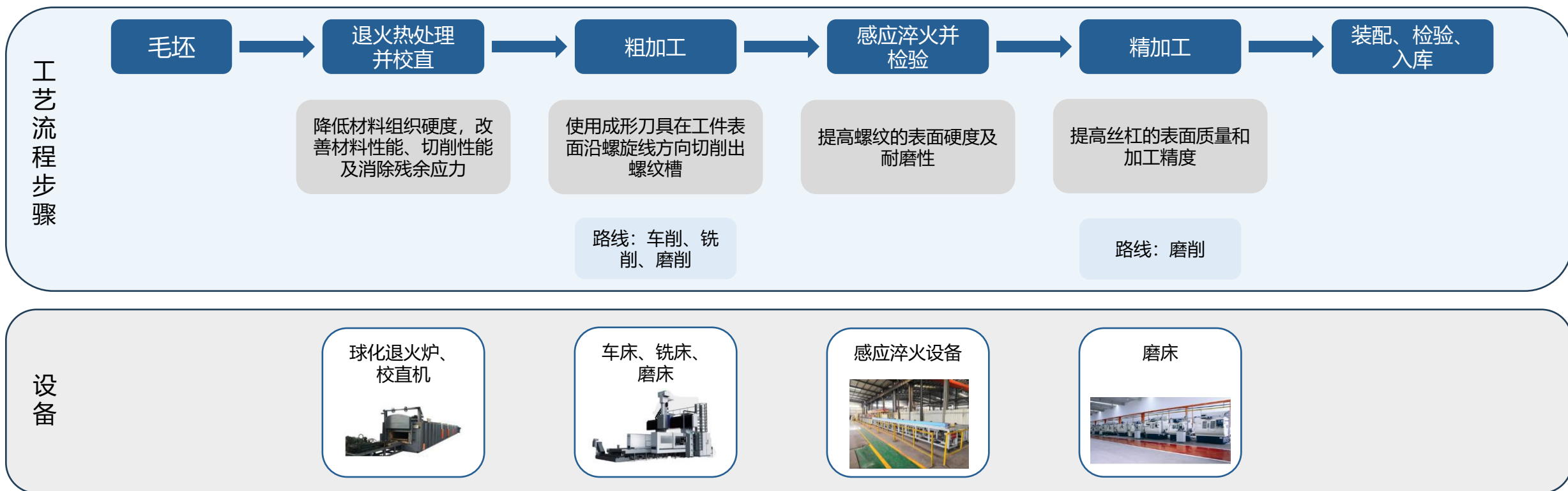
图表：行星滚柱丝杠核心部件加工工序（以切削工艺为例）

工序	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
丝杠	丝杠毛坯	预备热处理	校直	加工端面及中心孔	粗车	高温时效并检验	加工端面及修中心孔	半精车		铣		粗磨	感应淬火并检验	研中心孔	粗磨	探伤	时效处理并检验	研中心孔	半精磨	低温时效并检验	洗键槽	磨端部螺纹	研中心孔	精磨并全面检验	入库
螺母	螺母毛坯	预备热处理			粗车	高温时效并检验		半精车		铣螺纹	粗磨	渗碳淬火并检验		粗磨	探伤	时效处理并检验		半精磨	低温时效并检验					精磨并全面检验	入库
滚柱	滚柱毛坯	预备热处理	校直	加工端面及中心孔	粗车	高温时效并检验	加工端面及修中心孔	半精车	滚齿	铣		粗磨	表面氮化并检验	研中心孔	粗磨	探伤	时效处理并检验	研中心孔	半精磨	低温时效并检验	洗键槽	磨端部螺纹	研中心孔	精磨并全面检验	入库

### 3.3 丝杠：粗加工环节路线多样，精加工环节磨削仍为重要工艺

- **滚柱丝杠粗加工环节技术路线多样，精加工环节磨床仍必不可少。**滚柱丝杠的切削工艺大致可分为毛坯下料、预备热处理（退火）、粗加工、最终热处理（淬火）、精加工、装配检验等步骤。其中粗加工包括车削、铣削、磨削三种工艺路线（可单独或组合使用），精加工工艺为磨削。“以车代磨”、“旋风铣”等新加工工艺理论上可替代磨削、提升加工效率，但目前技术有待成熟，精加工仍需磨削技术、磨床必不可少。

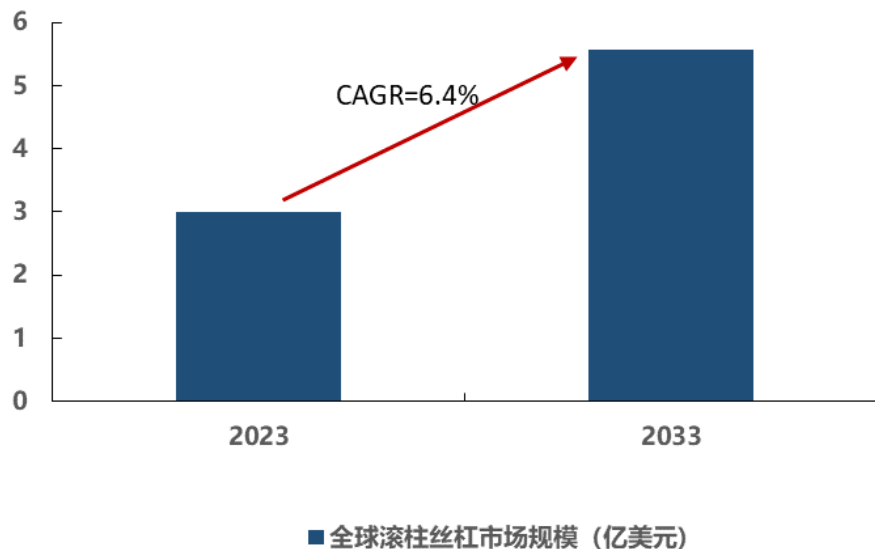
图表：滚柱丝杠加工工艺及设备



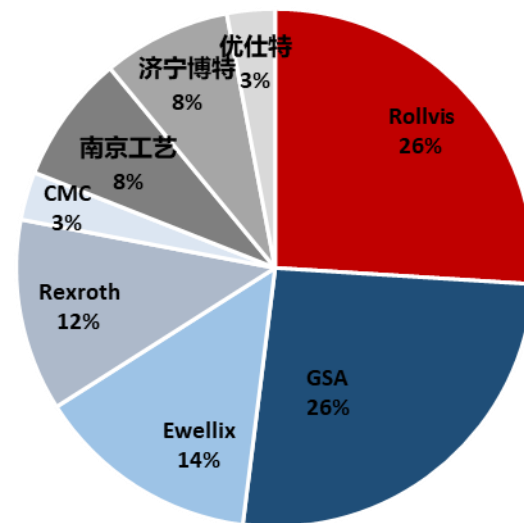
### 3.3 丝杠：人形机器人将打开滚柱丝杠长期空间，国内相关供应商较为稀缺

- **人形机器人将进一步打开滚柱丝杠市场空间。**据Persistence Market Research数据，2023年全球滚柱丝杠市场规模预计为3.00亿美元，伴随工业自动化对精密机械的需求增长，滚柱丝杠将在机床、航空航天、汽车、机器人等领域加速应用，2033年市场规模有望达到5.57亿美元，年均复合增速约为6.4%。进一步，若考虑人形机器人放量给滚柱丝杠带来的新需求，滚柱丝杠全球市场规模有望持续高增。
- **滚柱丝杠制造壁垒高，供应商数量少、目标下游分散。**目前全球滚柱丝杠的供应商主要包括Ewellix、Rollvis、GSA、Rexroth、CMC、南京工艺、济宁伯特、优仕特，据《E公司滚柱丝杠产品营销策略研究》数据，2022年Rollvis、GSA、Ewellix、Rexroth四家公司在我国合计市占率约为78%，而国内厂商在供货质量方面与欧美企业存在较大差距。

图表：2023-2033年全球滚柱丝杠市场规模CAGR约6.4%



图表：2022年我国滚柱丝杠市场竞争格局



### 3.3 丝杠：建议关注精密机械领域积累深厚、布局领先的相关企业

- **滚柱丝杠生产难度大，建议关注精密机械领域积累深厚、布局领先的相关企业。** 此前滚柱丝杠较多应用在机床、航空航天、汽车等领域，高端制造领域自主可控大趋势下，贝斯特、秦川机床等企业加速布局；此外，滚柱丝杠因其优越性能对其他直线传动的替代也将带来新增产能布局，如恒立液压拟投入14亿元布局线性驱动器项目。滚柱丝杠生产难度大，对原材料、设备、加工工艺等要求较高，未来随着机器人等领域需求放量、高端制造领域自主可控迫切，我国供应商有望加速突围，建议关注精密机械积累深厚、布局领先的相关企业，如：北特科技、贝斯特、恒立液压、等；磨床设备：日发精机、华辰装备等。

图表：国内企业滚柱/滚珠丝杠布局进展情况

主要厂商	滚珠/滚柱丝杠进展
北特科技	公司积极配合客户开展人形机器人用丝杠产品的研发工作，主要产品包括行星滚柱丝杠和梯形丝杠，目前小批量产线的设备已完成安装调试。
贝斯特	公司大力布局直线滚动功能部件领域。
恒立液压	拟投入14亿建设线性驱动器项目，达产后将形成年产10.4万根标准滚珠丝杠电动缸、4500根重载滚珠丝杠电动缸、750根行星滚柱丝杠电动缸、10万米标准滚柱丝杠和10万米重载滚珠丝杠的生产能力。
五洲新春	目前建设两个丝杠专业化车间：1) 滚珠丝杠组件及零部件车间，主要用于新能源汽车转向系统及刹车系统；2) 行星滚珠丝杠组件及零部件车间，主要用于机器人执行机构核心零部件。
鼎智科技（江苏雷利）	公司线性传动产品包括滑动丝杠、滚动丝杠、行星滚柱丝杠。微型行星滚柱丝杠的研发与生产已有里程碑式进展，应用领域包括机器人、飞机起落架、部分工业场景等。

### 3.4 灵巧手：空心杯电机/无刷有齿槽电机是核心动力源

- **灵巧手电机主要采用空心杯电机或无刷有齿槽电机。**微特电机具有体积小、功率密度大、噪音低等特点，相比传统电机更符合人形机器人灵巧手空间紧凑、负载能力的要求，空心杯电机和无刷有齿槽电机是目前灵巧手的主流解决方案。

图表：空心杯电机与无刷有齿槽电机对比

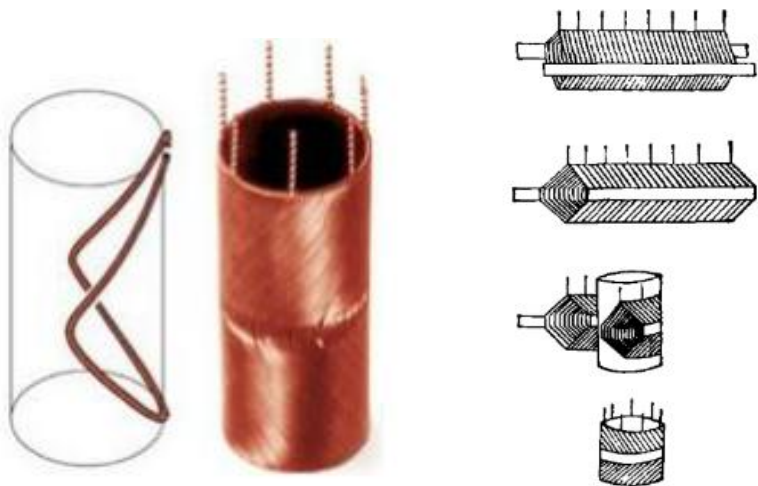
	有刷空心杯电机	无刷空心杯电机	无刷有齿槽电机
示意图			
技术原理	绕组由线圈按照一定的排列绕制，直接位于定子叠片与转子磁铁之间的空气间隙中。利用换相器+电刷完成机械换向。	绕组同样为自支撑的杯状线圈。利用控制电路(霍尔传感器+控制器或磁编码器)完成电子换向。	定子由有齿槽的钢片叠合在一起，绕组插在槽内。同样采用电子换向。
结构特点	有电刷、无铁芯、无齿槽	无电刷、无铁芯、无齿槽	无电刷、有铁芯、有齿槽
优点	体积小、重量轻，具备良好的稳定性、动力性能、控制性能和节能效果，且可直接连接电源工作	使用寿命长，无电火花和电磁干扰产生	空气间隙小，成本低、价格低
缺点	使用寿命短，有电火花和电磁干扰产生	制造工艺复杂，成本高、价格高	存在铁损和齿槽转矩，会引起噪音、电机振动、速度波动，且电子驱动器会增加系统成本



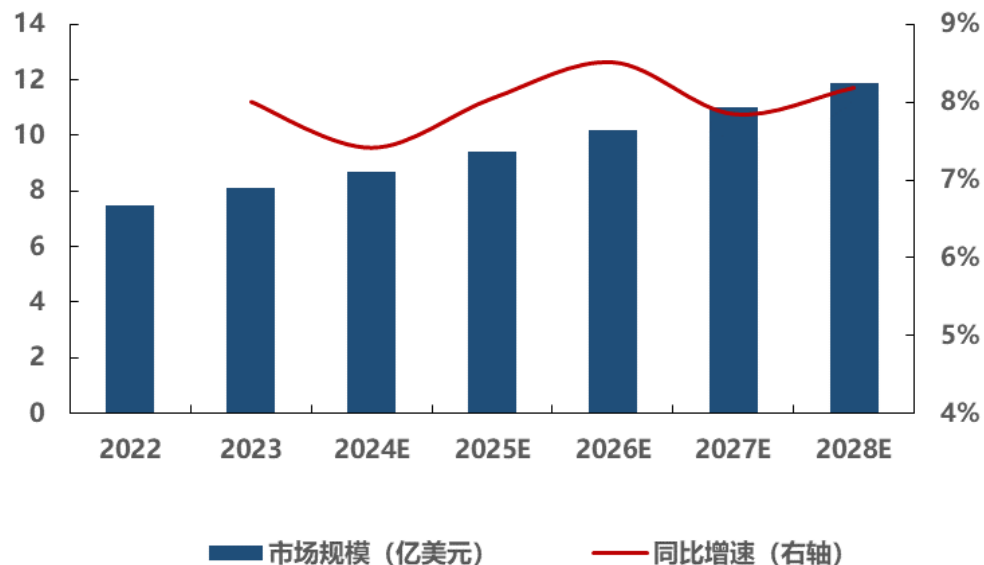
### 3.4 灵巧手：空心杯电机——核心壁垒在于线圈设计、绕制和设备

- **空心杯电机的三大核心壁垒为线圈设计、线圈绕制、自动化设备。**无刷空心杯电机转子由环形磁钢、转轴及其固定件组成，定子由环形硅钢片和空心杯线圈粘结而成，核心工艺为线圈的设计和制造。空心杯电机常用的线圈绕法分为直绕形、马鞍形、斜绕形三种，线圈绕制方式分为人工绕线、半自动化（卷绕式）和一次成型自动化绕制。国外主要采用一次性绕制成型的生产技术，自动化程度较高，可加工0.08-0.2mm线径、功率400W以下电机所需线圈；而国内主要采用卷绕式生产，依赖人工、生产效率低且生产线径受限，一次成型绕线设备有待突破。
- **空心杯市场规模稳定增长，人形机器人打开新空间。**空心杯电机主要应用在高精度、高速响应、紧凑高效场景，如航空航天、仪表仪器、工业机器人、医疗等领域。据QY Research数据，2023年全球空心杯电机市场规模约为8.1亿美元，预计2028年增长至11.9亿美元，2023-2028年CAGR达8%。据Market Research数据，2021年我国、欧洲的空心杯电机市场规模分别占比34.8%、25.85%。

图表：空心杯线圈结构（马鞍形）及卷绕式生产示意图



图表：2023年全球空心杯电机市场规模约8.1亿美元



### 3.4 灵巧手：空心杯电机——国内企业加速追赶，人形机器人新行业孕育国产化机会

- **高端市场外资品牌优势明显，国内企业加速追赶。**全球主要的空心杯电机制造商包括Maxon、Faulhaber、Portescap、Allied Motion、Nidec等，据Market Research数据，2021年全球CR3合计份额高达55.43%。我国空心杯技术发展起步较晚，可靠性和精度等方面和国外中高端品牌存在一定差距，近年来绕线机的自动化程度和绕线速度持续突破，我国空心杯电机厂商呈现加速追赶态势，鸣志电器、兆威机电、伟创电气、鼎智科技等公司较为领先，机器人降本需求下将有望逐步替代外资企业份额。

图表：国内外主要布局空心杯电机公司及产品情况

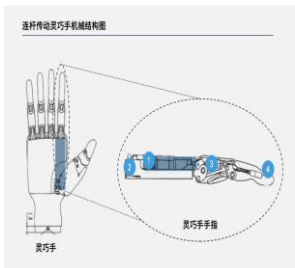
公司名称	公司简介	空心杯电机产品情况
MAXON	致力于研发并生产性能强大的电动驱动器，产品包括有刷和无刷直流电机、传感器、行星齿轮箱等，被广泛应用在各种高要求场合。	maxon DC电机质量优异，采用高性能永磁体，其“心脏”是空芯杯转子，拥有多个系列产品，其中A-max系列直径12—32mm，0.5—20W。
Faulhaber	微型和微驱动技术领域的领先者，在精细机械和机电技术方面将技术可行性发挥到极致，产品包括电机、减速器、线性致动器、编码器等。	FAULHABER直流电机的转子是无铁芯、自承式、带斜绕组的铜线圈，拥有五种产品系列，其直径范围6—38mm。
鸣志电器	公司是一家运动控制领域综合制造商，提供的产品包括旋转步进电机、无刷无槽电机、伺服电机、电机驱动系统、LED智能驱动等，旨在在广泛的应用领域中提供更专业、更节能、更高效的产品。	DCU系列直流有刷电机采用空心转子设计方案，提供在Ø8mm~Ø24mm范围内的多种外径及机身长度规格型号。并且公司在2023年7月实现新突破，完成Ø26mm系列无齿槽电机。
兆威机电	公司主要产品为微型传动系统、微型驱动系统等。	公司完成了高转矩直流电机、无刷直流电机以及微型无刷空心杯电机和永磁步进电机的开发。公司高性能电机兼具小体积与高性能，能够满足智能机器人的应用需求。
鼎智科技	公司提供以步进电机为基础的精密运动控制系列产品，广泛使用于医疗诊断设备、实验室自动化、机器人、流体控制、各类工业自动化设备等。	空心杯电机杯具有高耐用性、低电气噪声和高效率，电机最大效率达到91%，其直径范围16mm—42mm。目前已实现空心杯电机全自动量产，并能针对客户的不同需求提供定制化产品和组件。当前多款样品处在测试阶段。
禾川科技	专注于工业自动化产品的研发、制造、销售及应用集成，具备完整的自动化产品线，包括伺服系统、控制器、视觉系统、编码器、变频器、触摸屏等。	空心杯电机产品已有，但暂未销售。
伟创电气	从事工业自动化产品研发、生产和销售，产品包括变频器、伺服系统、控制系统、行业专机、智能物联网。	自主研发设计空心杯电动机，目前在内部测试阶段，主要面向机器人、医疗等行业，具有高转速、高扭矩、低噪音振动的特点。

## 3.4 灵巧手：传动方式多样，微型丝杠或为下一代灵巧手升级方向

### 传统传动方式

#### 连杆传动

- **工作原理：**刚性连杆传递动力，通过多个连杆的串并联混合使用



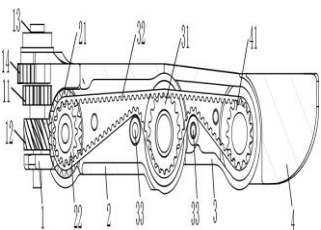
- ✓ **优点：**能抓取大型物体，结构设计紧凑，能够完成包络抓取

- ✗ **缺点：**远距离控制困难，容易发生弹射，抓取空间较小

- **代表企业：**ABB Robotics, Fanuc Corporation

#### 齿轮传动

- **工作原理：**齿轮啮合传递动力，能获得稳定的传动比



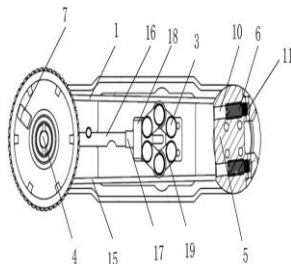
- ✓ **优点：**传递效率高，可靠性强

- ✗ **缺点：**齿轮质量加大整体质量和惯性

- **代表企业：**KUKA Robotics, Boston Dynamics

#### 线绳传动

- **工作原理：**线绳模拟人肌腱结构，远离驱动器，减轻末端负载



- ✓ **优点：**减轻末端负载和惯量，提升抓取速度，排布灵活，适合狭小空间和多自由度传动

- ✗ **缺点：**带负载能力弱，预紧力变化大，负载越大效率越低

- **代表企业：**Ocado Technology

### 创新传动方式

#### 通过齿轮箱联动多手指运动

- **工作原理：**将单个电机的动力分配至多个关节或手指，使不同的关节能够独立运动或同步运动

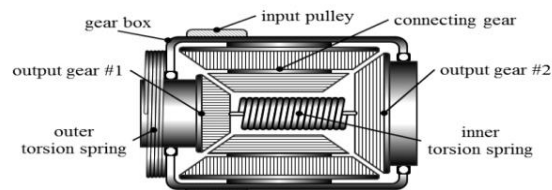


Fig. 4 Finger driving module.

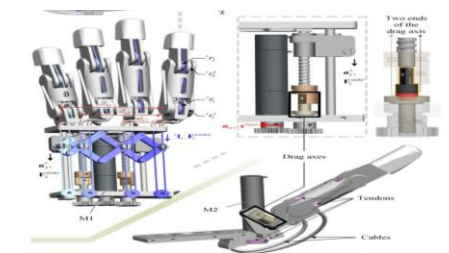
- ✓ **差速器机构：**允许关节之间改变输出速度和扭矩分配，对于实现具有不同力量要求的复杂动作（如抓握和捏合）至关重要。

- ✓ **机械自适应：**结合扭转弹簧和差速特征，实现机械柔顺性；根据外力调整抓地力，无需复杂的反馈系统。

- ✓ **稳健性和适应性：**提高处理不同尺寸、形状和重量的物体的可靠性，促进各种机器人应用中的精确运动和多功能任务执行。

#### 微型丝杠与传统传动方式相结合

- **工作原理：**微型丝杠将旋转运动转换为线性运动。当丝杠旋转时，螺母沿丝杠轴线移动，产生精确的线性位移。



- ✓ **精密驱动：**微导螺杆提供精确的线性运动，对于控制手指的运动和准确定位至关重要。

- ✓ **紧凑设计：**微型导螺杆结构紧凑，可安装在机械手有限的空间内，同时提供高效的运动控制。

- ✓ **负载处理：**它们可以处理相对于其尺寸的大量负载，使其适用于需要机械手抓取和操纵各种重量和尺寸的物体的应用。

- **代表企业：**Shadow Robot Company, 因时灵巧手

1. 人形机器人：行则将至，量产可期

2. 人形机器人拆解及产业链总览

3. 执行系统：灵活关节，丝杠、电机、减速器是关键

**4. 感知系统：交互之媒，多传感器综合赋能**

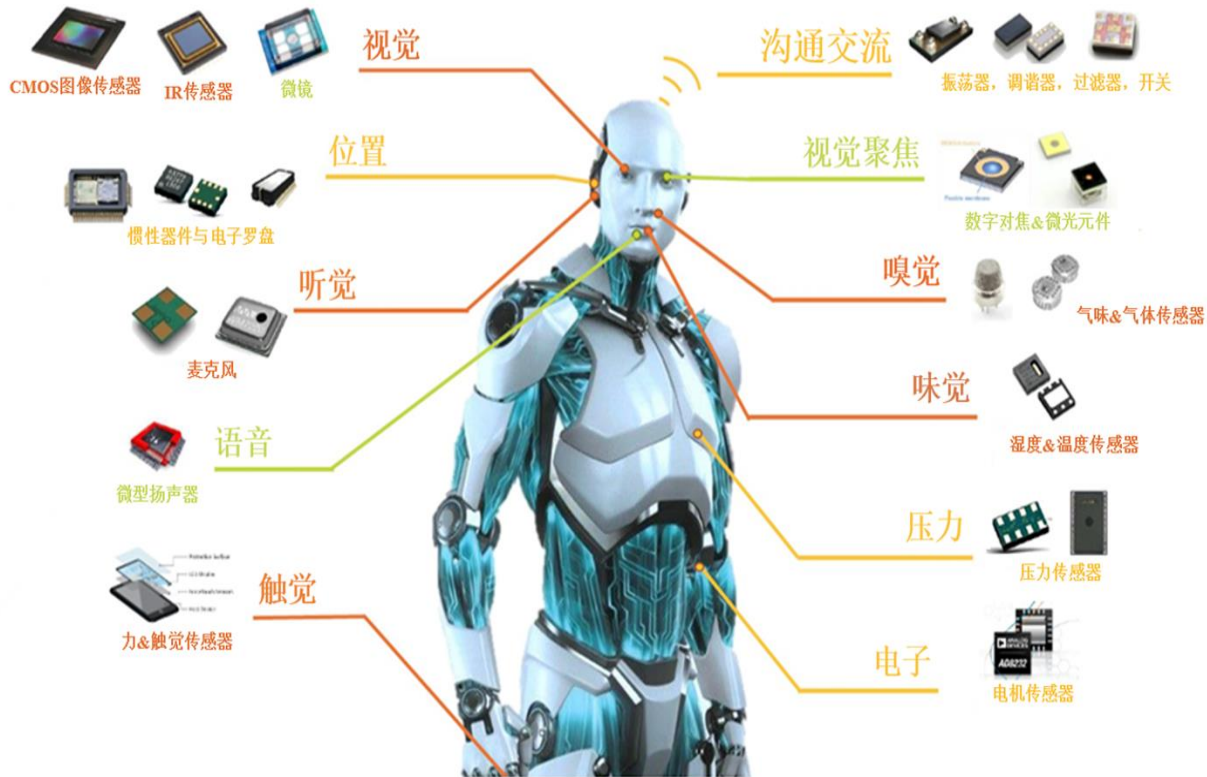
5. 控制系统：智能“小脑”，核心算法自研为主

6. 投资建议

## 4. 传感器：赋予机器人知觉功能和反应能力，分为内部传感器和外部传感器

■ **传感器是机器人感知世界的媒介，可分为内部传感器和外部传感器。** 传感器是将机器人对内外部环境感知的物理量转换为电量输出的装置。根据检测对象的不同，可分为内部传感器和外部传感器。内部传感器用于测量机器人自身状态，如位置、速度、加速度等；外部传感器用于测量与机器人作业有关的外部环境，如视觉、听觉、触觉、嗅觉等。

图表：机器人传感器示意图



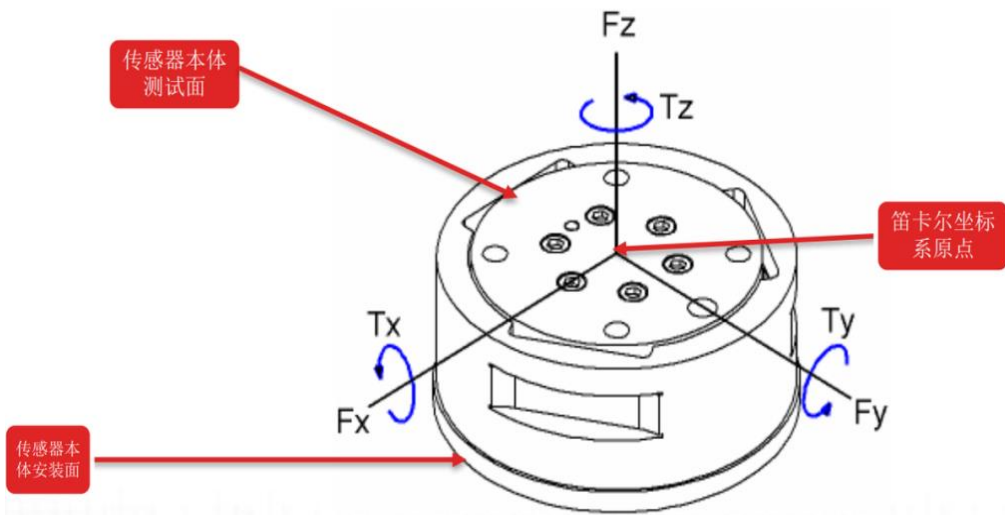
图表：机器人传感器可分为内部传感器与外部传感器

传感器分类		主要作用
内部传感器	光电编码器	电机转角/转速测量、里程测量
	惯性测量单元	移动机器人姿态测量
	加速度传感器	加速度测量
外部传感器	视觉传感器	用于识别物体、导航和建图等任务，包括摄像头、激光雷达、红外线传感器等
	听觉传感器	用接收声音信号以识别和理解语言，包括麦克风和扬声器等
	触觉传感器	用于感知机器人与外部物体的接触力和接触面积等信息，包括力传感器和压力传感器等。
	气味传感器	感知周围环境的气味信息，用于环境监测、卫生检查等。

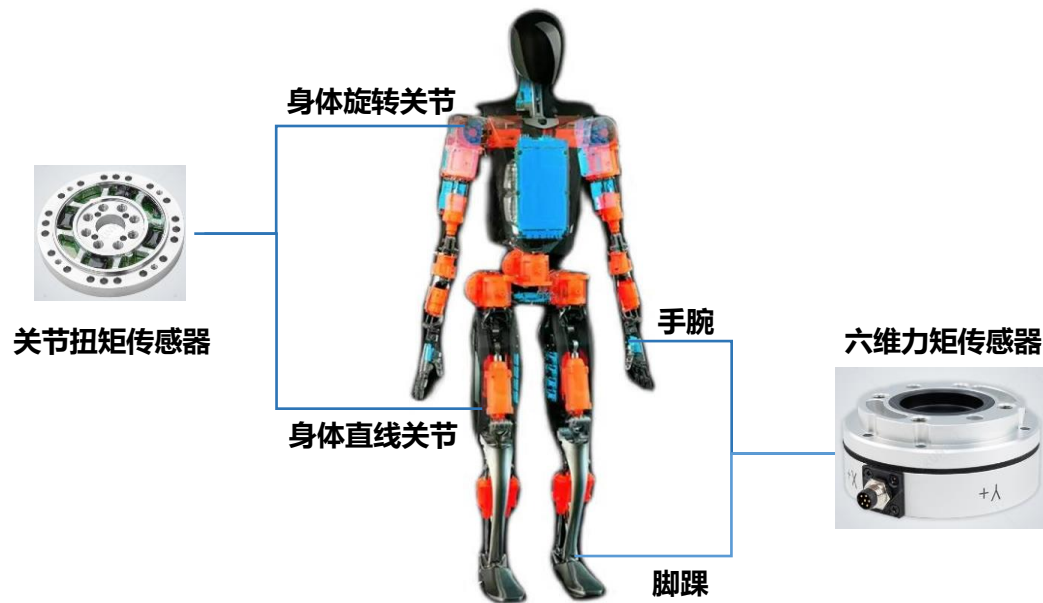
## 4.1 力矩传感器：人形机器人手腕和脚踝或将使用六维力矩传感器

- **力矩传感器是机械臂感知力度的重要部件。** 力矩传感器又称扭矩传感器，可在各种旋转或非旋转机械部件上对扭转力矩感知进行检测，将扭力的物理变化转化为精确的电信号，具有精度高、频响快、可靠性好、寿命长等优点。力矩传感器是机械臂的关键部件之一，可为机械臂提供实时的力和力矩信息，实现机械臂对操作对象的力感知，从而协助机械臂完成精细和智能的操作任务。
- **人形机器人中，六维力矩传感器主要用在对柔顺控制要求高的手腕和脚踝。** 按照测量维度，力矩传感器可分为一至六维力矩传感器，其中一维传感器、三维传感器和六维传感器最为常见。六维力传感器也被称为六轴力/力矩传感器、F/T传感器，用于精确测量X、Y、Z三个方向的力信息和 $M_x$ 、 $M_y$ 、 $M_z$ 三个维度的力矩信息。人形机器人中，对柔顺控制要求高的手腕和脚踝或将使用六维力矩传感器，而身体的其他关节将使用关节扭矩传感器（单维）。

图表：六维力和力矩传感器示意图



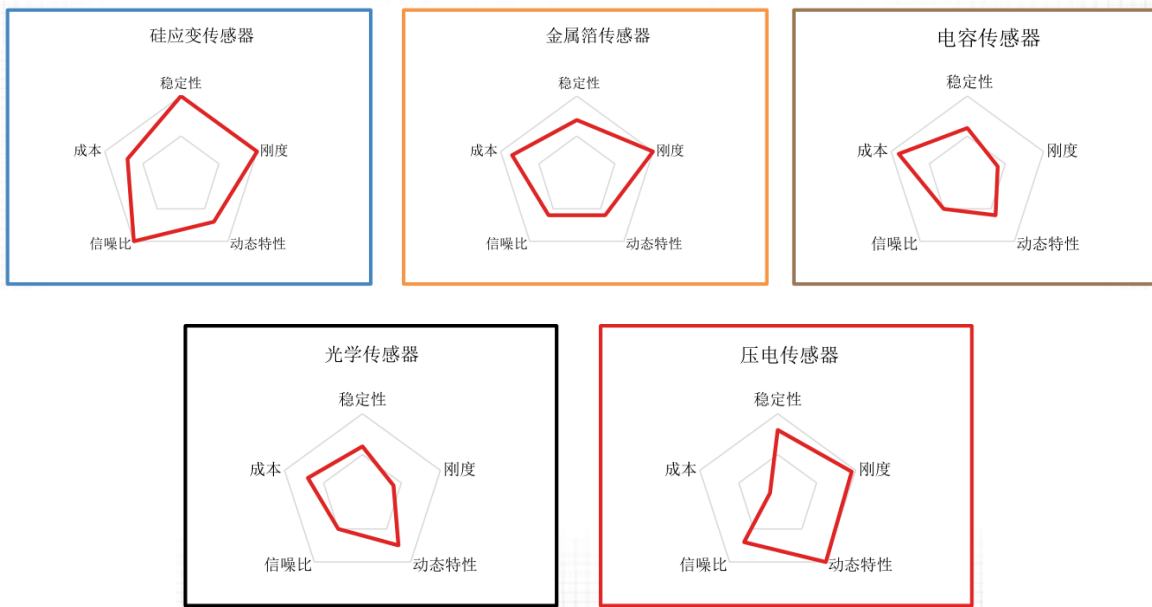
图表：人形机器人力矩传感器应用预估示意图



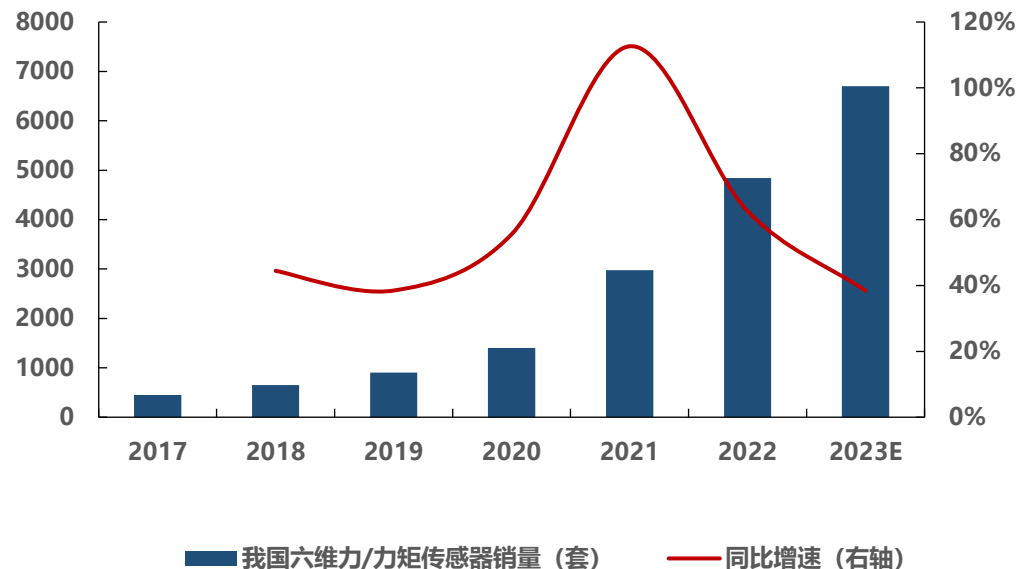
## 4.1 力矩传感器：应变片式传感器性能更优，2023年我国六维力矩传感器销量有望突破6700套

- **硅应变传感器综合性能更优。** 根据感力原理的不同，力/力矩传感器主要分为应变式、光学式和压电式三类：1) 应变式力传感器采用硅应变片或金属箔，本质是材料本身发生形变进而转化为阻值变化；2) 光学式传感器是通过光栅反应形变再转化力；3) 电容传感器是利用电容作为敏感元件，将被测压力转换成电容值改变的力传感器；4) 压电式传感器是将被测量物理量变化转换成压电材料因受机械力产生静电电荷或电压变化的传感器。整体来看，硅应变传感器在稳定性、信噪比以及动态特性等方面有较大优势；电容传感器的成本优势明显；光学传感器动态特性优势突出；压电传感器的刚度、动态特性较优。
- **据GGII数据，2022年我国六维力/力矩传感器销量4840套，同比增长62.58%，预计2023年销量有望突破6700套，同比增速40%左右。目前六维力矩传感器的应用下游以机器人（工业机器人、协作机器人）、医疗领域为主，未来人形机器人有望打开六维力矩传感器的应用新场景。**

图表：硅应变传感器综合性能更优



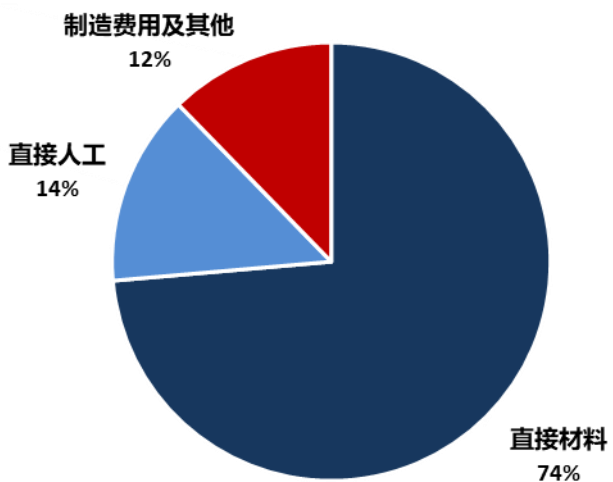
图表：2023年我国六维力/力矩传感器有望突破6700套



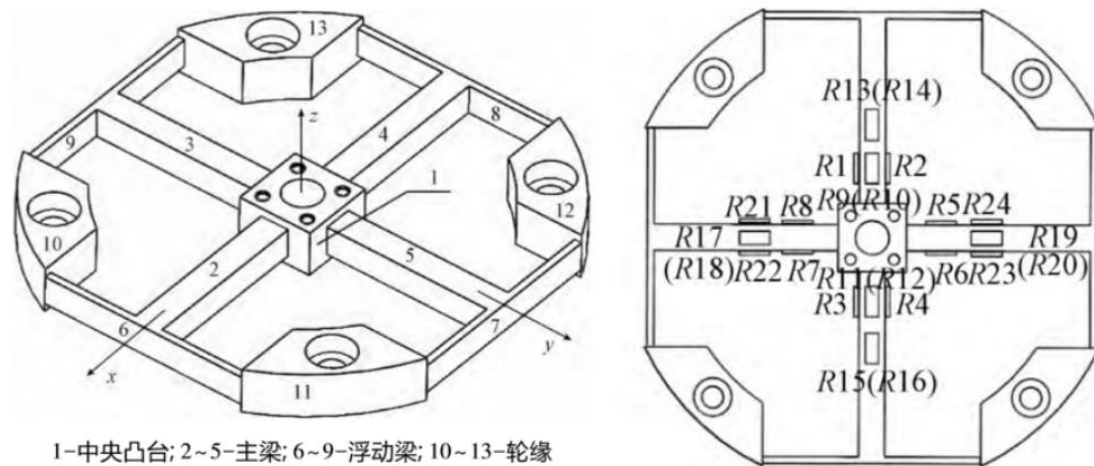
## 4.1 力矩传感器：六维力矩传感器研发生产难度大，规模化后降本有望持续体现

- 六维力/力矩传感器研发生产难度大，规模化后降本有望持续体现。** 与单维力传感器相比，多维力/力矩传感器除了要解决对所测力分量敏感的单调性、一致性问题外，还需解决因结构加工和工艺误差引起的维间干扰问题、动静态标定问题以及矢量运算中的解耦算法和电路实现等，对设备和材料要求较高，研发制造难度远高于单维力传感器。应变式力传感器的主要生产原材料为金属、芯片、应变片等，以柯力传感为例，2023年主营产品力学传感器的直接材料成本达74%；六维力/力矩传感器所需应变片数量是单维力传感器的数倍，叠加生产难度大，其成本远高于单维力矩传感器，据百度爱采购数据，ATI FC-NANO17六维力/力矩传感器单价为2万元，我们认为，未来随着国内应变片及相关产业链研发、生产能力提升以及下游需求打开，六维力/力矩传感器成本有较大下降空间。

图表：2023年柯力传感应变式传感器直接材料成本占比达74%



图表：某小型化六维力/力矩传感器结构及应变片（24个）粘贴方式示意图





## 4.1 力矩传感器：人形机器人奇点渐近，六维力矩传感器国产替代有望加速

- 人形机器人奇点渐近，国内六维力/力矩传感器产业链加速布局。**六维力/力矩传感器早期应用场景以航天领域的空间机械臂为主，欧美国家起步较早，ATI、AMTI等外资供应商在灵敏度、串扰、抗过载能力及维间耦合误差等方面具有领先优势；早期我国研发团队多为国防军工和科研院所，随着工业机器人及协作机器人等民用需求起量，国内本土供应商持续涌现，如宇立仪器、坤维科技、鑫精诚、海伯森、蓝点触控、神源生智能、瑞尔特测控等，均已有相关的产品落地并进入产业化应用。此外，昊志机电、柯力传感等已经具备六维力/力矩传感器的生产能力，部分产品型号开始进入下游用户的验证测试阶段。我们认为，伴随着机器人领域尤其是人形机器人批量应用带来的降本需求，六维力/力矩传感器国内供应商“试用-反馈-迭代-量产”的产业闭环有望逐步实现，而当前人形机器人产业链奇点时刻渐行渐近，国内供应链有望加速实现国产替代。建议关注：柯力传感、东华测试、昊志机电。

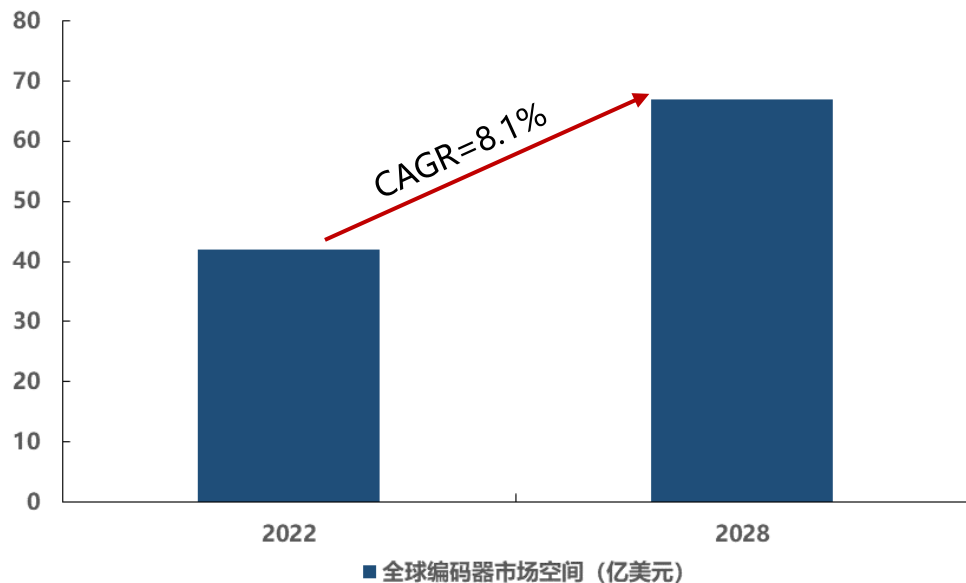
图表：国内主要六维力/力矩传感器布局企业

公司	六维力/力矩传感器布局
柯力传感	公司开发了三维力、六维力等多维力传感器，可用于机器手臂运动与工作载荷监测、曲面研磨抛光、加工中心精雕加工、医疗设备精密测控等，具有高精度、高灵敏度、抗偏载能力强、维间耦合小等特点。目前多维力系列产品仍处于小批量试制阶段。
东华测试	公司研发投入的六轴力传感器可应用于机器人、科学研究、自动化检测等领域。
昊志机电	公司六维力矩传感器当前主要应用在“按摩机器人”产品。
宇立仪器（未上市）	多轴力传感器产品包括六维力传感器、三维力传感器、一维力传感器和关节扭矩传感器。早期主要应用在汽车假人碰撞行业，目前，宇立仪器六维力传感器已拓展到机器人打磨领域，与ABB、库卡均有合作。
坤维科技（未上市）	坤维科技六维力传感器早期应用在火箭、导弹等高速飞行器的空气动力学性能参数测试，未来将主攻协作机器人、服务机器人及人形机器人市场，同时拓展医疗市场和运动健康市场。

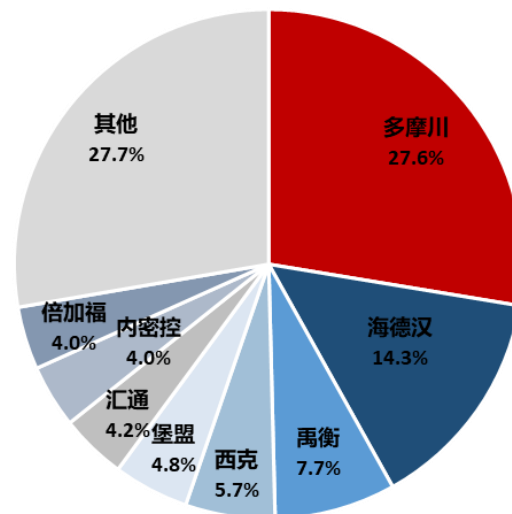
## 4.2 编码器：工业自动化等领域发展推动编码器行业持续扩容，国内头部企业已开始突破

- 预计2028年我国编码器市场规模将达7.4亿美元。** 编码器广泛应用于工业自动化设备和过程控制等领域，据MIR数据，2022年伺服和机床合计占我国编码器下游应用市场的53%。据尚普咨询数据，2022年全球编码器市场规模约42亿美元，未来工业自动化、机器人、航空航天等领域快速发展将驱动编码器行业持续扩容，预计2028年将达67亿美元，CAGR达8.1%，其中我国增速快于全球、占全球市场比重将从2022年的10%增长至2028年的11%。
- 外资企业占主要份额，国内头部企业已开始突破。** 我国高端编码器以进口为主，据MIR数据，2022年多摩川、海德汉两家合计在我国市占率约42%；我国本土领先供应商包括禹衡光学（奥普光电）、长春汇通（汇川技术）、宜科电子，其中禹衡光学在国内处于最领先地位、技术水平能够和外资竞争，2022年市占率约7.7%。

图表：预计2028年全球编码器市场空间将达67亿美元



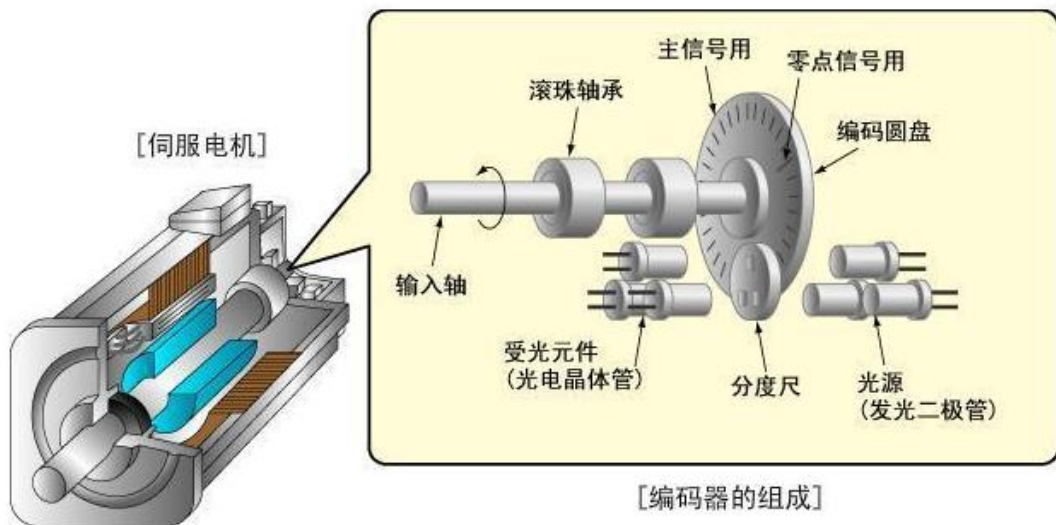
图表：禹衡光学为我国编码器头部厂商，2022年市占率达27.6%



## 4.2 编码器：用于运动控制的传感器，单BOT成本约8550元

- **编码器是用于转动位置检测的高精度传感器，单台人形机器人编码器价值量约8550元。** 编码器是一种用于运动控制的传感器，利用光电、电磁、电容或电感等感应原理检测物体的机械位置及其变化，并将此信息转换为电信号，再将电信号转换为可传输和存储的信号形式，最后反馈给各种运动控制装置。编码器在特斯拉人形机器人的旋转关节（14\*2）、直线关节（14\*1）、手部关节（12\*1）均有应用，合计单台价值量约8550元。
- **编码器按照工作原理可分为光学式、磁式、电容式三种。** 1) 光电式编码器精度高、稳定性好、抗干扰能力强，适用于高精度和高速度的测量，但价格较高、易受环境影响；2) 磁性编码器使用磁性码盘替代带槽光电码盘，相比于光学编码器更耐用、抗振和抗冲击，适用于恶劣环境下测量，但分辨率和精度相对较低；3) 电容式编码器具有高可靠性、高精度、长寿命的特点，适合电池供电应用。

图表：编码器应用示意图及结构拆解



图表：电容式、光学、磁式编码器性能对比

	电容式编码器	光学编码器	磁式编码器
耐脏、防尘、耐油	高	低	高
精密性	高	高	低
工作温度范围	宽	中	窄
功耗	低	高	中
可编程性	有	无	无
包装尺寸	低	中	中
EMC免疫能力	高	高	高
磁抗扰度	高	高	低
分辨率范围	宽	宽	窄

## 4.3 视觉传感器：纯视觉方案与多传感器融合方案并驾齐驱

- **特斯拉Optimus采用纯视觉方案，小米、宇树等大多使用多传感器融合方案结合实现环境感知。**视觉感知系统是机器人的“智慧之眼”，赋予机器人观察世界、规划执行的能力，包括环境识别、物体追踪、表情观察、路径规划等，是人形机器人实现人机交互的关键。现有的人形机器人视觉感知系统结合多模态感知能力和AI算法，实现环境理解、任务执行、安全和避障等功能，其中特斯拉Optimus采用纯视觉方案，小米、智元、宇树、优必选等大多采用3D视觉与传感器组合的方案。

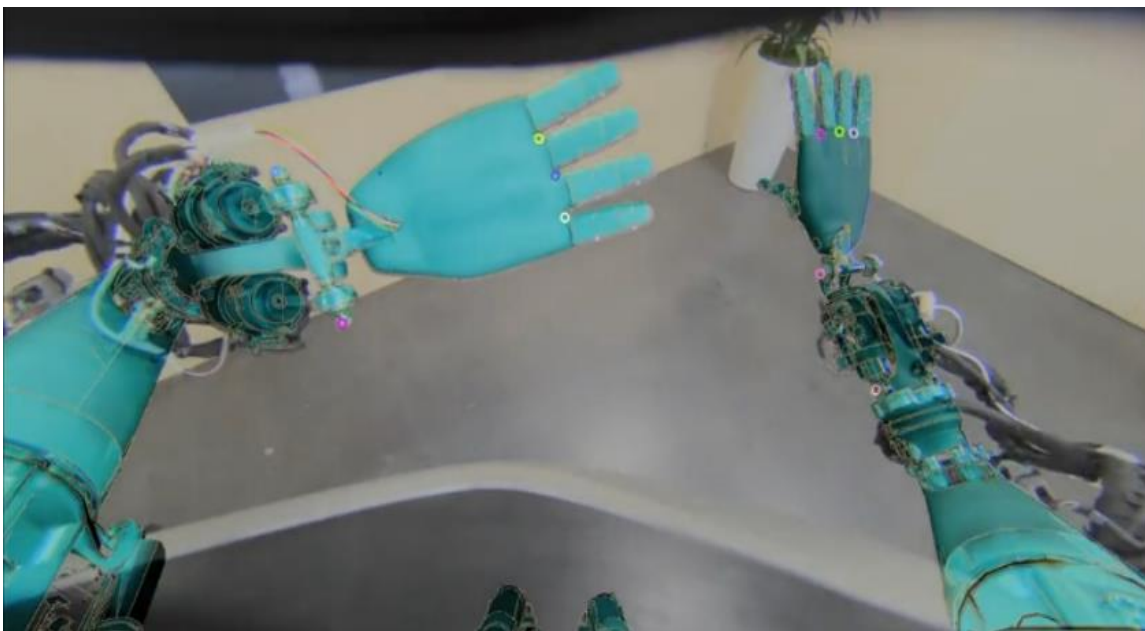
图表：特斯拉纯视觉方案与小米等机器人厂商多器件融合视觉方案对比

	机器人名称	视觉方案
特斯拉	Optimus	纯视觉方案，鱼眼摄像头、视觉摄像头*2
小米	CyberOne	Mi-Sense深度视觉模组，AI交互相机
	CyberDog 2	深度摄像头、AI交互摄像头、RGB摄像头、鱼眼摄像头、激光传感器
智元	远征A1	RGBD相机，激光雷达
宇树	Unitree H1	3D激光雷达，深度相机
优必选	Walker X	RGBD相机，四目立体视觉，超声波传感器
波士顿动力	Atlas	ToF深度相机，激光雷达

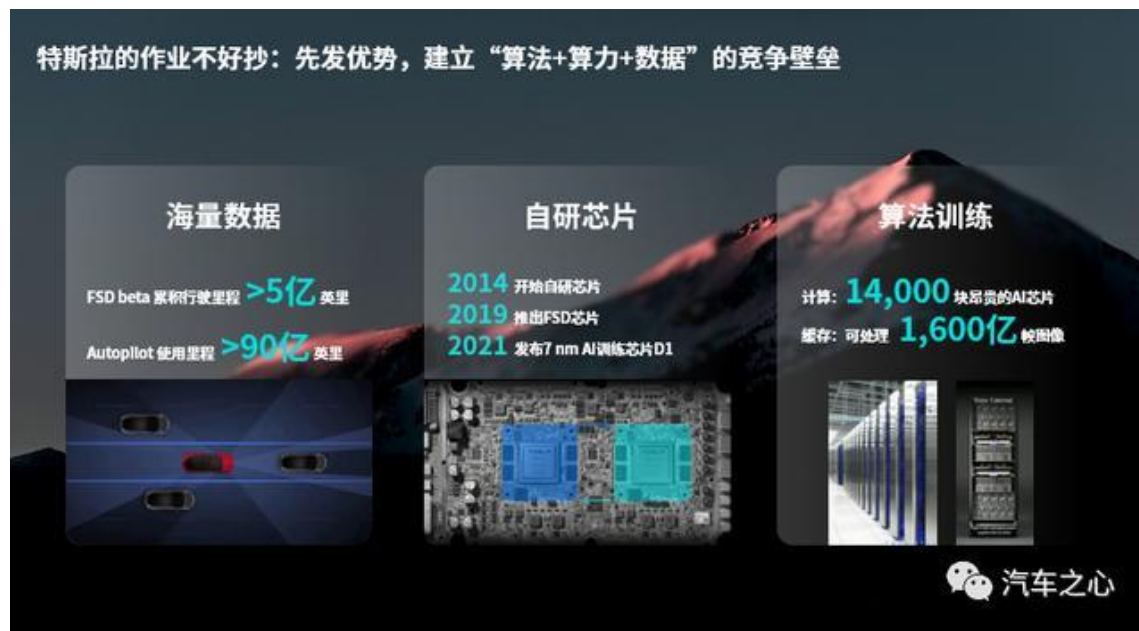
## 4.3 视觉传感器：特斯拉Optimus纯视觉方案与自动驾驶技术同源，“算法+算力+数据”是核心

- **特斯拉Optimus纯视觉方案复用自动驾驶底层技术，核心在于海量数据、自研芯片与算法训练。** 特斯拉Optimus的纯视觉方案搭载与特斯拉车相同的FSD电脑以及Autopilot相关神经网络技术，但实际应用场景相比汽车更加精细化，需要更多的数据积累及算法训练。2023年9月，特斯拉发布的人形机器人进展视频中显示，Optimus仅使用视觉和关节位置编码器就能准确判断物体位置、排除干扰做出指令，“端到端”神经网络本地运行，视觉输入图像后即可输出指令，无需联网或人工操作，自动驾驶在机器人上复用逻辑跑通。特斯拉纯视觉方案能够精准感知深度、速度、加速度信息，与通常的激光雷达融合方案相比硬件成本显著降低，而“算法+算力+数据”构筑了高竞争壁垒。

图表：特斯拉Optimus仅依靠纯视觉方案可识别物体、做出指令



图表：特斯拉纯视觉方案的竞争壁垒在于“算法+算力+数据”



## 4.3 视觉传感器：多传感器融合方案核心在于传感器选型与融合算法

- 多传感器融合方案：传感器和融合算法策略影响最终计算结果。** 多传感器融合技术将各类传感器进行多层次、多空间的信息互补和优化组合处理，最终产生对观测环境的一致性解释。不同传感器在不同环境下的检测能力和可靠性受到限制，多传感器融合可以提高目标检测和识别的准确性。机器人/汽车自动驾驶融合传感过程中，主要采用的传感器包括毫米波雷达、激光雷达、摄像机、超声波、IMU等，不同传感器工作特性有较大差异，如激光雷达和摄像机的组合可以获得具有深度的图像信息，双目和深度相机的应用允许图像数据具有深度信息，但精度较低。此外，融合算法的选择也会影响最终计算结果。

图表：常见视觉传感器优缺点比较

传感器类型	优点	缺点	最大工作距离
毫米波雷达	工作距离长、可测量径向速度、全天候适用	不适用于静态对象、易产生误报	5m-200m
摄像机	辨别能力出众、可测量横向速度、可识别颜色分布	计算量繁重、易受光干涉与天气影响、无法测量径向速度	250m (具体数字取决于镜头)
激光雷达	视野宽、距离分辨率与角度分辨率高	无法在恶劣天气下工作、价格高昂	200m
超声波	价格低廉	分辨率低、不适用于高速对象	2m
IMU	可测量物体姿态和状态（如加速度、角速度、角度）	精度和成本相关性很大	-
GNSS	通过对卫星、RTK定位和惯性导航进行结合实现对车辆定位	容易受到城市建筑、树木等障碍物的干扰	-

## 4.3 视觉传感器：产业链各环节国产进程持续深入，重点关注领先布局企业

- 3D视觉感知行业经过数十年发展，由早期工业级向消费级拓展，应用领域仍在不断拓宽，产业链各环节国产进程不断深入。重点关注国内领先布局企业，如：奥比中光、海康威视、奥普特、凌云光等。

图表：国内视觉传感器相关产品布局及进展

企业名称	公司视觉传感器产品种类	代表产品图片	机器人相关产品进展
奥比中光	3D视觉传感器		公司与微软合作的Femto系列iToF相机及今年新推出的Gemini 335、336系列相机可满足人形机器人在室内外复杂场景下执行视觉应用。
海康威视	机器视觉和移动机器人产品及解决方案		子公司海康机器人以视觉感知、AI和导航控制等技术为核心，持续在移动机器人、机器视觉领域深耕投入，推动生产、物流的数字化和智能化，目前已经在多个行业落地。
奥普特	3D视觉传感器		公司拥有完整的机器视觉核心软硬件产品，自主产品线已全面覆盖视觉算法库、智能视觉平台、深度学习（工业AI）、光源、光源控制器、工业镜头、工业相机、智能读码器、3D传感器。
凌云光	可配置视觉系统、智能视觉装备		FZMotion运动捕捉系统研发项目2.0能够稳定输出自动化智能设备的空间坐标、轨迹、面积等，可应用于人形机器人、机械臂、仿生机器人、无人机、无人车、灵巧手等领域。

## 4.4 触觉传感器：赋予机器人触觉感知交互能力，特斯拉Optimus Gen-2有望引领行业加速应用

- **触觉传感器是机器人与外界环境交互的重要元件，使机器人拥有人类触觉。** 触觉是人类通过皮肤感知外界环境的一种形式，机器人触觉主要感知机器人与外界环境接触时的温度、湿度、压力和振动等物理量，以及目标物体材质的软硬程度、物体形状和结构大小等，从而实现对物体的精准定位以及执行各种操作任务。
- **特斯拉Optimus Gen-2手指搭配柔性触觉传感器，有望引领行业新趋势。** 12月13日，特斯拉发布Optimus-Gen2演示视频，灵巧手新方案共11个自由度，每根手指搭配触觉传感器，操作更加灵活，是相比上一代最大的边际变化之一，在特斯拉引领下国内机器人厂商也有望持续推进触觉传感器的应用。

图表：帕西尼感知科技-基于视触觉双模态模型控制架构



图表：特斯拉Optimus-Gen2手部搭配触觉传感器





## 4.4 触觉传感器：压阻式和电容式较为常用，大阵列、柔性化是主要发展方向

- **电容式、压阻式和压电式是常见的触觉传感器。**触觉传感器按照原理主要分为电容式、压阻式、压电式、磁敏式、光纤式，其中压阻式传感器适用于监测恒定的压力变化，电容式传感器结构简单、在可穿戴和医疗保健设备中广泛应用，压电式传感器适用于检测压力频繁变化的场景。
- **大阵列、柔性化、多功能化、多维度、自供电等是触觉传感器的重要发展趋势。****大阵列：**触觉传感器与物体表面接触面积越大，获取的信息量越多，阵列化、高密度触觉传感器可获取不同位置、不同时间的触觉信息。**柔性化：**柔性传感器能够覆盖在非规则、非平整的表面上，便于携带和安装。**多功能化：**多功能触觉传感器可同时实现压力、拉力、温度、表面粗糙度等多种参数的测量。

图表：触觉传感器主要包括电容式、压阻式、压电式、磁敏式、光纤式

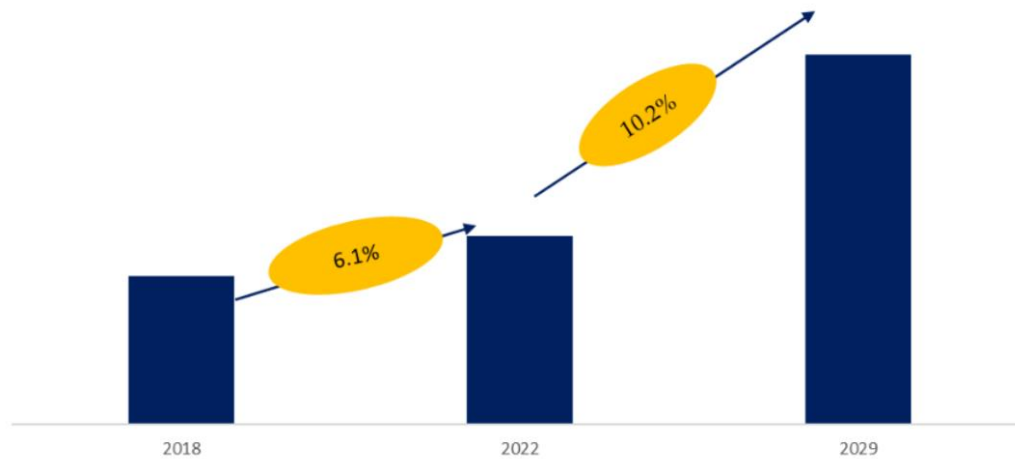
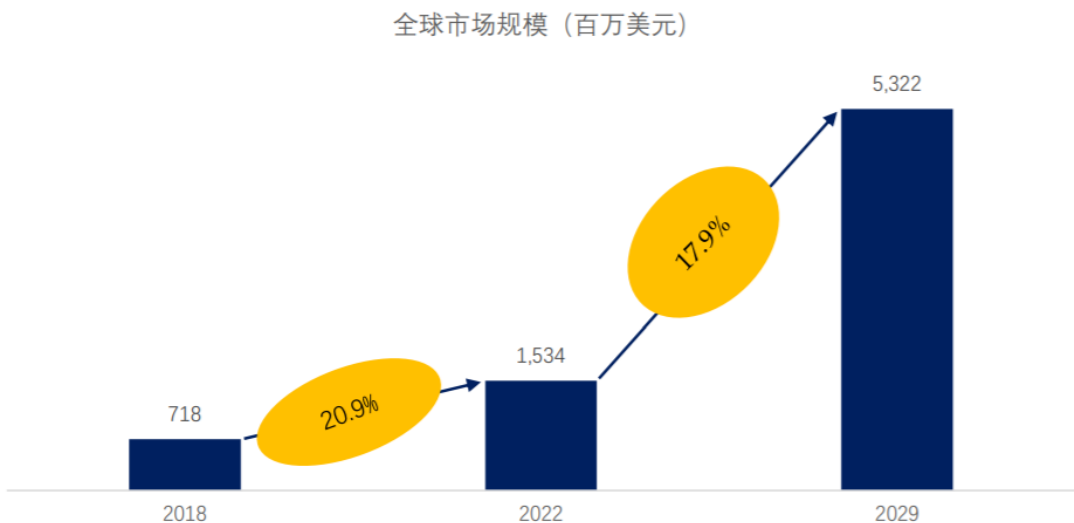
原理	结构示意图	原理	优点	缺点
电容式		在外力作用下两极板间的相对位置发生变化，从而导致电容变化，通过检测电容变化量来获取受力信息。	动态范围大，良好的线性响应，动态响应快，结构简单，适应性强	电容值随物理尺寸的增加而增加，限制了空间分辨率；容易受到噪声干扰
压阻式		利用弹性材料的电阻率随压力大小的变化而变化的性质制成，并把接触面上的压力信号变为电信号。	动态范围宽，过载承受能力较强	体积大，不易集成，信号采集电路复杂，压敏电阻漏电流不稳定
压电式		基于压电效应，当对压电元件施加外部压力时，压电材料产生的自发极化现象会在界面处产生电荷，形成电场，通过检测电信号变化来反映压力的变化。	动态范围宽，机械性能耐久性好	压电响应与热电响应同时存在
磁敏式		在外力作用下磁场发生变化，并把磁场的变化通过磁路系统转换为电信号，从而感受接触面上的压力信息。	机械位移量大、结构简单	各触觉传感点较难做到一致性，磁铁的磁场分布不均匀，分辨率很难提高
光纤式		将传感器所受压力映射为光信号强度、波长等性质的变化，通过检测光学信号来检测传感器所受压力。	空间分辨率高，不受电磁干扰，处理电路空间上与传感器分开	两向力以上共同作用时，很难保持线性关系，标定困难，精度难以提高

## 4.4 触觉传感器：机器人触觉传感器潜在应用场景大，预计2029年全球市场规模约4.3亿美元

- **预计2029年全球柔性触觉传感器市场规模53.22亿美元。**除了智能机器人领域发展较快外，柔性触觉传感器在工业设备、医疗器械、消费电子、体育器材等领域也得到广泛应用。据QYResearch数据，2022年全球柔性触觉传感器的市场规模约15.3亿美元，预计2029年将增长至53.22亿美元，2022-2029年CAGR为17.9%。
- **预计2029年全球机器人触觉传感器市场规模约4.3亿美元。**目前触觉传感器在机器人中主要应用于手/手指，未来各场景更精细的触觉感知能力需求将推动机器人触觉传感器需求进一步增加，如人形机器人的肢体、胸腔等部位有望成为潜在应用场景。据QYResearch数据，预计2029年全球机器人触觉传感器市场空间将达到4.3亿美元，2022-2029年CAGR达10.2%。

图表：2022-2029年全球柔性触觉传感器市场规模CAGR为17.9%

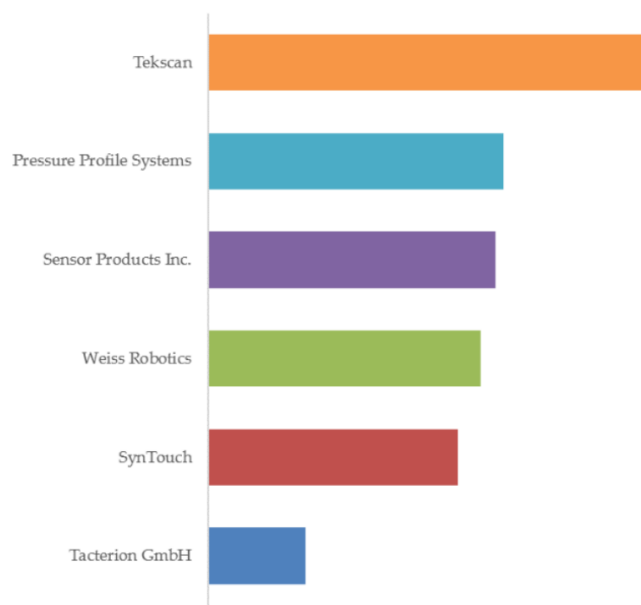
图表：2029年全球机器人触觉传感器市场规模将达4.3亿美元



## 4.4 触觉传感器：技术进步推动量产提速，国内企业有望崭露头角

- **触觉传感器研发制造加工大，工艺技术进步推动量产提速。** 1) 材料：需要弯曲、延展、挤压、扭转或变形成复杂的形状以适用于各种凹凸不平的表面；2) 制造：高灵敏度电子皮肤触觉传感器的制作通常涉及聚合物加工、氧等离子体处理等复杂的工艺和技术，加工难度大、设备价格较高；3) 信号处理：触觉传感器测量变量多、不同信号间存在干扰，标定机制较为复杂。近年来聚合物/纳米复合材料、3D打印等技术的出现使得触觉传感器的制造痛点逐渐被解决，产业规模量产正在提速。
- **国内触觉传感器厂商有望借助人形机器人产业链崭露头角。** 全球机器人触觉传感器市场集中度高，主要企业包括Tekscan、Pressure Profile System、Sensor Products Inc.等，据QYResearch数据，2022年全球CR5市占率约为76%；国内领先布局企业包括汉威科技、奥迪威、申昊科技、帕西尼、墨现科技等，有望在人形机器人浪潮中实现弯道超车。

图表：2022年全球机器人触觉传感器CR5合计市占率达76%



图表：国内触觉传感器主要企业及进展情况

公司	触觉传感器进展情况
汉威科技	子公司苏州能斯达专注于柔性微纳传感技术的研发和生产，应用领域包括消费电子、健康医疗、IOT等。
申昊科技	围绕电子皮肤应用场景，公司布局包括远距离的距离感知传感器、近距离的位置感知、触碰接触感知、指尖力传感、柔性电子皮肤等方向。
奥迪威	公司可用于人形机器人的产品包括隐藏式超声波避障传感器、触觉传感器、超声波材质识别传感器、触觉反馈执行器等。
帕西尼（未上市）	拥有行业一流机器人产品及方案，包含多维度触觉传感器PX-6AX、消费级触觉传感器PX-3A、触觉灵巧手DexH5以及人形机器人Tora。
墨现科技（未上市）	现有的柔性压力传感器解决方案，可以满足高可靠性、低触发力度、大量程、低成本的需求，广泛适用于机器人、电子乐器、医疗检测、成人玩具等领域。

1. 人形机器人：行则将至，量产可期

2. 人形机器人拆解及产业链总览

3. 执行系统：灵活关节，丝杠、电机、减速器是关键

4. 感知系统：交互之媒，多传感器综合赋能

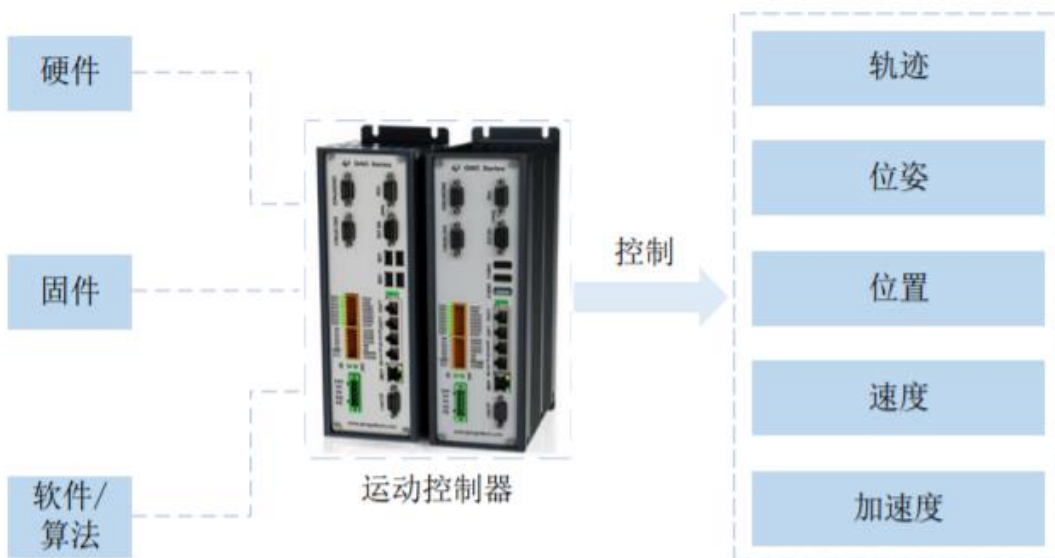
**5. 控制系统：智能“小脑”，核心算法自研为主**

6. 投资建议

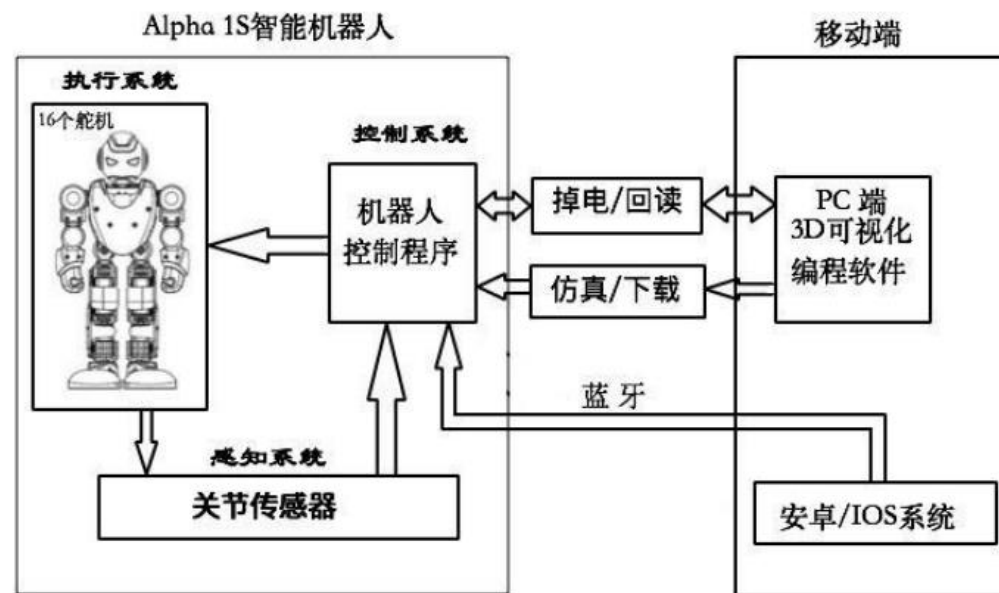
## 5. 控制系统：机器人的“小脑”，壁垒在于通信、算力和软件

- **控制系统充当机器人的“小脑”**。运动控制是指对机械运动部件的位置、速度、方向等进行实时控制，使其按照预期的运动轨迹和规定的运动参数进行运动。运动控制系统一般包括控制器、驱动器+电机（执行器）和传感器三大部分组成，其中控制器具体作用为接收操作指令后进行运动轨迹规划，为电机或其他动力和执行装置提供正确的控制信号。
- **人形机器人控制系统的壁垒主要在于通信、算力和软件**。1) 通信：众多伺服关节需解决高速同步通信难点，走线要求高；2) 算力：计算复杂度随着自由度的增加而显著增加，算法也需要适应不同工作环境，对控制器的算力要求高；3) 软件：控制系统需提供实时运行框架满足不同运行周期的算法APP实时计算的要求。

图表：运动控制器主要由硬件、固件、软件组成



图表：优必选Alpha 1S智能机器人控制系统架构



## 5. 控制系统：目前控制器尚未形成通用方案，各家以自研为主

- **人形机器人采用分布式控制，控制器多为自研。** 机器人控制系统按照控制方式可分为集中控制、主从控制和分布式控制，传统工业机器人一般有3~6个自由度，采用集中控制或主从控制即可实现各个轴之间的耦合关系处理；人形机器人通常有数十个关节自由度，采用分布式控制有利于系统功能的并行执行、缩短响应时间，即每个关节配置一个控制器、胸腔配置总控制器，将大幅增加控制器需求。一般控制器需要根据机器人的任务场景与需求具体设计开发，需要满足低功耗、高算力、高集成度等要求，目前人形机器人场景尚未明确，且各家对于算力的需求存在差异，因此控制器以自研为主。

图表：机器人厂商控制算法多为自研，控制系统采用分布式控制

	产品名称	控制系统方案
特斯拉	Optimus	采用基于FSD的端到端神经网络控制方法，通过直接处理视觉输入来控制自身动作。其搭载Tesla汽车相同Dojo D1超级计算芯片，基于全身各部位传感器信号进行决策和反馈控制。
小米	CyberOne	小米自研全身控制算法，协调运动21个关节自由度。
	CyberDog 2	使用双协处理器，即相当于两个“小脑”，系统代码开源，结构图纸开放，功能接口开放，可视化编程。
智元	远征A1	偏向于硬件底层的电机控制等工作都在本地甚至模块中完成，运动控制算法经过几个月迭代到最近使用的非线性的NMPC，目前正在开发基于各种learning（比如强化学习）的方法。
宇树	Unitree H1	借鉴了四足机器人的控制算法，使用全身力控制(WBC)和模型预测控制(MPC)。MPC包括预测系统未来动态、求解开环优化问题、将优化解的第一个元素作用于系统三个步骤，使人形机器人可以适应在复杂地形和环境中的运动。
优必选	Walker X	采用多主控板卡架构，所有算法APP能够在不同主控板卡上进行分布式计算。采用EtherCAT实时高速以太网，整个控制系统可以支持不少于50个节点，同时还具备拓扑关系的适应性，保证众多伺服关节高速同步通信。
波士顿动力	Atlas	硬件层面，本体搭载3台NUC/工控机负责整体控制系统的运算；软件层面，线轨迹库+在线精细控制的MPC控制器是Atlas的控制核心。配备的模型预测控制器(MPC)使用机器人动力学模型来预测机器人未来的动作，会调整其发力、姿势、动作发生时机等细节来优化并产生最佳动作。

1. 人形机器人：行则将至，量产可期

2. 人形机器人拆解及产业链总览

3. 执行系统：灵活关节，丝杠、电机、减速器是关键

4. 感知系统：交互之媒，多传感器综合赋能

5. 控制系统：智能“小脑”，核心算法自研为主

**6. 投资建议**

## 6. 投资建议：2024年重点关注执行器、传感器、降本新技术、设备方向

- 人形机器人产业趋势明确，目前产业进入从0到1的重要突破阶段，2024年是突破量产的关键一年，后续应重视技术迭代、定点、新品发布等事件催化，我们建议重点关注以下投资方向：
  - **1) 执行器&传感器：**此前执行器市场挖掘比较充分，后续重点跟踪各厂商送样进度，从技术难度上看，丝杠 > 减速器 > 电机；传感器是现阶段重点迭代方向，触觉传感器、六维力矩传感器是高壁垒、高确定性的方向。
    - ✓ 相关标的：①丝杠：北特科技、贝斯特、恒立液压、五洲新春；②减速器：绿的谐波、中大力德；③电机：步科股份；④传感器：汉威科技、敏芯股份、华依科技、东华测试、柯力传感。
  - **2) 核心加工设备：**人形机器人零部件资本开支启动将带来核心设备放量，从自主可控紧迫性程度看，磨床 > 车床 > 绕线机。
    - ✓ 相关标的：①磨床：日发精机、华辰装备、鼎泰高科；②车床：浙海德曼；③绕线机：田中精机。
  - **3) 降本新技术方向：**关节与材料降本/轻量化也将是下一阶段机器人厂商竞争的重点，如PEEK材料、球墨铸铁工艺、冷锻工艺等。
  - **4) 国内人形机器人厂商：**特斯拉引领下，国内厂商将加速突围，政策支持下国内主机厂也将迎来量产。
    - ✓ 相关标的：博实股份、禾川科技等。



## 6. 重点关注高确定性、高壁垒、高弹性的环节，如总成、丝杠、减速器、电机、传感器等

图表：人形机器人潜在供应链标的盈利预测及估值（取2024.9.18收盘价，盈利预测为iFind一致预期）

分类	公司名称	公司代码	总市值 (亿元)	归母净利润 (亿元)				PE			
				2023A	2024E	2025E	2026E	2023A	2024E	2025E	2026E
总成	三花智控	002050	653.21	29.21	34.82	41.14	48.38	22.36	18.76	15.88	13.50
	拓普集团	601689	600.22	21.51	29.30	37.78	46.43	27.91	20.49	15.89	12.93
丝杠	北特科技	603009	63.74	0.51	0.74	1.13	1.63	125.31	85.72	56.45	39.21
	贝斯特	300580	63.94	2.64	3.29	4.20	5.18	24.27	19.43	15.22	12.33
	恒立液压	601100	704.87	24.99	27.23	32.14	38.34	28.21	25.89	21.93	18.38
	秦川机床	000837	68.17	0.52	1.37	2.09	2.96	130.44	49.81	32.69	23.06
电机	鸣志电器	603728	147.36	1.40	1.65	2.23	2.85	104.92	89.27	66.04	51.71
	步科股份	688160	26.81	0.61	0.83	1.06	1.34	44.18	32.21	25.21	19.96
	禾川科技	688320	32.92	0.54	0.85	1.10	1.46	61.47	38.96	29.91	22.57
减速器	绿的谐波	688017	103.67	0.84	1.05	1.48	1.98	123.19	98.59	69.90	52.39
	中大力德	002896	37.81	0.73	0.96	1.16	1.40	51.69	39.47	32.55	26.97
	双环传动	002472	177.72	8.16	10.36	12.93	15.67	21.77	17.15	13.75	11.34
	丰立智能	301368	39.98	0.24	-	-	-	165.96	-	-	-
传感器	柯力传感	603662	68.13	3.12	3.40	4.13	4.89	21.81	20.05	16.48	13.94
	敏芯股份	688286	18.02	-1.02	-0.12	0.38	0.72	-17.69	-150.69	47.10	24.91
	汉威科技	300007	39.42	1.31	1.53	1.73	2.10	30.14	25.69	22.80	18.76
	东华测试	300354	38.95	0.88	1.80	2.42	3.08	44.39	21.62	16.13	12.63
编码器	奥普光电	002338	64.10	0.87	1.00	1.42	1.80	73.99	64.40	45.16	35.66
设备	日发精机	002520	35.53	-9.03	-	-	-	-3.94	-	-	-
	鼎泰高科	301377	62.36	2.19	2.68	3.51	4.44	28.44	23.29	17.76	14.05

- **AI技术进步不及预期：**软件技术决定机器人的智能性，若AI技术进步不及预期，将对人形机器人产生不利影响；
- **人形机器人量产进度不及预期：**当前主流的人形机器人方案尚未定型，且成本仍存在较大下降空间，若人形机器人量产进度不及预期，将对产业链公司产生不利影响；
- **国产化推进不及预期：**国内产业链虽然有成本优势，但技术水平与国外仍存在一定差距，存在国产化推进不及预期的风险；
- **地缘政治风险：**中美贸易关系或其他地缘政治冲突可能会导致国内公司较难进入海外机器人供应链。



**邹润芳**

中航证券总经理助理兼研究所所长  
先后在光大、中国银河、安信证券负责机械军工行业研究，在天风证券负责整个先进制造业多个行业小组的研究。作为核心成员五次获得新财富最佳分析师机械（军工）第一名、上证报和金牛奖等也多次第一。在先进制造业和科技行业有较深的理解和产业资源积淀，并曾受聘为多家国有大型金融机构和上市公司的顾问与外部专家。团队擅长自上而下的产业链研究和资源整合。  
SAC: S0640521040001



**卢正羽:**

先进制造业研究员  
香港科技大学理学硕士，2020年初加入中航证券研究所，覆盖通用设备、军民融合和计算机板块。  
SAC: S0640521060001



**闫智:**

先进制造业研究员  
南京大学工学硕士，2022年7月加入中航证券研究所，覆盖机器人、工业母机、锂电设备等。  
SAC: S0640524070001



**龙铖:**

先进制造业研究员  
上海交通大学工商管理硕士，2023年7月加入中航证券研究所，覆盖智能车、光伏设备、光热设备。  
SAC: S0640124040003

**我们设定的上市公司投资评级如下:**

- 买入** : 未来六个月的投资收益相对沪深300指数涨幅10%以上。
- 持有** : 未来六个月的投资收益相对沪深300指数涨幅-10%-10%之间
- 卖出** : 未来六个月的投资收益相对沪深300指数跌幅10%以上。

**我们设定的行业投资评级如下:**

- 增持** : 未来六个月行业增长水平高于同期沪深300指数。
- 中性** : 未来六个月行业增长水平与同期沪深300指数相若。
- 减持** : 未来六个月行业增长水平低于同期沪深300指数。

**分析师承诺**

负责本研究报告全部或部分内容的每一位证券分析师，在此申明，本报告清晰、准确地反映了分析师本人的研究观点。本人薪酬的任何部分过去不曾与、现在不与、未来也将不会与本报告中的具体推荐或观点直接或间接相关。风险提示：投资者自主作出投资决策并自行承担投资风险，任何形式的分享证券投资收益或者分担证券投资损失的书面或口头承诺均为无效。

**免责声明**

本报告由中航证券有限公司（已具备中国证券监督管理委员会批准的证券投资咨询业务资格）制作。本报告并非针对意图送发或为任何就送发、发布、可得到或使用本报告而使中航证券有限公司及其关联公司违反当地的法律或法规或可致使中航证券受制于法律或法规的任何地区、国家或其它管辖区域的公民或居民。除非另有显示，否则此报告中的材料的版权属于中航证券。未经中航证券事先书面授权，不得更改或以任何方式发送、复印本报告的材料、内容或其复印本给予任何其他人。未经授权的转载，本公司不承担任何转载责任。

本报告所载的资料、工具及材料只提供给阁下作参考之用，并非作为或被视为出售或购买或认购证券或其他金融票据的邀请或向他人作出邀请。中航证券未有采取行动以确保于本报告中所指的证券适合个别的投资者。本报告的内容并不构成对任何人的投资建议，而中航证券不会因接受本报告而视他们为客户。

本报告所载资料的来源及观点的出处皆被中航证券认为可靠，但中航证券并不能担保其准确性或完整性。中航证券不对因使用本报告的材料而引致的损失负任何责任，除非该等损失因明确的法律或法规而引致。投资者不能仅依靠本报告以取代行使独立判断。在不同时期，中航证券可发出其它与本报告所载资料不一致及有不同结论的报告。本报告及该等报告仅反映报告撰写日分析师个人的不同设想、见解及分析方法。为免生疑，本报告所载的观点并不代表中航证券及关联公司的立场。

中航证券在法律许可的情况下可参与或投资本报告所提及的发行人的金融交易，向该等发行人提供服务或向他们要求给予生意，及或持有其证券或进行证券交易。中航证券于法律容许下可于发送材料前使用此报告中所载资料或意见或他们所依据的研究或分析。