

机械设备

中美共振，人形机器人产业奇点到来

AI 赋能机器人及 Optimus 进展成为双主线。人形机器人产业趋势的共识在多轮行情中逐渐形成，呈现 AI 技术发展+产业巨头加持+政策支持的重三重共振，AI 赋能机器人及特斯拉 Optimus 进展也成为板块的双主线。多模态视觉语言模型与机器人的结合超大众预期。2023 年 12 月特斯拉发布 Optimus Gen-2 的视频，相比于第一代 Optimus 人形机器人，第二代 Optimus 增加六维力传感器、触觉传感器，进步明显，速度快 30%、重量减轻 10kg。

灵巧手：空心杯电机是最可靠动力源，传动方案多样。灵巧手是人形机器人的亮点，是具备高度灵活和精细控制能力的末端执行器。从动力源看，目前空心杯电机仍是最可靠方案，空心杯作为高效的微特电机，天然适配灵巧手。传动方面，绳驱与连杆为当前主流，其中绳驱方案一定程度上模拟了人手的肌腱结构，排布灵活且需要的内部空间较小，是最具潜力的方案。

旋转执行器：减速器是核心，谐波仍为当前主流方案。旋转执行器是机器人普遍采用的执行器，适用在机器人关节处，核心是减速器。特斯拉在 2023 年 AI day 上展示了三款旋转执行器，对应小中大三个功率等级。旋转执行器的动力源通常是无框力矩电机，而减速器则存在不同方案的选择。常用的精密减速器当中，行星减速器与谐波减速器是较适合于机器人的种类，其中谐波减速器由于其高传动比的特性，是人形机器人性能最优的方案。

线性执行器：行星滚柱丝杠和大功率密度电机是关键，设备国产化是丝杠大规模量产前提。线性执行器是特斯拉人形机器人的特色方案，主要由电机+丝杠组成，主要用于大臂、和下肢。特斯拉对于线性执行器的要求主要是大行程、承载力足够大、且体积小、反应速度快。对于电机而言，大功率密度电机更符合需求，但是工艺上仍需要解决大功率密度电机中存在的噪音大、效率低、温度高等问题。对于丝杠而言，反向式行星滚柱丝杠负载更大、体积更小，更适合用于人形机器人。

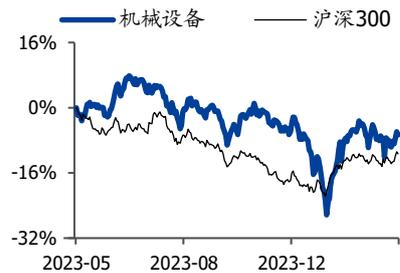
机器人加速国内传感器行业发展，国内传感器厂商为机器人蓄力。机器人了解周围环境需要广泛的信息，传感器是重要的“中介”，是机器人软硬件结合关键步骤之一，人形机器人需要的传感器种类繁多，包括但不限于触觉/力/扭矩/视觉/惯性等传感器，传感器技术涉及物理、电子、材料学等多种学科融合，存在极高的技术壁垒，因此过去在传感器市场中占据一席之地的更多是国外厂商。行至今日，国内众多优秀的传感器公司如雨后春笋般出现，如发布多维触觉传感器的帕西尼、具备全方位 3D 视觉产业链技术的奥比中光、具备玻璃微熔拉压力传感器技术的安培龙等，国内传感器厂商有望在人形机器人浪潮中充分受益。

投资建议：（1）第一梯队：鸣志电器、绿的谐波、三花智控、拓普集团、金力永磁；（2）丝杠&设备：北特科技、贝斯特、五洲新春、浙海德曼、华辰装备、日发精机；（3）传感器：安培龙、峰昭科技、东华测试、柯力传感、汉威科技。

风险提示：机器人量产进度不及预期、产业链国产化进度不达预期、测算误差风险。

增持（维持）

行业走势



作者

分析师 张一鸣

执业证书编号：S0680522070009

邮箱：zhangyiming@gszq.com

分析师 邓宇亮

执业证书编号：S0680523090001

邮箱：dengyuliang@gszq.com

研究助理 刘嘉林

执业证书编号：S0680122080032

邮箱：liujialin@gszq.com

相关研究

- 《机械设备：Mobile Aloha 发布，机器人场景泛化能力进一步强化》2024-01-12
- 《机械设备：机器人硬件拆解七：丝杠生产工艺流程详解》2023-12-21
- 《机械设备：机器人硬件拆解六：末端触觉与力控》2023-12-21



内容目录

一、AI 赋能机器人及 Optimus 进展成为双主线	5
1.1 复盘：AI 技术发展&产业巨头加持&政策支持三重共振.....	5
1.2 2024 年多模态视觉语言模型与机器人的结合超大众预期.....	8
1.3 特斯拉工程化能力强，Optimus 有望加快交付	16
二、硬件：机器人是 AI 与执行器的结合	19
2.1 灵巧手：空心杯电机是最可靠动力源，传动方案多样.....	19
2.2 旋转执行器：减速器是核心，谐波仍为当前主流方案.....	25
2.3 线性执行器：行星滚柱丝杠和大功率密度电机是关键，设备国产化是丝杠大规模量产前提	29
2.4 传感器是人形机器人与 AI 结合的关键之一	44
三、投资建议	58
风险提示	59

图表目录

图表 1: 人形机器人行情复盘 (基于 wind 人形机器人指数)	5
图表 2: 机器人行业的三重共振	6
图表 3: RT-2 模型执行将番茄酱推向蓝色方块的指令, 展现了强大的泛化能力.....	6
图表 4: 采用 NVIDIA Jetson 芯片的迪士尼 orange 机器人	7
图表 5: 中美机器人相关政策梳理	8
图表 6: LLM 在机器人上的应用	9
图表 7: RT-1 模型下的机器人在各个场景中的任务训练	10
图表 8: RT-2 的架构与训练	11
图表 9: Mobile ALOHA 的数据效率	12
图表 10: Mobile ALOHA 远程操作的学习曲线	12
图表 11: Figure 01	12
图表 12: 英伟达 GTC 大会展示的机器人	12
图表 13: 英伟达公布的 Project GR00T 项目	13
图表 14: Blackwell 架构 GPU.....	14
图表 15: Isaac 平台.....	14
图表 16: 汽车装配线.....	14
图表 17: 汽车装配线.....	14
图表 18: Figure 与宝马达成合作将 Figure 01 引入汽车工厂.....	15
图表 19: Apollo 机器人在奔驰厂.....	16
图表 20: 优必选 Walker S 在蔚来电动汽车装配线上.....	16
图表 21: 2021 年 8 月特斯拉展示了人形机器人 Tesla Bot 概念	16
图表 22: 2022 年 9 月-2023 年 9 月特斯拉发布 Optimus Gen-1 并相继发布相关视频.....	17
图表 23: 2023 年 12 月特斯拉发布 Optimus Gen-2	17
图表 24: 特斯拉 Optimus 第二代与第一代对比	18
图表 25: 特斯拉 Optimus 硬件拆解.....	19
图表 26: 人手共有 21 个自由度.....	20
图表 27: 因时 RH56BFX 灵巧手具备 6 个自由度.....	20
图表 28: 采用适应性欠驱动结构设计的灵巧手 (HERI Hand)	21
图表 29: 采用适应性欠驱动结构设计的灵巧手 (耶鲁大学的欠驱动手)	21

图表 30: 多指灵巧手第一、第二阶段典型代表.....	21
图表 31: 空心杯电机和普通电机结构存在差异.....	22
图表 32: 空心杯电机部分重点下游应用领域.....	22
图表 33: 有刷空心杯电机结构图.....	23
图表 34: 无刷空心杯电机结构图.....	23
图表 35: 空心杯电机的两种成形方式.....	23
图表 36: 空心杯电机通用的绕制方法（按缠绕方式分）.....	23
图表 37: 腱绳传动灵巧手.....	24
图表 38: 连杆/齿轮/带传动灵巧手.....	24
图表 39: 采用滚珠丝杠连接的腱绳传动结构.....	24
图表 40: 灵巧手核心标的.....	25
图表 41: 特斯拉在 AI DAY 展示的 Optimus 旋转执行器与线性执行器.....	25
图表 42: 四类精密减速器介绍.....	26
图表 43: 谐波减速器零部件拆分.....	26
图表 44: 绿的谐波 2019 年主要原材料成本构成.....	26
图表 45: 2021 年哈默纳科下游应用分布情况.....	27
图表 46: 谐波减速器专利申请构成.....	27
图表 47: 2022 年中国谐波市场竞争格局.....	27
图表 48: 谐波减速机主要厂商.....	28
图表 49: 旋转执行器核心标的.....	28
图表 50: 丝杠的分类.....	29
图表 51: 梯形滑动丝杠结构示意图.....	30
图表 52: 滚珠丝杠（左）与行星滚柱丝杠（右）的结构示意图.....	31
图表 53: 静压丝杠的丝杠被替换为楔形垫块.....	31
图表 54: 不同丝杠的特征对比.....	32
图表 55: 无框力矩电机.....	33
图表 56: 步进电机、伺服电机结构原理图.....	33
图表 57: 反向式行星滚柱丝杠结构示意图.....	34
图表 58: 特斯拉 Optimus 应用丝杠的部位（右左对称使用）.....	35
图表 59: 人形机器人丝杠市场空间敏感性分析.....	35
图表 60: 行星滚柱丝杠误差来源.....	36
图表 61: 丝杆-冷轧工艺加工示意图.....	36
图表 62: 丝杠-旋风铣工艺加工示意图.....	36
图表 63: 丝杠-车床车削加工示意图.....	37
图表 64: 丝杠-砂轮磨削加工示意图.....	37
图表 65: 工艺对比-旋风铣 VS 硬车 VS 砂轮磨.....	37
图表 66: 梯形丝杠加工工艺流程.....	38
图表 67: 滚珠丝杠-螺杆部分工序图.....	38
图表 68: 滚珠丝杠-螺母部分工序图.....	38
图表 69: 行星滚柱丝杠-丝杠加工工艺流程.....	39
图表 70: 行星滚柱丝杠-螺母加工工艺流程.....	39
图表 71: 行星滚柱丝杠-滚柱加工工艺流程.....	39
图表 72: 行星滚柱丝杠-内齿圈加工工艺流程.....	40
图表 73: 国内外螺纹磨床主要参会厂家.....	41
图表 74: 人形机器人带来高精度磨床设备市场空间.....	42
图表 75: 丝杠和丝杠设备企业主要核心标的.....	43

图表 76: 力传感器按测量的力的类型分类	44
图表 77: 力传感器按测量的力的类型分类	45
图表 78: 三维/六维力传感器适用情况.....	45
图表 79: 六维力传感器在机械臂中的使用	45
图表 80: 六维力传感器在人形机器人的市场空间测算.....	46
图表 81: 各类型力矩传感器特点.....	46
图表 82: 各类六维力传感器的特性	47
图表 83: 六维力传感器结构	47
图表 84: 多维触觉传感器 PX-6AX	48
图表 85: 多维触觉传感器 PX-6AX 各项性能优异	49
图表 86: 多维触觉传感器 PX-6AX 工作路径显示	49
图表 87: 柔性传感器分类.....	50
图表 88: 电子皮肤具备多功能.....	51
图表 89: 全球柔性电子市场规模 (十亿美元)	51
图表 90: 阵列式柔性薄膜压力传感器.....	52
图表 91: 柔子电子皮肤结构.....	52
图表 92: 电子皮肤基本平面结构.....	52
图表 93: 电子皮肤应用原理	52
图表 94: 柔性传感器技术性能关键问题.....	53
图表 95: 无刷电机与有刷电机对比	54
图表 96: 伺服电机编码器.....	54
图表 97: 右边三个是霍尔传感器.....	54
图表 98: 闭环霍尔电压传感器.....	54
图表 99: 磁编码器工作原理	55
图表 100: 霍尔效应.....	55
图表 101: 光电编码器的结构示意图	55
图表 102: 电容式编码器工作路径.....	55
图表 103: 增量式编码器工作原理.....	56
图表 104: 传感器主要 A 股上市公司 (排名不分先后)	57

一、AI 赋能机器人及 Optimus 进展成为双主线

1.1 复盘：AI 技术发展&产业巨头加持&政策支持三重共振

行情复盘：人形机器人从 2022 年二季度开始进入大众视野，在多轮行情的交易与博弈中，产业趋势的共识逐渐形成。

1) 2022 年 4 月，马斯克接受公开访谈，声称已在布局人形机器人，随后产业链消息不断，行情启动。2022 年 6 月 3 日马斯克在推特预告，人形机器人原型机“擎天柱”(Optimus)可能在 9 月 30 日 AI DAY 发布，进一步带动行情。

2) 8 月中旬板块达到高点后开始回调，参与者对 AI DAY 持观望态度。9 月 30 号 AI DAY 上展示的机器人无超预期表现，板块继续回调，之后经历 3 个月的盘整期，直到 AI 行情到来。

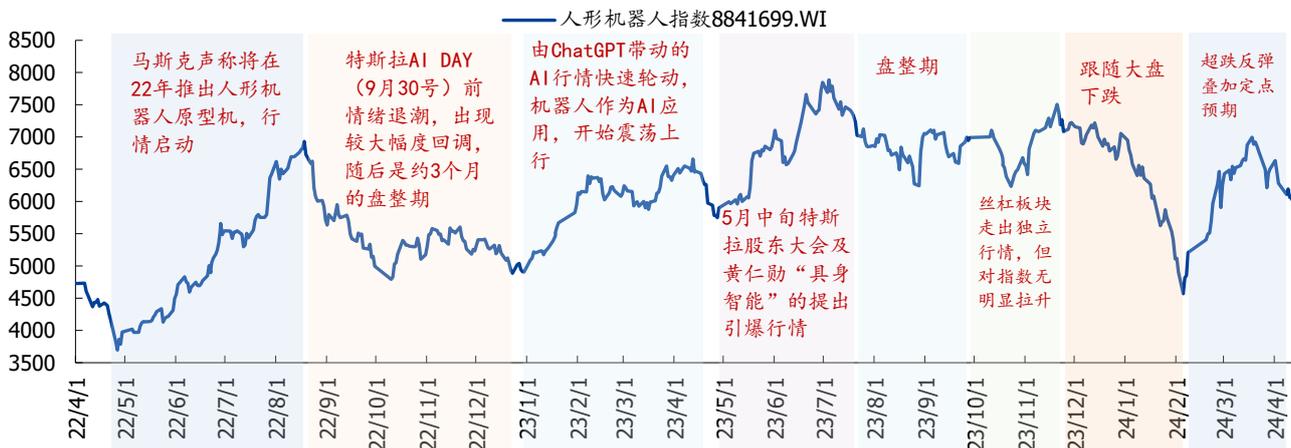
3) 2023 年年初开始，由于 ChatGPT3.5 的推出，AI 行业热度攀升。人形机器人作为 AI 的终极应用，在 AI 行情的轮动中震荡上行。

4) 5 月中旬特斯拉在股东大会上展示了人形机器人的最新进展，几乎同一时间段，英伟达创始人黄仁勋在 ITF World 2023 半导体大会上提出“具身智能”概念。受上述两个事件催化，人形机器人率先由传感器领涨，后辐射至整个板块。

5) 在经历数月盘整期后，2023 年 10 月丝杠走出独立行情，但板块内的结构性行情并未明显拉升人形机器人指数。

6) 2023 年底至 2024 年初，板块跟随大盘下行，随后在超跌叠加特斯拉定点的预期中反弹。经历了多轮行情，我们认为人形机器人的产业趋势逐渐得到认可，量产前夕大有可为。

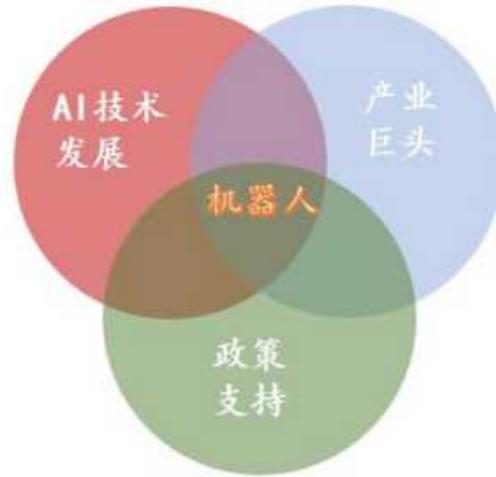
图表 1: 人形机器人行情复盘 (基于 wind 人形机器人指数)



资料来源: wind, 国盛证券研究所

至今，机器人行业已呈现 AI 发展&产业巨头&政策支持三重共振特性，在产业起点积蓄力量。多模态大语言模型的出现，代表人形机器人“大脑”层面难题取得突破。同时 2022 年以来产业巨头陆续入局，中、美等国政策支持也相继推出，在三重共振下，人形机器人有望形成类似于汽车、智能手机的全球性产业链。

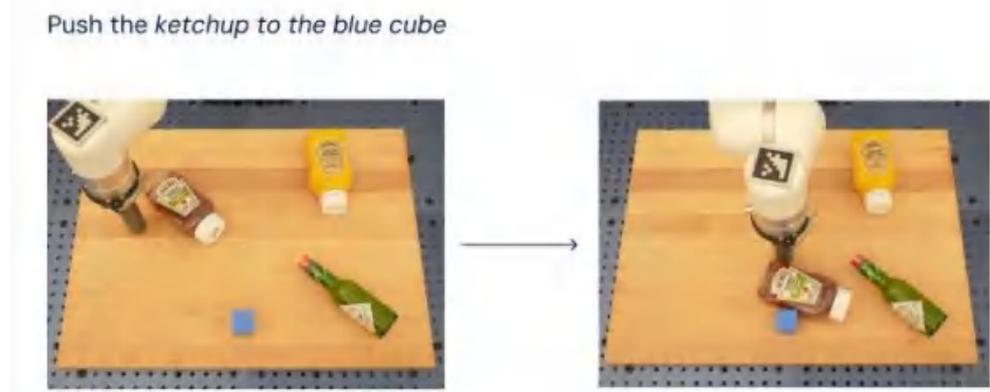
图表 2: 机器人行业的三重共振



资料来源: 国盛证券研究所绘制

第一: AI 技术发展。通用人工智能大模型是实现“具身智能”的关键一环,近年人工智能快速发展,机器人装上“大脑”成为可能。机器人的大脑需要解决理解、决策、执行三个层面的问题,以 ChatGPT3.5 为代表多模态大语言模型解决了机器人理解人类语言和外部世界的问题;谷歌 RT-1 模型以图片序列、自然语言指令作为输入,是一种视觉-语言模型 (VLMs),展现了较强的泛化能力和鲁棒性,主要解决了前两个层面的问题;而谷歌 RT-2 模型则是基于视觉-语言-动作模型 (VLA) 的端到端模型,加入了动作模态,提高了机器人的泛化能力、涌现能力和策略的完成率。RT-2 已经足够具身化,将机器人执行层的感知、任务拆解、硬件驱动实现了 AI 化。

图表 3: RT-2 模型执行将番茄酱推向蓝色方块的指令,展现了强大的泛化能力



资料来源: 澎湃, 国盛证券研究所 注: 训练数据集中除蓝色方块外无其他物体, 该任务体现了 RT-2 泛化到新物体的能力

第二: 产业巨头入局。自特斯拉机器人亮相以来,全球产业巨头纷纷布局人形机器人领域。特斯拉作为行业引领者,于 2022 年 9 月 30 日举办的 AI DAY 上首次公开展示人形机器人;2023 年年初,三星向本土机器人厂商 Rainbow Robotics 投资 590 亿韩元,约合人民币 3.19 亿元;2023 年 3 月,OpenAI 领投挪威机器人公司 1X Technologies;2023 年 5 月,NVIDIA 创始人黄仁勋表示下一波人工智能浪潮是具身智能 (embodied AI);谷歌在推出有 5620 亿参数的 PaLM-E 模型后,其旗下 AI 团队 DeepMind 在 2023 年 6 月 20 日展示了用于机器人的 AI 智能体 RoboCat,并于 7 月发布机器人模型 RT-2;2024 年 3 月,黄仁勋在机器人大会上公布其 GR00T 项目,推出人形机器人通用基础模型 Project GR00T 和一款基于 NVIDIA Thor 系统级芯片 (SoC) 的新型人形机器人计算平台

Jetson Thor。

图表 4: 采用 NVIDIA Jetson 芯片的迪士尼 orange 机器人



资料来源: 澎湃, NVIDIA GTC 大会, 国盛证券研究所

第三: 政策支持, 中美共振。2022 年以来国内人形机器人相关政策频出, 北京、上海、深圳等地都出台了推动产业发展的地方性政策。2023 年 10 月, 工信部印发《人形机器人创新发展指导意见》, 将人形机器人提升到与计算机、智能手机、新能源汽车同等的战略高度, 并表示人形机器人有望在 2027 年成为经济增长的新引擎。美国方面, 2024 年 3 月, 美联储半年度货币政策提出, 未来几年美国可能快速采用人工智能和机器人等新技术, 有望提高生产力增长速度。

图表 5: 中美机器人相关政策梳理

发布日期	政策名称	相关内容
中国-全国性政策		
2023年10月	《人形机器人创新发展指导意见》	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,将深刻变革人类生产生活方式,重塑全球产业发展格局。当前,人形机器人技术加速演进,已成为科技竞争的新高地、未来产业的新赛道、经济发展的新引擎,发展潜力大、应用前景广。……2027年,人形机器人……成为重要的经济增长新引擎。
2023年8月	《2023年未来产业创新任务揭榜挂帅工作》	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,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。榜单显示,全身动力学控制算法、电机驱动器、力传感器、MEMS姿态传感器、触觉传感器等产品技术被列为人形机器人产业任务的核心基础;旋转电驱动关节、直线型电驱动关节、机械臂与灵巧手、控制器、高密度电池等被列为人形机器人重点产品等。
中国-地方性政策		
2023年8月	《北京市促进机器人产业创新发展的若干措施》	提出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。提到推动构建机器人产业科技创新体系,由机器人骨干企业牵头,整合国内外一流创新资源,组建人形机器人创新中心,开展关键共性技术研究。
2023年5月	《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)》	提出深圳将举全市之力打造国家新一代人工智能创新发展试验区和国家人工智能创新应用先导区,指出聚焦通用大模型、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等。
2023年5月	《上海市推动制造业高质量发展三年行动计划(2023—2025年)》	提及多项机器人引导政策,包括加快人形机器人创新发展;2025年规模以上制造业企业数字化转型比例达80%以上,工业机器人使用密度力争达360台/万人等。
美国		
2024年3月	《美联储半年度货币政策报告》	未来几年可能快速采用人工智能和机器人等新技术,有望提高生产力增长速度,超过目前温和步伐。

资料来源:工信部,中国政府网,北京市人民政府网,深圳政府在线,上海市人民政府网,美港电讯,国盛证券研究所

1.2 2024年多模态视觉语言模型与机器人的结合超大众预期

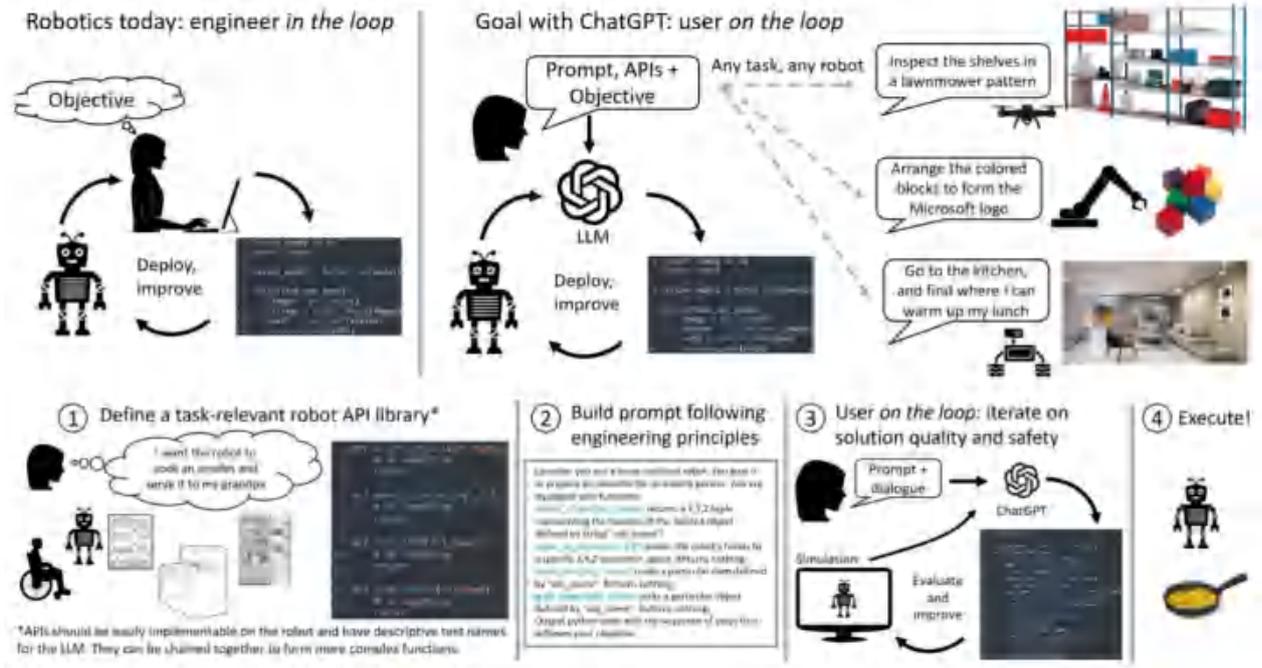
1.2.1 机器人执行层三大层面均已突破,未来重点在于软硬件结合

机器人执行主要有三大层面: 1) **第一层:理解需求和环境**,即通过传感器等了解周围环境,搞明白机器人所处的环境是室内还是室外,整个厨房长什么样,要拿的蔬菜是什么样子等等; 2) **第二层:拆解任务和路径规划**,即机器人明白任务以后,需要将任务拆解成哪几步,并计划好机器人应该走多远,机械臂和灵巧手该怎么动,每个地方用多大力度等; 3) **第三层:驱动硬件执行任务**,机器人将任务拆解完计划好运动步骤以后,将规划转为机械指令给到驱动系统上,驱动系统确定完速度、动量等物理因素后,机器人开始执行任务。

ChatGPT 解锁了机器人新的范式,将人机交互简单化,但以其为代表的大语言模型(LLM)只解决了机器人执行层第一层部分通用性的问题,准确性仍有待提升。随着2023年 Chatgpt 大火,基于 Transformer 架构的大语言模型逐步走进大众视野,传统的机器

人驱动方式需要工程师将任务转化为系统代码，运行过程中工程师需要不停的编写新的代码和规划来纠正机器人的行为，该过程成本高昂并且效率低下。ChatGPT 可以为机器人场景生成代码，无需任何微调，就可以控制不同的机器人执行各种任务，且参与人员不仅限定在技术人员，原本机器人需要通过编程告知所需的执行任务，LLM 取代了这个过程，使得人机交互成为更简单的事情。通过将 GPT-4 整合到机器人 Alter3 中有效地连接 LLM 与 Alter3 的身体运动，通过程序代码将人类行为的语言表达映射到机器人的身体上从而实现了直接控制。

图表 6: LLM 在机器人上的应用



资料来源: Microsoft 《chatgpt for robotics》, 国盛证券研究所

机器人应用模型主要有两大难点，缺乏大规模多样化的数据和泛化能力。1) 缺乏大规模和多样化的机器人数据，模拟场景花费高效果一般，现实世界更加复杂多变，这限制了模型吸收广泛的机器人经验的能力。对于机器人技术来说，数据收集尤其昂贵且具有挑战性，因为数据集管理需要大量工程自主操作，或使用人类远程操作收集演示。2) 缺乏可表达的、可扩展的、足够快的实时推理模型，这些模型可以从此类数据集中学习并有效地进行泛化。

为了应对以上难点，2022 年底 Google 提出了多任务模型 RT-1，突破了之前机器人的零泛化性能和解决了部分机器人训练数据集缺乏的问题。RT-1 主要解决的是机器人执行层的第二层问题，即任务拆解和任务实现路径规划。在 RT-1 大模型的加持下，机器人在可看见的任务、非可看见的任务、背景有干扰和远景场景四个类别下都表现出远高于基准的泛化性和稳健性，机器人执行从未做过的任务的成功率大幅上升，即使在有干扰的场景下成功率也大幅上升。此外，研究人员还采用了不同型号的机器人进行来训练模型，若未来大模型能对不同的机器人进行预训练，那么将会形成机器人 AI 通用的训练集。

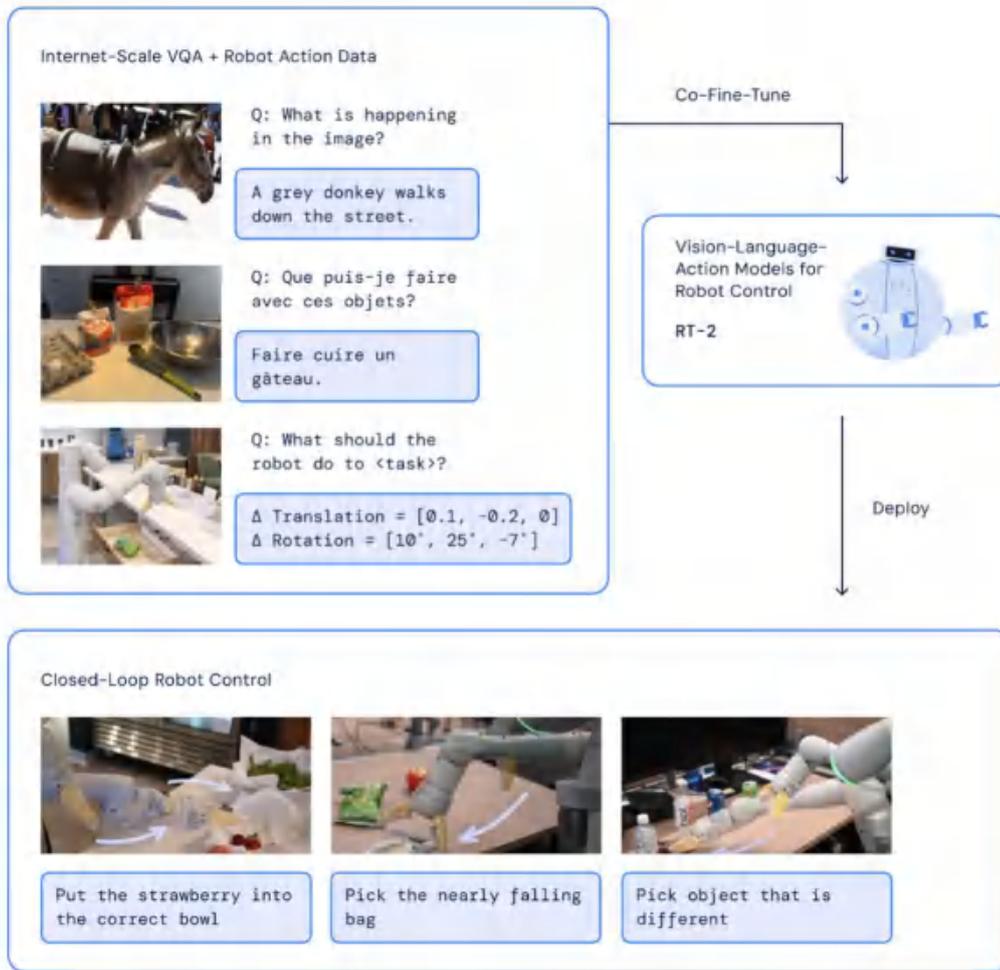
图表 7: RT-1 模型下的机器人在各个场景中的任务训练



资料来源: Google 《RT-1: Robotics Transformer for real-world control at scale》, 国盛证券研究所

2023 年是人形机器人与各类大模型结合有较大突破的一年, 从 23 年 7 月底 Google Deepmind 推出的 RT-2 模型, RT-2 突破了机器人执行层的第三层, 即将硬件驱动执行任务 AI 化。Google deepmind 研究团队将动作 (action) 模态加入到 VLM 模型并经历多次训练后, 该模型能够解释全新的命令, 并通过执行基本推断来响应客户的要求, 并将动作以文本 token 的形式表示, 再将文本 token 分解为机器人动作, 详细的机器人动作完全取代过去模型输出的对执行层的控制信号, 形成闭环控制。在此之前的 VLM 大模型更多的是在机器人执行层对第一、二层进行优化, 硬件执行任务的驱动更多还是采用传统控制论方法, RT-2 的 VLA 所展现的是 AI 大模型控制机器人的可能性。

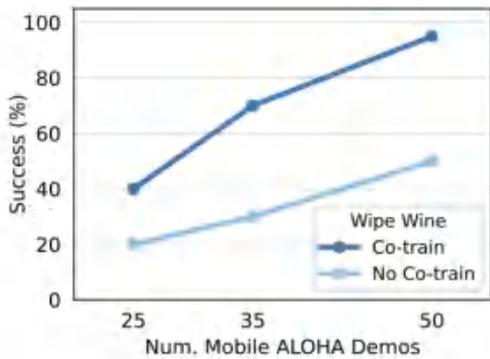
图表 8: RT-2 的架构与训练



资料来源: Google deepmind, 国盛证券研究所

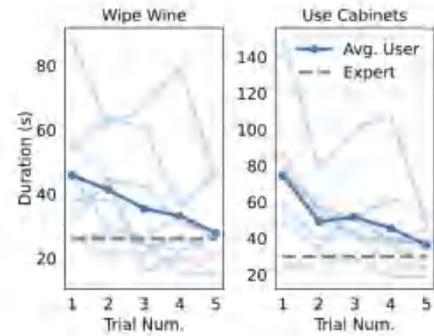
人形机器人三大执行层面均已打通,随后 2024 年产业重点转向大模型与机器人硬件上更好的融合。如斯坦福团队于 2024 年初发布的炒菜机器人 Mobile ALOHA, 斯坦福机器人研究团队核心解决了两个问题: 1) 硬件端: 打造了即插即用的全身远程操控硬件和证明了复杂任务的高性能双臂移动操作的可行性, 这是机器人广泛应用于各种复杂场景的关键点; 2) 软件端: Mobile ALOHA 展示出了强大的模仿学习能力, 机器人通过静态 ALOHA 数据协同训练的模仿学习, 可以学习各种精细复杂的任务, 研究人员通过 50 次的示范可以把机器人的自主任务成功率提升到 80%+, 另外, 用户使用 Mobile ALOHA 远程操控未见过的任务时, 熟练度可以迅速接近专家级程度。Mobile ALOHA 的硬件和软件都已开源, 预计斯坦福所展示的机器人在应用场景的潜力在未来将会被快速复制。

图表 9: Mobile ALOHA 的数据效率



资料来源: Zipeng Fu, Tony Z. Zhao, Chelsea Finn 《Mobile ALOHA: Learning Bimanual Mobile Manipulation with Low-Cost Whole Body Teleoperation》, 国盛证券研究所

图表 10: Mobile ALOHA 远程操作的学习曲线



资料来源: Zipeng Fu, Tony Z. Zhao, Chelsea Finn 《Mobile ALOHA: Learning Bimanual Mobile Manipulation with Low-Cost Whole Body Teleoperation》, 国盛证券研究所

AI 厂商下场助力机器人 大模型与具身本体融合，开启人形机器人智能新纪元。24 年 3 月 AI 创新公司 Figure 推出了与 Open AI 初步合作后的机器人 Figure 01，Figure 01 在与人类互动的过程中，展示了机器人强劲感知、推理和认知能力，不再是生硬的软硬件结合。英伟达的 GTC2024 大会上，英伟达推出了人形机器人基础模型项目 Project GR00T，为了给 Project GR00T 项目提供软件支持，英伟达也对基于 Omniverse 平台构建的 ISAAC Lab 也进行了同步更新，允许开发者利用该平台模拟机器人学习技能、与物理世界模拟互动，支持数千个机器人同步训练与模拟。24 年 4 月，优必选发布了其和百度文心大模型合作的机器人视频，均在表示机器人与大模型融合已经达到一个新高度。

图表 11: Figure 01



资料来源: 科技新报, 国盛证券研究所

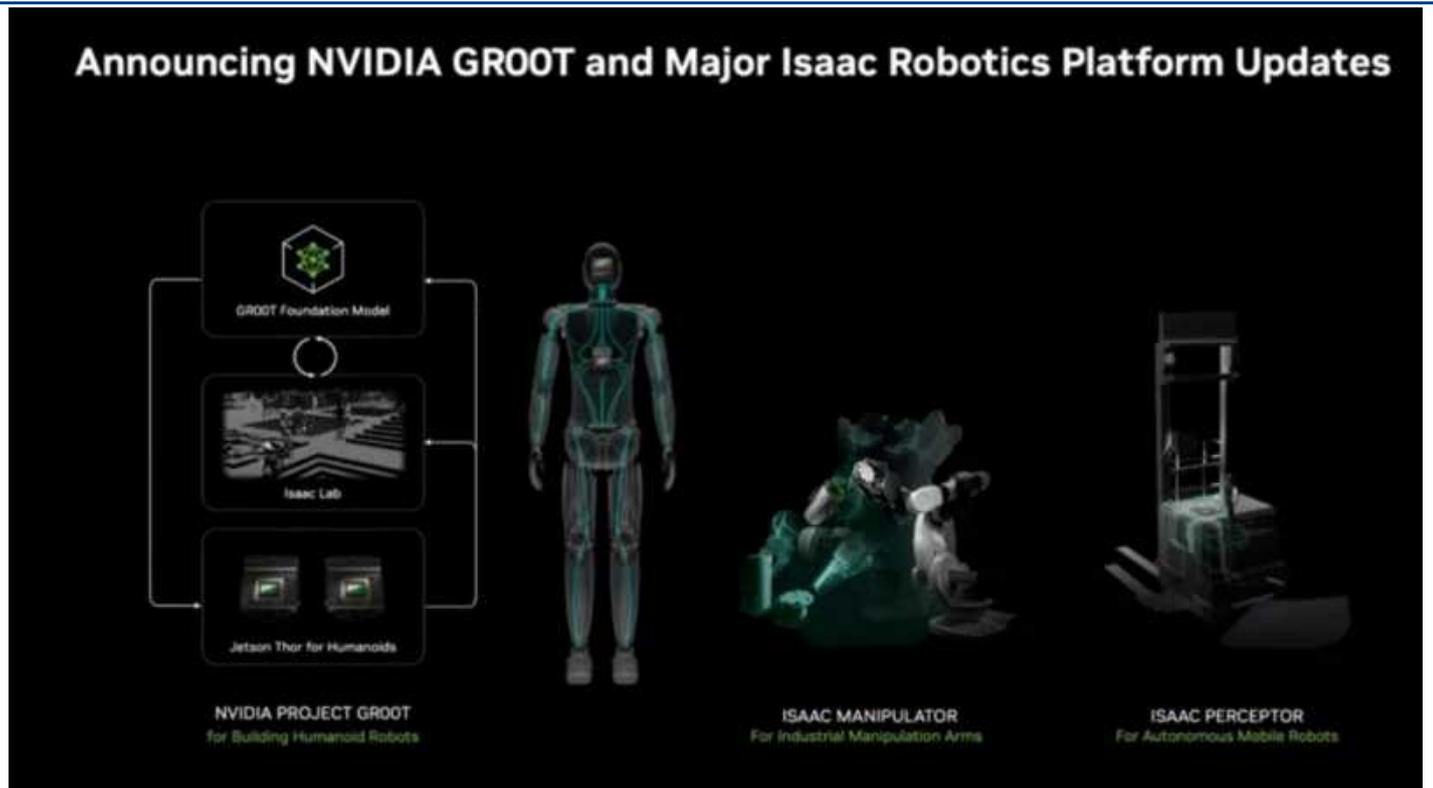
图表 12: 英伟达 GTC 大会展示的机器人



资料来源: 36 氪研究院, 国盛证券研究所

英伟达 GTC2024 大会表示，公司将致力于打造一个综合性的 AI 平台，该平台包括生成式 AI 基础模型和仿真工具，以及 AI workflow 基础设施。在众多人工智能厂家推出的大模型与具身智能形态结合的人形机器人中，英伟达推出的 Project GR00T 项目彰显了当前时代下 AI 厂商的另一种选择。让技术汇聚在一起，才能使全球领先的机器人专家在人工通用机器人领域实现巨大飞跃。因此，英伟达致力于打造一个全方位软硬件融合的 AI 平台，让世界领先的机器人企业包括但不限于 1X Technologies、Agility Robotics、Apptронik、波士顿动力公司、Figure AI、傅利叶智能等均能在该平台上进行机器人在任何环境下的任何任务进行学习和模拟。

图表 13: 英伟达公布的 Project GR00T 项目



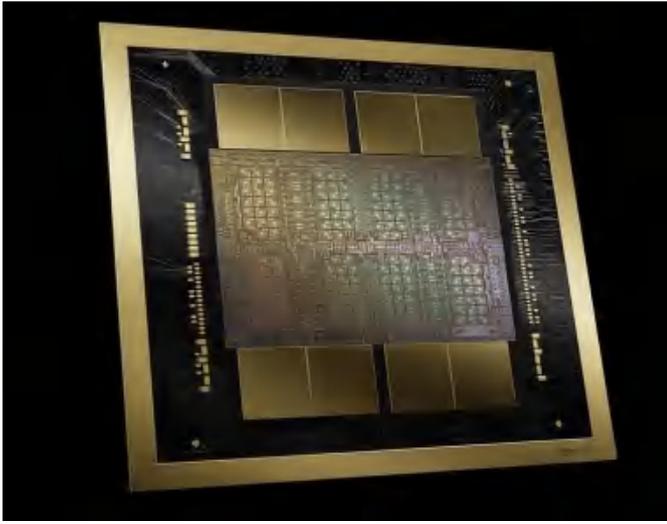
资料来源: NVIDIA, 科技玩家, 国盛证券研究所

英伟达发布了全新的人形机器人计算平台 Jetson Thor 以及对机器人平台 Isaac 平台进行了重大升级,旨在推动人形机器人在具身智能上的发展。Project GR00T 项目是一款人形机器人通用模型,GR00T 驱动的机器人(代表通用机器人 00 技术)将能够理解自然语言,并通过观察人类行为来模仿动作——快速学习协调、灵活性和其它技能,以便导航、适应现实世界并与之互动。为了该模型更好的发,英伟达还发布了一款基于 NVIDIA Thor 系统级芯片(SoC)的新型人形机器人计算平台 Jetson Thor,并对机器人平台 Isaac 平台进行了重大升级,其主要表现在:

1) 人形机器人计算平台 Jetson Thor: 是一个全新的计算平台,能够执行复杂的任务、自然的和人机进行交互,主要针对于性能、功耗和尺寸的模块化架构。Jetson Thor 基于英伟达一款系统级的芯片 SoC,该 SoC 带有 transformer engine 下一代的 GPU,采用 Blackwell 架构,可以提供每秒 800 万亿次 8 位浮点运算 AI 性能,大大简化了机器人模型的设计和集成工作。

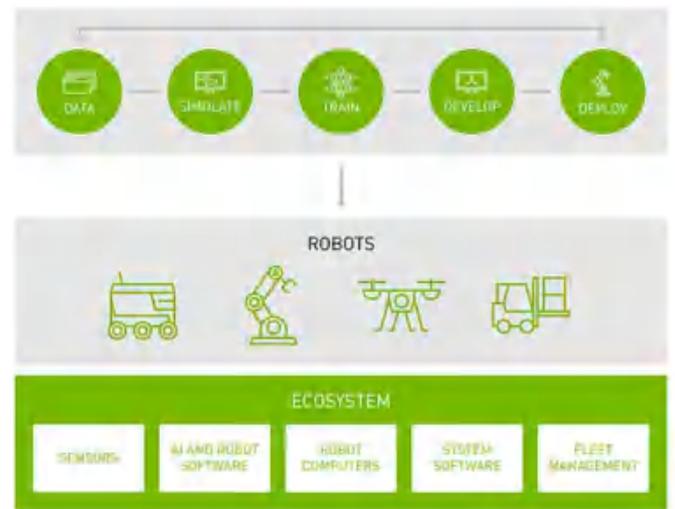
2) Isaac 平台的重大更新: 机器人中最重要的一点能力是学习并仿真,GR00T 使用的 Isaac 工具还能够为在任何环境中的任何机器人创建新的基础模型,包括用于强化学习的 Isaac Lab 和用于计算编排服务的 OSMO,Isaac Lab 是性能优异、GPU 加速的轻量化应用,大大降低机器人数据训练模拟仿真的时间;OSMO 在分布式环境中协调数据生成、模型训练和软硬件在环 workflow,加速机器人内部数据和硬件的融合。

图表 14: Blackwell 架构 GPU



资料来源: NVIDIA, 国盛证券研究所

图表 15: Isaac 平台



资料来源: NVIDIA, 国盛证券研究所

1.2.2 机器人应用于汽车装配线已成行业共识，应用落地可期

汽车装配线流水线工人未来高度短缺,人形机器人或大有可为。中国拥有全球规模最大、增长最快速的新能源电动汽车市场,对员工的需求非常大,目前中国数十家电动汽车企业员工超过 150 万人,相较之下,底特律三大车企在全球的员工总数为 61 万人。其中,以比亚迪为例,截止 2022 年底,其企业员工总数已达 57 万人,其中生产人员占比接近 80%,学历为大专及以下的员工占比超 80%,生产人员中多为流水线作业工人,在如今人口紧张和人口受教育程度普遍上移的情况下,可以预见在未来流水线工人是非常短缺的。考虑到汽车装配线上仍有大量重复性的工作,比如安装汽车内饰、贴车标、给玻璃窗打胶等,普通的工业机器人无法像人一样自由弯腰、下蹲来执行一些装配工作,相对而言人形机器人很适用于汽车制造。

图表 16: 汽车装配线



资料来源: 纽约时报中文网, 国盛证券研究所

图表 17: 汽车装配线



资料来源: 纽约时报中文网, 国盛证券研究所

人形机器人进入汽车装配线已成行业共识,宝马工厂入驻 Figure 01 标志着人形机器人和制造业合作的开端。Tesla 作为人形机器人领域的引领者,其中很重要的一个设想在于

用机器人替代 Tesla 汽车工厂的流水线工人，为此，其他机器人厂商纷纷跟进。宝马将 Figure 01 入驻到位于美国卡罗来纳州斯巴坦堡的工厂中，主要是将该机器人用于工厂的无聊处理、组装辅助和质量控制等方面，Figure 01 与工业机器人相比具备更灵活、更先进感应能力和强大人工智能能力，Figure 01 的人形设计和强学习能力适合执行多种任务，从组件组装、品质检查到协助物流等，这标志人形机器人在制造业合作的新时代开始。

图表 18: Figure 与宝马达成合作将 Figure 01 引入汽车工厂



资料来源: 36氪研究院, 国盛证券研究所

Apollo 人形机器人引入梅赛德斯-奔驰车厂，优必选引入蔚来电动汽车装配线，各家车企纷纷与人形机器人合作试验。梅赛德斯-奔驰希望减轻其工人的单调乏味、重复性任务和体力要求高的工作量，引入 Aptronik 的 Apollo 机器人，这款模块化机器人是德克萨斯大学奥斯汀分校衍生技术公司 Aptronik 开发的近 12 个机器人系统中的最新一个，Apollo 机器人在该车间执行的任务包括向工人运送组件和工具包、检查零件等。优必选发布的工业版本人形机器人 Walker S 也进入到蔚来电动汽车装配线上，进行贴车标等一些更为高级的人工作业，人形机器人替代人类多次重复性劳动在即。

图表 19: Apollo 机器人在奔驰厂



资料来源: AIUST.com, 国盛证券研究所

图表 20: 优必选 Walker S 在蔚来电动汽车装配线上

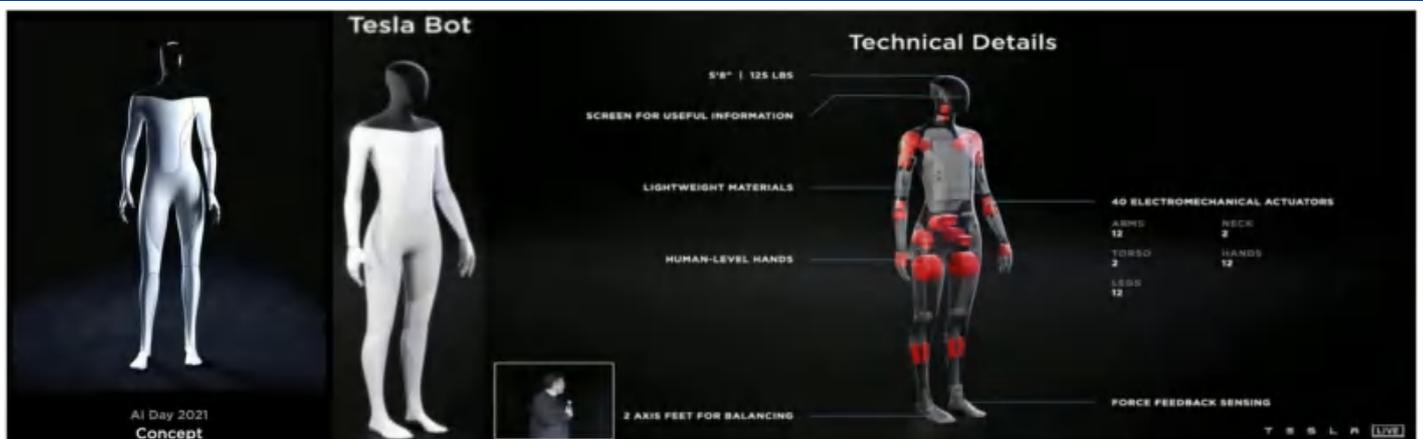


资料来源: 优必选科技, 国盛证券研究所

1.3 特斯拉工程化能力强, Optimus 有望加快交付

特斯拉人形机器人始于 2021 年, 三年来迭代加快、进步明显。在 2021 年 8 月特斯拉 AI DAY, 马斯克先是公布了 FSD 模型、D1 芯片、Dojo 超算中心, 之后, 马斯克展示了人形机器人 Tesla Bot 概念。其身高 172cm、体重 56.7kg, 当时还只是概念, 还没有实物。但是, 特斯拉的 FSD 模型+Dojo 超算中心+D1 芯片可以为汽车行业做配套的同时, 也为机器人行业的数据采集训练提供所需要的模型和算力基础设施, 也就是说为人形机器人的“大脑”打下了基础。一年后, 在 2022 年 9 月特斯拉 AI DAY, 马斯克正式发布了人形机器人 Optimus Gen-1 的原型机(擎天柱), 其重 73 公斤、身高 172cm, 当时现场展示还电线外露、没有外壳、走路需要人扶; 视频展示中呈现了行走、下蹲、抓取物体、浇花等动作。2023 年 3 月-9 月, 特斯拉相继发布了 Optimus Gen-1 的相关视频, 其可以实现直立行走, 手指关节抓取电动工具、螺丝, 单腿站立做瑜伽, 颜色分拣等任务。2023 年 12 月特斯拉发布 Optimus Gen-2 的视频, 相比于第一代 Optimus 人形机器人, 第二代 Optimus 增加六维力传感器、触觉传感器, 进步明显, 速度快 30%、重量减轻 10kg。

图表 21: 2021 年 8 月特斯拉展示了人形机器人 Tesla Bot 概念



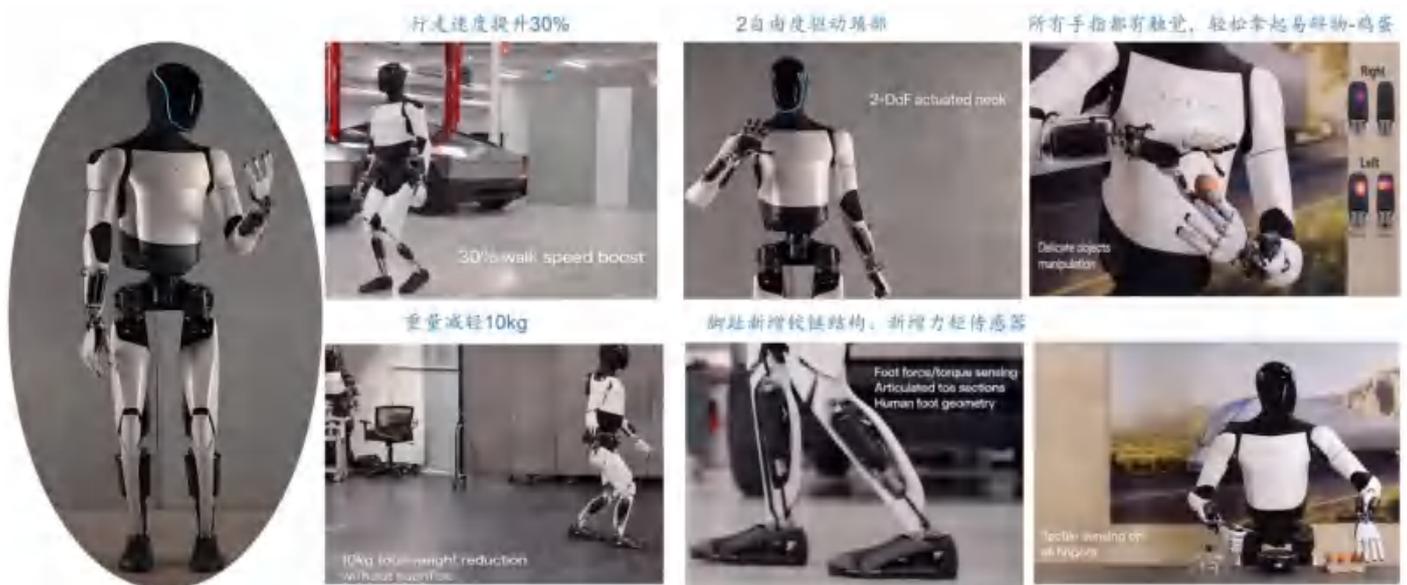
资料来源: 特斯拉, youtube, 国盛证券研究所

图表 22: 2022年9月-2023年9月特斯拉发布 Optimus Gen-1 并相继发布相关视频



资料来源: 特斯拉, youtube, 国盛证券研究所

图表 23: 2023年12月特斯拉发布 Optimus Gen-2



资料来源: 特斯拉, youtube, 国盛证券研究所

特斯拉 Optimus Gen-2 相比于 Optimus Gen-1 有明显进步。从核心变化来看，主要是以下几个方面：第一，每个手指都增加了触觉感应器，实现灵巧手的精细操作，单手 11 个自由度（我们预计是大拇指 3 个，其余 2*4 个）；第二，新增颈部两个自由度；第三，脚部新增力/力矩传感，新增脚趾铰链结构，脚上套了类似鞋子的装置，防止铝合金直接接触地面；第四，机器人表面覆盖智能表皮，感知温度变化，加强与人的互动性；第五，步行速度更快，整体重量减轻。从硬件层面而言，具体如下：

- **丝杠:** 特斯拉 Optimus Gen-2 肩膀处由一个旋转执行器和直线执行器拼成一个 L 型的执行器，预计丝杠使用的数量没有变化，仅为结构性变化。
- **减速器:** 特斯拉 Optimus Gen-2 增加了颈部的旋转与仰俯自由度，共 2 个电机模组，预计为无刷电机+减速器的方案，因此减速器用量可能增加 2 个。特斯拉 Optimus 展示的第一代版本颈部无法运动，此次更新增加颈部自由度，提升了机器人的仿生

特性，同时能增加视觉传感器的广角，提升视觉性能。

- **电子皮肤**：特斯拉 Optimus Gen-2 全身覆盖智能表皮（包括身体表面和鞋底），电子皮肤的覆盖使得 Optimus 全身都具备触感，与物理世界的接触更加充分。
- **传感器**：特斯拉 Optimus Gen-2 的手部配备了全新高分辨率微型传感器，所有的指尖都有触觉感应，可以处理鸡蛋等需要精确力的物体。脚部新增力矩传感器，考虑到 Optimus gen-2 脚部所需要承载的力和所处位置，我们认为六维力矩传感器的可能性较大。

图表 24: 特斯拉 Optimus 第二代与第一代对比

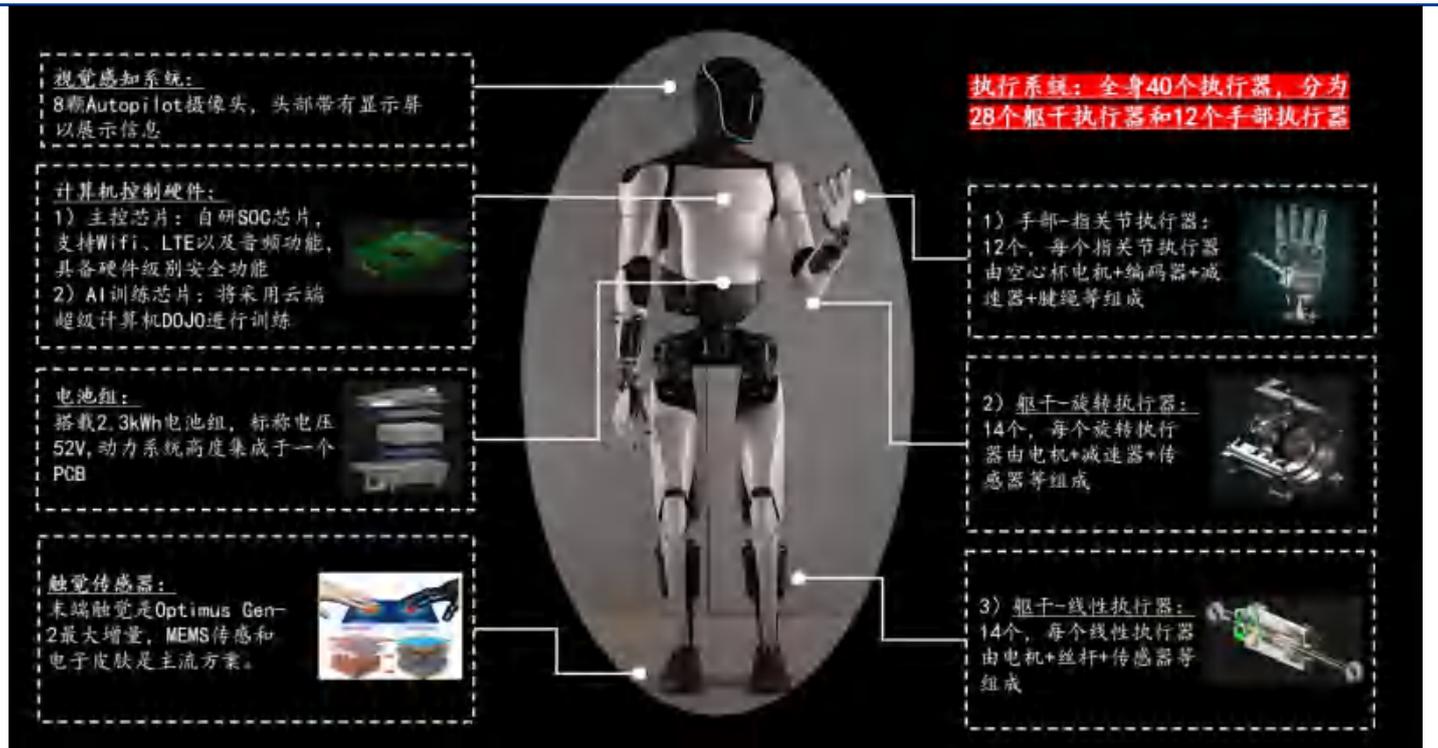


资料来源：特斯拉，youtube，国盛证券研究所

二、硬件：机器人是 AI 与执行器的结合

以特斯拉 Optimus 为例，硬件投资机会集中于执行器和传感器。特斯拉 Optimus 总共 40 个执行器，其中 28 个躯干执行器，12 个为指关节执行器。在 28 个躯干执行器中，14 个为线性执行器、14 个为旋转执行器。传感器方面，主要包括视觉感知系统和触觉感知系统。触觉传感器主要包括 Mems 传感器、电子皮肤、力传感器。视觉传感器主要包括 2D 视觉方案、3D 视觉方案，如特斯拉 FSD 采用的 2D 视觉方案，其获取信息的中介为 8 个 2D 摄像头，而国内较多厂商采用了成本较高的 3D 视觉方案，但对机器人主机厂的算法要求相对宽松。此外，人形机器人还需要精度较高的编码器来检测电机转子的位置和角度。

图表 25: 特斯拉 Optimus 硬件拆解



资料来源: 特斯拉, youtube, 传感器技术, 国盛证券研究所

2.1 灵巧手：空心杯电机是最可靠动力源，传动方案多样

灵巧手：具备高度灵活和精细控制能力的末端执行器。从运动学观点看，灵巧手通常需要满足 6 个或以上的自由度。灵巧手的自由度是指机械系统能够独立运动的关节数量。根据自由度与驱动源数量，可将灵巧手分为全驱动和欠驱动两大类。全驱动灵巧手驱动源的数量与被控制灵巧手的自由度数量相等，每个手指关节都有驱动器，使其能够实现主动控制。欠驱动灵巧手被控制的自由度多于驱动源的数目，缺少驱动源的部分进行耦合随动。从运动学的观点看，灵巧手需满足两个条件：1) 指关节运动时能使物体产生任意运动；2) 指关节固定时能完全限制物体的运动。按照运动学理论，满足上述条件至少要 3 个手指，并需要 6 个或以上的自由度。

灵巧手具有人手的部分外形特征和功能，其通过模拟人类运动、感知、控制等方面的仿生，实现对手运动的模拟。作为人体最灵巧的部分之一，人手的自由度超过 20 个。而灵巧手的自由度则可以根据应用需求和具体设计进行调整。部分灵巧手（如 Shadow hand、Allegro hand 等）的自由度与人手接近，即具有 20 个或以上的自由度。但即使自由度与

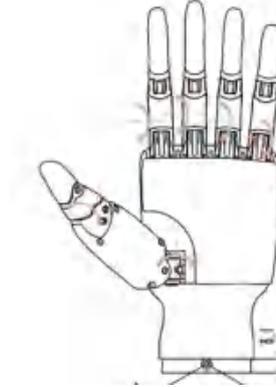
人手相似，在高自由度导致的算法困难、操作中产生的大量接触点等因素影响下，这些灵巧手也很难真正像人手一样智能地处理各种任务。总体而言，虽然灵巧手在某些特定任务上可以模仿人手的灵巧程度，但目前的灵巧手还无法完全复制人手的复杂属性和处理多任务的能力。

图表 26: 人手共有 21 个自由度



资料来源: 小米技术, 国盛证券研究所

图表 27: 因时 RH56BFX 灵巧手具备 6 个自由度



资料来源: 因时机器人官网, 国盛证券研究所

多指灵巧手: 多指多关节结构，最普遍的结构为 3-5 个手指，且各手指均具有 3 个关节，手指关节的运动副都采用转动副。多指灵巧手以人手的结构和功能作为模仿对象，其研究的最终目标是能够像人手一样对生产、生活乃至自然界中的各种物体进行稳定并且灵活的抓持和操作。机器人多指灵巧手的研究始于 20 世纪 70 年代，一共经历了 20 世纪 70 年代—20 世纪 90 年代、20 世纪 90 年代—2010 年和 2010 年至今三个阶段。

1) 20 世纪 70 年代—20 世纪 90 年代是机器人多指灵巧手领域研究的初始阶段，在这一阶段中的三个典型代表分别是日本的 Okada 灵巧手、美国的 Stanford/JPL 灵巧手和 Utah/MIT 灵巧手。这三种灵巧手的研究为后续仿人型多指灵巧手研究建立了理论基础。

2) 20 世纪 90 年代—2010 年，随着嵌入式硬件的发展，多指灵巧手的研究进入了快速发展阶段。这一阶段的多指灵巧手具备更高的系统集成度和更丰富的感知能力。例如美国国家航空宇航局研制的用于国际空间站舱外作业的宇航员灵巧手 Robonaut hand，腱绳张力传感器的加入使其运动控制更加准确；德国宇航中心先后研制成功的 DLR-I 和 DLR-II 灵巧手共集成 25 个传感器，包括类似人工皮肤的触觉传感器、关节扭矩传感器、位置传感器和温度传感器等，使得灵巧手在灵活性和感知能力方面都有显著提升；日本岐阜大学研制出 Gifu hand，其突出特点在于分布式的触觉传感器，这提升了灵巧手对外界物体整体的触觉感知，进而大幅提高了手抓持和操作的成功率。

3) 2010 年至今，朝着简化系统、提高鲁棒性的方向发展。由于高度系统集成的灵巧手在具有灵活性和功能性优势的同时因复杂的系统而产生高额制造成本，系统的可靠性和易维护性也有所降低，因此多指灵巧手设计将简化系统、提高鲁棒性作为进一步发展的一个重要方向。欠驱动手能够通过合理的结构设计，以少于手指关节自由度的驱动器控制手的运动，以此降低整只手的系统复杂度，提高可靠性。自适应灵巧手就是一种有效的欠驱动实现方式，它通过对操作对象的自主适用性包络实现抓取。典型例子是立命馆大学设计的 Ritsumeikan Hand，它通过耦合走线实现了 2 个驱动器对 15 个关节的驱动。此外，HERI Hand、SPRING hand、Columbia hand、耶鲁大学的欠驱动手等也都采用了适应性欠驱动的结构设计，实现了稳定的抓取。

图表 28: 采用适应性欠驱动结构设计的灵巧手 (HERI Hand)



资料来源: SEMANTIC SCHOLAR, 国盛证券研究所

图表 29: 采用适应性欠驱动结构设计的灵巧手 (耶鲁大学的欠驱动手)



资料来源: 3D Science Valley, 国盛证券研究所

图表 30: 多指灵巧手第一、第二阶段典型代表

年代	灵巧手	手指数	自由度	驱动	传动	传感	结构
20 世纪 70 年代-20 世纪 90 年代	Okada 灵巧手 (日本)	3	11	电机	腱绳	电机/关节位置、电机电流	外置
	Stanford/JPL 灵巧手 (美国)	3	9	电机	腱绳	电机位置、张力、指尖力、指尖触觉	外置
	Utah/MIT 灵巧手 (美国)	4	16	气缸	腱绳	电机/关节位置、张力、触觉	外置
20 世纪 90 年代-2010 年	NASA 多指灵巧手 (美国)	5	14	电机	腱绳	电机/关节位置、张力、触觉	外置
	DLR-I 灵巧手 (德国)	4	12	直线电机	腱绳	电机/关节位置、指尖力	外置
	DLR-II 灵巧手 (德国)	4	13	电机	齿形皮带	电机/关节位置、6 维指尖力	内置
	GifuII 手 (日本)	5	16	电机	齿轮	电机位置、6 维指尖力、触觉	外置

资料来源: 《机器人灵巧手的研究与发展》, 国盛证券研究所

灵巧手的动力源: 空心杯电机是最可靠方案。空心杯电机天然适配灵巧手, 是目前性能最优的电机方案。空心杯电机作为高效率的能量转换装置, 优点明显: 1) 节能性: 能量转换效率高, 其效率一般在 70% 以上, 部分产品可达到 90% 以上, 而普通铁芯电机能量转换效率在 70% 以下; 2) 控制特性: 起动、制动迅速, 响应极快, 在高速运转状态下, 可以方便地对转速进行灵敏的调节; 3) 运行稳定且十分可靠, 转速波动很小, 能够容易的控制 在 2% 以内; 4) 重量轻, 体积小: 空心杯电动机的能量密度大幅度提高, 与同等功率的铁芯电动机相比, 其重量、体积减轻超过三分之一。由于空心杯电机具备小体积下快速响应和高控制精度的特点, 人形机器人灵巧手多以使用空心杯电机进行驱动。一般而言, 终端客户需要的是一整套完整的指关节执行器而非单一电机, 包括空心杯电机、二级微型行星齿轮以及驱动方案 (包括电流环、位置环、速度环)。手指关节一般用 10-13mm 直径的空心杯电机, 小体积、高转速要保证控制发热、噪音、功率输出稳定并不容易。从未来空间来看, 灵巧手用的空心杯电机将是机器人赛道较为确定的方案。

图表 31: 空心杯电机和普通电机结构存在差异



资料来源: 天孚微电机, 国盛证券研究所

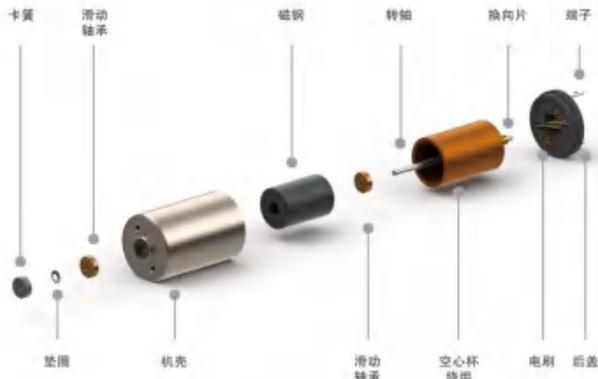
图表 32: 空心杯电机部分重点下游应用领域



资料来源: 鸣志电器官网, 国盛证券研究所

空心杯电机结构特殊，其对制造水平有较高要求。从空心杯电机的产品结构和下游需求来看，其绕组为自支撑式结构，因此带来一系列技术和制造难点。比如绕组结构强度较低，轴向长度有较大限制，同时空心功率无法做大（通常空心杯电机的最大功率仅有几百瓦），而在诸如航空航天这种对重量、效率、体积有着极致追求的情况下，对电机的稳定性、高效率、节能性、重量等都有非常高的要求。因此，空心杯电机制造商在权衡各方面因素后才能对产品设计进行生产并满足各种不同行业需求，这必然会对企业的制造能力、制造水平有较高要求，这既是制造能力壁垒，也是技术壁垒。此外，对制造能力高要求必然带来成本溢价，一般而言，不同类型的空心杯电机均价比普通的同功率甚至部分高功率的普通伺服电机价格更加昂贵。

图表 33: 有刷空心杯电机结构图



资料来源: 鸣志电器官网, 国盛证券研究所

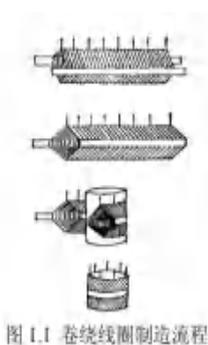
图表 34: 无刷空心杯电机结构图



资料来源: 中骏电机官网, 国盛证券研究所

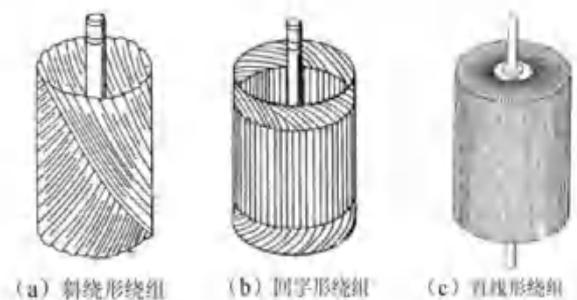
空心杯电机制造的关键在于空心杯线圈的生产。空心杯电机的一个核心技术在于电机绕组。导线粗细、绕组匝数的不同,使得绕组电阻值,启动电流以及速度常数等电机参数存在较大的差异。电机绕组是电机的重要组成部分,绕组的质量决定了空心杯电机的质量,直接影响到电机可靠性和运行性能。目前生产技术按照线圈成形方式主要是分为两种: 1) 绕卷式生产技术,将铜线绕制成菱形的空心线圈,然后将其压扁,制成扁平的线板,最后再将线板卷绕成杯状的线圈; 2) 一次成型生产技术,利用自动化绕线设备,通过实现其线圈缠绕运动,将线圈直接缠绕在芯轴上,完成整个线圈的全自动化生产。两种方法相比较而言,第一种加工方式步骤繁琐,加工周期较长,需要人员较多,劳动强度大。第二种方法,有助于缩减生产过程,提高生产效率,利于自动化生产,节省人力成本。目前我国的空心杯电机生产还是第一种加工方式为主,工人劳动强度大,废品率较高,而且其受工艺自身的制约,生产线圈相对较小,很难用于生产大功率空心杯电机。此外,根据不同的线圈形状以及缠绕方式,现在通用的绕制方法主要分为直绕形、马鞍形(回字形)、斜绕形三种。直绕形一般应用于匝数比较少的空心杯电机绕组。而斜绕形和马鞍形是目前国外先进空心杯电机厂商较为常用的两种线圈形式。

图表 35: 空心杯电机的两种成形方式



资料来源: 《马鞍形空心杯电机线圈绕制设备研究》_谢春辉, 国盛证券研究所

图表 36: 空心杯电机通用的绕制方法(按缠绕方式分)



资料来源: 《马鞍形空心杯电机线圈绕制设备研究》_谢春辉, 国盛证券研究所

灵巧手传动: 方案多样, 腱绳传动是最具潜力方案。灵巧手的传动方案主要有**腱绳传动**、**连杆传动**、**齿轮传动**以及**带传动**。

腱绳传动: 腱绳传动是目前灵巧手研究中应用最为广泛的一种传动方式,如目前量产的 Shadows Hand 即采用了这一传动方式。腱绳在一定程度上模拟了人手的肌腱结构,腱绳传动使得大型的驱动器远离了执行机构,减轻末端的负载和惯量,提升了抓取的速度,

它排布灵活，适合空间狭小且需要驱动自由度数目较多的传动场合。但它也有自身的局限性，如带负载能力较弱，预紧力变化大，负载越大效率越低等。

连杆传动: 连杆传动多用于工业和商业用途，多个连杆串并联混合的使用形式较为常见。手指的运动和动力由刚性连杆传递，能够抓取大型的物体且结构设计紧凑，可以完成包络抓取。但是在远距离的控制上就比较困难，容易发生弹射，抓取的空间较小。

齿轮传动: 齿轮传动在工业机器人中应用比较广泛，它能获得稳定的传动比，传递效率高，可靠性更强。但齿轮本身的质量加大了整体的质量和惯性。

带传动: 带传动结构简单且传动平稳、可以起到缓冲作用，能在大的轴间距和多轴间传递动力，同时具有价格便宜、不需润滑和维护便利等优点。

图表 37: 腱绳传动灵巧手



图表 38: 连杆/齿轮/带传动灵巧手

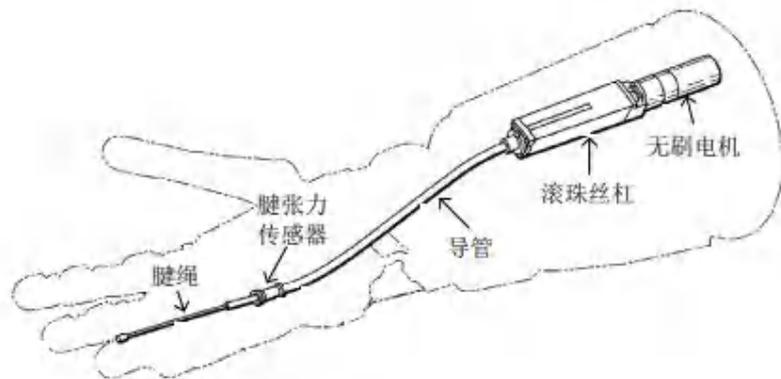


资料来源:《机器人灵巧手研究综述》_刘伟、肖剑等,国盛证券研究所

资料来源:《机器人灵巧手研究综述》_刘伟、肖剑等,国盛证券研究所

腱绳传动灵巧手的传动部件主要有两种组合: 腱绳+行星减速器(或谐波减速器, 较少用)、腱绳+滑动丝杠(或滚珠丝杠, 较少用)。腱绳传动灵巧手的驱动模块一般分为两种, 一种是电机加行星减速器(或谐波减速器, 较少用), 这种组合既可用于内置式, 也可用于外置式, 即可直接传动, 又可以腱传动; 另一种是电机加滑动丝杠(或滚珠丝杠, 较少用), 将旋转运动转换为直线运动后传出, 通常用于外置式腱传动。电机加丝杠对于驱动器后置于前臂中的情况更利于布置, 提高空间利用率, 同时具有自锁功能, 保持抓取姿势时电机不必输出力矩, 可以节约能量, 减少发热。因此, 在腱传动系统中, 核心传动部件包括腱绳与行星减速器或丝杠。

图表 39: 采用滚珠丝杠连接的腱绳传动结构



资料来源:《多指灵巧手动力学与操作控制技术研究》_徐彤彤, 国盛证券研究所

灵巧手板块核心标的: 空心杯电机环节, 我们建议关注国内空心杯电机的领军企业鸣志电器; 腱绳环节, 建议关注布局绳驱的大业股份; 设备环节, 建议关注国内绕线设备龙

头田中精机。

图表 40: 灵巧手核心标的

公司名称	所处环节	简介
鸣志电器	空心杯电机	公司是国内步进电机龙头，现已形成多种类电机+驱控+解决方案的完善产品组合，以及全球化的业务布局。公司是国内少数具备空心杯电机批量生产能力的企业之一，有望率先突破国内及海外灵巧手空心杯电机市场。
大业股份	腱绳	公司是全球轮胎骨架材料领军企业，主营业务为胎圈钢丝、钢帘线以及胶管钢丝。公司凭借突出的技术研发能力和制造工艺水平，着力布局高性能特种钢丝，包括缆型胎圈、灵巧手腕绳等新产品。
田中精机	绕线机	公司是国内绕线设备龙头，前身为日本田中精机株式会社，始创于 1933 年。公司在精密绕线领域处于行业领先地位，可以提供从单台智能装备到个性化定制开发智能制造综合解决方案，产品覆盖标准机、非标准机、特殊机、涂布机等，下游主要包括消费电子行业、汽车行业、工业控制行业等多个领域。

资料来源: 各公司公告, 国盛证券研究所

2.2 旋转执行器: 减速器是核心, 谐波仍为当前主流方案

旋转执行器是机器人普遍采用的执行器, 适用在机器人关节处, 核心是减速器。机器人躯干的执行器通常有旋转执行器和线性执行器两类, 其中旋转执行器的合作更为普遍, 许多机器人本体甚至采用全旋转执行器的方案。旋转执行器位于机器人关节处, 由电机+减速器等构成, 其中电机多采用无框力矩电机, 减速器则存在不同方案的讨论。特斯拉在 AI DAY 上展示了六种躯干执行器, 其中旋转执行器分别有 20Nm/110Nm/180Nm 三种力矩等级, 对应小/中/大三种功率。

图表 41: 特斯拉在 AI DAY 展示的 Optimus 旋转执行器与线性执行器

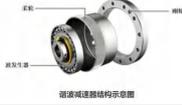


资料来源: 特斯拉 AI DAY, 国盛证券研究所

常用的精密减速器有行星减速器、摆线针轮减速器、谐波减速器、RV 减速器等, 其中谐波减速器是人形机器人性能最优的方案。常用的工业精密减速器有行星减速器、摆线针轮减速器、谐波减速器、RV 减速器等, 其中 RV 减速机由一个行星齿轮减速机的前级和一个摆线针轮减速机的后级组成, 是在传统针摆行星传动的的基础上发展而来。工业机器人通常采用谐波减速器(如 6 轴工业机器人第 4、5、6 关节)与 RV 减速器(如 6 轴工业机器人第 1、2、3 关节), 而人形机器人通常采用谐波减速器与行星减速器。谐波减速器传动比大、重量体积小, 搭配力矩传感器可以实现精确的力控, 是性能更出色的方案, 但成本较高; 行星减速器传动比较小, 相同力矩要求下重量与体积均大于谐波减速器, 这将限制其在人形机器人大部分关节的使用, 但其传动刚度较高, 可适用于电机自带的

电流环力控，降低了传动与力控环节的成本。

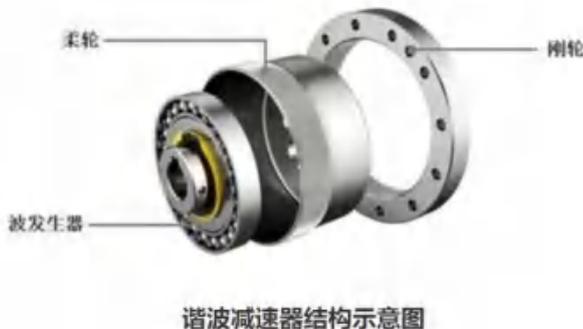
图表 42: 四类精密减速器介绍

减速器种类	图例	特点
行星减速器		传动比相对较小，但制造较简单，成本低，适用于小减速比场合。
摆线针轮减速器		应用行星式传动原理，采用摆线针齿啮合，较行星减速器具有更高的传动比。
谐波减速器		传动比大，单级同轴可获得 50~300 的高减速比。体积小、重量轻、结构简单、零件数少、安装方便。
RV 减速器		减速比大、刚度大、耐冲击性强，承载能力强。但体积、重量较大，零件数量多，加工工艺复杂。

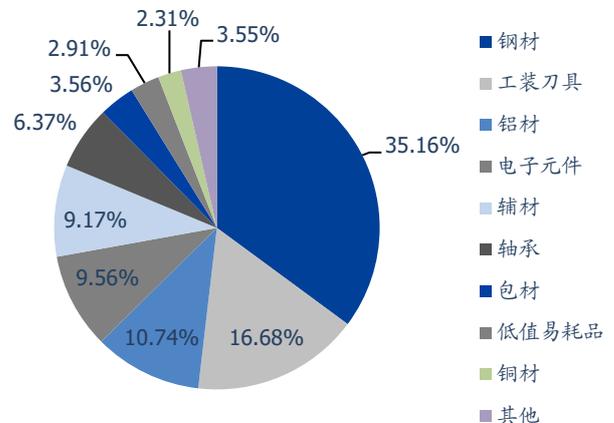
资料来源：摩森电机，摩尔网，绿的谐波招股书，千圣传动，苏州创工件，拓江减速机，中国工控网，国盛证券研究所

谐波减速器由波发生器、柔轮和刚轮三大零部件组成。其通过柔轮变形产生的周期性波动来实现刚轮轮齿与柔轮轮齿之间的少齿差内啮合，从而完成运动与动力的传递。具体来说，当波发生器装入柔轮内圆时，迫使柔轮产生弹性变形而呈椭圆状，使其长轴处柔轮齿插入刚轮的轮齿槽内，成为完全啮合状态，而短轴处两轮轮齿完全不接触，处于脱开状态，当波发生器连续转动时，迫使柔轮不断产生变形并产生了错齿运动，从而实现波发生器与柔轮的运动传递。由于谐波减速器精度极高，因此其每一个环节都需要高水平的技术支持。1) **柔轮**：采用 40Cr 合金钢制造，例如 40CrMoNiA、40CrA，目前柔轮材料还依赖从国外进口；2) **钢轮**：多采用球墨铸铁制造，能够提供良好的韧性、耐磨性；3) **波发生器**：由柔性轴承与椭圆形凸轮组成，目前国内谐波减速器厂商已经开始加速轴承的国产化进程，以绿的谐波为例，其谐波减速器用轴承以自产为主，外购轴承主要为特定型号的深沟球轴承。从材料成本看，绿的谐波 2019 年钢材\铝材\轴承的成本占比分别为 35.16%/10.74%/6.37%。

图表 43: 谐波减速器零部件拆分



图表 44: 绿的谐波 2019 年主要原材料成本构成



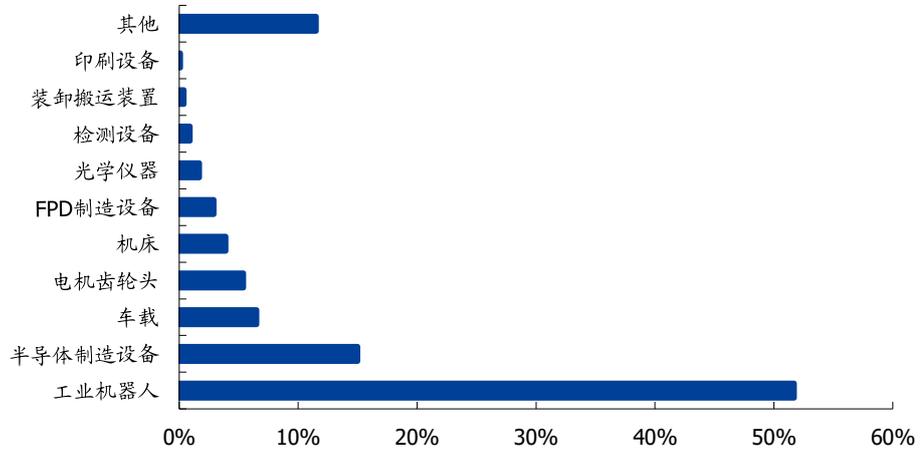
资料来源：绿的谐波招股说明书，国盛证券研究所

资料来源：绿的谐波招股说明书，国盛证券研究所

谐波减速器应用领域目前以各种机器人为主，此外还包括数控机床，半导体、光伏、医

疗等其他设备领域。根据华经产业研究院数据,以全球减速机龙头哈默纳科为例,其2021年产品下游应用占比中,工业机器人下游占比超50%,其余应用领域相对比较分散,包括半导体制造设备、数控机床、电机制造商等其他行业。而根据绿的谐波2022年年报披露(见上文数据),其工业及服务机器人收入占比超80%。

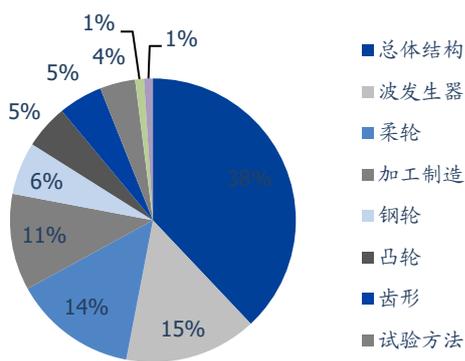
图表 45: 2021 年哈默纳科下游应用分布情况



资料来源: 华经产业研究院, 国盛证券研究所

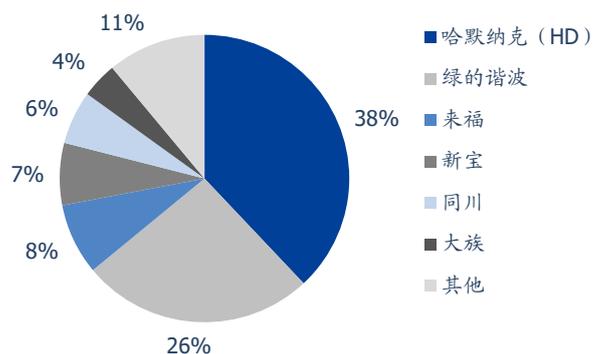
在国内谐波减速器市场,哈默纳克仍占主导地位,绿的谐波市场份额仅次于哈默纳克。谐波传动技术包括总体结构、柔轮、刚轮、凸轮、柔性轴承、交叉滚子轴承、齿形、波发生器等多个分支,从专利申请数量的角度来看,总体结构、波发生器等是谐波减速器技术的研发重点,哈默纳克凭借多年技术积累,在谐波减速器领域长期保持领先地位。2022年,从我国谐波减速器市场份额看,哈默纳科市场份额最大,占比38%,其次是绿的谐波市场份额为26%。目前,我国国产品牌在市场占有率不断提升,国产谐波减速器已基本可以实现国产替代,在减速比、输出转速、传动精度等当面和海外品牌差距明显缩小。

图表 46: 谐波减速器专利申请构成



资料来源: CNKI, 华经产业研究院, 国盛证券研究所

图表 47: 2022 年中国谐波市场竞争格局



资料来源: MIR DATABANK, 中商情报网, 国盛证券研究所

图表 48: 谐波减速机主要厂商

公司	国家	成立时间	介绍
哈默纳科 (HDSI)	日本	1970	成立于 1970 年, 总部位于日本东京, 主要从事谐波减速器、机电一体化产品、精密行星减速器等生产和销售, 是整体运动控制的领军企业, 其生产的谐波减速器被广泛应用于各种传动系统中, 在全球工业机器人领域中有着较高的市场占有率。
电产新宝 (SHIMPO)	日本	1952	成立于 1952 年, 总部位于日本京都, 是日本电产公司旗下子公司, 主要从事精密减速机、变速机的开发、生产和销售。
中技克美	中国	1994	成立于 1994 年, 注册资本 4000 万元, 位于北京市, 在 2017 年于全国中小企业股份转让系统挂牌, 主营业务包括谐波传动产品、谐波传动机电产品的制造和研发。
来福谐波	中国	-	公司一家从事高精度谐波减速器的专业化公司, 拥有 30000 平方米的标准厂房, 并从原材料到成品的所有环节都有严格的把控, 从而保证产品的质量。
北京谐波传动	中国	1983	成立于 1983 年, 具有长期的关于谐波齿轮传动技术的研发及为用户服务的丰富经验, 是从事谐波传动及特种传动技术的研发销售的专业化企业。
大族谐波传动	中国	-	公司为大族激光科技产业集团股份有限公司下属子公司, 专注于精密减速器及装置、机器人系统、机电一体化设备的研发生产与销售。公司位于深圳福永, 在北京、苏州等地设有办事处, 业务范围覆盖全国。

资料来源: 各公司官网, 公司招股说明书, 国盛证券研究所

旋转执行器核心标的: 执行器总成环节, 建议关注三花智控、拓普集团; 减速器环节, 建议关注国内谐波减速器龙头绿的谐波, 以及布局多品类减速器的双环传动。

图表 49: 旋转执行器核心标的

公司名称	所处环节	简介
三花智控	执行器总成 (旋转+线性)	公司是全球领先的热管理系统供应商, 在美国、波兰、墨西哥、越南、印度等地建有海外生产基地, 具备全球交付能力。据公司 2023 年半年度报告, 在仿生机器人领域, 公司聚焦机电执行器, 全方面配合客户产品研发、试制、调整并最终实现量产落地; 同时, 同步配合客户量产目标, 积极筹划机电执行器海外生产布局。
拓普集团	执行器总成 (旋转+线性)	公司是国内知名的汽车零部件平台型企业, 汽车 NVH 领域的技术及研发水平位居国内前列。据公司 2023 年半年度报告, 公司研发的机器人直线执行器和旋转执行器, 已经多次向客户送样, 获得客户认可及好评。
绿的谐波	减速器	公司是国内谐波减速器龙头, 产品包括谐波减速器、机电一体化执行器及精密零部件。公司谐波减速器产品包括 LCS、LHS、N 系列和 Y 系列等多个系列类型, 广泛应用于工业机器人、服务机器人、数控机床、航空航天、医疗器械、半导体生产设备、新能源装备等高端制造领域。
双环传动	减速器	公司专注于机械传动齿轮制造, 产品广泛应用于乘用车、商用车、轨道交通、非道路机械以及电动工具、风电、工业机器人等领域。减速器方面, 公司 RV 减速器经过多年迭代, 已在国内市场占据重要份额; 谐波减速器业务为公司新业务, 已实现多型号稳定供货, 产能得以释放并快速提升。

资料来源: 各公司公告, 国盛证券研究所

2.3 线性执行器：行星滚柱丝杠和大功率密度电机是关键，设备国产化是丝杠大规模量产前提

2.3.1 行星滚柱丝杠和大功率密度电机更适合应用于线性执行器

丝杠的工作原理：丝杠轴上有一个螺旋线，而螺母上则有与之相配合的螺旋槽，当丝杠轴旋转时，螺母便沿着丝杠轴的轴向方向移动，将旋转运动转化成线性运动。

丝杠的种类：根据摩擦特性，丝杠可以分为滑动丝杠、滚动丝杠以及静压丝杠。

滑动丝杠与滚动丝杠具有不同精度标准：1) 滑动丝杠有 4~9 共 6 个等级，精度依次降低，其中 4 级最高，一般很少使用；5 级用于精密仪器与精密机床，如坐标镗订、螺纹磨床等；6 级用于精密仪器、精密机床和数控机床；7 级用于精密螺纹车床、齿轮加工机床及数控机床；8 级用于一般机床，如卧式车床、铣床；9 级用于刨床、钻床及一般机床的进给机构。2) 滚动丝杠一般有 6~7 个精度等级，如在 JIS 标准中，滚珠丝杠精度等级分为 C0、C1、C3、C5、C7、C10 共 6 个等级，而国内等级精度分为 P1、P2、P3、P4、P5、P7、P10 共 7 个等级。

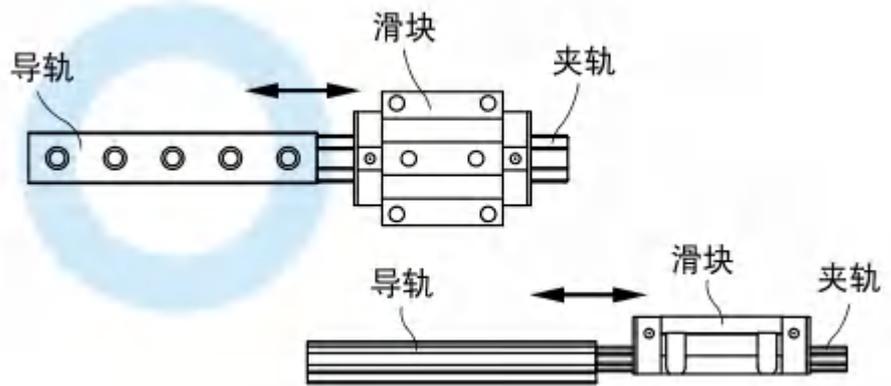
图表 50: 丝杠的分类



资料来源：机械网，国盛证券研究所

- **滑动丝杠：**主要由丝杆、螺母、滑块和导向装置等组成。结构简单，制造方便，常用于恒速传动领域，如数控机床、注塑机、模压机等。丝杠通过在螺母中旋转来传递运动，螺母是与丝杆螺距相同的螺纹，与丝杆进行相对运动，滑块与丝杆一起运动，将旋转运动转化为直线运动，导向装置用来支撑和引导滑块沿着丝杆轴向方向移动。此外，还包括一些辅助部件，如润滑系统、密封件等，用于保持丝杠的正常运行和防止外部环境对丝杠的影响。滑动丝杠的摩擦阻力较大，传动效率较低，定位精度和轴向刚度较差。

图表 51: 梯形滑动丝杠结构示意图



资料来源: 济宁利兴精密机械制造有限公司官网, 国盛证券研究所

➤ **滚珠丝杠: 由螺杆、螺母、滚珠和预压片组成。** 螺纹轴表面刻有螺纹形状的凹槽, 用于放置滚珠, 螺母是与螺纹轴配合使用的零件, 内部有与滚珠相匹配的导槽, 滚珠位于螺纹轴和螺母之间, 预压片用于对滚珠施加预压力, 消除间隙并提高丝杠的刚度。反向器、防尘器用来保证滚珠丝杠的正常运行和防止外部环境对丝杠的影响。滚珠丝杠相比于普通的梯形丝杠, 其在自锁性、传动速度、使用寿命、精度和传动效率方面优势明显。滚珠丝杠采用滚珠和钢球等滚动体, 不仅适用于更高速的运动, 相对应的机械损耗也较小, 其线性运动精度要比滑动类型丝杠更高, 并且在传动精度稳定性方面表现更出色, 使用寿命更长。

➤ **滚柱丝杠: 由螺杆、行星滚柱、螺母组成, 按照价值量占比来看。**

原理: 丝杠是牙型角为 90° 的多头螺纹, 滚柱是具有相同牙型角的单头螺纹, 其牙型轮廓通常加工成球面, 目的是提高承载能力、降低摩擦、提高效率。螺母是具有与丝杠相同头数和牙型的内螺纹。若干个滚柱沿丝杠圆周方向均匀分布, 当丝杠旋转时, 滚柱既绕着丝杠轴线公转, 又绕自身轴线自转。滚柱与螺母具有相同的螺旋升角, 与螺母啮合时能够确保纯滚动并且没有相对轴向位移。

特点: 滚柱丝杠在满足精度的同时, 承载能力大大加强, 但是其结构复杂、加工难度大和成本较高。滚柱丝杠采用滚柱作为滚动体, 相比滚珠丝杠具有更大的接触面积, 能够承受更大的负荷和冲击, 因此具有高刚性和高效率的特点。另外, 制造精度和传动精度都很高, 能够保证设备的精确定位和稳定运动。

与滚珠丝杠相比的优势: (1) 滚柱与丝杠接触半径更大, 且所有滚柱同时参与啮合, 接触点多, 比滚珠丝杠在相同丝杠直径下承载能力提高 6 倍、相同负载下比滚珠丝杠节省 $1/3$ 空间、寿命提高 14 倍、工作环境温度范围提高 2 倍。当滚柱丝杠直径为 120mm 时, 其推力可达 120t。(2) 滚柱丝杠用滚动摩擦代替滑动摩擦, 与滚珠丝杠传动效率相当, 润滑良好的情况下效率可达 90%。(3) 滚柱相对于螺母没有轴向运动, 因此具有加速、旋转和减速的能力, 转速可达 6000r/min, 直线速度 2m/s, 加速度 7000rad/s^2 , 滚珠丝杠难以做到。(4) 采用行星机构控制滚柱运动, 不需要滚动件循环装置, 且高速运转时产生的振动噪声较小。

图表 52: 滚珠丝杠 (左) 与行星滚柱丝杠 (右) 的结构示意图



资料来源: 九正建材网, 360 百科, 国盛证券研究所

静压丝杠: 由丝杠、螺母、液压缸、油管、油泵以及控制阀等构成。丝杠为外螺纹，螺母为内螺纹，丝杠和螺母运动需要的压力由液压缸提供，油管用于传输液压油，油泵为液压系统提供动力，控制阀用于控制液压油的流量和方向，从而控制丝杠和螺母的运动方向和速度。静压丝杠常应用于精密机床及数控机床的进给机构中，工作原理是通过液压系统将压力油进入到螺纹牙上的油腔内，在接触面上形成压力油膜产生平衡液压力，在螺母和螺杆之间有一层压力油膜，使丝杠副与螺母不直接接触，在压力油膜上滑动，零件之间处于液体摩擦状态。静压油膜位于静压螺母和精密丝杠之间，静压螺母和丝杠本身并不接触，因此几乎没有磨损，具有很好的减震性和静音性。静压丝杠的摩擦阻力很小，磨损小，效率高。其螺纹牙形与标准梯形螺纹牙形相同，目的在于获得良好油封及提高承载能力，但是调整比较麻烦，而且需要一套液压系统，工艺复杂，成本较高。

图表 53: 静压丝杠的丝杠被替换为楔形垫块



资料来源: MM 自动化与驱动网, 国盛证券研究所

图表 54: 不同丝杠的特征对比

丝杠分类	细分品类	图示	优势	劣势
滑动丝杠	梯形丝杠等		结构相对简单，制造成本较低，具备自锁能力	容易磨损，使用寿命相对较短，且无法达到高精度的传动效果
滚动丝杠	滚珠丝杠		传动效率高，线性运动精度高于滑动丝杠，传动可逆，可实现高速进给和微进给，售价较滚柱丝杠低	制造难度较大，承载能力较低
	滚柱丝杠		在定位精度、速度、加速度、使用寿命、承载力、传动效率、刚度方面优于滚珠丝杠	结构复杂，制造难度高，制造成本高，售价高
静压丝杠			摩擦阻力很小，磨损小，效率高；运行时没有噪音和振动；传动精度高。	对油膜的要求高；油膜厚度受温度和压力的影响较大，对工作环境的要求较高；需要专门的液压系统来提供压力油，增加了系统的复杂性和成本

资料来源：山东博特精工股份，穆格中国，MM 自动化与驱动网，国盛证券研究所整理

在线性执行器大行程、大负载、小体积、高速度的要求下，行星滚柱丝杠和大功率密度电机是破局关键。线性执行器是特斯拉人形机器人的特色方案，主要由电机+丝杠组成，主要用于大臂、和下肢。特斯拉对于线性执行器的要求主要是大行程、承载力足够大、且体积小、反应速度快。

➤ 对于电机而言，要求电机在输出功率不变的情况下，其重量更轻、体积更小、运行的效率更高，因此大功率密度电机更符合需求，但是工艺上仍需要解决大功率密度电机中存在的噪音大、效率低、温度高等问题。

➤ 对于丝杠而言，反向式行星滚柱丝杠负载更大、体积更小，更适合用于人形机器人。行星滚柱丝杠至今没有被广泛应用，主要是由于结构复杂、加工难度大和成本高，并且最主要的是之前市场需求也不大，但是人形机器人的量产有望给行星滚柱丝杠带来巨大的市场增量。正向式行星滚柱丝杠的特点是长螺杆-短螺母外加螺旋滚道，通过滚柱在丝杠轴上的滚动实现直线运动。反向式行星滚柱丝杠的构成为长螺母-短螺杆外加螺旋滚道，螺母作为主动件，由丝杠直线输出，螺母比螺杆还要长。这种结构的最大优点是可将螺母作为电机的转子实现电机和反向式行星滚柱丝杠的融合设计，可使人形机器人直

线传动结构更加紧凑、重量更小。从产品性能上看，反向式行星滚柱丝杠表现出的高承载、耐冲击、体积小、噪音低、高精度、长寿命的优势，契合人形机器人的要求。

图表 55: 无框力矩电机



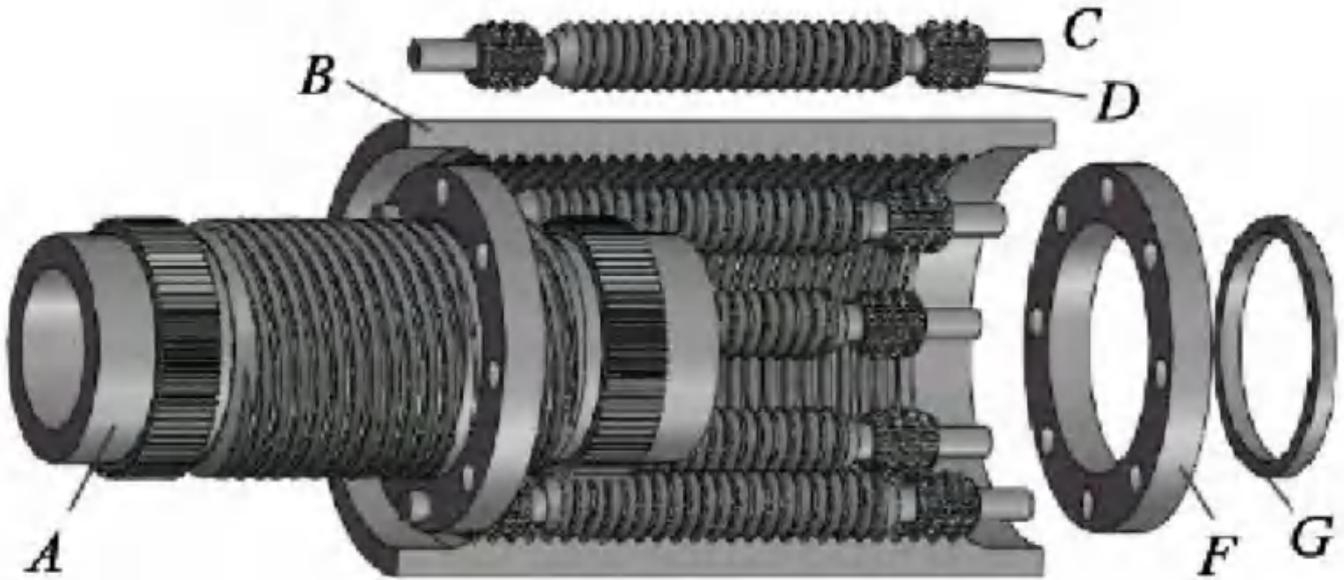
资料来源: 科尔摩根官网, 国盛证券研究所

图表 56: 步进电机、伺服电机结构原理图



资料来源: 鸣志电器官网, 国盛证券研究所

图表 57: 反向式行星滚柱丝杠结构示意图

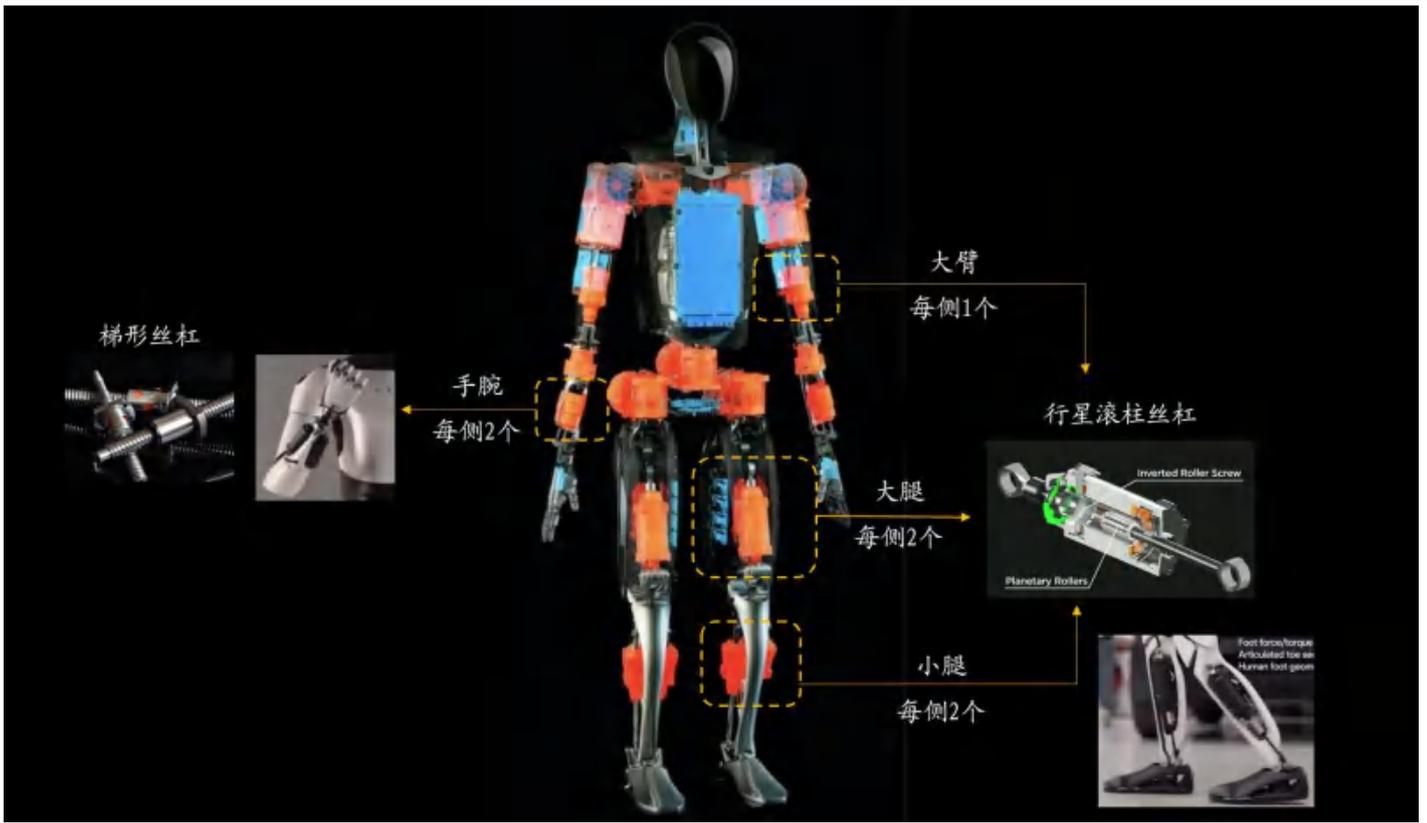


资料来源：刘更《行星滚柱丝杠副的新发展及关键技术》，国盛证券研究所（备注：A是丝杠，B是螺母，C是滚柱，D是滚柱两端的直齿，F是滚柱保持架，使滚柱沿圆周均匀分布，G是弹簧挡圈）

特斯拉人形机器人主要用反向式行星滚柱丝杠和梯型丝杠。丝杠将电机的旋转运动转换为直线运动，控制机器人的各个关节，从而实现位置调整、姿态控制和负载传递等功能。丝杠在人形机器人中主要作用是线性执行器，具有较高的传动效率和刚性，能够提供大的力矩和负载承重能力，更好地模拟人体关节活动。在特斯拉人形机器人中，其线性执行器就采用了反向式行星滚柱丝杠和梯形丝杠。

- **使用数量：**梯型丝杠通常用于机器人的手腕部位，每个手腕 2 个，即每个机器人 4 个。而行星滚柱丝杠主要用于机器人的大臂、大腿和小腿等部位，每侧大臂 1 个、大腿 2 个、小腿 2 个，两侧合计就是 10 个。这些部位通常需要承受较大的负载，因此需要具备较高的刚性和传动效率。行星滚柱丝杠通过丝杠与滚柱的齿轮啮合来实现传动，具有较高的承载能力和刚性，适用于大力矩传递和高负载环境。因此，1 个机器人合计需要用到 4 个梯形丝杠和 10 个行星滚柱丝杠。
- **价值量：**就丝杠的价值量来看，梯型丝杠目前的价格约 100 元/副，行星滚柱丝杠的价格相对较高、需要进口，目前约为 10000 元/副。我们预计未来设备国产化、技术进步、叠加需求提升和规模效应背景下，梯型丝杠价格有望降低至约 50 元/副，行星滚柱丝杠降低至约 1000 元/副。

图表 58: 特斯拉 Optimus 应用丝杠的部位 (右左对称使用)



资料来源: 特斯拉 AI DAY, 产业调研, 国盛证券研究所绘制

机器人有望带来百亿级丝杠增量需求。以特斯拉 Optimus 为例，其全身预计使用 14 个线性执行器，则需要 14 个丝杠部件，假设未来单台机器人丝杠量产均价为 1000 元，则单台机器人丝杠价值量为 1.4 万元。在 100 万台机器人销量假设下，机器人丝杠市场空间将达 140 亿元，机器人有望成为丝杠最大的应用市场。

图表 59: 人形机器人丝杠市场空间敏感性分析

人形机器人销量 (万台)	50	100	200
单台机器人用量 (个)	14	14	14
机器人丝杠单价 (元/个)	1000	1000	1000
机器人丝杠市场空间 (亿元)	70	140	280

资料来源: 乐晴智库, 1688 批发网, 国盛证券研究所测算 注: 测算含主观假设, 结论与实际可能存在误差

2.3.2 设备国产化是丝杠大规模量产的前提

丝杠部件加工难度高，对设备要求高。丝杠制造难度大，这也是制约其国产化的重要因素之一。丝杠有淬硬丝杠和不淬硬丝杠两种，前者的耐磨性较好，能较长时间保持加工精度，但加工工艺复杂，必须有高精度的螺纹磨床和专门的热处理设备，而后者只需要精密丝杠车床。丝杠是细长柔性轴，刚性较差，结构外形复杂，有很高的螺纹表面要求，还有阶梯、沟槽等，所以在加工过程中易出现变形，因此对加工工艺的要求很高。而螺母的内螺纹要求与丝杠外螺纹精确匹配，对精度的要求同样还很高。此外，高精度滚珠丝杠需要对螺纹、沟槽进行精磨加工，生产效率难以提高。行星滚柱丝杠由于具有更加复杂的空间形状，加工难度一般比滚珠丝杠更高。**加工难点:**

(1) 对外圆和螺纹需要分多次加工，逐步减少切削量，从而逐步减少切削力和内应力，减少加工误差，提高加工精度。

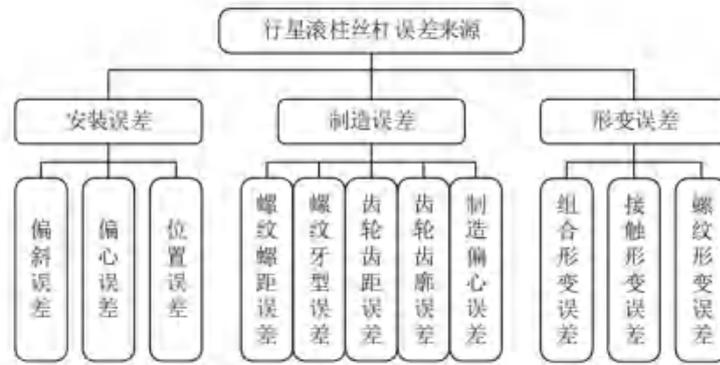
(2) 每次粗加工外圆及粗加工螺纹后都要进行时效处理，以便消除内应力。丝杠的精度

要求越高，时效处理的次数也越多。

(3) 每次时效处理后都要重新打中心孔或修磨中心孔，以修正时效处理时产生的变形；并除去氧化皮等，使加工有可靠而精确的定位基面。

(4) 每次加工螺纹前，先加工丝杠外圆（切削量很小），然后以丝杠外圆和两端中心孔作为定位基面加工螺纹，逐步提高螺纹加工精度。

图表 60: 行星滚柱丝杠误差来源



资料来源: 柯浩《行星滚柱丝杠传动精度与设计》，国盛证券研究所

丝杠加工工艺类型:

(1) **冷轧**: 优势是简单，步骤短，但是采用冷加工工艺、用模具压出，精度偏低，仅能达到 P7 级别，因此一般不满足人形机器人丝杠的要求。

(2) **旋风铣**: 旋风铣是刀盘带动刀具作高速旋转运动，工件缓慢轴向进入，刀具作径向深入切削。优点是生产效率高，并能达到一定的精度 (P3 级，截形轮廓精度 $\pm 5 \mu\text{m}$ ，圆柱度 $5 \mu\text{m}$ ，表面粗糙度值 $Ra=0.4 \mu\text{m}$)。对应的设备为旋风铣床。

(3) **硬车**: 又称之为以车代磨，其采用螺纹滚道硬车削技术，生产速度快、加工效率高，但是精度没有磨床的精度高。对应的设备为车床。

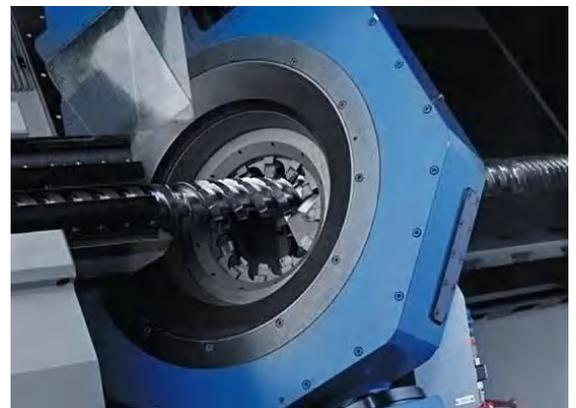
(4) **砂轮磨削**: 以先车后磨的方式进行加工制造生产，先把原材料车削到一定精度，再用专用丝杆磨床先粗磨再精磨到所需要的尺寸。这种加工方式优点是精度高，可以达到 P1 级别，足以满足人形机器人的精度需要。

图表 61: 丝杠-冷轧工艺加工示意图



资料来源: 新浪财经, 国盛证券研究所

图表 62: 丝杠-旋风铣工艺加工示意图



资料来源: 158 机床网, 国盛证券研究所

图表 63: 丝杠-车床车削加工示意图



资料来源: 周氏数控官网, 国盛证券研究所

图表 64: 丝杠-砂轮磨削加工示意图



资料来源: 东莞市福庆机械有限公司, 国盛证券研究所

图表 65: 工艺对比-旋风铣 VS 硬车 VS 砂轮磨

可加工部件	精度	生产效率	设备价格
旋风铣 螺杆、行星滚柱(可以加工螺纹轨道,但是两端的类似齿轮结构难以加工)	偏低。精度可以达到 P3 级别。 刀具变形: 刀具旋转速度快, 刀具易磨损。 切削热: 刀盘高速旋转, 产生的切削热量相对较多, 热量多容易导致丝杠变形。 表面粗糙度: 刀具磨损和热量波动会影响加工的稳定性和精度, 导致表面粗糙度难控制。 加工精度比砂轮磨要低。精度可以达到 P2-P3 级别。	高, 刀盘带动刀具作高速旋转运动, 工件缓慢轴向进入, 刀具作径向深入切削, 生产速度比车削更快, 适合大批量生产。	主要设备是旋风铣床, 相比较与砂轮磨、硬车而言, 偏低。价格在预计在 50 万左右。
硬车 螺杆、行星滚柱、螺母(可以,但需要对刀头做一些更改,稳定性较难保持)	精度低, 可以达到 P2-P3 级别。 刀具变形: 如果刀具刚度不足或切削用量过大, 可能会导致刀具变形, 进而影响加工精度。 切削热: 由于切削速度和切削厚度较高, 会产生切削热, 导致工件变形, 从而影响加工精度。 表面粗糙度: 可能因为刀具的磨损和加工状态的波动, 导致加工表面的粗糙度不易控制。	通常采用高转速、大切深, 金属切除效率是磨削加工的 3 倍多, 生产速度比砂轮磨要快、加工效率较高。	主要设备是车床, 价格比旋风铣床要高, 但是低于砂轮磨床。价格 50 万左右。
砂轮磨 螺杆、行星滚柱、螺母	精度高, 可以达到 P1 级别。 刀具变形: 由于磨轮的颗粒小, 分布均匀, 可以减小磨削刃口与工件接触面积, 从而降低切削力和热变形所造成的误差, 实现更高的加工精度。 切削热: 由于磨粒的切削速度较低, 切削厚度较小, 产生的切削热较少, 因此对加工精度的影响也较小。 表面粗糙度: 由于磨轮的颗粒小, 分布均匀, 所以磨削能够实现更高的表面精度和亮度。	用定制化丝杆磨床先粗磨、再半精磨、再精磨, 生产速度不高。对一副行星滚柱丝杠, 一般 2 个小时完成, 一天大概 10 副	主要设备是外螺纹磨床、内螺纹磨床。高精度设备目前主要为进口, 价格偏高。价格在 100-200 万左右。

资料来源: 刘顺华《旋风铣削在螺旋件中的应用研究》、张广明《精密滚珠丝杠制造技术的变革创新》、高岩《大直径内螺纹的旋风铣加工》、张广明等《滚珠丝杠滚道硬车加工技术研究》、宋现春《旋风硬铣削加工技术及其在精密滚珠丝杠加工中的应用》、中国供应商网、产业调研、国盛证券研究所

梯形丝杠制造流程大致分为“冷拔→滚花→铣丝→校正→钻孔→切断→倒角”，采用旋风铣削丝杠设备，解决以往车削加工工艺产生的问题。梯形丝杠开始采用车削加工，工艺路线包括“冷拔→滚花→车螺纹→校正→钻孔→切断→倒角”，但是这种加工方式效率低下、成本高。并且由于小圆钢刚度低，车削、滚花时容易变形，不能生产小号螺轮。为此旋风铣削丝杠设备被设计出来，不仅可以提高转速，还能够将铣丝、滚花一次完成。改进后的工艺减小了表面粗糙度，减少由切削力引起的震动，但是增加了小径工件螺距累积误差（大径工件变形较小）。

图表 66: 梯形丝杠加工工艺流程

梯形丝杠-铣削加工



梯形丝杠-车削加工



资料来源: 小龙丝杠加工公司官网, 国盛证券研究所

滚珠丝杠生产工序: 螺母和螺杆各需要 15 道工序, 核心决定精度的工序阶段为精磨, 对应设备为螺纹磨床, 而滚珠一般为外采的标准件。滚珠丝杠的加工难度高于梯形丝杠, 机械加工一般包括切削加工 (精车, 半精车外圆、螺纹)-热处理-磨削加工 (精磨, 半精磨外圆、螺纹) 等。

图表 67: 滚珠丝杠-螺杆部分工序图



资料来源: 潘小英《鸿鑫公司滚珠丝杠项目的商业计划书》, 国盛证券研究所

图表 68: 滚珠丝杠-螺母部分工序图

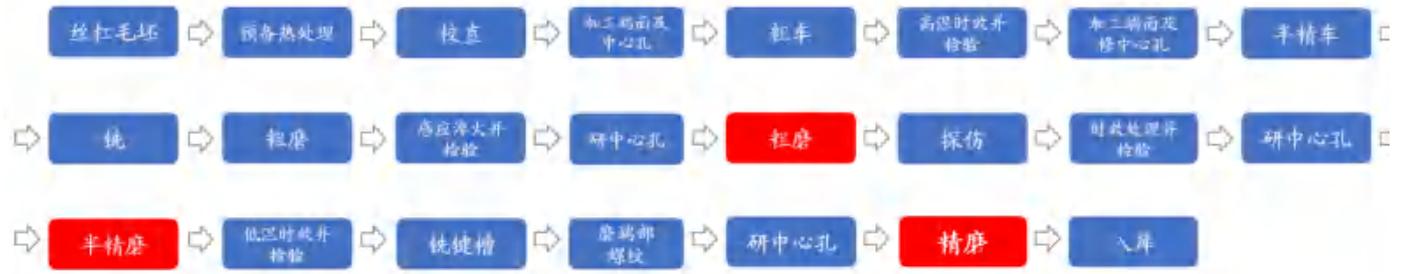


资料来源: 潘小英《鸿鑫公司滚珠丝杠项目的商业计划书》, 国盛证券研究所

行星滚柱丝杠的制造: 核心难点在于螺母内螺纹加工, 对应的核心设备为螺纹磨床。反向式行星滚柱丝杠的螺母很长、还是内螺纹, 加工时还需要有一个螺旋升角, 砂轮伸进

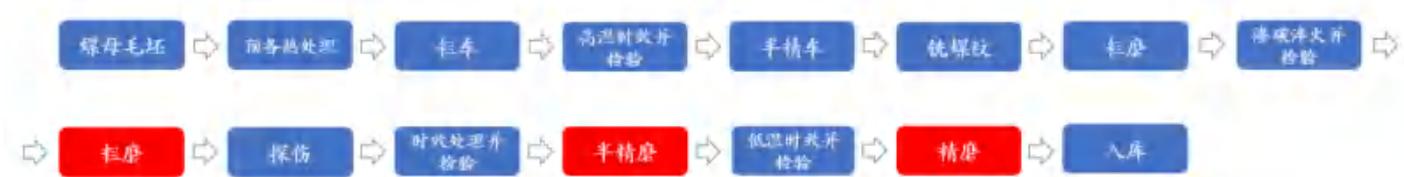
去磨，精度很难控制。因为砂轮是单边支撑，螺母越长，砂轮就越要往里面走，砂轮伸得越长、抖动越厉害，对刚性的要求也就越高，很细微的抖动，那么误差都达到微米级别，所以螺母越长，其精度越难控制。反向式行星滚柱丝杠与其他类型的丝杠差别很大，因此需要定制化的专机磨床。从加工上看，由于行星滚柱丝杠依靠零件间的螺纹啮合实现传动功能，其螺纹的加工精度将直接影响系统的传动精度、使用寿命、与平稳性，而磨削是高精度丝杠螺纹的主要加工方法，磨削的实质是砂轮的表面有很多磨粒划擦、刻划和切削工件表面，使用螺纹磨床高速旋转的成型砂轮对加工工件表面进行高速磨削，因此，高精度磨床设备成为了行星滚柱丝杠加工生产的核心要素。

图表 69: 行星滚柱丝杠-丝杠加工工艺流程



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》，国盛证券研究所

图表 70: 行星滚柱丝杠-螺母加工工艺流程



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》，国盛证券研究所

图表 71: 行星滚柱丝杠-滚柱加工工艺流程



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》，国盛证券研究所

图表 72: 行星滚柱丝杠-内齿圈加工工艺流程



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》, 国盛证券研究所

进口丝杠价格高、海外加工设备价格高&交付周期长, 因此设备国产化是必然趋势。行星滚柱丝杠价格高、制作难度大, 此前需求不大, 一般为进口。但是进口价格目前为 1+ 万元/副, 成本高昂, 难以满足人形机器人量产的成本要求, 因此国内企业纷纷希望自行生产行星滚柱丝杠。然而, 国内企业自行生产, 需要进口相关的螺纹磨床, 海外螺纹磨床价格非常高, 一般为 100-200 万欧元/台, 并且是定制化磨床。一开始量不大、又是定制, 国外企业产能有限, 供货的意愿不强。此外, 国外厂家的销售模式是以销定产, 客户下单后, 通常需要 2 年以后才能拿到设备, 生产交付周期很长, 未来很难满足人形机器人的量产需求。

国内多厂家发力螺纹磨床, 国产化进程有望加速。从螺纹磨床竞争格局上看, 欧美、日本的厂家全球领先。国外螺纹磨床主要厂商包括: 日本三井、德国克林贝格、瑞士斯图特、英国麦屈克斯和霍罗德、美国德拉克等; 国内具备丝杠加工能力的厂商包括: 浙海德曼、秦川机床、日发精机、华辰装备等。相比国外厂商, 在高端螺纹磨床产品上仍存在较大差距, 在丝杠前道生产设备中, 国内技术已趋于成熟, 后道核心设备即数控螺纹磨床国产化率低, 生产高端丝杠所用的高精度螺纹磨床基本完全依赖进口。国内磨床与国外磨床的差距主要体现在组装精度、数控系统以及加工经验等方面。目前国内磨床技术持续突破, 多家厂商与下游客户进行密切技术交流, 在螺纹磨床技术上持续研发。

图表 73: 国内外螺纹磨床主要参会厂家

	公司名称	国别	业务情况
国外厂商	Doimak (多伊马克)	西班牙	Doimak 成立于 1974 年, 在欧洲是螺纹磨削领域的领导者, 拥有内螺纹磨床和外螺纹磨床。
	Seiki (三井)	日本	用于生产滚珠丝杠的螺纹磨床、加工中心、镗床, 包括用于内螺纹加工的磨床
	MATRIX (麦屈克斯)	英国	成立于 1934 年的全球螺纹磨床龙头, 专门生产各种类型的螺纹磨床, 包括内螺纹磨床。
	DRAKE (德拉克)	美国	全球螺纹磨床龙头, 公司生产各种精密磨床, 其产品线包括专用于螺纹加工的磨床
	Holroyd (霍罗德)	英国	专门生产用于螺纹加工的磨床, 包括内螺纹磨床
	Studer (斯图特)	瑞士	知名磨床制造商, 其产品包括可用于内螺纹磨削的高精度圆磨机。
	Klingelberg (克林贝格)	德国	提供高质量螺纹磨床
国内厂商	浙海德曼	中国	车床龙头, 可用于丝杠加工。
	华辰装备	中国	轧辊磨床龙头, 与贝斯特配套导轨磨床。
	秦川机床	中国	子公司汉江机床专注于螺纹磨床, 汉江机床的螺纹磨床市场占有率超过 70%。
	日发精机	中国	公司数控螺纹磨床用于新能源汽车、人形机器人上的丝杆与螺母的试磨情况良好, 高效且精度符合客户要求, 获得了客户的认可。
	广州敏嘉	中国	2001 年成立, 公司多年来深耕滚动功能部件行业、机器人及 RV 减速器行业, 产品涵盖了车床、铣床、钻床、磨床多个领域。公司主要产品有: 数控车床, 车铣复合加工中心, 磨床, 内螺纹磨削中心, 外螺纹磨床, 外圆磨床等。
豪特曼	中国	2007 年成立, 主要产品包括非圆磨削系列、平面龙门成型磨床系列、铣磨混合中心系列、车铣复合中心系列、内外圆磨削系列、工具磨削系列。	

资料来源: wind, 各公司官网, 同花顺, 欧洲机床网, 158 机床网等, 国盛证券研究所

螺纹磨床空间测算: 人形机器人有望带来近百亿的高精度螺纹磨床增量需求。我们对人形机器人带来的高精度磨床的市场增量进行测算, 假设单台机器人需要行星滚柱丝杠 10 套, 行星滚柱丝杠三个主要部件螺母、螺杆、滚柱 (一般一套为 6-8 根) 需要内螺纹磨床、外螺纹磨床、外圆磨床、内圆磨床等 4 种不同类型的磨床, 各磨床之间难以通用, 假设该 4 种磨床合计每天生产行星滚柱丝杠数量为 25 套, 一年有效工作天数为 300 天, 平均单台磨床价值量按 150 万元计算, 预计 100 万台人形机器人将带来 80 亿的高精度磨床设备需求增量。

图表 74: 人形机器人带来高精度磨床设备市场空间

人形机器人台数 (万台)	50	100	200
丝杠品类	行星滚柱丝杠	行星滚柱丝杠	行星滚柱丝杠
单台机器人所需丝杠数 (副)	10	10	10
丝杠总需求量 (万副)	500	1000	2000
4 台磨床每天丝杠生产数量 (副/天)	25	25	25
一年有效工作天数 (天)	300	300	300
4 台磨床全年丝杠生产数量 (副)	7500	7500	7500
磨床需求量 (台)	2667	5333	10667
单台磨床价值量 (万元)	150	150	150
新增磨床市场空间 (亿元)	40	80	160

资料来源: 产业调研, 国盛证券研究所测算 注: 测算含主观假设, 结论与实际可能存在误差

2.3.3 投资建议: 重视有可能率先突破的主流丝杠和丝杠设备企业

重视有可能率先突破的主流丝杠和丝杠设备企业。在线性执行器大导程、大负载、小体积、高速度的要求下, 行星滚柱丝杠是破局关键。而进口的行星滚柱丝杠加工设备价格高、且交付周期长, 难以满足人形机器人的量产需求, 因此设备国产化是必然趋势。在此背景下, 我们建议关注有可能率先突破的主流丝杠和丝杠设备企业: 北特科技、新剑传动 (未上市)、贝斯特、五洲新春、浙海德曼、华辰装备、日发精机。

图表 75: 丝杠和丝杠设备企业主要核心标的

丝杠企业	简介
北特科技	<p>公司主业为汽车底盘零部件业务，公司的转向器齿条、减震器活塞杆在行业内处于领先地位。在人形机器人业务方面，公司 2023 年年底开始布局，公司在战略上对此高度重视，公司扎根汽车底盘零部件行业 20 多年，所积累的生产工艺与丝杠产品的生产工艺有较高的同源性，公司研发团队在相应的精密车加工、磨加工、原材料调质、表面热处理、探伤、校直等环节，形成了一套专业性高、体系性强的工艺流程和生产方案。</p>
新剑传动 (未上市)	<p>公司成立于 1999 年，专业从事研发生产滚轧成型蜗杆齿轮、座椅水平驱动器、行星滚柱丝杠-直线型电驱动关节、旋转型电驱动关节等相关系列产品。产品主要应用于人形机器人、半导体、通讯电子、智能汽车、无人机、工程机械等行业。公司拥有制造场地 3 万多平方米，拥有进口、国产研发、制造、检测高端设备 300 多台、10 多条智能化组装线，员工 300 余人。公司研发技术实力雄厚、客户拓展顺利，行星滚柱丝杠业务有望率先且深度受益于人形机器人市场。</p>
贝斯特	<p>公司机加工能力突出，主要产品为涡轮增压器精密轴件、叶轮、中间壳等。公司董事长为无锡机床厂出身的机床专家，在机加工领域具有深厚的积累。2022 年公司设立全资子公司“无锡宇华精机”，布局高精度滚珠/滚柱丝杠副、高精度滚动导轨副等，瞄准高端机床、机器人等市场进行大力开拓。公司作为国内机加工领域顶尖玩家之一，切入丝杠领域有望延续其技术优势，跻身丝杠领域第一梯队。</p>
五洲新春	<p>公司为国内轴承领军企业，磨前技术全球领先，公司深耕精密制造技术二十多年，是国内少数涵盖精密锻造、制管、冷成形、机加工、热处理、磨加工、装配的轴承精密零部件全产业链企业。公司前瞻布局汽车滚珠丝杠组件，其技术与人形机器人丝杠具备一定共通性。我们认为公司作为国内轴承领先企业，具备精密传动部件加工的优秀基因，有望进入人形机器人供应链，迈入超级成长赛道。</p>
丝杠设备企业	简介
浙海德曼	<p>公司主营业务为数控车床研发、设计、生产和销售，产品主要分为高端数控车床、自动化生产线和普及型数控车床，致力于高精密数控车床的核心制造和技术突破。公司机床精度标准及性能达到了国外同行同等水平，有些关键技术有所突破、领先国外，已实现主轴、刀塔、尾座三大核心部件全部自制，在加工效率、节拍、稳定性、高性价比的本土化服务和自动化产品的应用创新方面优势明显。公司产品系列可满足涉及车削及车铣工艺的丝杠的高精、高效、高可靠性的加工要求。</p>
华辰装备	<p>公司作为国内轧辊磨床行业的领军企业，在部分应用领域内，公司的设备品质已达到国际领先水平，已具备与国际一流轧辊磨床制造商 HERKULES（德国）、WALDRICH（德国）、POMINI（意大利）等同台竞技并实现进口替代的技术能力。公司为贝斯特滚动功能部件项目提供设备支持，目前公司已成功研制出丝杠导轨生产过程中所需的核心设备：初加工的外圆磨床、核心螺纹磨床和导轨磨床，其中外圆磨床已实现出货。</p>
日发精机	<p>公司主营业务为数字化智能机床及产线。在高端轴承磨超加工及装配生产线领域，公司产品市占率第一。公司进行数控螺纹磨床研发，目前数控螺纹磨床用于新能源汽车、人形机器人上的丝杠与螺母的试磨情况良好，高效且精度符合客户要求，已有少量订单。</p>

资料来源：各公司公告，各公司官网，国盛证券研究所

2.4 传感器是人形机器人与 AI 结合的关键之一

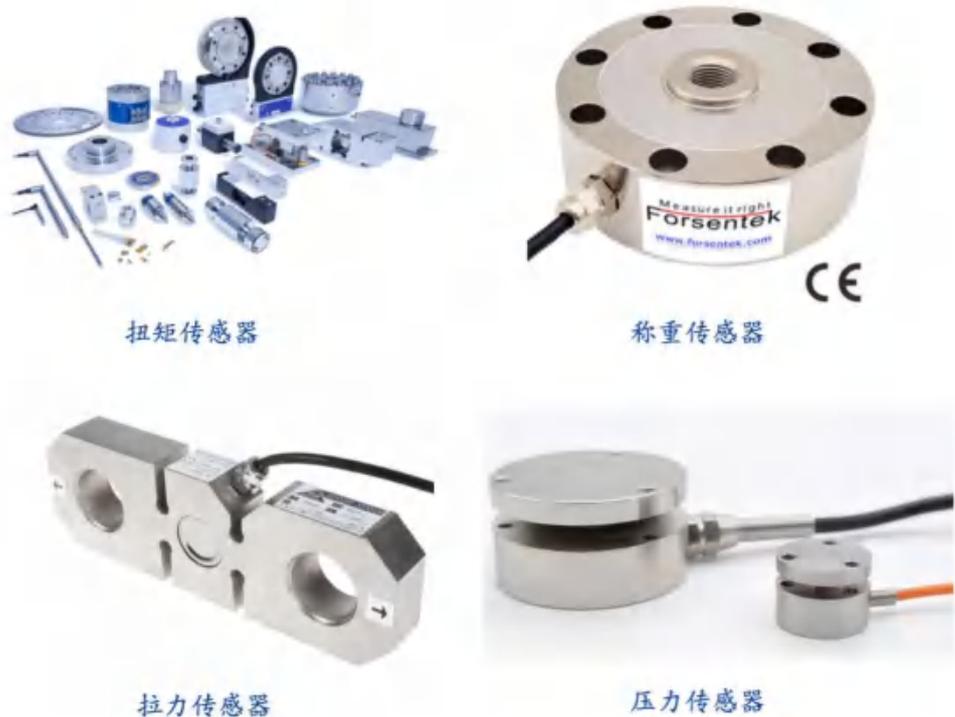
2.4.1 机器人了解周围环境需要广泛的信息，传感器是重要的“中介”

传感器是指将收集到的信息转换成机器人能处理的电信号或其他信号的元件/装置。人类会将视觉、听觉、触觉、嗅觉等获得信息传递给大脑，大脑进行处理以后人类会做出相对应的反应，人形机器人作为具身智能的终端形态，重点在于仿生，机器人了解周围的世界需要广泛的信息，传感器则用于估计机器人的状态和环境，根据传感器获得的信号进行控制或处理，最后反馈出正确的任务路径。对应着人类的视觉、听觉、嗅觉、触觉等，机器人的传感器就是机器人的“五官”，对应的传感器也分为触觉传感器、视觉传感器、距离传感器等，传感器助力机器人增加更多智能意识。

2.4.2 力/力矩传感器：机器人常用应变式六维，制造工艺难度大

力传感器有压力、称重、扭矩等类型，通过荷电效应和磁场效应将力转换为电信号。力是引起物质运动变化的直接原因，力传感器是将力的量值转换为电信号的器件，可以检测张力、拉力、压力、重量、扭矩、应变等力学量，广泛应用于制造业自动化、航天航空、医疗器械等领域。根据其测量的力的类型不同，可以分为扭矩传感器、称重传感器、拉力传感器和压力传感器。力传感器工作的原理主要基于荷电效应和电磁感应效应，当力传感器受到力的作用是，内部的电荷/磁场会产生相应的变化，从而产生电信号。

图表 76: 力传感器按测量的力的类型分类

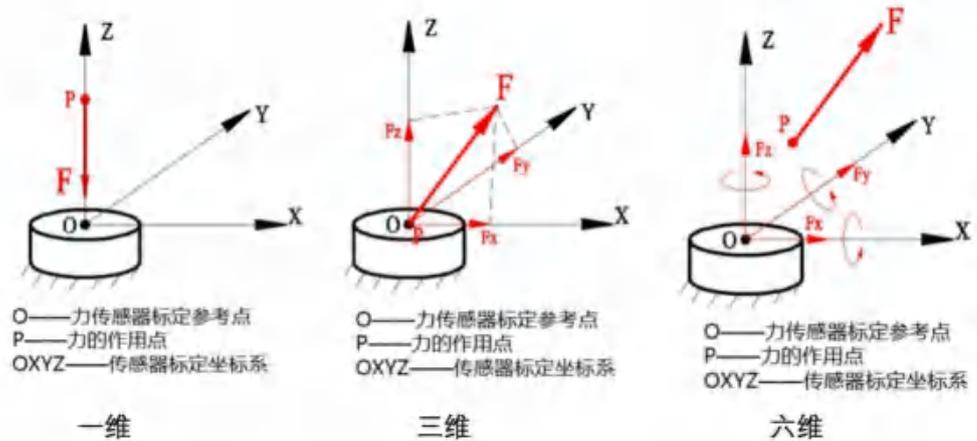


资料来源: Dytran 官网, HBM 官网, Bufson 官网, Forsentek 官网, 国盛证券研究所

按测量力的纬度划分，力传感器可以分为一维、三维和六维力传感器，二维和五维的力传感器较少。力的方向和作用点决定该用几维的力传感器测量：1) 如果力的方向和作用点固定且和一维力传感器的标定坐标轴一致，那么一维传感器就能对其精确测量；2) 如果力的方向随机变化，力的作用点保持不变且与传感器的标定参考点重合，那么三维力传感器能完成任务，可以同时测量 F 的分力 F_x 、 F_y 、 F_z ；3) 如果力的方向和作用点都

在三维空间内随机变化，那么空间中任意的作用点力可以分解为沿标定坐标轴的三方向分力和绕标定坐标轴的三方向力矩（作用力使物体绕着转动轴或支点转动的趋向），则需要使用六维力传感器来测量 F_x 、 F_y 、 F_z 、 M_x 、 M_y 、 M_z 六个分量。

图表 77: 力传感器按测量的力的类型分类



资料来源: 坤维科技, 国盛证券研究所

不同纬度的力传感器适用于不同的场景，机器人多用六维力（力矩、六轴力）传感器。如果力的作用点离传感器的标定参考点很近且方向不变，对测量精度也要求不高的话，那么三维力传感器就可以达到要求；如果力的作用点离传感器标定参考点较远且力的方向随机变化，对测量精度要求较高的情况下，通常需要使用六维力传感器。机器人力传感器距离力的作用点中间通常会有执行机构，那么力的作用点通常力传感器标定参考点较远且方向随机变化，精度也要求较高（六维力传感器的内部算法会解耦各方向力和力矩间的干扰，使力的测量更为精准），所以机器人场景中我们通常使用六维力传感器。

图表 78: 三维/六维力传感器适用情况

项目	三维力传感器	六维传感器
力的作用点的距离	离传感器标定参考点的距离很近	离传感器标定参考点的距离较远
力的方向是否变化	不变化	随机变化
测量精度	要求不高	要求比较高

资料来源: 坤维科技, 国盛证券研究所

图表 79: 六维力传感器在机械臂中的使用



资料来源: 坤维科技, 国盛证券研究所

六维力传感器在人形机器人的市场规模可达千亿，空间巨大。目前市场上通常说六维力传感器是指应变式力矩传感器，价格较高，我们基于以下假设对人形机器人中六维力传感器的市场空间进行测算：1) 假设人形机器人随着产业化的推进量产数量逐步增加；2) 假设目前应变式六维力传感器均价约 1 万/个，未来随着产品数量的增加逐步降价，但最终降价的幅度有限；3) 假设单台人形机器人至少需要 4 个六维力传感器。测算所得，人形机器人量产数量为 100 万台时，六维力传感器市场空间可达 320 亿元，人形机器人量

产数量达 500 万台时，六维力传感器市场空间高达 1200 亿元。

图表 80: 六维力传感器在人形机器人的市场空间测算

人形机器人量产台数/万元	10	50	100	200	300	400	500
六维力传感器单价/万元	1	1	0.8	0.75	0.7	0.6	0.6
单台人形所需六维力传感器的数量/个	4	4	4	4	4	4	4
六维力传感市场空间/亿元	40	200	320	600	840	960	1200

资料来源: 国盛证券研究所测算

根据感力器件的不同，六维力传感器可以分为应变式（电阻式）、光学式和电容/压电式力矩传感器。六维力传感器通常由弹性体、应变片、电桥、信号调理器和输出接口等组成，其中弹性体和应变片是核心器件，当力输入后，弹性体将物体受到的力和力矩转化为应变，应变片再检测弹性体的应变情况，电桥再将应变片的信号转化为电信号，信号调理器再对电信号进行处理最后通过输出接口输出。不同类型的六维力传感器其中应变片对应的材料不同：

1) **应变式力矩传感器**: 应变片采用的硅应变片或金属箔，应变片被贴在弹性体上，当力矩传感器受力时，硅应变片或金属箔形变被测量转换成电信号，再通过算法计算成需被计量的数值。该类力矩传感器采用了粘接应变片和可变形板，制造工艺较为复杂，成本较高。但其有较高分辨率且可以承受极端载荷，据 Robotous，目前市场份额占比 80% 以上。

2) **光学式力矩传感器**: 据 Robotous，光学式力矩传感器市场份额最低，平常较难找到。传感器受到力作用时，光学传感器测量光强度变化，将光栅变化的信号转化为电信号。该类传感器制造工艺和水平适中，光信号受点噪声影响较小，具有较高稳定性，但它不能承受重载荷，实际使用较少。

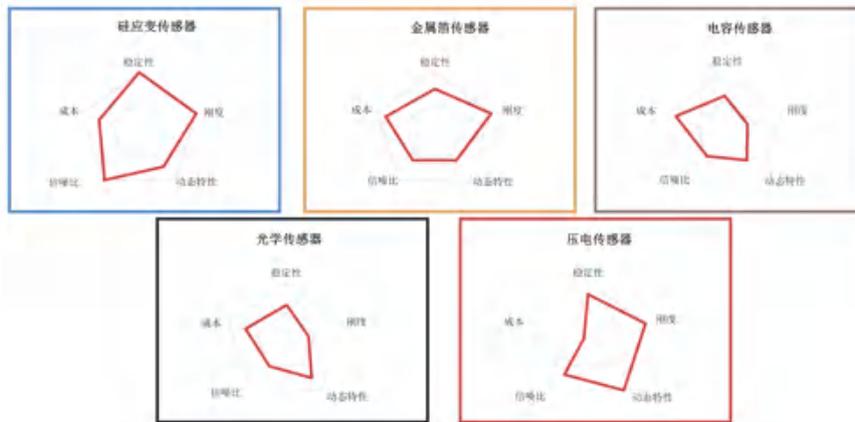
3) **电容/压电式力矩传感器**: 压电式力矩传感器是通过压电材料的形变产生静电电荷/电压变化从而产生电信号；电容式力矩传感器则是采用非接触式传感结构，应变片是非接触式电极，传感器受力产生电容差而计算力的具体量值。该类传感器制造工艺最简单，成本最低，但由于数据具有较高的非线性，对处理数据的算法要求较高。

图表 81: 各类型力矩传感器特点

力矩传感器类型	应变计材料	工作原理本质	制作工艺难度	市场份额
应变式（最常用）	硅应变片/金属箔	将硅应变片/金属箔的形变信号转化为电信号，再转化为力的量值	最高	80%+
光学式	光学传感器	将光栅变化的信号转化为电信号，再转化为力的量值	中等	市场份额最低
压电/电容式	压电材料/非接触式电极	通过压电材料的形变产生静电电荷/电压变化从而产生电信号，或者产生电容差为电信号，再转化为力的量值	难度较低，主要是对处理数据的算法要求较高	中等

资料来源: Robotous, 苏州创工品, 国盛证券研究所

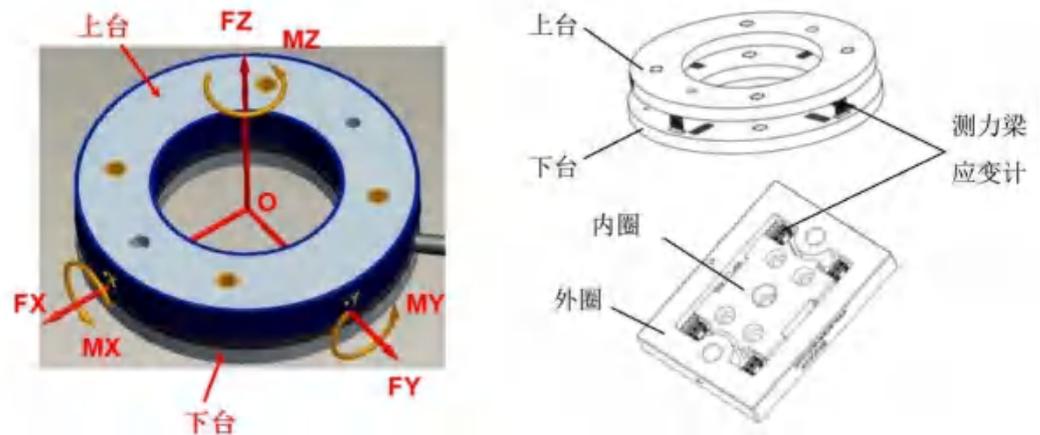
图表 82: 各类六维力传感器的特性



资料来源: 上海耐创测试技术有限公司, 国盛证券研究所

六维力传感器核心壁垒在于非线性、迟滞性、重复性、温度等其他影响, 国内外仍有一定差距。六维力传感器生产商第一梯队目前仍以国外厂商如美国 Vishay、德国 HBM 和日本 NMB 为主, 第二梯队才是国内厂商如柯力传感等公司, 国内外发展差距较大的原因主要是六维力传感器的制造工业难度较高, 具体表现在: 1) 现六维力/力矩传感器技术开发和工艺成本的平衡并不统一; 2) 应变片材料配方较难; 3) 应变片如何贴到弹性体上难度较高; 4) 六维力信号的解耦解算难度较高, 这种是解耦解算非线性的, 但敏感元件+温度响应问题会加剧非线性问题; 5) 传感器之间会有应变片以外的形变问题如漂移等会影响精度。

图表 83: 六维力传感器结构



资料来源: 俊德科技官网, 国盛证券研究所

2.4.3 触觉传感器: 帕西尼多位触觉传感器引领潮流

帕西尼研发技术优秀, 其核心产品维触觉传感器 PX-6AX 引领触觉传感器潮流。帕西尼成立于 2021 年, 公司创始团队最早来源于早稻田大学, 其发布的多维触觉传感器 PX-

6AX 解决了机器人行业中一个比较重要的问题，即早期机器人难以放量的问题之一在于没有很好的触觉系统，类比人类的五官，触觉没有具体的量化指标，是摩擦度、温度、厚度等各种因素的结合，触觉由于物理量过多难以解耦，机器人触觉精度提高存在较大难度。帕西尼针对该难点，发布的多维触觉传感器 PX-6AX 可以贴合人类的触感，其传感器精度可以做到 1%，可赋予机器人如同人体般灵敏的多纬度触觉感知能力，使机器人快速适应不同环境，在数亿个岗位上辅助人类去完成各类基础或繁杂的劳动，引领下一代行业变革。

图表 84: 多维触觉传感器 PX-6AX



资料来源: 帕西尼官网, 国盛证券研究所

PX-6AX 其柔性阵列上亚毫米级别的微小形变场能被瞬间捕捉，同时还能能为机器人提供滑动、摩擦、纹理、温度等额外信息，让机器人拥有媲美人类的灵动丰富触觉。作为人类最重要的感官知觉——触觉，几乎承担了全部的人体与物理世界交互的通道，这也包含了人类日常基础劳动的所有场景，多维触觉传感器 PX-6AX 性能优异：1) 可以测量 15 中多维触觉感知，如压觉、力觉、滑觉等多种物理量；2) 与目前市场上大多数触觉传感器不同，PX-6AX 可以测量单/三轴受力；3) 拥有多行业、多材质海量触感数据；4) 具有超高分辨率，采样频率最高可达 1000Hz，精度可达 0.01N；5) 使用频次可以达到 300 万次工业级寿命。

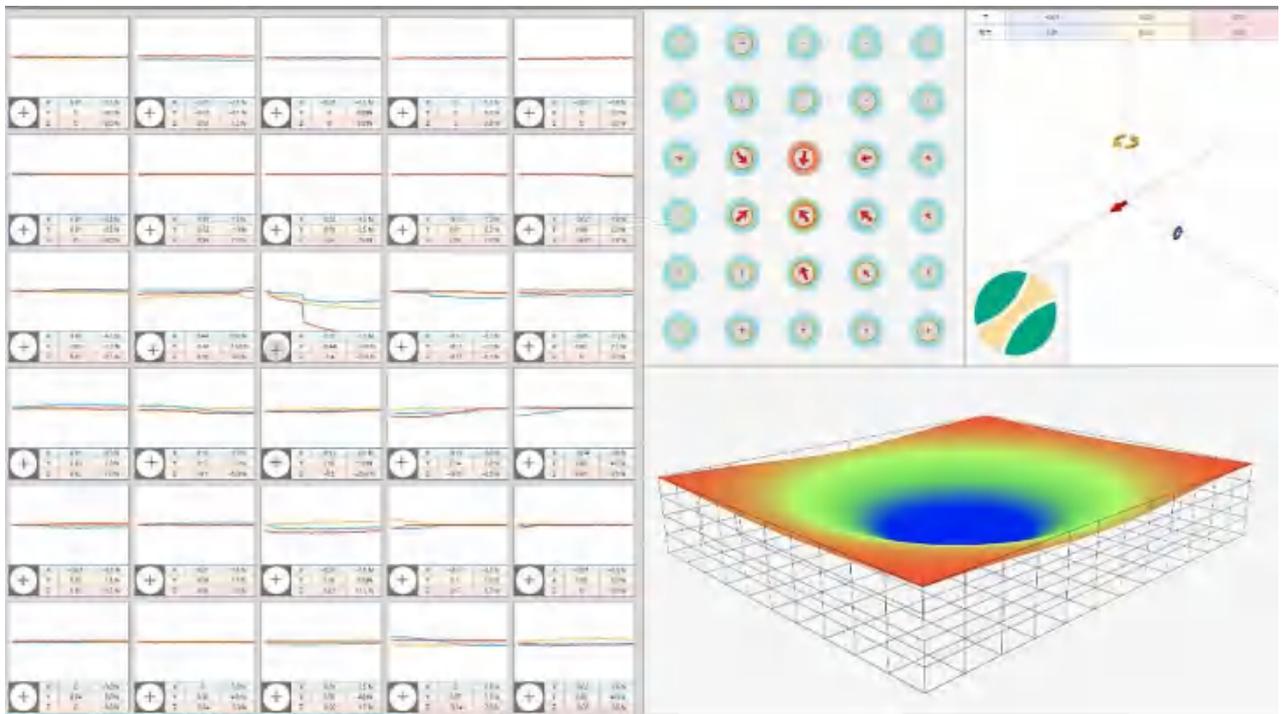
图表 85: 多维触觉传感器 PX-6AX 各项性能优异



资料来源: 帕西尼官网, 国盛证券研究所

多维触觉传感器 PX-6AX 采用阵列式方案, 在传统三维/六维的基础上还能提供额外的温度、纹理等信息。能捕捉接触面上亚毫米级别的微小变形, 赋予机器人丰富的触觉感知能力。在传统三维/六维力检测的基础上, 安装在 PX-6AX 上的柔性传感阵列能额外为机器人提供滑动、摩擦、纹理、温度等额外信息, 使用寿命达到 300 万次, 使得机器人能在更丰富多元的场景下完美感知, 完成复杂的自适应动作。传感器上布满多个按压点, 可以灵敏感应外部的压力等触感, 并快速将多种物理量联合解耦, 将充分有望推动机器人量产。

图表 86: 多维触觉传感器 PX-6AX 工作路径显示

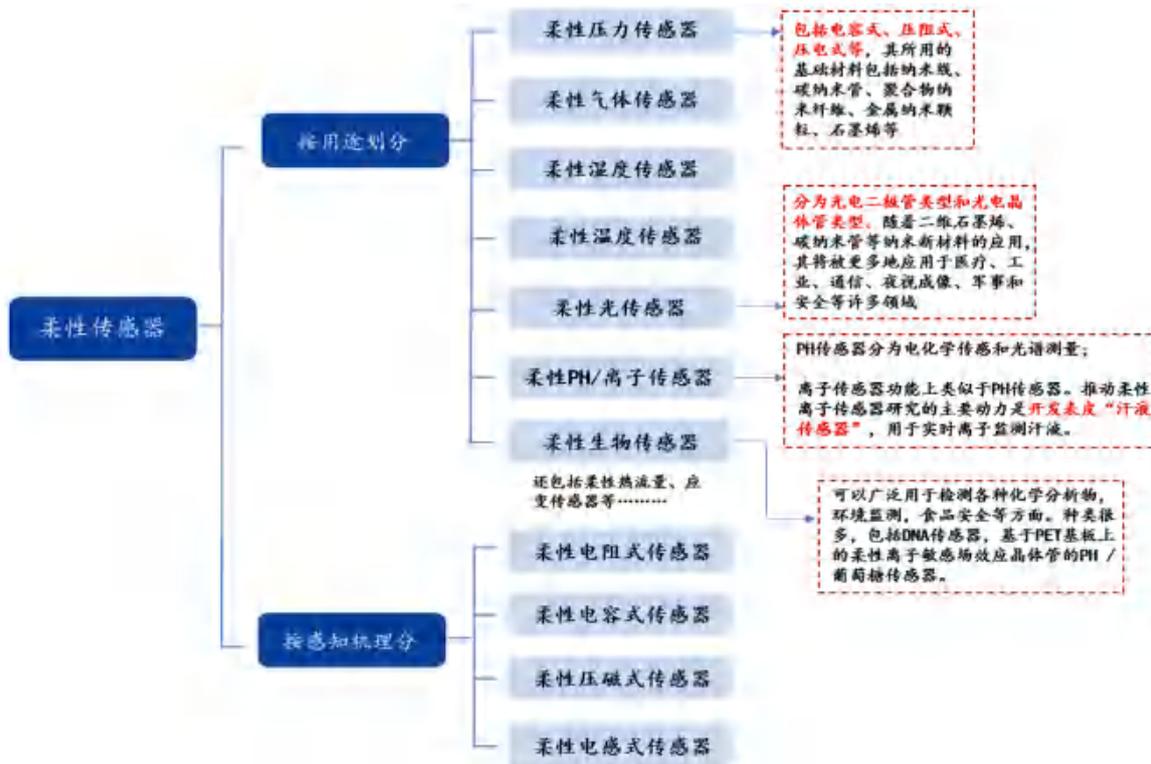


资料来源: 帕西尼官网, 国盛证券研究所

2.4.4 电子皮肤：或为机器人触觉终局形态，目前发展最成熟的为压阻式

电子皮肤是柔性传感器最不可忽视的应用，柔性电子是机器人的“皮肤”。传统的传感器因其硬度和刚性，无法应用在比如在人形机器人表皮、医疗等领域，柔性传感器是指柔性材料制成的传感器，具有良好的柔韧性、延展性、可以一定程度的自由弯曲，按功能可分为柔性压力、气体、温度等，按感应元件的不同可以分为柔性电阻式、电容式等类型。其中，电子皮肤是柔性电子应用中最不可忽视的种类，电子皮肤像人体皮肤一样柔软，用于机器人中可帮助机器人获取环境中和本体中的物理化学信号，提升本体与环境的交互能力。

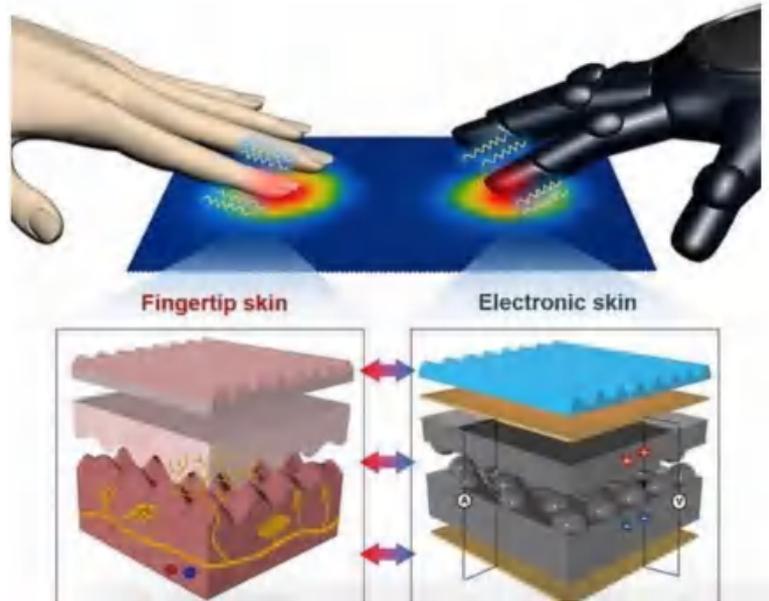
图表 87: 柔性传感器分类



资料来源：力准传感官网，中国电子元件行业协会，迈科技 metalab，国盛证券研究所

电子皮肤多功能化是必然趋势，甚至功能需远超生物性皮肤。电子皮肤是一种新型可穿戴柔性仿生触觉传感器，可作为机器人的触觉系统，电子皮肤可以被加工成各种形状，附着在机器人表面，可以让机器人感知到外部交互信息，让机器人更加智能。类比人类的生物皮肤，具备感受不同类型的压力、温度与热量、空气水流和痛觉等，电子皮肤作为机器人的皮肤，除了具备生物皮肤所具备的功能以外，甚至还需要具备生物皮肤所没有的功能如感受超声波、红外、声呐等。此外，电子皮肤还具有高灵敏、精度高等特点。

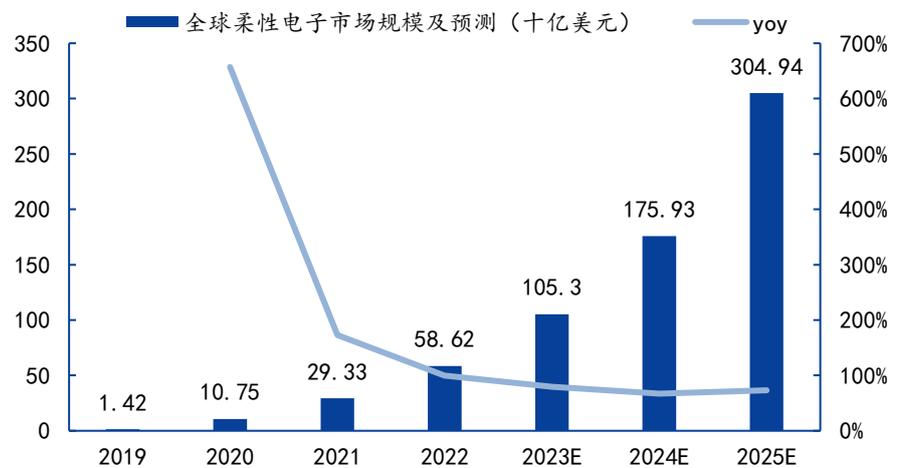
图表 88: 电子皮肤具备多功能



资料来源: 传感器技术, 国盛证券研究所

据华经情报产业研究院预测, 全球柔性电子 2025 年市场规模可达 3049.4 亿美元。近年来随着人形机器人、仿生学等学科的发展, 可以模仿人体皮肤的柔性传感器迅速发展, 在全球引起广泛的关注。柔性电子皮肤作为一个新兴行业, 未来市场空间广阔, 据华经情报产业研究院测算, 2019 年全球柔性电子市场规模为 14.2 亿美元, 预计 2023 年市场空间为 1053 亿美元, 已超千亿美元规模, 预计到 2025 年全球柔性电子市场规模将达到 3049.4 亿美元, 市场空间巨大, 具有先发优势的企业如 interlink、苏州能斯达或大有可为。

图表 89: 全球柔性电子市场规模 (十亿美元)

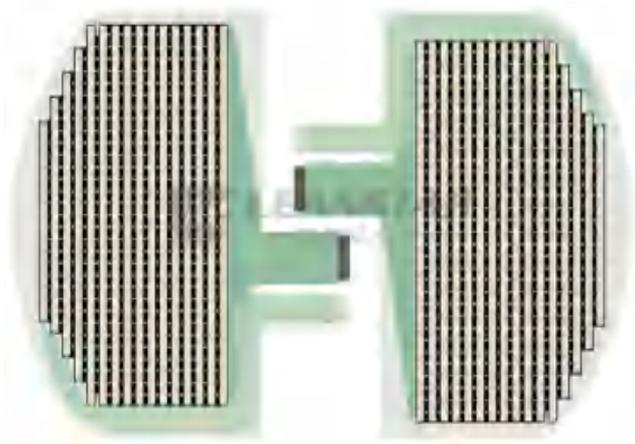


资料来源: 华经情报产业研究院, 国盛证券研究所

柔性电子皮肤通常都是由柔性底板、上下电极及中间薄膜层组成。详细可以拆分成触点、上下电极层、金属层和多孔 PDMS 层。柔性底板通常采用聚二甲基硅氧烷 (PDMS)、聚

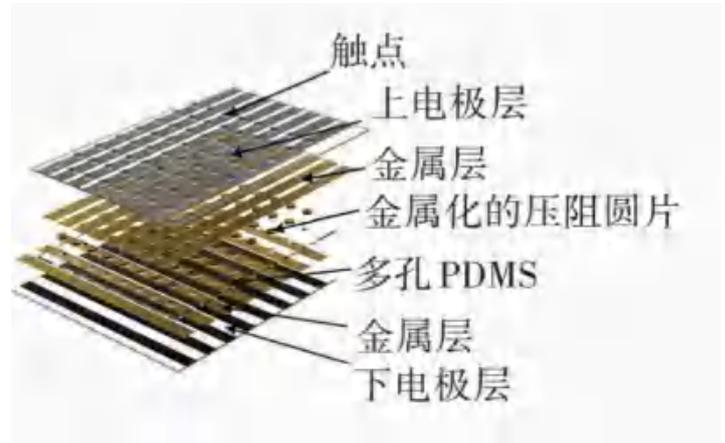
酰亚胺（PI）等高分子聚合物材料，上下电极和导线通常采用纳米银等优质金属材料在柔性底板上均匀进行喷涂，中间薄膜层则有普通纸面膜或其他聚合物膜。此外，柔性传感器中常用的材料还有碳材料、有机材料等，用于柔性电子皮肤的各类材料需达到较高的环境稳定性和可延展性，否则会影响到传感器的稳定性。

图表 90: 阵列式柔性薄膜压力传感器



资料来源: 能斯达电子官网, 国盛证券研究所

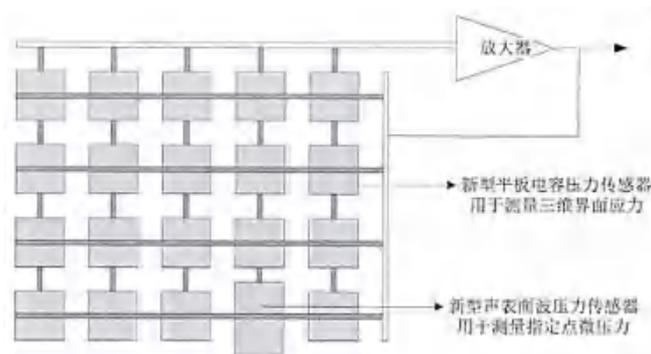
图表 91: 柔性电子皮肤结构



资料来源: 曾建国, 周建辉, 缪存孝, 尹海斌, 李维奇, 夏飞《电子皮肤触觉传感器研究进展与发展趋势》, 国盛证券研究所

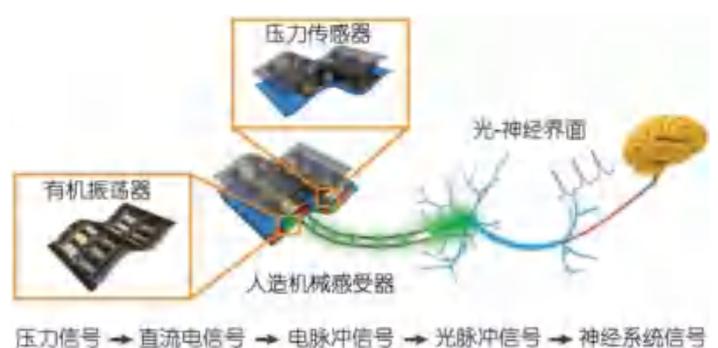
电子皮肤由三维界面、局部点微应力检测单元和外围电路组成，工作原理较为简单。以电容式压力传感器为例，三维界面应力检测单元用于检测应力的分布，微应力检测单元由新型表面波压力传感器组成，用于检测局部点的微应力大小，柔性电子皮肤可以实时检测三维界面和指定点的应力大小，将各个点的检测数据输出到外部以达到实时检测电子皮肤分布界面的应力。柔性压力/温度等传感器的工作原理主要是通过力敏/热敏等敏感元件感受外部环境的变化，通过外部信号导致柔性传感器内部的压电材料/电容/电阻等发生变化从而产生电信号（微型传感器实现），从而达到测量的目的。

图表 92: 电子皮肤基本平面结构



资料来源: 传感器技术, 国盛证券研究所

图表 93: 电子皮肤应用原理

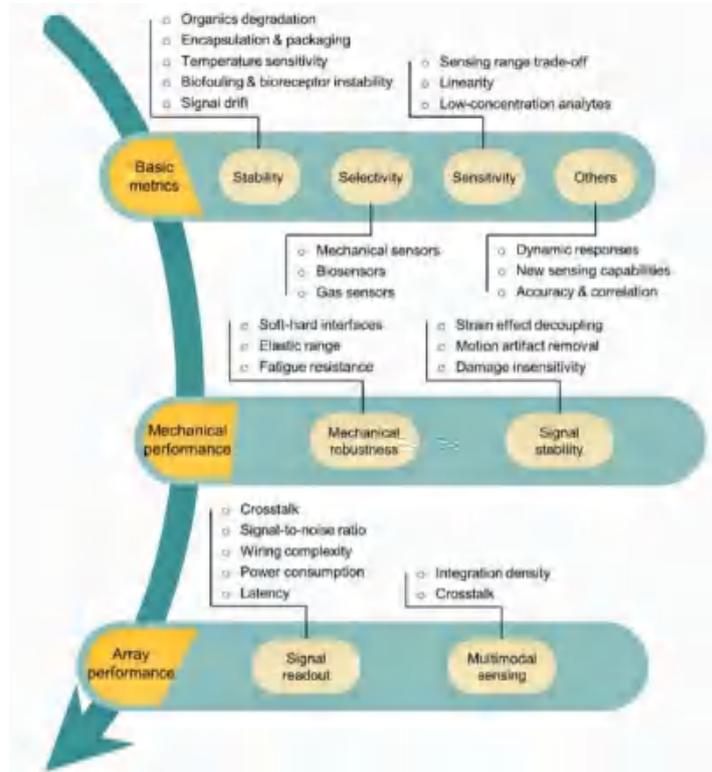


资料来源: 传感器技术, 国盛证券研究所

柔性电子皮肤的核心壁垒在于如何设计电路，从而达到其稳定性、选择性、灵敏度和机械协调性问题。柔性传感器的这几大难点也是目前限制柔性电子皮肤大规模发展的重要原因：1) 稳定性：柔性电子皮肤的稳定性问题主要来源于高聚合分子材料，聚合材料拉伸的可延展性不佳和生物污染等问题会导致柔性传感器稳定性不佳；2) 选择性：是指传感器区分目标分析物和可能的干扰物的能力，EMI 等问题容易导致传感器区分不开测量

目标；3) 灵敏度：大多数机械性传感器存在假阴性、非线性等问题；4) 机械协调性：传感器中使用的材料种类繁多，但每种材料的机械性都不同，界面失配容易导致机械性失调问题。

图表 94: 柔性传感器技术性能关键问题



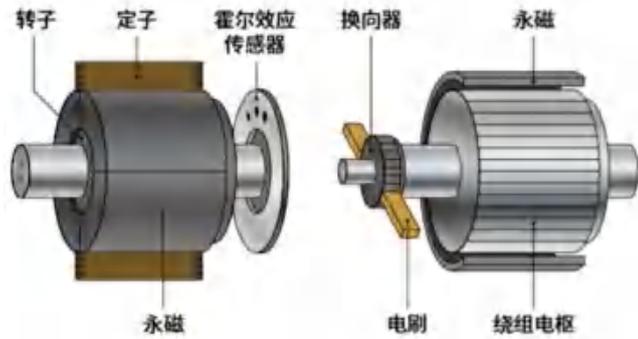
资料来源：传感器专家网，国盛证券研究所

电子皮肤仍在发展中，或为机器人表皮终极形态，目前发展最成熟的为压阻式。柔性传感器大范围商业化仍存在一定的路要走，目前运用较为广泛的下游在医疗领域，压阻式传感器因其结构简单、易于制备、测量范围广、灵敏度高等特点受到学术界的青睐，目前压阻式为主要研究方向。考虑到目前电子皮肤的单价和未来大规模应用后的降本，以及在电子皮肤覆盖的同等面积下，所需要的 MEMS 微型传感器的数量较为庞大，我们认为柔性电子皮肤或为覆盖机器人皮肤及末端的终局形态，建议关注相关国外公司 interlink 和国内电子皮肤公司苏州能斯达电子。

2.4.5 内传感器（编码器）：国产替代关键是核心芯片的突破

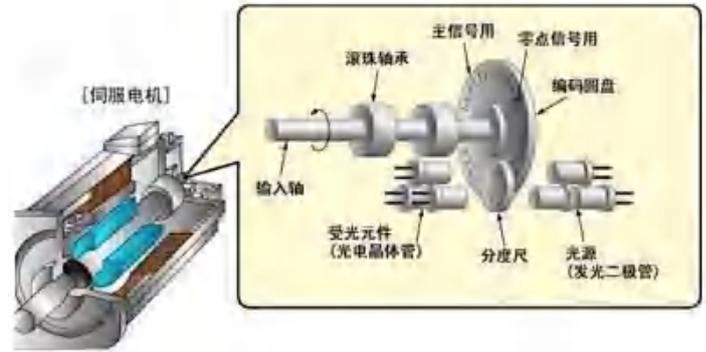
检测转子位置和角度的传感器对无刷电机来说至关重要。无刷电机和有刷电机的工作原理类似，都是通过电机中的永磁体磁场和绕组中的电流产生驱动力而发生转动，不同的是有刷电机采用了碳刷换向器，而无刷电机换向则是通过电子电流换向，电子换向在数字交互中也更具有灵活性。对于无刷电机来说，如何确定电机中转子所处的位置至关重要，其主要有几种检测转子位置和角度的传感器：霍尔传感器、旋转变压器（一种电磁式传感器）、编码器等，编码器通常由敏感元件、轴、编码盘等元件组成。

图表 95: 无刷电机与有刷电机对比



资料来源: 电机控制系统设计, 国盛证券研究所

图表 96: 伺服电机编码器



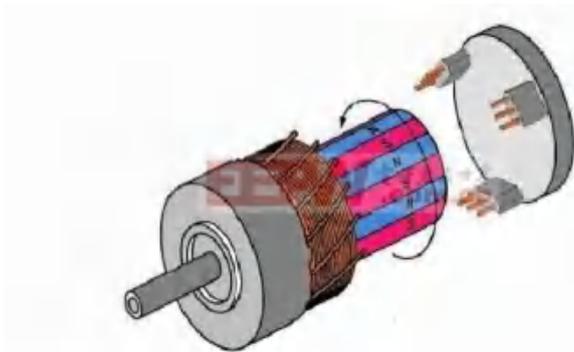
资料来源: 承务实业官网, 国盛证券研究所

电机内部的位置测量按能量中介分通常有三种: 霍尔传感器、旋转变压器(磁传感器)、编码器(电磁、光电、电容或电感应等编码器)。对于一般应用的场合, 比如电动自行车等通常可以使用霍尔位置传感器即可; 但对于需要高精度的场合比如智能家电、机器人等霍尔传感器无法实现精确的闭环, 则需要编码器。

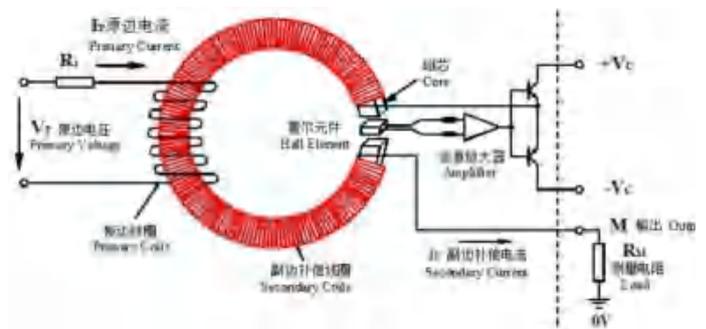
1) 霍尔传感器: 一般是指 ABC 三个成 120 度角度间隔排列的器件, 此时电机旋转单个周期内会出现 6 种不同的状态, 每种状态维持 60 度电角度, 这种传感器一般集成在电机内部, 电机每转一圈会生成 6N 个信号, 每个信号代表电机转到了特定的角度;

图表 97: 右边三个是霍尔传感器

图表 98: 闭环霍尔电压传感器



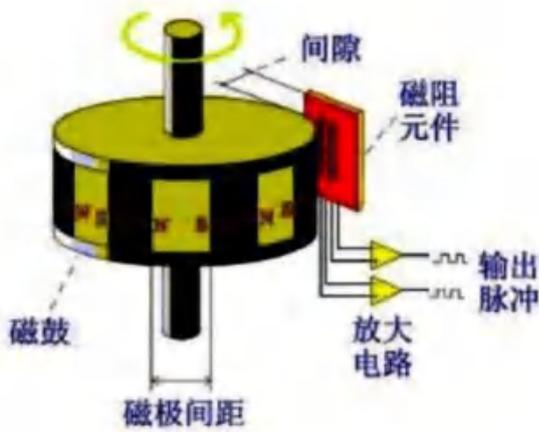
资料来源: 华芯官网, 电子产品世界, 国盛证券研究所



资料来源: 南京奇霍科技有限公司, 国盛证券研究所

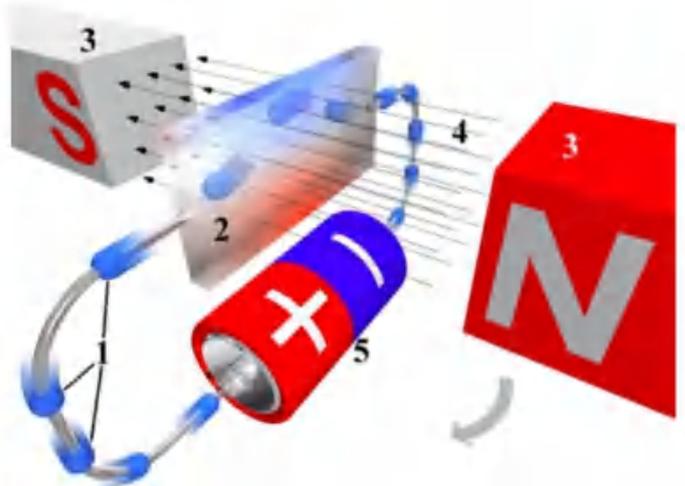
2) 磁编码器: 对磁缸有要求, 电磁干扰现象比较明显, 芯片和算法要求较高。磁编码器具有转速高、易用性好、可高度抗震等优点, 本质上也是依靠霍尔效应对转子的位置和角度进行检测, 是一种输出绝对位置的传感器。磁编码器主要由磁阻传感器、磁鼓、信号处理电路组成, 电机转动导致磁极变化, 磁极磁化后会产生周期分布的空间漏磁场, 磁传感器将磁场变化信号转化为阻值, 阻值经处理变成电压的变化, 再经信号电路的处理把电压转化成计算机可识别的数字信号, 从而达到编码功能。

图表 99: 磁编码器工作原理



资料来源: kind 官网, 国盛证券研究所

图表 100: 霍尔效应

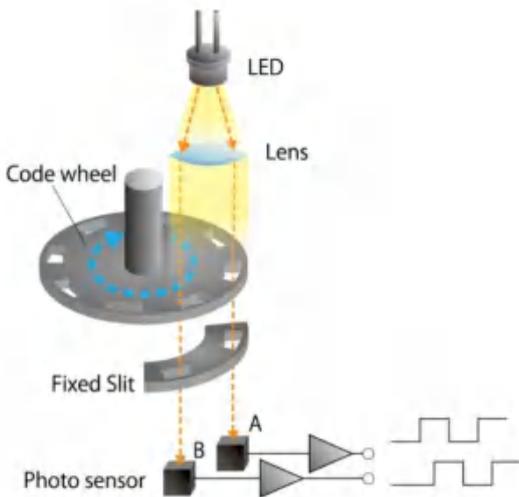


资料来源: kind 官网, 国盛证券研究所

3) **光电编码器:** 光电编码器一般精度较高, 但是在外部环境较为恶劣的情况下需要较高的防护要求, 也不适合在湿度等较高的环境下使用。光电编码器的光码盘等分成若干个长方形孔, 电动机与光电码盘同轴, 电动机旋转时光码盘同速旋转, 从而经过发光二极管等电子元器件组成的检测装置检测出脉冲信号, 再通过计算脉冲的个数即可得到电机的转速; 此外, 计算双通道光码的状态变化可确定方向。

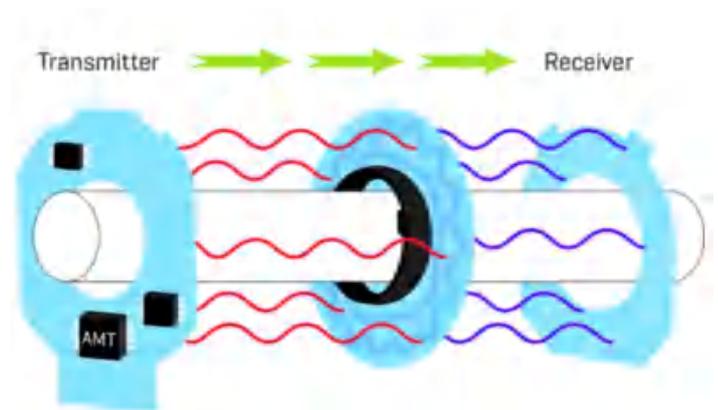
4) **电容式编码器:** 往往寿命较长, 封装尺寸更小, 且不受环境污染的影响。其工作原理是通过测量旋转电场来测量, 通过固定发射器发送载波信号, 转子将脉冲信号反射给固定接收器, 利用数模转换器 (ADC) 对脉冲信号进行采样, 再利用逻辑芯片 (FPGA) 进行调解并计算得到测量结果。

图表 101: 光电编码器的结构示意图



资料来源: AsahiKASEI 官网, 国盛证券研究所

图表 102: 电容式编码器工作路径

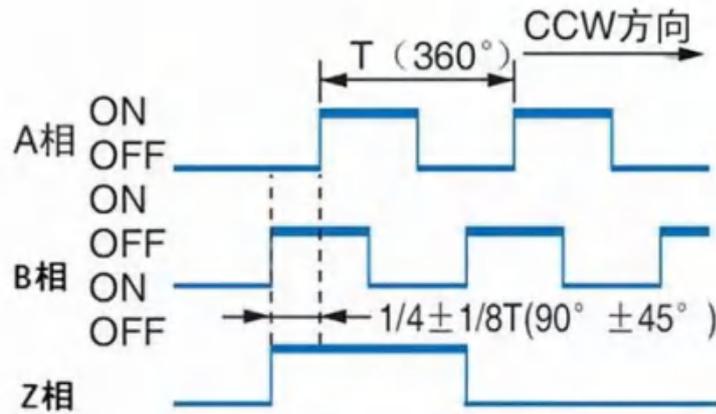


资料来源: 新通讯官网, 国盛证券研究所

按照工作原理电机编码器可分为增量式和绝对式两类。增量式编码器主要的工作原理是将位移转换成周期性信号, 再把该电信号转换成脉冲信号, 脉冲信号的个数即表示为位移的大小, 如光电式编码器。绝对式编码器则是一个位置对应一个确定的数字码, 该数

字码只与测量的起始和终止位置有关，与测量过程无关，如磁传感器。内传感器是和机器机电一体化产品，内传感器和电机、轴等机械部件或机械结构如手臂（Arm）、手腕（Wrist）等安装在一起，完成位置、速度、力度的测量，实现伺服控制。电机内部除了测量位置的传感器，通常还有温度传感器、湿度传感器等，以上传感器统称为内传感器。

图表 103: 增量式编码器工作原理



资料来源: 天先数智科技(深圳)有限公司官网, 国盛证券研究所

磁编码器突破难度相比光电编码器低，关键在于突破核心芯片。编码器属于精密加工领域的关键高端传感器，编码器的性能直接决定了伺服系统的精度，但由于编码器结构过于精密复杂，且设计电、磁、机、光学等多领域学科，核心技术及编码器高端芯片一直被德、日企业所垄断。据 36 氪研究院统计，海德汉和日本多磨川的编码器产品在国内市场份额已经超过 50%。磁编码器相比光电编码器的芯片难度略低，但磁编码器的 EMI 问题较为严重，对芯片设计的能力要求也较高，建议关注国内厂商峰昭科技。此外，光电编码器的核心芯片仍处于国产替代推进中。

2.4.6 投资建议：重视具有核心技术的传感器企业

图表 104: 传感器主要 A 股上市公司 (排名不分先后)

公司	介绍
峰昭科技	公司紧扣应用场景复杂且多样的电机控制需求,提供专用性的芯片产品、相适配的架构算法以及电机结构设计方案,实现 BLDC 电机控制系统多样性的控制需求及电机整体性能的提升与优化。
安培龙	公司是一家专业从事热敏电阻及温度传感器、氧传感器、压力传感器研发、生产和销售的国家级高新技术企业。经过多年的陶瓷工艺技术积累,公司拥有从陶瓷材料研发到热敏电阻及传感器生产制造的完整产业链,在材料配方、陶瓷基体制备、成型、烧结、印刷、封装等方面均拥有自主研发能力和核心技术。
柯力传感	公司创建于 1994 年末,是目前中国最大的称重元件公司。企业专业研制和生产健康秤、脂肪秤、厨房秤、高精度称重传感器、称重仪表、电子称重系统和分析仪器,年生产能力达到 100 万台健康秤、脂肪秤、厨房秤、300 万只传感器、50 万台称重仪表、1500 台(套)称重系统和 2 万套分析仪器。公司产品销售网络遍布全国,其中钢制传感器长期以来占据了国内市场 50%以上的销售份额。
东华测试	公司是国内领先的结构力学性能测试仪器行业自主创新型企业,专注于结构力学性能测试仪器及配套软件的研发、生产和销售,并提供测试系统解决方案和技术服务。
汉威科技	公司主要是以传感器为核心,将传感技术、智能终端、通讯技术、云计算和地理信息等物联网技术紧密结合,形成了“传感器+监测终端+数据采集+空间信息技术+云应用”的系统解决方案,业务应用覆盖物联网综合解决方案及居家智能与健康等行业领域,在所涉及的产业领域中形成了相对领先的优势。
芯动联科	公司长期致力于自主研发高性能 MEMS 惯性传感器,经过多年的探索和发展,公司高性能 MEMS 惯性传感器的核心性能指标达到国际先进水平,复杂环境下适应性强。目前,公司产品已实现批量化应用并在应用的过程中不断升级和迭代。

资料来源: wind, 国盛证券研究所

三、投资建议

执行器：执行器是机器人成本最高的环节之一，由电机、减速器、丝杠等各类零部件组成。执行器供应商需具备批量生产能力，同时生产的一致性，性能的稳定性也应达到高标准，这一方面考验供应商资金实力，另一方面也对其生产、组装工艺及供应商把控能力提出较高要求。我们建议关注具备资金实力的三花智控、拓普集团。

灵巧手：人形机器人的灵巧手是其区别与普通机器人的重要标志，也是人形机器人执行任务的末端执行器。灵巧手自由度较多，且空间受限，对电机、传动等环节的性能与体积要求较高。我们建议关注国内空心杯电机的领军企业鸣志电器，布局绳驱的大业股份，以及绕线设备龙头田中精机。

减速器：减速器在传统工业已有广泛运用，竞争格局初步形成。人形机器人减速器多为定制化，考验供应商的正向开发能力与响应速度。我们建议关注国内谐波减速器龙头绿的谐波，以及同时具备谐波减速器、RV减速器及其他精密减速器产能的双环传动。

丝杠和丝杠设备：在线性执行器大导程、大负载、小体积、高速度的要求下，行星滚柱丝杠是破局关键。而进口的行星滚柱丝杠加工设备价格高、且交付周期长，难以满足人形机器人的量产需求，因此设备国产化是必然趋势。在此背景下，我们建议关注有可能率先突破的主流丝杠和丝杠设备企业：北特科技、新剑传动（未上市）、贝斯特、五洲新春、浙海德曼、华辰装备、日发精机。

感知与力控：考虑到机器人传感器作为人形机器人首要的关键部分，其灵敏度以及集成度会高度影响机器人执行任务的时间与电耗，基于此，我们推荐：峰昭科技、东华测试、安培龙、柯力传感、汉威科技等。

风险提示

机器人量产进度不及预期: 当前机器人行业正处于产业变革阶段, 智能机器人、人形机器人等颠覆性产品迭代速度加快, 但离量产仍有距离, 机器人量产进度可能慢于预期。

产业链国产化进度不达预期: 未来机器人放量将带来大量零部件需求, 为国内企业带来重要机遇, 但存在机器人产业链国产化进度不达预期的风险。

测算误差风险: 市场空间与相关公司的弹性测算包含主观假设, 结论与实际可能存在误差。

免责声明

国盛证券有限责任公司（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。本报告仅供本公司的客户使用。本公司不会因接收人收到本报告而视其为客户。在任何情况下，本公司不对任何人因使用本报告中的任何内容所引致的任何损失负任何责任。

本报告的信息均来源于本公司认为可信的公开资料，但本公司及其研究人员对该等信息的准确性及完整性不作任何保证。本报告中的资料、意见及预测仅反映本公司于发布本报告当日的判断，可能会随时调整。在不同时期，本公司可发出与本报告所载资料、意见及推测不一致的报告。本公司不保证本报告所含信息及资料保持在最新状态，对本报告所含信息可在不发出通知的情形下做出修改，投资者应当自行关注相应的更新或修改。

本公司力求报告内容客观、公正，但本报告所载的资料、工具、意见、信息及推测只提供给客户作参考之用，不构成任何投资、法律、会计或税务的最终操作建议，本公司不就报告中的内容对最终操作建议做出任何担保。本报告中所指的投资及服务可能不适合个别客户，不构成客户私人咨询建议。投资者应当充分考虑自身特定状况，并完整理解和使用本报告内容，不应视本报告为做出投资决策的唯一因素。

投资者应注意，在法律许可的情况下，本公司及其本公司的关联机构可能会持有本报告中涉及的公司所发行的证券并进行交易，也可能为这些公司正在提供或争取提供投资银行、财务顾问和金融产品等各种金融服务。

本报告版权归“国盛证券有限责任公司”所有。未经事先本公司书面授权，任何机构或个人不得对本报告进行任何形式的发布、复制。任何机构或个人如引用、刊发本报告，需注明出处为“国盛证券研究所”，且不得对本报告进行有悖原意的删节或修改。

分析师声明

本报告署名分析师在此声明：我们具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格或相当的专业胜任能力，本报告所表述的任何观点均精准地反映了我们对标的证券和发行人的个人看法，结论不受任何第三方的授意或影响。我们所得报酬的任何部分无论是在过去、现在及将来均不会与本报告中的具体投资建议或观点有直接或间接联系。

投资评级说明

投资建议的评级标准		评级	说明
评级标准为报告发布日后的6个月内公司股价（或行业指数）相对同期基准指数的相对市场表现。其中A股市场以沪深300指数为基准；新三板市场以三板成指（针对协议转让标的）或三板做市指数（针对做市转让标的）为基准；香港市场以摩根士丹利中国指数为基准，美股市场以标普500指数或纳斯达克综合指数为基准。	股票评级	买入	相对同期基准指数涨幅在15%以上
		增持	相对同期基准指数涨幅在5%~15%之间
		持有	相对同期基准指数涨幅在-5%~+5%之间
	行业评级	减持	相对同期基准指数跌幅在5%以上
		增持	相对同期基准指数涨幅在10%以上
		中性	相对同期基准指数涨幅在-10%~+10%之间
	减持	相对同期基准指数跌幅在10%以上	

国盛证券研究所

北京

地址：北京市东城区永定门西滨河路8号院7楼中海地产广场东塔7层
邮编：100077
邮箱：gsresearch@gszq.com

南昌

地址：南昌市红谷滩新区凤凰中大道1115号北京银行大厦
邮编：330038
传真：0791-86281485
邮箱：gsresearch@gszq.com

上海

地址：上海市浦东新区南洋泾路555号陆家嘴金融街区22栋
邮编：200120
电话：021-38124100
邮箱：gsresearch@gszq.com

深圳

地址：深圳市福田区福华三路100号鼎和大厦24楼
邮编：518033
邮箱：gsresearch@gszq.com