

人形机器人产业研究蓝皮书

优于大市

核心观点

回望人类工业化数百年演进历程，每一次生产力的跨越式跃迁，都源于动力形式、劳动边界、人机关系的底层重构。第一次工业革命以珍妮纺纱机开启工具机械化序幕，再由蒸汽机完成通用动力的历史性普及，彻底摆脱人力、水力的自然约束，建立近代工厂生产体系；第二次工业革命依托电力与流水线，实现标准化、规模化的工业量产，固化了结构化场景的劳动模式；第三次信息革命以计算机与数字化技术替代重复性脑力运算，完成物理世界到数字世界的信息映射；而本轮以大模型为核心的通用人工智能浪潮，实现了逻辑推理、知识理解、语言交互的认知突破，数字AI的发展让机器拥有了“思考的大脑”。

纵观历次技术变革，产业升级始终存在核心短板：数字AI局限于数字虚拟空间，具备认知能力却无物理执行能力，各类自动化设备拥有实体躯体却无自主感知与通用决策能力。长期以来，工业自动化依赖预设程序、固定场景与人工适配，只能在标准化环境中完成单一任务，无法适配真实世界复杂、动态、非结构化的作业场景，人机分工始终停留在“人类定义规则、机器被动执行”的阶段，这也是全球自动化产业数十年难以突破的核心瓶颈。

当下，数字AI发展如火如荼，率先在AI Coding领域获得超预期进展，海外有OpenAI/Anthropic，国内诞生了智谱/月之暗面/Deepseek等大模型公司预计将陆续走向资本市场。如果说数字AI在编程领域的胜利，是人类为思维找到了数字延伸，那么具身智能的使命，就是为这种思维赋予一副能够真正介入物理世界的躯体。2026年6月GTC大会上，英伟达发布全球首款全模态物理AI大模型Cosmos 3并确立WAM新范式，黄仁勋也在后续股东大会上明确表态：“物理AI是英伟达的下一波增长浪潮”。人工智能正式从数字AI迈入物理AI时期，具身智能成为第四次智能革命的核心突破口与终极落地形态。作为通用人工智能的物理载体与落地闭环，具身智能融合大模型认知能力、多模态环境感知、实时运动规划与自主执行控制，打破了数字智能与物理世界的壁垒，让机器首次具备“感知环境、理解场景、自主决策、自适应作业”的通用能力，实现从“数字化认知”到“物理化改造”的历史性跨越。

不同于传统专用机器人的工具属性，具身智能复刻了人类“观察—思考—行动”的完整行为逻辑，不再依赖人工编程与场景改造，可自适应工业制造、商业服务、家庭民生、特种作业等全场景复杂环境。这一技术变革的本质，是继蒸汽机替代体能、电力规模化生产、计算机替代算力、大模型替代认知之后，人类生产力的第五次底层革命，彻底重构“人、机器、环境”的协作边界，推动自动化从封闭工业场景走向全社会全域落地。

当前，具身智能已从实验室技术探索迈入产业化落地临界点，成为全球科技竞争、产业升级与未来产业布局的核心赛道。全球技术迭代加速、产业链生态持续完善、政策扶持持续加码，软硬融合技术不断突破，正在重塑智能制造、智慧服务、城市运维、养老医疗等万千行业的产业形态与价值体系。未来，具身智能将作为通用生产力基础设施，承接人类重复性、高强度、高风险的基础劳动，释放人类创造力与顶层决策价值，成为驱

行业研究 · 行业专题

汽车

优于大市 · 维持

证券分析师：唐旭霞

0755-81981814

tangxx@guosen.com.cn

S0980519080002

证券分析师：孙树林

0755-81982598

sunshulin@guosen.com.cn

S0980524070005

证券分析师：连欣然

010-88005482

lianxinran@guosen.com.cn

S0980525080004

证券分析师：吴双

0755-81981362

wushuang2@guosen.com.cn

S0980519120001

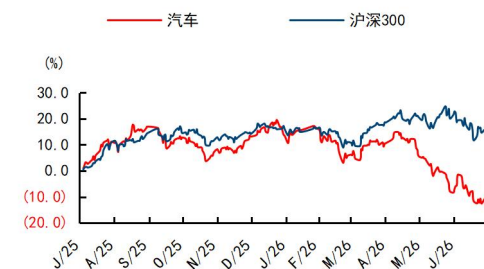
证券分析师：李全

021-60375434

liquan2@guosen.com.cn

S0980524070002

市场走势



资料来源：Wind、国信证券经济研究所整理

相关研究报告

《汽车行业 2026 年 7 月投资策略-建议关注高增长低估值的出口链行情》——2026-07-23

《汽车行业 2026 年 6 月投资策略-2026 年 5 月全国乘用车批发销量同比下降 5%，看好自主乘用车出海加速》——2026-06-17

《汽车行业 2026 年 5 月投资策略暨年报&一季报总结-2026Q1 汽车板块营收同比增长 2%，看好出海及产业升级机遇》——2026-05-12

《特斯拉专题研究系列三十五-人形机器人预计年中发布，FSD 加速渗透》——2026-05-06

《汽车+AI 前瞻系列之-服务器液冷专题-服务器算力提升催化液冷需求，供应商迎来国产替代新机遇》——2026-04-14

动全球经济增长、产业结构升级、社会形态革新的核心引擎，开启物理世界全面智能化的全新文明阶段。

本蓝皮书立足全球产业格局、技术演进规律与国内发展现状，系统梳理具身智能的技术体系、产业链结构、落地场景、核心痛点与未来趋势，客观研判行业发展机遇与挑战，旨在为产业从业者、科研机构、投资机构及政策制定者提供专业、全面的参考依据。

内容目录

一、人形机器人总论——定义、政策与发展历程	14
1. 人形机器人定义	14
2. 人形机器人历史发展概述	15
3. 人形机器人政策体系	17
二、人形机器人的产业发展阶段与前景	23
1. 人形机器人产业市场空间	23
2. 人形机器人目前发展阶段及发展路径分析	24
3. 人形机器人技术演进路径	28
4. 人形机器人行业发展的挑战和机遇	29
5. 人形机器人发展需要培育的关键产业链	33
三、人形机器人产业链全景和本体玩家梳理	34
1. 人形机器人产业链全景图	34
2. 人形机器人本体公司梳理	36
3. 人形机器人车企公司梳理	67
4. 人形机器人科技公司梳理	81
四、产业链拆解之减速器	90
1. 精密减速器：匹配转速、传递转矩，机器人旋转关节核心零部件	90
2. 壁垒：工艺、材料、设备等环节均具难点的系统工程	97
3. 市场：国产减速器替代进程加速，人形机器人催生全新增量空间	105
五、产业链拆解之新型减速器	116
1. 摆线减速器：新型减速器的重要方向	116
2. 壁垒：在设计与工艺方面均具壁垒	119
3. 市场：摆线减速器有望实现人形机器人搭载	120
六、产业链拆解之丝杠	124
1. 丝杠：人形机器人线性关节核心零部件	124
2. 壁垒：壁垒高筑，制造设备与工艺技术 Know how 为核	133
3. 市场：外资品牌主导高端市场，国产替代+人形机器人催生成长机遇	148
七、产业链拆解之六维力传感器	153
1. 传感器：人形机器人感知层、控制层关键部件	153
2. 壁垒：设计、算法、标定以及工艺多维壁垒	162
3. 市场：国产玩家进展较快，人形机器人催生广阔空间	171
八、产业链拆解之固态电池	174
1. 固态电池	174
2. 固态电池产业链梳理	177
3. 市场空间	190

风险提示	193
------------	-----

图表目录

图 1: 工业机器人类型	14
图 2: 服务机器人类型	15
图 3: 特斯拉 Optimus 人形机器人发展历程	16
图 4: 宇树科技人形机器人产品情况	17
图 5: 人形机器人: 潜在兆亿赛道, 当前尚处从“0”到“1”的萌芽期	24
图 6: 机器人产业发展路径	24
图 7: 无人出租车 (Robotaxi) 产品	25
图 8: 无人矿卡 (Robotruck) 产品	25
图 9: 物流机器人 (Robovan)	26
图 10: 环卫机器人 (Robosweeper)	26
图 11: 机器人与汽车智能化发展路径类比	27
图 12: 人形机器人核心关节拆解	33
图 13: 人形机器人硬件拆解	35
图 14: 人形机器人产业链	36
图 15: 人形机器人主要厂商情况	36
图 16: Figure 01 使用咖啡机冲咖啡	39
图 17: Figure 02 人形机器人	39
图 18: Helix 视觉运动策略的架构改进	40
图 19: Figure 机器人采用视觉-语言-动作模型 (VLA)	40
图 20: Figure 机器人物流工作	40
图 21: 宇树科技产品矩阵	41
图 22: 宇树人形机器人腿部关节专利	43
图 23: 智元的 EnerVerse 世界模型在任务视频生成时性能较好	44
图 24: 百条级数据实现快速泛化	45
图 25: VLA 进化到 ViLLA	45
图 26: 灵犀 X1 结构	46
图 27: 灵犀 X2 骑车	46
图 28: 智元 2024 年开启通用机器人商用量产	46
图 29: 智元机器人相关专利拆解	47
图 30: 傅利叶人形机器人产品情况	48
图 31: 优必选人形机器人产品时间线	49
图 32: 优必选在极氪 5G 智慧工厂开展协同实训	50
图 33: 优必选商用接待场景应用	50
图 34: 优必选 Walker S2 自动换电	51
图 35: 优必选天工行者	51
图 36: 众擎通用机器人 SE01	52
图 37: 众擎通用机器人 PM01	52

图 38: 众擎人形机器人 PM01 完成前空翻	52
图 39: 众擎人形机器人 PM01 户外行走稳健	52
图 40: 众擎自研关节	53
图 41: 启智机器人战略合作签约仪式	54
图 42: 开普勒机器人	54
图 43: 开普勒机器人结构	55
图 44: 开普勒机器人双臂协同搬运	56
图 45: 开普勒机器人标箱搬运	56
图 46: 云深处产品矩阵	56
图 47: 云深处自研 J60 关节	57
图 48: 云深处自研 J100 关节	57
图 49: 1X 产品矩阵	58
图 50: 1X 家用机器人 Neo Gamma	58
图 51: 银河通用机器人 G1	59
图 52: ERA-42 模型	60
图 53: 星动纪元探索融合世界模型的原生机器人模型	60
图 54: 星动纪元模型-本体-场景数据	61
图 55: 人形机器人 CL 系列	62
图 56: 逐际动力模块化足端 买一得三	62
图 57: 四轮足机器人 W1	62
图 58: 天工连续攀爬 134 级阶梯	64
图 59: 天工完成精准倒闸工作	64
图 60: 青龙行走与驱动系统设计	65
图 61: 青龙构型设计	65
图 62: 青龙关节模组	65
图 63: 青龙手部设计	65
图 64: 青龙机器人练习抓取杯子	66
图 65: 白虎数据集涵盖了多款机器人本体	66
图 66: 龙跃大模型	67
图 67: 格物致知平台	67
图 68: 特斯拉车端 VS 人形机器人	68
图 69: 汽车与人形机器人的线控制动核心部件拆解	69
图 70: 特斯拉商业生态	71
图 71: 车企有望实现从制造企业到 AI 应用企业的产业升级	71
图 72: 特斯拉人形机器人量产和应用场景探讨	71
图 73: 特斯拉 Optimus 人形机器人迭代过程	72
图 74: Optimus 实现灵活抓球	73
图 75: Optimus 实现下坡小跑动作	73
图 76: 特斯拉制造成本降低	74
图 77: 特斯拉生产和组装统一	74
图 78: FSD 累计行驶里程(百万英里)	74

图 79: 特斯拉 AI 算力的内部预测	74
图 80: 比亚迪智能座舱和智能驾驶布局	75
图 81: 比亚迪与港科签署合作协议	77
图 82: 小鹏 PX5 人形机器人	78
图 83: 小鹏 AI 机器人 Iron	78
图 84: 小鹏机器人专利相关结构拆解	78
图 85: 小鹏汽车端到端大模型进展节奏	79
图 86: 小鹏机器人端到端+强化学习能力	79
图 87: 小鹏机器人工厂工作	79
图 88: 赛力斯整车超级工厂	80
图 89: 赛力斯发布机器人工作视频	80
图 90: 赛力斯小赛机器人	80
图 91: 奇瑞 Mornine 机器人	81
图 92: 奇瑞招标展示机械狗相关招标采购项目信息	81
图 93: 英伟达 Cosmos 世界模型的文本提示词	82
图 94: 英伟达 Cosmos 世界模型生成的视频	82
图 95: 英伟达 2025 年 CES 大会展示合作人形机器人	82
图 96: 英伟达认为下个时代是机器人时代	83
图 97: 机器人 Blue	83
图 98: 英伟达 GR00T N1 模型	83
图 99: 小米 CyberOne 人形机器人硬件	84
图 100: 小米 CyberOne 人形机器人算法	84
图 101: 华为机器人的相关产业布局	85
图 102: 华为（深圳）全球具身智能产业创新中心签约仪式	85
图 103: 华为介绍乐聚工业应用	87
图 104: CloudRobo 具身智能平台正式发布	87
图 105: 华为架构	88
图 106: 华为盘古大模型	88
图 107: 盘古大模型	88
图 108: 自动驾驶域控制器分芯片方案出货量占比	89
图 109: 美的人形机器人样机	90
图 110: 美的人形机器人从实验室前往美的荆州工厂打工	90
图 111: 减速器基本功能原理	90
图 112: 中国工业机器人产量数据（万辆）及增速	91
图 113: 工业机器人平均成本占比拆分	91
图 114: 谐波齿轮传动装置的结构	93
图 115: 行星减速器组成构件	94
图 116: 行星减速器传动过程示意图	94
图 117: 行星减速器工作原理	94
图 118: 三级行星减速器示意图	95
图 119: 1~3 级行星减速器减速比情况（输入转速 3000pm）	95

图 120: RV 减速机在机器人关节的应用	95
图 121: RV 减速器拆解爆炸图	95
图 122: RV 减速器主要构件	95
图 123: RV 减速器运作原理	96
图 124: 减速器制造难点梳理	97
图 125: 国产和日产谐波减速器柔轮组织比较	99
图 126: 热处理工艺流程及相关核心要求	99
图 127: 谐波减速器主要齿形的特点及示意图	100
图 128: 慢走丝、滚齿、插齿工艺对比	100
图 129: 绿的谐波产品生产流程及使用设备情况	101
图 130: 行星减速器耦合设计分析	101
图 131: 行星减速器专用高速数控干切滚齿机	102
图 132: 行星减速器高速系列干切滚齿刀具	102
图 133: 优化前后的摆线轮齿廓设计	103
图 134: RV 减速器回差影响因素多	103
图 135: RV 减速器摆线轮齿廓修形法	104
图 136: 我国工业机器人出货量市场竞争格局	106
图 137: 中国工业机器人本体销量国产品牌份额	106
图 138: 减速器国内与全球竞争格局	107
图 139: 国内减速器行业历史沿革（2013-2023 年）	107
图 140: 2013-2027 年中国工业机器人减速器市场份额分布	108
图 141: 品质、响应及降本驱动国产替代	108
图 142: 国内工业机器人用谐波与 RV 减速器市场格局情况	109
图 143: 减速器行业的演进方向梳理	110
图 144: 哈默纳科减速器需求驱动变化	111
图 145: 绿的谐波减速器下游应用场景分布	112
图 146: 我国谐波减速器市场规模（亿元）	112
图 147: 全球行星减速器市场区域分布	112
图 148: 全球及中国行星减速器销售金额（单位：百万美元）	112
图 149: 主流人形机器人自由度及减速器情况	113
图 150: 特斯拉 Optimus 机器人减速器方案	113
图 151: 智元自研 PowerFlow 关节模组	114
图 152: 宇树科技自研关节模组产品矩阵（行星减速器）	114
图 153: 傅利叶 GR-1 机器人	115
图 154: 优必选 Walker S 系列机器人	116
图 155: 摆线针轮减速器示意图	116
图 156: 摆线齿廓形成法示意图	116
图 157: 摆线针轮减速器爆炸图	117
图 158: 摆线针轮减速器传动原理	118
图 159: 摆线针轮减速器多齿同时啮合	119
图 160: 摆线轮齿廓设计与修形	119

图 161: 不同修形方法比较	119
图 162: 摆线针轮减速器重要工艺	120
图 163: 科盟创新 PEEK 轻量化摆线减速机	121
图 164: 科盟创新减速机	121
图 165: 动易科技 PhyArc 系列摆线关节模组	121
图 166: Agility Robotics 机器人使用摆线减速器	122
图 167: 特斯拉 Optimus 机器人关节情况	123
图 168: 摆线针轮减速器有望应用于人形机器人腰髋等重负载部位	123
图 169: 丝杠基本功能原理	124
图 170: 精密丝杠主要类型	125
图 171: 行星滚柱丝杠应用领域	125
图 172: 行星滚柱丝杠及相关构造拆解	126
图 173: 丝杠导程与螺距关系	127
图 174: 滚珠丝杠的核心结构参数	127
图 175: 梯形丝杠示意图	129
图 176: 梯形丝杠结构简单	129
图 177: 滚珠丝杠结构	129
图 178: 滚珠与滚道接触图	129
图 179: 滚珠与滚道面的小接触点提高传动效率	130
图 180: 螺母轴向载荷由滚珠的接触载荷轴向分量之和平衡	130
图 181: 内循环式与外循环式滚珠丝杠	130
图 182: 行星滚柱丝杠内部结构示意图	131
图 183: 行星滚柱丝杠零部件	131
图 184: 行星滚柱丝杠接触点比滚珠丝杠多	132
图 185: 行星滚柱丝杠寿命比滚珠丝杠高	132
图 186: 滚珠丝杠应力与负载集中在滚珠接触点	132
图 187: 行星滚柱丝杠多个滚柱共同承受载荷	132
图 188: 行星滚柱丝杠类型特点及应用领域	133
图 189: 行星滚柱丝杠与加工制造相关的误差来源	134
图 190: 滚柱一次滚压成形原理	136
图 191: 轧辊及其局部图	136
图 192: 热轧示意图	136
图 193: 冷轧示意图	136
图 194: 轧制丝杠生产率高	137
图 195: 轧制滚柱齿形的应力较为集中	137
图 196: 螺纹车削加工原理图	137
图 197: 砂轮磨削加工外螺纹螺旋面	139
图 198: 砂轮磨削加工螺母内螺纹	139
图 199: 滚珠丝杠的磨削加工工艺流程	140
图 200: 行星滚柱丝杠的磨削加工工艺流程	140
图 201: 旋风硬铣削加工原理图	142

图 202: 旋风铣五大加工运动	142
图 203: 外螺纹旋铣系统	142
图 204: 内螺纹铣削示意图	142
图 205: 丝杠热处理工艺流程	143
图 206: 丝杠热处理工艺曲线	144
图 207: 机床进口数量与均价情况	145
图 208: 热处理设备	145
图 209: 金属加工机床分类	146
图 210: 我国进口与出口磨床均价情况 (单位: 万美元/台)	146
图 211: 我国进出口铣床均价情况 (单位: 万美元/台)	148
图 212: 我国进出口铣刀均价情况 (单位: 美元/千克)	148
图 213: 滚珠丝杠和行星滚柱丝杠发展历程	149
图 214: 2022 年国内中高端滚珠丝杠市场格局情况	150
图 215: 2022 年国内行星滚柱丝杠市场格局情况	150
图 216: 滚珠丝杠应用领域	152
图 217: 特斯拉 Optimus 关节展示	152
图 218: 特斯拉关节分布	152
图 219: 特斯拉 Optimus 机器人丝杠方案	152
图 220: 人形机器人关节感知、驱动原理	153
图 221: 人形机器人传感器类型及价值量占比	154
图 222: 一维、三维、六维力传感器作用示意图	154
图 223: 力传感器产业链	155
图 224: 机器人由自动化向智能化进化	155
图 225: 人形机器人中六维力传感器应用位置	156
图 226: 六维力传感器在机器人末端的应用	156
图 227: Optimus 旋转关节采用力矩传感器	156
图 228: Optimus 直线关节采用力传感器	156
图 229: 优必选人形机器人产品使用六维力传感器情况	156
图 230: 六维力传感器测量原理	157
图 231: 飞行器中六维力传感器同时测量六分量	157
图 232: 六维力传感器能够同时测量力和力矩	158
图 233: 六维力传感器串扰测量指标	158
图 234: 六维力传感器精度与准度区别	158
图 235: 六维力传感器性能指标对比	160
图 236: 应变式力传感器基本工作原理	161
图 237: 应变式六维力传感器结构	161
图 238: 应变式六维力传感器主要采用硅应变片或金属应变片	162
图 239: 应变片包括金属和半导体两类	164
图 240: 弹性体采用不同材料时应变片的温度漂移	164
图 241: 六维力传感器补偿应变片法	164
图 242: 六维力传感器无耦合条件下的输入输出系统	165

图 243: 六维力传感器存在维度耦合时的输入输出关系	165
图 244: 具有滑移结构的六维力传感器整体结构图	166
图 245: 非线性解耦效果通常好于线性解耦	166
图 246: 解耦算法比较	166
图 247: 标定流程图	167
图 248: 六维力传感器的联合加载标定和检测工作量大	168
图 249: 六维力传感器的联合加载标定和检测理论基础更深	168
图 250: 各国六维力传感器标定设备形态不一	168
图 251: 应变式力传感器加工工艺流程	169
图 252: 人工贴片流程	169
图 253: 人工贴片示意图	169
图 254: 硅基应变片玻璃微熔工艺制备方法	171
图 255: 全球六维力/力矩传感器主流厂商	172
图 256: 2020 年、2023 年中国六维力传感器市场格局	172
图 257: 六维力传感器应用领域	173
图 258: 锂电池发展路线	174
图 259: 液态电池与固态电池结构示意图	174
图 260: 各类电池性能及结构对比	175
图 261: 液态电池成本结构	175
图 262: 半固态电池成本（目前材料价格及投资额下）	176
图 263: 全固态电池成本（目前材料价格及投资额下）	176
图 264: 半固态/固态电池成本比较与中远期展望（元/Wh）	176
图 265: 固态电池产业链梳理	177
图 266: 全固态电池与液态电池相比核心变化环节	178
图 267: 部分电池企业半固态与全固态电池布局进展	178
图 268: 部分海外电池企业半固态与全固态电池布局进展	179
图 269: 固态电池工艺设备环节核心变化	179
图 270: 曼恩斯特高效混合机以及混合工序	180
图 271: 双螺杆设备示意图	180
图 272: 全固态电池辊压成膜工序	180
图 273: 先导智能 Z 型叠片机	181
图 274: 全固态电池等静压设备示意图	181
图 275: 先导智能固态高压化成容解决方案	182
图 276: 部分设备企业在固态电池设备领域布局情况	182
图 277: 全球固态/半固态电池电解质材料市场空间（亿元）及需求（万吨）	183
图 278: 不同固态电解质特性比较	183
图 279: 部分公司固态电解质布局情况	184
图 280: 部分公司固态电解质原料布局情况	185
图 281: 全球固态/半固态电池正极材料市场空间（亿元）及需求（万吨）	186
图 282: 部分正极材料性能对比	186
图 283: 部分正极企业固态电池材料布局情况	187

图 284: 全球固态/半固态电池负极材料市场空间（亿元）及需求（万吨）	187
图 285: 部分负极材料性能对比	188
图 286: 部分企业固态电池负极材料布局情况	189
图 287: 部分企业固态电池集流体布局情况	189
图 288: 软包固态电池（左）与碳纳米管（右）	190
图 289: 固态电池应用场景	191
图 290: 车企在半固态与全固态电池车型领域布局进展	191
图 291: 机器人等领域固态电池应用情况	192
图 292: 固态电池渗透率（蓝）和容量增速（黑）	193
图 293: 全球固态电池市场空间展望（亿元）	193
图 294: 全球固态与半固态电池市场规模展望	193
表 1: 近期人形机器人相关政策梳理	17
表 2: 人形机器人公司主流产品情况	37
表 3: 宇树人形机器人产品	42
表 4: 智元人形机器人本体情况	45
表 5: 傅利叶人形机器人本体情况	48
表 6: 优必选人形机器人 Walker S 系列本体情况	50
表 7: 众擎人形机器人本体参数对比	53
表 8: 星动纪元人形机器人本体参数对比	60
表 9: 省级以上人形机器人创新中心	63
表 10: 天工机器人本体情况	63
表 11: 智能驾驶与人形机器人本质上都为 AI 端侧应用	68
表 12: 机器人与智能汽车的零部件具有一定相通性	68
表 13: 车企开始布局人形机器人本体业务	70
表 14: 特斯拉 Optimus 机器人关节部位及价值量测算	73
表 15: 比亚迪具身智能招聘岗位	76
表 16: 小鹏人形机器人迭代过程	77
表 17: 华为 16 家机器人合作企业情况	85
表 18: 精密减速器关键技术指标、含义及决定因素	91
表 19: 精密减速器原理特点、参数、优缺点及应用领域梳理	92
表 20: 精密减速器主要生产设备	98
表 21: RV 减速器曲柄轴与摆线轮加工工艺流程	104
表 22: RV 减速器针齿壳加工工艺流程与关键要素	104
表 23: 精密减速器技术壁垒	105
表 24: 国内外品牌同型号谐波减速器、RV 减速器技术指标对比	108
表 25: 国内减速器主要玩家相关信息梳理	109
表 26: 丝杠关键技术指标、含义及影响因素	126
表 27: 丝杠精度等级及部分应用领域要求	127
表 28: 三种丝杠的核心参数对比及优缺点梳理	128

表 29: 行星滚柱丝杠不同部位热处理方法	134
表 30: 丝杠加工工艺对比	135
表 31: 硬车削加工工艺情况	138
表 32: 丝杆磨削加工工艺流程较长	139
表 33: 行星滚柱丝杠不同零部件加工参数及工艺细节	141
表 34: 秦川机床募投项目车、铣、磨床部分设备价格情况	146
表 35: 国内磨床部分玩家相关信息梳理	147
表 36: 国内外行星滚柱丝杠产品对比	149
表 37: 国内丝杠主要玩家相关信息梳理（单位：亿元）	150
表 38: 六维力传感器关键技术指标及含义	158
表 39: 力传感器分级和主要技术指标	159
表 40: 不同类型六维力传感器原理、特点、优劣势对比	159
表 41: 不同弹性体结构的力传感器对比	163
表 42: 应变式力传感器具体工艺步骤	169
表 43: 国内六维力传感器主要玩家相关信息梳理	172

一、人形机器人总论——定义、政策与发展历程

1. 人形机器人定义

1.1 机器人的定义

机器人是一种能够半自主或全自主工作的智能机器。根据国家标准 GB/T39405-2020，机器人是具有两个或两个以上可编程的轴，以及一定程度的自主能力，可在其环境内运动以执行预定任务的执行机构。

1.2 机器人的分类

根据国际机器人联合会（IFR），机器人可分为工业机器人和服务机器人两大类。

1、工业机器人概述

工业机器人可简单定义为多自由度机电设备，通过编程实现生产流程自动化（《机器人分类》GB/T 39405-2020），主要用于工业生产，如焊接、搬运、装配、质检、分拣等重复性或高精度任务，在汽车、3C 电子生产线中应用广泛。传统的工业机器人（如 SCARA 平面多关节机器人等）已经比较成熟，外观更像车或者局部机械部件，而非人形。传统工业机器人的主要参与者包括海外（日本、德国发展领先）的 ABB、发那科、库卡、安川，国内的汇川技术、埃斯顿、雷赛智能、埃夫特等。

图1：工业机器人类型



资料来源：觅途咨询，国信证券经济研究所整理

2、服务机器人概述

服务机器人可定义为除工业自动化应用外，能半自主或全自主工作，完成有益于人类健康或设备服务的机器人。为契合当前人形机器人领域发展趋势，我们将服务机器人分为场景机器人和通用机器人两大类，其中场景机器人是能基于特定场景需求，通过感知环境、自主决策并执行完成智能化任务的机器人（包括无人驾驶汽车、环卫机器人等），通用机器人是具备高度灵活性、适应性和多功能性的智能机器人，可执行多种任务并适应不同环境，研发难度高，人形机器人可视为未来通用机器人的一种理想量产形态。

服务机器人中，通用机器人仍处于产品定义和前期研发阶段，场景机器人的部分应用场景正在逐步落地，其中：

商业服务：包括接待、导览、咨询、餐饮服务、物流配送等，落地节奏略慢于工业领域；

家庭服务：包括养老陪护、健康监测、家务协助、情感陪伴等，壁垒最高，落地难度最大；

特种作业：包括抢险救援、危险品处理、深海/核电站巡检、空间站维护等，专用性较强，部分产品已经落地；

教育科研：包括高校实验室研发、医疗手术辅助（如远程操控机械臂）等。

图2：服务机器人类型



资料来源：亿欧智库，国信证券经济研究所整理

2. 人形机器人历史发展概述

作为服务机器人中的一大类别，人形机器人与人类具有相似的外表和结构，在现有针对人类构建的生产生活环境中具有高度的适应性和通用性，进而成为通用机器人最理想的形态。根据全国机器人标准化技术委员会发布的《人形机器人标准化白皮书》，人形机器人是指外观和行为与人类相似，具有部分或全部人类特征的机器人。人形机器人理想化的应用场景是通用场景，即人形机器人能够完成所有人类能够完成的工作，应用场景十分广泛。

2.1 人形机器人国外发展历程

国外人形机器人研究起步较早，美、日等国持续推动关节设计、动力驱动、感知控制等技术发展，探索人形机器人在军事、医疗、教育、物流、工业等领域的应用。谷歌、微软、英伟达等在人形机器人运动控制算法、AI 大模型领域形成一定积累。国外人形机器人的发展阶段大致可分为萌芽概念阶段、早期发展阶段、高度集成阶段、高动态运动阶段、产业化落地五大阶段，当前处于产业化落地阶段。

目前，国外人形机器人典型厂商为特斯拉，引领全球人形机器人产业发展。作为汽车电动化、智能化领域的开拓者，特斯拉依托其在智能驾驶领域的算法积累和硬件经验，于 2021 年提出人形机器人相关设计概念，正式进军人形机器人产业。2022 年 9 月，特斯拉在 AI Day 上首次展示 Optimus（擎天柱）人形机器人原型产品，完成行走、挥手、搬运等任务。2023 年底，特斯拉发布 Optimus Gen-2 产品，能够完成复杂动态动作（如跑步、上下楼梯），手部灵活度和抓握精度得到提高，运动执行能力接近人类水平。2024 年 10 月，Optimus 配备了增强的视觉识别技术，能够快速识别物体并实时处理，集成更先进的自学习算法。2024 年底，特斯拉对 Optimus 的灵巧手进行了升级，同时增强其平衡能力。2025 年，特斯拉正式开启量产进程。2025 年 5 月，特斯拉发布 Optimus 最新进展，机器人能够完成单脚旋转、鬼步舞、机械舞等多种舞蹈动作，动作协调程度再上台阶。产能节奏：已关

闭弗里蒙特工 Model S/X 产线，安装第一代 Optimus 生产线，预计很快就开始生产；德州工厂建设推进中。

图3：特斯拉 Optimus 人形机器人发展历程



资料来源：特斯拉，国信证券经济研究所整理

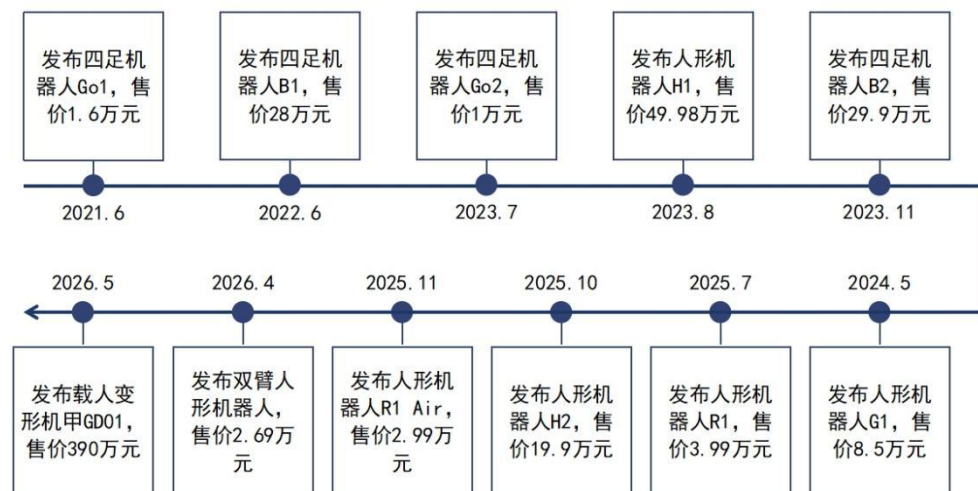
2.2 人形机器人国内发展历程

我国的人形机器人研究开始于 20 世纪 90 年代。前期，在国家“863”计划、国家自然科学基金等资助下，科研院所成为推动我国人形机器人产业进步的关键力量。近年来，以新能源汽车为代表的中国制造业厚积薄发，完成弯道超车和产业升级，中国制造全产业链的成熟，一方面打造出中国新能源汽车的全球名片，另一方面也为我国人形机器人的硬件生态奠定了早期基础。2021 年后，随着人工智能技术的突破，以及我国产业链集聚优势逐渐形成，宇树科技、智元机器人、乐聚机器人、优必选等企业，华为、小米等科技大厂，小鹏等造车新势力逐步入局人形机器人，我国人形机器人产业实现了从“追赶式创新”到“开拓式创新”的跨越。

以国内人形机器人龙头企业宇树科技为例，其发展历程折射出国内人形机器人产业的整体发展过程。宇树科技由王兴兴创立于 2016 年 8 月，总部浙江杭州，是全球最早实现四足机器人公开零售商业化的公司之一，从四足机器人向人形机器人延伸。2017 年 9 月，宇树科技开始实现四足机器人的行业落地，发布第一款商业化四足机器人。随后，宇树科技在四足领域逐步推出 A1、Laikago、Go1、Go2 等产品，覆盖消费、工业、军事等多场景需求。2022 年，人工智能技术实现突破，宇树科技进行人形机器人产品研发，于 2023 年 8 月推出 H1 全尺寸人形机器人，售价 9 万美元。2024 年 5 月，宇树科技发布第二代人形机器人 G1，身高 1.3 米，将人形机器人入门价降低至 9.9 万元人民币，相比 H1 价格下降超 80%。2024 年 8 月，宇树科技宣布 G1 人形机器人可大规模量产，基于端到端深度强化学习和仿真训练的技术路线，G1 可实现快速升级迭代。2025 年 1 月宇树发布首个人形机器人应用方案 G1-Comp，能在足球场上奔跑、转圈，实现球场环境快速识别，精准定位。2025 年春晚，16 台 H1 亮相，实现全自动走位变队形，完成抛手绢等复杂动作，将人形机器人产品引入大众视野。2025 年 6 月，宇树科技完成股改，名称由杭州宇树科技有限公司变为杭州宇树科技股份有限公司。2025 年 7 月，宇树发布人形机器人 R1，集成语音和图像多模态大模型，售价 3.99 万元人民币。10 月，公司发布新一代全尺寸人形机器人 H2，身高约 1.8m、体重约 70kg，采用仿人双目视觉和仿生外观，并强化全身运动控制和具身模型适配能力。招股书披露，宇树科技 2025 年人形机器人出货量 5215 台，表明公司已由产品验证阶段进入规模化交付阶段。2026 年，宇树陆续发布双臂人形机器人、载人变形机甲，产品矩阵

进一步丰富。资本化方面，宇树科技于 2026 年 3 月正式申报科创板 IPO；6 月 1 日通过上交所上市委审议，7 月获得中国证监会首次公开发行股票注册批复，目前处于发行上市准备阶段。公司拟募集约 42.02 亿元，主要投向智能机器人模型研发、机器人本体研发、新型智能机器人产品开发及智能机器人制造基地建设。

图4: 宇树科技人形机器人产品情况



资料来源：宇树科技，国信证券经济研究所整理

3. 人形机器人政策体系

2023 年以来，我国中央和地方政府纷纷出台政策鼓励人形机器人产业发展。2023 年 11 月，工信部印发《人形机器人创新发展指导意见》，意见指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，重塑全球产业发展格局。发展目标指出，到 2025 年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，培育 2-3 家具有全球影响力的生态型企业 and 一批专精特新中小企业，打造 2-3 个产业发展集聚区。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。

表1: 近期人形机器人相关政策梳理

发布时间	发布部门	范围	政策名称	重点内容解读
2026.07	北京市发展改革委、市委网信办、市科委中关村管委会、市经济和信息化局	北京市	《北京市关于加快智能体引领发展的若干措施》	提高智能体环境感知、自主决策、任务执行以及终端部署能力，支持创新主体将智能体能力深度嵌入智能终端，研制新一代智能手机、智能眼镜、智能耳机及可穿戴设备、智能机器人、智能汽车等智能终端产品。推动芯模云端用五位一体协同发展，支持智能终端厂商与模型厂商开展软硬联合定义，发展具备环境感知、自主决策能力的具身智能核心硬件组件，打造一批“北京智造”智能体终端标杆产品。
2026.07	江苏省发展改革委、省科技厅、省工业和信息化厅、省国资委、省数据局	江苏省	《江苏省加快场景培育和开放若干措施》	推动具身智能、光通信、第六代移动通信、脑机接口、无人机等前沿技术在主导产业的真实场景应用，搭建数字技术、生物制造技术、绿色低碳技术、材料技术等前沿交叉融合应用场景，加速产业化进程。
2026.07	广州市工业和信息化局	广东省广州市	《广州市推动具身智能机器人产业高质量发展若干措施》	力争到 2029 年，实施具身智能和机器人领域重大科技攻关 15 项以上，入选省级及以上应用示范场景 40 个以上，集聚 10 家左右整机制造企业，实现 2 家左右企业进入国内“第一方阵”。

2026. 06	深圳市科技 创新局	广东省 深圳市	《深圳市具身智能机器人技术创新与产业发展行动计划（2025—2027 年）（修订版）》	到 2027 年，在机器人关键核心零部件、AI 芯片、人工智能与机器人融合技术、多模态感知技术、高精度运动控制技术、灵巧操作技术等方面取得突破。新增培育估值过百亿元企业 10 家以上、营收超十亿元企业 20 家以上，实现十亿级应用场景落地 50 个以上，关联产业规模达到 1000 亿元以上，具身智能机器人产业集群相关企业超过 1200 家。
2026. 06	郑州市人民 政府办公室	河南省 郑州市	《郑州市深入实施“人工智能+”行动方案》	1. “人工智能+”先进制造。聚力打造新型工业化示范中心，组织工业大模型、工业软件等关键核心技术攻关，推动人工智能在研发设计、中试验证、生产制造、运营管智能工厂、灯塔工厂。推动智能网联汽车“车路云一体化”应用，强化人工智能在辅助驾驶、智能交互等领域的应用。创新发展具身智能，建设人形机器人训练场，研发减速器、传感器等核心零部件。
2026. 06	工业和信息化部 办公厅、国务院 国资委办公 厅	全国重 点地区 及中央 企业	《关于联合开展 2026 年度人形机器人与具身智能实景实训专项行动的通知》	到 2026 年底，人形机器人等重点产品在一批代表性场景中率先完成应用验证和常态化部署，开启“作业模式”；凝练形成百个以上高价值应用场景，进一步丰富具身智能应用谱系，带动形成万台级规模落地能力。
2026. 06	湖南省人民 政府	湖南省	《湖南省推进新型工业化和制造强省建设“十五五”规划》	1. 人工智能。重点布局具身智能、人工智能芯片等领域，发展智能机器人、工业智能体等核心产品，推动场景化算法与大模型深度融合，加速在典型场景中的规模化应用。加快人机交互、多机器人协同控制等技术突破，强化先进计算基础层与技术层研究布局，推进超算与智算融合网络、端侧算力网络及典型场景应用。
2026. 05	重庆市人民 政府办公厅	重庆市	《重庆市加快场景培育和开放推动新场景大规模应用行动方案》	2·人工智能领域。深入实施“AI+”综合应用场景赋能行动，高质量建设重庆人工智能湾区，加速建设全国人工智能应用高地。深入实施“机器人+”应用行动计划，在制造业、农业、特种应急等领域打造并推广一批应用场景。深化实施市级重大（重点）科技专项，支持突破智能制造、智能驾驶、具身智能机器人等领域一批关键技术，通过场景应用赋能技术创新。
2026. 05	北京经济技 术开发区管 理委员会	北京经 济技术 开发区	《关于进一步加快建设全域人工智能之城的实施方案（2026—2027 年）》	实施具身智能社会实验计划。依托国地共建具身智能机器人创新中心等平台优势，系统布局“大脑-小脑-本体-核心零部件”创新链条。重点打造人机协同、研用共融的全域实训场，开展全域真实世界数据采集，构筑全球领先的多构型兼容开源具身智能数据集，通过海量真实场景数据驱动技术迭代。前瞻布局先进产能，搭建供应链快速响应体系，建设人形机器人中试和量产工厂，加速前沿科技的产业化进程。
2026. 03	宁波市经济 和信息化局	浙江省 宁波市	《宁波市“百景千品 AI 赋能”计划方案（2026 版）》	1. 推进具身智能进工厂。鼓励行业协会、高校科研机构等联动人工智能服务商、制造业龙头企业，通过现场演示、案例剖析、精准对接、协同创新等形式，推动具身智能装备在复杂装配、柔性搬运、高危环境巡检、生产协同优化等场景中的应用落地和示范推广。2026 年，推广具身智能进工厂场景 5 个以上，培育工业具身智能产品 10 项以上。
2026. 03	厦门市工业 和信息化局	福建省 厦门市	《厦门市促进具身智能产业发展若干措施》	（一）支持具身智能整机产品制造企业扩大有效投资。对于符合条件的具身智能整机产品制造企业实施的新建和增资扩产（含技术改造和提容增效）项目，按项目生产设备实际购置费给予 20%以内，最高不超过 3000 万元的补助。将具身智能整机产品制造企业实施的新建和增资扩产项目纳入技术创新基金支持范围，企业融资成本最高 2%每年，差额部分由财政给予贴息。
2026. 03	国家发展改 革委/全国 人民代表大 会	全国	《中华人民共和国国民经济和社会发展第十五个五年规划纲要》	统筹布局具身智能实训场，推进虚实融合的协同训练与进化，深入研究物理人工智能，研发大小脑一体化的具身模型与算法，攻关本体及核心零部件等关键技术，加速人形机器人等各类形态产品升级和应用落地。
2026. 02	南京市人民 政府办公厅	江苏省 南京市	《南京市推动新场景规模化应用 高水平打造场景开放之城行动方案（2026—2028 年）》	（三）具身智能。以江宁开发区机器人产业集聚区为核心引擎，打造全域具身智能新高地。聚焦工业智造与民生服务，打造智能产线协作、无人化仓储物流、智能焊接作业、设备预测性维护、人机协作安全、智能质检等工业级应用场景，构建智慧医疗、智能文旅、无人餐饮、安防巡检、智慧教育、商业服务等民生服务矩阵。落地 100 个示范场景，形成 50 个以上可复制推广的典型场景，牵引 250 家以上机器人领域关联企业集聚发展。
2026. 02	黑龙江省人 民政府	黑龙江 省	《黑龙江省深入实施“人工智能+”行动的实施方案》	15. “人工智能+”终端产品。加快人工智能赋能机器人、智能农机、智能穿戴等智能终端产业发展。加快推进具身智能机器人等科技成果转化和产业化，加快建设哈尔滨智能机器人岛大型具身智能机器人综合训练场，依托博实股份、思哲睿等企业推进智能机器人创新发展，在机器人整机、零部件和系统集成等领域培育骨干企业。到 2027 年，打造智能终端产品 20 款以上。
2026. 02	重庆市人民 政府	重庆市	《重庆市国民经济和社会发展第十五个五年规划纲要》	1. 具身智能机器人。建设具身智能开源社区，加强具身智能产业生态培育和大脑、小脑、本体等软硬件关键技术研发，发展具身智能专用机器人和通用机器人。
2026. 02	上海市闵行 区经济委员 会	上海市 闵行区	《闵行区推进具身智能产业创新发展的若干政策措施》	（一）支持核心零部件研发。鼓励企业围绕机器人伺服系统、传感器、一体化关节及具身智能芯片等核心零部件，加大技术研发投入，加快产品升级迭代，对形成自主知识产权并进入市场销售环节的产品，给予不超过项目研发投入的 30%、最高不超过 3000 万元的经费支持。
2025. 12	四川省人民 政府办公厅	四川省	《四川省人工智能赋能新型工业化三年行动方案（2025—2027 年）》	3. 推动智能创新平台建设。瞄准芯片层加速自主架构 AI 芯片研发、终端层攻关环境自适应机器人、云脑层建设行业知识计算引擎，支持建设具身智能创新中心、智能产业研究院等智能创新平台，培育自主可控工业智能体平台。搭建人工智能产业检验检测平台，完善检验检测与标准体系。
2025. 12	江苏省人民 政府	江苏省	《江苏省“人工智能+”行动方案》	7·推动具身智能机器人产业发展。研发具身智能操作系统和具身智能应用框架，提升环境感知、语言交互、推理决策和高度泛化能力。建立全场景具身智能数据采集体系，探索构建世界模型仿真平台，科学布局具身智能机器人数据采集训练中心。面向制造业等工业场景、特种环境和个性化场景，开发具身智能机器人整机。
2025. 12	杭州市经济 和信息化局、杭 州市财政 局	浙江省 杭州市	《杭州市具身智能机器人“强链补链”行动方案（2026—2027 年）》	2026—2027 年，聚焦具身智能机器人产业技术攻关、产品供给、场景拓展和生态培育等任务，着力夯实创新链、做强产业链、打造创新创业生态圈，实现“1134”工作目标。2027 年，实现各类具身智能机器人整机企业工业总产值超 200 亿元，产业链工业总产值超 500 亿元。

2025. 12	工业和信息化部、中央网信办、国家发展改革委等 8 部门	全国	《“人工智能+制造”专项行动实施意见》	推动具身智能产品创新，建设人形机器人中试基地和训练场，打造人形机器人标杆产线，在典型制造场景率先应用。
2025. 12	江西省人民政府	江西省	《江西省“人工智能+”行动方案》	（四）产业保障。加大具身智能、消费电子等领域传感器研发生产，加快智能穿戴、虚拟现实等领域产品创新，支持企业开展光通信、显示、音视频等模组研发应用。
2025. 12	山东省工业和信息化厅等部门	山东省	《山东省人工智能产业高质量发展行动计划（2025—2027 年）》	面向复杂装配、特种作业、辅助医疗等领域，加快布局以人形机器人、仿生机器人为代表的具身智能产品；围绕电商直播、文娱传媒、智能客服等领域，加速发展服务型、功能型数字人（虚拟人）。
2025. 12	广西壮族自治区工业和信息化厅	广西壮族自治区	《广西培育先进制造业集群行动方案》	深入实施“人工智能+制造”行动，深化人工智能、数字孪生、云计算、大数据等数字技术的集中应用，发展智能机器人、具身智能、智能家居等智能产品，在集群内重点领域打造一批应用场景和工业高质量数据集。加快建设中国—东盟人工智能创新合作中心、中国—东盟人工智能工业设计中心等创新服务平台。
2025. 11	中共河北省委	河北省	《中共河北省委关于制定河北省国民经济和社会发展第十五个五年规划的建议》	前瞻布局发展生物制造、第六代移动通信、具身智能等未来产业，打造绿氢全产业链体系，打造高水平孵化平台和加速器，实施一批前沿创新项目，不断催生产业发展新变量。
2025. 11	安徽省人民政府办公厅	安徽省	《安徽省智能机器人产业发展行动方案（2025—2027 年）》	研发通用技术底座，包括机器人专用操作系统、高保真仿真平台、高质量数据集及开发环境等，推动与具身智能大模型深度融合，系统打造智能机器人应用生态。到 2027 年，智能机器人产业形成“十百千”发展格局，即培育 10 户以上细分领域国内龙头企业，突破 100 项以上关键技术及标志性产品，全产业链营业收入达到 1000 亿元。
2025. 10	湖北省人民政府办公厅	湖北省	《湖北省人民政府办公厅关于加快推进人工智能产业发展的实施意见》	（一）推进优势领域集聚攻坚。支持华中科技大学、武汉大学、湖北人形机器人创新中心、机器人控制与驱动技术创新中心等创新主体联合重点企业，开展仿生关节驱动、多模态人机交互等核心技术攻关，形成一批“首发首创”技术和产品。（二）突破关键共性技术。聚焦群体智能、类脑智能、具身智能、人机混合智能等方向，鼓励高校联合科研院所及龙头企业，加强人工智能基础理论研究，开展大模型基础架构创新、多路径技术探索、多模态数据处理等共性技术攻关，形成一批突破性原创性成果。
2025. 09	盐城市人民政府办公室	江苏省盐城市	《盐城市具身智能机器人产业发展行动计划（2025—2027 年）》及《盐城市支持具身智能机器人产业发展若干政策措施》	坚持“创新引领、应用牵引、整零协同、生态培育”的思路，前瞻布局人形机器人和具身智能大模型，加快发展工业机器人、服务机器人、物流机器人、特种机器人 4 类特色机器人产品，着力提升核心零部件和关键材料等 N 个配套产品，构建“2+4+N”具身智能机器人产业体系。到 2027 年，引进实施具身智能机器人产业链项目超 100 个，产业集群企业超 100 家，产业规模超 100 亿元，突破一批具身智能机器人创新产品，打造一批具身智能机器人标杆应用场景，建设一批具身智能机器人特色园区载体，努力建设长三角具身智能机器人制造集聚区和创新应用试验区。
2025. 09	吉林省人民政府	吉林省	《吉林省人民政府关于加快推进人工智能创新发展的实施意见》	6. 加快垂直领域大模型研发迭代。支持研发行业大模型产品，做精细分场景专用模型，培育一批行业应用开发商和集成商。倡导在开源社区发布开源模型，支持建设 MaaS（模型即服务）平台，开发模型智能体，促进模型落地应用。在具身智能控制与决策、高质量仿真、系统集成等方向加强技术攻关。开展大模型评测研究，支持建设大模型测试验证平台，提供专业化模型评测服务。
2025. 08	北京经济技术开发区管理委员会	北京经济技术开发区	《北京经济技术开发区关于推动具身智能机器人创新发展的若干措施》	到 2027 年底，力争实现“十个百万”发展目标，建成 1 个国际一流的机器人二次开发社区，引育 5 家以上生态领军企业，打造 5 个以上公共服务平台，推动在教育、医疗、健康、政务服务、商业社区等十个以上领域典型应用场景全覆盖，聚集百家以上具身智能优势企业，汇聚千名以上高端人才，形成万台级具身智能机器人量产规模能力，打造千万规模级真实世界具身智能数据集，具身智能机器人产业高地建设初具成效。
2025. 08	上海市人民政府办公厅	上海市	《上海市具身智能产业发展实施方案》	按照“模型驱动、应用示范、群链协同、开源生态”的总体思路，通过布局重大技术攻关、建设典型应用示范、构建产业特色集群、打造开源优质项目，到 2027 年，实现具身模型、具身语料等方面核心算法与技术突破不少于 20 项；建设不少于 4 个具身智能高质量孵化器，实现百家行业骨干企业集聚、百大创新应用场景落地与百件国际领先产品推广，我市具身智能核心产业规模突破 500 亿元。
2025. 07	广州市南沙区人民政府办公室	广州市南沙区	《广州市南沙区促进人工智能产业高质量发展扶持办法》	第九条 支持机器人研发创新。鼓励具身智能机器人研发创新，促进成果产品首试首用。对达成首次试用的未定型阶段具身智能机器人创新产品，按企业当年研发投入的 5% 给予补贴，单家企业每年最高不超过 100 万元。购买具身智能训练场服务的，按企业年度实际支付具身智能训练场服务费用的 30% 给予补贴，单家企业每年最高 200 万元。
2025. 07	四川省人民政府办公厅	四川省	《关于发展壮大新兴产业加快培育未来产业的实施方案（2025—2027 年）》	2. 机器人。突出整机带动，强化关键零部件制造和系统集成，打造一批高辨识度标志性产品。鼓励科研单位、重点企业发展特色整机产品，加快具身智能控制、全身协同运动自主学习、人工智能交互等技术迭代，加快机器人软件算法升级。加快推动机器人向商用服务、社区家庭、应急救援等场景拓展，实现规模化商业应用。支持省内重点企业做强谐波减速机、高精度传感器、智能一体化关节、高性能伺服系统、机器人皮肤等关键零部件，提升市场占有率。
2025. 07	上海市人民政府办公厅	上海市	《上海市具身智能产业发展实施方案》	按照“模型驱动、应用示范、群链协同、开源生态”的总体思路，通过布局重大技术攻关、建设典型应用示范、构建产业特色集群、打造开源优质项目，到 2027 年，实现具身模型、具身语料等方面核心算法与技术突破不少于 20 项；建设不少于 4 个具身智能高质量孵化器，实现百家行业骨干企业集聚、百大创新应用场景落地与百件国际领先产品推广，我市具身智能核心产业规模突破 500 亿元。
2025. 06	中国证监会	全国	《关于在科创板设置科创成长层 增强制度包容性适应性的意见》	根据产业发展和市场需求，支持人工智能、商业航天、低空经济等更多前沿科技领域企业适用科创板第五套上市标准，加大对新兴产业和未来产业的支持力度。
2025. 06	湖北省武汉市	湖北省武汉市	人形机器人产业三年行动方案和政策措施	实施整机领航等五大行动，支持具有生态主导力、行业竞争力的整机企业，牵头成立市级产业创新联合实验室，最高支持 6000 万元。
2025. 05	上海市浦东新区科技和经济数字化转型高质量发	上海浦东新区	《浦东新区人工智能赋能经济数字化转型高质量发	在人形机器人试点示范阶段，经综合评估，认定为示范应用项目，具备可复制可推广取得良好示范效果的，给予场景应用方不超过总投资 50% 的补贴。支持人形机器人企业

	经济委员会、上海市浦东新区财政局		《展专项操作细则》	自主研发和生产，在人形机器人整机形成技术领先优势，并率先开展市场应用和推广。经综合评估，对人形机器人创新产品研发投入，给予不超过研发投入 50% 的补贴。单个企业年度补贴金额不超过 1 亿元。支持人形机器人减速器和控制器、传感器和灵巧手等核心零部件的产业化，经审核，给予不超过每款零部件产品首批次合同金额 10% 的奖励。单个企业每年不超过 500 万元。
2025. 05	深圳市龙岗区	深圳市龙岗区	《龙岗区加快创建“AI 龙岗”三年行动计划（2025—2027 年）》《龙岗区具身智能机器人友好示范城区三年行动方案（2025—2027 年）》	通过“人才+技术+场景+订单+资金”组合拳，发布龙岗区应用场景创新“一联盟、一平台、一政策”举措，为企业新技术、新产品、新服务落地应用、开拓市场提供广阔空间。以 AI 产业化、产业 AI 化“双向驱动”为核心路径，不断推动创新链、产业链、资金链、人才链深度融合，加快创建人工智能全域全时应用示范区。
2025. 05	浦东新区	上海浦东新区	《具身智能产业支持 16 条政策》	对关键核心技术攻关、新型研发机构、大企业创新中心等给予最高 2000 万元的资金支持，鼓励具身智能技术自主突破；在应用层面，着力支持具身智能技术在产业、市场中的融合与落地，单个项目支持额度最高可达亿元级。
2025. 05	佛山市人民政府办公室	佛山市	《佛山市加快智能机器人产业发展行动方案（2025—2030 年）》	到 2027 年，智能机器人整机产值突破 200 亿元，智能机器人相关产业营收突破 2000 亿元；到 2030 年，智能机器人整机产值突破 1000 亿元，智能机器人相关营收突破 5000 亿元，成为大湾区智能机器人育成创新应用中心。
2025. 05	国家数据局综合司	全国	《数字中国建设 2025 年行动方案》	深度挖掘人工智能应用场景，积极开展人工智能高质量数据集建设。着力发展智能网联新能源汽车、人工智能手机和电脑、智能机器人等新一代智能终端及智能制造装备。
2025. 04	浙江省人民政府	浙江省	《关于支持人工智能创新发展的若干措施》	支持具身智能应用。建设具身智能行业基地，搭建公共测试环境、测试验证平台等，有力支撑具身智能软硬件迭代升级，推动形成一批行业标准。鼓励国有企事业单位聚焦未来工厂、智慧园区等，滚动开放不低于 50 个应用场景，打造具身智能应用的“样板间”和“体验中心”。支持智能终端消费。将智能家居机器人、智能眼镜等产品纳入消费品以旧换新补贴范围，按照产品售价的 15%，给予最高 2000 元/件补助。
2025. 04	广东省人民政府办公厅	广东省	《广东省进一步激发市场主体活力加快建设现代化产业体系若干措施》	突出培育发展前沿赛道产业。聚焦集成电路、人工智能、机器人、自动驾驶、低空经济、生物医药、量子科技、商业航天、新型储能、新能源汽车、数字经济、现代化海洋牧场等重点领域，编制产业链招商图谱，建立头部企业和领军人才数据库，实施有针对性的招商引资政策。对特别重大的产业招引项目，结合产业特点依法依规制定更加精准的支持政策。
2025. 04	杭州市发改委	杭州市	《杭州市建设人工智能产业发展高地实施方案（2025 年版）（征求意见稿）》	目标到 2025 年，全市投向人工智能的产业基金组建规模突破 1000 亿元。为加强产业基金支持，《征求意见稿》还提出“组建润苗直投基金，重点支持具备硬科技属性的本地人工智能初创企业”、“支持符合条件的人工智能优质企业纳入证券交易所知名成熟发行人名单，接入交易所债券发行绿色通道”。
2025. 04	北京市经济和信息化局、北京市通信管理局	北京市	《北京市 5G 规模化应用“扬帆”行动升级方案（2025—2027 年）》	明确未来三年 5G 发展蓝图，其中提出，探索在人形机器人中预置 5G 模组，加强人形机器人与 5G 工业互联网协同适配能力，推进具备 5G 通信能力的人形机器人在高端制造场景、消费服务场景规模化应用，丰富系统性解决方案，拓展人机协同、柔性生产等制造新模式。
2025. 04	苏州市政府	苏州市	《苏州市具身智能机器人产业创新发展三年行动计划（2025—2027 年）》《苏州市支持具身智能机器人产业创新发展的若干措施》	《行动计划》聚焦具身智能机器人整机产品、核心部件、关键共性技术三个发展方向，明确支持企业做大做强做优、推动产业集聚发展等 8 项具体任务，提出到 2027 年，重点培养 3 家以上拥有整机商业化量产能力的具身智能机器人企业，核心产业规模达 100 亿元，支撑全市机器人产业规模达 2000 亿元，成为全国具身智能机器人技术创新策源地、高端制造集聚区和示范应用样板城市。对此，《若干措施》提出了支持重大项目落户、支持企业增资扩产、建设高能级创新平台等 12 项具体措施。
2025. 03	中共中央办公厅、国务院办公厅	全国	《提振消费专项行动方案》	支持新型消费加快发展。深入实施数字消费提升行动，大力培育品质电商。开展“人工智能+”行动，促进“人工智能+消费”，加速推动自动驾驶、智能穿戴、超高清视频、脑机接口、机器人等新技术新产品开发与应用推广，开辟高成长性消费新赛道。
2025. 03	广东省人民政府办公厅	广东省	《广东省推动人工智能与机器人产业创新发展若干政策措施》	支持关键核心技术攻关。支持企业、高校、科研院所等各类创新主体开展联合攻关，围绕人工智能与机器人产业链上下游组建产业创新联盟，加快构建全过程创新链。组织实施省重点领域研发计划“新一代人工智能”“智能机器人”等旗舰项目、重大专项，在人工智能与机器人领域部署一批攻关任务。对国家科技重大专项符合省级配套条件的人工智能与机器人领域重点项目，省财政按规定给予配套奖励，单个项目省级配套金额超 1 亿元（含）的，按“一事一议”方式研究给予支持。创建人工智能与机器人领域制造业创新中心，对符合条件的国家级、省级制造业创新中心，省财政按规定分别给予最高 5000 万元、1000 万元的资金支持。
2025. 03	北京市经济和信息化局	北京市	《北京市 5G 规模化应用“扬帆”行动升级方案（2025—2027 年）（征求意见稿）》	推动基于 5G 的智能机器人、智能移动终端、云设备等研发应用，鼓励融合 5G 的 XR 业务系统、裸眼 3D、智能穿戴、智能家居等产品创新发展。探索在人形机器人中预置 5G 模组，加强人形机器人与 5G 工业互联网协同适配能力，推进具备 5G 通信能力的人形机器人在高端制造场景、消费服务场景规模化应用，丰富系统性解决方案，拓展人机协同、柔性生产等制造新模式。
2025. 03	浙江省人民政府	浙江省	《关于下达 2025 年浙江省国民经济和社会发展规划的通知》	安排重大项目 1000 个以上，完成年度投资 1 万亿元以上。培育壮大新兴产业，力争战略性新兴产业增加值增长 7.5%。布局建设未来产业，深化“人工智能+”行动，加快布局人形机器人、量子信息、类脑智能、合成生物、空天信息和低空经济等新产业新业态。
2025. 03	深圳市科技创新局	深圳市	《深圳市具身智能机器人技术创新与产业发展行动计划（2025—2027 年）》	到 2027 年，在机器人关键核心零部件、AI 芯片、人工智能与机器人融合技术、多模态感知技术、高精度运动控制技术、灵巧操作技术等方面取得突破。新增培育估值过百亿元企业 10 家以上、营收超十亿元企业 20 家以上，实现十亿级应用场景落地 50 个以上，关联产业规模达到 1000 亿元以上，具身智能机器人产业集群相关企业超过 1200 家。打造公共服务平台矩阵，吸引更多上下游企业、科研机构、创新团队等加入，形成更完善的产业生态，具身智能机器人产业综合实力达到国际领先水平。
2025. 02	北京市科学技术委员会等四部门	北京市	《北京具身智能科技创新与产业培育行动计划（2025—2027 年）》	计划制定了发展目标：到 2027 年，原始创新能力显著提升，围绕具身大小脑模型、具身智能芯片、全身运动控制等方面突破不少于 100 项关键技术，产出不少于 10 项国际领先的软硬件产品，具身智能上下游产业链基本实现国产化。基础设施建设逐步完善，建设世界模型仿真、数据采集、中试验证、场景开放测试等一批新型研究创新平台，建设统一的具身数据采集管理、测试验证标准，支撑不少于 100 家创新主体开展技术

创新，提升产品迭代速度。产业规模进一步扩大，培育产业链上下游核心企业不少于50家，形成量产产品不少于50款，在科研教育、工业商业、个性化服务三大场景实现不少于100项规模化应用，量产总规模率先突破万台，培育千百亿产业集群。产业生态持续优化，建设不少于2个具身智能特色产业集聚区，打造具身智能领域产教融合基地，营造具有国际影响力的具身智能产业生态。

2025. 02	重庆市经济和信息化委员会	重庆市	《重庆市工业和信息化领域“揭榜挂帅”项目榜单（具身智能机器人方向第一批）的通知》	围绕具身智能机器人产业发展需求，结合重庆实际，发布三类共12个项目。第一类开源社区包括1个项目：具身智能开源社区建设与运营。第二类开放场景包括6个项目：面向汽车智能制造应用场景的具身智能机器人开发、面向汽车总装应用场景的具身智能机器人开发、面向新能源汽车电驱产线关键柔性生产环节的具身智能机器人开发、面向笔电装配柔性生产环节的具身智能机器人开发、面向集成电路封装打包柔性生产环节的具身智能机器人开发、面向新型显示制造场景的具身智能机器人开发。第三类技术攻关包括5个项目：具身大模型关键技术攻关、具身智能因果推理关键技术攻关、具身智能仿真训练关键技术攻关、空间智能关键技术攻关、具身大模型端侧应用关键技术攻关。第一批榜单包括赛力斯、重庆长安汽车、京东方、重庆金康动力、华数机器人等核心企业。
2024. 12	安徽省工业和信息化厅	安徽省	《安徽省人形机器人产业发展行动计划（2024—2027）》	打造合肥、芜湖两个产业先导区。到2027年，构建安徽省人形机器人产业的“23456”创新体系和产业生态，建成在国内具有重要影响力的人形机器人产业发展高地。打造合肥、芜湖两个产业先导区；建设人形机器人省级创新平台、中试验证平台、招引孵化平台等三大平台；打造不少于四种型号具有国内代表性的人形机器人整机。同时，开发控制器、高功率密度高性能伺服驱动器和伺服电机、一体化关节、轻质灵巧手、电子皮肤等优势部件；推出面向制造、应急、商贸物流、医疗健康、家庭服务、文旅服务等六大领域场景的多类型人形机器人产品。
2024. 12	重庆市经济信息委等七部门	重庆市	《重庆市支持具身智能机器人产业创新发展若干政策措施》	从构建产业创新体系、加强产品应用推广、提升产业生成能力、强化发展要素支撑、加强协调联动五方面支持具身智能机器人产业创新发展，其中提出，加快培育市场主体。支持具身智能机器人创业团队和中小企业参与创客中国等创新创业赛事。支持具身智能机器人领域企业创建高新技术企业、专精特新“小巨人”企业、制造业单项冠军企业。培育一批具有生态主导力、品牌竞争力、国际影响力的瞪羚企业和独角兽企业并予以支持；适时将发展成效好的具身智能机器人企业纳入全市领军链主企业跨越发展“鲲鹏”行动并予以支持。
2024. 11	四川省科技厅、四川省发改委	四川省	《四川省人工智能产业链总体工作方案（2024—2027年）》	在人工智能重大科技专项重点攻关任务清单中，围绕人工智能芯片、算力等产业短板，以及类脑智能、智能机器人等前沿方向列出16项任务，将通过定向制、揭榜挂帅等方式，实现高性能算力芯片架构、机器人小脑等关键技术突破。
2024. 11	南京市政府办公厅	江苏省南京市	《促进机器人产业高质量发展行动计划（2024—2026年）》	立足南京机器人产业发展现状与基础优势，到2026年，我市机器人产业总体发展水平居全国前列；自主工业机器人在行业内继续保持领先优势；经营主体加速集聚，产业竞争力更加提升；“机器人+”创新示范应用取得显著成效，成为国内标杆。聚力打造“1+N+1”整机体系。前一个“1”表示打造工业机器人领先优势。依托工业机器人国内“链主”地位和品牌领先优势，打造更具全球竞争力的TOP5品牌，进一步提升我市工业机器人产品的全球市场占有率和影响力。“N”表示全面提升一批特色机器人产业。聚焦协作、物流、安全应急、公共服务、个人消费、医疗健康机器人等领域，打造门类丰富、各具特色的产业发展体系。后一个“1”代表前瞻布局人形机器人产业。全面推进人形机器人“大脑”“小脑”“肢体”等部件研发，构筑人形机器人通用整机平台，初步建立人形机器人整机的小批量生产制造能力。
2024. 11	泉州市发改委	福建省泉州市	《泉州市培育发展未来产业实施方案》	《方案》瞄准低空经济、卫星互联网、氢能、前沿新材料、量子信息、生物技术、人形机器人、核能应用等八大未来赛道，以前沿技术能力供给引领新场景、创造新需求，工程化推进“技术—产品—标准—场景”联动迭代，系统构建技术产品化、产品产业化、产业规模化的生态链条，打造全国未来产业应用创新发展新高地。
2024. 11	甘肃省第十四届人民代表大会常务委员会	甘肃省	《甘肃省人民代表大会常务委员会关于进一步加快数字政府建设促进数字经济数字社会发展的决定》	依托鲲鹏生态产业创新中心和兰州、平凉、张掖、天水、兰州新区等智能制造产业园，生产电脑、手机、机器人、无人机、可穿戴设备等，构建自主可控软硬件产业集群。大力发展信创、数字创意、工业软件、新兴平台软件、信息安全、嵌入式系统等，加速推进数字信息产业创新。前瞻布局未来产业，推动人工智能、量子信息、人形机器人、元宇宙、下一代互联网等前沿技术研发和应用推广，打造数字产业新赛道。
2024. 11	中关村科技园区石景山园管理委员会北京市石景山区科学技术委员会	北京市石景山区	《石景山区人形机器人产业发展支持办法（试行）》	从支持前沿技术研发、加强关键技术攻关、支持建设产业促进平台、支持打造创新策源平台、支持创新成果转化、支持场景示范应用、支持产业运营、加强资本支撑、支持人才引育、优化服务环境等多方面鼓励人形机器人产业发展。围绕人形机器人“大脑、小脑、肢体、本体”关键技术和核心部件，加强多模态大模型、运动控制算法、专用算力芯片、智能传感器、仿生轻量化机械臂及灵巧手等前沿技术研发，按照项目研发投入总额的30%予以项目资金补助，单个项目补助金额不超过500万元；对获得市级及以上支持的项目，按照支持资金30%予以补助，最高900万元。
2024. 10	南山区工业和信息化局	深圳市南山区	《南山区促进机器人产业发展的若干措施（征求意见稿）》	适用于在南山区依法从事经营活动的机器人核心零部件、本体研发制造、系统集成企业，或提供机器人成果产业化、产品检测认证及应用推广、行业咨询等相关产业服务的组织，围绕机器人操作系统、高性能专用芯片和精密减速器、高性能电机、控制器、传感器等关键核心零部件以及人工智能、多模态大模型等相关技术，聚力解决机器人产业短板和“卡脖子”技术难题。
2024. 10	湖北武汉东湖高新区	湖北武汉东湖高新区	《东湖高新区促进未来产业发展实施方案》	以人形机器人整机产品为突破口，加快推进小规模量产，支持整机企业牵头建立创新联合体，引导“大脑、小脑、感知、躯干、四肢”等零部件企业融入整机制造产业链，实现整机与零部件协同发展。
2024. 10	重庆市经济和信息化委员会等八部门	重庆市	《重庆市“机器人+”应用行动计划（2024—2027年）》	1. 培育壮大智能制造装备产业集群，推动机器人产业高质量发展，推进机器人典型应用开发，推广“机器人+”应用创新实践。 2. 到2027年，机器人广泛应用于经济社会各领域，机器人典型示范应用成效显著。聚焦机器人应用重点领域，突破一批机器人关键技术，开发一批机器人中高端产品，引育一批“机器人+”应用标杆企业，提供一批机器人创新应用解决方案，推广一批具有较高水平、创新应用模式和显著应用成效的机器人典型应用场景，打造一批应用体验中心和试验验证中心，推广一批“机器人+”试点区县。

2024. 10	河北省雄安新区管理委员会改革发展局	河北省雄安新区	《雄安新区支持机器人产业发展的若干措施》	加快推动雄安新区机器人产业布局和发展，融入京津冀重点产业链条。从支持科技创新平台建设、支持关键技术产品攻关、支持机器人场景创新应用、鼓励企业采用灵活方式打造机器人场景、支持机器人龙头企业落地、引进培育优质中小企业、支持机器人重大产业项目落地、支持机器人产业公共服务平台建设、支持机器人科普中心建设等方面支持雄安新区人形机器人发展。
2024. 09	河北省雄安新区管理委员会改革发展局	河北省雄安新区	《雄安新区机器人产业创新发展三年行动计划（2024—2026 年）》	聚焦商业服务机器人、建筑机器人、服务机器人、智能机器人四大赛道，布局人形机器人、工业机器人、特种机器人、医疗机器人、竞技机器人等方向，大力推动机器人科技创新和产业发展。到 2026 年，本区机器人产业生态初具雏形，引进和培育 100 家左右机器人产业链相关企业，全区机器人核心产业收入达到 10 亿元以上，深度融入京津冀机器人产业协同生态链，机器人技术研发和应用推广取得明显进展。
2024. 09	湖南省工业和信息化厅	湖南省	《湖南省人工智能产业发展三年行动计划（2024—2026 年）》	发展智能机器人。以大模型等人工智能技术突破为引领，加快推动智能机器人产业创新发展。依托优势企业推动机器人脑、机器肢、机器体、通用产品等产品研发生产，开发一批具有核心竞争力的低成本交互型、高精度型以及极端环境下高可靠型等人形机器人整机产品。支持优势园区大力发展高精度工业机器人，加快智能人机交互、多自由度精准控制服务机器人的应用推广，加快抢险救灾等特种机器人研发生产。
2024. 09	辽宁省人民政府办公厅	辽宁省	《辽宁省人民政府办公厅关于科技引领未来产业创新发展的实施意见》	聚焦人形机器人领域，突破全息感知、情感分析与交互等关键技术，研发仿生传感器、高动态运动控制器、自主产权人形机器人系统等产品。依托场景资源优势打造一批人工智能应用场景。
2024. 09	青岛市工业和信息化局等十一部门	山东省青岛市	《青岛市人形机器人产业发展行动计划（2024—2027 年）》	青岛将打造国内重要的人形机器人研发制造应用基地。到 2027 年，培育 5—8 家人形机器人领域重点企业，在智能传感、减速器等关键部件领域形成一批创新成果。
2024. 09	浙江省制造业高质量发展领导小组办公室	浙江省	《浙江省人形机器人创新发展实施方案（2024—2027 年）》	力争到 2027 年，科技创新有效引领人形机器人产业创新发展，在人形机器人领域培育省级及以上高能级创新载体 5 家、企业研发机构 30 家，实施重大科技项目 30 项，产业链供应链实现自主可控；企业科技创新主体作用充分发挥，培育链主企业 5 家，制造业单项冠军和专精特新“小巨人”企业 50 家，形成具有国际竞争力的全产业链优势；人形机器人产业协同布局和集群化发展格局基本形成，建设省级未来产业先导区 2 个，打造示范应用场景 50 个，标志性产品在重点领域规模化应用取得实质性进展；产业配套与创新发展生态进一步完善，产业规模实现跨越式增长，全省整机年产量达到 2 万台，核心产业规模达到 200 亿元，关联产业规模达到 500 亿元。
2024. 07	黑龙江省工信厅	黑龙江省	《黑龙江省未来产业孵化加速计划（2024—2027 年）》	聚焦未来制造、未来信息、未来材料、未来空间、未来能源、未来健康等六大方向，在全面承接国家未来产业重点领域的同时，立足黑龙江省产业基础、科研优势和场景应用等方面实际，突出发展先进制造、人形机器人、人工智能+等 18 个高增长高潜能细分领域，加速孵化培育未来产业。
2024. 07	青海省科学技术厅	青海省	《青海省科学技术厅关于印发青海省 2025 年度省级科技计划项目申报指南的通知》	到 2027 年，我省将建设一批未来产业孵化器和先导区，打造一批未来产业支撑平台，突破一批前沿技术，形成一批标志性产品，培育一批骨干企业，促进未来产业技术创新、产业培育、安全治理等全面发展，部分领域达到国内先进水平，产业规模稳步提升，为加快构建“4567”现代化产业体系提供强力支撑。
2024. 07	上海市法学会等五部门	上海市	《上海市人形机器人治理导则》	旨在促进人工智能科技和产业的健康发展，确保人形机器人的设计、开发和应用合乎人类道德和伦理价值，持久保障人类使用人形机器人的权益和安全，为全人类带来更多福祉和便利。
2024. 06	陕西省工业和信息化厅	陕西省	《陕西省加快推动人工智能产业发展实施方案（2024—2026 年）》	到 2026 年，建成 3 个人工智能产业集聚区，打造智能算力、智能机器人、智能无人机、智能网联汽车、智能软硬件等 5 个产业集群，人工智能（大数据）产业链规模突破千亿元。人工智能重点技术产品在工业领域普及应用，创新应用场景数量达到 100 个以上。加快大模型与智能软硬件、智能机器人、智能无人机、智能网联汽车等深度融合，提升感知、交互、控制、协作和自主决策能力，降低操作门槛，促进智能产品和装备从感知向认知跃升。
2024. 06	国家发改委等五部门	全国	《关于打造消费新场景培育消费新增长点的措施》	拓展智能机器人在清洁、娱乐休闲、养老助残护理、教育培训等方面功能，探索开发基于人工智能大模型的人形机器人。
2024. 05	广东省人民政府办公厅	广东省	《广东省关于人工智能赋能千行百业的若干措施》	推进智能机器人创新发展。加快机器脑、机器肢、机器体、通用产品等产品研发生产，推动人形机器人等具身智能机器人研制和应用。发展柔性交互、动态规划路径的协作机器人与自适应机器人等高精度工业机器人，加快智能人机交互、多自由度精准控制的服务机器人应用推广。到 2027 年，智能机器人产业营业收入达到 900 亿元。
2024. 05	安徽省工业和信息化厅	安徽省	《安徽省人形机器人产业发展行动计划（2024—2027 年）》（征求意见稿）	到 2027 年，围绕“23456”目标体系，初步构建安徽省人形机器人创新体系和产业生态，形成产业化能力。到 2030 年，人形机器人产业化进程加速，应用场景更加丰富，相关产品深度融入实体经济，建成国内有重要影响力的人形机器人产业发展高地。
2024. 04	湖北省人民政府办公厅	湖北省	《省人民政府办公厅关于加快培育新质生产力推动高质量发展的实施意见》	以未来制造、未来信息、未来材料、未来健康、未来能源和未来空间为主攻方向，在我省具有创新优势和产业基础的重点领域，布局实施 8 大重点工程。实施人形机器人突破工程，坚持以整带零、以零强整，加快突破“大脑、小脑、感知、躯干、四肢”关键技术，尽快实现“从 0 到 1”的突破。
2024. 04	江苏省工业和信息化厅等五部门	江苏省	《江苏省机器人产业创新发展行动方案》	到 2025 年，我省机器人产业链规模达 2000 亿元左右，机器人核心产业规模达到 250 亿元以上，成为全国机器人产业创新发展和集成应用高地，培育 5 家具有国际竞争力的机器人企业、新增 10 家以上省级以上专精特新企业、遴选 50 个标杆示范机器人应用场景，重点制造业领域机器人密度达到 500 台/万人以上。
2024. 04	江苏省工业和信息化厅等五部门	江苏省	《江苏省机器人产业创新发展行动方案》	到 2027 年，我省机器人产业综合实力达到国际先进水平，机器人成为经济发展、人民生活、社会治理的重要组成部分。工业机器人整机综合指标达到国际先进水平，关键零部件性能和可靠性达到国际同类产品水平；服务机器人和特种机器人行业应用深度和广度显著提升，在家政服务、养老助残、医疗康复、教育娱乐、维护巡检、安全应急等领域实现广泛应用；人形机器人“大脑、小脑、肢体”等关键核心技术取得突破，大模型等人工智能技术加快发展，典型应用场景更加丰富，争创国家级产业发展集聚区。

2024. 04	山东省工业和信息化厅	山东省	《山东省促进人形机器人产业创新发展实施方案（2024-2027 年）》	加快推动山东省人形机器人产业创新发展，提升人形机器人在经济社会领域的应用水平，打造具有核心竞争力的人形机器人产业集群。到 2027 年，人形机器人技术创新能力显著提升，培育 10 家左右核心业务产值过亿元的骨干企业，产业加速实现规模化发展，综合实力达到全国先进水平。应用场景更加丰富，相关产品深度融入实体经济，人形机器人产业成为山东新兴产业的重要力量，基本进入人形机器人强省序列。
2024. 01	工信部等七部门	全国	《关于推动未来产业创新发展的实施意见》	突破人形机器人、量子计算机、超高速列车、下一代大飞机、绿色智能船舶、无人船舶等高端装备产品，以整机带动新技术产业化落地，打造全球领先的高端装备体系。
2023. 11	工信部	全国	《人形机器人创新发展指导意见》	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，重塑全球产业发展格局。发展目标指出，到 2025 年，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，培育 2-3 家具有全球影响力的生态型企业和一批专精特新中小企业，打造 2-3 个产业发展集聚区。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。
2023. 06	北京市人民政府	北京市	《北京市机器人产业创新发展行动方案（2023—2025 年）》	1. 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。 2. 采取“公司+联盟”模式，加紧机器人布局；巩固医疗健康、协作、特种、物流四类机器人技术水平和市场竞争力。
2023. 05	深圳市人民政府中共深圳市委	深圳市	《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）》	1. 加强科技研发攻关，聚焦智能机器人、智能网联汽车等领域，开展通用型具身智能机器人的研发和应用，加快组建广东省人形机器人制造业创新中心。 2. 发挥粤港澳大湾区制造业优势，开展人形机器人规模化应用。 3. 打造全域全时场景应用，推动医用、巡查、扫地、生产机器人的应用
2023. 05	上海市人民政府	上海市	《上海市推动制造业高质量发展三年行动计划（2023-2025 年）》	1. 到 2025 年，工业机器人使用密度力争达 360 台/万人。 2. 打造世界级产业集群，加快人形机器人创新发展。 3. 打造智能网联汽车、智能机器人、智能穿戴、虚拟显示等终端品牌。 4. 加快建设智能工厂，新增应用工业机器人不少于 2 万台。
2023. 04	山东省工信厅	山东省	《山东省制造业创新能力提升三年行动计划（2023—2025 年）》	1. 强化产业基础技术攻关，加快突破工业母机、机器人、高端软件等核心领域。 2. 加快布局人形机器人、元宇宙、量子科技、未来网络、碳基半导体、类脑计算、深海极地、基因技术、深海空天开发等前沿领域。
2023. 03	上海市经信委等八部门	上海市	《上海市智能机器人标杆企业与应用场景推荐目录》	力争到 2025 年，本市将打造 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。
2023. 01	工信部等十七部门	全国	《“机器人+”应用行动实施方案》	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。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，打造一批“机器人+”应用标杆企业。
2022. 07	科技部等六部门	全国	《关于加快场景创新 以人工智能高水平应用促进经济高质量发展的指导意见》	1. 制造领域优先探索工业大脑、机器人协助制造、机器视觉工业检测、设备互联管理等智能场景。 2. 物流领域优先探索机器人分流分拣、物料搬运、智能立体仓储以及追溯终端等智能场景。

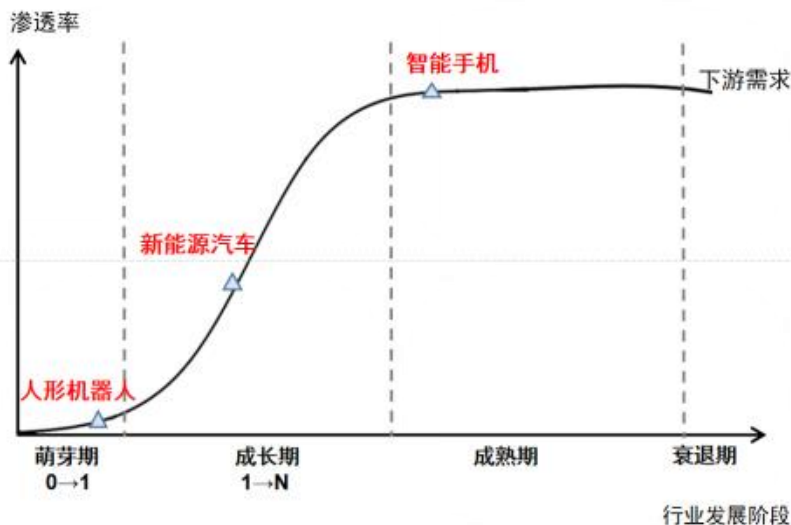
资料来源：各地方政府官网，中国政府网，工信部，国信证券经济研究所整理

二、人形机器人的产业发展阶段与前景

1. 人形机器人产业市场空间

机器人可应用在工业、服务业的不同细分场景中，市场空间广阔。工业机器人可应用于工业生产场景，完成焊接、搬运、装配、质检、分拣等重复性或高精度任务。2024 年全球工业机器人市场规模约 136 亿美元，国内工业机器人市场规模 900 亿元人民币，远期全球市场规模数千亿元人民币。服务机器人中，不同垂直场景下专用机器人市场空间广阔，其中商业服务场景机器人远期上千亿市场规模，家庭服务场景机器人远期数万亿市场规模，特种作业场景机器人远期上千亿市场规模，教育科研场景机器人远期数百亿市场规模。通用机器人以人形机器人为主要形态，参考中国信通院于 2024 年 12 月发布的《人形机器人产业发展研究报告（2024 年）》，当前至 2028 年，人形机器人仍处于发展初期，以科学研究、教育为主要落地场景，整机市场规模为 20 亿至 50 亿元。2028 年到 2035 年，人形机器人以特种场景应用为主，工业场景逐步落地，整机市场规模达到 50 亿至 500 亿元。2035 年到 2040 年，人形机器人在工业场景形成规模，服务场景逐步落地，整机市场规模达到 1000 亿至 3000 亿元。2040 年到 2045 年，人形机器人将实现工业场景和服务场景规模应用，整机市场规模达到 5000 亿至 1 万亿元。

图5：人形机器人：潜在兆亿赛道，当前尚处从“0”到“1”的萌芽期



资料来源：特斯拉第二届人工智能日，国信证券经济研究所整理

2. 人形机器人目前发展阶段及发展路径分析

我们认为通用人形机器人距离量产落地还为时尚早，当前最大的问题在于算法能力欠缺，难以实现跨场景的泛化。但是并不意味着机器人产业没有发展机遇，当前市场衍生出许多适合量产的专用场景机器人（如无人物流车、无人矿卡、环卫机器人、巡检机器人等），在一些固定场景和路线中、操作步骤清晰规范的机器人产品陆续进入市场，成功实现商业化落地。

未来机器人行业预计将遵循“专用场景—跨专用场景—通用场景”的路径逐步实现落地，也将产生多种机器人形态。人形机器人预计将在B端专用场景首先落地应用，借此采集数据、训练模型，随后将逐渐在多个专用场景进行小范围的跨场景应用，最后向C端通用场景升级。在此过程中，不同场景对机器人形态的需求不同，轮式人形机器人、半身足式人形机器人、全人形机器人甚至非人形机器人等多种形态有望共存。

图6：机器人产业发展路径

	2021-2024	2025-2030	2031-2035	2036-以后
应用场景	科研、教育、工业	B端场景最先落地，如工业、服务业	向家庭场景过渡	家庭场景逐渐普及
核心功能	预先编程的固定任务执行	单任务，特定场景	单任务，多场景 多任务，专用场景	多任务，通用场景
典型产品	工业机器人、协作机器人、AGV等	不同形态的机器人出现	多种形态机器人共存，向人形渗透	多种形态机器人共存，人形为通用场景主流形态

资料来源：亿欧智库，国信证券经济研究所整理

2.1 专用场景

未来 5 年，预计不同形态的机器人将会量产适用于各行各业的规范化场景，尤其是 3D（Dull 枯燥/Dangerous 危险/Dirty 肮脏）工作场景将会有专用机器人进行替代。举例而言，司机（物流车、出租车、矿卡）、保安（安防巡检）、工人（工厂搬运、组装、焊接等多工序）、环卫清洁、酒店服务、零售等场景都对应专用机器人可以发展。

以自动驾驶衍生出的专用机器人为例，随着高阶自动驾驶技术的加速推进、自动驾驶硬件成本的不断降低，部分厂商依托自动驾驶技术，针对垂直场景开发出专用机器人产品，如无人出租车（Robotaxi）、无人矿卡（Robotruck）、物流机器人（Robovan）、环卫机器人（Robosweeper），实现了对不同垂直场景下司机、环卫工人工作的有效替代，是专用场景机器人商业化落地的成功范例。

无人出租车（Robotaxi）：在出租车场景中，当前国内网约车及出租车保有量级在 400 万至 500 万辆，按照 5 年折旧年限计算，年均 Robotaxi 对出租车的替代空间约 100 万辆，按 20 万元/台的价格测算得到 Robotaxi 约存在 2000 亿市场空间，当前渗透率低于 0.5%，空间广阔。自动驾驶技术的突破使得无人出租车能够实现对人流的效率提升与劳动力替代，相比传统出租车有更高的单位经济效益和盈利能力。目前 Robotaxi 的部署多集中于特定区域，是典型的专用场景机器人。在技术进步、政策支持和硬件成本下降的推动下，随着国内更多城市开放试点，以及自动驾驶技术的不断完善，预计 Robotaxi 将在未来两三年内进入快速增长周期。

图7：无人出租车（Robotaxi）产品



资料来源：各公司官网，国信证券经济研究所整理

无人矿卡（Robotruck）：在矿区物流领域，当前露天煤矿矿卡保有量约 3 万辆，预计 Robotruck 对矿卡的替代空间约为年化 1 万至 1.5 万辆，以 150 万元每台的价格进行测算，Robotruck 约拥有 200 亿市场空间，当前渗透率为 7%，市场空间广阔。矿区的道路信息相对简单、封闭、低速，场景专业化。当前，无人矿卡正从示范验证走向小规模部署的关键跃升期，即将步入规模化商用阶段。未来在自动驾驶算法的进步和政策的持续支持下，Robotruck 有望从特定区域下的无人矿卡向开放道路的无人矿卡发展。

图8：无人矿卡（Robotruck）产品

易控智驾Robotruck产品



中科慧拓Robotruck产品



踏歌智行Robotruck产品



资料来源：各公司官网，国信证券经济研究所整理

物流机器人（Robovan）：在物流领域，当前国内传统配送车保有量级在 1000 万辆以上，预计 Robovan 对配送轻卡、微卡的替代量约为年化 400 万至 500 万辆，以 10 万元/辆的价格进行测算，Robovan 约存在 4000 亿至 5000 亿市场，当前渗透率为 1%。物流机器人本质上是 AI 在配送场景对物流效率的提升与劳动力替代。基于自动驾驶技术和政策支持，Robovan 率先在城市内部实现商业化。无人配送车一般为低速无人驾驶车辆，应用于最后五公里的配送，包括快递、轮胎、医药、生鲜等配送场景。2025 年有望成为无人物流车快速规模化落地元年，已形成“技术降本-场景验证-规模扩张”的正向循环。未来在国内城市牌照逐步放开、自动驾驶技术实现突破的背景下，Robovan 在物流专用场景中有望得到广泛应用。

图9：物流机器人（Robovan）

新石器Robovan产品



白犀牛Robovan产品



九识智能Robovan产品



资料来源：各公司官网，国信证券经济研究所整理

环卫机器人（Robosweeper）：在环卫清扫领域，当前国内市容环卫专用车保有量约 60 万辆，环卫机器人对环卫专用车的年化替代量约为 10 万辆，以 30 万元每辆的价格进行测算，得到 Robosweeper 存在约 300 亿潜在市场，当前渗透率为 2%。自动驾驶环卫车主要是在城市清扫场景中对人力进行替代，能够显著降低人力成本，提升清扫效率和作业安全性，尤其在夜间和恶劣天气条件下优势更为明显。目前自动驾驶环卫车已在部分城市的公园、园区、城市开放道路等多种场景实现规模化部署，随着试点城市逐渐增多、自动驾驶技术不断发展，预计 Robosweeper 商业化落地进程加快。

图10：环卫机器人（Robosweeper）



资料来源：各公司官网，国信证券经济研究所整理

2.2 跨专用场景

目前尚未出现跨专用场景机器人品类量产，我们预计，在 5-10 年的时间维度下，当单一专用场景下的技术成熟度达到阈值后，多场景复用的经济性需求将驱动专用机器人向小范围通用机器人跃迁。这一阶段机器人需要突破多模态感知融合和任务迁移学习等技术，机器人能够在有限的不同场景中完成任务。在机器人的形态方面，预计在跨场景应用中，机器人形态将会根据不同场景进行优化，在专用场景下形态相似的机器人会率先实现跨场景应用，例如同样受到自动驾驶技术驱动且形态均为汽车的无人物流、无人出租等。

2.3 通用场景

全人形机器人将是通用场景机器人的理想形态，能够针对不同场景完成非结构化任务，实现通用智能。人形机器人需要具备物理世界推理能力和长周期任务规划能力，主要依赖于物理大模型的深度训练。预计在 10 年以后甚至更长的时间维度下，通用人形机器人有机会规模化应用。

与汽车智能化的技术演进过程类似，机器人产业预计也将经历从 L0 无智能机器人到 L5 通用人形机器人的发展路径。当前机器人产业正处于 L1 预编程机器人到 L2 专用场景机器人过渡的过程中，未来随着通用性程度不断提高，机器人有望向跨专用场景、通用场景升级。

图11：机器人与汽车智能化发展路径类比



资料来源：国家市场监督管理总局，中国国家标准化管理委员会，工信部，国信证券经济研究所整理与绘

制

3. 人形机器人技术演进路径

机器人产业经历了从单一功能的自动化设备向具备感知、决策和执行能力的智能系统的技术演进。当前，机器人产业中，工业机器人和专用场景机器人的核心技术已经得到突破。人形机器人作为“制造业上的皇冠”，其最终目的是实现通用智能、产业落地，仍存在一系列核心技术尚需突破，机器人产业的核心技术演进主要体现在人形机器人技术上。据前所述，人形机器人的技术架构可分为硬件、软件两部分。硬件方面，人形机器人本体结构设计则经历了从刚性结构向柔性、轻量化、模块化方向的发展。软件方面，人形机器人的大小脑技术经历了从基于简单规则驱动向基于学习的大模型驱动的重大转变，技术架构上从分层模型向端到端大模型演进。早期人形机器人主要采用基于规则的决策系统，结构简单、执行高效，但缺乏灵活性和适应性，难以应对复杂多变的环境。随着 AI 大模型、机器学习技术的突破，大模型技术开始与人形机器人深度融合，形成了以大模型为核心的智能决策系统，通过模仿学习、强化学习的训练方式不断提高模型智能化程度。

3.1 “大脑”

“大脑”方面，现阶段主要有 4 条技术路线。一是 LLM（大型语言模型）+VFM（视觉基础模型），实现人机语言交互、任务理解、推理规划，技术相对成熟。二是 VLM（视觉-语言模型），弥合语言与视觉理解间的差距，实现更准确的任务规划和决策。三是 VLA（视觉-语言-动作模型），在 VLM 基础上增加运动控制，解决机器人运动轨迹决策问题。四是多模态大模型与世界模型，实现对物理世界环境的全面感知，是人形机器人大模型未来的主要演进迭代方向。多模态大模型引入了视频、音频、肢体、表情和生理信号等多模态，可以分析更丰富的传感器输入并进行信息融合，使得人形机器人能够更加准确地感知环境、解决更复杂的任务。而世界模型是用于描述、理解、预测外部环境状态变化的抽象模型，弥补了多模态大模型所缺乏的对物理空间的建模能力，从而支持机器人的复杂场景泛化与实时决策。

3.2 “小脑”

“小脑”方面，核心技术正在从基于模型的控制方法向基于学习的控制方法演进。基于模型的控制方法是通过建立机器人的运动学和动力学模型，进行运动轨迹规划和平衡控制，特点是身体控制稳健，但步频较慢，代表算法有零力矩点（ZMP）算法、线性倒立摆（LIP）算法、模型预测控制（MPC）算法、中心引力优化（CF0）算法等，整体开发较为复杂，成本高，不利于产品快速迭代。基于学习的控制方法则是使用端到端 AI 技术代替复杂的运动学模型，大幅度降低开发难度、提升迭代速度，包括模仿学习和强化学习。模仿学习是通过人类或专家提供反馈示教的方式，使机器人以产生与示教相似的行动策略进行学习，其效果依赖高质量示范数据。而强化学习则是机器人自主学习的方式，通过精心设计学习目标，机器人不断在环境中探索，逐渐发现最大化奖励，从而学习到最优的执行策略，效果依赖于仿真环境和奖励函数。

3.3 “肢体”

“肢体”方面，未来核心的演进方向为降低成本、提高性能、轻量化三方面。降低成本方面，人形机器人核心零部件成本高，一方面是由于人形机器人产品仍未起量导致上游零部件并未进行批量化生产，另一方面则是技术原理、加工工艺、

设备等方面仍需要突破。例如，在人形机器人核心零部件中，精密丝杠将向低成本、高效率加工工艺方向演进，力传感器则将向量产工艺、弹性体创新、算法迭代等方向演进。提高性能方面，人形机器人硬件当前能够实现基本功能（如行走、抓取、感知环境）。未来硬件的性能仍然需要进一步提高。例如，六维力传感器未来预计向高精度、高稳定性的方向发展，而精密减速器未来预计将向高寿命、低杂质材料等方向演进。轻量化方面，人形机器人目前仍存在能耗高、续航短等问题，轻量化提高人形机器人的续航、灵活度、散热能力，未来技术将向结构优化（集成化设计、去冗余设计）、新型零部件（采用高功率密度的新型电机）、材料创新（采用铝合金、镁合金、高性能工程塑料替换机器人外壳或零部件）等路径演进。

4. 人形机器人行业发展的挑战和机遇

4.1 人形机器人行业发展的挑战

通用型人形机器人在软件、硬件、软硬系统集成、测试标准和规范等方面依然存在问题，制约其智能化、商业化进程。

1、软件的挑战

人形机器人硬件性能已达基础门槛，软件成为通用型人形机器人智能化的最大瓶颈，主要体现在：1）当前算法基础下机器人跨场景泛化能力较弱；2）用于训练的高质量物理数据集匮乏；3）物理感知缺失等核心问题。

（1）大脑泛化能力较弱，通用场景依然较难应用

人形机器人跨场景泛化能力是指其基于大模型或具身智能系统，在未经专门训练的新任务、新物体、新场景或新指令下，仍能理解意图、推理决策并可靠执行的能力。人形机器人最理想化的应用场景是通用场景，即无论场景如何变化，人形机器人都能够完成场景中的非结构化任务。现阶段大部分人形机器人的能力展示都建立在预设场景的精确控制之上，跨场景泛化能力依然较弱，导致在通用场景的应用仍存在瓶颈。通用型人形机器人需要在多样、动态的环境中完成任务，但环境、任务超出先前训练范围时，人形机器人难以将已学到的知识和技能进行迁移、复用，导致任务完成率降低。例如，在汽车工厂中，人形机器人虽能完成预设的搬运任务，但若是传送带速度变化或零件位置偏移时，失误率便急剧上升。以特斯拉 Optimus 为例，2024 年在工厂的实训数据显示，在预设货架位置、固定零件型号的结构化环境中，人形机器人任务完成率达 91%；但在多型号零件随机出现的非结构化生产场景中，任务完成率骤降至 27%。机器人在未经训练的新场景、新任务中自主决策执行能力不足，反映跨场景泛化能力是实现通用型人形机器人的卡点。

（2）用于人形机器人训练的高质量数据集获取难

用于人形机器人训练的数据缺乏是人形机器人跨场景泛化性不足的重要底层原因之一，制约了其通用智能化的实现。当前的机器人“大小脑”模型需要基于多模态物理交互数据（如传感器信号、动作轨迹、环境感知信息）进行深度学习训练，这一过程需要大量、优质、多样的物理数据。获取人形机器人训练数据的主要方式有真实本体数据采集（真机数据）、虚拟本体数据采集（仿真数据）、合成数据、人体的数据集。但是，当前可部署的人形机器人数量少，难以获取高质量的真实物理世界数据；而高保真世界模型的构建、训练和优化也仍处于发展初级阶段，也难以为人形机器人提供高质量的仿真数据。现阶段人形机器人数据集多基于厂商自采集，存在“数据差异大”“单个厂商积累数据有限”的问题，且大规模真机数据采集需投入大量人力物力，物理世界的复杂性也导致数据完整性不足。特

斯拉为训练 Optimus 机器人，高薪聘请操作员穿戴动作捕捉设备进行数据采集，时薪最高达 48 美元，且需“三班倒”24 小时不间断收集数据，凸显数据获取已成为制约人形机器人学习和适应能力提升的关键瓶颈。

（3）物理感知与场景理解能力缺乏

人形机器人高精度环境感知与场景理解的技术是实现具身智能与物理世界进行交互、完成通用性任务等功能的核心基础，通过理解并识别出环境中的物体、场景及它们之间的关系做出合理的决策和行动。这一技术涵盖多个关键领域包括传感器技术、算法处理、硬件支持等，但目前关键领域的能力不足导致人形机器人对于物理世界的感知和场景理解仍存在缺失，主要体现在以下几个方面。一是触觉感知较为初级，环境感知需要人形机器人集成多种传感器，如视觉、听觉、触觉、嗅觉等，从而实现对环境高精度、全方位的感知。触觉是人形机器人与物理世界进行互动，真正“改变世界”的重要功能模块。尽管当前已有部分人形机器人采用了触觉传感器，其技术指标也已达到人类皮肤灵敏度级别，但人形机器人以往训练的数据源主要是网络文本或视频，极度缺乏触觉数据，如何让人形机器人大脑理解触觉与动作的关联仍是待解难题。二是多模态数据的融合和场景理解能力仍不足。人类在观察、改变世界时往往会进行视觉、听觉、嗅觉、触觉等多种模态的感知，人形机器人亦是如此，多种模态的融合感知提升了机器人对环境信息的感知和处理能力，使其能够更准确地判断环境中的情况。但是不同传感器的数据形式和结构上存在不同，多模态感知数据的融合速度、准确度依然较低，同时目前的融合以图像、文本和语音为主，对于感知信息的运用局限于一类信息解决一类问题，缺乏对多模态信息的有效融合与综合运用。人形机器人依然无法像人类一样对世界形成多种感官上的完整认知，这限制了人形机器人在人类生活环境中灵活处理各类复杂问题的能力。

2、硬件的挑战

当前人形机器人的硬件存在技术迭代尚未收敛、零部件性能尚需提高、零部件成本较高等问题，商业化落地进展较缓慢。

（1）技术迭代尚未收敛，零部件性能尚需提高

当前人形机器人产业仍处于技术路径未收敛阶段，整机方案尚未标准化，硬件性能距与理想状态存在显著差距。一是人形机器人整机尚未具备通用能力，方案也并未成熟。人形机器人整机制造业正处于产业化发展的初期阶段，各类人形机器人整体解决方案正持续迭代与创新，同时面临技术基础仍待加强、制造成本仍需显著降低、场景验证困难等难题。核心是人形机器人整机能力尚需提升，人形机器人动态环境适应性弱如复杂地形易步态失衡反映小脑尚未成熟，尚未能够进行跨场景、多任务协同反映大脑泛化能力不足。人形机器人整机能力不足和技术迭代尚未收敛是当前商业化落地的首要卡点。二是零部件性能尚需提高。当前人形机器人硬件仅能满足基本需求，部分零部件距离理想性能仍有差距。一方面，国产产品与海外龙头品牌产品仍有差距，使得零部件成本依然居高不下，如国产谐波减速器材料的杂质相比国外材料杂质更多，产品寿命、负载力仍不及海外龙头品牌产品。另一方面，部分零部件仍无法在较低成本下实现较高的性能，如压阻式触觉传感器虽然价格较低，但仅能检测垂直力，无法检测摩擦力，而高性能的光学式触觉传感器则价格高昂。

（2）零部件成本较高

通用型人形机器人的终极目标是进入 C 端家庭场景，当前高昂的价格使得 C 端消费者难以承受，阻碍其商业化进程。经过测算，使用国产替代零件的情况下，人形

机器人当前 BOM 成本依然需要 20 万元左右，丝杠、减速器、力传感器等核心零部件单价高，使得人形机器人距离大规模家庭场景的商业化落地仍然较为遥远。一方面，人形机器人整机尚处于发展早期还未达到大规模量产的阶段，相关零部件产业链仅小批量供应无法通过批量化生产降本。另一方面，人形机器人核心零部件缺乏统一的技术标准，定制化生产成本较高。

3、软硬系统集成能力

人形机器人产业链长、零部件种类繁多、需要高强度紧凑的机械结构，对软硬系统的集成能力提出高要求。

人形机器人硬件本体由关节模组配套感知系统、结构件等部件构成，其中关节模组是价值量最大、也是实现人形机器人动作的核心单元，其所需零部件种类多、产业链条长，产业链的供应能力和软硬系统的集成能力是人形机器人发展的关键。以关节模组为例：

（1）种类多

关节模组主要分为旋转关节、线性关节和灵巧手，包括的主要零部件有无框力矩电机/空心杯电机、谐波减速器/行星减速器、滚柱丝杠/滚珠丝杠、一维力/六维力传感器、编码器、伺服驱动器、轴承、腱绳、电子皮肤等，不同的应用环节上规格和技术要求也不一样。

（2）产业链条长

对于每个零部件，一般产业链都包括：上游从原材料到铸件/锻件等，中游各个零件组装成对应部件，最终再集成为终端产品。以核心零部件电机和减速器为例：电机环节又可以拆分为定子和转子，转子通常采用钕铁硼永磁材料，人形机器人稀土永磁材料也已成为核心卡位环节；减速器环节以谐波减速器为例可以拆分柔轮、钢轮和波发生器。多种类和长产业链条需要国内制造产业链依托于在工业机器人/汽车产业的技术积累，通过已具备的完整供应链体系为人形机器人提供支持。

（3）系统高度集成化要求高

实现人形机器人一体化关节的集成需要克服一系列技术难点，如驱动器等组件的精度和可靠性保证、控制算法的开发和优化、接口的标准化等，还有在保证性能的同时实现关节的小型化和轻量化也是重要的技术发展方向。人形机器人一体化关节模组将不断向轻量化、紧凑化、高性能化、高可靠性、标准化、模块化以及智能化方向发展，对于降低人形机器人生产成本和维修成本，提高可扩展性和可升级性有重要意义，也对软硬系统的集成能力提出高要求。人形机器人涉及软硬件系统结合、多零部件整合、高集成化等要求，即使拥有完善的供应链，实现高可靠性、高稳定性人形机器人产品的落地依然考验整机厂的集成能力。

4、测试标准和规范

当前机器人领域已发布的国际标准均未专门针对人形机器人，产品质量、安全和道德规范等尚未完善。

（1）产品标准

检验检测的标准化能统一评价标准和方法，提高人形机器人的评价准确性和可信度等。关于人形机器人的标准仍处于在研或拟研制状态，人形机器人作为融合人工智能、计算机、机械、电子、控制、信息和传感、仿生等多领域多学科的综合

技术载体，在基础共性、零部件、模块、整机等方面，可通过功能解耦、要素重构、性能重塑等方式，依托机器人领域现有标准，形成面向人形机器人的系列标准。

整机及关键功能部件的第三方评价和认证体系也有待建设，人形机器人整机及零部件通过实施验证及检测认证，有助于提升产品性能和可靠性水平。

（2）安全和道德规范

人形机器人在给人提供便利的同时，也给人类社会带来一定的安全、道德、伦理风险。第一，安全规范，在复杂环境下难以完全保证高度的可靠性，使得人形机器人在一些对安全性要求极高的场景中的应用受到限制，需要对人形机器人建立完善的安全规范和相应的检测标准以确保产品使用的安全性；第二，道德规范，人形机器人在运行过程中会收集大量数据，这些数据涉及用户隐私和企业商业秘密等重要信息，使得用户降低了对人形机器人的信任度，也同样限制其在需要高度信息安全保障场景中的使用。为确保人形机器人的使用不会给人的信息和数据安全造成负面影响，需要制定相关的安全和道德规范保护使用者。第三，伦理规范，人形机器人满足使用者情感需要可能产生虚拟和现实情感混淆的问题。满足情感需要的人形机器人需要制定其适用范围，超出其适用范围的过度使用可能会让人混淆虚拟情感与现实情感，对人形机器人产生错误认识和不合理期望。

4.2 人形机器人行业发展的机遇

1、拉动地方经济与技术发展

（1）技术密集型行业，推动区域创新升级

作为人工智能、机械工程、材料科学等多学科交叉的前沿领域，人形机器人的研发与应用倒逼多维度技术突破。机械工程领域围绕运动控制算法、关节驱动技术实现创新，提升机器人的灵活性与运动精度；材料科学聚焦轻质高强度结构材料、柔性仿生材料研发，满足机器人对重量、耐用性与安全性的要求；人工智能领域在具身智能、人机交互、环境感知等方向持续突破，推动机器人从程序化执行向自主决策演进。这些技术并非孤立发展，而是通过跨领域协同形成联动效应——机械结构优化依赖新材料特性支撑，智能算法迭代需结合运动控制需求，材料创新则需适配人工智能的感知交互场景，最终构建“基础研究-应用开发-场景验证”的技术迭代链条，牵引多学科技术水平整体跃升，推动区域创新能力向更高层级发展。

（2）全产业链条联动效应，为地方经济注入新动能

强化上游核心部件产业：人形机器人产业需要高端伺服电机、高精度传感器等关键零部件。此类产业以往由日本和西欧企业主导。此前我国缺乏有竞争力的下游集成商，因此难以形成产业带动效应。随着人形机器人的发展，领先地区可凭借链主优势或者上游配套产业优势，加强体系标准建设、促进研发技术和人才引进，吸引或培育形成有国际竞争力的产业集群，带动高端精密制造业发展水平，并最终完成自主可控、进而国际市场争取一席之地。

中游整机制造环节：本体制造或集成商可依托先发优势或者更大的竞争优势，建立成本与技术护城河，率先完成研发、装配、质检等多类型岗位的组织协作成熟度，同时拉动上游模具、五金等配套产业协同发展，形成“核心制造+配套服务”的产业集群。从整机设备和后服务市场角度，机器人可以形成万亿体量的市场规模，若孵化机器人总部集群，将为地方经济发展、科技创新、人才引进，乃至城市建设、教育和医疗资源的聚集带来良性发展。

下游应用环节通过激活工业替代、民生服务等场景需求，推动规模以上企业降本增效，促进C端消费市场扩容，催生新商业模式与经济增长点。配套服务层面，检测认证、人才培养、金融支持等生态要素同步发展，进一步完善产业闭环，推动地方经济从传统产业主导向高技术、高附加值产业驱动转型，实现产值、就业与区域竞争力的同步提升。

2、提升应用场景效益

第二产业：赋能企业，节约工厂劳动力、提升自动化率。人形机器人向第二产业渗透，通过“劳动力替代+自动化提效”重塑工厂生产逻辑。在重复劳动与高危作业岗位上（如流水线组装、高温环境操作），机器人可实现24小时连续作业，直接缓解劳动力短缺与人力成本高企的痛点，降低企业用工依赖；同时，凭借精准的动作控制与数据化操作，减少人为失误导致的次品率，提升生产流程的稳定性与标准化水平，推动自动化率从局部环节向全链条延伸。这种转型不仅优化单一环节效率，更倒逼企业重构生产体系，加速与工业互联网、柔性制造技术的融合，推动从“劳动密集型”向“智能驱动型”升级，构建更具韧性与竞争力的现代化工业模式。

第三产业：效率提升，体验升级，重塑第三产业格局。在第三产业中，人形机器人衍生的服务形态通过“效率突破+体验升级”重塑服务逻辑。Robotaxi依托智能调度与路径优化，突破人力驾驶时空限制，实现全天候精准出行服务，降低运营成本的同时提升通行效率；酒店机器人以标准化流程完成迎宾、送物等基础服务，借助柔性交互技术应对个性化需求，减少人力波动对服务质量的影响；养老机器人整合照料、健康监测与情感陪伴功能，替代人工完成24小时陪护，通过数据联动构建“专业照护+家庭协同”闭环；安保机器人凭借多传感器融合技术实现全天候巡逻，主动识别隐患并联动处置，将安全防护从“被动应对”转为“主动预防”。这些应用既通过减少重复劳动降低人力依赖与成本，又以精准化、个性化、全时化服务创造差异化价值，推动服务业从“人力密集型运营”向“数据驱动的智能服务生态”迭代，在效率提升与体验升级中重塑第三产业格局。

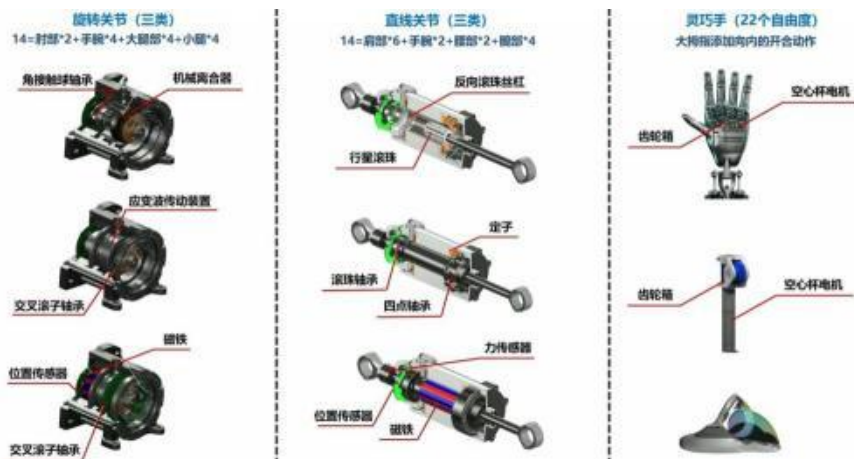
5. 人形机器人发展需要培育的关键产业链

机器人产业的培育需聚焦硬科技突破与软生态构建，上游突破核心零部件卡脖子技术，中游提升本体制造水平与智能化程度，下游拓展场景应用与系统集成能力，共同推动技术突破与产业升级。

5.1 核心零部件与高端设备

一是加快培育人形机器人核心零部件。减速器、丝杠、电机等传动部件作为机器人的“关节”，是机器人实现运动的核心。目前国内高端市场仍依赖进口，例如日本哈默纳科产品占据全球谐波减速器80%以上份额，需重点培育。高性能芯片与算力支撑是机器人训练大小脑模型、实时处理数据的硬件基础。高端算力芯片有受制海外的风险，国内企业需突破高端芯片设计与加工瓶颈，推动国产替代。力传感器、电子皮肤、视觉传感器等各类传感器是机器人感知环境的关键部件。人形机器人需要与物理世界进行频繁高效交互，高精度传感器是实现人形机器人精准感知控制的重要前提。目前力传感器、电子皮肤仍存在技术壁垒，触觉感知、多模态融合感知也较为初级，需加快培育。

图12：人形机器人核心关节拆解



资料来源：特斯拉 AI DAY，国信证券经济研究所整理

二是积极推进精密加工与智能制造设备研发。机器人零部件的制造依赖高精度加工设备，目前国产高精度设备仍较为缺乏。例如，高精度行星滚柱丝杠的加工依赖于高精度的车床和磨床，但国产磨床的加工精度相较国际头部品牌仍有差距，海外磨床价格高、到货周期长，因此亟需培育国产高端设备，推动核心零部件规模化量产。

5.2 大模型算法与高质量数据

一是加快培育人工智能算法大模型。AI 技术是机器人智能化的核心。当前人形机器人“大脑”的自主学习决策、“小脑”的运动控制与动态平衡算法等领域存在明显瓶颈，通用性程度仍不高。二是重点关注高质量数据集构建进展。高质量物理数据集是人形机器人模型训练的基础，当前数据集存在规模小、质量低、成本高等问题，限制人形机器人大模型训练进展，需重点培育。

5.3 多领域应用场景拓展

短期内通用性具身智能落地较为缓慢，可培育下游多场景应用拓展。需鼓励无人驾驶、无人物流、无人清扫等专业化机器人发展，更快实现产业化，同时收集数据、打造品牌。通过开放城市级应用场景试点、设立垂直领域研发补贴、牌照支持等方式支持企业打造专用性具身智能产品，引导企业聚焦细分场景开展技术攻关。

三、人形机器人产业链全景和本体玩家梳理

1. 人形机器人产业链全景图

人形机器人产业链上游包括硬件、软件两部分，中游是人形机器人整机制造，下游则是应用场景，如工业制造、商用服务、家用服务等。

人形机器人产业链上游为核心硬件和软件。与人类躯体进行对照，人形机器人的技术架构可分为“大脑”“小脑”和“肢体”三个部分，其中“大脑”完成人机交互、环境感知、上层规划后发出宏观决策，“小脑”完成身体的平衡和各种运动学力学的控制后，实现路径最优规划、步态控制、平衡控制，发出控制指令来驱动“肢体”的关节和灵巧手完成任务指令。

软件：“大脑”+“小脑”。大脑方面，人形机器人的“大脑”以大模型为核心，承担着类似人类大脑的复杂认知和决策功能，主要功能是人机交互、环境感知、规划决策。人形机器人“大脑”在完成环境感知后，进行高级任务规划和推理分析，并生成逐步决策指令来执行任务。通用大模型、数据集、高效计算架构、多模态融合感知等关键技术为人形机器人“大脑”赋予了强大的学习与适应能力，使得人形机器人能够处理基本运算、图像处理、视觉识别、决策规划和智能决策等各种任务。小脑方面，人形机器人“小脑”是指其运动控制系统，负责整合感官数据并控制姿势和动作，是“大脑”和“肢体”之间的桥梁，在复杂条件下将预定的控制方案、规划指令转变成期望的机械运动，实现机械运动精确的位置控制、速度控制、加速度控制、力控制，从而提高人形机器人动作的精确性和灵活性。

硬件：“肢体”。“肢体”是人形机器人实现所有拟人功能的载体和基础，分为感知系统、决策系统、执行系统三部分。感知系统包括触觉传感器、力（力矩）传感器、惯性传感器、视觉传感器、编码器等各类传感器。决策系统主要是处理器芯片，主流解决方案是技术路线最成熟的 CPU+GPU 方案。执行系统则以各类电机作为动力输出机构，主要包括旋转执行机构、线性执行机构、末端执行机构三类。旋转执行机构是实现旋转运动的关键部件，多用于人形机器人关节处，如手腕、膝关节，主要由电机和减速器组成。线性执行机构多安装于机器人上臂、大腿及肘部，实现伸展、推拉等直线运动，可理解为旋转执行器的线性转换。末端执行机构可分为爪手类和工具类，爪手类从各类夹持器逐步向多指灵巧手演进。

图13：人形机器人硬件拆解



资料来源：特斯拉 AI DAY，国信证券经济研究所整理

人形机器人产业链中游为本体生产制造厂商。当下人形机器人本体的生产制造呈现百花齐放的特征。众多科技厂商涌入人形机器人赛道，不局限于机器人本体公司（智元、宇树、众擎、Figure AI 等），车企（特斯拉、比亚迪、小鹏、理想等），科技互联网（华为、小米、英伟达、腾讯等）等行业跨界主体也凭借自身在技术、市场、供应链优势布局人形机器人。而国家和地方政府不仅通过政策支持、资本注入等方式助推人形机器人产业发展，还通过建设地方人形机器人创新中心，来打造基础创新平台和产业集群，构建和打造产业集群，形成技术生态。

人形机器人产业链下游为应用场景。人形机器人下游应用场景包括工业制造、物流运输、酒店接待、智慧导览、军事战斗、极限救援、医疗康养、家庭服务等场景，涵盖 ToB、ToG、ToC 等众多领域，应用空间广阔。

图14: 人形机器人产业链



资料来源: 亿欧智库, 国信证券经济研究所整理

2. 人形机器人本体公司梳理

当下人形机器人本体厂商呈现百花齐放、进展加速的特征。众多科技厂商涌入人形机器人赛道，不局限于机器人本体公司（智元、宇树、众擎、Figure AI 等），还包括车企（特斯拉、比亚迪、小鹏、理想等），科技互联网（华为、小米、英伟达等）等行业跨界主体也凭借自身在技术、市场、供应链优势布局人形机器人。而国家和地方政府不仅通过政策支持、资本注入等方式助推人形机器人产业发展，还通过建设地方人形机器人创新中心，来打造基础创新平台和产业集群，构建和打造产业集群，形成技术生态。

图15: 人形机器人主要厂商情况



资料来源：各公司官网，国信证券经济研究所整理

表2: 人形机器人公司主流产品情况

公司	产品	身高 (cm)	图示	体重 (kg)	全身自由度	双手	传动方案	负载	商业化落地	售价
T	Optimus	172		57	52 个（脖颈 2+ 躯干 28+手 22）	单手 22 个自由度	大关节 14 丝杠+14 减速器+手部采用丝杠等	约 20kg	预计初期在超级工厂工作	大批量产后 最终售价 2-3 万美元
	01	150		60	-	单手 6 自由度	旋转关节	约 20kg	-	-
Figure	02	170		70	-	单手 16 自由度	旋转关节	约 25kg	已出货宝马工厂，另外已出货送往第二个客户；公司一代产线拥有 1.2 万台/年产能，计划 4 年内扩展至 10 万台），25.07，Figure 将 7 月至 9 月期间生产的人形机器人数量增加约 3 倍	-
	03	173		61	-	-	旋转关节	约 20kg	成本较上一代便宜 93%	-
	远征 A1	175		55	49 个	有五指灵巧手（12 主自由度，5 被动自由度）	预计大关节采用减速器	整机承重 80kg，单臂最大负载 5kg	暂未披露商业化对象，暂时出席会展/表演	目标成本 < 20w 人民币
	远征 A2	169		69	40+个	有五指灵巧手	预计大关节采用减速器	-	截至 25.01，与灵犀 X1 合计产量 731 台。25.07，智元机器人在中移（杭州）信息技术有限公司 2025 年至 2027 年人形双足机器人代工服务采购项目中中标。中标产品全尺寸人形双足机器人，预算为 7800 万元（含税），最终选人为智元机器人	-
智元	远征 A2-Max	175		85	67 个（53 主自由度）	19 自由度（12 主自由度，5 被动自由度）工业级灵巧手	双臂采用双速比减速器模组，峰值扭矩可达 450Nm，大腿采用直线推杆电机；腿部关节拥有 8800N 推力；	全工作空间可搬运 40kg 重物	截至 25.01，与远征 A2 合计产量 731 台	-
	远征 A2-W	165		230	单臂 7 自由度	-	仿生 7 自由度双臂	单臂负载：5kg	截至 25.01，与远征 A2-D 合计产量 269 台	-
	远征 A3	173		55	-	-	-	-	-	-
	灵犀 X1	130		≤33	31/41 个（可扩展）	夹爪	预计大关节采用减速器	≥0.5kg	-	-
	灵犀 X2	-		33.8	28 个	夹爪	预计大关节采用减速器	-	-	-
	H1	180		47	19 个（手 8+腰 1+腿 10）	灵巧手选配	预计大关节采用减速器方案	-	2023 年 10 月完成首批商业化小批量交付；春晚表演；京东预售	65 万人民币
宇树	G1	130		35	23 个（手臂 10+腿 12+腰 1）	3 指力控灵巧手	预计大关节采用减速器方案	手臂最大负载 2kg	京东预售。25.07，宇树科技在中移（杭州）信息技术有限公司 2025 年至 2027 年人形双足机器人代工服务采购项目中中标。中标产品为小尺寸人形双足机器人、算力背包、五指灵巧手，预算为 4605 万元（含税）	9.9 万人民币起
	R1	121		25	26 个（手臂 10+腿 12+腰 2+头 2）	灵巧手选配	预计大关节采用减速器方案	手臂最大负载 2kg	-	3.99 万元起

	H2	182		70	31 个 (手臂 14+ 腿 12+腰 3+头 2)	灵巧手选配	预计大关节采用减速器 方案	峰值约 15kg	-	-
小鹏	Iron	178		70	62 个 (手 15)	有五指灵巧手	配备新一代直线执行器 和新一代微型手指关节	-	进入工厂工作，率先聚焦工厂、门店等 场景；计划于 2026 年实现 L3 初阶能力 的量产	-
小米	CyberOne	177		52	21 个 (臂 10+颈 1+腿 10)	无十指	未披露	单手垂直抓 握 1.5kg	-	-
	GR-1	165		55	40 个	6 个自由度	预计大关节采用减速器	-	在迎宾接待、科研教育、工业制造、康 复医疗等场景的实验性应用	-
傅利叶	GR-2	175		63	53 个	12 个自由度	预计大关节采用减速器	单臂运动负 载 3kg	在迎宾接待、科研教育、工业制造、康 复医疗等场景的实验性应用	-
	N1	130		38	23 个	-	-	-	-	-
	Walker X	130		63	41 个 (臂 12+颈 3+腿 14+手 12)	有五指灵巧手	预计大关节采用减速器	伸展状态单 臂 1.5kg	商演、智慧工厂等	-
	Walker S	170		65	41 个	有五指灵巧手	预计大关节采用减速器	-	比亚迪、极氪等工厂实训，工业场景落 地	-
优必选	Walker S1	172		76	-	有五指灵巧手	预计大关节采用减速器	负载 15kg 行走	比亚迪、极氪等工厂实训，工业场景落 地	-
	Walker S2	176		70	52 个	有五指灵巧手	预计大关节采用减速器	单手抓握 7.5kg, 指尖 1kg	3 分钟换电，7*24 小时连续工作	-
	天工行者	170		-	20 个	可装备五指灵 巧手	预计大关节采用减速器	-	已开放预订，并将于第二季度开始交付	售价为 29.9 万元
	SE01	170		55	32 个 (腿 12, 臂 8, 灵巧手 12)	有五指灵巧手	行星+谐波 (自研行星准 直驱关节、谐波力控关节 和滚珠丝杠直线关节)	-	商演、特警巡逻等	计划将售价 控制 15-20 万人民币
众擎	PM01	138		40	23 个 (腿 12, 臂 10, 腰 1)	可选配	全行星关节	-	2025Q2 开启第一批交付	PM01 教育版 18.8 万元, PM01 商业版 8.8 万元
	T800	173		75~85	29 个 (臂 14, 腿 12, 颈 2, 腰 1)	单手 7 自由度	-	单手负载 5kg	-	18 万元
开普勒	先行者 K2	175		83	52 个	单手 11 自由 度 (6 空心杯 电机)	14 旋转型执行器+14 行星 滚柱丝杠执行器	2025 年 3 月开普勒视频表示 K2 已开始 流水线搬货工作，计划 6 月底开启预 定，与伟创电气、柯力传感、兆丰股份、 汉威科技、乔锋智能等开展合作	-	-
银河通 用	G1	173		85	-	-	双臂+单腿+轮式底盘	末端负载 5kg	已与美团签署战略合作协议，双方将在 线下零售、智慧货仓、智慧物流等多个 领域开展深度合作	-
星动纪 元	STAR1	171		63	55 个	12 全主动自由 度 (其中拇指 和食指各 3, 其他三指各 2)	自研一体化关节，集电 机、行星减速器、编码器、 驱动器一体	单手最大 80N、25Kg 负载	穿越戈壁、草坪、石子路等多种复杂地 形，奔跑速度 3.6m/s，打破人形机器 人奔跑速度纪录；成为首个能熟练使用 筷子的人形机器人。2025 年已累计交 付超 200 台产品，另有上百个订单在量 产交付中	-
	L7	171		65	55 个	有五指灵巧 手，12 自由度	自研关节模组	20kg 双臂 负重	-	-

越疆机器人	Dobot Atom	153	62	41 个, 7 自由度 工业级仿生协作臂	五指灵巧手	预计采用旋转关节方案	-	将于 2025 年年中试产和批量生产	售价 19.9 万元起
逐际动力	CL	-	-	-	-	预计采用旋转关节方案	-	完成全球多个国家和地区的产品交付, 初步实现了产品的设计、研发、量产和销售的商业化闭环。	-
	LimX Luna	160	-	27 个	-	-	-	-	-
松延动力	N2	120	29	18 个	球手/五指灵巧手	预计采用旋转关节方案	-	现货, 预计 2-3 周交付	3.99 万元起
	E1	136	35	21-27 个	五指灵巧手 (可选配)	预计采用旋转关节方案	-	预售, 预计 8 月启动交付	3.99 万元起

资料来源: 高工机器人, 各公司官网, 焉知新能源汽车, 高工机器人, 中国机器人网, 国信证券经济研究所整理

2.1 机器人本体: 运动控制能力领先, 本体研发经验丰富

除车企和科技互联网公司成熟企业以外, 人形机器人领域也涌入大批优质创业企业和机器人本体企业, 这类玩家本体研发经验丰富, 产品迭代迅速, 运动控制能力强, 同时部分玩家也具备领先的 AI 模型能力。

■ Figure AI

Figure 成立于 2022 年, 2023 年推出首款产品 01。2023 年 7 月 Figure 获英特尔资本 900 万美元融资, 2024 年 2 月 Figure 获来自微软、英伟达、OpenAI 及亚马逊创始人贝佐斯等约 6.8 亿美元融资; 最初借助 OpenAI、亚马逊、微软、英伟达等行业巨头的资源加持以及自身的研发能力, Figure 跻身人形机器人头部玩家。

图16: Figure 01 使用咖啡机冲咖啡



资料来源: Figure 官网, 国信证券经济研究所整理

图17: Figure 02 人形机器人



资料来源: Figure 官网, 国信证券经济研究所整理

- 2023 年 10 月人形机器人 Figure 01 正式发布, 能够平稳流畅地行走; 2024 年 1 月, 发布 Figure 01 通过系统观察人类的演示视频, 学会使用咖啡机冲咖啡。Figure 采用端到端神经网络训练, 具有巨大的可扩展和适应潜力。
- 2024 年 8 月 Figure 发布 Figure 02, 其在结构、AI、感知、电池、灵巧手等均有升级: 采用 6 个高性能摄像头+AI 驱动的视觉系统感知, 内置电池组升级成 2.25KWh, 将原有的 5 小时运行时长延长 50%以上; 灵巧手拥有 16 个自由度; Figure 为其定制电机, 与关节传动系统集成, 实现关节的功率和性能的优化; 采用外骨骼结构, 提升结构刚度。
- 2025 年 10 月, Figure 发布最新款机器人 Figure03 机器人, 成本较上一代便

宜 93%。

在大模型方面，Figure 最初与 OpenAI 在大模型上开展合作，2025 年 2 月 Figure 与 OpenAI 终止合作。最初二者合作：1) 内置麦克风和扬声器连接自定义 AI 模型实现端到端语音交互，可与人类流畅对话；2) Figure 02 头部、前躯干和后躯干共配备 6 个 RGB 摄像头，驱动其 AI 视觉模型，通过摄像头，完成视觉推理。视觉模型可处理图像以进行感知、避障、手眼协调；Figure 02 相对 01 代产品计算和 AI 推理能力提高 3 倍。5 月 Figure 宣布通过 Helix 模型实现“视觉-语言-动作”闭环，70 亿参数多模态“大脑”与 8000 万参数“小脑”协同，提升泛化能力。

终止合作 Open AI，发布端到端的视觉-语言-动作模型。Figure AI 推出 Helix 模型，采用端到端视觉-语言-动作模型（VLA）融合视觉运动控制策略的“双系统”创新设计，将 7-9Hz 频率处理的场景理解和认知决策与 200Hz 的视觉运动控制分离协同，旨在让机器人无需针对物体进行专门训练，即可处理不同物体；2 月 Figure 更新实测视频，机器人在高速包裹物流的环境下进行包裹分拣。Figure 将 Helix 视觉运动策略架构改进，利用立体视觉主干和多尺度特征提取网络来捕捉丰富空间层次结构，将两个摄像头的特征合并到多尺度立体网络中，然后进行标记，从而保持输入到交叉注意力转换器的视觉标记总数不变，并避免计算开销，不再单独从每个摄像头输入图像特征标记。

图18: Helix 视觉运动策略的架构改进



资料来源：Figure AI 官网，国信证券经济研究所整理

图19: Figure 机器人采用视觉-语言-动作模型（VLA）



资料来源：Figure AI 官网，国信证券经济研究所整理

图20: Figure 机器人物流工作



资料来源：Figure AI 官网，国信证券经济研究所整理

在交付方面，2024 年 1 月份 Figure 与宝马签约，7 月 Figure 01 在宝马工厂部署视频更新，AI 驱动的视觉模型使其实现自主运作，视频中 Figure01 将金属板精确地放在指定位置上（误差不超 3 厘米），并可实现自主纠正操作错误；2024 年

12月CEO宣布，正式向客户交付Figure 02，目前已经在仓库与工厂中运作；2025年1月Figure宣布签约第二个商业化客户，且是美国最大公司之一。预计四年内为两家客户将产出10万台机器人；2月中旬Figure创始人表示，Figure-02已出货，送往第二个客户；3月12日Figure表示正准备运送数千个人形机器人。4月1日，Figure表示人形机器人在宝马车间完成装配、搬运等工作；5月22日，Figure表示在宝马X3生产线上完成了连续20小时的轮班，已经连续几周实行10小时轮班制。

产能方面，3月16日Figure介绍其最新生产基地BotQ，历经8个月的开发，BotQ的初代产线具备12000台/年产能，且产能还在持续提升。Figure重点专注于内部组装核心技术（执行器、手部、电池、最终组装），公司也已组建成熟供应链团队，从而与外部供应商达成成熟合作。预计未来四年内，将拓展到生产10万台或300万个执行器的水平。2025年7月，Figure宣布将7月至9月期间生产的人形机器人数量增加约3倍，BotQ的初期生产进展顺利。Figure每天能够生产超过350台第三代人形机器人，产速由每天1台提升至每小时1台。

■ 宇树科技

宇树科技的产品线主要包括四足和人形机器人。宇树科技由王兴兴创立于2016年8月，总部浙江杭州，是全球最早实现四足机器人商业化的公司之一。2025年6月，宇树科技完成股改，名称由杭州宇树科技有限公司变为杭州宇树科技股份有限公司。在四足领域推出A1、A2、Laikago、Go1、Go2等产品，2023年7月发布Unitree Go2四足机器人，起售价9997元，11月发布专为工业场景设计的四足机器人——Unitree B2，应用于电力巡检等各类工业、特种救援场景；人形方面研发H1全尺寸人形机器人和G1高自由度高性价比人形机器人。

图21：宇树科技产品矩阵



资料来源：宇树科技官网，国信证券经济研究所整理

全球四足机器人销量龙头企业。据GGII，2023年全球四足机器人销量3.4万台，同比+76.9%，市场规模10.7亿元，同比+43.0%；竞争格局看，主要由内资厂商主导，宇树、蔚蓝智能、云深处等厂商在消费和行业级市场领先，在技术创新、控本和市场适应性方面表现出色；国际企业如波士顿动力、瑞士ANYbotics等，在高端行业级应用领域领先，尤其在技术先进性、产品可靠性和国际渠道具有显著

优势，用于复杂环境的巡检、搜救、科研等领域。据 GGII，2023 年宇树凭借其技术创新和市场开拓等优势，占据全球四足机器人 69.8% 的销量份额。

2023 年人工智能大模型的突破使得人形机器人发展加速，宇树也进军人形机器人行业，在其他形态机器人领域的积累使得宇树有较强的人形本体制造能力：

- 2023 年 8 月，宇树发布首款双足机器人产品 Unitree H1，售价 9 万美元；25 年春晚 16 台 H1 亮相春晚舞台，靠 AI 训练来执行激光 SLAM 定位，全自动定位变队形快速转、抛手绢结构复杂，所涉及技术包含：3D 激光雷达全自动定位与导航、基于视频的舞蹈动作的生成与映射、基于强化学习的全身舞蹈动作、手腕对接变换装置、基于力矩补偿的快速放线算法、欠驱动收线算法、手绢隐藏与释放、足底减震降噪结构等。
- 2024 年 5 月宇树发布 G1，起售价 9.9 万元人民币，相比 H1 价格下降超 80%；G1 拥有 23-43 个关节自由度，力控灵巧手，有 G1 和 G1 EDU 两种型号，后者提供不同模块方案搭配，算力、自由度（43 个）、承载力、手臂负载重量、关节运动空间等方面较优。宇树自研自产 G1 关节模组，共 3 种类别，带双编码器的行星减速器关节模组最大瞬时扭矩 140Nm。2025 年 1 月宇树发布首个人形机器人应用方案 G1-Comp，能在足球场上奔跑、转身、转圈，基于 Yolo 11 网络算法，实现球场环境快速识别，精准定位，续航时间约 2 小时。
- 2025 年 7 月，宇树发布新款机器人 R1，拥有 26 个自由度（腿 6*2，手 5*2，腰 2，头 2），售价 3.99 万元人民币，集成语音和图像多模态大模型。
- 2025 年 10 月，发布人形机器人 H2，售价 19.9 万元。身高约 182cm，体重约 70kg，拥有 31 个自由度（腿 6*2，手臂 7*2，腰 3，头 2），关节扭矩可达 360N.m，拥有仿生人脸，可选配灵巧手。搭载最高 2070 TOPS 算力芯片，可用于部署各类具身智能大模型，赋能多元工作场景。

量产方面，2022 年至 2025 年，宇树人形机器人合计销量 5630 台，2025 年宇树人形机器人出货量 5215 台（纯人形，不含轮式双臂机器人）。

表3: 宇树人形机器人产品

产品型号	产品图片	主要参数	核心特点
H1		身高：约 180cm 体重：约 47kg 最快移动速度：5m/s 单腿自由度：5 单手臂自由度：4	先进的动力系统、稳定的步态、高度灵活的动作能力，在速度、力量、机动性、灵活性等方面均具备较高水平，能够在复杂地形和环境中自主行走和奔跑
G1		身高：约 132cm 体重：约 35kg 单腿自由度：6 单手臂自由度：5-7 腰部自由度：3 单手灵巧手自由度：6-20	超大关节运动角度空间、具备较高的灵活性；AI 加速下的机器人模仿与强化学习；结合力位混合控制，灵敏可靠，可模拟人手实现对物体的精准操作
R1		身高：约 123cm 体重：约 25kg 单腿自由度：6 单手臂自由度：5 腰部自由度：2 头部自由度：2	体态轻盈，运动性能突出，头部双自由度增强环境感知，关节、传感器全开放控制接口，支持主流生态仿真平台
H2		身高：约 182cm 体重：约 70kg 单腿自由度：6 单手臂自由度：7 腰部自由度：3 头部自由度：2	精准复现复杂高动态动作，可用于部署各类具身智能大模型，赋能多元工作场景

G1-D



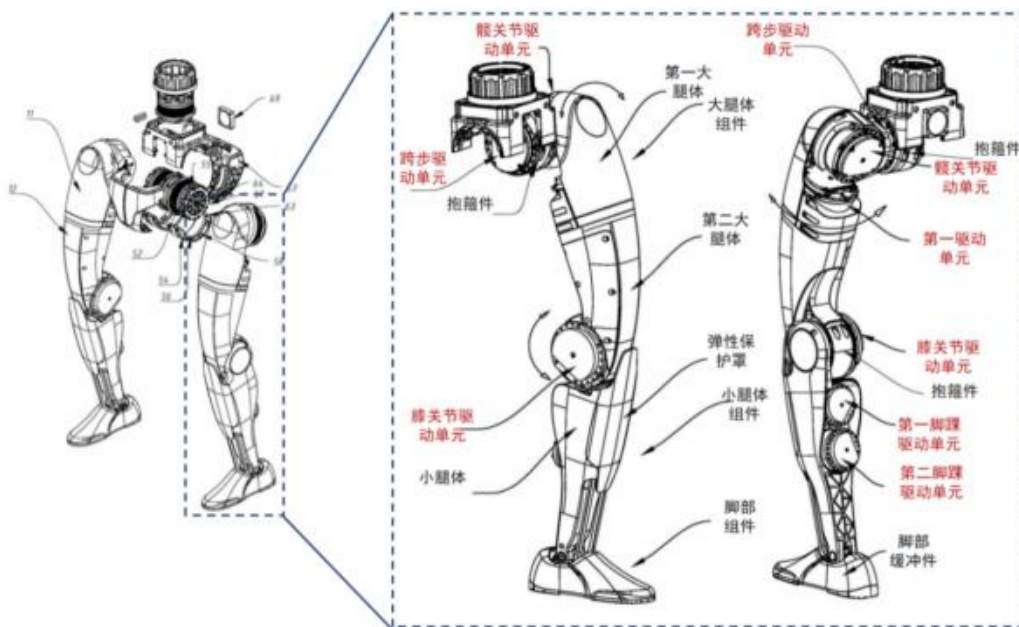
尺寸: 168x50x50cm
体重: 约 50kg
整机自由度: 17
单臂自由度: 7
腰部自由度: 2

在平坦环境中不容易摔倒、能耗降低、高度可调节, 可快速部署在车间等工作场景; 支持从数据处理到模型训练、仿真测评及一键部署的工作要求, 可无缝集成多种主流机器人开源模型框架

资料来源: 公司招股书, 国信证券经济研究所整理

在关节方案选择方面, 根据宇树科技的专利, 宇树人形机器人目前主要采用**驱动电机+减速器的旋转关节方案**。根据宇树专利, 第一大腿杆上部设有髌关节电机及减速器单元, 以驱动第一大腿杆左右摆动进而带动整个腿部动力结构左右摆动。第一大腿杆和第二大腿杆之间有第一电机及减速器单元, 实现第一大腿杆与第二大腿杆相对周向转动; 大腿杆组件与小腿杆组件之间设有膝关节电机及减速器单元, 以驱动大腿和小腿杆组件相对前后摆动; 小腿杆上设有脚踝电机及减速器单元, 输出端设有依次连接的摇臂和连杆, 连杆与脚部支撑件连接, 以带动脚部支撑件作上下、左右方向的摆动。

图22: 宇树人形机器人腿部关节专利



资料来源: 宇树科技专利文件, 国信证券经济研究所整理 注: 图中标红的驱动单元为旋转电机或具有减速器的电机

■ 智元机器人

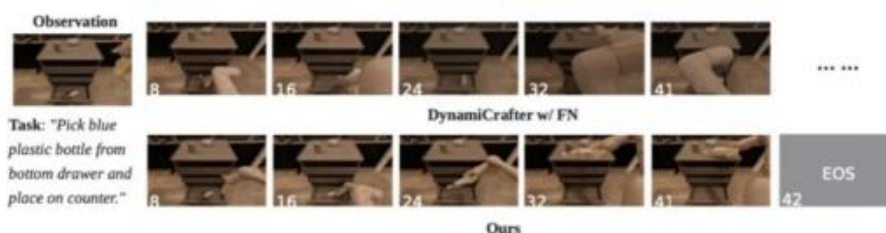
智元机器人成立于 2023 年 2 月, 创始团队包括“稚晖君”彭志辉在内的多位业内资深人士, 背景综合互补, 具有深厚的核心技术背景、产业管理经验和产业资源, 已完成多轮融资。2025 年 7 月, 智元机器人收购上市公司上纬新材 63.62% 股份, 股权交易完成后, 上纬新材控股股东将变更为智元机器人及其管理团队共同持股的主体, 实际控制人将变更为邓泰华, 核心团队包括稚晖君等。

机器人产品方面, 当前产品矩阵覆盖 A2/A2 Ultra/A2-W/A3、X1/X2、G1/G2 以及 D1 系列, 并配套具身智能开发与数据方案。2023 年 8 月智元发布第一代通用型具身智能机器人原型机远征 A1, 2024 年 8 月智元机器人发布“远征”与“灵犀”两大家族共计五款商用机器人新品: 远征 A2、远征 A2-W、远征 A2-Max、灵犀 X1 及灵犀 X1-W。24 年 10 月智元机器人开源智元灵犀 X1 的软硬件全套图纸和代

码，进一步推动技术的共享与进步。25 年 3 月发布搭载情感计算引擎的双足智能交互人形机器人灵犀 X2，具备完善的运动、交互及作业能力。2025 年 6 月 3 日，智元携手百事中国发布品牌首个人形机器人“百事蓝宝”，未来将在百事品牌营销、线下体验、数字社交等场景创造更多价值。

在大模型方面，智元远征 A2 在人机交互、规划决策、运动控制等核心能力储备丰富。人机交互上，A2 基于语音大模型、超拟人合成技术、全双工对话能力、端侧模型部署，实现实时对话；基于多模态大模型，多通道信息处理能力让人机交互更轻松舒适；**规划决策上**，基于语言大模型+RAG (Retrieval-Augmented Generation) 构建企业定制业务知识库，支持精准营销话术、业务咨询与引导、展项讲解，让信息传递更加高效直观。配合 RTMOF (Real-Time Robust Motion Framework) 非线性模型预测控制和强化学习算法，及高效动态规划引擎，能快速生成全局最优轨迹，不断优化运动策略，抗干扰能力强，在不确定环境中行走敏捷可靠、灵活自如。**运动控制上**，基于动作大模型 (ActionGPT)，A2 可根据人语音指令和意图动态生成上百种仿人自然动作并执行轻作业任务。此外 A2 基于 HIMUS (High-performance Multimodal Mapping System) 3D-SLAM 算法、VectorFlux 规控算法，低延迟低漂移性能，支持在复杂多变动态环境中实现 L4 级别自主移动。**数据生成上**，智元发布全球首个机器人 4D 世界模型，让机器人在任务指引和实时观测的基础上规划未来动作；2025 年 1 月 8 日，智元机器人发布全球首个机器人 4D 世界模型，针对人形机器人的**模态对齐和数据稀缺**两大关键问题，提出 EnerVerse 架构，通过自回归扩散模型，在生成未来具身空间的同时引导机器人完成复杂任务，在提升 4D 生成能力的同时，实现动作规划性能的显著突破。**世界模型上**，2025 年 5 月，智元机器人开源发布全球首个基于机器人动作序列驱动的具身世界模型 EVAC (EnerVerse-AC)，以及具身世界模型评测基准 EWM Bench，在世界模型架构 EnerVerse 基础上推出创新成果：基于动作序列驱动的世界模型 EVAC 与具身世界模型评测榜单 EWM Bench，构建从训练到评测全链路技术闭环，重新定义具身智能研发范式。

图23：智元的 EnerVerse 世界模型在任务视频生成时性能较好



资料来源：智元机器人公众号，国信证券经济研究所整理

在硬件方面，智元 A2 实现高可靠、轻量化、超高槽满率绕线工艺的量产自研一体化关节，最高峰值扭矩 430Nm，电机扭矩密度 50Nm/kg，动态性能佳，关节可靠支持长时间稳定行走。360° 激光雷达+6 颗高清摄像头融合感知，实现全景无盲区；结合开集语义信息支持动静态语义环境与目标同步构建，实现智能避障。

2025 年 3 月 10 日，智元发布首个通用具身基座模型——智元启元大模型 (Genie Operator-1)，开创性地提出 Vision-Language-Latent-Action (ViLLA) 架构，该架构由 VLM (多模态大模型) +MoE (混合专家) 组成，其中 VLM 借助海量互联网图文数据获得通用场景感知和语言理解能力，MoE 中的 Latent Planner (隐式规划器) 借助大量跨本体和人类操作视频数据获得通用的动作理解能力，MoE 中的 Action Expert (动作专家) 借助百万真机数据获得精细的动作执行能力，三者环环相扣，

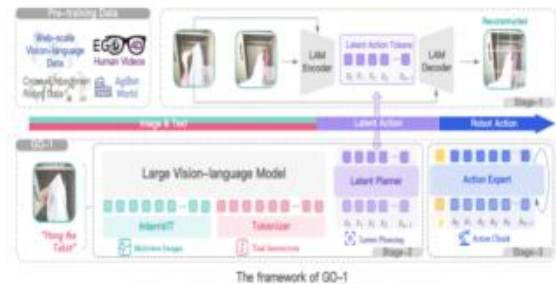
实现了可以利用人类视频学习，完成小样本快速泛化，降低具身智能门槛，并成功部署到智元多款机器人本体，持续进化，将具身智能推上新台阶。

图24: 百条级数据实现快速泛化



资料来源：智元机器人，国信证券经济研究所整理

图25: VLA 进化到 ViLLA



资料来源：智元机器人，国信证券经济研究所整理

智元机器人在 3 月 11 日发布搭载情感计算引擎的双足智能交互人形机器人灵犀 X2 具备完善的运动、交互及作业能力：

- **运动结构方面**，灵犀 X2 采用柔性材料外壳，全身拥有 28 个自由度，未使用任何并联结构；配备小脑控制器 Xyber-Edge、域控 Xyber-DCU、智能电源管理系统 Xyber-BMS 及关节模组 Powerflow 等核心组件，实现运控算法层面的全面突破。通过结合深度强化学习和模仿算法学习的优势，灵犀 X2 展现运动灵活性，实现走路、奔跑、踩滑板车、玩平衡车、骑自行车等高难度动作。
- **交互能力方面**，搭载基于 VLM 多模态交互大模型，实现毫秒级交互反应，通过人类的面部表情和语音语调精准判断情感状态，并做出相应的回应。研发团队还将动作模态集成到模型当中，可实现比如模仿人类的呼吸韵律、会“暗中观察”，还有各类细小动作和肢体语言，使其拥有更多情绪表达的能力。
- **作业能力方面**，基于一脑多形的智元启元大模型，X2 初步具备简单任务中对操作物体的零样本泛化能力，可在某些任务中实现多机协作，并外溢到日常生活的方方面面，如保安、保姆、保洁，同步应用于教育、医疗等多个领域。同时，灵犀 X2 采用轻量化设计，可模块化拓展，拥有完备的二次开发接口，以及预训练模型和“采-训-推”一站式方案，用户可根据需求自由探索，为康养、服务、家庭陪伴等各类场景打造应用。

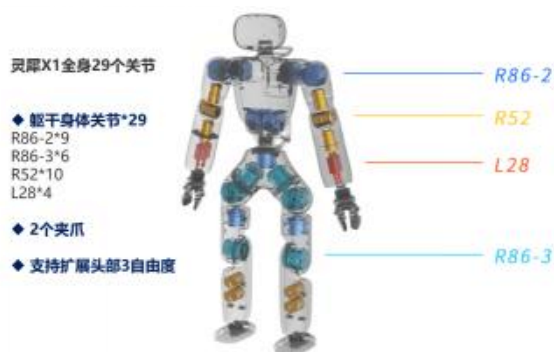
表4: 智元人形机器人本体情况

	智元远征 A1	智元远征 A2	智元远征 A3	智元远征 A2-Max	智元灵犀 X1	智元灵犀 X2
示意图						
发布时间	2023 年 8 月	2024 年 8 月	2026 年 7 月	2024 年 8 月	2024 年 8 月	2025 年 3 月
产品定位	通用型人形机器人	交互服务型机器人	为舞台而生的硅基明星	重载特种机器人	全栈开源机器人	全能探索机器人
身高	175cm	169cm	173cm	175cm	130cm	-
体重	55kg	69kg	55kg	85kg	≤33kg	33.8kg
步速	7km/h	-	-	1m/s	≥1m/s	-

全身自由度	共 49 个 DOF, 其中手 12	40+主动自由度	-	共 67, 其中 53 主动, 手 19、臂 7、腿 6、腰 3	31/41	28 个自由度
双手	有十指灵巧手	有十指灵巧手	-	有十指灵巧手	夹爪	夹爪
负载	整机承重 80kg, 单臂最大负载 5kg	-	-	全工作空间可搬运 40kg 重物	单臂 $\geq 0.5\text{kg}$	-
AI 算力	200TOPS	-	-	-	-	-
电池	-	700wh	1152wh	-	-	-
续航	-	2h	10h	2h	$\geq 4\text{h}$	-
原地掉头宽度	-	60cm	-	60cm	-	-

资料来源：智元机器人官网，国信证券经济研究所整理

图26: 灵犀 X1 结构



资料来源：智元机器人，国信证券经济研究所整理

图27: 灵犀 X2 骑车



资料来源：智元机器人，国信证券经济研究所整理

量产方面，2025 年 1 月 6 日，智元机器人宣布其量产的第 1000 台通用具身机器人正式下线，其中包括 731 台双足人形机器人（远征 A2/灵犀 X1）和 269 台轮式通用机器人（远征 A2-D/A2-W）。2025 年 4 月，均胜电子与智元达成战略合作，合资成立宁波普智未来机器人有限公司，第一期产线计划年产 1000 台人形机器人及轮式机器人。2025 年 5 月，智元机器人宣布灵犀 X2 正式开启商业化进程，灵犀业务部总裁魏强对灵犀 X2 的未来表现非常乐观，表示灵犀 X2 将在 2025 年下半年实现规模出货，预计 2026 年底出货量将达到“大几千台”。2025 年 7 月，宇树科技和智元机器人在中移（杭州）信息技术有限公司 2025 年至 2027 年人形双足机器人代工服务采购项目中中标。本次采购的项目总预算为 1.2405 亿元（含税）。采购包 1 为全尺寸人形双足机器人，预算为 7800 万元（含税），最终中选人为智元机器人；采购包 2 为小尺寸人形双足机器人、算力背包、五指灵巧手，预算为 4605 万元（含税），中标人为宇树科技。公司官网披露第 10,000 台通用具身机器人于 2026 年 3 月下线、第 15,000 台于 2026 年 6 月下线。

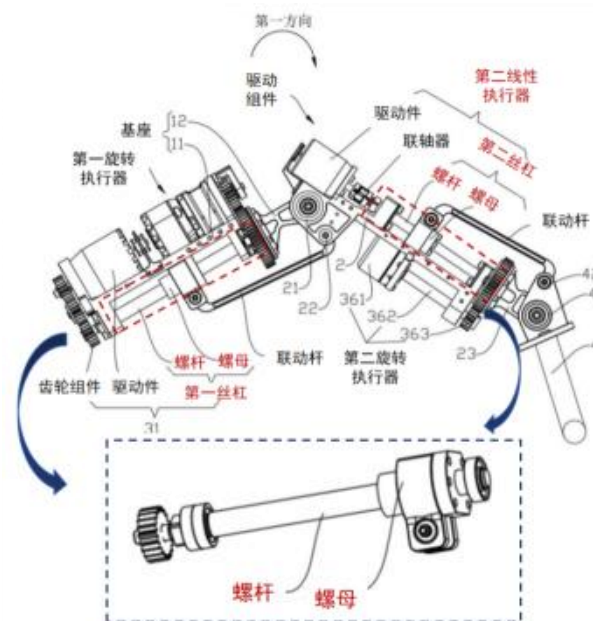
图28: 智元 2024 年开启通用机器人商用量产



资料来源：智元机器人视频号，国信证券经济研究所整理

在关节方案选择方面，旋转关节和直线关节能力兼具。根据智元相关专利，智元机器人在机械臂上采用丝杠的直线关节方案，在轮足机器人的腿部结构上也采用丝杠的直线关节方案。根据智元机械臂专利，机械臂第一线性执行器包括第一丝杠，其中有螺接配合的第一螺杆和第一螺母，第一驱动件能够带动第一螺杆转动，以带动第一螺母移动；根据智元轮足机器人专利，轮足机器人的腿部结构中，第一连接组件和第二连接组件均可分别包括丝杆和丝杆螺母，丝杆的一端连接第一关节件或第二关节件，丝杆的另一端与轮足机构连接，丝杆螺母设在丝杆上，丝杆与丝杆螺母相配合，以驱动轮足机构在轮式模式或足式模式之间可切换。

图29: 智元机器人相关专利拆解



资料来源：智元专利文件，国信证券经济研究所整理 注：图中标红的部位为丝杠

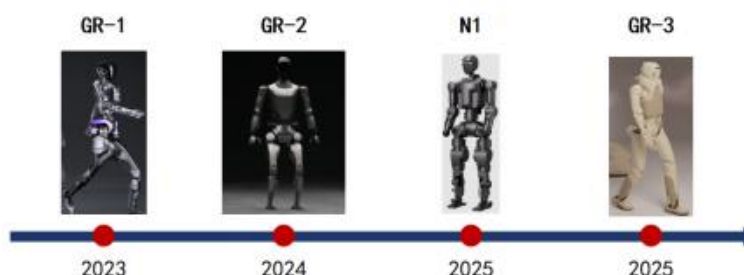
■ 傅利叶

傅利叶智能成立于 2015 年，涵盖人形机器人核心业务与智能康复解决方案。成立初期专注于医疗康复机器人，其核心产品涵盖上/下肢康复机器人、运动与平衡训

练系统等 30 多款产品；25 年 1 月傅利叶宣布完成最新一轮 E 系列融资，融资金额为 8 亿人民币。产品方面，傅利叶已发布 GR-1、GR-2 和 N1 人形机器人。

- **GR-1：**傅利叶 2023 年发布第一代人形机器人 GR-1，身高 1.65m，体重 55kg，全身自由度 44 个，最大关节扭矩 230N.m，步行速度 5km/h。GR-1 基于傅利叶自研的集电机、驱动器、减速器及编码器为一体的高性能执行器，具备快速行走、敏捷避障、抗冲击干扰等运动功能。
- **GR-2：**傅利叶 2024 年发布的第二代人形产品 GR-2，高 1.75m，体重 63kg，最大关节扭矩达 380N.m，步行速度 5km/h，全身总自由度 53 个，搭载新一代 12 自由度灵巧手，单手具备 6 个阵列式触觉传感器，可实时感知不同形状、材质的物体并精准抓握。同时支持多种示教方式，可采集更多真实训练数据。
- **N1：**傅利叶 2025 年 4 月发布的首款开源人形机器人 N1，同步开放涵盖物料清单、设计图纸、装配指南、基础操作软件在内的完整本体资源包。N1 采用紧凑型硬件架构设计，身高 1.3 米，体重 38 公斤，全身自由度 23 个。整机结构由铝合金与工程塑料复合构成。电池采用背部插拔式设计，单次连续运动续航可达 2 小时以上。动力系统搭载自研的 FSA 2.0 一体化执行器；实测最高稳定奔跑速度可达 3.5 米/秒。
- **GR-3：**傅利叶 2025 年 8 月发布的新一代人形机器人 GR-3，通过柔肤软包覆材设计与全感交互系统。本体结构上，GR-3 身高 165cm，体重 71kg，全身 55 个自由度，支持更拟人化的肢体表达。通过优化头部空间与轴心位置，实现了更紧凑灵巧的结构设计。依托模块化设计，GR-3 高效集成各类传感与运算模块，保证美观性同时兼顾实用性与拓展性，为更多场景人机交互提供基础。

图30：傅利叶人形机器人产品情况



资料来源：傅利叶，国信证券经济研究所整理

落地方面，傅利叶机器人广泛应用于医疗康复、学术研究等现实场景。已为全球超过 40 个国家和地区的 2000 余家机构和医院提供支持与服务。GRx 系列机器人目前已在迎宾接待、科研教育、工业制造、康复医疗等场景进行实验性应用。2025 年 5 月，傅利叶与上海国际医学中心举行了“具身智能康复港”揭牌仪式，双方将围绕具身智能机器人在康复医疗场景的应用标准建设、康复方案共创、科研攻关等展开全面合作，携手打造国内首个具身智能康复示范基地。傅利叶与同济大学签署战略合作，双方优势互补，开展联合研发、人才培养与场景共建，加速先进技术从理论到实际应用的转化。傅利叶还与国家地方共建人形机器人创新中心签署战略合作，共同推进具身智能技术在康复医疗和产业服务领域的创新应用。这也标志了傅利叶携手行业伙伴迈开探索具身智能+康养的第一步。

表5：傅利叶人形机器人本体情况

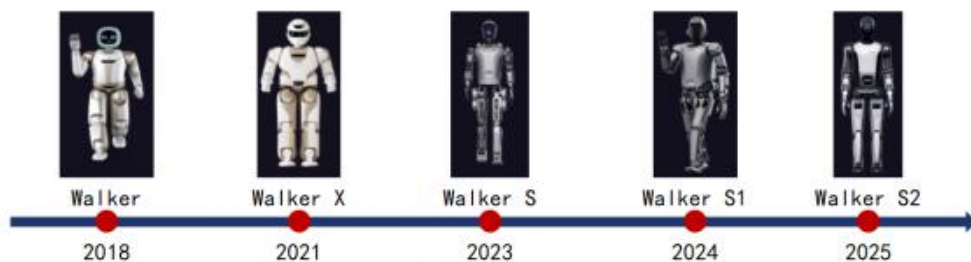
	GR-1	GR-2	GR-3	N1
示意图				
发布时间	2023 年	2024 年	2025 年	2025 年
身高	165cm	175cm	165cm	130cm
体重	55kg	63kg	55kg	38kg
总自由度	44	53	55	23
灵巧手	6 个自由度	12 个自由度, 6 个阵列式触觉传感器	12 自由度	-
最大关节扭矩	230Nm	380Nm	-	-
步态行走速度	5km/h	5km/h	-	3.5km/h
续航时间	1h	2h	3h	2h
单臂运动负载	-	3kg	-	-

资料来源：傅利叶官网，国信证券经济研究所整理

■ 优必选

优必选是人形机器人早期行业老兵，人形机器人产品包括 Walker、Walker X、Walker S 等系列。优必选成立于 2012 年，2014 年成功研发并生产首款小型人形机器人 Alpha，2017 年发布商用服务机器人产品及解决方案。2018 年发布第一代人形机器人 Walker 后，优必选对人形机器人不断迭代，2019 年发布第二代 Walker 机器人，2023 年 12 月发布 Walker S，2024 年发布人形机器人 Walker S1，2025 年 7 月发布最新一代人形机器人 Walker S2。

图31：优必选人形机器人产品时间线



资料来源：优必选官网，国信证券经济研究所整理

2024 年 10 月优必选推出 Walker S1，配置自主研发的语义 VSLAM 导航技术与第三代仿人灵巧手，能实现双手 15 公斤的负重行走，满足工业场景中最常见的搬运需求；优必选开发面向通用任务的多模态规划大模型、语义 VSLAM、学习型运动控制等具身智能关键技术，赋予 Walker S1 更聪明的大脑和敏捷的小脑，满足其工业场景内的泛化应用需求；优必选表示 Walker S 系列已获得来自车厂超过 500 台的意向订单，2025 年或有 1000-2000 台的人形机器人订单。2025 年 7 月，优必选推出全新一代工业人形机器人 Walker S2，全球首个实现自主换电的人形机器人，自由度 52 个，能实现 2m/s 拟人行走。

表6: 优必选人形机器人 Walker S 系列本体情况

	Walker S	Walker S1	Walker S2
示意图			
发布时间	2023 年	2024 年	2025 年
身高	170cm	172cm	176cm
体重	65kg	76kg	70kg
最大关节扭矩	300Nm	250Nm	-
灵巧手	有, 可加选电子皮肤	有, 6 个阵列式触觉传感器	有, 11 自由度, 6 个阵列式触觉传感器, 单手抓握 7.5kg, 指尖 1kg
感知	8 寸 AMOLED 柔性超清 360° 多模态感知, 集成化头曲面屏, 6 麦克风阵列部设计, 双眼鱼眼相机, 3D 立环绕, 多目立体视觉, 体视觉, 4 个六维力传感器, 360° 听觉	采用纯 RGB 双目视觉方案, 双目 RGB 相机, 2 个六维力传感器	高精度姿态传感器
续航时间	约 2.5h	未披露	双电池无缝切换设计, 灵活切换双电池续航或单电池工作模式云端实时监测电量, 配套自研智能换电站实时补能可根据任务优先级自主决策换电或充电模式, 实现动态能源管理

资料来源: 优必选官网, 国信证券经济研究所整理

优必选牵头首批人形机器人系列国家标准正式立项。2025 年 4 月, 人形机器人技术要求系列国家标准正式获批立项, 在全国机器人标准化技术委员会 (TC591) 秘书处承担单位北京机械工业自动化研究所有限公司的统筹下, 优必选联合北京人形机器人创新中心有限公司、上海人工智能实验室等单位共同发起了该系列国标, 并主导牵头制定作业操作技术要求, 针对灵巧操作、腿部移动作业、双臂操作、长序列执行、多机协同、操作避障、续航等作业操作技术要求进行规范。这是国内首批人形机器人领域国家标准, 涉及环境感知、决策规划、运动控制、作业操作等多项技术要求。

落地方面, 根据高工, 优必选在 2024 年先后宣布与蔚来、东风柳汽、一汽大众、极氪、一汽红旗、比亚迪、北汽等车企合作, 人形机器人进厂执行搬运、质检、装配等任务。2025 年 1 月优必选表示其工业人形机器人 Walker S1 在比亚迪汽车工厂的第一阶段实训工作已取得初步成效, 效率提升一倍, 稳定性提升 30%, 相关优化工作还在持续进行中, 预计 2025Q2 具备规模化交付条件; 实训过程中, Walker S1 解决了在车厂实训过程中的挑战, 包括在光照和环境变化情况下的视觉定位、动态高负载情况下的运控算法和高负载长时间工况下的关节散热问题, 保证 Walker S1 能在工厂中稳定执行任务。2025 年 3 月, 优必选促发群体智能觉醒, 在极氪实现全球首例多台多场景多任务人形机器人协同实训。2025 年 4 月, 优必选与采购方签订大型双足人形机器人采购合同, 所涉及的产品主要是工业人形机器人 Walker S1 与商用版人形机器人 Walker C, 相关产品将用于汽车工厂的生产制造和商用接待等环节。2025 年 5 月, 优必选与华为正式签署全面合作协议, 双方围绕具身智能和人形机器人领域, 在产品技术研发、场景应用及产业体系等开展创新合作。通过发挥华为昇腾、鲲鹏、华为云及大模型等技术创新能力和华为在研发、生产供应等经验, 结合优必选全栈式人形机器人技术优势, 双方将加速推动人形机器人从实验室创新向工业、家庭等场景的效率提升和落地复制。

图32: 优必选在极氪 5G 智慧工厂开展协同实训

图33: 优必选商用接待场景应用



资料来源：优必选，国信证券经济研究所整理



资料来源：优必选，国信证券经济研究所整理

3月12日优必选联合北京人形机器人创新中心发布全尺寸科研教育人形机器人天工行者，售价为29.9万元；目前天工行者已开放预订，并将于第二季度开始交付：

- 天工行者身高170cm，全身20个自由度，能以10km/h速度稳定奔跑，具备在山坡、台阶复杂泛化地形运动功能；搭载创新中心“慧思开物”通用具身智能平台，为高校及科研机构提供完整研究解决方案。
- 在关键部位，超大扭矩密度设计配合航空铝材及钛合金关键部件，轻量化设计的同时保证高硬度、高性能、高稳定性。还采用轻量化、高性能关节模组，最高可拓展至550TOPS超大算力，同时全身风道散热设计保证主控板、算力板及关节模组等关键零部件，长时间高性能运行不过热。
- 天工行者机器主体可自由拓展，可装配深度相机、激光雷达、NVIDIA Orin算力板、六维力传感器、七自由度协作双臂、五指灵巧手等人形机器人核心零部件。同时天工行者完整开放底层电机接口、传感器接口及运动控制接口，配套成熟的开发指南与示例代码，能够充分满足科研用户的二次开发需求。

图34：优必选 Walker S2 自动换电



资料来源：优必选，国信证券经济研究所整理

图35：优必选天工行者



资料来源：优必选，国信证券经济研究所整理

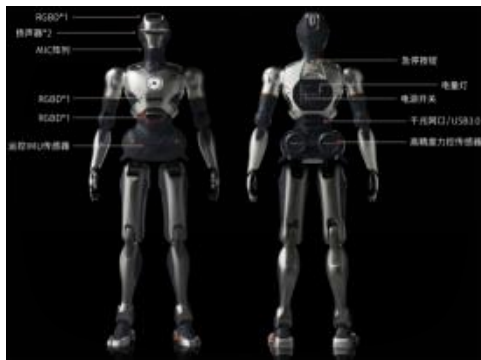
■ 众擎机器人

众擎机器人成立于2023年10月，总部位于深圳，专注于通用智能机器人及行业场景方案。团队来自中国第一批腿足式机器人研究与产业落地团队，以及 UC Berkeley、清华、普渡、港中文、北理工等顶尖高校，从本体核心零部件到具身智能、运控算法均全栈自研；公司产品面向科研教育、工业制造、商业服务、家

庭等多种场景，致力于推动人形机器人技术在全球范围的商业化落地。

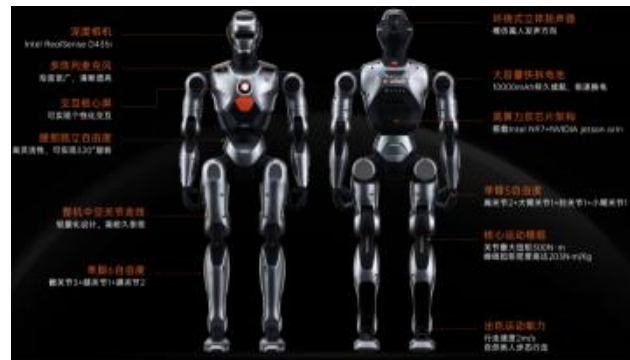
众擎产品包含通用机器人（SE01、PM01）、双足机器人科研平台（SA01）、原创 IP 服务机器人（S2）。2024 年 7 月众擎首款产品面世，发布首个开源型平台 SA01，科研教育版 SA01 EDU 及同平台文旅版 S2（小怪兽）相继面世。SA01 EDU 售 3.85 万元，刷新全球人形市场底价；2024 年 10 月旗舰产品首款全尺寸大人形机器人 SE01 发布，利用端到端神经网络模型让机器人实现拟人自然步态；2024 年 12 月众擎高兼容性开源人形机器人 PM01 发布，预计 2025 年第二季度开启交付。4 月 15 日，众擎机器人宣布其机器人产品正式量产上市，其中 PM01 教育版售价为 18.8 万元，SA01 售价为 4.2 万元，PM01 商业版 8.8 万元（预约）。

图36: 众擎通用机器人 SE01



资料来源：众擎机器人，国信证券经济研究所整理

图37: 众擎通用机器人 PM01



资料来源：众擎机器人，国信证券经济研究所整理

2025 年 2 月 23 日，众擎机器人发布视频，PM01 人形机器人成为全球首例完成前空翻的人形机器人，也同时展示 PM01 在户外场景中稳健的行走能力，表现出优异的运动控制能力。2 月 23 日消息，深圳市众擎机器人科技有限公司完成一轮 2 亿元融资，阿联酋私募投资机构 Stone Venture 领投。

图38: 众擎人形机器人 PM01 完成前空翻



资料来源：众擎机器人，国信证券经济研究所整理

图39: 众擎人形机器人 PM01 户外行走稳健



资料来源：众擎机器人，国信证券经济研究所整理

从关节类型上看，PM01 使用的是全行星关节模组的方案，SE01 是行星+谐波的方案。行星准直驱关节、谐波力控关节和滚珠丝杠直线关节等高性能部件均为团队成员自主研发。功能与定位上看，PM01 面向科研教育场景等，主要用于算法验证和二次开发；SE01 面向工业与家庭场景，全身采用航空级铝合金打造，拥有 5-10 年使用寿命，尺寸与真人大小接近，适用于各种复杂场景。结构设计上看，PM01

较 SE01 增加腰部自由度,可实现腰部 320 度自由旋转,能支持更多动作定制。PM01 教育版在商业版的基础上又增加颈部自由度, 仿生程度更高。

表7: 众擎人形机器人本体参数对比

	SE01	PM01	T800
示意图			
发布时间	2024. 10	2024. 12	2025. 12
身高	170cm	138cm	173cm
体重	55kg	40kg	75kg~85kg
自由度	总自由度 32: 单腿 6 (髋部谐波关节*3+膝部谐波关节*1+踝部谐波关节*2), 单臂总自由度 29: 单臂 7, 单腿 6, 颈 2, 腰 1 总自由度 23: 单腿 6 (髋关节*3+膝关节 1+踝关节 2), 单臂总自由度 29: 单臂 7, 单腿 6, 颈 2, 腰 1 谐波关节*1), 灵巧手 6 节 1+小臂关节 1), 腰部 1		
行走速度	2m/s	2m/s	≥3m/s
最大关节扭矩	186Nm	300Nm	450Nm
灵巧手	有	研发中,未来将作为可选配件	单手 7 自由度, 负载 5kg
感知	深度相机, 360° 激光雷达, 6 颗高清摄像头, 运控 IMU 传感器, 高精度力控传感器	深度相机	深度相机, 360° 激光雷达
续航时间	约 2h	未披露	4h
售价	创始人透露成本 10 万以内, 售价或 15 万左右	8.8 万元起	18 万元

资料来源: 众擎机器人官网, 量子位, 国信证券经济研究所整理

图40: 众擎自研关节



资料来源: 众擎机器人, 国信证券经济研究所整理

■ 埃夫特

埃夫特作为国内工业机器人的龙头企业,连续在机器人领域耕耘十六年,与国家先进制造产业投资基金、芜湖市科创集团共同发起设立合资公司-启智(芜湖)智能机器人有限公司。启智机器人瞄准智能机器人,致力于打造智能机器人通用技术底座。埃夫特从 2017 年就开始推出其自主作业的智能机器人产品,在喷涂、焊接、码垛等多个应用领域已经实现落地并形成批量应用。

清华大学、中科大分别与埃夫特、启智机器人成立的联合实验室将共同开展具身智能领域感知、决策、规划和控制相关前瞻技术和共性技术平台研究和探索，深耕计算与感知技术、系统设计与控制策略等核心领域，驱动智能机器人技术发展。埃夫特与启智机器人还已经在具身智能数据采集、训练基础设施建设、校企合作示范、典型应用场景落地等方面，与安徽工程大学、长三角哈特机器人产业技术研究院、北京超星未来科技有限公司、长三角信息智能创新研究院、芜湖市大数据建设投资运营有限公司等多个生态合作伙伴达成合作意向。

图41：启智机器人战略合作签约仪式



资料来源：埃夫特机器人公众号，国信证券经济研究所整理

■ 开普勒

上海开普勒探索机器人有限公司是一家专注于通用机器人研发、生产及应用生态的创新企业。为智能制造、仓储物流、智慧巡检、安保巡逻、高危作业、商业服务、科研教育等行业提供自动智能化解决方案，远期更可进入家庭提供各类服务。2024年10月开普勒先行者K2正式发布，身高175厘米，体重83公斤，采用四肢主体结构一体化设计，单手具备11个自由度，单指搭载25个力触点柔性传感器，实现精准操控，适用于智能制造、仓储物流、特种作业等多个场景。

图42：开普勒机器人



资料来源：埃夫特机器人公众号，国信证券经济研究所整理

- **算法层面**：采用自研算法实现预设动作与端到端全自主规划相结合模式及精准控制，全身配备高性能 GPU 主板、纯视觉识别和导航方案在内的多样传感器；K2 通过基于云端大模型的大脑+具身小脑的组合，模仿学习+强化学习的技能训练，基本实现自主完成特定场景工作任务的能力。开普勒研发团队通过优化人机协同作业算法与数据传输技术，提升遥操作过程中的实时互动性。通过优化步态规划与控制算法，K2 大幅提升抵御外界干扰的能力和行走速度，确保在自主作业环境中的可靠性和流畅性。通过视觉感知与自主导航算法的深度优化，先行者 K2 能实时监测、识别周围环境并迅速、准确地作出反应，确保在复杂多变的环境中保持自适应性和安全性。
- **结构层面**：先行者 K2 硬件体系围绕手臂和腿部肢体结构、触觉灵巧手、布线方式、电源系统、本体自由度和工业造型等进行全面升级；四肢主体结构均采用一体化设计，刚性更好。新一代绳驱触觉灵巧手单手多达 11 个自由度(主动+被动)，单手负载能力可达 15 公斤，每个指尖配备高达 96 个触点的柔性传感器。采用全新星型线路布线方式，走线简洁，连接快捷。续航方面延续使用 2.33KWh 大容量电池，保证 8 小时不间断续航的同时，增加兼顾直充和自动充电的特殊充电接口；增加头部转动和俯仰 2 个自由度；在全身 52 个自由度的加持下，先行者 K2 的感知范围和手眼协同能力更进一步。

图43: 开普勒机器人结构



资料来源：开普勒，国信证券经济研究所整理

- **工艺层面：**上海开普勒研发总监张敏梁表示“通过革新工艺，成功将螺母的磨削时间从 20 小时缩短至 2 小时，此外对 28 个关节模组进行优化组合，由原本的 14 个规格精简为 4 个旋转规格和 4 个直线规格，实现‘聚量降本’策略，使得整个关节模组的成本降低 50%”。
- **商业化层面：**开普勒已在欧美市场获得大量预订订单；先行者 K2 已进入多家头部客户实际场景开展测试，比如物料搬运、样品处理、巡逻巡检、冲压收料质量检测等，按计划推进落地流程；2025 年 3 月 15 日，开普勒发布视频，表示开普勒 K2 已开始流水线搬货工作，后续计划 6 月底可以开启预定。开普勒和其股东伟创电气、柯力传感、兆丰股份、汉威科技、乔锋智能等开展合作，促进商业化落地。

图44：开普勒机器人双臂协同搬运



资料来源：开普勒，国信证券经济研究所整理

图45：开普勒机器人标箱搬运



资料来源：开普勒，国信证券经济研究所整理

■ 云深处科技

杭州云深处科技（DEEP Robotics）成立于 2017 年，是具身智能创新技术与应用引领者，在中国率先实现四足机器人全自主巡检变电站。云深处自主研发的“绝影”系列机器人在电站、工厂、管廊巡检以及应急救援、消防侦查、未来科研等多种应用环境中落地应用，曾在地下管廊服务亚运，参与新加坡国家电网项目，实战参演应急使命抗震救灾、燃爆侦察实战演习。目前，云深处科技正同国家电网、南方电网、宝钢股份、福祿克等行业巨头开展长期深度合作。

机器狗积累核心技术，进军人形机器人。云深处于 2018 年发布绝影 pro 四足机器人，随后持续迭代四足机器人产品，技术积累深厚。2024 年，云深处发布通用机器人 DR01，正式进军人形机器人赛道。2025 年，云深处发布人形机器人 DR02。

图46：云深处产品矩阵



资料来源：云深处官网，国信证券经济研究所整理

DR01 具身智能通用型人形机器人，依托 DR01 人形机器人平台进行人工智能与大数据训练。算法方面，DR01 基于强化学习智能算法，融合机器人本体感知及环境感知，通过感控一体的学习算法，实现在复杂与离散地形下的稳定通行；在路面打滑和外部干扰等未知扰动下，可快速恢复平衡并保持稳定行走；行走速度大于 1.6 米/秒，可上下 18 厘米台阶，25° 斜坡和随机起伏地形，实现户外长距离运动。**硬件方面**，DR01 搭载 J60 高性能轻量化关节和 J100 高爆发力关节，为多场景应用提供强劲动力。其中，J100-116P 关节可实现最大扭矩 315Nm，峰值扭矩密度可达 107.5Nm/kg，能胜任大型足式机器人的动力需求。J100 关节采用高可靠无电池的多圈绝对式编码器，具备高精度性、可靠性、耐用性，整体关节调教具备优异的控制性能，同时兼容市面各类主流驱动器，可根据需要自行搭配驱动器进行集成开发，采取驱控分离设计，提供更多自由空间，便于关节集成设计与散热。

DR02 作为全球首款具备 IP66 防护等级、可适应全天候户外作业的人形机器人，为多行业场景提供可靠、高效的智能化解决方案，可适应户外淋雨、潮湿、粉尘等复杂环境的全尺寸人形机器人，攻克了行业级机器人在复杂场景中“环境限制导致无法作业”的核心痛点。-20℃~55℃的宽温运行范围，可无缝衔接干燥工厂与户外雨天、低温冷库与高温车间，真正实现“全天候、全时域、全场景”连续作业。

图47：云深处自研 J60 关节



资料来源：云深处，国信证券经济研究所整理

图48：云深处自研 J100 关节



资料来源：云深处，国信证券经济研究所整理

■ 1X Technologies

1X Technologies 成立于 2014 年，前身为 Halodi Robotics，致力于构建完全自主的人形机器人；2025 年 CES 大会上 1X NE0 人形机器人是与英伟达合作的产品

之一。1X 的产品主要包括 EVE 和 NEO 两款人形机器人，其中 EVE 为轮式机器人，NEO 为双足人形机器人。NEO 专为家庭场景打造，可实现整理、深度清洁、家庭管理等功能，也拥有谈话、写作、辅导能力。

2025 年 2 月，1X 发布最新家用机器人 NEO Gamma，**本次升级主要体现在 AI 架构、硬件设计与交互模式的三重突破**。NEO Gamma 视频中着重突出人机协作的理念，具备强大的家务处理能力，可独立完成多项家务任务。设计上融入更多亲和力元素，表面覆盖针织尼龙材质的“外衣”，降低机器人在与人交互过程中可能产生的意外伤害风险。**算法方面**，NEO Gamma 配备具备多功能全身控制器，运用 100Hz 高频强化学习算法，以大量人类动作数据为基础展开训练，可实现自然步态行走、蹲下拾取物品、自主坐下等动作。Gamma 上半身依赖远程算法，下半身由强化学习控制系统驱动完成动作。NEO Gamma 的 Companion 功能集集成新的内部语言模型，可实现自然对话和肢体语言，同时内置先进的视觉操作模型，在未经专门针对特定环境训练的情况下，也能够识别并抓取各类物品。2025 年 6 月，1X 推出具身智能模型 Redwood，一款专为人形机器人量身定制的视觉语言转换器，能够执行端到端的移动操作任务，例如取物、开门、导航等 NEO Gamma 能够从现实世界的经验中学习。**硬件方面**，Gamma 的机械手装配毫米波触觉传感矩阵，能够敏锐感知 0.1N 的细微力度改变。

合作方面，OpenAI 于 2023 年领投 1X 的 A2 轮融资，成为其早期核心投资者。2023 年起英伟达为 1X 提供 CUDA 加速库和 Isaac Sim 仿真平台，帮助其训练机器人完成复杂任务。2024 年双方还联合举办“世界模型挑战赛”，利用英伟达 Cosmos 视频分词器压缩机器人动作数据，显著降低训练成本。

图49：1X 产品矩阵



资料来源：1X Technologies，国信证券经济研究所整理

图50：1X 家用机器人 Neo Gamma



资料来源：1X Technologies，国信证券经济研究所整理

■ 银河通用

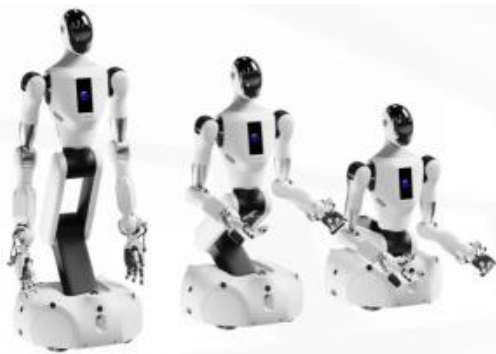
北京银河通用机器人有限公司（GALBOT）成立于 2023 年 5 月，设有北京、深圳和苏州三地研发中心，与北大和北京智源人工智能研究院分别成立具身智能联合实验室和研究中心，现有算法、软件、硬件研发团队 80+人。24 年 11 月银河通用完成 5 亿元人民币战略轮融资，累计融资超 12 亿元；2025 年 1 月银河通用机器人亮相 CES 2025，与英伟达深度合作。

2024 年 6 月银河通用发布首代具身大模型机器人 Galbot (G1)。在硬件方面，G1 高 173cm，重 85kg，臂展 190cm，续航时间 10h，末端负载 5kg；采用“双臂+单

腿+轮式底盘”的躯体结构，可实现横向平稳灵活移动，纵向拥有地面至 2.4m 高的超大工作空间；**在大模型方面**，银河通用自研首个全面泛化的端到端具身抓取基础大模型 GraspVLA，能反思、可随机应变的操作大模型系统 SAGE。2025 年 6 月，银河通用推出自研的产品级端到端导航大模型 TrackVLA，具备纯视觉环境感知、语言指令驱动、可自主推理、具备零样本（Zero-Shot）泛化能力。TrackVLA 是银河通用推出的产品级导航大模型，纯视觉环境感知、自然语言指令驱动、端到端输出语言和机器人动作，是一个由仿真合成动作数据训练的视觉-语言-动作（VLA）大模型。它让机器人拥有“听→看→懂→走”的闭环运动能力：一双眼睛看世界、一个智能“大脑”做推理，无需提前建图、不依赖遥控控制，真正实现语言驱动、泛化感知、自主推理、智能交互与运动；在大小脑模型联动下，机器人可理解人类自然语言并根据指令与人类交互；**在数据采集方面**，银河通用通过物理仿真合成大规模高质量数据的技术路线，支持 Isaac Sim/Mujoco 等多个仿真平台，已积累千万级的场景数据以及十亿级动作数据，在合成数据训练下，Galbot 拥有全球领先的泛化物体抓取技术，目前已实现抓取随机放置的透明、高光等物体成功率在 95%以上。

银河通用与美团签署战略合作协议。银河通用选择从无人值守药店、商超和物流分拣等场景切入市场。在商业布局上，公司已与美团签署战略合作协议，双方将在线下零售、智慧货仓、智慧物流等多个领域开展深度合作。后续规划包括工业、物流、科研、教育以及家庭等应用场景。

图51：银河通用机器人 G1



资料来源：银河通用机器人官网，国信证券经济研究所整理

■ 星动纪元

北京星动纪元科技有限公司成立于 2023 年 8 月，由清华大学交叉信息研究院孵化，也是唯一一家清华大学占股的人形机器人企业。创始人陈建宇是清华大学博士生导师、助理教授。团队已发布机器人 AI 领域 50+高质量论文，包括多篇机器人大模型部署与规划的学术成果，目前员工中研发人员人数占比超过 80%。

星动 STAR1 是星动纪元首款产品级高性能通用型人形机器人，Q5 为服务机器人。身高 171cm，体重 63kg，共 55 个自由度，算力 275TOPS，最高关节扭矩达 400Nm，最高转速达 25rad/s。室外真实场景跑速 3.6m/s，配合腰部 3 个自由度能完成稳定行走、奔跑、跳跃等复杂运动；上肢包括自主研发的配备 7 个自由度高精度仿生机械臂（负载超 20kg），及 12 个全主动、全自驱的自由度的高性能灵巧手星动 XHAND1。星动 Q5 大部分核心零部件均与星动 STAR1 共享。

➤ **算力+感知等：**STAR1 集成 Intel 高性能处理器和 Nvidia Orin 计算资源，为

人形机器人在强化学习、模仿学习和端到端大模型研究中提供算力支持。机器人还配备指尖阵列式触觉传感器、深度视觉相机、麦克风阵列和面部交互屏幕等多种外设，方便高效训练和高度自主化操作。

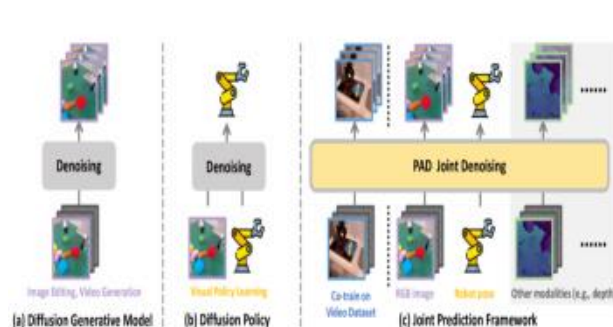
- **一体化关节模组：**星动纪元针对人形机器人应用特点，自研一体化系列关节，集无框力矩电机、精密行星减速器、高精度编码器、驱动器为一体，具备 EtherCAT 高速通信，高精度力位混控模式，结构紧凑，高定位精度，高响应频率，高扭矩密度，适合动态变负载的机器人应用。
- **大模型：**2024 年 12 月星动纪元端到端原生机器人模型 ERA-42 亮相，采用大规模视频数据学习策略，涵盖无标注的视频数据、公开各类形态机器人的数据、人类活动数据以及遥操作数据等；在上述数据的使用上，星动纪元不是直接模仿视频里的人怎么去做，而是学习行动之后会产生什么样的结果，以实现泛化。这也使得学习效果不受限于数据质量，可大大降低数据收集成本，解决世界范围内在构建通用操作模型过程中数据消耗量巨大、需要大量高质量数据的问题。模型不需任何预编程技能，完全基于其泛化和自适应力，能在不到 2 小时内通过收集少量数据就学会执行新的任务。
- **灵巧手：**星动 XHAND1 是星动纪元推出的首款产品级机器人灵巧手，具备高自由度、高性能、高智能性等优势；5 指关节全自驱、12 个独立自由度、高分辨率三维触觉传感器，单手最大 80N、25Kg 负载。

图52: ERA-42 模型



资料来源：星动纪元，国信证券经济研究所整理

图53: 星动纪元探索融合世界模型的原生机器人模型



资料来源：星动纪元，国信证券经济研究所整理

2025 年 7 月星动纪元发布全尺寸双足人形机器人 L7，身高 171cm，体重 65kg，拥有 55 个自由度，其中灵巧手 12 个自由度。自研关节模组可实现扭矩 400 N·m，转速 25 rad/s。L7 可实现 20kg 双臂负重，搭载端到端 VLA 大模型 ERA-42，在商业服务（街舞表演、调酒表演）、物流场景（扫码、智能分拣）、制造场景（智能搬运、智能装配）、科研场景（全身遥操作、数据采集）等场景均可应用。

表8: 星动纪元人形机器人本体参数对比

	STAR1	L7
示意图		
身高	2024. 10	2024. 12

体重	170cm	138cm
自由度	55kg	40kg
行走速度	3.6m/s	4m/s
最大关节扭矩	400Nm	400Nm
最大转速	25rad/s	25rad/s
灵巧手	单手 12 主动自由度，阵列指尖触觉全覆盖	12 自由度灵巧手，全直驱可用工具，高分辨率触觉传感器
感知	触觉传感器、摄像头、深度相机	双目相机、3D 激光雷达
算力	275 TOPS	80 TOPS (X86) + 275 TOPS (Orin)

资料来源：星动纪元官网，国信证券经济研究所整理

落地方面，星动纪元 2025 年已累计交付超 200 台产品，另有上百个订单在量产交付中。全球 TOP10 市值科技巨头中有 9 家为星动纪元客户，也助力 MIT、Stanford、UC Berkeley、字节跳动机器人实验室等产出顶尖研究成果，并推动科技果实从实验室到应用场的落地。星动纪元率先布局业务出海，自 2025 年初布局以来，海外市场收入占比已超过 50%。锚定大产值行业、高价值场景，物流与零售场景率先布局。与北自科技开展战略合作，探索人形机器人在物流领域通用场景的应用潜力，目前已具备在复杂工业场景物流（搬运、分拣、扫码等）中落地的技术积累和实力。同时，星动纪元携手海尔智家、联想及世纪金源，重构零售服务体验。

图54：星动纪元模型-本体-场景数据



资料来源：星动纪元官网，国信证券经济研究所整理

■ 逐际动力

逐际动力成立 2022 年 1 月，涵盖全尺寸通用机器人、四轮足机器人、双足机器人及相关解决方案，围绕三大具身智能技术：本体硬件设计制造、基于强化学习的小脑全身运动控制、具身大脑模型训练策略，打造人形机器人本体软硬件系统和具身 Agent 开发工具链，推动具身智能在科研、制造、商业、家庭等领域的广泛应用。公司核心团队成员来自加州大学伯克利分校、俄亥俄州立大学和德国等国内外知名高校，研发工程师占比超 80%，在国际顶级期刊和会议上发表 130 多篇以控制理论、足式机器人、人工智能等为主题的高水平论文。

- **全尺寸人形机器人：**“星途 CL-1”于 2023 年 12 月首次公开动态测试，实现从实时地形感知、步态规划到全身控制的全栈闭环，CL-2 于 2024 年 8 月在世界机器人大会上发布，增加更多的自由度，装配灵巧手。2025 年 5 月逐际公布全尺寸人形机器人 CL-3 最新测试视频，CL-3 在自由度与控制协调上实现了新突破，拥有 31 个高性能自由度，高动态大幅度拟人动作丝滑完成。全身控制算法加持，全尺寸人形机器人实现走路、伸手、扭腰。2026 年 5 月，发布 LimX Luna 人形机器人，全新设计语言，天生优雅。高级织物包覆，柔化机械触感 160cm 全尺寸拟人比例。

图55：人形机器人 CL 系列



资料来源：逐际动力官微，国信证券经济研究所整理

- **双足机器人：**多形态双足机器人 TRON 1 独创性采用“三合一”模块化足端设计（双点、双、双轮足），可进行足端自适应识别和运控模式自动切换，标准版早鸟价 6.98 万起；TRON 1 设有实用的外设接口，用户可根据需求，搭载扩展配件，如雷达、机械臂、相机和双光云台等，目前 TRON1 已完成全球多个国家和地区交付，初步实现产品设计、研发、量产和销售商业化闭环。
- **四轮足机器人：**逐际动力首款四轮足机器人产品 W1 是国内首个基于自主地形感知，通过实时步态规划与控制完成上下楼梯的全自研产品，W1 能够自由切换双足模式与四轮足模式，可滚可踏可行走，结合腿式和轮式结构的优势。

图56：逐际动力模块化足端 买一得三



资料来源：逐际动力，国信证券经济研究所整理

图57：四轮足机器人 W1



资料来源：逐际动力，国信证券经济研究所整理

2025 年 2 月 18 日逐际动力发布基于视频生成大模型的具身操作算法 LimX VGM，为国内首次将人类操作数据直接应用于机器人操作。LimX VGM 的工作流程背后是逐际动力三大具身技术核心创新点：人类操作视频到机器人操作策略及行为的桥

接、空间智能的引入、算法与机器人本体的解耦，其工作流程分三步：

- **训练阶段：**采集若干真实人类操作视频，对现有视频生成大模型进行后训练。
- **推理阶段：**以初始场景结合任务操作指令作为提示，利用经过后训练的视频生成大模型生成带深度信息的人类操作视频，进而根据人类操作视频，生成机器人操作的行为。
- **执行阶段：**算法输出符合机器人操作逻辑的行为解算，由机器人执行相应的操作轨迹。

2.2 地方人形机器人创新中心：政企共建“国家队”，依托产业集群打造基础平台

政府不仅通过政策支持、资本注入等方式助推人形机器人产业发展，还通过建设地方人形机器人创新中心，来打造基础创新平台和产业集群。2023 年以来，北京、上海、广东、浙江、四川、安徽等地都陆续建立本地人形机器人创新中心，构建和打造产业集群，形成技术生态。

表9：省级以上人形机器人创新中心

创新中心	所在地	成立时间
国家地方共建具身智能机器人创新中心	北京	2023. 11 成立，2024. 10 揭牌升级为国地共建
国家地方共建人形机器人创新中心	上海	2023. 12 成立，2024. 5 揭牌升级为国地共建
浙江人形机器人创新中心	宁波	2023. 12
成都人形机器人创新中心	成都	2024. 4
广东省具身智能机器人创新中心	深圳	2024. 4
安徽省人形机器人产业创新中心	合肥	2024. 6

资料来源：高工移动机器人，国信证券经济研究所整理

■ 天工

2023 年 11 月京城机电、优必选、亦庄机器人等 10 家行业领军企事业单位出资 4.6 亿元联合组建北京人形机器人创新中心。创新中心作为行业资源组织者，与高校、科研院所和产业链上下游企业密切协同开展关键共性技术攻关，参与行业标准制定和测试验证平台建设。经近一年发展，创新中心已迭代出“天工”、“天轶”等系列产品；2024 年 10 月在工业和信息化部与北京市人民政府指导下，创新中心正式升级为国家地方共建具身智能机器人创新中心。4 月 19 日，全球首个人形机器人半程马拉松在北京亦庄开跑，天工队以 2 时 40 分 42 秒的成绩获得冠军，展现了天工机器人领先的性能。

2024 年 4 月创新中心发布天工 1.0 lite，2024 年 8 月发布更为先进的天工 1.1 pro 与天工 1.2 MAX：新版本在自由度、负载等参数上不断优化升级；天工 1.1 PRO 拥有完整手臂功能，内置多个视觉感知传感器及六维力传感器，配备惯性测量单元和 3D 视觉传感器，每秒进行 550 万亿次计算；在 1.1 PRO 基础上，天工 1.2 MAX 参数进一步加强，髌膝关节扭矩达 320Nm，负载能力更大、速度更快、续航更长，具更强智能交互和任务执行能力；后续在世界机器人大会上发布“天轶”，搭载具身智能情感大模型，可精确地识别人类情感与情绪，进行更深层次智能交互，可应用于接待、导览、咨询问答、场馆介绍、舞蹈表演等多种场景。

表10：天工机器人本体情况

天工 1.0 lite	天工 1.1 pro	天工 1.2 MAX	天工 3.0
-------------	------------	------------	--------

示意图				
发布时间	2024 年 4 月	2024 年 8 月	2024 年 8 月	2026 年 2 月
身高	163cm	163cm	173cm	170cm
体重	43kg	56kg	60kg	64.5kg
自由度	28 个	42 个	42 个	31 个
双手	无灵巧手（可选扩展）	有十指灵巧手	有十指灵巧手	多款灵巧手选配
负载	单手 3kg	单手 3kg，单臂负载≥4kg	单手 3kg，单臂负载≥4kg	-

资料来源：国创中心，国信证券经济研究所整理

户外运动和工作能力强，应用场景逐渐打开。国创中心持续提升具身小脑能力，实现基于视觉的感知行走，可实现无磕碰、不踩棱、不踏空地跨越连续多级楼梯和 35 厘米大高差台阶，奔跑时速达 12km/h，并能在雪地高速奔跑，同时具备强抗干扰能力，大外力冲击下仍可保持平衡。应对复人形机器人走出实验室，在真实环境执行任务，甚至在地、雪地救援、废墟等极端环境下作业基础杂地形的移动能力提升，将成为；1 月 23 日国创中心与北京亦利和能源发展在北京签署合作协议，围绕电力场景展开深度合作共研。“天工”成为首个在电力行业完成操作和巡检的人形机器人。凭借具身运控和操作能力，成功突破复杂环境下的移动与操作难题，高效完成电力设备的巡检和操作任务，应用场景逐渐打开。

图58：天工连续攀爬 134 级阶梯



资料来源：国创中心，国信证券经济研究所整理

图59：天工完成精准倒闸工作



资料来源：国创中心，国信证券经济研究所整理

首个支持多本体多场景应用的通用具身智能平台“慧思开物”发布。3 月 12 日创新中心发布首个支持多本体多场景应用的通用具身智能平台“慧思开物”，其由 AI 大模型驱动的任务规划具身“大脑”及数据驱动的端到端技能执行具身“小脑”构成，支持各类机器人与物理世界交互的开放平台；其中具身“大脑”具备自然交互、空间感知、意图理解、分层规划和错误反思等能力，具身“小脑”分为具身操作和具身运控两个子平台：具身操作涵盖元技能库、泛化抓取、技能拆解和错误处理等功能，而具身运控负责实现全身控制、双臂协作、稳定行走和移动导航等任务。由具身“大脑”进行任务规划，再调用具身“小脑”技能库执行具体动作，并将执行反馈传递给具身“大脑”，形成任务闭环。

作为国家级创新平台，国创中心持续攻坚具身智能机器人关键共性技术研发和生态建设，并向全行业开源开放。在本体开源方面，北京具身智能机器人创新中心还公布“百台天工计划”，将向重点科研机构、高校提供超百台“天工”系列机器人，科研机构可基于“天工”按需进行二次开发；在算法开源方面，创新中心

发布开源运动控制框架 Tien Kung-Lab，将运控算法面向行业开源，融合模仿学习与强化学习的优势，在数据集开源方面，国创中心发布行业首个标准化通用具身智能数据集和 Benchmark RoboMIND 首批开源数据 10 万条；还发布高保真铰接物体数字资产 ArtVIP，构建了全球最精细的复杂铰接物体库，并且开源了 6 个支持全场景交互的虚拟机器人训练场。在开源社区方面，通过开源协作模式吸引超千名开发者参与数据集的数据优化与模型训练工作，推动技术成果传播。

■ 青龙

2024 年 5 月 17 日，国家地方共建人形机器人创新中心揭牌，更注重打造产业生态。除发布全尺寸的开源人形机器人“青龙”与开源社区 OpenLoong 之外，国地中心重点工作集中在建设人形机器人训练场，通过依托人形机器人训练场，构建高质量共享数据集，同时打通数据的采集，推动人形机器人时代的 ImageNet 时刻。

2024 年 7 月国地中心发布国内首款全尺寸通用人形机器人公版机——青龙，同时宣布开源其技术；“青龙”身高 185cm、体重 82kg，全身 43 个主动自由度；拥有高度仿生的躯干构型和拟人化的运动控制；腿部系统追求轻量化、高刚度和低惯量，配备高扭矩密度的轴向电机，确保复杂地形保持稳定行走能力；搭载 10 种、31 个关节模组，最大关节扭矩达到 396Nm，峰值扭矩密度 200Nm/kg；配备七自由度机械臂与集成触觉感知能力的五指灵巧手，为精细操作和复杂任务提供力支持。

图60：青龙行走与驱动系统设计



资料来源：AI 工业，人形机器人（上海）有限公司，国信证券经济研究所整理

图61：青龙构型设计



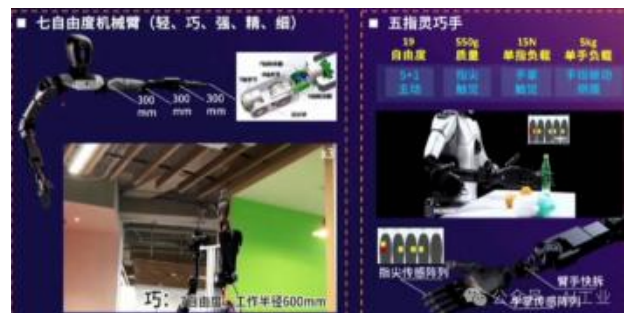
资料来源：AI 工业，人形机器人（上海）有限公司，国信证券经济研究所整理

图62：青龙关节模组



资料来源：AI 工业，人形机器人（上海）有限公司，国信证券经济研究所整理

图63：青龙手部设计

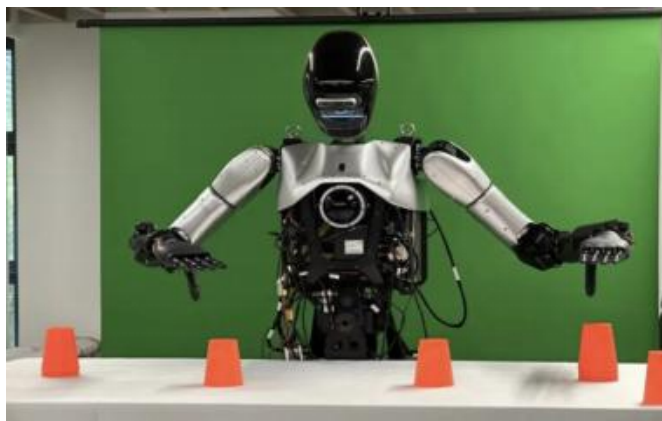


资料来源：AI 工业，人形机器人（上海）有限公司，国信证券经济研究所整理

在大小脑方面，算力与控制，青龙搭载 400T TOPS 高算力的具身智能控制器，集成“视、听、触、嗅、动”五感融合设计，实现自主决策与控制；通过朱雀具身大脑和玄武小脑模型协作，青龙能够独立完成从语言理解到动作执行全过程。

- 朱雀具身大脑共集成 3 个大模型，分别是科大讯飞星火大模型、上海人工智能实验室书生浦语大模型、上海人工智能实验室书生万象多模态大模型。大脑拥有跨设备的调度框架，书生浦语大模型和万象多模态大模型运行在本地服务器，语言大模型实现用户意图识别与对话功能；讯飞星火大模型与浦语功能相似，运行在云端服务器；多模态大模型具备处理图像的能力，当识别到用户的任务与当前环境相关时，会启用多模态大模型进行环境感知。
- 玄武小脑模型是任务执行模型，分为轨迹规划模块和运动控制器两个部分。轨迹规划模块负责输出期望轨迹，由端到端的机载视觉信息为驱动，以人类动作为模仿对象，然后由运动控制器控制人形机器人做出相应的动作。“玄武”小脑模型采用了控制理论、模仿学习、强化学习三条技术路径。控制理论通常需要对系统进行详细建模，模仿学习通过模仿专家的行为来学习任务，强化学习让人形机器人通过与环境的交互来学习。

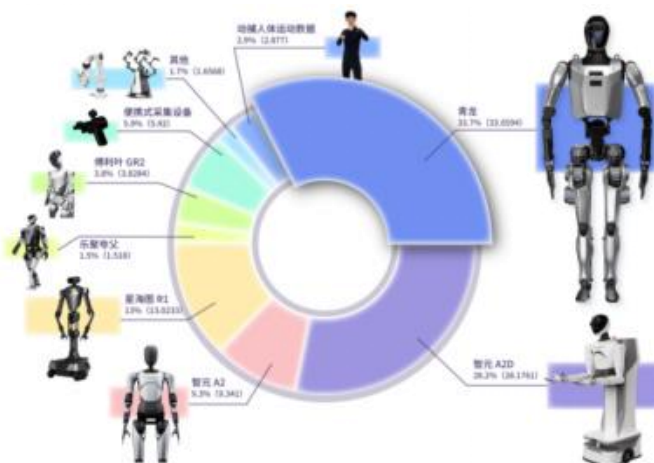
图64：青龙机器人练习抓取杯子



资料来源：浦东发布，国信证券经济研究所整理

在数据集方面，作为全球首个规模突破百万量级的异构机器人数据集“白虎”数据集，以真实数据驱动-模型训练迭代-实体应用闭环为核心路径，一举攻克了数据体量、工程标准、应用广度与智能深度四大关键领域的难题，展现其超强技能。

图65：白虎数据集涵盖了多款机器人本体



资料来源：人形机器人（上海）有限公司，国信证券经济研究所整理

人机交互方面，龙跃大模型以“自然语言驱动”为核心，构建了从多模态输入到高保真动作生成的完整闭环，颠覆传统运动控制范式。用户无需学习专业术语或操作复杂软件，仅需像与人类对话一样发出指令，龙跃大模型即可自动解析语义并生成对应的连贯动作，并支持通过追加指令实时调整细节。“龙跃”拥有四大核心技术优势：多模态交互，低门槛驱动；拟真度与时序一致性双突破；结构生成与细节优化并重；轻量化设计，赋能广泛场景。

开源社区方面，“格物-致知”通用具身智能开发平台，支持自定义配置机器人快速适配场景需求，通过低代码编程实现复杂装配任务，并基于开源硬件驱动与仿真环境助力高校开展机器人学研究，降低实验成本。

图66: 龙跃大模型



资料来源：人形机器人（上海）有限公司，国信证券经济研究所整理

图67: 格物致知平台



资料来源：人形机器人（上海）有限公司，国信证券经济研究所整理

3. 人形机器人车企公司梳理

3.1 汽车是 AI 端侧应用的重大场景之一

算力奠基、模型迭代加速的背景之下，人工智能产业即将进入应用爆发时刻。在众多端侧应用之中，汽车行业拥有逾 10 亿全球存量用户，吸引特斯拉、“蔚小理”、华为、小米等科技企业纷纷入局，作为具备广泛用户却尚未完成智能化全面升级改造的移动终端，汽车将融合电子、计算机、互联网、通信等核心技术，完成世纪性的产品迭代。

展望未来，汽车相当于一个“轮式”专用机器人，工作场景在于完成二维平面上

的横纵向路径规划和运动控制，替代原驾驶员的劳动，场景成熟，商业模式易变现，规则明确、数据充足，在端到端大模型推进下，预计将早于通用足式机器人（即人形机器人）实现在现实生活中的量产应用。驾驶场景积累的感知-运控算法基础和硬件工程化能力，对于后续车企后续转型机器人本体公司有强参考性。

表11: 智能驾驶与人形机器人本质上都为 AI 端侧应用

	替代	场景	数据	模型	商业模式
智能驾驶汽车	驾驶员	单一，驾驶场景	真实数据+虚拟仿真（世界模型）	阶段性-端到端架构，VLA 模型	ToB、ToC
人形机器人（工厂）	工人	单一，工业场景	真实数据+虚拟仿真（世界模型）	阶段性-端到端架构，VLA 模型	ToB
人形机器人（消费）	家政	复杂、高泛化性	真实数据+虚拟仿真（世界模型）	阶段性-端到端架构，VLA 模型	ToC

资料来源：中国信通院，国信证券经济研究所整理和绘制

汽车和机器人产业链重叠度高，车企转型机器人企业大势所趋

传统智能汽车与机器人结构均可大致分为感知、决策、执行三大层面。智能汽车可大致分为底盘之上+之下，底盘之上是智能座舱下人机交互实现场景，细分产业链为“芯片-系统-应用-显示”；底盘之下主要为智能电动和智能驾驶，智能电动集成三电系统，为整车运动的核心能源支撑；智能驾驶主要基于“传感器-计算平台-自动驾驶算法”作用到执行层面，实现横向和纵向运动控制，整体可分为“感知-决策-执行”三大层面；人形机器人指能够模仿人类运动、表情、互动及动作的机器人，本质上同样可划分为感知、决策、执行三大层面。

表12: 机器人与智能汽车的零部件具有一定相通性

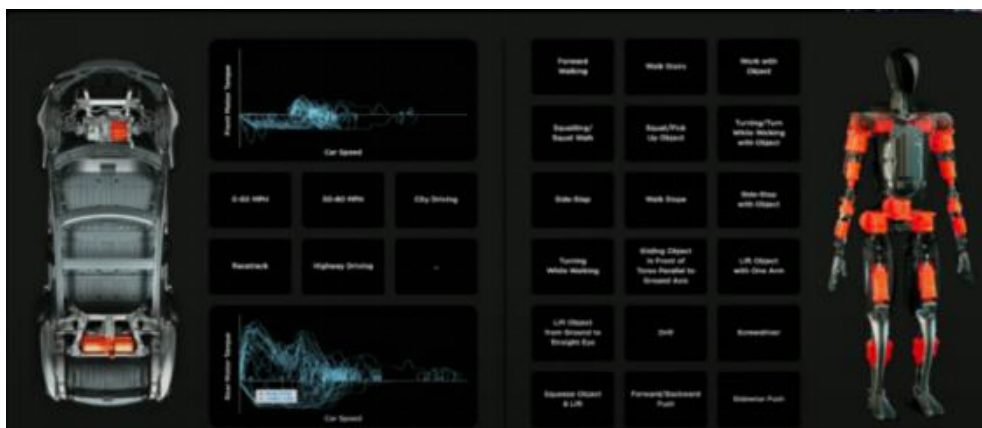
	智能汽车	人形机器人
感知层	摄像头、超声波雷达、毫米波雷达、激光雷达等	力矩传感器、位置传感器、摄像头、毫米波雷达等
决策层	域控制器（智能驾驶芯片、软件 ECU 等）	AI 芯片等
执行层	线控底盘（线控制动、线控转向、电控悬架）、智能车灯、其他	手部、脚部、腿部等运动
相通部件	电机、传感器、减速/转换机构（减速器、丝杠、齿轮等）、电池、轴承、结构件、冷却系统、控制器、芯片、软件	

资料来源：特斯拉官网，汽车之家，国信证券经济研究所整理

以特斯拉汽车与人形机器人为例，其 Optimus 在多个层面沿用汽车领域技术：

- **机械结构**：据特斯拉 AI DAY，特斯拉正为 Optimus 研发电池、执行器，以将功耗保持最低水平，从传感到融合、再到充电管理等方面，借鉴在汽车设计方面的经验；并采用与汽车相同的芯片，支持 Wi-Fi、LTE 链接和音频交流。
- **软件方面**：Optimus 有望共用汽车 FSD 自动驾驶系统及 Autopilot 神经网络技术，同时特斯拉基于汽车安全模拟分析能力打造机器人安全性，在交通事故模拟中，特斯拉通过软件优化+电池保护等提升系统软硬件的安全性保障。

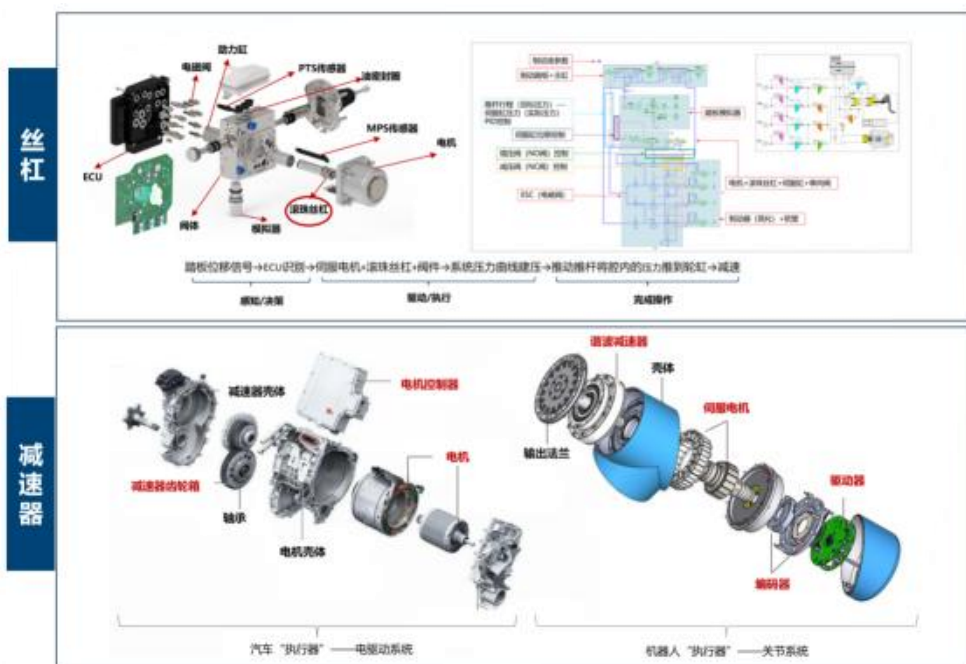
图68: 特斯拉车端 VS 人形机器人



资料来源：特斯拉 AI Day，国信证券经济研究所整理

汽车是年千万量级需求的终端场景，人形机器人远期也有望达千万需求量级，二者在原材料、设计、工艺、设备、装配、成本管控能力、产品质量管控能力体系以及 AI 能力等方面具相通性，我们认为在汽车领域具有相关产品、技术储备的公司，有望实现产品从车端向人形机器人延伸。

图 69：汽车与人形机器人的线控制动核心部件拆解



资料来源：拓普集团官网，高工机器人，绿的谐波，新剑传动官网，国信证券经济研究所整理

- **零部件公司研发、代工机器人核心部件：**汽配公司布局机器人核心部件：部分机器人部件与汽零具相通性（汽车内部本身就含较多执行器），有望实现向机器人延伸；1）**线控制动**，车端线控制动部件包括电机、滚珠丝杠、模拟器、电磁阀、传感器、ECU 等，机器人线性执行器包括电机、传感器、丝杠、轴承等部件；2）**电驱动系统**，汽车动力结构为电机-电控-变速箱（减速器），机器人旋转执行器包括电机-控制器-减速器等，同样高度重合；目前也有较多车端零部件公司在进行机器人领域的布局，产业升级已经在推进之中。

- **整车厂开发机器人本体：**1) 应用层面：如特斯拉机器人最初即用在自身超级工厂，车企本身的属性也提供了最好的、最适配性的应用场景；2) AI 能力：如前文所言，在端到端大模型推进下，智能车预计将早于足式机器人实现现实生活中量产应用。而基于驾驶场景积累的感知-运控算法基础和硬件工程化能力，对于后续车企转型机器人本体公司有强参考性。

2024 年开始，通过车企创始人的公开访谈及研发招聘行为，我们观测到很多国内车企开始布局机器人本体业务。

表 13: 车企开始布局人形机器人本体业务

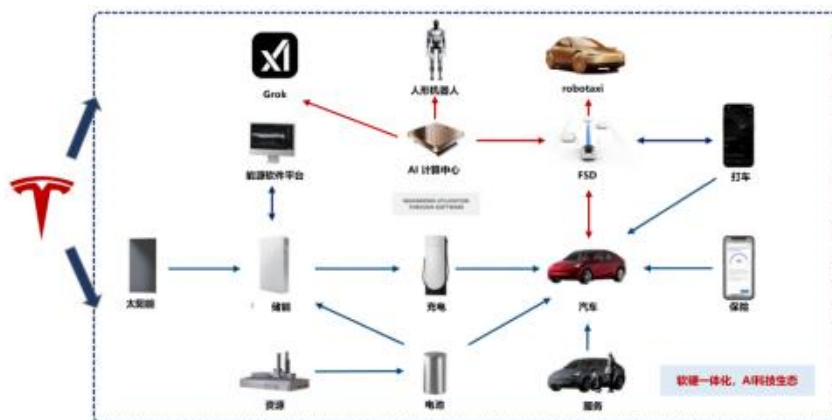
汽车企业	研发进展	产品进展
比亚迪	2024 年 12 月“比亚迪招聘”官方公众号发布具身智能研究团队招聘通知，所需专业包括机械类、自动化类、力学类、计算机类、数学类、电子信息类、电气类等多个具身智能领域。 - 比亚迪的具身智能研究团队成立于 2022 年，深入挖掘比亚迪规模化的应用场景需求，比亚迪在机器人本体及系统的定制开发上，不断增强机器人的感知与决策能力，推进具身智能在工业领域的落地应用。比亚迪具身智能研究团队目前已开发完成系列产品，如工艺机器人、智能协作机器人、智能移动机器人等，其中还包括类人形机器人。 2025 年 7 月 7 日，比亚迪与香港科技大学签署合作框架协议，共同成立“香港科技大学-比亚迪具身智能联合实验室”，聚焦机器人技术与智能制造的前沿研究，致力推动技术创新与产业应用。比亚迪将于未来数年投入数千万港元支持实验室运营，攻关具身智能领域；双方将重点探索数据驱动具身智能研究，开发适用于模拟与真实环境的操作数据采集新方案，降低数据获取成本。	预计布局中
奇瑞	2024 年 8 月，奇瑞成立安徽开阳科技有限公司，经营范围包括软件开发、智能机器人的研发等。2024 年奇瑞招标公众号发布安徽普思机器狗 CE 认证采购项目。 2025 年 1 月，安徽墨甲智创机器人科技有限公司成立，注册资本 1 亿人民币，由奇瑞汽车全资持股，经营范围含智能机器人销售、智能机器人的研发、工业机器人销售、智能基础制造装备制造、人工智能应用软件开发、人工智能基础软件开发、信息系统集成服务、智能控制系统集成等。 2025 年 3 月，奇瑞在智能化发布会上展示机器人，表示奇瑞墨甲机器人开发的机器人和机械狗，已经在马来西亚上岗，预计短期用于 4s 店协助销售业务，强调其具备高度拟真外观和交互能力。 4 月 26 日，奇瑞与 AiMOGA 团队联合研发的墨甲人形机器人在奇瑞国际公司园区完成首批 220 台全球交付。墨甲机器人凭借奇瑞在辅助驾驶、智能座舱、CheryGPT 大语言模型和智能传感器等领域的技术优势，已具备在 4S 店提供主动问候、销售指导、车型推荐和绕车讲解等实际服务能力，在马来西亚 4S 店应用。	奇瑞人形机器人已经在马来西亚上岗，预计短期用于 4s 店协助销售业务
理想	- 理想汽车创始人李想在访谈中表达未来“100%会做人形机器人”的意愿。 2025 年 3 月，理想发布自研的 VLA 模型——MindVLA，定位“机器人大大模型”，将空间智能、语言智能和行为智能统一在单个模型。	-
小米	2023 年 4 月北京小米机器人技术有限公司成立，致力于提供高品质的智能机器人产品和解决方案。 - 透过智能汽车的技术迁移，首先打造应用于工业制造端的专用机器人，且先在自家工厂尝试落地试点，后续再逐步拓展到更多场景与不同行业。 - CyberOne 机器人的智能、机械能力，由小米机器人实验室自研完成。	2022 年公布首款人形机器人 Cyberone
赛力斯	2024 年 8 月，赛力斯在招聘软件上陆续发布多个人形机器人相关岗位，包括具身智能控制工程师、嵌入式软件开发（电机-机器人）、产品经理（机器人）、具身智能应用开发 leader 等，工作地点位于重庆。 2025 年 3 月，重庆凤凰技术有限公司成立，法定代表人为朱乾勇，注册资本 5000 万元，经营范围包含：人工智能基础资源与技术平台；人工智能理论与算法软件开发；人工智能公共数据平台，赛力斯全资持股。3 月，赛力斯联合北京航空航天大学成立北京赛航具身智能技术有限公司，注册资本 5000 万元，主要从事智能机器人的研发；智能机器人销售；服务消费机器人制造；服务消费机器人销售；人工智能理论与算法软件开发；人工智能基础软件开发等，由赛力斯旗下凤凰技术持股 70%。	预计布局中
小鹏	- 软件方面，小鹏汽车在智能驾驶领域的算法、软件能力的技术积累一定程度可以赋能给机器人产品，小鹏 AI 鹰眼视觉系统实现 720 度无死角的环境感知能力；支持小鹏 AI 端到端大模型+强化学习，机器人双足自然行走，在避障方面展现出了智能驾驶级别的安全性及稳定性；交互能力升级，Iron 搭载与小鹏汽车同款的小鹏天玑 AIOS，不仅能进行复杂的语言理解，还能进行逻辑推理，实现人机交互。 - 硬件方面，采用小鹏自研的图灵 AI 芯片，拥有 40 核处理器，算力为 3000T，自主研发高性能关节。 2025 年 3 月，小鹏 IRON 人形机器人已在广州工厂投入使用，并计划于 2026 年实现 L3 初阶能力的量产。	IRON 已在广州工厂投入使用，并计划于 2026 年实现 L3 初阶能力的量产
长安	2024 年 11 月 15 日长安汽车宣布，未来五年内计划投入超 500 亿布局海陆空立体交通方案和人形机器人。在机器人领域，将开展类人机器人、汽车生态机器人等相关产业布局。	2027 年前发布人形机器人，2028 年实现量产下线
广汽	- 硬件方面，GoMate 灵巧手、驱动器、电机等核心零部件完全自研。 - 软件方面，针对特定应用场景对开源大模型进行调优训练，通过海量数据的输入和深度学习的优化。	2024 年 12 月推出人形机器人 GoMate，融合四轮足、两轮足两种模式

资料来源：各公司官网，高工机器人，国信证券经济研究所整理 注：不完全列举，具体以公司实际进展为准。

以特斯拉为例，其估值体系也实现从单一汽车制造类企业朝 AI、科技类企业重塑，其类似苹果围绕 iOS 从芯片到系统、再到硬件设计打造的软硬一体化体系，特斯拉亦从 FSD、电池、造车、机器人、Grok 统一调控，通过“FSD+DOJO+车+机器人+Robotaxi”不断赋能新商业模式，向具有更广阔盈利空间的 AI 业务扩展。我们当下看到比亚迪、华为、小米躬身入局，跨越电车，向智能汽车、机器人多个领

域布局。

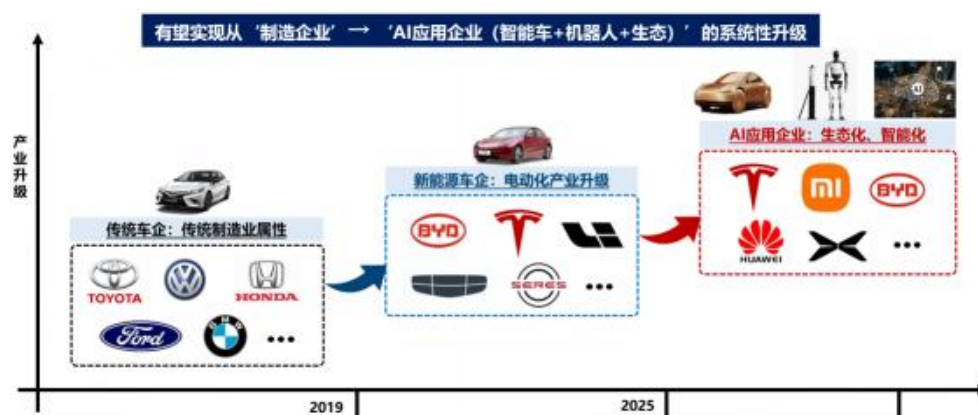
图70: 特斯拉商业生态



资料来源：特斯拉，国信证券经济研究所整理

我们认为在以上逻辑开始演绎时，提前进行 AI 相关布局的车企有望从制造企业往 AI 应用企业（智能车+机器人）的系统性估值提升：从传统制造业的油车，到能源变革下的电车，再到 AI、智能化升级下的智能车和机器人，实现产业升级。

图71: 车企有望实现从制造企业到 AI 应用企业的产业升级



资料来源：各公司官网，国信证券经济研究所整理和绘制

人形机器人有望成为新能源汽车之后的颠覆性产品，2026 年有望成为量产元年。23 年 11 月工信部印发《人形机器人创新发展指导意见》，指出人形机器人有望成为继计算机、智能手机、新能源车后颠覆性产品；伴随以 Optimus 为代表的机器人快速迭代，人形机器人商业化应用逐步落地：1) **应用场景**：预计初期主要用在工厂等特殊场景，如特斯拉 Optimus 应用场景初期用于其超级工厂，后逐渐向外蔓延，后续辐射到其他制造工厂或相关细分应用场景（商用），远期随机器人持续迭代升级，逐渐落地至通用性（家用）场景；2) **量产节奏**：预计短期以特定（定制化）场景为主导，节奏具一定分散性、阶段性，远期为大批量通用性量产（类似汽车），核心驱动力预计主要为政策、技术、降本和应用场景的需求。

图72: 特斯拉人形机器人量产和应用场景探讨



资料来源：特斯拉官网，特斯拉 AI Day，高工机器人，中国机器人网，国信证券经济研究所整理和预测

3.2 车企：有优先应用场景，技术、供应链同源性高

■ 特斯拉

人形机器人产业引领玩家。特斯拉于 2021 年提出人形机器人相关设计概念，于 2022 年 9 月在 AI Day 上首次展示 Optimus 人形机器人产品，2023 年 5 月特斯拉展示 Optimus 的进展，能够执行捡起物品等任务，并在特斯拉工厂中执行简单任务，到 23 年底发布 Optimus Gen-2 产品，实现性能、能力的全方位提升；马斯克预计特斯拉 Optimus 机器人价格最终可能会低于 2 万美元，量产预计可达数百万台，并宣称人形机器人将成为未来特斯拉长期重要价值来源；我们认为特斯拉有望持续给全球机器人市场带来类似于其在新能源汽车领域的“鲶鱼效应”，激发人形机器人产业进展。

图73：特斯拉 Optimus 人形机器人迭代过程



资料来源：GGII，人形机器人联盟公众号，机器之心，高工机器人，国信证券经济研究所整理

持续迭代升级，手部精细操作能力以及足部自由移动能力显著提升。2024 年 11 月特斯拉发布 Optimus 可灵巧地接住网球的视频，新灵巧手 22 个自由度；2024 年 12 月 Optimus 最新进展发布，可实现野外环境行走，是特斯拉首次展示 Optimus 在户外自然环境中的移动能力，已经和人类相仿，在下坡时甚至可以“小跑”，且平衡能力也实现突破；下坡时 Optimus 险些摔跤，但凭借自身平衡能力及时调整过来，此次户外行走是在机器人没有视觉输入的情况下保持平衡，除视觉外其他传感器被嵌入式计算机上的神经网络中运行和处理（运行时间约 2~3 毫秒）。

图74: Optimus 实现灵活抓球



资料来源：特斯拉，国信证券经济研究所整理

图75: Optimus 实现下坡小跑动作



资料来源：特斯拉，国信证券经济研究所整理

硬件方面，结合 AI DAY 信息我们大概拆解特斯拉 Optimus 内部构造：全身共有近 50 个自由度（躯干 28+手部 22 个），身高约 173cm，体重 73kg，设计行走速度 8km/h，可搬运约 20 磅的货物，搭载 2.3Kwh 电池组。1）感知层：主要包括摄像头、毫米波雷达等传感器；2）决策层：为机器人脑，预计主要为 AI 芯片、FSD 系统等；3）执行层：线性执行器、旋转执行器以及手部关节；4）其他：主要包括电池及管理系统，机体结构（仿生结构、其他特殊材料等）。基于此，结合 AI DAY 信息我们大概拆解特斯拉 Optimus 内部构造：

表14: 特斯拉 Optimus 机器人关节部位及价值量测算

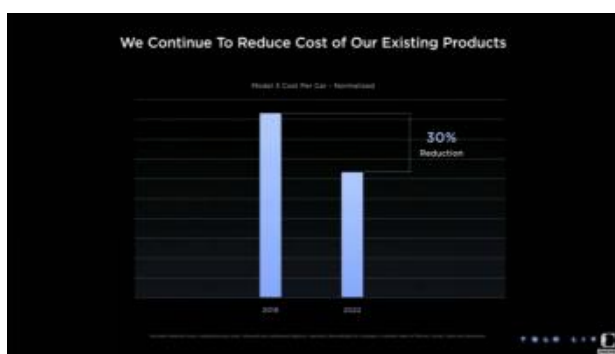
关节部位价值量测算	关节部件	单机器人使用量 (个)	100 万台量级时后单价 (元)	单套机器人价值量 (元)	100 万台机器人空间预估 (亿元)
14 个旋转关节	电机+驱动器	14	500	7000	70
	减速器（谐波）	14	900	12600	126
	力矩传感器	14	300	4200	42
	编码器	14	100	1400	14
	轴承	14	50	700	7
	合计		1850	25900	259
14 个直线关节	电机+驱动器	14	500	7000	70
	滚珠/滚柱丝杆	14	1000	14000	140
	力传感器	14	300	4200	42
	编码器	14	100	1400	14
	轴承	14	50	700	7
	合计		1950	27300	273
2 个灵巧手	无刷直流/空心杯	34	600	20400	204
	微型丝杠	34	600	20400	204
	腱绳	44	60	2640	26.4
	编码器	14	100	1400	14
	齿轮箱（未定）	34	100	3400	34
	合计		1460	48240	482
其他	结构件	1	10000	10000	100
	电子皮肤		10000	10000	100
	六维力传感器	4	2000	8000	80
	热管理	1	2500	2500	25
	摄像头、雷达		未知		未知
	电池	1	2500	2500	25
合计			27000	33000	330
关节+灵巧手合计				134440	1344

资料来源：鸣志电器官网，雷赛智能招股书，步科股份招股书，绿的谐波公告，柯力传感公告，1688，国信证券经济研究所整理和预测

核心优势：软硬件能力卓越，有望率先实现量产

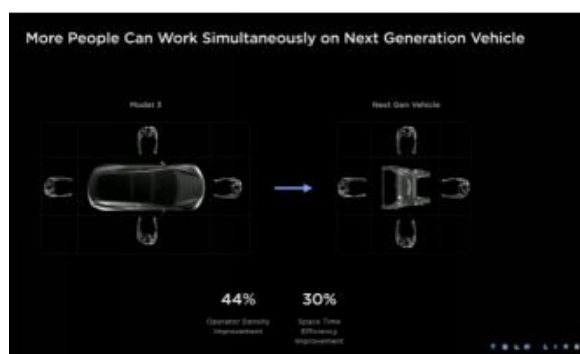
- ✓ **工艺&硬件层面：**1) **工艺层面：**特斯拉具备极强的工业、生产制造能力，具备领先的①**成本控制能力**（从 18 年到 22 年，Model 3 的成本降低 30%）；②**工艺创新能力**（一体化压铸、电池技术）；③**工艺优化水平**（采用由工人或机械臂同时时间对不同部分操作的理念，组装工序优化升级，有望节省 50%组装成本）；2) **硬件层面，**一方面电控、控制器、芯片等核心部件自研，全球范围配备完善且成熟的零部件供应链系统，可迅速整合资源实现量产，并采用本地化配套模式实现降本，如特斯拉超级工厂目前已实现超 95%的零部件国产化率。依托国内供应商的特斯拉向供应商传递新的制造理念，优化生产工艺，提高效率，降低成本。

图 76: 特斯拉制造成本降低



资料来源：特斯拉，国信证券经济研究所整理

图 77: 特斯拉生产和组装统一



资料来源：特斯拉，国信证券经济研究所整理

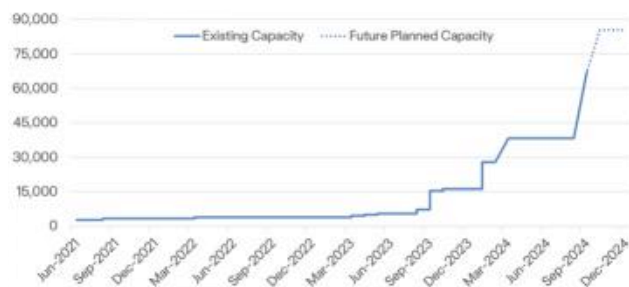
算法&应用层面，1) **应用层面：**特斯拉具极强定义、深挖应用场景的潜力，第一批机器人有望在特斯拉超级工厂得到适配性应用，后续逐步推向外供；2) **算法层面：**特斯拉车端与机器人端在算法、算力、数据上协同，持续迭代人形机器人“大脑与小脑”。①**算法上，**历经 8 年迭代升级，特斯拉实现从传感器输入到车辆驾驶行为输出的 One Model 一体化端到端自动驾驶大模型（21 年 BEV+Transformer—22 年引入 Occupancy Network—2023 年引入端到端融合大模型）；②**数据上，**端到端模型训练需要海量数据，特斯拉通过构建数据采集→搭建数据集→自动标注→送入模型训练→量化部署上车的数据闭环，利用车端数据对大模型进行训练，相关经验、成果有望沿用至机器人领域，根据特斯拉官网，截至 2025 年底，特斯拉 FSD 累计行驶里程突破 70 亿英里；③**算力上，**2023 年 7 月 Dojo 超级计算机正式投产，神经网络算训能力进一步加强，24Q3 特斯拉 AI 训练计算量增长超 75%，德州工厂部署 2.9 万套 H100 芯片集群；2024Q4 特斯拉在德州工厂完成 Cortex 的部署，约 5 万个 H100。Cortex 帮助实现 FSD 的 V13，该系统在安全性和舒适性方面有重大改进，包括数据增加 4.2 倍、视频输入分辨率更高、延迟减少 2 倍以及重新设计的控制器等。

图 78: FSD 累计行驶里程(百万英里)

图 79: 特斯拉 AI 算力的内部预测



资料来源：特斯拉，国信证券经济研究所整理



资料来源：特斯拉，国信证券经济研究所整理

■ 比亚迪

比亚迪基于垂直整合、全栈自研的优势，通过璇玑智能化架构打通电动化与智能化，形成整车智能化的布局。整车智能通过璇玑智能化架构，实现电动化与智能化高效融合。整车智能打破不同系统间的壁垒，做到实时捕捉内外部环境的变化，在毫秒之间将信息汇总进行决策，迅速调节车辆状态，提升驾乘安全性和舒适性，做到全面感知、集中思考、精准控制和协同执行。

2023 年比亚迪先后发布易四方架构、云辇智能车身控制系统、天神之眼高阶智能驾驶辅助系统，其中天神之眼高阶智能驾驶辅助系统以自研硬件、软件以及算法构建全栈自研整车系统级解决方案。比亚迪首创双循环多模态 AI——璇玑 AI 大模型，将人工智能应用到车辆全领域。璇玑拥有业界最庞大的数据底座、行业领先的样本量和高算力，覆盖整车三百多个场景，赋予整车智能持续进化的能力；2025 年比亚迪在智能驾驶侧有望全面发力，智能驾驶领域，全新 DiPilot 智能驾驶平台，“天神之眼”高阶智能驾驶辅助系统量产交付，同时还成为全国首个获得 L3 级测试牌照的车企。比亚迪将不断降低智驾门槛，以更领先的技术、更具竞争力的成本，加速智驾普及。

图80：比亚迪智能座舱和智能驾驶布局



资料来源：公司官网，公司官方微信公众号，国信证券经济研究所整理

2 月 10 日比亚迪举办智能化战略发布会，重磅发布全民智驾战略，核心优势在于依托数据、研发、制造体系等。在整车智能战略下，比亚迪构建起天神之眼技术矩阵，其全系车型将搭载高阶智驾技术。1) 比亚迪拥有巨大的数据优势，目前累

计销售超过 440 万台搭载 L2 及以上驾驶辅助的车辆,构建起中国最大的车云数据库;2) 拥有全球最大的研发工程师团队,研发人员超 11 万名,其中智驾工程师共 5000 多名,可实现软硬件全栈自研;3) 具备全球规模最大的新能源汽车生产制造体系;依托数据优势、智能化研发优势、制造体系优势,我们认为比亚迪在潜在的人形机器人领域有望持续获得突破。

需求场景广阔,基于生态链合作的考虑,早期通过财务投资的方式布局人形机器人赛道。在早期布局中,比亚迪主要采取财务投资的形式布局人形机器人,如智元和优必选。2023 年 8 月比亚迪领投智元机器人的 A+轮融资,持股比例达 3.76%。2012 年比亚迪出资优必选天使轮融资;2024 年 11 月,优必选全新一代工业人形机器人 Walker S1 已进入比亚迪汽车工厂实训,并与 L4 级无人物流车、无人叉车、工业移动机器人和智能制造管理系统协同作业,这也是全球范围内首个人形机器人与无人物流车等协同作业的工业场景解决方案;2025 年 4 月,比亚迪以数亿元资金入股触觉传感器及人形机器人公司——帕西尼感知,成为其最大外部股东,持股约 13.37%。

比亚迪招聘具身智能研究团队,或将发力人形机器人。2024 年 12 月“比亚迪招聘”官方公众号发布一则招聘消息——面向 2025 届全球高校硕士、博士毕业生招聘具身智能研究团队。招聘所需专业包括机械类、自动化类、力学类、计算机类、数学类、电子信息类、电气类等多个领域。比亚迪的具身智能研究团队成立于 2022 年,通过深入挖掘公司规模化的应用场景需求,比亚迪在机器人本体及系统的定制开发上,不断增强机器人的感知与决策能力,推进具身智能在工业领域的落地应用。比亚迪具身智能研究团队目前已开发完成系列产品,如工艺机器人、智能协作机器人、智能移动机器人等,其中还包括类人形机器人。

表15: 比亚迪具身智能招聘岗位

职位名称	研究方向
高级算法工程师	深度学习、控制算法、伺服驱动器、感知、交互算法等
高级结构工程师	人形机器人、双足机器人、四足机械狗、多模态机械结构等
高级仿真工程师	分析仿真结果、有限拆分、有限元等
高级工艺工程师	切削加工、钣金、焊接、涂胶、铸造、冲压、线切割、3D 打印
高级硬件工程师	原理图、PCB、嵌入式 ARM 系统
高级测试工程师	嵌入式软件功能测试
高级机器人工程师	机器人维护、机器人售前售后工作
高级感知算法工程师	感知、Pytorch、TensorFlow、感知模式交互
高级软件系统工程师	Modern C++、Linux、人工智能、大模型、SoC 体系架构
高级软件工程师	ProfiNET、EtherCAT、CANopen、MODBUS、ROS、ROS2

资料来源: 比亚迪招聘公众号, 国信证券经济研究所整理

比亚迪与香港科技大学成立具身智能实验室, 推动机器人与智能制造创新。2025 年 7 月 7 日, 比亚迪与香港科技大学签署合作框架协议, 共同成立“香港科技大学-比亚迪具身智能联合实验室”。将聚焦机器人技术与智能制造的前沿研究, 致力推动技术创新与产业应用。比亚迪将于未来数年投入数千万港元支持实验室运营, 攻关具身智能领域; 双方将重点探索数据驱动具身智能研究, 开发适用于模拟与真实环境的操作数据采集新方案, 降低数据获取成本。所获数据将用于训练具身智能大模型, 使机器人能在家庭或工厂环境中自主完成多类任务。此外, 双方还将展开自动驾驶方向的深度合作, 提升高阶自动驾驶技术的安全性和可靠性。

图81: 比亚迪与港科签署合作协议



资料来源：公司官网，公司官方微信公众号，国信证券经济研究所整理

■ 小鹏汽车

小鹏汽车在 2023 年 AI 科技日上发布的首款双足人形机器人 PX5，通过自主研发的高性能关节技术实现高稳定性，并且可以连续行走和跨越多种障碍物，也配备了末端触觉感知的传感器，可实现类似于人类的柔顺抓取、搬运操作，包括握手、倒水、抽纸巾、举起物体等。PX5 身高 1.5m，搭载的灵巧手单手具有 11 个自由度，超轻量级仿人机械臂有 7 个自由度。

2025 年 11 月小鹏发布全新一代 IRON：采用仿人脊椎、仿生肌肉、柔性皮肤，全身 82 个自由度，单手 22 个自由度，搭载 3 颗图灵 AI 芯片、总算力 2250TOPS 及第二代 VLA。公司 2026 年 6 月披露，量产版计划三季度亮相、年底量产，先在小鹏门店试商用，2027 年起面向境内外商业客户交付。

表16: 小鹏人形机器人迭代过程

时间	具体内容
2020 年	何小鹏公开表达对通用机器人的兴趣，并称“2025-2040 年，人形机器人将会逐步走向家庭与更丰富的应用场景”。同时，小鹏收购了四足机器人企业 Dogotix，随后成立鹏行智能，正式走向打造人形机器人的道路。
2021 年	小鹏鹏行公布了首款智能机器马的第三代原型机，其内部代号为“小白龙”，具备可骑乘、强自主运动、情感化交互的能力。
2022 年	小鹏鹏行宣布完成 A 轮融资签约，该轮融资超 1 亿美元。此轮融资领投方之一为 IDG 资本，小鹏汽车等股东跟投。
2023 年 9 月	小鹏汽车以 9896 万美元的价格，收购鹏行余下的 74.82% 股份，并在十月正式发布小鹏第一款双足人形机器人 PX5。
2024 年 3 月	在英伟达 2024 年 GTC 大会上，英伟达创始人兼 CEO 黄仁勋推出了人形机器人通用基础模型 Project GR00T，并与九台人形机器人集体亮相，小鹏 PX5 正是其中之一。
2024 年 7 月	何小鹏在“小鹏汽车 AI 智驾技术发布会”上提到，AI 时代将统治科技业十年以上，而目前在 AI 领域有四大方向值得投入：芯片、大模型、无人驾驶和机器人。
2024 年 8 月	何小鹏在微博发布视频，展示了机器人灵巧手在手机上预订一辆 MONA M03 新车的操作过程。灵巧手的手指配备了触觉传感器阵列，让它能够在手机屏幕上准确地点击相应目标，完成订车流程。
2024 年 11 月	小鹏正式发布第二代人形机器人 Iron，并且还宣布已经在自家工厂落地试点，推进速度快。
2024 年 3 月	何小鹏透露小鹏 IRON 人形机器人已在广州工厂投入使用，并计划于 2026 年实现 L3 初阶能力的量产。

2025 年 11 月 小鹏发布全新一代 IRON，拟人化程度进一步提高。

资料来源：高工人形机器人公众号，小鹏汽车，国信证券经济研究所整理

2025 年 11 月小鹏 AI 科技日发布最新人形机器人 Iron。小鹏提出了首个通用人形设计系统（General-Purpose Humanoid Design Framework）。这是一套可扩展的设计体系，让机器人能在不同身高和比例下，始终保持人形体态的匀称、美感、机械平衡。相比上一代 IRON，新增的肩部与腰部的自由度，让机器人能以更自然的方式完成弯腰、转体、耸肩等复杂而细腻的动作。而腰部结构的重新设计，使得 IRON 拥有灵活“脊椎”，从而实现人类步态中标志性的连贯“摆臀”节奏。

图82：小鹏 PX5 人形机器人



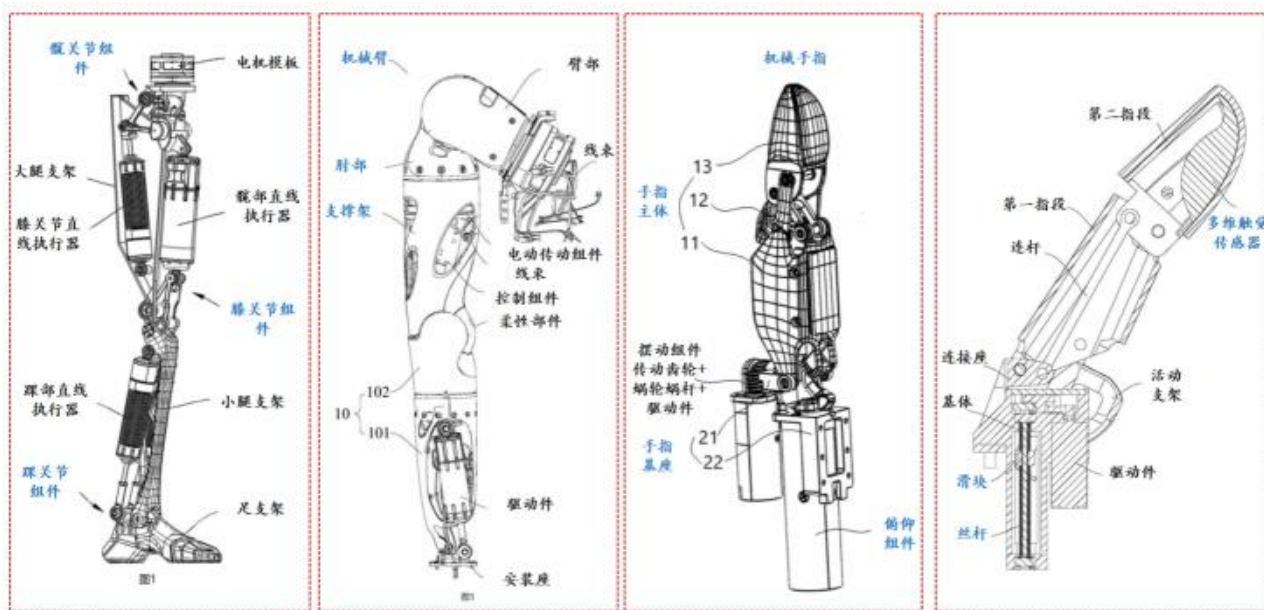
资料来源：小鹏官微，国信证券经济研究所整理

图83：小鹏 AI 机器人 Iron



资料来源：小鹏官微，国信证券经济研究所整理

图84：小鹏机器人专利相关结构拆解



资料来源：小鹏汽车专利文件，国信证券经济研究所整理

软件方面，小鹏汽车在智能驾驶领域的算法、软件能力的技术积累在一定程度上

可以赋能机器人产品，搭载小鹏 AI 鹰眼视觉系统，可实现 720 度无死角的环境感知；支持小鹏 AI 端到端大模型+强化学习，机器人双足自然行走，在避障方面展现出了智能驾驶级别的安全性与稳定性；交互能力升级，Iron 搭载与小鹏汽车同款的小鹏天玑 AIOS，不仅能进行复杂的语言理解，还能进行逻辑推理，实现人机之间的“流畅自由对话”。

图85：小鹏汽车端到端大模型进展节奏



资料来源：小鹏汽车，国信证券经济研究所整理

落地方面，何小鹏透露 L3 级人形机器人 26 年量产。2025 年 3 月 8 日何小鹏首次现身人大代表通道，他透露小鹏 IRON 人形机器人已在广州工厂投入使用。L3 意味着机器人不再只是“执行工具”，而是能自主感知环境、理解任务并进行复杂决策的智能体，这场变革的核心，在于 A 大模型、自动驾驶与机器人技术的深度融合。25 年上海车展期间，小鹏展出第四代人形机器人产品 IRON，接下来将在第五代机器人上部署图灵芯片，大幅提高机器人的端侧算力。2026 年 7 月 16 日，小鹏汽车在 MONA L03 全球发布会上，明确了人形机器人业务的核心落地规划：自研 IRON 双足人形机器人将于 2027 年正式进军全球市场。

图86：小鹏机器人端到端+强化学习能力



资料来源：小鹏官微，国信证券经济研究所整理

图87：小鹏机器人工厂工作



资料来源：小鹏官微，国信证券经济研究所整理

■ 赛力斯

企查查 APP 显示，2025 年 3 月 17 日，重庆凤凰技术有限公司成立，法定代表人为朱乾勇，注册资本 5000 万元，经营范围包含：人工智能基础资源与技术平台；人工智能理论与算法软件开发；人工智能公共数据平台；人工智能通用应用系统；人工智能行业应用系统集成服务；人工智能基础软件开发；人工智能公共服务平台技术咨询服务；软件开发；人工智能应用软件开发；机械设备研发；汽车零部件研发；智能机器人的研发；信息系统集成服务；工业机器人制造。股权穿透显

示，该公司由赛力斯全资持股。3月31日，赛力斯联合北京航空航天大学成立北京赛航具身智能技术有限公司，注册资本5000万元，主要从事智能机器人的研发；智能机器人销售；服务消费机器人制造；服务消费机器人销售；人工智能理论与算法软件开发；人工智能基础软件开发等，由赛力斯旗下凤凰技术持股70%。

工程化能力强，机器人已在工厂部署工作。赛力斯已建成三座智慧工厂。工厂运用物联网、大数据、数字孪生、5G、AI、BIM等新一代信息技术，融合先进制造技术与ICT技术，连接物理世界与数字世界，通过“一硬+一软+一网+一平台”的智能制造架构，打造“智造”生态圈。以实时在线的响应方式，快速精准地进行规模化定制生产。工厂执行严格的品控标准，以高水平智能制造实力为高质量交付赋能。3月14日，赛力斯发布工厂视频，先展示AGV机器人，视频最后展示一只机器人灵巧手。

图88：赛力斯整车超级工厂



资料来源：赛力斯，国信证券经济研究所整理

图89：赛力斯发布机器人工作视频



资料来源：赛力斯，国信证券经济研究所整理

2026年6月15日，赛力斯在重庆龙兴超级工厂正式对外展示首款人形机器人“小赛”，具备视觉识别能力，能够主动打招呼并进行语音互动，交互表现自然流畅，已在工厂内开展内部试用，主要承担客户接待、展厅引导及部分辅助质检任务。

图90：赛力斯小赛机器人



资料来源：赛力斯视频号，国信证券经济研究所整理

■ 奇瑞汽车

2024 年 4 月，奇瑞联手 AI 公司 Aimoga 共同研发人形机器人 Mornine，进军人形机器人赛道。Mornine 能够准确地理解人类语言交互意图，并将其转化为具体的行动策略和语言输出。其定位不仅仅是汽车市场服务人员，还将实现更广泛活动范围和更自然行走及导航功能，成为家庭助手。

24 年 8 月，奇瑞汽车成立安徽开阳科技有限公司，注册资本为 1 亿元，经营范围包括软件开发、智能机器人的研发、人工智能基础软件开发、人工智能应用软件开发、人工智能理论与算法软件开发等。法定代表人为奇瑞汽车。2024 年奇瑞在奇瑞招标公众号发布安徽普思机器狗 CE 认证采购项目。

2025 年 1 月 7 日，安徽墨甲智创机器人科技有限公司成立，注册资本 1 亿人民币，由奇瑞汽车全资持股，经营范围含智能机器人销售、智能机器人的研发、工业机器人销售、智能基础制造装备制造、人工智能应用软件开发、人工智能基础软件开发、信息系统集成服务、智能控制系统集成等。2 月初，奇瑞墨甲机器人已将 DeepSeek 模型部署到机器人云平台，将实现更个性化、更灵活的互动。

奇瑞墨甲机器人全球批量交付。2025 年 3 月 18 日奇瑞在智能化发布会上展示机器人，公司表示奇瑞墨甲机器人开发的机器人和机械狗，已经在马来西亚上岗，预计短期用于 4s 店协助销售业务，强调其具备高度拟真外观和交互能力。4 月 26 日，奇瑞与 AiMOGA 团队联合研发的墨甲人形机器人在奇瑞国际公司园区完成首批 220 台全球交付。墨甲机器人凭借奇瑞在辅助驾驶、智能座舱、CheryGPT 大语言模型和智能传感器等领域的技术优势，已具备在 4S 店提供主动问候、销售指导、车型推荐和绕车讲解等实际服务能力，并在马来西亚 4S 店得到应用。

图91：奇瑞 Mornine 机器人



资料来源：奇瑞汽车，国信证券经济研究所整理

图92：奇瑞招标展示机械狗相关招标采购项目信息

2024年安徽普思机器狗CE认证采购项目

奇瑞招标 2024年12月06日 16:10 安徽

采购类别：咨询服务类

1. 项目名称：2024年安徽普思机器狗CE认证采购项目

2. 项目概况与采购范围

2.1 项目概况

根据安徽普思的要求在规定时间内提供符合要求的技术工程师、测试资源，测试人员以完成机器狗CE认证。

2.2 采购范围

获取获取CE-RED认证证书，CE-MD认证证书，RoHS报告，WEEE报告，电池包UN38.3，鉴定书，总包证协议。

3. 技术要求

请见具体发放的采购文件。

资料来源：奇瑞招标微信公众号，国信证券经济研究所整理

4. 人形机器人科技公司梳理

科技互联网公司主要优势在于对大模型的算法训练有较深厚的积累，大语言模型可用于人形机器人“大脑”，同时资金和供应链优势也助力其从大模型向机器人本体进行延伸。

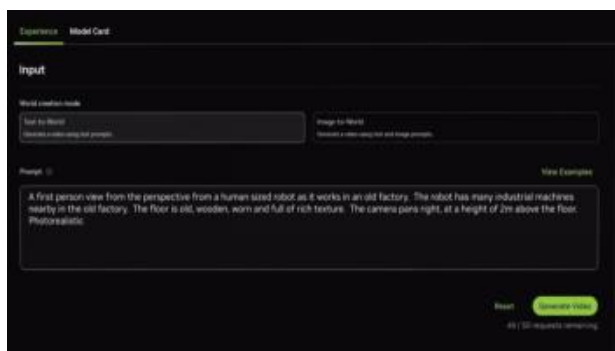
■ 英伟达

英伟达从芯片、算法方面赋能人形机器人开发，未来或将进入本体制造。2023年5月，英伟达对适用于边缘AI和机器人的NVIDIA Jetson平台上的Metropolis和Isaac框架进行软件扩展。2024年3月，英伟达推出人形机器人通用基础模型Project GROOT和基于NVIDIA Thor系统级芯片（SoC）的新型人形机器人开发套件Jetson Thor。在模型基础上人形机器人可理解人类自然语言，同时通过观看视频与人类演示动作，学习在不同场景中执行不同任务。2024年10月，英伟达GEAR团队发布AI小模型HOVER，该模型仅有1.5M参数，但足以控制人形机器人执行多种运动；2024年12月，在AWS大会上，英伟达推出NVIDIA Isaac Sim4.2，可帮助开发者在基于现实物理规律的虚拟环境中，对数千个人形机器人进行训练，收集仿真合成数据，让人形机器人学习不同的动作与技能。

世界模型方面，2025年1月7日英伟达在CES2025大会上发布NVIDIA Cosmos世界基础模型平台，Cosmos模型可以接受文本、图像或视频的提示，生成虚拟世界状态。Cosmos模型平台上有一系列开源、开放权重的视频世界模型，参数量从4B到14B不等，为机器人、自动驾驶汽车等在物理世界中运行的AI系统生成大量照片级真实、基于物理的合成数据，以解决训练数据不足的问题。

合作方面，2024年2月，英伟达成立通用具身智能团队GEAR。与多家领先的人形机器人公司合作，共同开发综合AI平台。2024年6月鸿海与英伟达联合在高雄建立计算中心，该中心的核心为NVIDIA Blackwell平台，将于2025年完成建设。2024年12月中国台湾联合新闻网报道英伟达已接触多家中国台湾机床和关键零部件制造商，目标包括征求关键零组件的技术与规格，并探索合作企业加入其人形机器人供应链的可能性。2025年1月6日中国台湾制造业巨头鸿海董事长刘扬伟表示，其公司正在与英伟达进行合作，通过采用英伟达的软件技术及硬件平台，在中国台湾南部城市——高雄开发人形机器人，还计划将人形机器人引入包括医疗保健行业在内的其他服务领域。

图93：英伟达 Cosmos 世界模型的文本提示词



资料来源：英伟达 2025 年 CES 大会，国信证券经济研究所整理

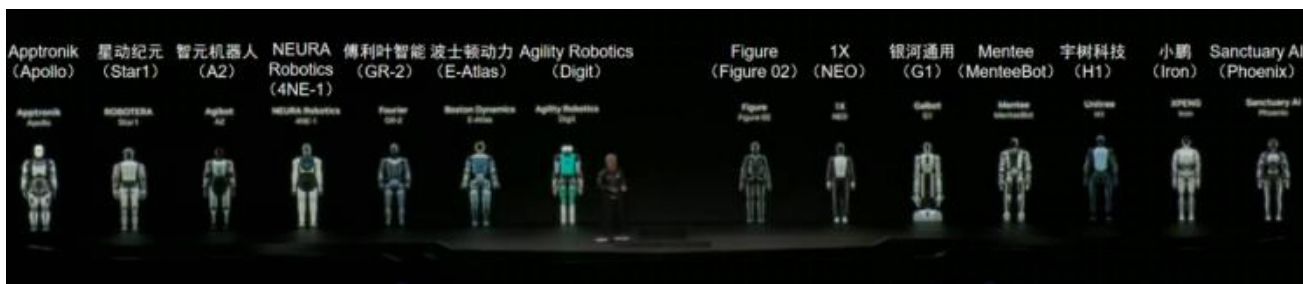
图94：英伟达 Cosmos 世界模型生成的视频



资料来源：英伟达 2025 年 CES 大会，国信证券经济研究所整理

在人形机器人领域，英伟达与国内的星动纪元、智元机器人、傅利叶智能、银河通用机器人、宇树科技、小鹏等均有合作。

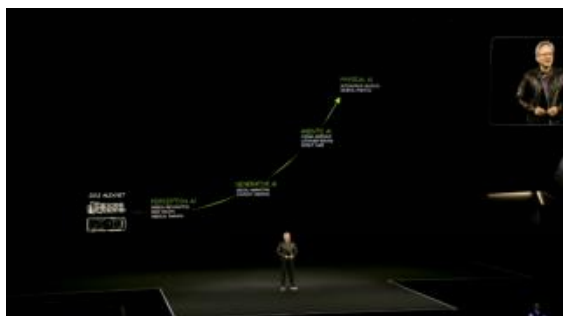
图95：英伟达 2025 年 CES 大会展示合作人形机器人



资料来源：英伟达 2025 年 CES 大会，国信证券经济研究所整理

3 月 19 日英伟达 CEO 黄仁勋在英伟达 GTC 2025 上发表主题演讲。黄仁勋表示，英伟达踩中 AI 风口的十几年。AI 已经经历三代技术范式的转移。从最初的意识 AI（Perception AI），到现在生成式 AI（Generative AI），再到目前代理式 AI（Agentic AI）时代，接下来是物理 AI（Physical AI），即机器人的时代。黄仁勋认为机器人产业“很可能是最大的产业”。演讲的现场，出现英伟达、谷歌与迪士尼合作研发的机器人，名为 Blue，由英伟达最新的 GROOT N1 模型加持（全球首款开源的人形机器人功能模型）。

图96: 英伟达认为下个时代是机器人时代



资料来源：英伟达 2025 年 GTC 大会，国信证券经济研究所整理

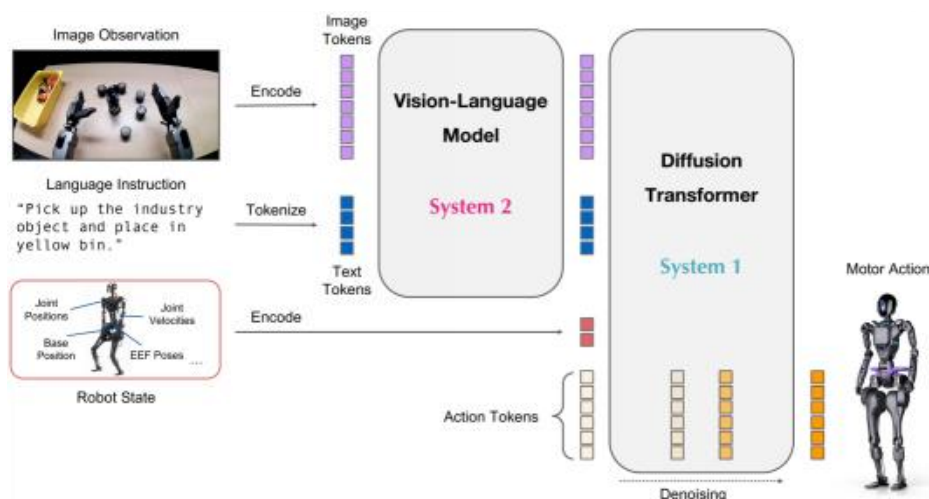
图97: 机器人 Blue



资料来源：英伟达 2025 年 GTC 大会，国信证券经济研究所整理

GROOT N1 是视觉-语言-动作（VLA）模型，采用双系统架构。“系统 1”是基于 diffusion transformer 模型，通过交叉注意力机制关注视觉语言模型（VLM）的输出 Tokens，采用专用的编码器和解码器处理可变维度的状态与动作，实现运动生成；“系统 2”是基于视觉-语言模型（VLM）的推理模块，处理机器人的视觉感知和语言指令，以解释环境并理解任务目标。二者在训练过程中紧密耦合、联合优化，以实现推理与执行的高效协同。

图98: 英伟达 GROOT N1 模型



资料来源：英伟达，国信证券经济研究所整理

■ 小米集团

2022 年小米公布首款人形机器人 Cyberone，2023 年 4 月北京小米机器人技术有限公司成立，致力于提供高品质的智能机器人产品和解决方案；2023 年 11 月北京具身智能机器人创新中心成立，由小米机器人、优必选、京城机电、亦庄机器人等联合组建。产业投资方式切入机器人领域。根据高工机器人统计，2015 年至今，小米系在机器人领域共计投资近 50 家企业，涵盖机器人及自动化、智能驾驶、高端装备等，总计融资额超 150 亿元，其中包括宇树科技等。

预计小米在人形机器人上节奏与特斯拉类似，透过智能汽车的技术迁移，首先打造应用于工业制造端的专用机器人，且先在自家工厂尝试落地试点，后续再逐步拓展到更多场景与不同行业。目前小米已发布四足仿生机器人 CyberDog、全尺寸人形仿生机器人 CyberOne 和全新的仿生四足机器人 CyberDog2，其中 CyberDog2 搭载小米自研的 CyberGear 微电机及自研算法。CyberOne 机器人身高 177cm，体重 52kg，机械关节模组最大提供 300Nm 峰值扭矩，96Nm/kg 峰值扭矩密度，全身自由度 21 个，时速达到 3.6km/h，背后的智能、机械能力，由小米机器人实验室自研完成。

图99：小米 CyberOne 人形机器人硬件



资料来源：小米机器人官网，国信证券经济研究所整理

图100：小米 CyberOne 人形机器人算法



资料来源：小米机器人官网，国信证券经济研究所整理

■ 华为

华为机器人布局：版图逐渐扩张。2022 年 4 月达闼机器人股份有限公司与华为技术有限公司签署合作协议，共同打造云端机器人城市运营联合解决方案，推广机器人运营服务，并开展多模态大模型开发、机器人创新应用等领域的全方位合作；2023 年 6 月华为成立东莞极目机器人有限公司，注册资本 8.7 亿元，华为全资持股；2024 年 12 月华为增资极目 30 亿元；2024 年 3 月，华为与乐聚机器人签署战略合作协议，双方共同探索“华为盘古大模型+夸父人形机器人”商用落地场景；2025 年 6 月，华为云发布 CloudRobo 具身智能平台。

图101：华为机器人的相关产业布局



资料来源：高工机器人，华为官网，华为云，国信证券经济研究所整理

2024 年 11 月 15 日，华为与深圳市前海管理局、宝安区人民政府合作共创的华为（深圳）全球具身智能产业创新中心正式启动运营，**同时联合产业链 16 家企业签署合作备忘录**，加速布局具身智能生态，其首期方案计划：将整合华为各部门的具身智能相关能力，共建具身智能大脑、小脑、工具链等关键根技术。在基础投入方面，由具身智能根技术实验室提供共性技术底座，大脑根技术研发及产品化涉及具身智能大模型、多模态大模型、算力，小脑关键技术研发包括柔性自动化装配、柔性自动化测试、多机器人协同制造、通用双臂精细制造等。此外，创新中心还将开启联创项目，由华为赋能具身智能技术，联合本体厂商及制造企业解决企业技术难题，打造解决企业实际问题的具身爆款产品。

图102：华为（深圳）全球具身智能产业创新中心签约仪式



资料来源：深圳前海公众号，国信证券经济研究所整理

表17：华为 16 家机器人合作企业情况

公司名称	是否上市	收入	主营业务及人形机器人进展
乐聚机器人	否	-	- 乐聚机器人专注机器人关键共性技术研究、智能机器人产品研发和生产。 - 目前推出 KUAVO-MY、KUAVO 3.0 两款通用人形机器人，ROBAN、AELOS PRO3、AELOS 开源鸿蒙版、AELOS SMART 四款中小尺寸双足人形机器人，以及编程教育系列机器人、医院物流机器人、重载运输机器人等产品。 人形机器人方面，KUAVO-MY 身高 1.74m，全身自由度 40+（单臂 7，颈部 2，灵巧手 6），拥有五指精准力控灵巧手，11 自由度仿生关节、最大开合距离 113mm。搭载华为盘古大模型，采用端到端的通用大脑架构，泛化任务规划，精准感知和智能行动。
兆威机电	是	15.25	- 兆威机电是集设计、研发、制造于一体的微型驱动系统方案解决商，主要从事微型传动系统、微型驱动系统的研发、生产和销售业务，主要产品具备的高精度、小体积、低噪音等特性能够适应下游行业的应用需求。产品可应用于汽车电子、医疗和个人护理、工业自动化、智能消费、通信行业、机器人等多领域。主要产品包括电机、编码器、行星减速箱、齿轮箱、电路板等。 - 公司的微型传动、微型驱动系统产品，凭借其高精度运动控制、高扭矩输出和紧凑体积等特性，与机器人领域的运动控制需求高度契合。公司凭借在精密减速箱、高性能电机和电控系统的产品组合优势和技术经验，成功开发并推出仿生机器人灵巧手产品。 灵巧手产品：采用独特的单关节驱动技术，作为工业级产品面向市场推广。电动直驱多指仿生灵巧手采用全驱动方案，17 个主动执行单元，每个指节可独立驱动，兼顾灵巧性和长寿命设计，单指节拥有 3 个及以上主动执行单元，精准模拟人手部的抓握等精细动作，提升了机械手的灵活性与精确度，能够适应工业生产、特种作业、生活服务复杂多变的操作环境。 - 机器人团队建设情况：公司组建了相应的技术与销售团队，人员综合覆盖结构、传动、电机、电控等领域，专注于机器人相关产品及部件研发。公司已取得阶段性成果，凭借精密减速箱、高性能电机和电控系统的产品组合优势，成功开发并推出仿生机器人灵巧手产品。
大族机器人	否	-	- 大族机器人是在大族机器人研究院 100 多人的研发团队基础上孵化而成的国家高新技术企业和国家级专精特新小巨人企业，致力于智能协作机器人在工业、医疗、物流、教育、服务等领域的研发、推广和应用。大族机器人为大族激光（上市公司）的联营企业，大族激光持有约 17.47% 的大族机器人股份。 - 大族机器人主要产品包括 Elfin 系列协作机器人、升级款 Elfin-P 协作机器人、MAiRA 多感知智能机器人助手、STAR 复合机器人、S 系列大负载机器人、Elfin-Ex 防爆型协作机器人等。目前，大族机器人已经突破并掌握了完整的机器人关键部件核心技术，并获得最高 IP66 防护、力控视觉夹爪一体化（高速总线）、防爆认证、智能避障、负载自动辨识、高性能振动抑制、创新的抱闸方式（机器人在运行时遇到突发断电或者急停时直接抱死不下坠）等在内的多项技术成就，在产品优化方面亦有体现。 - 在软件方面，今年大族机器人和华为签约具身智能项目，华为的具身智能解决方案可以为客户提供高精度、自主规划、低成本、可泛化的价值。基于华为云提供的 AI 学习机制，大族协作机器人可以实现百微米级操作精度。
墨影科技	否	-	- 墨影科技专注于移动协作机器人（MCR）及其应用集成系统的开发，自主研发了一体化控制及多机调度系统等核心技术，在自主导航、高维度复杂环境运动规划、双臂协同、人机共融等领域属于行业领先地位。墨影科技致力于为 3C 及汽车电子精密加工和半导体封测等行业提供矩阵式柔性制造产线无人值守整体解决方案。 - 墨影科技已形成了“AI+移动协作机器人+先进制造升级整体解决方案”的全链完备产品及服务体系。在硬件产品上，墨影科技推出了基于类人形机器人的核心“一体化操控”技术研发而成的移动协作机器人（MCR），以“唯一智控中枢”完成各部件管理，代替人工“手脚眼”等功能，变革生产方式，提升生产效率，降低生产成本。软件方面，墨影科技开发出智能机器人通用系统，将机器人控制模块化和抽象化，快速完成机器人在复杂场景和任务下的部署；可全面连通工厂内的平台、各品类机器人和智能化、自动化终端设备，从而让系统集成、部署实施、应用开发更简单。同时，基于人工智能技术实现生产数据可视化、智能分析及管理，可实现方案模拟仿真、资源最优分配及全厂数据化升级管理。
拓斯达	是	28.72	- 拓斯达通过以工业机器人、注塑机、数控机床为核心的智能装备，打造以核心技术驱动的智能硬件平台，为制造企业提供智能制造工厂整体解决方案。主要产品及服务包括工业机器人及自动化应用系统，注塑机、配套设备及自动供料系统，数控机床，智能能源及环境管理系统。 - 拓斯达工业机器人产品包括多关节机器人、直角坐标机器人，如四轴（SCARA）、六轴、并联（DELTA）等工业机器人品类，并在控制器、伺服驱动和视觉系统等领域拓展构建自主核心技术。同时，公司以工业机器人配套视觉系统、传感器、编码器、激光机、直线电机、传输带等辅助设备，规划成套解决方案，以实现帮助客户降低生产成本、提高生产效率的目的。
自变量机器人	否	-	- 自变量机器人于 2023 年 12 月在深圳成立，2024 年 3 月 1 日设北京分公司。其业务主要聚焦于“通用具身大模型”的研发，为机器人提供通用大模型底座。目标是为机器人构建一个通用的大脑-小脑系统，提供从感知到动作的端到端能力。其自研的机器人通用模型平台，是多模态大模型、机器人控制大模型（Large Manipulation Model）、机器人本体的结合，可以训练机器人完成复杂而精细的物理操作。 - 成立 2 个月时，自变量机器人已训练出第一版具身智能操作模型，能实现切菜、倒水等步骤长且复杂的操作任务，为后续研发奠定了基础。2024 年，其模型在特定任务上已显现出少样本学习和自发的跨任务迁移能力，推出具身智能通用操作大模型 Greatwall 系列中的 Wall-A 模型。CEO 王潜认为该模型在多个维度上达到或超过 SOTA 水平。
华龙讯达	否	-	- 华龙讯达是工信部试点示范的工业互联网赋能平台公司，主要产品包括全球主流工业设备设施数据采集和边缘计算设备“机器宝”、木星数字孪生平台、木星数据建模平台、木星工业物联网平台、木星工业互联网平台、木星智能控制等系列产品，助力传统行业数字化转型升级。 - 华龙讯达是鸿蒙生态的重要参与者，基于开源鸿蒙开发了一款面向工业自动化全场景、分布式工业级操作系统：华龙工业操作系统 HualongOS，适用于工业自动化控制和监视的各类应用场景，可以驱动智能工业手机、平板等移动设备与智能设备、产线、车间、工厂等工业应用的“多屏互动、随时交互”。 - 华龙讯达创新性地将基于龙芯 3A5000 芯片的自主可控大型 PLC、基于 OpenHarmony 的华龙工业操作系统等全自主技术融合，打造了华龙具身智能生产线，为工业现场的复杂作业提供智能化、一体化的解决方案。
华成工控	是（新三板）	2.16	- 华成工控以研发运动控制为核心，公司聚焦于线性机器人控制系统、多关节机器人控制系统、工业云平台和数字孪生等，涉及码垛、搬运、焊锡、点胶、喷涂、折弯等场景，自主研发的驱控一体集成技术，让机器人变成即插即用的一体式自动化装置。 - 主要产品包括注塑线性机器人控制系统、机床线性机器人控制系统、多关节机器人系统、冲压线性机器人控制系统、伺服系统、机器视觉、云通讯模块、全电动注塑机解决方案等。提供的解决方案包括注塑机、冲压压铸、机床自动上下料、通道闸、AGV、水平四关节机器人、多关节机器人等。
中坚科技	是	9.71	- 中坚科技主要从事园林机械的研发、设计、生产及销售，充分利用好公司多年在制造业积累的优势，加大在智能机器人领域内的开拓和资源投入。 - 公司的园林类产品主要应用于园林绿化修剪养护，按使用方式可分为手持式与轮式机械。其中，手持式机械主要为链锯、吹风机、绿篱机、割灌机、打草机等，轮式机械主要为手推式割草机与坐骑式割草机等。而智能机器人

板块则主要为割草机器人 UNICUT H1，能实现自主建图、规划切割、自主转场、AI 智能避障、自主回归、精准对接充电等功能，割草效率高、无需用户干预，也可通过 APP 远程监控、遥控指挥割草机器人自主割草，目前产品处于量产前的准备阶段。

- **人形机器人方面**，2024 年 3 月，公司投资了 1X Holding AS 公司。2024 年 5 月，公司设立控股子公司江苏坚米智能机器人有限公司，经营范围涉及智能机器人研发和销售；服务消费机器人制造和销售；人工智能基础软硬件开发和销售；智能无人飞行器的制造和销售等。江苏坚米的核心团队由相关智能制造领域内的科技人员组成，大部分成员具有国内智能制造领域龙头公司多年从业经验和研发经验。

埃夫特	是	13.73	● 人形机器人方面 ，2024 年上半年，公司与国家先进制造产业投资基金、芜湖市科创基金共同出资，设立了启智（芜湖）智能机器人有限公司，启智机器人着眼于机器人系统的智能化与开放性，以颠覆性技术创新，为机器人制造商和机器人终端用户持续提供智能化技术底座，其研发的内容包括但不限于：自主人形机器人开发、灵巧手项目、IDE 项目、EBOX 项目等，其中人形机器人样机目前仍在研发中，预计 2025 年上半年会发布相关样机。公司的灵巧手项目在进行相关部件测试中。
北京创新乐知信息技术	否	-	● 北京创新乐知信息技术有限公司成立于 2006 年，以从事科技推广和应用服务业为主。
数字华夏	否	-	● 数字华夏 2024 年 3 月成立，重点布局人形机器人多模态互动大模型核心算法及智能硬件，开展 AGI 机器人的设计、研发、生产及商业化应用，涵盖多个涉及人机互动、机器人替代的企业级和消费级的应用场景。产品涵盖人形机器人（轮式、双足），商用清洁机器人，在以交互服务为核心的场景化解决方案中，提供 E2E 定制服务。 ● 人形机器人方面，数字华夏发布“有温度的人形交互机器人”夏澜，有较强的仿生和互动能力。 ● 合作方面，2024 年 6 月，数字华夏与科大讯飞正式签署合作协议，双方将围绕人形交互服务机器人展开全方位合作。2024 年 7 月数字华夏完成天使轮融资，投资方为智元机器人、汉唐机器人（深圳）有限公司。
中软国际教育	否	-	● 中软国际教育正式成立于 2008 年，是一家集高校产学研合作、企业人才服务、数字校园建设、教育数字装备等业务于一体的综合性教育科技型企业。 ● 中软国际教育依托自身资源及技术优势，以产业需求为导向，为鸿蒙原生应用的开发者提供专业辅导及资源支持，发起“鸿蒙原生应用开发者护航计划”，孵化多个元服务应用，不断丰富鸿蒙在教育领域的创新应用生态。
强脑科技	否	-	● 人形机器人方面 ，2024 年 4 月，中软国际教育与达闼机器人共同发布“AIGC+具身智能机器人”联合解决方案。 ● 强脑科技创立于 2015 年，是首家入选哈佛大学创新实验室的中国团队，致力于成为全球领先的非侵入式脑机接口技术解决方案供应商。产品包括智能仿生、智能健康、智能教育等领域。 ● 人形机器人方面 ，强脑科技智能仿生产品包括智能仿生腿、智能仿生手、智能仿生灵巧手。灵巧手产品单手抓握力高达 6 公斤，承载能力可达 30 公斤，提供 0.01 毫米精度，0.8 秒开合速度，<10 毫秒控制周期，实时控制频率>100HZ，指尖模块配备多维触觉传感器，可检测压力摩擦力、受力方向、接近距离和表面材质。能够感知小至 1g 的微小力，最大精度达 0.01N。
奥卡机器人	否	-	● 奥卡机器人是一家集研发、生产、销售、服务于一体的智能建造解决方案综合服务商。主要产品包括地坪研磨机器人、金刚石刀头、树脂磨片。地坪研磨机器人是用于混凝土地面打磨或研磨的自动化设备，主要用于去除混凝土表面浮浆以便开展后续地坪表面施工工作。广泛应用于工业厂房、地下停车场、仓储物流中心、大型仓储式商场、医院、场馆、停车楼等，是密封固化地坪、环氧地坪、聚氨酯地坪、环氧磨石地坪施工的必备设备。
禾川人形机器人	否（母公司上市）	-	● 禾川人形机器人成立于 2024 年 8 月，为禾川科技的子公司，禾川科技持股 60%，经营范围包括服务消费机器人制造、智能机器人的研发、服务消费机器人销售、人工智能硬件销售、日用电器修理、人工智能应用软件开发等。 ● 禾川科技在 2024 年 8 月发布通用型人形机器人“YOLO”游龙 01，机器人身体部件的 90%为禾川科技自制，包括行星滚柱丝杠、空心杯电机、无框力矩电机、驱动单元、灵巧手等，六维力矩传感器和减速器为外采，软件算法由浙江工业大学提供。2024 年 11 月，禾川科技表明人形机器人部件、组件已实现小批量订单。

资料来源：wind，各公司官网，公司公告，天眼查，高工机器人，达闼公众号，国信证券经济研究所整理 注：收入为 2024 年数值，单位为亿元人民币

华为在开发者大会（HDC2025）上正式发布 CloudRobo 具身智能平台。CloudRobo 具身智能平台基于盘古大模型的多模态能力及思维能力，整合数据合成、数据标注、模型开发、仿真验证、云边协同部署及安全监管等端到端能力，提供具身多模态生成大模型、具身规划大模型、具身执行大模型三大核心模型：

- **具身大脑（规划大模型）**：针对机器人在真实环境交互中的实际需求，提供空间感知、环境交互理解、具身推理能力，可做出 10 步以上复杂任务规划。
- **具身小脑（执行大模型）**：解锁抓取、放置、理线、插装等典型技能，让机器人实现毫米级精准操控，且末端控制精度达毫米级。
- **数字宇宙工坊（多模态生成模型）**：提供跟物理世界相一致的数字空间，构建海量的数据样本支持不同场景的泛化训练。基于 CloudRobo 平台，具身智能的训练样本可 20%靠采集，80%靠生成，提高数据获取效率。

图103：华为介绍乐聚工业应用

图104：CloudRobo 具身智能平台正式发布



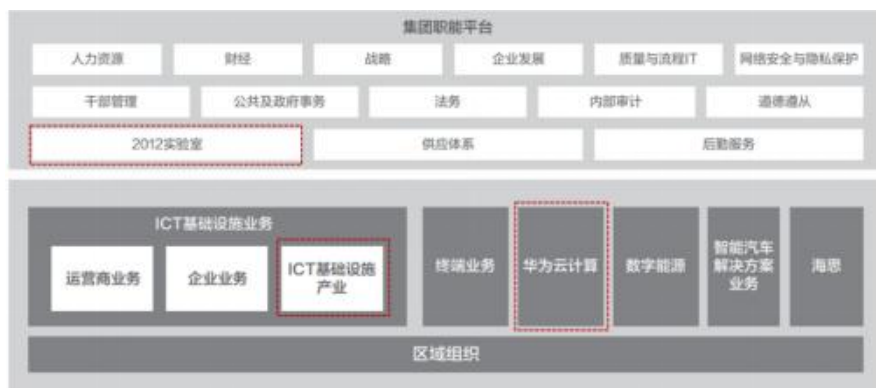
资料来源：华为云，国信证券经济研究所整理



资料来源：华为云，国信证券经济研究所整理

内部优势：华为多部门储备具身智能相关能力，具身智能大脑、小脑、工具链等关键根技术基础。华为内部潜在可以给机器人赋能的部门包括华为云（盘古大模型）、ICT（华为昇腾）、华为 2012 实验室、诺亚方舟实验室等。

图 105：华为架构



资料来源：华为，国信证券经济研究所整理

华为云计算：盘古大模型车端与机器人端协同。盘古大模型可让机器人完成 10 步以上复杂任务规划，能生成机器人需要的训练视频，更快学习各种复杂场景。2025 年 6 月盘古大模型 5.5 正式发布，自然语言处理（NLP）、计算机视觉（CV）、多模态、预测、科学计算五大基础模型全面升级。

图 106：华为盘古大模型



资料来源：量子位，国信证券经济研究所整理

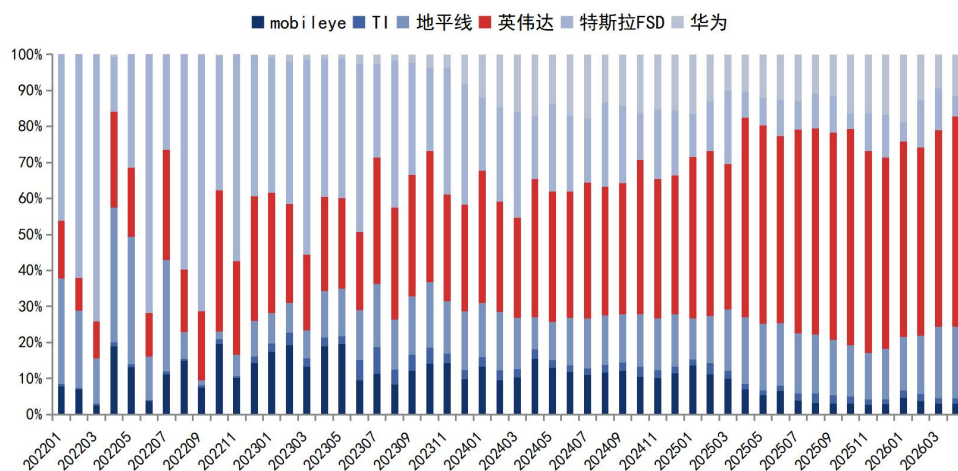
图 107：盘古大模型



资料来源：华为云，国信证券经济研究所整理

华为昇腾：ICT 基础设施产业包括联接产业、计算产业、数据存储产业和电信软件与服务产业。围绕鲲鹏、昇腾及欧拉、CANN/昇思等基础软件，构建数字基础设施生态，打造数字世界的算力底座。**华为昇腾：**昇腾计算是基于昇腾系列（HUAWEI Ascend）AI 处理器和基础软件构建的 Atlas 人工智能计算解决方案，包括 Atlas 系列模块、板卡、小站、服务器、集群等丰富的产品形态，打造面向“端、边、云”的全场景 AI 基础设施方案，覆盖深度学习领域推理和训练全流程。**华为智能驾驶算力、制程表现优秀，**根据高工智能汽车及公司官网信息，华为昇腾 610 采用先进的 7nm 工艺，从算力看，华为昇腾 610 算力超过 200TOPS，表现较为领先。从渗透率来看，2026 年 1-4 月，华为驾驶域控制器渗透率达到 9.66%，市场竞争力持续提升。

图108：自动驾驶域控制器分芯片方案出货量占比



资料来源：佐思汽车研究，高工智能汽车，国信证券经济研究所整理

■ 美的集团

2024 年，美的正式对外宣布公司布局人形机器人业务。2025 年 4 月 27 日，美的集团透露，美的人形机器人于今年 5 月将进入荆州洗衣机工厂，用于设备巡检、零部件检测和简单装配任务等场景。同时人形机器人预计下半年将陆续进入线下门店，主要执行产品介绍、派发礼品、制作并递送咖啡等工作，进一步提升用户和门店的绑定。

硬件方面，美的集团类人形机器人高约 1.9 米、重 68 公斤，采用的轮足式设计独具匠心，底盘由库卡制造，并配备激光导航和雷达，大幅提升了在工厂复杂环境中行走的可靠性。手臂由美的自主研发，拥有 16 个自由度、6 个主动关节，还搭载了六维力传感器，赋予机器人“感知重量”的能力，能精准判断拿起物品的重量是否超出安全负荷，避免因操作不当造成损坏。**软件方面，**多模态、端到端的具身智能大小脑技术，让机器人能高效完成复杂任务，其中，机器人大脑负责任务推理，能把一些复杂的任务分解成小的技能，机器人小脑则通过多模态 VLA 大模型、模仿学习、强化学习等技术实现多场景的复杂运动及操作技能，实现真正的智能化。

应用方面，美的集团工厂为其人形机器人提供应用场景。2025 年 5 月 6 日，美的集团类人形机器人从美的中央研究院人形机器人创新中心“毕业”，前往美的洗衣机荆州工厂打工。在美的洗衣机荆州工厂，这台机器人的首份工作是巡检，负

责信息收集、设备维护等常规性工作。

图109: 美的人形机器人样机



资料来源：佛山工信，国信证券经济研究所整理

图110: 美的人形机器人从实验室前往美的荆州工厂打工



资料来源：美云智数公众号，国信证券经济研究所整理

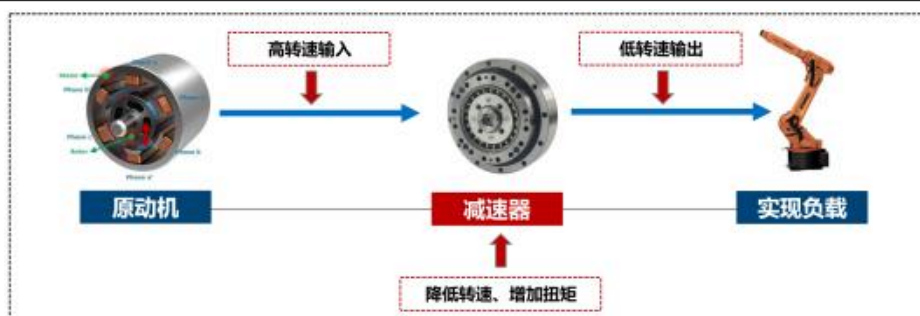
四、产业链拆解之减速器

1. 精密减速器：匹配转速、传递转矩，机器人旋转关节核心零部件

总结：减速器主要用于匹配转速和传递转矩，精密减速器回程间隙小、精度较高、使用寿命长，稳定性高，在人形机器人等高端领域有明确应用场景。**谐波减速器**传动比大，精度高、体积小，在人形机器人小臂、腕部等部位有较强优势；**精密行星减速器**体积小、寿命高，一般单级减速比小；**RV 减速器**具备高精度、大速比、高刚性、高疲劳强度特点。整体来看，减速器在人形机器人等高端领域有明确应用需求（以特斯拉 Optimus 为例，预计规模化量产后减速器占单台人形机器人成本约 15%-20%）。

减速器是一种在原动机和工作机或执行机构之间起匹配转速和传递转矩的减速传动装置。当电机的输出转速从主动轴输入后带动小齿轮转动，小齿轮带动大齿轮运动，而大齿轮齿数多、转速慢，带动输出轴输出，从而起到输出减速、增大扭矩的作用。按精度划分，减速器分为一般传动减速器和精密减速器，一般传动减速器控制精度低，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，可应用于机器人等高端领域。**精密减速器主要分为谐波减速器、行星减速器、RV 减速器等。**

图111: 减速器基本功能原理



资料来源：科峰智能招股说明书，国信证券经济研究所整理

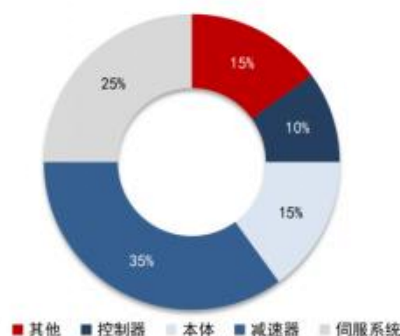
减速器是工业机器人三大核心部件之一，成本占比约 3-4 成。工业机器人广泛应用于汽车制造、设备生产、机械加工等制造环节，近些年随人工费用上升，机器替代人工的趋势愈发明显。2023 年中国工业机器人产量达 43 万台，同比+3.0%，2024H1 产量 28.3 万台，同比+9.6%有所回升。2023 年中国工业机器人销量 31.6 万台，同比+4.3%，2024H1 销量 14.3 万台，同比-6.1%，工业机器人增速有所放缓。工业机器人是集机械+电子+控制+计算机+传感+人工智能等多学科技术于一体的自动化装备，由精密减速器、伺服电机、控制系统与本体几大部分构成。目前工业机器人成本大概构成为：**减速机 35%左右+伺服机 20%左右+控制系统 15%左右**，减速器是工业机器人重要结构组成。

图112：中国工业机器人产量数据（万辆）及增速



资料来源：国家统计局，高工机器人，国信证券经济研究所整理

图113：工业机器人平均成本占比拆分



资料来源：中商情报网，国信证券经济研究所整理

指标介绍：精密减速器的关键技术指标包括扭转刚度、减速比、传动效率、传动精度、传动误差、启动转矩、空程、背隙等。

表18：精密减速器关键技术指标、含义及决定因素

技术指标	含义	影响因素
扭转刚度	在扭转力矩的作用下，构件抗扭转变形的能力，或额定负载转矩与切向弹性变形转角之比	结构设计、轴承支撑方式、轴承类型、齿轮副的刚度和精度、传动比等
减速比	瞬时输入速度与输出速度的比值，减速比越大，输出速度越慢，增加扭矩越大	输入/输出齿轮数、减速级数等
传动效率	传动效率是指输出功率与输入功率的比值。 传动效率受到减速比、转速、负载扭矩、温度、润滑条件的影响	材料选择、合适的传动级数、结构设计、齿轮的精度等级、齿轮的定位与固定方式、齿轮的安装与配合等
传动精度、传动误差	工作状态下，输入轴单向旋转时，输出轴的实际转角与相对理论转角的接近程度。传动精度的高低用传动误差的大小来衡量，传动误差小，则传动精度高	设计（如齿轮间隙）、加工（如RV减速器摆线轮不同的修形加工法）、安装（啮合传动误差）、润滑等
启动转矩	空载启动时，所需施加的力矩	结构设计、减速比、传动链路的摩擦系数、轴承的质量等
空程	在工作状态下，当输入轴由正向改为反向旋转时，输出轴在转角上的滞后量	结构设计、制造工艺、传动部件的磨损程度、安装和调整等
背隙	将输出端与减速器壳体均固定，在输入端施加±2%额定转矩顺时针和逆时针方向旋转时，减速机输入端的微小角位移就是背隙，也称为侧隙	齿轮的制造精度、轴承的运转精度、油膜的厚度、机床的精度、装配精度、工作环境温度等

资料来源：黄兴、何文杰、符远翔，《工业机器人精密减速器综述》，机床与液压，2015，43(13):1-6，哈默纳科产品手册，王文涛、杨斌，《影响RV减速器传动精度的因素与控制》，科技创新导报，2018，15(10):99-100，王亚芹、钱斌、徐冠军，《行星减速器机械效率影响因素分析》，芜湖职业技术学院学报，2021，23(4):41-44，爱采购；国信证券经济研究所整理

近年随工业机器人、高端数控机床等智能制造和高端装备领域快速发展，**谐波、RV减速器已成为高精密切动领域广泛使用的精密减速器**（二者合计占全球工业机

器人减速器市场约 80%)。目前精密减速器已经被应用于人形机器人的旋转关节中，但技术路径尚未收敛。我们发现各人形机器人厂商基于不同减速器的特征、成本等因素的考量，采用不同的技术路径。

- **RV 减速机**具高精度、大速比、高刚性、高过负载及长寿命、高疲劳强度特点，且振动小，噪音低，能耗低，常用于扭矩较大的机器人关节（腿腰肘三大关节），负载大的工业机器人，一二三轴一般都用 RV 减速机。由于 RV 减速器传动比范围大、精度较为稳定、疲劳强度较高，并具有更高的刚性和扭矩承载能力，在机器人大臂、机座等重负载部位拥有优势。
- **谐波传动减速机**具有传动比大并且范围广、精度高、体积小、重量轻、传动平稳、噪声小、可向密封空间传递运动等特点。与一般减速器相比，在输出力矩相同时，谐波减速器的体积更小，重量更轻，这使其在机器人小臂、腕部、手部等部件具有较强优势。但随使用时间增长，运动精度会降低，一般用于负载小的工业机器人或大型机器人末端几个轴。
- **行星减速器**以其体积小、寿命高等诸多优点，而被广泛应用于伺服、步进、直流等传动系统中。但行星减速器单级减速比小，想要提供高扭矩需要采用多个行星减速器进行多级减速，从而导致长度和重量增加。特斯拉 Optimus 机器人将行星减速器用于灵巧手部位，而部分机器人厂商则将行星减速器用于腿部、髋部。

表 19: 精密减速器原理特点、参数、优缺点及应用领域梳理

	谐波减速器	行星减速器	RV 减速器
工作原理	波发生器产生谐波运动，驱动柔性铰链轮实现减速输出	行星轮在太阳轮的驱动下转动，实现减速输出	偏心轮驱动摆线针齿轮进行旋转，通过摆线针齿轮的连续啮合实现减速
技术特点	通过柔轮弹性变形传递运动，主要由柔轮、刚轮、波发生器三个核心部件组成。谐波减速器使用的材料少、体积小、重量轻	由多级行星轮构成，齿数少的齿轮啮合输出轴上的大齿轮从而达到减速的目的	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
结构特点	主要包括波发生器、柔轮与刚轮。减速器工作时，波发生器会发生可控变形，同时依靠柔轮、刚轮的啮合传递动力	体积比较小，主要包括行星轮、太阳轮和内齿圈。精密行星减速器单级传动比都在 10 以内，且减速级数一般不会超过 3 级	主要包括两级传动装置，分别为渐开线行星齿轮传动和摆线针轮行星传动
单价	1000-5000 元/台	380-1600 元/台	5000-8000 元/台
功率密度	高	相对较低	相对较低
传动精度 (")	≤60	≤180	≤60
传动效率	较高	高	高
传动比	30-160	单级 3-10	30-192.4
设计寿命 (h)	>8000	>20000	>6000
扭转刚度 (N·m/arc min)	1.34-54.09	10-370	20-1176
额定输出转矩 (N·m)	6.6-921	40-1200	101-6135
噪音 (db)	≤60	≤65	≤70
温升 (°C)	≤40	≤30	≤45
输出扭矩	中	小	大
可靠性	相对较低	较高	较高
主流人形机器人厂商应用情况	特斯拉、智元、傅利叶、优必选	智元、宇树、傅利叶、优必选	暂无

优点	高传动比、高精度、结构简单，体积小、重 承载能力高、抗冲击能力强、结构简单， 传动效率高、输出扭矩大，承载力强、扭转 量轻	单级行星减速器体积小、重量轻	刚性大、精度稳定性高
缺点	承载能力、使用寿命、散热条件相对弱	传动比低，输出扭矩较低，多级减速器重 结构、制造工艺复杂，轴承薄弱易磨损，外 量大限制使用场景，高精度提高制造成本	形尺寸大，应用领域受限

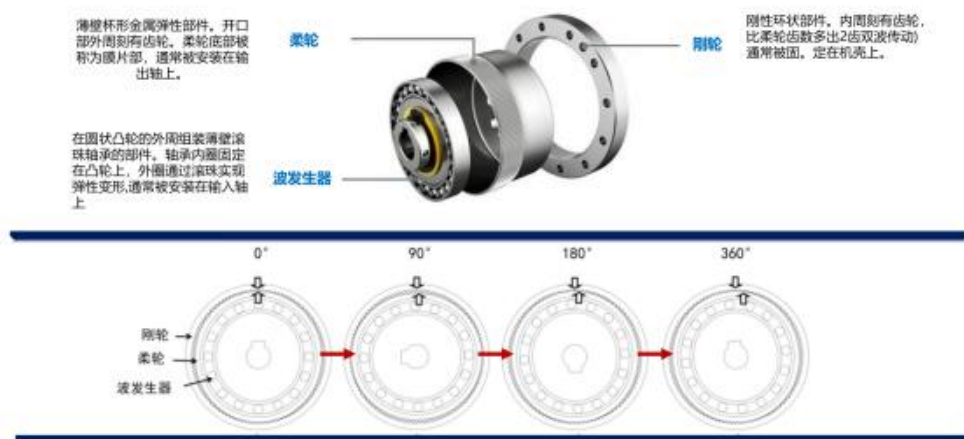
资料来源：纳博特斯克产品手册，绿的谐波招股说明书，科峰智能招股说明书，瑞迪智驱公告，GGII，中大力德网上商城，郑州迪飞机电官网，电子发烧友，搜狐汽车，立鼎产业研究网，焉知人形机器人公众号，AIOT 大数据公众号，王浩等，《谐波减速器柔轮疲劳断裂失效分析》，河北冶金，2021，(7):68-70，黄兴、何文杰、符远翔，《工业机器人精密减速器综述》，机床与液压，2015，43(13):1-6，向珍琳、李霆、杨林等，《谐波减速器研究现状及问题研究》，机械传动，2020，44(7):151-162，程澄，《RV 减速器结构分析及轴承可靠性研究》，山东建筑大学，2020:1-77；国信证券经济研究所整理

1.1 谐波减速器

谐波减速器是一种依靠弹性变形运动来实现传动的新型减速机构，它突破机械传动采用刚性构件机构的模式，使用柔性构件来实现机械传动。谐波减速器主要是由波发生器、带有内齿圈的刚性齿轮（刚轮）、带有外齿圈的柔性齿轮（柔轮）三个基本构件组成。波发生器是一个凸轮部件，其两端与柔性齿轮的内壁相互压紧。柔轮为可产生较大弹性变形的薄壁齿轮。当波发生器装入柔轮后，迫使柔轮的剖面由原先的圆形变成椭圆形，其长轴两端的齿与刚轮的齿完全啮合，而短轴两端附近的齿则与刚轮完全脱开。谐波减速器具有传动比大、外形轮廓小、零件数目少且传动效率高的特点，一般放置在机器人的小臂、腕部或手部等位置。

谐波减速器利用错齿运动实现降低转速、增加扭矩。谐波减速器的工作原理通常采用波发生器主动、刚轮固定、柔轮输出的形式，波形发生器（椭圆形）作为输入端连接到电机轴上，并且被装入柔轮（圆形），柔轮的剖面被迫产生弹性变形，由圆形变成椭圆形。长轴处柔轮齿轮插入刚轮的轮齿槽内，成为完全啮合状态；而其短轴处柔轮与刚轮的齿完全不接触，处于脱开状态；其他区段的齿处于啮合和脱离的过渡状态。当波发生器连续转动时，柔轮将不断变形并产生错齿运动，柔轮与刚轮的啮合状态也不断改变，由啮入、啮合、啮出、脱开、再啮入，周而复始地进行，从而实现柔轮相对刚轮、沿波发生器相反方向的缓慢旋转，实现波发生器与柔轮的运动传递。

图 114: 谐波齿轮传动装置的结构



资料来源：环动科技官网，国信证券经济研究所整理

1.2 精密行星减速器

精密行星减速器主要由太阳轮、行星轮、行星架、内齿圈构成，其减速传动原理就是**齿轮减速原理**。精密行星减速器工作时，通常是伺服电机等原动机驱动太阳轮旋转，太阳轮与行星轮的啮合驱动行星轮产生自转。同时，由于行星轮另外一

侧与减速器壳体内壁上的环形内齿圈啮合，最终行星轮在自转驱动下将沿着与太阳轮旋转相同方向在环形内齿圈上滚动，形成围绕太阳轮旋转的“公转”运动。行星轮通过公转驱动行星架旋转，行星架与输出轴联接，带动输出轴输出扭矩。通常，每台精密行星减速器都会有多个行星轮，它们会在输入轴和太阳轮旋转驱动下，同时围绕太阳轮旋转，共同输出动力，带动负载运动。

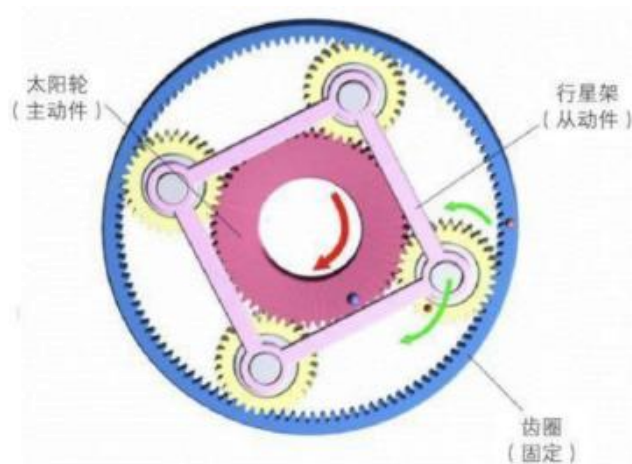
图115: 行星减速器组成构件

- ① 输出轴
- ② 挡圈
- ③ 滚珠轴承
- ④ 输出端盖
- ⑤ 挡圈
- ⑥ 齿轮轴
- ⑦ 联接螺栓
- ⑧ 行星齿轮
- ⑨ 保护外壳
- ⑩ 行星齿轮架
- ⑪ 齿圈
- ⑫ 隔离垫片
- ⑬ 输入太阳齿轮
- ⑭ 输入端盖



资料来源: AIOT 大数据, 国信证券经济研究所整理

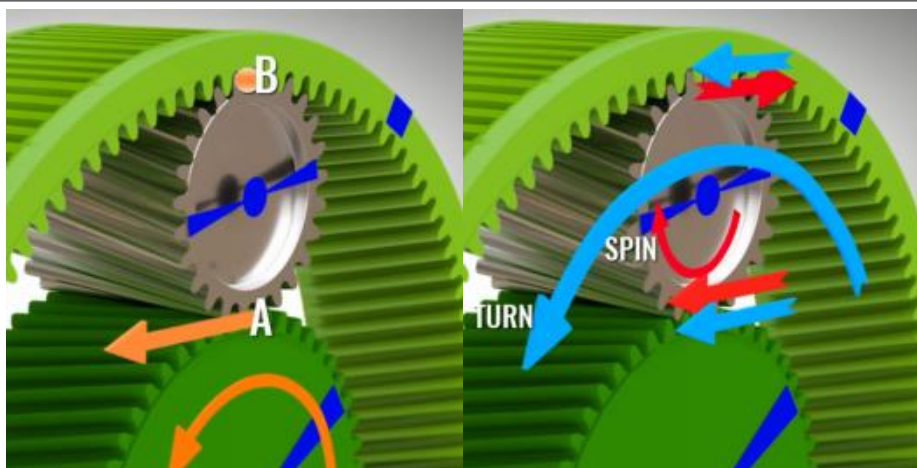
图116: 行星减速器传动过程示意图



资料来源: 有驾, 国信证券经济研究所整理

行星减速器利用行星齿轮的自转和公转运动降低转速、输出扭矩。当太阳轮逆时针旋转、内齿圈固定时，行星齿轮需要同时自转和公转，在这种传动模式下，行星架在内齿圈上进行逆时针旋转运动，输出轴与行星架相连。由于太阳轮与内齿圈存在齿数差异，行星架的输出转速会低于太阳轮的输入转速，从而降低转速，提升扭矩，匹配惯量。在机器人领域，精密行星减速器是移动机器人核心零部件，主要与伺服电机、控制器共同组成移动机器人的驱动单元。

图117: 行星减速器工作原理

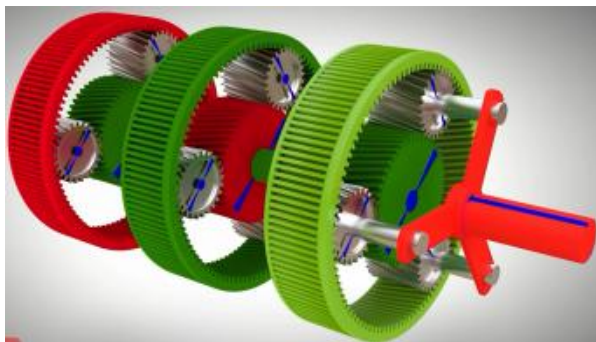


资料来源: Youtube Lesics, 国信证券经济研究所整理

行星减速器主要有单级和多级两种结构。多级行星减速器在单级行星减速的基础上增加了多个级数，每个级数都由太阳轮、行星轮和内齿轮组成，形成级联结构，

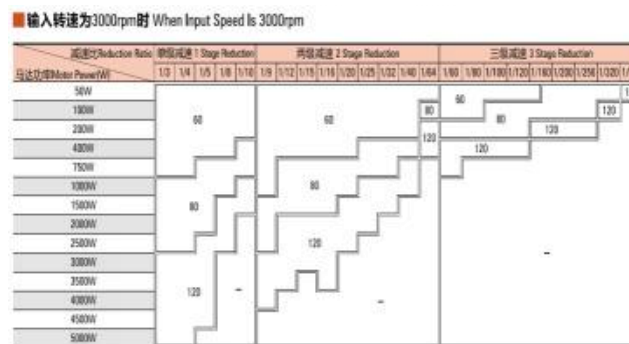
可以进一步减小输出轴的转速，提高输出扭矩。多个行星轮的使用分担了载荷，提高了减速器的承载能力，但每增加一个行星轮，就增加一对齿轮啮合，**传动效率就会下降**。多级行星减速器为了结构紧凑，通常共用内齿轮，即大齿圈，同时作为内齿轮也是减速器的外壳（机架）。

图118: 三级行星减速器示意图



资料来源: Youtube Lesics, 国信证券经济研究所整理

图119: 1~3 级行星减速器减速比情况（输入转速 3000rpm）

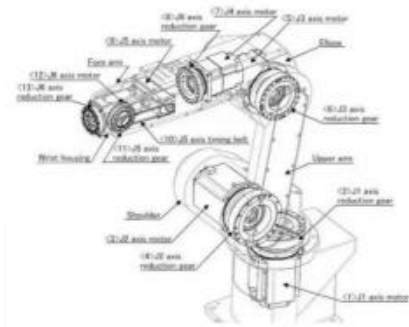


资料来源: 中大力德产品手册, 国信证券经济研究所整理

1.3 RV 减速器

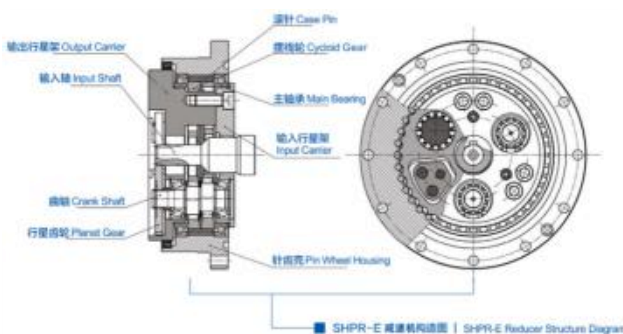
RV 减速器（Rotary Vector，旋转矢量）是一种精密的机械传动装置，最早由日本发明，用于实现高扭矩输出和高精度的旋转运动，**通常适用于工业机器人基座、大臂、肩部等重负载的位置**。

图120: RV 减速机在机器人关节的应用



资料来源: SUPROR, 国信证券经济研究所整理

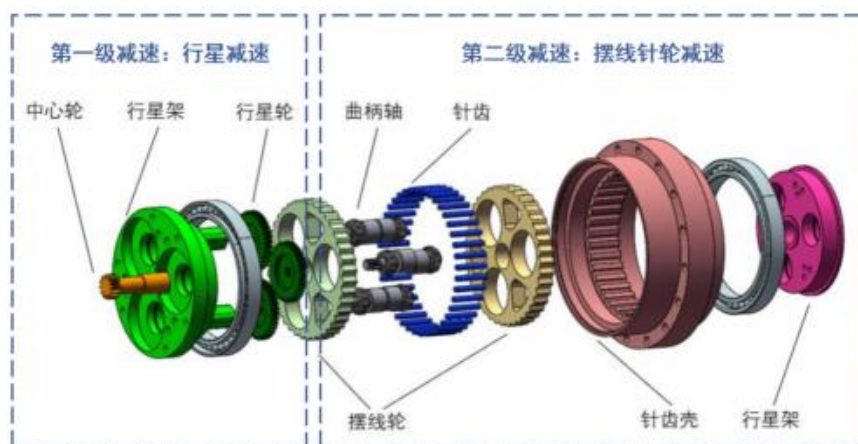
图121: RV 减速器拆解爆炸图



资料来源: 双环传动官网, 国信证券经济研究所整理

RV 减速器的工作原理涉及正齿轮变速和差动齿轮变速，本质上是多级的减速传递运动。RV 减速器通常由两级减速机构组成，第一级为正齿轮减速机构（行星减速器），**通过行星轮和太阳轮实现第一级齿轮减速**。第二级为差动齿轮减速机构（摆线针轮减速器），**通过 RV 齿轮和针轮之间的啮合来达到第二级差动齿轮减速**。

图122: RV 减速器主要构件

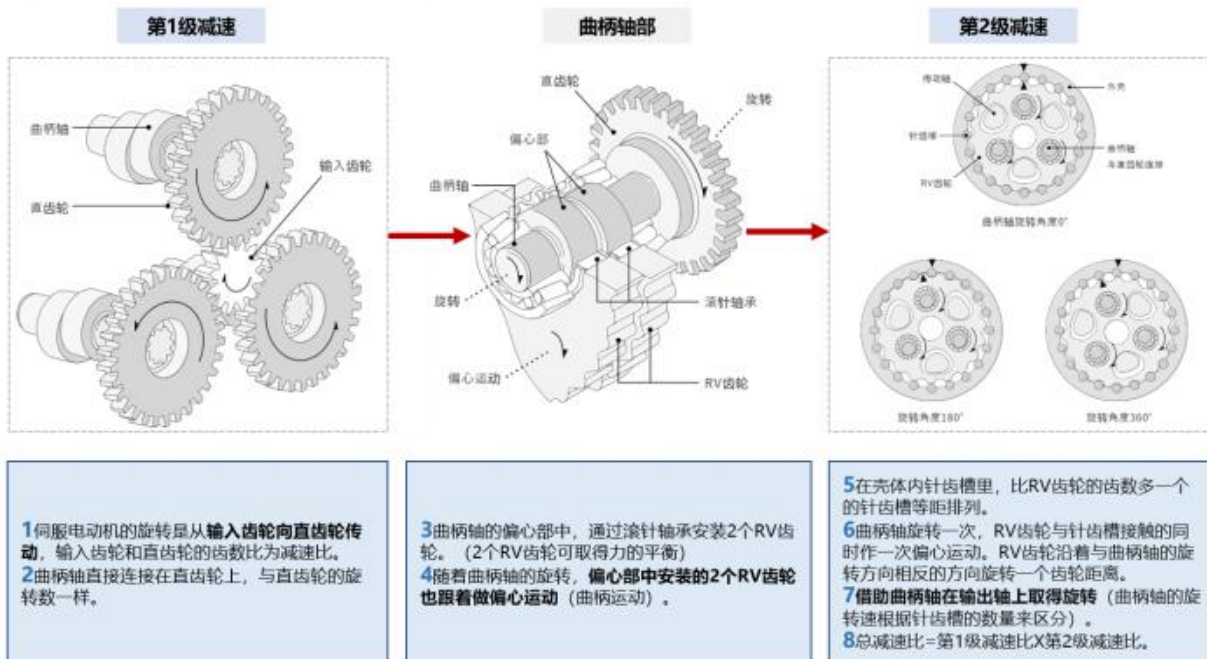


资料来源：王明楠，《RV减速器轻量化设计》，沈阳工业大学，2022:1-79；国信证券经济研究所整理

RV减速器是由行星齿轮减速机一级+摆线针轮减速机后级组成的二级减速器：

- ✓ **第一级减速：**太阳轮与电机相连，电机带动太阳轮旋转，太阳轮带动行星轮同时转动，曲柄轴前后端分别与行星轮和RV齿轮（摆线轮）相连。行星轮旋转时，曲柄轴以相同的转速旋转。行星轮的齿数多，行星轮的转动速度慢于输入齿轮，实现第一级减速，一级减速比为行星轮与输入齿轮的齿数之比。
- ✓ **第二级减速：**输入轴为第一级减速中的曲柄轴，曲柄轴的偏心部有通过滚针轴承安装的2个摆线轮（RV齿轮）。在外壳内侧的针齿槽中的针齿数比RV齿轮多1齿。曲柄轴旋转1周时，2个摆线轮也进行1次偏心运动（曲柄运动）。摆线轮沿着与曲柄轴运动方向相反方向转动1个齿，从而实现减速。

图123: RV减速器运作原理



资料来源：Nabtesco，双环传动官网，国信证券经济研究所整理

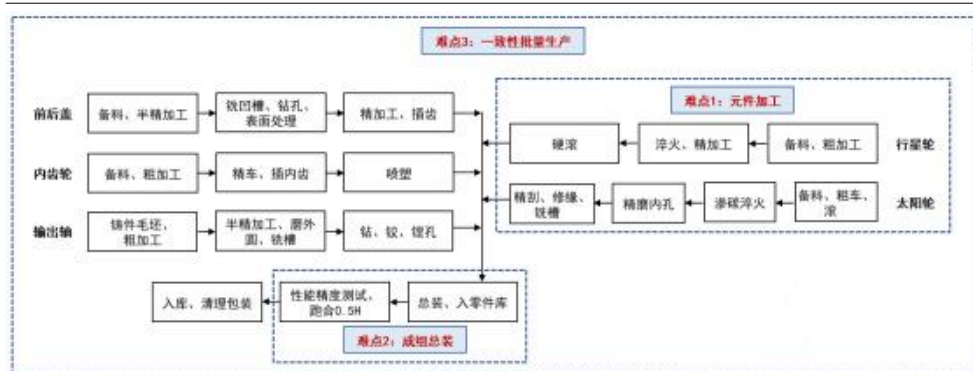
2. 壁垒：工艺、材料、设备等环节均具难点的系统工程

总结：减速器制造整体是一个“系统工程”，在研发设计、材料处理、设备采购、工艺制造、装配成组、稳定批产等多环节均存在较高壁垒。**整体而言，我们认为不同减速器的壁垒难点也各有侧重：**RV 减速器主要难点在于大量高精度的零部件需极高的加工精度与装配技术，以及设备资金投入的高门槛；谐波减速器主要难点在于选择合适的柔轮材料、齿形与加工工艺（热处理等）以保证柔轮的使用寿命；行星减速器主要难点在于对加工精度要求高。

减速器是机器人价值成本中较高部件，成本占比 30%-40%左右（以工业机器人为例），同时也是技术壁垒较高的环节。我们认为减速器制造整体是一个“系统工程”，在研发设计、材料处理、设备采购、工艺制造、装配成组、稳定批产等多个方面均有较高壁垒。国内生产高性能减速器的精密加工设备主要来自日本、欧洲等国外厂商，设计、材料、热处理、加工工艺、齿轮、轴承、密封、装配工艺、零件检测、成品检测等一系列环节均存在瓶颈。我们从材料选择、设计、加工工艺、设备资金等方面深度研究了精密减速器的技术壁垒。

- **材料选择：**减速器的齿轮材料不合适可能导致零件过早磨损。齿轮材料选择时应保持较高的弯曲疲劳强度和接触疲劳强度，从而使齿面有足够的硬度和耐磨性，芯部有一定的强度和韧性。以谐波减速器为例，柔轮周期性发生变形，其材质直接影响谐波减速器的使用寿命。目前国内使用材料的型号与海外厂商基本一致，但国内热处理工艺不够完善，材料杂质含量较高，材料性能与国外相比仍有提升空间。
- **元件加工：**减速器制造壁垒在于各项工艺配合，包括齿面热处理、加工精度、零件对称性、噪音控制、先进设备等。1）机器人运作对传动准确性要求极高，关键部件（如摆线轮、曲柄轴等）加工精度要求高（通常需达微米级）；2）减速器持续工作能力（耐磨+精度保持+寿命）影响人形机器人成本，要求较高；3）国外先进加工和检测设备购置成本较高，且对设备调教能力和效率提升均有较高要求。
- **成组技术：**减速器内部零件较多（尤其是 RV 减速器），多个零部件装配于同一外壳内，零部件在啮合程度、体积大小等方面具有一定关联性（如 RV 减速器行星齿轮机构要求相位一致），对高精度装配、高精度检测技术提出了极高的要求。
- **批量生产：**机器人的操作需要具有高度的稳定性和一致性，因此对减速器大批量产品的稳定性和一致性上有较高的要求。精度保持性、产品一致性、减速器与机器人算法结合，是三项最核心的技术要求，一般需长达 10 年的基础理论和经验数据积累。

图124：减速器制造难点梳理



资料来源：中大力德公告，高工机器人，机器人网，国信证券经济研究所整理

- 设备资金：**减速器的高精度特性对制造设备和检测设备要求高，包括磨齿机、插齿机、滚齿机、磨床等，目前高端精密加工设备主要依赖进口，购置成本较高，具体来看：1) **资金需求高：**据 GGII，在有一定技术积累情况下，RV 减速器设备投入至少需 2 亿以上，核心零件针齿壳和摆线轮的加工设备从欧洲进口，单台均价超过 1500 万元；谐波减速器生产设备费用占整体投入 70%-80%左右，5000 万左右的设备投入才能实现小批量生产。2) **到货周期长：**部分减速器的设备交付期约 1 年左右，特殊设备则需要 14 个月甚至更长时间才能到货，对厂商的资金要求高。

表20：精密减速器主要生产设备

设备名称	数量（台/套）	总价（万元）	设备名称	数量（台/套）	总价（万元）
立式加工中心	50	2500	立式磨床	4	2440
数控车床	10	500	加工中心	16	2460
数控滚齿机	50	20000	滚齿机	24	2910
六轴工业机器人	100	2000	插齿机	4	1800
数控磨床	50	10000	磨齿机	4	3320
定制化热处理产线	1	800	数控车床	16	860
装配工作站	100	400	测量仪	5	670
网络服务器	20	100	试验仪	3	150
			热处理	1	450

资料来源：绿的谐波招股说明书，中大力德招股说明书，国信证券经济研究所整理 注：表格左侧为年产 50 万台精密谐波减速器所需设备及数量，表格右侧为年产 20 万台精密行星、RV 减速器所需设备及数量

我们从材料选择、设计、加工工艺、设备与资金等方面梳理了精密减速器的技术壁垒。基于技术难度进行总体排序，我们认为 RV 减速器与谐波减速器整体制造壁垒相对更高，整体而言不同减速器的壁垒难点也各有侧重：1) RV 减速器主要难点在于大量高精度的零部件需要极高的加工精度与装配技术，以及设备资金投入的高门槛；2) 谐波减速器主要难点在于选择合适的柔轮的材料、齿形与加工工艺以保证柔轮的使用寿命；3) 行星减速器主要难点在于加工精度要求高。

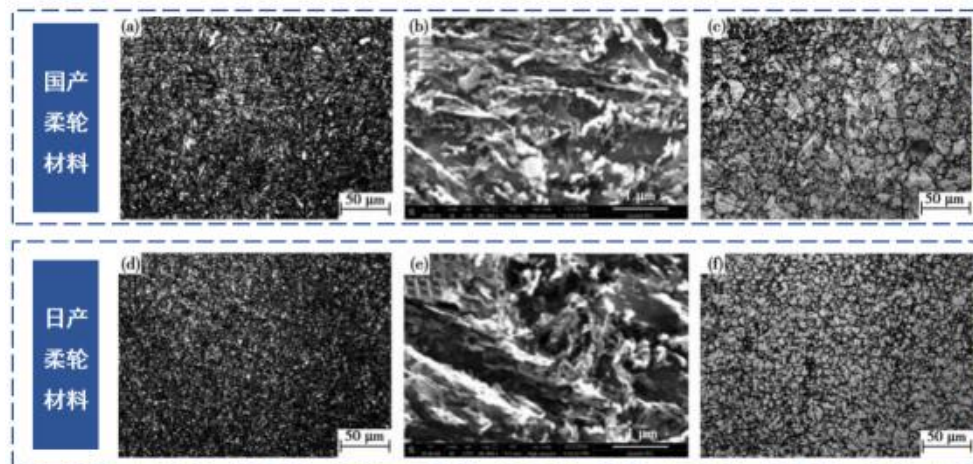
2.1 谐波减速器：柔轮材料与制造工艺是核心壁垒

谐波减速器主要是由波发生器、刚轮、柔轮三个基本构件组成，柔轮是谐波减速器中结构最复杂、最易受外力损坏及腐蚀磨损的部件，是谐波减速器的核心技术壁垒。

1、**材料选择与热处理工艺壁垒：**柔轮材质直接影响谐波减速器的使用寿命，需要具有足够韧性、强度和高耐疲劳特性。较差的柔轮材料可能存在晶粒和铁氧体相的不合理，产生局部微裂纹和尺寸精度的变化，导致柔轮失效。目前，国内外

的谐波减速器柔轮材料基本为 40Cr 合金钢，包括 40CrMoNiA、40CrA、30CrMoNiA、38Cr₂Mo₂VA 等中碳合金钢，其中前两种最为常用。龙头厂商哈默纳科的谐波减速器柔轮使用材料纯度高，组织晶粒精度等级高，洁净度较好，组织均匀，在疲劳寿命和稳定性方面较好。虽然国内厂商采用同样材料，但材料提纯技术和热处理工艺不够完善，材料杂质含量较高，材料卷气、夹杂严重，柔轮组织粗大，稳定性差，材料性能与国外仍有距离。

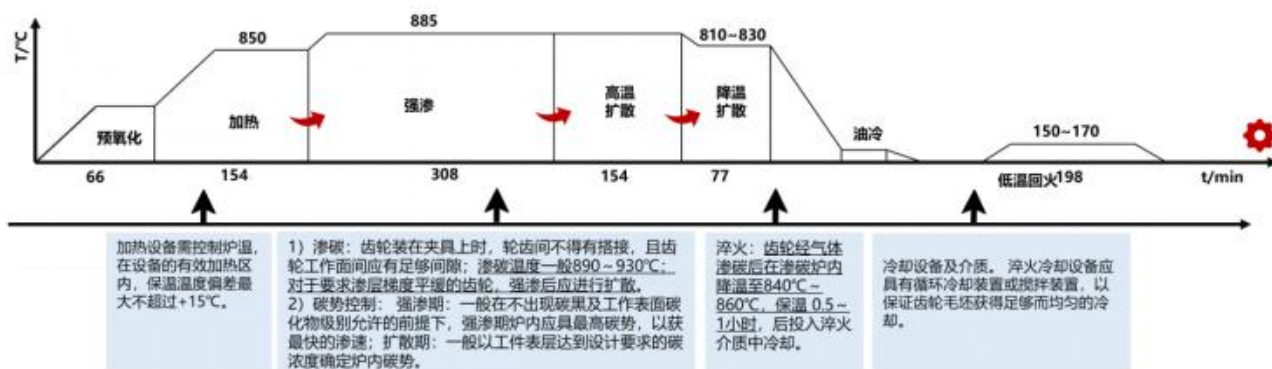
图125: 国产和日产谐波减速器柔轮组织比较



资料来源：张朝磊、魏旻、方文等，《谐波减速器特殊钢材质柔轮的组织和力学性能分析》，材料导报，2018，32(16):2842-2846；国信证券经济研究所整理

热处理：热处理是高精度齿轮成型的核心环节之一，齿轮的抗接触疲劳强度、抗弯曲疲劳强度、心部韧性、表面硬度及耐磨性等都是热后齿轮的关键指标，直接影响齿轮使用寿命长短。热处理一方面可强化齿轮强硬度，提升其耐磨性，另一方面也可以降低后续工艺对精度的需求。热处理对于设备要求、工艺规范、温度把控等多个维度有较高的要求，同时热处理过程中的变形情况不容忽视，是引发齿轮尺寸发生改变、产生异常噪声的重要原因，甚至还会影响齿轮的使用寿命。总体来看，齿轮的热处理工艺如渗碳、高频淬火等会使齿轮变硬，但同时也会使材料变脆，合适的热处理工序需要保证齿面的硬度、齿轮的屈服抗拉强度、韧性、足够的精度，在多个方面进行平衡，具有较高的技术壁垒。

图126: 热处理工艺流程及相关核心要求

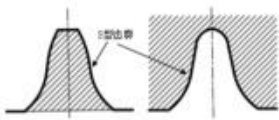
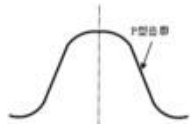
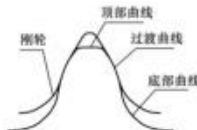


资料来源：杨小冈，《变速箱齿轮热处理与质量控制探讨》，南方农机，2018，49(17):180-186，史秋月等，《8AT 大主减速器齿轮热处理

与形变研究》，湖北汽车工业学院学报，2019，33(3):72-75，公司公告；国信证券经济研究所整理

2、设计壁垒：齿轮的齿形直接决定减速器的传动性能。哈默纳科的“S”齿形，在空载条件下基本实现连续接触，突破传统齿形只在负载条件下才实现多齿啮合的连续接触的状况，**柔轮轮齿抗疲劳强度能力提升1倍，扭转刚度提高70%-100%**。国内厂商在齿形设计方面也有一定进展。**绿的谐波研发出低齿高大齿宽的P形齿**，保证啮合量的同时减小啮合距离，柔轮径向变形量较小，延长柔轮寿命。**来福谐波研发出一种 δ 齿形并申请了相关专利**，使谐波减速器寿命及转矩容量均提高了30%以上。

图127: 谐波减速器主要齿形的特点及示意图

谐波减速器齿形	特点	示意图
S齿形	- S齿形在空载条件下基本实现了连续接触，突破了传统齿形只有在负载条件下才能实现多齿啮合的连续接触的状况。 - 相比于渐开线齿形，在相同传动效率的情况下，同时参与啮合齿数加倍，齿根处的圆角半径增大，使轮齿的抗疲劳强度能力提升1倍，扭转刚度提高70%-100%。 - 相比双圆弧齿形，S齿形在凸齿啮合区的侧隙更小、更均匀，有利于合理分配齿间载荷，且齿顶高系数对S齿形的啮合侧隙影响很小，S齿形的啮合性能更优。 - S齿形对柔轮的加工工艺要求非常高，生产过程很复杂，增加生产成本。	
P齿形	- P齿形的齿高较低，能承载更大的转矩；齿宽较大，降低了齿根断裂的风险；柔轮变形量较小，柔轮的疲劳寿命得到提高；20%-30%的齿同时参与啮合，齿面比压较小。 - P齿形为获得更大的承载能力，齿高设计较低，同时也降低了传动精度。	
δ 齿形	δ齿形包括顶部曲线、过渡曲线、底部曲线，过渡曲线的弧顶向外凸出，底部曲线的弧顶向内凹陷，且顶部曲线、过渡曲线与底部曲线之间平滑连接。 δ齿形寿命提高超过30%，转矩容量提升超过30%，传动的平稳性得到显著提高。	

资料来源：李良玉，《圆柱杯型柔轮力学及振动特性分析与结构优化》，吉林大学，2024，1-109，向珍琳、李霆、杨林等，《谐波减速器研究现状及问题研究》，机械传动，2020，44(7):151-162；国信证券经济研究所整理

3、加工壁垒：柔轮的加工工艺复杂，导致不同工艺处理下的产品性能相差大，具有较高的壁垒。柔轮属于薄壁构件，不同类型的柔轮筒体结构、齿形的迭代也使得加工工艺较为复杂，需要对热处理后的坯料开展粗车、半精车、精车、齿加工、喷丸等加工工序。制齿工艺方面，目前日本哈默纳科运用先进的加工技术已经能够实现一分钟完成两个工件的齿形加工。尽管国内厂家开始追求高速滚齿、精密磨削、强力插齿等先进加工工艺，**但国内的制齿工艺效率不足国外的二分之一，受制于机床与刀具依赖进口、货期拉长等因素，柔轮加工工艺壁垒高。**

图128: 慢走丝、滚齿、插齿工艺对比

工艺	原理	特点	示意图
慢走丝	慢走丝是利用连续移动的细金属丝作电极，对工件进行脉冲火花放电，产生6000度以上高温，蚀除金属，切割成工件的一种数控加工机床。	由于慢走丝线切割机是采取线电极连续供丝的方式，因此即使线电极发生损耗，也能连续予以补充，故能提高零件加工精度。多次切割技术是提高低速走丝电火花线切割加工精度及表面质量的根本手段。一般是通过一次切割成形，二次切割提高精度，三次以上切割提高表面质量。	
滚齿	滚齿工艺运用展成法原理用滚刀来加工齿轮，相当于一对交错螺旋齿轮啮合。	滚齿为连续切削，无空行程，所以滚齿生产率一般比插齿高。	
插齿	插齿是用插齿刀按展成法或成形法加工内、外齿轮或齿条等的齿面。	- 插齿的齿形精度比滚齿高，插齿后齿面的粗糙度比滚齿细，插齿的运动精度比滚齿差。 - 钢轮插齿工艺可以应对任何材料，包括钢材和球墨铸铁。此外，滚齿与插齿相较于慢走丝，在效率上提高了近10倍，在插齿工艺上还可添加附加装置，以此达到与慢走丝一样的精度。	

资料来源：GGII，今日减速机，国信证券经济研究所整理

图129：绿的谐波产品生产流程及使用设备情况



资料来源：绿的谐波招股说明书，国信证券经济研究所整理

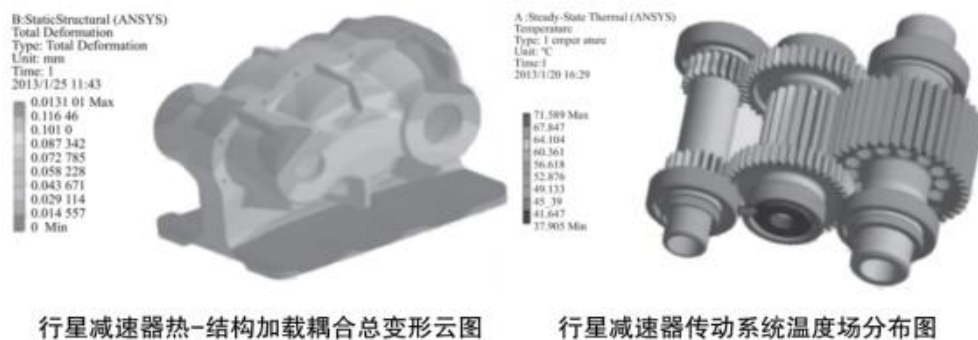
2.2 行星减速器：加工精度要求高

精密行星减速器主要由太阳轮、行星轮、内齿圈三大核心部件构成，主要的技术难点也在于三大部件的生产加工。精密行星减速器对高精度的要求增加了生产制造难度。

1、设计壁垒：

- **动力学设计：**精密行星齿轮减速器精度要求高，在零件加工和装配中不可避免产生误差，结构设计和加工装配误差综合作用导致减速器可能出现振动等问题，严重时导致齿轮失效和整机损坏，需进行合理的动力学设计，进行动态性能优化。
- **耦合分析：**精密行星减速器工作过程是流场、温度场、结构应力场等物理场复合作用的过程。高功率密度行星减速器体积小、热源较多、散热面积小，工作时产生大量热量，散热不足会导致减速器内温度升高，结构发生热变形。因此需考虑多物理场的耦合，如即流—固—热耦合、热—声—振耦合等。

图130：行星减速器耦合设计分析



资料来源：张建润、伍健伟、傅琪迪等，《高功率密度行星减速器设计的关键核心技术综述》，机械制造与自动化，2020，49(4):1-4；国信证券经济研究所整理

2、加工工艺壁垒：

- **齿轮加工工艺：**需要将传统的普通精密车床升级为数控车床，采用专用高速数控干切滚齿机，并且配套研发高速系列干切滚齿刀具，从而优化工艺参数。
- **行星架加工工艺：**需要采用自动化组合加工机床及组合夹具，实现精加工。
- **内齿圈加工工艺：**齿圈的精度直接影响传动质量，薄壁齿圈零件加工工艺过程主要包括锻造毛坯→车削加工→调质→车削加工→插齿加工→渗氮热处理等多个步骤，较为繁琐，对精度要求较高。

图131：行星减速器专用高速数控干切滚齿机



资料来源：马颢等，《机器人关节精密行星齿轮减速器关键生产工艺设计》，现代制造工程，2017，(12):43-47；国信证券经济研究所整理

图132：行星减速器高速系列干切滚齿刀具



资料来源：马颢等，《机器人关节精密行星齿轮减速器关键生产工艺设计》，现代制造工程，2017，(12):43-47；国信证券经济研究所整理

2.3 RV 减速器：结构复杂，加工精度与资金要求高

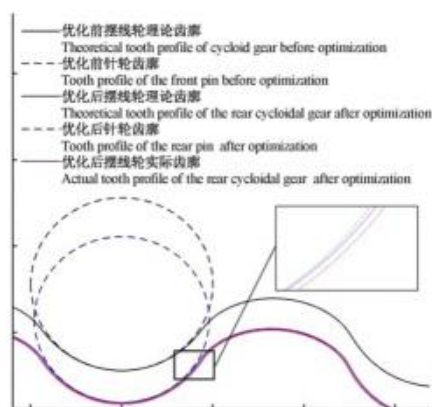
RV 减速器由高精度的元件组成，对材料科学、精密加工装备、加工精度、装配技术、高精度检测技术均提出了极高的要求，也存在显著的硬件设备门槛，尤其是高精度机床的投入。由于 RV 减速器本身由行星减速器和摆线针轮减速器组成，因此行星减速器的技术难点同样也是 RV 减速器的技术难点。同时，RV 减速器有两级传动，不同零部件的生产**一致性和精度要求高**。RV 减速器中，上一级 1 微米大小误差传导到下一级齿轮上可能会放大数十倍，经过多个机器人关节层层放大，最后误差可能被放大至几百倍，可能极大影响整体精度。此外，RV 减速器的精密

加工设备费用高昂，且采购周期 1 年以上，**具有明显的设备资金壁垒。**

1、设计壁垒：难点在于摆线轮齿廓和整体的公差分配设计。

- **齿廓设计：**摆线轮的齿廓是 RV 减速机的“核心线”，如果齿廓设计不准，工作中受力不均，齿轮磨损经过几百倍放大后，精度会受到较大影响。此外，还要考虑材料热变形弹性变形、齿轮啮合原理、齿轮传动位移、运动角度等多个影响精度的要素。同时，优化齿廓需要与理论齿廓的逼近程度较高，且留有满足润滑要求的齿侧间隙与径向间隙，设计门槛非常高。
- **公差分配设计：**RV 减速器的高精度特性对回差有较高要求，一般要求不超过 1 arcmin，而公差分配需要把 1 arcmin 的许用回差进行合理分配。然而，一台 RV 减速器有 20 多种零件，如行星架盖、主轴承、滚针轴承、行星底座、摆线轮、针齿壳、偏心轴等，多个零件均装配于同一针齿壳内，在啮合程度、体积大小等方面具有一定关联性，影响回差的因素众多，公差分配设计较难。因此，RV 减速器的零件公差设计是其研发过程中的一大难点，公差分配不当可能会导致传动精度达不到预期的要求。

图 133: 优化前后的摆线轮齿廓设计



资料来源：李有堂、董浩楠，《基于压力角的摆线针轮齿廓曲线优化方法》，机械强度，2024，46(4):914-923；国信证券经济研究所整理

图 134: RV 减速器回差影响因素多



资料来源：李有堂、董浩楠，《基于压力角的摆线针轮齿廓曲线优化方法》，机械强度，2024，46(4):914-923；国信证券经济研究所整理

2、加工工艺壁垒：国产减速器厂家的加工工艺始终和行业龙头存在一定差异。

RV 减速器对尺寸公差和位置精度要求非常高，摆线轮、曲柄轴、针齿壳为最难加工的工件，加工精度要求高。

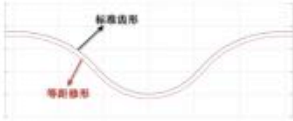
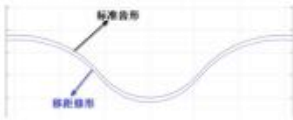
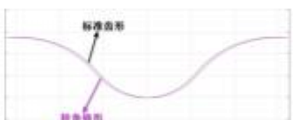
- **曲柄轴：**曲柄轴承孔、外齿形加工难度高。曲柄轴承孔及中间工艺孔有孔径和位置度、垂直度等较高要求，对夹具的精度要求较高。
- **摆线轮：**制造精度要求达到微米级。摆线轮较薄且结构复杂，热处理后摆线轮端面极易翘曲变形，无法采用常规平面磨工艺加工两端面，**需要对摆线轮的淬火过程进行热力学仿真分析并选取合适的磨削量，以有效控制热变形量。**此外，在实际的 RV 减速器传动过程中，为了补偿制造误差便于装拆和保证良好的润滑，不允许摆线轮齿与针轮齿之间没有间隙。因此，实际的摆线轮不能采用标准齿形，均须用修形齿形。摆线针轮的**修形加工法（等距修形法、移距修形法和转角修形法）各有优劣，三种修形法也可组合使用（如负等距+负移距润滑效果好，降低对传动误差的影响；负等距+正移距可使啮合齿面接触应力分布均匀，受力状况明显改善）**，需要合理选取。

表21: RV 减速器曲柄轴与摆线轮加工工艺流程

序号	曲柄轴工序名称	曲柄轴工序描述	摆线轮工序名称	摆线轮工序描述
1	取料	根据尺寸选取适合的毛坯件	精密锻造	直接锻造成型并留一定的加工余量
2	粗车	粗车外圆及两端面	等温退火	消除残余应力、降低硬度，方便后续加工
3	粗磨	粗磨曲柄及主轴外圆	抛丸处理	清除锻造和退火加工留下的表面氧化层
4	粗滚	粗滚渐开线外花键	渗碳淬火	提高表面硬度、耐磨性和接触疲劳性能
5	粗车	根据偏心距粗车两曲柄	回火	消除内应力、减小变形、提高工件性能
6	淬火	渗碳淬火，深度为 0.9~1.2mm	粗磨	粗磨摆线轮两端面、齿廓曲面、中间及轴承孔
7	精滚	精滚渐开线外花键	精磨	精磨摆线轮两端面、齿廓曲面、中间及轴承孔
8	精磨	精磨主轴及两曲柄外圆	表面清理	清洗零件磨削残留的铁屑和磨削液
9	检验	检验加工精度	检验	检验加工精度
10	入库	入库保存	入库	入库保存

资料来源：付毅，《RV 减速器关键零部件工艺设计及综合性能测试》，江苏理工学院，2017，1-71；国信证券经济研究所整理

图135: RV 减速器摆线轮齿廓修形法

修形工艺	原理	示意图
等距修形	- 在加工摆线轮时，将磨轮半径增大或减小，其余的加工条件不变，所得到的摆线轮修形齿廓与理论齿廓法线间隙是处处相同的，短幅系数也没有发生变化。 - 存在正等距修形和负等距修形两种工艺。	
移距修形	- 在加工摆线轮时，将磨轮向工作台中心靠近或远离，其余加工条件不变，所得到的摆线轮修形齿廓与理论齿廓法线间隙并不是处处相等的，且短幅系数也发生了变化。 - 存在正移距修形和负移距修形两种工艺。	
转角修形	在第一次磨出标准齿形后，将摆线轮转动一个微小的角度 δ，改变摆线轮在磨削时的初始位置，后用标准摆线轮齿加工方法对摆线轮进行二次加工。加工得到的摆线轮齿廓与理论齿廓之间侧隙均匀，但齿根与齿顶部分没有间隙，不能满足润滑要求以及弥补工艺误差，故不能单独使用。	

资料来源：陈智龙，《RV 减速器摆线轮齿廓修形研究》，湖北工业大学，2019，1-73，CSDN；国信证券经济研究所整理

- **针齿壳：针齿壳的加工及装配精度要求高。**针齿壳两端的角接触球轴承支撑孔方面的尺寸精度、形位公差与表面粗糙度都必须满足一定的精度等级，滚针孔的加工需具备较高的精度。

表22: RV 减速器针齿壳加工工艺流程与关键要素

序号	工序	关键要素	加工工艺要求
1	精密铸造	测量工件，符合坯件工序尺寸加工要求	预留加工余量 2~3mm
2	球化退火处理	使用温度—时间记录仪记录、检测，满足保温时间及温度要求	铸件加热至共析温度附近（约 700~760℃），保温 3~6h，然后随炉冷至 600℃出炉空冷

3	抛丸处理	按工序要求配制清洗液，目测清洗效果	抛丸时间 10min
4	表面清洗处理	按工序要求配制清洗液，控制清洗液温度及清洗液温度 80~100℃热水冲洗，清洗时间 30~40min	目测清洗效果
5	磷化处理	按工序要求配制磷化液，控制磷化液温度及磷化时间，检测磷化质量	磷化温度 85~90℃，处理时间 30~40min
6	针齿壳粗加工	检测工件，表面粗糙度控制在 Ra 3.2~1.6，满足加工中心镗铣留加工余量 0.5~0.3mm，加工粗糙度 Ra3.2~1.6	足工序加工精度要求
7	淬火回火处理	使用温度一时间记录仪记录、检测，满足保温加热至 840~950℃保温 1~2h，盐水中冷却时间至 400℃并保温 2h，随炉空冷	使用温度一时间记录仪记录、检测，满足保温时间至 400℃并保温 2h，随炉空冷
8	深冷稳定处理	使用温度一时间记录仪记录、检测，满足保温时间在液氮中冷却至-150℃保温 6h	使用温度一时间记录仪记录、检测，满足保温时间在液氮中冷却至-150℃保温 6h
9	针齿壳精加工	检测工件，表面粗糙度控制在 Ra 0.8~0.4，满足加工至粗糙度 Ra0.8~0.4	检测工件，表面粗糙度控制在 Ra 0.8~0.4，满足加工至粗糙度 Ra0.8~0.4
10	针齿壳检验，成品入库	满足检验规程要求，按保管规程存储	按图纸检测尺寸与形位公差，登记入库

资料来源：付毅，《RV 减速器关键零部件工艺设计及综合性能测试》，江苏理工学院，2017，1-71；国信证券经济研究所整理

表23：精密减速器技术壁垒

技术壁垒	谐波减速器	行星减速器	RV 减速器
材料选择壁垒	- 柔轮材质直接影响谐波减速器使用寿命，较差材料可能存在晶粒和铁氧体相的不合理，产生局部微裂纹和尺寸精度的变化，导致柔轮失效。 - 虽然国内外的材料牌号一致，但国内材料制造加工工艺、热处理工艺、材料提纯技术不完善，材料杂质含量较高，性能与国外仍有距离。	行星减速器的齿轮材料不合适可能导致零件过早磨损。齿轮材料选择时应保持较高的弯曲疲劳强度和接触疲劳强度，齿面应有足够的硬度和耐磨性，芯部要具有一定的强度和韧性。不同材料存在不同的优劣，需要合理选择。	- RV 减速器的材料直接影响到减速器性能、寿命和可靠性。 - 摆线轮材料选择时主要侧重于材料自身的淬透性及重载情况下的抗冲击特性，常见材料为轴承钢（GCr15）及低碳合金钢（GrMn、CrMo 合金），需合理选择并进行热处理。
设计壁垒	- 哈默纳科 S 齿形同时参与啮合齿数加倍，齿根圆角半径增大，抗疲劳强度能力提升 1 倍，扭转刚度提高 70%~100%。 - 绿的谐波的低齿高大齿宽的 P 形齿保证齿的啮合量同时减小啮合距离，使柔轮径向变形量较小，延长柔轮寿命。 - 来福谐波 8 齿形相关专利，提升减速器的寿命及转矩容量 30%以上。	- 动力学设计：行星减速器传动结构复杂、精度要求高，在零件加工和装配过程中不可避免产生误差，结构设计有误可能导致减速器可能出现振动等问题，严重时导致齿轮失效和整机损坏。 - 耦合分析：行星减速器运行是流场、温度场、结构应力场等物理场复合作用的过程，需考虑多物理场的耦合作用。	- 齿廓设计：摆线轮的齿廓是 RV 减速机的“核心线”，设计门槛非常高。 - 公差分配设计：RV 减速器要求回差不超过 1 arc min，而需要对关键零部件实现公差合理分配。公差分配不当可能会导致传动精度达不到预期的要求，是研发的一大难点。
加工工艺壁垒	- 热处理工艺：不同的热处理工艺导致粗加工精度下的应力残留、热处理表面外硬内软及加工余量不同，造成露出部分不一样，性能相差较大。 - 加工工艺：目前哈默纳科已实现一分钟完成两个工件的齿形加工。国内目前仍采用慢走丝、滚齿、插齿等传统轮齿成形工艺，效率不足国外一半。	- 齿轮加工工艺：将传统的普通精密车床升级为数控车床，采用专用高速数控干切滚齿机，并且配套研发高速系列干切滚齿刀具，从而优化工艺参数。 - 行星架加工工艺：需采用自动化组合加工机床及组合夹具，提高加工精度。 - 内齿圈加工工艺：齿圈的精度直接影响传动质量，薄壁齿圈零件加工工艺过程包括多个步骤，较繁琐，精度要求高。	- 摆线轮加工工艺：制造精度要求达到微米级，对设备、工艺和人员要求较高。摆线轮的不同修形加工法各有优劣，需合理选取。 - 针齿壳：针齿壳两端的角接触球轴承支撑孔方面的尺寸精度、形位公差与表面粗糙度都必须满足一定的精度等级，滚针孔的加工精度需具备较高的加工精度。
设备资金壁垒	高端精密加工设备依赖进口。谐波减速器生产企业的设备费用占整体投入 80%左右，生产谐波减速器需要 5000 万左右的投资投入才能实现小批量生产，设备交付期约 1 年。	行星减速器的精密加工和检测设备，如数控磨齿机、数控插齿机、数控滚齿机、立式复合磨床、数控立式加工中心、数控立式镗铣加工中心、三坐标测量机等，需从日本、德国、美国进口。	针齿壳和摆线轮的加工设备从欧洲进口，单台均价超 1500 万，国产机床在精度和工艺方面还无法达到要求。如智同科技仅完成了摆线轮理论初步设计和试制阶段就已投入 7000 万左右。设备采购周期在一年以上，对资金储备有较高要求。

资料来源：中大力德招股说明书，高工机器人，纽格尔官网，直驱 GDDIA 公众号，金属加工公众号，齿轮传动公众号，瞭望公众号，江宇，《PEEK 基复合材料短筒谐波减速器的设计关键问题研究》，东华大学，2023，1-91，李奇，《不同参数对谐波减速器柔轮动态特性的影响》，重庆大学，2016:1-90，向珍琳、李霆、杨林等，《谐波减速器研究现状及问题研究》，机械传动，2020，44(7):151-162，张建润、伍健伟、傅琪迪等，《高功率密度行星减速器设计的关键核心技术综述》，机械制造与自动化，2020，49(4):1-4，马懿等，《机器人关节精密行星齿轮减速器关键生产工艺设计》，现代制造工程，2017，(12):43-47，王文涛、杨斌，《影响 RV 减速器传动精度的因素与控制》，科技创新导报，2018，15(10):99-100，葛捷，《RV 减速器针齿壳零件加工工艺设计与分析》，自动化应用，2018，(3):53-55；国信证券经济研究所整理

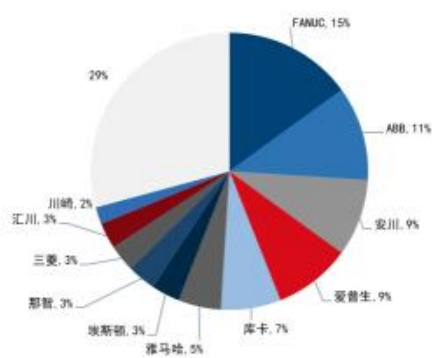
3. 市场：国产减速器替代进程加速，人形机器人催生全新增量空间

总结：凭借技术专利以及在工业机器人的应用带来的先发优势，外资品牌如哈默纳科（谐波减速器全球份额 80%+）、纳博特斯克（RV 减速器全球份额 60%+）目前主导精密减速器市场，国内厂商虽起步相对晚，但已逐步具备一定规模和技术实力，与国际头部厂商差距逐渐缩小，后续在主机厂降本诉求+自身品质提升+合作响应高效的三重奏下，国产替代趋势逐渐明晰；当下减速器行业两大趋势持续演进，1）横向（负载谱系拓展+迭代产品性能）：①开拓不同负载等性能指标的减速器产品；②升级当下减速器指标性能；③推进新型减速器产品创新（新材料、新结构）；2）纵向（机电一体化）：将减速器与电机、编码器、制动器、传感器等组合，提供高附加值模块化产品，打开半导体、光学、测量等下游市场。机电一体化供货有望成为未来的趋势。

3.1 格局梳理：先发优势下外资品牌主导减速器市场

四大家族占据工业机器人半壁江山，国产厂商不断缩小差距。2020 年我国新装工业机器人全球占比 43.8%；外资工业机器人品牌起步早，在技术、规模方面具较强优势，在我国长期维持 60%以上市占率，其中以 ABB、发那科、库卡及安川为代表的四大家族厂份额约 5 成。近几年受物流、疫情、缺芯影响，外资货期延长+产品涨价，内资在本土供应链、货期、价格等方面逐渐掌握一定优势，且在产品质量、定制方面与一线品牌差距逐渐缩小。国产工业机器人龙头以埃斯顿、汇川等为代表，已具备一定规模和技术实力。国内工业机器人对本土供应链的庞大需求驱动内资减速器品牌发展。

图136：我国工业机器人出货量市场竞争格局



资料来源：中商情报网，国信证券经济研究所整理

图137：中国工业机器人本体销量国产品牌份额



资料来源：GGII，中商情报网，国信证券经济研究所整理

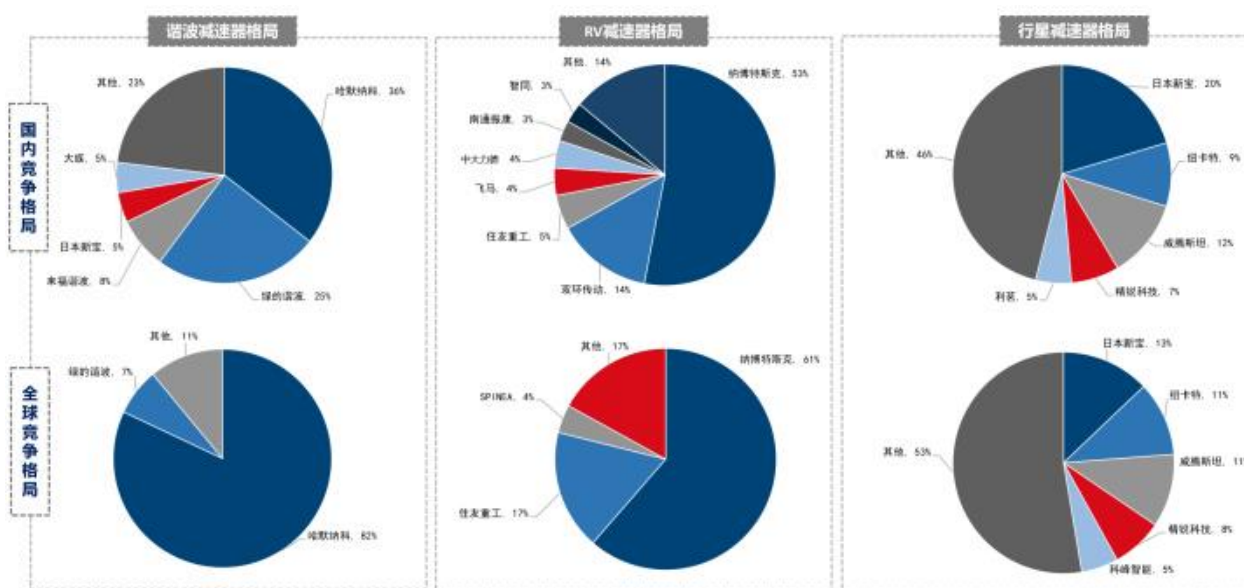
减速器市场当下主要由日系等外资品牌主导。精密减速器作为技术密集型行业，材料、设计、加工工艺、加工设备等方面均存在较高技术壁垒，因此先进者具备先发优势。得益于在工业机器人领域的领先优势，德日等外资品牌主导精密减速器市场，外资品牌如日系龙头哈默纳科、纳博特斯克分别占据谐波减速器、RV 减速器市场 60%以上的市场份额，两者产品定位高端，品牌效应明显，与下游客户厂商深度绑定。

- **谐波减速器方面**，凭借技术专利、工业机器人的领先带来的先发优势，日系龙头哈默纳科垄断谐波减速器市场，全球份额超 80%，国产玩家绿的谐波全球市占率不足 7%左右，国内市场来看，哈默纳科市占率约 36%，第二名为国产谐波减速器的龙头绿的谐波（占比 25%），其他玩家如日本新宝、来福谐波份额均不足 10%。
- **行星减速器方面**，德日等品牌行星减速器在材料、设计、质量控制、精度、

可靠性和寿命等方面领先，国内厂商则聚焦于中低端领域，高端减速器领域外资厂商依然占主要份额。全球格局来看，日本新宝份额 13%，纽卡特 11%，威腾斯坦 11%。国内份额来看，日本新宝份额 20%，纽卡特份额 9%，威腾斯坦份额 12%。

- **RV 减速器方面**，国内 RV 减速器企业起步较晚，当前本土 RV 减速器品牌主要仍聚焦在本土机器人品牌的中低端和中低负载产品系列。RV 减速器市场集中度较高，全球 CR10 超 83%，纳博特斯克份额为 61%，住友重工份额 17%。国内竞争格局与全球类似，纳博特斯克市占率 53%，其次是双环传动，市场份额为 14%，是我国本土龙头企业；住友占比 5%，飞马占比 4%，中大力德占比 4%，南通振康占比 3%，智同占比 3%。

图138: 减速器国内与全球竞争格局



资料来源：GGII，QY Research，科峰智能招股说明书，观研天下，国信证券经济研究所整理

3.2 趋势演绎：国产厂商不断缩小差距

近年国产减速器厂商已具备一定规模和技术实力，国产替代趋势明显。我国减速器行业起步慢，但内资品牌不断实现技术突破，随着国内制造业智能化、自动化转型升级加快，工业机器人市场规模不断扩大，带动精密减速器行业市场需求持续增长，国内减速器玩家配合下游需求持续扩充产能，逐渐开始切入下游客户，内资份额开始明显提升。据 GGII，目前我国超 100 家本土企业涉足精密减速器生产，企业数量逐渐增多，且技术和研发实力逐步提升，部分厂商已实现量产并逐步推向市场，精密减速器的国产替代进程逐步体现效果。2013-2023 年，国内减速器行业实现一定的技术和品牌积累。

图139: 国内减速器行业历史沿革（2013-2023 年）



资料来源：GGII，国信证券经济研究所整理

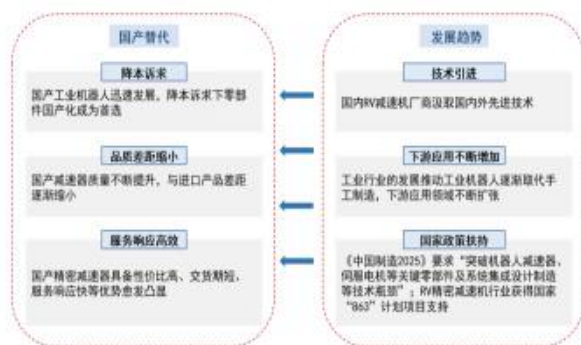
工业机器人三大环节中伺服系统、控制器目前国产化程度已较高，国产减速机也得到一定规模应用，如埃斯顿工业机器人产品核心部件自主使用率超80%。我们认为未来减速机实现国产替代是必然趋势，将在降本诉求+品质提升+响应高效的三重驱动下逐渐兑现：1）**降本**：降本诉求下零部件国产化成为首选；2）**品质**：经国内多年科技创新及技术经验积累，国产减速机质量不断提升，与进口产品差距逐渐缩小；3）**响应**：工业机器人需求增长的背景下，对减速机厂商服务响应的要求提升，国产减速机的高性价比、短交货期、快速响应服务等优势愈发凸显。

图140：2013-2027 年中国工业机器人减速机市场份额分布



资料来源：GGII，国信证券经济研究所整理

图141：品质、响应及降本驱动国产替代



资料来源：GGII，前瞻产业研究院，国信证券经济研究所整理

我国现阶段机器人精密减速机制造与国际头部厂商差距逐渐缩小，国产替代有望进一步突破市场份额。

- **核心指标方面**，国际品牌产品在传动精度、保持高精度的使用寿命、产品一致性等方面具备领先优势，但国产品牌与国际品牌的差距正在缩小，国产高端精密减速机在部分领域实现了进口替代，未来将向高精度、轻量化、高功率密度、模块化、集成化、智能化方向发展。

表24：国内外品牌同型号谐波减速机、RV 减速机技术指标对比

减速机类型	公司	产品型号	减速比	最小齿隙	传动精度	额定扭矩
-------	----	------	-----	------	------	------

	哈默纳科（日本）	CSG-32	50-160	5 arc sec	1 arc min	99-178Nm
谐波减速器	双环传动	SHXB 32	50-100	10 arc sec	1 arc min	76-137Nm
	绿的谐波	LHS-32	30-160	10 arc sec	1 arc min	51-130Nm
	纳博特斯克（日本）	RV-20E	57-161	1 arc min	1 arc min	167Nm
RV 减速器	双环传动	SHPR-20E	57-161	1 arc min	1 arc min	167Nm
	中大力德	E 系列 150-20E	41-161	1 arc min	1 arc min	196Nm

资料来源：各公司产品手册，国信证券经济研究所整理

- **谐波减速器方面，国产谐波减速器替代相对明显。当下国内谐波减速器市场虽仍由日系主导，但内资品牌市场份额逐步提升。**GGII 统计数据显示，目前中国市场超 100 家本土企业涉足精密减速器的生产，谐波减速器企业超 50 家。绿的谐波是国产谐波减速器的龙头企业，目前国内份额 25%，国内其他厂商份额也逐渐提升，如来福、大族、同川等，外资龙头品牌哈默纳科整体份额有所下降。在价格方面，国产厂商价格低于日系厂商。例如，在质量、型号相差不大的情况下，绿的谐波（1500 元左右）谐波减速器产品售价一般比哈默纳科同类型产品（3000-4000 元左右）低 50%。
- **RV 减速器方面，从竞争格局来看，2021-2023 年纳博特斯克的国内市场份额明显降低，国内双环传动、珠海飞马、智同科技、中大力德等厂商的市场份额逐渐提升，国产 RV 减速器的替代进程加速。**

图 142: 国内工业机器人用谐波与 RV 减速器市场格局情况



资料来源：GGII，国信证券经济研究所整理

3.3 国内进展：技术持续突破，中高端+多品类推进

国内减速器厂商技术持续突破，开始向中高端减速器市场进发。近年，国内减速器企业取得了显著进步和发展，不仅在产品布局方面日臻完善，同时在市场占有率上也实现显著提升，逐渐向日系厂商垄断的中高端市场推进。

表 25: 国内减速器主要玩家相关信息梳理

公司	市值	营收	归母	研发投入	产品	减速器进展
双环传动	300.6	91.1	12.6	4.9	RV、谐波等	● RV 减速器：具 SHPR-C 和 SHPR-E 两大系列，国产 RV 减速器市占率连续第一。中小负载机器人用新一代高功重比 RV 减速机规模量产；中大负载机器人（50Kg-210Kg 负载）用 RV 减速机取得关键性突破。RV 减速器年化产能 10 万台左右。 ● 谐波减速器：已有 6 年积累，供应链端、技术端的共通性加速谐波减速器产品迭代过程，已形成多型号产品的批量供货。

中大 力德	116.7	10.4	0.6	0.6	行星、RV、 谐波	从 2008 年开始研发减速器，具备减速器、电机、驱动器三位一体能力，主要减速器产品覆盖谐波、行星、RV 减速器。目前已掌握 RV 减速器生产加工所需的工艺、组合和装配技术，核心技术主要包括整体结构式角接触轴承摆线减速器技术、摆线轮摆线齿修形数学模型及工艺技术、摆线减速器摆线片工艺技术、RV 减速器与弧锥齿轮的组合与装配技术等。
秦川 机床	87.8	40.9	0.5	2.4	RV 等	突破 RV 减速器关键零件的瓶颈工序及核心工艺装备，形成完善的检测、试验、验证设施等，主要技术指标均达到国际同行业先进水平；机器人关节减速器有 5 大系列、40 种规格、140 多种速比，是国内规格最全、系列最多、满足 5-1000KG 负载匹配全系列工业机器人关节减速器产品的供应商，机器人关节减速器实现 N 系列 6 个规格的定型销售，产品谱系更趋完整，突破 N 系列减速器关键设计和制造技术，实现小批销售。
绿的 谐波	541.4	5.7	1.2	0.5	谐波	- 国内谐波减速器龙头，核心团队从事精密传动领域超 20 年，产品寿命、传动误差、传动效率、噪声等关键性能指标已达行业前列。2021 年国内市占率 24.7%，同时持续研发新一代机电一体化产品，丰富、优化产品结构。2023 年完成年产 50 万台精密减速器的扩产项目的土建及设备采购，在国内率先实现谐波减速器的工业化生产和规模化应用，打破国际垄断。 - 在谐波减速器结构设计、齿形研究、啮合原理、传动精度、疲劳寿命、振动噪声抑制、精密加工等方面持续研发投入。
科达 利	509.6	152.1	17.6	8.8	谐波	国内最大的动力电池精密结构件供应商之一。2024 年公司投资设立深圳科盟公司进入减速器行业，透过各方的资源投入有助于提升综合效益，以合资方式成立新公司进行深度的合作，进一步扩大整体的经营效益。
精锻 科技	53.4	20.4	1.3	1.1	行星	- 机器人减速器的研发工作进行中，在研机器人关节行星减速器，目前正与客户讨论应用场景，确认设计的边界设计，以建立设计试验规范。 - 公司也在与国内外的设备供应商在探讨新的工艺和装备。2023 年已在进行样品开发和内部试验验证，以积累设计和试验的经验数据。公司已成立项目团队负责该业务，根据客户和市场需求同步进行技术研发和产能规划落实。
丰立 智能	43.7	5.0	-0.3	0.2	谐波、行星	- 起家于小模数螺旋锥齿轮，业务逐步拓展到微型精密减速器（行星减速器、谐波减速器等）等。大力布局以钢齿轮为主线延伸到用于机器人行业的精密减速器产品，IPO 募投项目已于 23H2 进入安装调试阶段，2024 年将全力进行产能爬坡。 - 公司成功研发多种类常规型号产品以及用于机器人的超薄款谐波减速器，用于灵巧手的直锥齿轮等产品。公司对谐波减速器新厂区空间预留四条产线，每条产线年产约 3.5 万台设置。公司 23 年谐波减速器产线达成，常规型号全部研发完成，目前进入小批量生产中，已与人形机器人、协作及工业机器人等部分客户合作，并产生少量营业额。
来福 谐波	65.5	2.6	-1.7	0.5	谐波	具有低温升、低启动扭矩、高可靠性、高精度、高扭矩、高寿命、大速比、小体积等特性。产品批量运用在工业机器人、服务机器人、医疗器械、高精度自动化设备等领域。公司自主研发伺服电机编码器、驱动器。

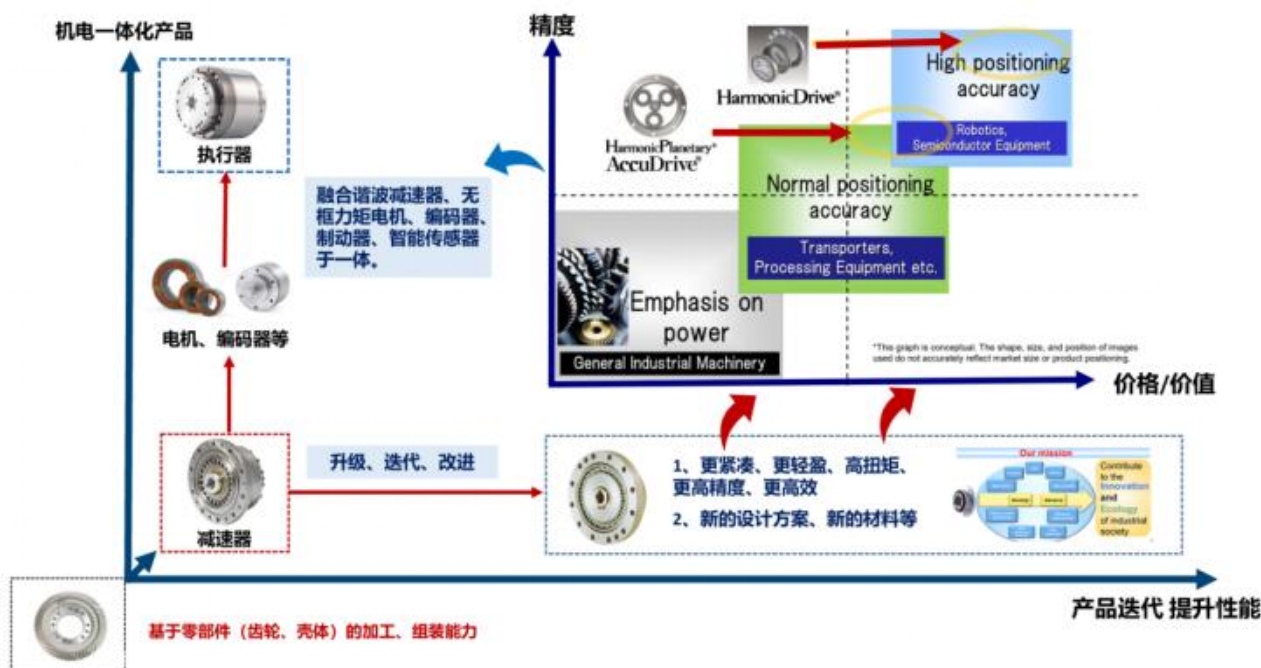
资料来源：wind，各公司官网，高工机器人，各公司公告，国信证券经济研究所整理 注：市值数据截至 2026 年 7 月 24 日，市值、营收、归母、研发投入均为 2025 年数值，单位为亿元人民币

3.4 后续升级方向：横（谱系拓展）、纵（机电一体化）并举

我们认为，减速器是执行器中较高附加值、较高供货壁垒的环节，具备减速器能力的供应玩家将在执行器中占据重要地位，减速器具备两大潜在的行业演进方向：升级和延展。

- **横向（负载谱系拓展+迭代产品性能）**：①继续开拓不同负载等性能指标的减速器产品；②升级当下减速器指标性能（扭矩、精度、效率、体积、重量等）；③推进新型减速器产品创新（新材料、新结构），以及布局高精密减速器在更多领域的应用探索。
- **纵向（机电一体化）**：国内外领跑企业纷纷开发一体化模块。国际谐波减速器厂商提出“整体运动控制”，国内龙头品牌绿的谐波、双环传动也在推进机电一体化布局，将谐波减速器与电机、编码器、制动器、传感器等组合，提供高附加值模块化产品，打开半导体、光学、测量等下游市场。机电一体化供货有望成为未来的趋势。

图 143: 减速器行业的演进方向梳理

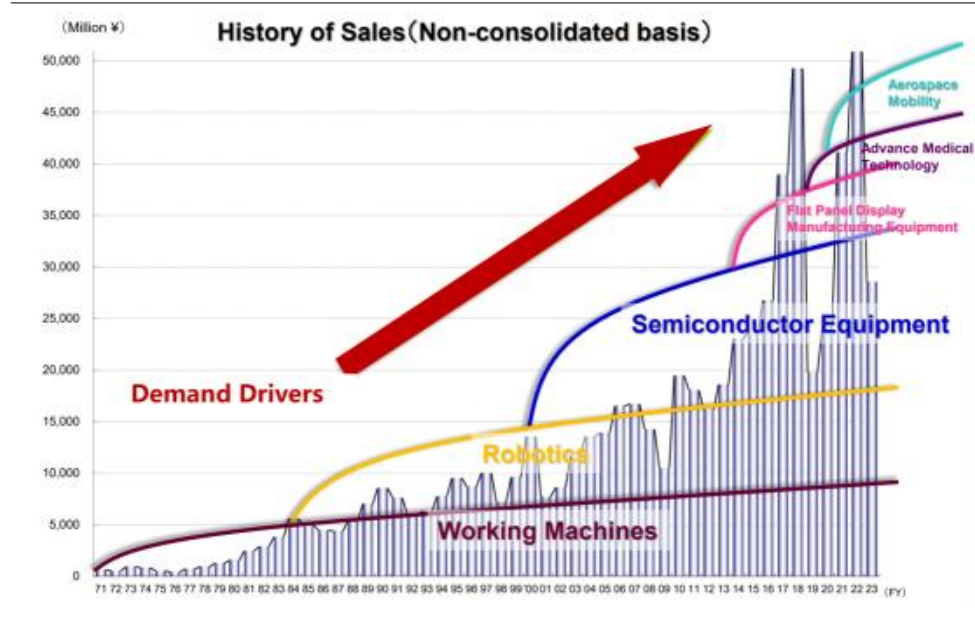


资料来源：GGII，哈默纳科，绿的谐波公告，双环传动公告，国信证券经济研究所整理

3.5 市场规模：精密减速器应用领域不断升级

精密减速器下游终端场景主要包括机器人、新能源设备、高端机床、医疗器械、半导体设备、电子设备、印刷机械等高端制造领域。以绿的谐波为例，绿的谐波减速器下游细分应用占比较大的为多关节机器人（36.2%）、协作机器人（32.41%）、高端数控机床（7.5%）；哈默纳科减速器需求的拉动力按时间顺序主要为机床、工业机器人、半导体设备、平板显示器制造设备、高端医疗、航空航天等，随着谐波减速器技术的发展，其应用领域也在不断拓展。

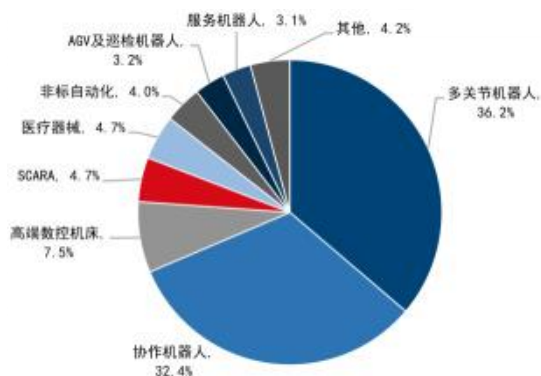
图144：哈默纳科减速器需求驱动变化



资料来源：GGII，哈默纳科公告，国信证券经济研究所整理

谐波减速器方面，谐波减速器在传动领域广泛适用，应用行业正不断拓宽至高端数控机床、半导体制造设备、医疗器械等领域。我国从 20 世纪 60 年代就开始谐波方面研制工作，目前国内国内主要生产厂家有绿的谐波、来福谐波等；在人形机器人领域，**由于谐波减速器体积小、质量轻、传动比高，在人形机器人中通常被用于小臂、腕部或手部等末端轴位置等轻负载部位**；据中商产业研究院，2022 年我国谐波减速器市场规模约 21 亿元，2023 年增至 24.9 亿元，2024 年市场规模将达 29.4 亿元，2025 年市场规模有望超过 33 亿元。

图 145: 绿的谐波减速器下游应用场景分布



资料来源：中商产业研究院，国信证券经济研究所整理

图 146: 我国谐波减速器市场规模（亿元）



资料来源：中商产业研究院，国信证券经济研究所整理

行星减速器方面，近年我国机械设备制造业规模发展迅速，带动机械传动领域减速器行业规模扩张。行星减速器下游行业主要为移动机器人、新能源设备、高端机床、电子设备、智能交通等高端装备制造业。在一般传动领域，我国减速器已基本实现国产化，但高端精密行星减速器国产化率低。据 QY Research，2022 年全球行星减速器销量 540 万台，销售金额 12 亿美元，行星减速器市场的主要供应商集中在美国、欧洲和日本等地。这些地区的厂商拥有先进的技术和品牌优势，同时也在不断推出新产品和新技术。2022 年中国减速器销量为 231.9 万台，销售金额 5 亿美元。预计 2029 年全球行星减速器规模将达 22.3 亿美元，中国市场规模将达 11.5 亿美元。

图 147: 全球行星减速器市场区域分布

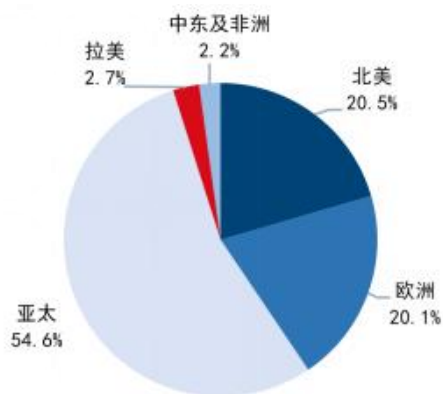


图 148: 全球及中国行星减速器销售金额（单位：百万美元）



资料来源：QY Research，科峰智能招股说明书，国信证券经济研究所整理

资料来源：QY Research，科峰智能招股说明书，国信证券经济研究所整理

3.6 方案选择：谐波+行星为主流减速器技术路径

目前，减速器已经被应用于人形机器人的旋转关节中，但技术路径尚未收敛。我们总结了特斯拉、智元、宇树、傅利叶、优必选的人形机器人减速器方案，发现各厂商基于不同减速器的特征、成本等因素的考量，采用不同的减速器方案。综合来看，大部分主流厂商在人形机器人中使用谐波减速器+行星减速器的技术方案。而RV减速器由于成本较高、体积较大，暂无主流人形机器人厂商披露使用。

图149：主流人形机器人自由度及减速器情况

					
厂商及型号	特斯拉Optimus	智元A1	宇树G1 EDU	傅利叶GR-1	优必选Walker X
总自由度	40	49+	43	44	41
减速器	谐波（预计）	谐波、行星	行星	谐波、行星	谐波、行星
头/颈部自由度	-	未披露	-	3	3
腰部自由度	2	未披露	1+2	3	-
腿部自由度	6*2	未披露	6*2	6*2	6*2
手臂自由度	7*2	未披露	5*2	7*2	7*2
灵巧手自由度	6*2	17	7*2+2*2	6*2	6*2

资料来源：各公司官网，国信证券经济研究所整理

- 特斯拉 Optimus 机器人全身 14 个旋转关节均采用谐波减速器，手部 12 个自由度采用行星齿轮箱。根据特斯拉 AI Day 发布会，Optimus 机器人的旋转执行模组主要在手臂、腿、躯干和颈部等部位，对应采用 14 个谐波减速器，主要分为 20Nm/0.55kg、110Nm/1.62kg、180Nm/2.26kg 三种。在手部，Optimus 采用行星齿轮箱。

图150：特斯拉 Optimus 机器人减速器方案



资料来源：特斯拉 AI day，国信证券经济研究所整理

- **智元远征 A1 机器人采用谐波一体关节，以及自研带行星减速器的关节电机，2024 年 8 月对关节电机进行了优化迭代。**智元在 2023 年 8 月推出 A1 人形机器人时就采用了谐波一体关节+自研的关节电机 PowerFlow。PowerFlow 使用准直驱关节方案实现低齿槽转矩设计，搭配 10 速比以内的高力矩透明度行星减速器、共轴同轴双编码器一体液冷循环散热系统，以及自研的矢量控制驱动器。2024 年 8 月 18 日，智元远征系列发布了面向交互服务场景的 A2、面向柔性智造场景的 A2-W 和面向重载特种场景的 A2-Max 三款人形机器人。A2 全身 40+ 个自由度，采用高可靠、轻量化、超高槽满率绕线工艺的量产自研一体化关节，最高峰值扭矩 430Nm，电机扭矩密度 50Nm/kg，动态性能佳，关节可靠支持长时间稳定行走。同时，智元对关节电机 PowerFlow 进行了迭代优化，在可靠性和稳定性方面针对量产开展了大量优化和测试。

图151：智元自研 PowerFlow 关节模组

系列	8513	8523	15022
最大外径 (mm)	89	112	164
轴向长度 (mm)	48.4	71.1	60.4
重量 (kg)	0.9	1.61	3.2
额定扭矩 (Nm)	48	96	270
峰值扭矩 (Nm)	91	182	512
峰值扭矩 (rpm)	120	115	98
防护等级	IP5X	IP5X	IP5X

资料来源：智元新品发布会，国信证券经济研究所整理

- **宇树人形机器人主要采用行星减速器。**2023 年 8 月 15 日，宇树正式发布首款通用人形机器人 H1。2024 年 5 月 13 日，宇树发布了最新一代人形机器人——Unitree G1 人形智能体，售价 9.9 万元起，拥有超大关节运动空间角度，23-43 个关节自由度，力控灵巧手。G1 人形机器人有 G1 和 G1 EDU 两种型号，后者提供不同模块方案的搭配，在算力、自由度（共 43 个）、承载能力、手臂负载重量、关节运动空间等方面较优。此外，宇树自研自产 G1 的关节模组，共有 3 种类别，带双编码器的行星减速器关节模组最大瞬时扭矩 140Nm。

图152：宇树科技自研关节模组产品矩阵（行星减速器）

			
型号	A1电机	GO-M8010-6	超级机器人防水关节 B1-16
重量	605g	530g	1740g
最大瞬时扭矩	33.5N.m	23.7N.m	140N.m
最大关节转速	21rad/s	30rad/s (24V供电时)	-
扭矩常数	0.9287N.m/A	0.63895Nm/A	2.165N.m/A

资料来源：宇树科技官网，国信证券经济研究所整理

- **傅利叶人形机器人采用谐波+行星减速器方案。**傅利叶通用人形机器人 GR-1 拥有高度仿生的躯干构型和拟人化的运动控制，全身最多达 44 个自由度，最大关节峰值扭矩达 230Nm，具备快速行走，敏捷避障，稳健下坡，抗冲击干扰等运动功能，是通用人工智能的理想载体。内置 32 个全自研 FSA 高性能一体化执行器（集成电机、驱动器、减速器及编码器），最大峰值扭矩达 230Nm，高动态响应能力，实现高难动作力度和精度的精准控制。可模拟人类不同运动方式，实现转头、扭腰、和抓取、跑步、跳跃等拟人化运动。与非网预计 32 个执行器为头部、腰部、手臂和腿部，上半身选择使用谐波减速器，下半身关节则采用行星减速器。

图153: 傅利叶 GR-1 机器人



资料来源：傅利叶机器人产品手册，国信证券经济研究所整理

- **优必选人形机器人主要采用谐波减速器，同时自研谐波+行星减速器。**优必选 Walker 具有 36 个高性能伺服关节，采用精密谐波减速器，伸展状态单臂能够实现负载 1.5kg。Walker X 和 Walker S 具有 41 个高性能伺服关节，分别能够达到最大转矩 200Nm、300Nm，最大转速 90rpm、130rpm。优必选自研

的伺服驱动器集成了高密度无框力矩电机、双位置编码器、行星/谐波减速器和高性能处理控制器，形成一体化，可以满足高功率密度、大扭矩输出的需求。目前支持最大扭矩 $\geq 200\text{Nm}$ ，具有高集成度、高性价比、高同步性、高精度、低虚位、抗冲击能力强、高寿命、低噪音的优点。

图154: 优必选 Walker S 系列机器人



资料来源：优必选官网，国信证券经济研究所整理

五、产业链拆解之新型减速器

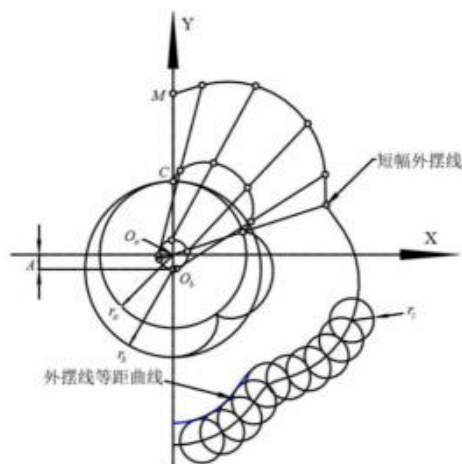
1. 摆线减速器：新型减速器的重要方向

摆线针轮减速器所采用的精密摆线传动技术，由德国 Lorenz Baraen 于 1926 年提出，最初是一种使用外摆线作为齿廓的少齿差行星传动，由于其关键零部件为摆线轮和针轮，因此被称为摆线针轮减速器。

具体来看，摆线针轮减速器名称中的“摆线”是指摆线轮的实际轮廓为短幅外摆线的等距曲线。根据内切外滚法，摆线轮在形成时有基圆（固定不动）和滚圆，二者的圆心、半径不同，因此存在偏心距。滚圆与基圆保持内切并在基圆上做纯滚动。随后，设计一个固连在滚圆上的定点，在滚圆做纯滚动的过程中，该点的轨迹即为短幅外摆线。以轨迹上的点为圆心，以相同半径画圆，这些圆包络出的曲线为短幅外摆线的等距曲线，即摆线轮的实际轮廓。

图155: 摆线针轮减速器示意图

图156: 摆线齿廓形成法示意图



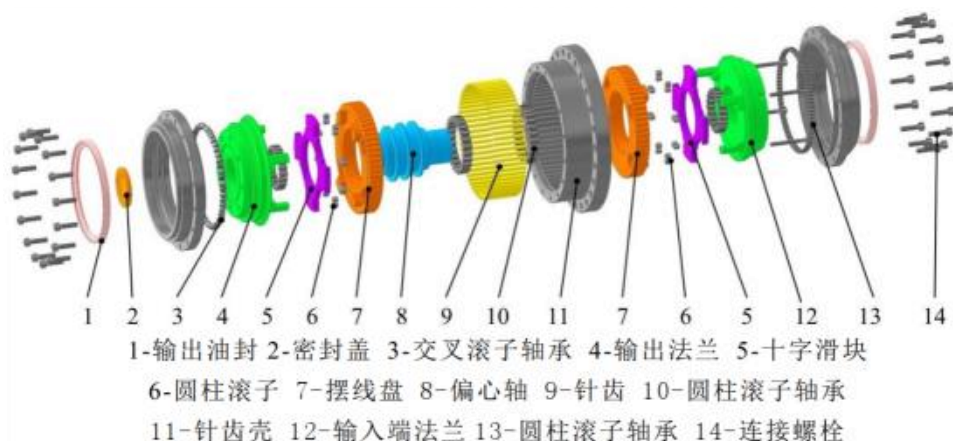
资料来源：中大力德官网，国信证券经济研究所整理

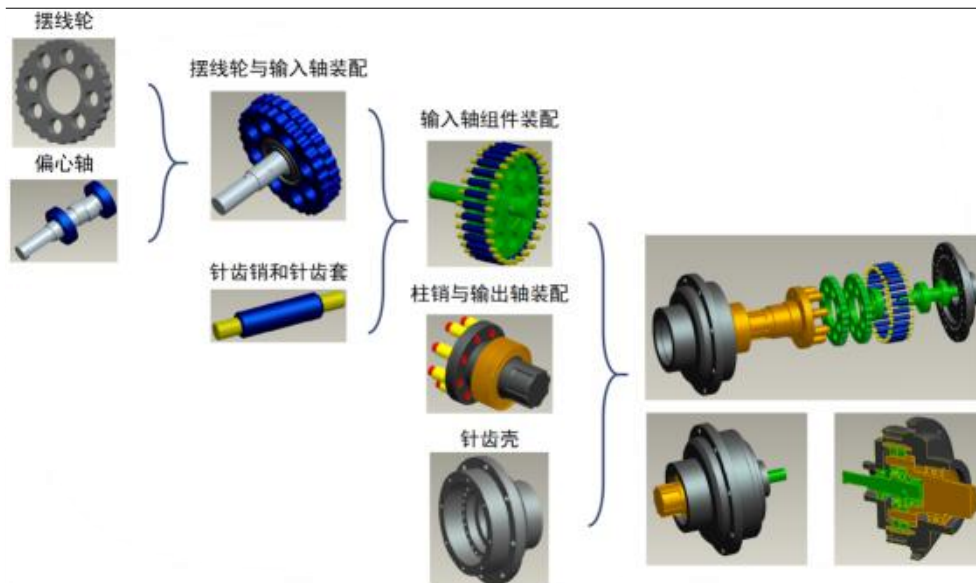
资料来源：黄岳磊，《基于几何接触算法的摆线针轮传动误差分析及公差优化》，大连交通大学，2023:1-91；国信证券经济研究所整理

摆线针轮减速器主要由输入机构、摆线轮、针轮及输出机构等部件组成：

- ✓ **输入机构：**主要由输入轴、偏心轴和轴承组成。输入轴与电机轴相连，偏心轴有 2 个，径向对称地安装于输入轴上，分别用于安装相位相差 180° 的 2 个摆线轮；偏心轴与摆线轮之间通过滚动轴承连接。
- ✓ **摆线轮：**以短幅外摆线的内侧等距曲线作为传动齿廓的传动齿轮，是摆线针轮减速器的核心构件。理论上一个摆线轮就能实现运动的传递，但实际机构一般采用两个相同的摆线轮沿径向对称安装，以使摆线轮在与针轮啮合过程中实现静力平衡，减轻振动，提高减速器的承载能力。
- ✓ **针轮：**摆线针轮减速器的关键部件之一，主要由针齿壳、针齿销和针齿套组成。当摆线轮与针齿套相啮合时，针齿套可绕针齿销转动，因而将其与摆线轮啮合中的相对滑移运动转化为纯滚动，以减少啮合摩擦损失。
- ✓ **输出机构：**输出机构主要由法兰盘、若干柱销和摆线轮上开有的柱销孔组成。柱销的一端固定在输出轴的法兰盘上，另一端插入两摆线轮端面的等分孔中，在柱销的悬臂上装有可移动的柱销套以减少摩擦损失。摆线轮上柱销孔推动着柱销转动，柱销固连着减速器两端的圆盘作为输出机构，由此将摆线轮的低速自转通过柱销输出。

图157: 摆线针轮减速器爆炸图



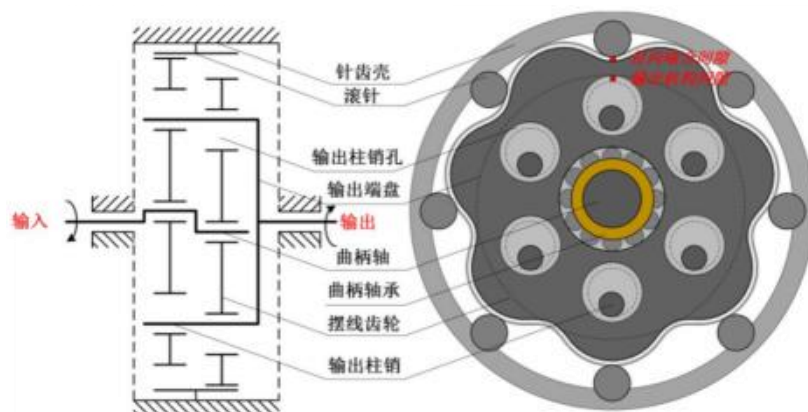


资料来源：郝哲鹏，《高刚度紧凑型精密摆线针轮减速器研究》，哈尔滨工业大学，2023:1-72，戴文婷，《摆线针轮减速器实体建模和啮合特性分析》，天津大学，2014:1-65；国信证券经济研究所整理

摆线针轮减速器主要依靠少齿差原理进行减速传动。

- ✓ 摆线针轮传动机构中针轮固定不动，电机带动输入轴转动，输入轴的运动通过偏心套带动摆线轮绕着针轮中心公转。摆线轮在公转过程中，与针齿啮合。由于摆线轮与针齿间存在少齿差，针齿对摆线轮产生反向推力，进而形成与摆线轮公转方向相反的力矩，推动摆线轮反向自转。
- ✓ 当输入轴转动一周时，偏心轴也转动一周，在此过程中，由于针齿的推动作用，摆线轮绕其几何中心反向转过一个轮齿，再借助输出机构，将摆线轮的低速自转运动通过销轴，传递给输出轴，从而获得较低的输出转速。

图158: 摆线针轮减速器传动原理



资料来源：李轩，《有侧隙啮合摆线针轮行星传动接触特性分析及实验研究》，重庆大学，2017:1-120；国信证券经济研究所整理

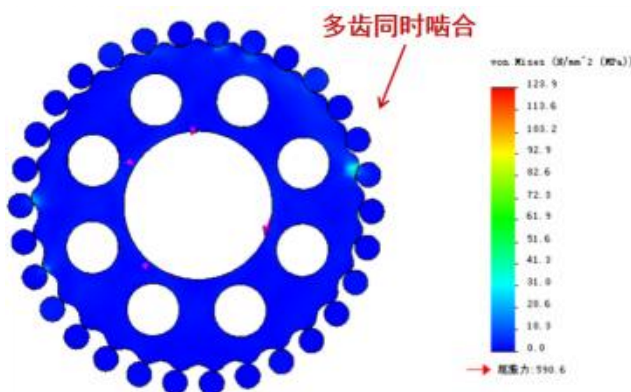
摆线针轮减速器具有传动比大、传动效率高等优势：

- ✓ **结构紧凑、体积小、重量轻：**摆线针轮减速器采用少齿差行星传动机构，结构紧凑，与同功率普通齿轮传动相比，体积可减小 $1/2 \sim 2/3$ ，重量约减轻

$1/3 \sim 1/2$ 。

- ✓ **传动比范围大：**摆线针轮减速器的传动比公式为 $i = \frac{\text{摆线轮齿数}}{\text{摆线轮齿数} - \text{针轮齿数}}$ ，由于摆线针轮减速器以少齿差作为传动原理，摆线轮齿数与针轮齿数相差很小，因而其传动比较高，单级传动比可达 $6 \sim 119$ 。
- ✓ **传动效率高：**由于针齿套和摆线轮齿之间，摆线轮和偏心套之间，以及柱销套和摆线轮之间都是滚动摩擦，而且各零件加工和安装精度较高，啮合表面无相对滑动，所以其传动效率较高。一般单级传动效率可达 $0.90 \sim 0.95$ 。
- ✓ **传动精度高：**摆线传动机构在传动过程中多齿啮合特性和误差均化效应显著，有利于提高传动精度。
- ✓ **承载能力强，运转平稳，噪声低：**在运转中同时啮合的齿数多，啮入啮出平稳，因而传动平稳、过载与抗冲击能力强、振动和噪音低。

图159: 摆线针轮减速器多齿同时啮合



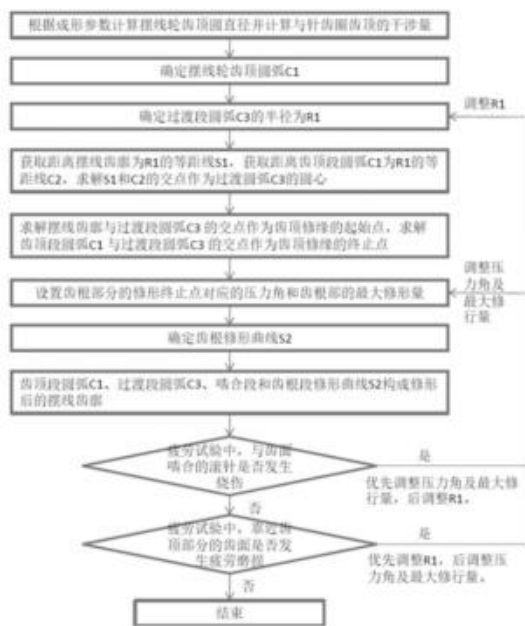
资料来源：李轩，《有侧隙啮合摆线针轮行星传动接触特性分析及实验研究》，重庆大学，2017:1-120；国信证券经济研究所整理

2. 壁垒：在设计与工艺方面均具壁垒

设计方面：齿廓设计与修形方案众多。摆线轮齿廓作为承受载荷和传递动力的直接作用接触面，合理可行的齿廓设计和修正方案是提高摆线针轮行星传动性能的关键因素。为保证摆线轮与针轮齿之间有一定啮合间隙（以便于拆装和补偿制造误差，并形成润滑油膜，实际应用的摆线轮不能采用标准齿形），需要进行齿廓修形。摆线轮的基本修形方法包括移距修形法、等距修形法、转角修形法，可联合使用，如可以采用“负移距+正等距”相结合的修形法，获得较理想摆线轮齿廓。摆线轮齿廓修形技术长期以来是摆线针轮减速器的关键问题，**修形量过小会导致摆线针轮啮合时出现的间隙过小，减速器运转过程中会出现严重干涉从而使零件卡死；修形量过大会导致啮合传动过程中出现的间隙过大，产生较大的回差从而降低传动精度。**

图160: 摆线轮齿廓设计与修形

图161: 不同修形方法比较



资料来源：环动科技专利，国信证券经济研究所整理

修形方法	说明	示意图
移距修形	在磨削摆线轮齿廓时，将砂轮相对工作台多移动一个微小的距离，改变刀具与摆线齿轮的中心距，磨削出来的就是一条新的修形摆线齿廓，工艺上较简单	
等距修形	在磨削摆线轮齿廓时，刀具和工件的相对位置和运动与加工标准齿廓相同，将砂轮齿形半径进行增大或减小，其他与加工标准齿廓时保持一致，这样加工出来的摆线齿廓相当于理论齿廓往内或往外等距了一段距离，是理论齿廓的等距曲线	
转角修形	先磨出标准齿廓，再将分齿机构和偏心机构的联系脱开，拨动分齿挂轮上的齿轮，使工作台转过一微小的角度，改变摆线轮在上一次磨削时的初始位置。通过这种方法得到的修形齿廓与标准齿廓基本一样，只是整个轮齿变小一些，而齿间变大一些。其特点是在同样的修形量下，同时啮合齿数较多，但摆线轮的齿顶和齿根圆处没有间隙存在，因此不能单独使用，需和其他修形方法结合使用	

资料来源：秦大同，等，《现代机械设计手册》，化学工业出版社，2019，第3卷：529-726；庞源，《摆线齿轮的分段修形设计及其连续展成磨削加工技术研究》，重庆大学，2021：1-84；国信证券经济研究所整理。

工艺方面：零件较多，工艺复杂。1) **工艺流程复杂，精度要求高：**相比谐波和行星减速器，摆线针轮减速器零件多，工艺流程长，对公差分配及批量生产一致性要求高。另外摆线轮轮齿精加工普遍采用成型磨削加工工艺，对加工工艺的精度要求较高，众多的零件对装配工艺的精度也提出要求；2) **需磨齿机、磨床、热处理等设备：**针齿壳加工需采用成型磨工艺，摆线轮加工采用磨齿工艺，且摆线针轮减速器常采用高碳铬轴承钢 GCr15，需进行热处理，因此需要采购磨床和热处理设备；一般而言，磨齿机、磨床、热处理炉单价一般在大几百万元到千万级别，对厂商的设备和资金要求较高。

图162: 摆线针轮减速器重要工艺



资料来源：王心成，《新型精密摆线针轮减速器的设计研究》，扬州大学，2019:1-87；国信证券经济研究所整理

3. 市场：摆线减速器有望实现人形机器人搭载

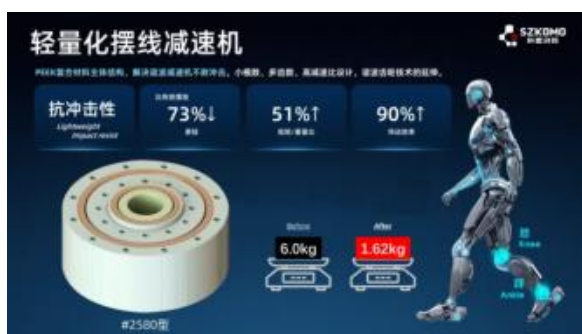
总结：当前人形机器人关节模组方案以行星、谐波减速器为主，各有优劣。行星

减速器结构简单、成本低，但背隙大影响精度，增加控制难度，且多级行星传动导致体积重量大；谐波减速器传动精度高，但柔轮反复变形导致抗冲击性、寿命与可靠性相对不足，限制其在高负载场景的应用。摆线针轮减速器（或升级迭代、优化的版本）兼具精度（较行星）和负载能力（较谐波），且体积小、重量轻（较RV），同时具有较好的传动效率和传动比，成本也相对适中。我们认为，新型减速器在摆线减速器的基础上进行性能、结构、材料等维度的优化升级，有望逐步满足人形机器人部分场景减速器的需求，具有较大的应用潜力。人形机器人有望打开摆线针轮减速器应用空间，结合 QYResearch 等测算，到 2030 年全球机器人用新型减速器的市场空间有望超 140 亿元。

3.1 摆线方案在机器人场景已有一定应用

25 年 4 月，科盟创新发布七款机器人核心传动技术新品，涵盖轻量化、结构紧凑、扭矩/重量比与高精度&高负载稳定性四大技术方向，为人形机器人和工业自动化提供全新技术支撑，其中包含 PEEK 轻量化摆线减速机，可以实现±1.5%低波动率，空间压缩 30%，抗冲击能力提升 200%，适配紧凑型高负载任务，其 PEEK 材料的应用不仅大幅降低重量，同时具备出色的耐磨性和高强度。

图163: 科盟创新 PEEK 轻量化摆线减速机



资料来源：科盟创新公众号，国信证券经济研究所整理

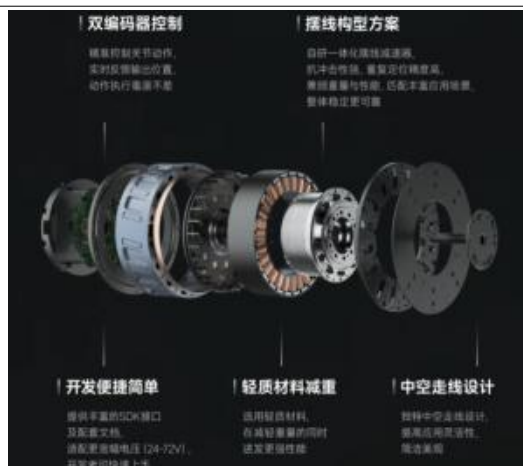
图164: 科盟创新减速机



资料来源：科盟创新公众号，国信证券经济研究所整理

动易科技推出准直驱一体化摆线关节模组，从底层零部件全栈自研，融合高精度摆线减速器、自研力矩电机、驱动系统与双编码器，做到背隙仅有 1 弧分，可承受 5 倍以上瞬时过载冲击力，具轻量化、高爆发、抗冲击、高精度、响应快、集成度高、稳定性强等特点。动易科技 PhyArc 系列关节模组创新选用轻质材料，在减轻重量的同时，让关节迸发出更强性能，同时为关节加入独特的散热方式，不至于过热，散热效率高，让电机在高功率运行时仍能保持稳定。

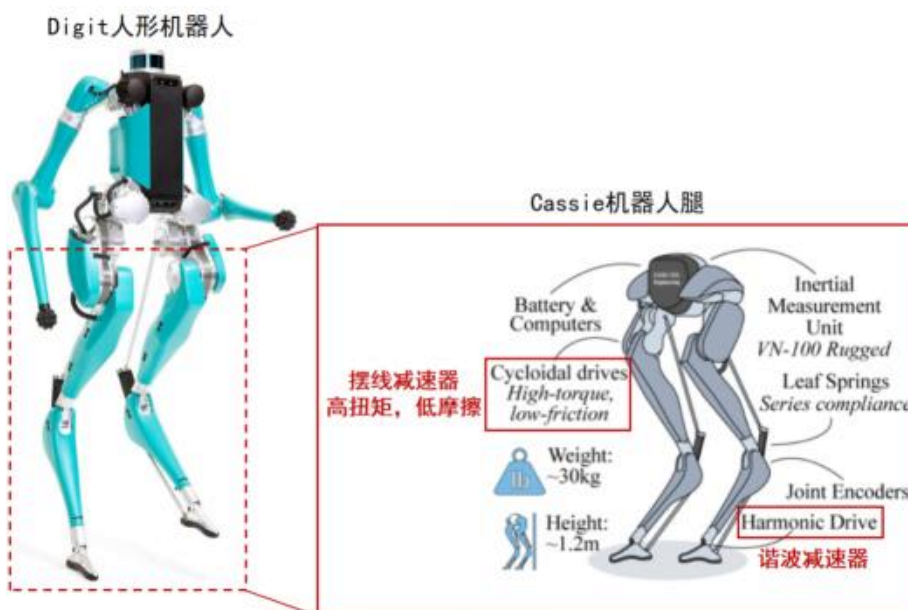
图165: 动易科技 PhyArc 系列摆线关节模组



资料来源：动易科技，国信证券经济研究所整理

由 Agility Robotics 开发的双足机器人 Cassie 及其全人形版本 Digit 参考了鸟类行走机械结构，在腿部采用了摆线减速器，实现了高行走性能。摆线减速器能够实现高减速比和低摩擦，可实现扭矩的精确传递。摆线减速器具有负载力高、传动精度高、体积重量轻等优势，在人形机器人腿部等高负载要求的部位有应用空间。

图166: Agility Robotics 机器人使用摆线减速器



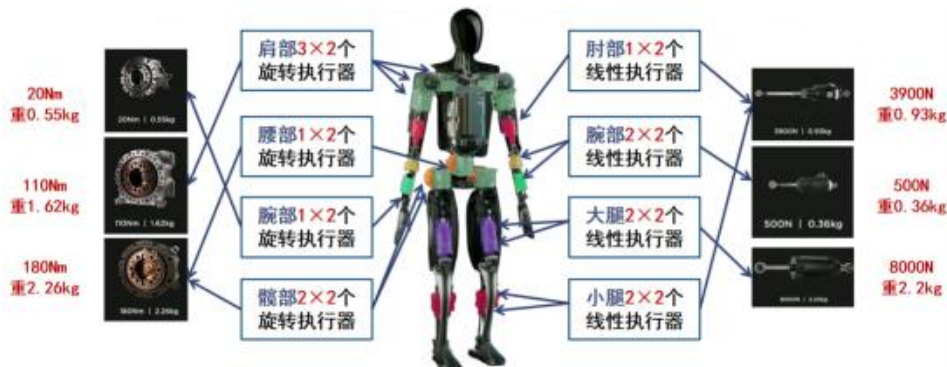
资料来源：White 等，《Force-based Control of Bipedal Balancing on Dynamic Terrain with the "Tallahassee Cassie" Robotic Platform》，IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)，2020:6618-6624；国信证券经济研究所整理

3.2 新型减速器有望持续渗透人形机器人关节方案

从减速器的视角来看，人形机器人关节模组方案目前以行星、谐波减速器为主，各自的技术特性决定其不同的应用边界；行星减速器优势在于结构简单、成本低，且依靠多级行星结构可输出高扭矩，缺点在于其背隙大，从而影响精度，增加控制难度，且行星减速器单级传动比较低，为了提高传动比通常采用多级行星传动，

将增加体积重量；谐波减速器传动精度高，但柔轮强度不够，抗冲击性、寿命与可靠性相对不足，限制其在高负载场景的应用；RV 减速器主要用于工业机械臂领域，其精度高、负载能力强，缺点在于体积和重量大，相对不适合用于人形机器人领域。从特斯拉 Optimus 结构来看，其下肢（大腿、小腿）高负载关节主要依靠的是抗冲击能力强的行星滚柱丝杠，减速器主要搭载于腰髋以及上肢环节。

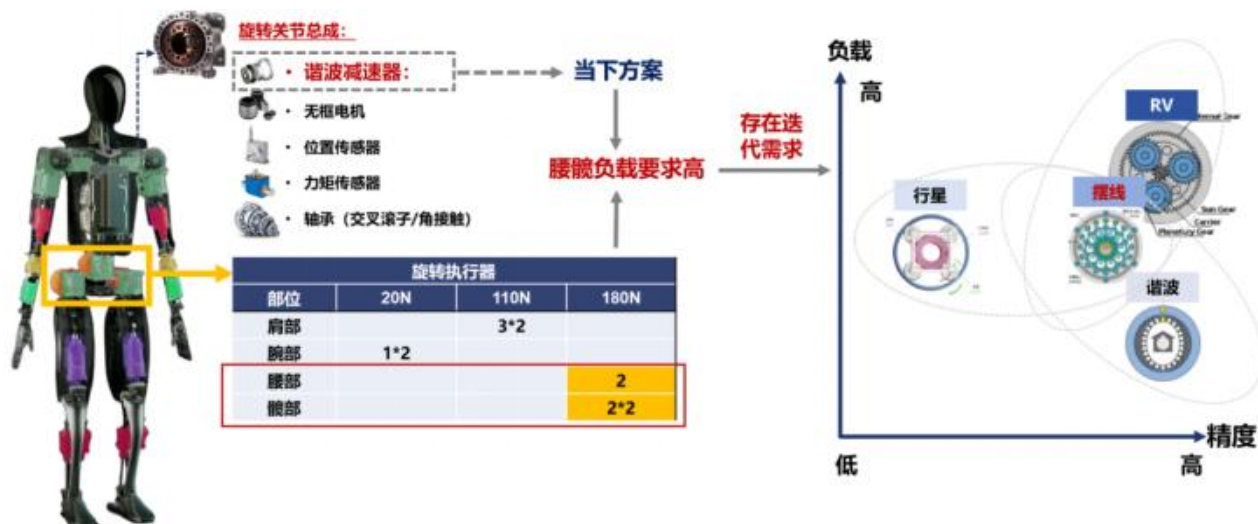
图167: 特斯拉 Optimus 机器人关节情况



资料来源: Tesla AI day, 国信证券经济研究所整理

对于特斯拉 Optimus，腰部*2+髋部 2*2=6 个旋转关节，对负载要求高（180Nm），目前主要是搭载的谐波减速器方案，但谐波减速器存在负载能力弱+疲劳问题，无法完美满足需求，因而存在对腰髋环节减速器升级迭代的需求。而行星减速器传动比小且精度不足，纯 RV 减速器体积和重量大，均无法完美适配需求。摆线针轮减速器（或升级迭代、优化的版本）兼具精度（较行星）和负载能力（较谐波），且（较 RV）体积小、重量轻，同时具有较好的传动效率和传动比，成本也相对适中。我们认为，在摆线减速器的基础上进行性能、结构、材料等维度的优化升级，有望逐步满足人形机器人部分场景减速器的需求，具有较大的应用潜力。

图168: 摆线针轮减速器有望应用于人形机器人腰髋等重负载部位



资料来源: Tesla AI DAY, 国信证券经济研究所整理

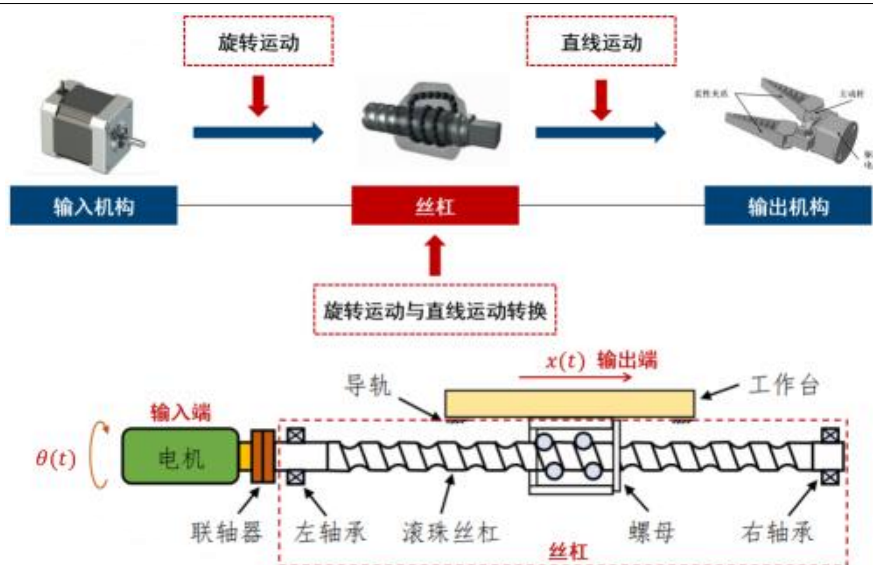
六、产业链拆解之丝杠

1. 丝杠：人形机器人线性关节核心零部件

总结：丝杠是一种将旋转运动（电机端）转化为直线运动（输出端）的机械部件，主流丝杠方案包括梯形丝杠、滚珠丝杠和行星滚柱丝杠。相比梯形丝杠，滚珠丝杠和行星滚柱丝杠将传统的滑动摩擦转为滚动摩擦，极大提升传动效率、传动精度、寿命、传动速度；其中行星滚柱丝杠虽制造成本较高，但具备传动效率高、传动精度高、寿命长、负载能力大等优势，在人形机器人中有较好的适配性。反向式滚柱丝杠一体化、小型化程度高，便于集成为机电集成装置，预计是特斯拉 Optimus 机器人线性关节的选择方案。

丝杠是一种将旋转运动（电机端）转化为直线运动（输出端）的机械部件，广泛应用于具有直线运动功能需求的机器设备。电机通过联轴器带动丝杠轴转动，丝杠轴上的螺母在螺旋形螺纹的驱动下实现直线往复运动，从而将电机的旋转力矩转化为设备运动所需要的直线方向的驱动力。以精密运动平台为例，其基本结构为电机-滚珠丝杠副-导轨-载物台，其中动力源为步进电机，传动单元为滚珠丝杠副，引导单元为交叉滚柱导轨，执行单元为载物台，**滚珠丝杠的主要功能是将电机输出的旋转运动转换为直线运动。**

图169：丝杠基本功能原理



资料来源：金属加工公众号，唐勉志，唐皓，《滚珠丝杠副精密运动平台全行程定位精度预测及补偿》，机械科学与技术，2025，44(7):1188-1199，包正强，《滚珠丝杠进给系统的联合仿真及控制方法研究》，兰州理工大学，2023:1-88；国信证券经济研究所整理

按摩擦特性，丝杠可分为滑动丝杠、静压丝杠和滚动丝杠：

- 1) **滑动丝杠**：最典型的是梯形丝杠，因其牙型截面为梯形而得名；梯形丝杠由丝杠和螺母组成，导程较大，可在低速转动时实现较快的进给，承载能力强。
- 2) **静压丝杠**：螺纹牙形与标准梯形螺纹牙形相同，但牙形高于同规格标准螺纹1.5~2倍，目的在于获得良好油封及提高承载能力；静压丝杠调整较麻烦，需一套液压系统，工艺复杂，成本较高。
- 3) **滚动丝杠**：在螺母与螺杆之间加入钢珠、滚柱等滚动部件，将传统螺杆滑动接

触转换成滚动接触，将螺母内的钢珠、滚柱的回转运动转为线性运动。相比滑动和静压丝杠，**滚动丝杠传动过程中能量损耗较少、传动效率也较高**，主要包含滚珠丝杠和行星滚柱丝杠。行星滚柱丝杠与滚珠丝杠的主要区别是行星滚柱丝杠负载的传递单元使用螺纹滚柱而不是滚珠，从而能够承受更高的静态和动态负载，具更强刚度和抗冲击能力，可提供更高转速及更大加速度。此外行星滚柱丝杠为螺纹传动，螺距设计范围更广，导程可比滚珠丝杠更小。

图170：精密丝杠主要类型



资料来源：头豹产业研究院，鼎智科技官网，张健聪，《行星滚柱丝杠参数设计及静态力学性能分析》，哈尔滨工业大学，2018:1-71；国信证券经济研究所整理

产业链拆解来看，以行星滚柱丝杠为例，行星滚柱丝杠产业链由上游原材料与零部件供应、中游行星滚柱丝杠制造、下游多应用领域构成。上游环节，行星滚柱丝杠中丝杠选用的材料多为合金结构钢，螺母和滚柱选用的材料多为高碳铬轴承钢；零部件包括丝杠、螺母、滚柱、内齿圈等关键部件；下游应用场景涵盖多个行业，从汽车、石油天然气、医疗器械到光学仪器、工程机械、机器人、自动化和机床设备等，应用空间广阔。

图171：行星滚柱丝杠应用领域

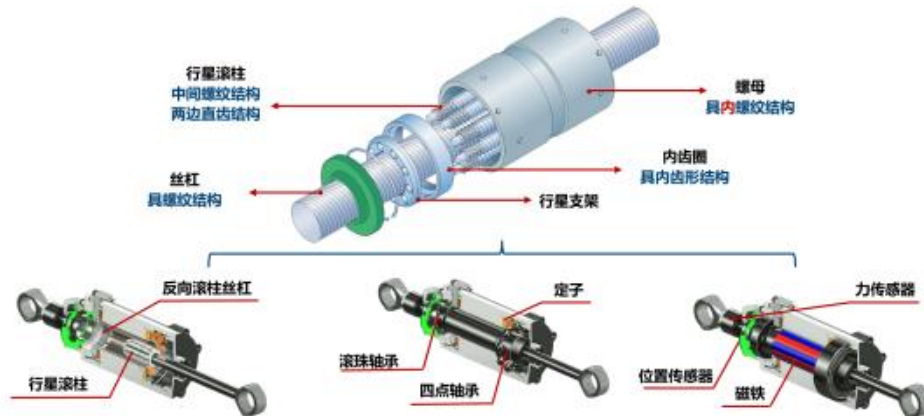


资料来源：前瞻产业研究院，国信证券经济研究所整理

行星滚柱丝杠是人形机器人的核心环节，后续降本空间广阔。以特斯拉机器人Optimus为例，其躯干共有28个关节，旋转关节和直线关节各14个，按照目前的行业情况，预计其中直线关节或采用大、中、小三种共计14个丝杠，分别位于肘部2个、腕部4个、大腿前后4个和小腿4个。根据行业信息，目前人形机器人用行星滚柱丝杠单价为万元级别，成本极高，我们预估后续的降本路径大概为送样阶段（万元级别/套）→小批量生产（几千元/套）→大批量生产（1-2千元/套）的水平，预计批量量产后单台机器人关节丝杠价值量占比约15%-25%左右，

是机器人各零部件中价值量占比最高的环节之一，若后续机器人灵巧手部位也采用微行星滚柱丝杠，则价值量占比有望进一步提升。

图172: 行星滚柱丝杠及相关构造拆解



资料来源：高工机器人，Tesla AI day，国信证券经济研究所整理

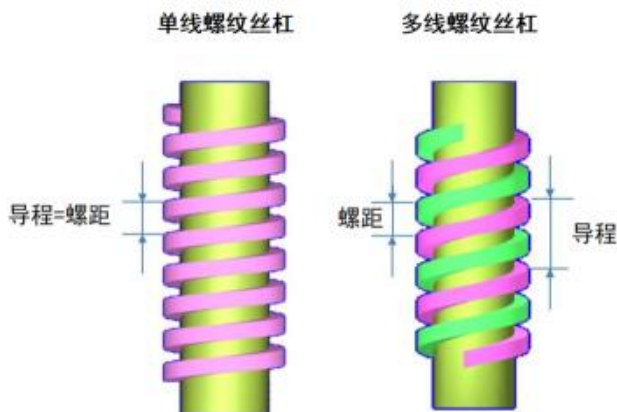
丝杠核心参数：丝杠的关键技术指标包括公称直径、传动效率、载荷、螺旋升角、导程、螺距、寿命、精度、轴向间隙、重复定位精度等。其中螺距是指相邻两牙在中径线上对应两点间的轴向距离；而导程则是指同一条螺旋线上的相邻两牙在中径线上对应两点间的轴向距离。因此当螺纹为单线螺纹时，导程=螺距；多线螺纹时，导程=螺距×线数。

表26: 丝杠关键技术指标、含义及影响因素

技术指标	含义	影响因素
公称直径	丝杠的外径，不仅确定了丝杠的基本尺寸，还直接影响其承载能力。常见规格 12、14、16、20、25、32、40、50、63、80、100 等；	加工精度、运转环境等
传动效率	输出功率与输入功率的比值；	摩擦力矩、磨损、精度保持性、润滑、负载、转速等
载荷	分为静态载荷和动态载荷。额定静载荷是使滚珠与滚道区承受最大接触应力处产生不大于 0.0001 滚珠直径的永久变形量的情况下所允许的最大静载荷；额定动载荷是丝杠在运转过程中，螺旋副不发生疲劳剥蚀所能承受的纯轴向载荷；	公称直径、加工误差、表面粗糙度、材料特性、修形量、啮合位置等
螺旋升角	在公称直径的圆柱上螺旋线的切线与垂直于螺纹轴线平面间的夹角 λ ，计算公式为： $\tan \lambda = Ph / (\pi d_0)$ ，其中 Ph 是导程， d_0 是公称直径；	公称直径、导程等
导程	同一条螺旋线上的相邻两牙在中径线上对应两点间的轴向距离，通常以毫米或英寸表示。导程越大，移动速度越快，但也意味着轴承负载增加；	丝杠长度、公称直径等
螺距	相邻两牙在中径线上对应两点间的轴向距离，通常以毫米或英寸表示。螺距越大，每转实现的进给量越大，但也会导致阻力增大，影响精度；	丝杠长度、公称直径等
寿命	丝杠在使用寿命内所能承受的负荷次数；	负荷、转速、温度、润滑等
精度	丝杠制造精度的评价标准，在行星滚柱丝杠实际的工程应用中，通常将螺母行程为 300mm 时传动误差作为传动精度的指标；	加工误差、负载、转速、润滑等
轴向间隙	在滚珠螺母与滚珠丝杠之间没有相对转动时，两者之间总的相对轴向自由位移量；	加工精度、预压、装配等
重复定位精度	丝杠在相同的条件下多次移动到同一位置时的误差，高精度滚珠丝杠的重复定位精度可以载荷、速度、加/减速度、运动方向、温度、轴向间隙等达到 0.001mm 以下。在需要频繁定位的场合，重复定位精度非常重要。	加工精度、预压、装配等

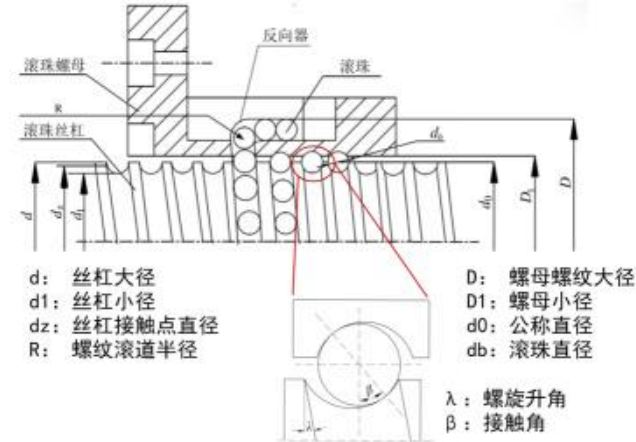
资料来源：金属加工公众号，Thomson 官网，百度爱采购，中华人民共和国国家标准 GB/T 17587.5-2008，中华人民共和国国家标准 GB/T 17587.1-2017，上海慧腾官网，冯虎田、祖莉、徐子杰，《滚珠丝杠副传动效率影响因素试验研究》，金属加工（冷加工），2022，（2）：7-10，刘荣荣，《凸凹式行星滚柱丝杠承载与磨损特性理论研究》，重庆大学，2022：1-91，刘波，《滚珠丝杠副额定动载荷值的影响因素研究及其计算实现》，浙江大学，2006：1-75；国信证券经济研究所整理

图173: 丝杠导程与螺距关系



资料来源：机械工程文萃公众号，国信证券经济研究所整理

图174: 滚珠丝杠的核心结构参数



资料来源：卢宇，《重载滚珠丝杠副接触载荷与刚度分析研究》，太原科技大学，2024:1-84；国信证券经济研究所整理

丝杠精度等级：不同国家和地区对丝杠精度等级划分不同的标准，但基本都采用丝杠任意 300mm 行程内的行程变动量来进行衡量。我国国家标准《GB/T 17587.3—2017 滚珠丝杠副第 3 部分》将滚珠丝杠分为 0、1、2、3、4、5、7、10 共 8 个公差等级，其中 0 级（P0）精度最高；据上银科技，基于日本 JIS 标准，丝杠下游应用领域的精度要求较为多样化。其中，工业母机对丝杠的精度要求较高，如用于加工设备的高精密磨床、车床要求 C0 级别精度。在机器人中，精密的机械臂要求 C1~C4 级精度，一般级别的机械手臂则为 C5~C7 精度。

表27: 丝杠精度等级及部分应用领域要求

国内标准	精度等级	P0	P1	P2	P3	P4	P5	P7	P10
	精度 (μm)	3.5	6	8	12	16	23	52	210
ISO 标准	精度等级	IT0	IT1	IT2	IT3	IT4	IT5	IT7	IT10
	精度 (μm)	4	6	8	12	16	23	52	210
日本 JIS 标准	精度等级	C0	C1	C2	C3	—	C5	C7	C10
	精度 (μm)	3.5	5	7	8	—	18	50	210
主要应用领域	高精度机床、精密测量设备等				航空制造设备、精密投影及三坐标测量设备等		数控设备		普通机械
车床	○	○	○	○	○	○	○		
磨床	○	○	○	○	○				
铣床、镗床		○	○	○	○	○	○		
钻床					○	○	○		
航空制造设备、精密投影设备等			○	○	○				
机械手臂（精密级）		○	○	○	○				
机械手臂（一般级）							○	○	
航空负载齿轮							○	○	
搬送装置						○	○	○	○

资料来源：中华人民共和国国家标准 GB/T 17587.3—2017，金属加工公众号，上海慧腾官网，上银科技官网，国信证券经济研究所整理

对比三种丝杠的优劣势：梯形丝杠性能弱于滚珠和行星滚柱丝杠，但成本低、结构简单、制造方便，国产化率较高，通常用于机床等领域；滚珠丝杠传动效率高，但工艺复杂、成本高，适用于高精度传动；行星滚柱丝杠性能更强，传动效率高、精度高、长寿命、高承载，但前期投入成本高，制造壁垒高，国产化率低。

- **梯形丝杠**：成本较低，工艺成熟，但滑动摩擦摩擦力大，影响传动效率+精度较低，一般不用于高速传输，表面损伤较大，寿命较低；梯形丝杠啮合区域较滚珠丝杠大（增大牙形接触面积），提升传动自锁性（可防止工件在断电或停止驱动时滑落）；梯形丝杠一次完成工艺效率高，结构简单，成本较低。
- **滚珠丝杠**：摩擦损失小、传动效率高。滚珠丝杠的丝杠轴与丝杠螺母之间有滚珠做滚动运动，实现较高运动效率（可达 90%+）；由于滚珠丝杠中的滚珠是滚动摩擦，其静摩擦力与动摩擦力几乎相等，因此不需要大的启动力矩，在启动（或低速时）的时候不会发生颤动，提高传动的灵敏度、准确度和平稳性，能够实现精确的微进给。
- **行星滚柱丝杠**：高承载、耐冲击、体积小、高速度、低噪音、高精度、长寿命。行星滚柱丝杠的接触形式为线接触，相比滚珠丝杠大量增加接触点，提升承载力和刚性，利于达到较高的导程精度；相同载荷下，行星滚柱丝杠体积比滚珠丝杠小（预估节省 1/3 左右的空间），且寿命更长。

表28：三种丝杠的核心参数对比及优缺点梳理

核心指标	梯形丝杠	滚珠丝杠	行星滚柱丝杠
丝杠示意图			
传动方式	滑动摩擦	滚动摩擦（点接触）	滚动摩擦（线接触）
传动精度	低	较高	高
寿命	低	较高	高
承载能力	高	较高	高
成本	低	较高	高
导程	一般>1mm	一般>0.5mm	可<0.5mm
自锁性	高	低	较高
体积	-	-	小
优点	结构和工艺简单、成本低	传动效率高、传动精度高	长寿命、高承载、耐冲击、体积小、高精度、噪音低、高速度
缺点	传动效率和精度低、无法用于高速传动、易发热、寿命低	自锁性低、承载力不高、寿命相对行星滚柱丝杠不高	价格高、生产难度大

资料来源：头豹产业研究院，鼎智科技官网，博特精工官网，杨光，《基于行星滚柱丝杠的伺服电动缸节能高效起竖关键技术》，南京理工大学，2023:1-99，潘小英，《鸿鑫公司滚珠丝杠项目的商业计划书》，华南理工大学，2019:1-69；国信证券经济研究所整理

1.1 梯形丝杠：结构简单，一次完成工艺效率高

梯形丝杠由丝杠和螺母组成，二者通过螺纹直接啮合，当电机驱动丝杠旋转时，螺母通过与丝杠之间的滑动摩擦力而沿丝杠轴向移动。梯形丝杠拥有导程较大、价格低、技术成熟等特点，可在低速转动时实现较快进给，且承载能力强，广泛应用于机床、矿山、医疗等领域。同时梯形丝杠具有一定自锁性。

- **结构简单，加工方便，价格经济**：梯形丝杠的结构相对简单，加工起来也较为方便，在成本上较为经济。

- **自锁性：**自锁性是指由于梯形丝杠的螺纹外形特性，螺旋升角小于当量摩擦角时，丝杠与螺母不会发生滑动。这种自锁性在特定应用领域具有明显优势，例如垂直升降系统中，带自锁的丝杠副无需加装额外的锁紧装置，在电机失速时自锁性提供了更高的安全系数。

梯形丝杠由于滑动摩擦的特性存在一定劣势：

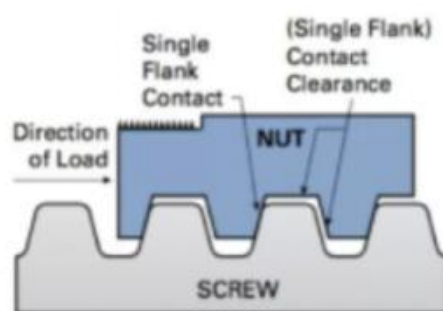
- **工作时温升高、磨损大、寿命低，不适用于高速传输：**滑动摩擦工作时温升较大，过高的速度将在结合面上产生高热量，导致磨损加剧、寿命较低，因而适合于重量较轻，速度要求不高的应用中。
- **传动效率低：**梯形丝杠的传动效率低于其他精密丝杠。

图175：梯形丝杠示意图



资料来源：米思米官网，国信证券经济研究所整理

图176：梯形丝杠结构简图



资料来源：斯科勒自动化官网，国信证券经济研究所整理

1.2 滚珠丝杠：精密传动元件，滚动摩擦代替滑动摩擦

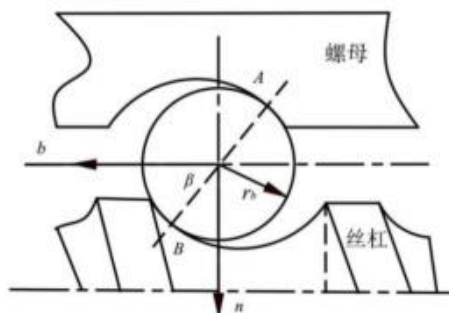
滚珠丝杠由螺杆、螺母、钢球、预压片、反向器、防尘器组成，通过滚珠在螺纹带上滚动，将旋转运动转化为线性运动，具高精度、可逆性和高效率的特点。螺母和丝杆的表面被加工成与滚珠配合的螺纹滚道，滚珠作为中间传动介质在螺旋滚道内沿螺旋滚道运动，从而迫使螺母轴向移动；滚珠滚动一圈后，螺母上设置的反向器会使其回到初始位置，构成滚珠循环链。滚珠反复循环运动，带动螺母沿着丝杆轴向运动，实现旋转和直线运动双向转换。滚珠丝杠使用螺母与丝杠滚道之间的滚动运动代替滑动运动，大大提高传动效率，在传动领域有重要的应用。

图177：滚珠丝杠结构



资料来源：石国辉，《滚珠丝杠高精研磨工艺及装置研究》，南京理工大学，2022:1-84；国信证券经济研究所整理

图178：滚珠与滚道接触图



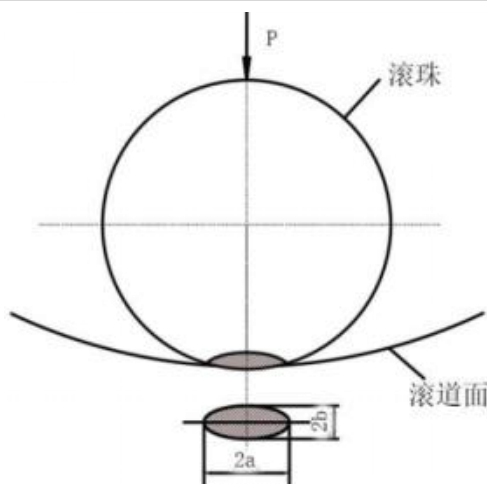
资料来源：燕栋，《精密滚珠丝杠副精度保持性影响因素分析及试验研究》，山东建筑大学，2023:1-66；国信证券经济研究所整理

滚珠丝杠的滚动摩擦原理使其与传统的滑动摩擦方式相比具较多优势：

- **传动效率高**：滚珠丝杠在实际工作条件下滚动所产生磨损较小，传动效率高（超 90%），产生的功率消耗也相对较低，约传统丝杠 $1/4 \sim 1/3$ 。
- **传动精度高**：丝杠的轴向间隙可通过预紧力来消除，而热伸长现象则可通过对丝杠预拉伸来补偿，从而可得到较高的定位和进给精度。
- **传动平稳**：传动过程中，滚珠滚动带动丝杠和螺母运动，产生的摩擦阻力很小，启动时无振动、无爬行现象，因此灵敏度较高，可实现精密的微量进给。
- **寿命长**：滚珠丝杠在选材上选用综合力学性能较好的钢材，并经过淬硬等热处理或表面改性处理，因此长期使用后磨损较小，工作寿命较长。

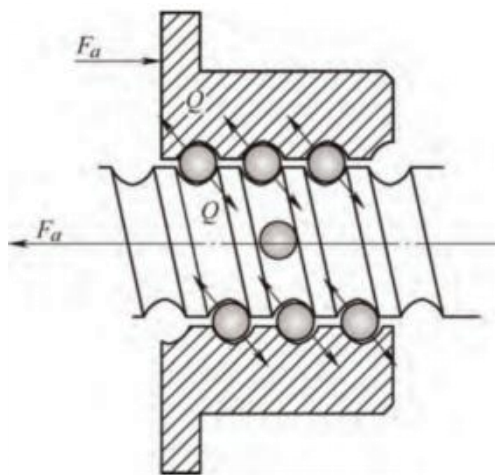
相比行星滚柱丝杠，滚珠丝杠也存在使用寿命和承载能力低的问题。在高速运转时，滚珠丝杠里的滚珠受离心力作用发生滑动，使机构的径向振动加剧，相比行星滚柱丝杠出现温升过快与寿命下降等问题。在重载工况下，滚珠由于弹性变形和摩擦力作用，易发生卡死导致无法正常运转。

图179：滚珠与滚道面的小接触点提高传动效率



资料来源：燕栋，《精密滚珠丝杠副精度保持性影响因素分析及试验研究》，山东建筑大学，2023:1-66；国信证券经济研究所整理

图180：螺母轴向载荷由滚珠的接触载荷轴向分量之和平衡

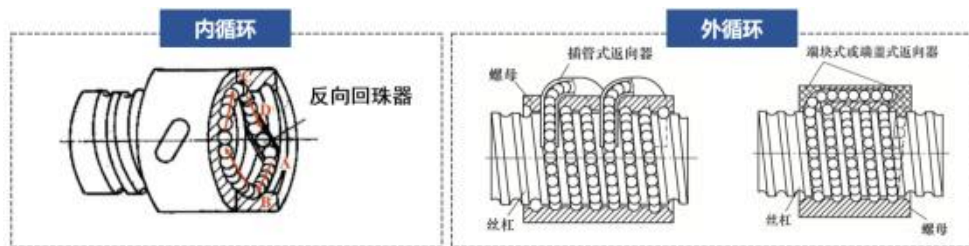


资料来源：冯虎田、祖莉、徐子杰，《滚珠丝杠副传动效率影响因素试验研究》，金属加工（冷加工），2022，（2）：7-10；国信证券经济研究所整理

根据螺母中的滚珠循环方式，滚珠丝杠主要分为外循环、内循环。

- **内循环滚珠丝杠**：内循环滚珠丝杠主要由丝杠、螺母、滚珠及反向器 4 个部分组成。滚珠在循环过程中始终不离开丝杠表面，具有结构尺寸小、传动效率高、滚珠循环链短、同步性能好的特点，适用于结构紧凑的机械设备。但反向器安装在螺母内部，加工难度较高。
- **外循环滚珠丝杠**：在运行中滚珠会离开滚道，通过反向器（突出于滚珠螺母外径之上）回到初始位置；外循环结构承载能力较好，且工艺简单，适于批量生产，但其滚道接缝处较难做得平滑，影响滚珠滚动平稳性，甚至发生卡珠现象，噪声较大；同时外循环弯管突出在螺母外部，导致径向尺寸较大。

图181：内循环式与外循环式滚珠丝杠



资料来源：张海栋，《高速滚珠丝杠副动力学性能提升的关键技术研究》，东南大学，2019:1-77，机械工程文萃公众号；国信证券经济研究所整理

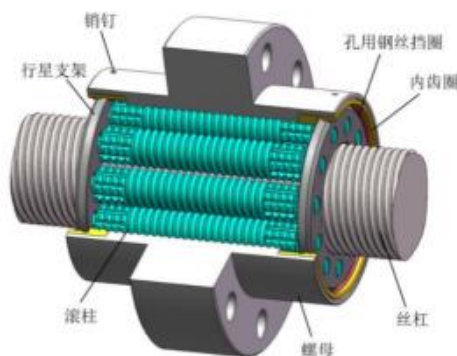
1.3 行星滚柱丝杠：精度和承载力高，当下机器人关节主流方案

在滚珠丝杠的基础上，行星滚柱丝杠将传动单元变为滚柱，克服传统液压传动装置固有的环境适应性差、可靠性低等缺点，并具备高承载能力、传动精度、传动效率、轴向刚度与高速性能，应用于数控机床、航空航天、武器装备等领域。

标准式行星滚柱丝杠主要包括丝杆、滚柱、内齿圈、保持架和螺母等主要零件：

1) 丝杠上有多头螺纹，2) 滚柱有相同牙型角的单头螺纹；3) 螺母具与丝杠相同头数和牙型的内螺纹；4) 保持架：滚柱通过保持架均匀分布于丝杠、螺母间，防止滚柱相对螺母轴向窜动，保持架与螺母之间轴向方向相对固定；5) 直齿：为消除丝杠螺旋升角对滚柱产生的倾斜力矩，在滚柱两端加工有直齿，与内齿圈啮合，确保滚柱轴线平行于丝杠轴线正常滚动，避免滚柱相对于螺母滑动产生偏斜现象。

图182：行星滚柱丝杠内部结构示意图



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》，南京理工大学，2021:1-108；国信证券经济研究所整理

图183：行星滚柱丝杠零部件



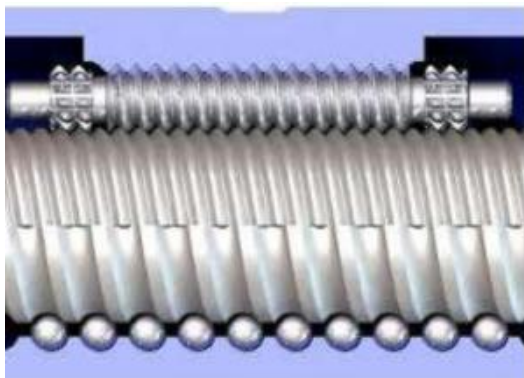
资料来源：王家健，《行星滚柱丝杠设计》，南京理工大学，2020:1-89；国信证券经济研究所整理

行星滚柱丝杠的传动原理是电机驱动丝杠旋转，从而带动滚柱绕丝杠轴向公转，同时绕自身轴线自转，然后滚柱带动螺母做轴向运动。其中滚柱与螺母的螺旋升角相等以实现二者之间无相对轴向位移，而丝杠的螺旋升角大于滚柱的螺旋升角以实现轴向和周向运动。**与滚珠丝杠相比，行星滚柱丝杠具有以下优势：**

- **承载能力强、工作寿命和可靠性高：**滚柱丝杠的主丝杠周围布置有若干行星螺纹滚柱，作为负载的传递单元，相对滚珠方案大幅增加接触面和受力面，接触线长、传动间隙小，尤其在动载荷工况下，多根滚柱可将冲击分散至螺纹接触线上，使其可承受更高静态和动态负载。行星滚柱丝杠拥有高精度、高传动效率、高承载、高可靠性等优点，适合用于要求高负载、高功率、高转速、高线速度、高加速度、极高精度和刚性的环境，且寿命比滚珠丝杠高，可恶劣工况下连续工作上万小时，工作环境温度范围相比滚珠丝杠提高。

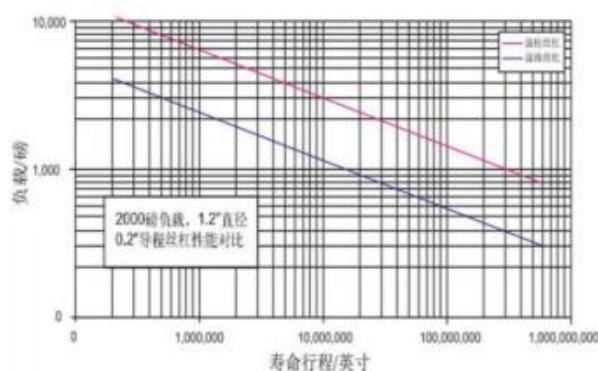
- **传动精度高：**滚柱丝杠中丝杠螺旋升角较小，螺距设计范围更广，导程可以设计得比滚珠丝杠更小，定位精度更高，且传动噪声低。
- **安装空间紧凑：**相同负载下，体积较滚珠丝杠节省约 1/3，安装空间紧凑。
- **速度和加速度特性好：**滚柱丝杠通过滚柱作为传动体进行传动，与行星齿轮类似，在保持架的作用下能够保证啮合运动的顺畅进行，保证螺母能够顺利的往复直线运动，更多的啮合点保证滚柱丝杠可获得更高的速度和加速度。

图184：行星滚柱丝杠接触点比滚珠丝杠多



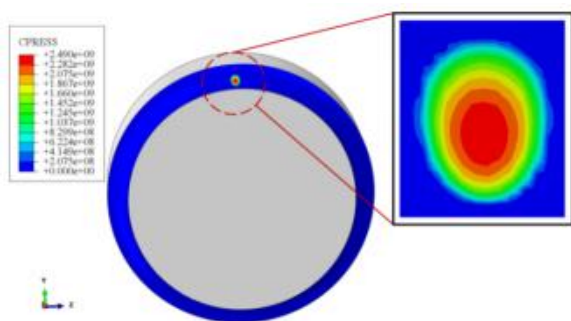
资料来源：李巧，《循环式行星滚柱丝杠副的设计及运动连续性研究》，陕西理工大学，2021:1-91；国信证券经济研究所整理

图185：行星滚柱丝杠寿命比滚珠丝杠高



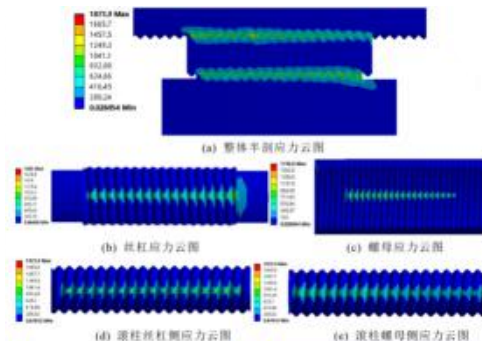
资料来源：李巧，《循环式行星滚柱丝杠副的设计及运动连续性研究》，陕西理工大学，2021:1-91；国信证券经济研究所整理

图186：滚珠丝杠应力与负载集中在滚珠接触点



资料来源：冯本哲，《滚珠丝杠材料的滚动接触疲劳试验与仿真研究》，南京理工大学，2023:1-83；国信证券经济研究所整理

图187：行星滚柱丝杠多个滚柱共同承受载荷



资料来源：王敏，《反向式行星滚柱丝杠静态承载能力研究》，哈尔滨工业大学，2021:1-73；国信证券经济研究所整理

行星滚柱丝杠根据其结构组成及运动关系不同可分为标准式、反向式、循环式、差动式、轴承环式行星滚柱丝杠：

- **标准式行星滚柱丝杠：**标准方案；为避免滚柱轴线相对于丝杆倾斜，消除丝杆螺旋升角对滚柱产生倾覆力矩，滚柱两端带有螺旋齿，确保滚柱平行于丝杆轴线而正常转动。
- **反向式行星滚柱丝杠：**与标准式的区别在于，反向式是将电机直接集成到滚柱丝杠螺母上，螺母作为旋转输入而丝杆作为直线输出，丝杠上仅在与滚柱旋合的部位加工有螺纹或螺旋齿。在结构上，相比标准式，反向式的螺母长度比标准式的大，螺母内螺纹长度明显更深，而滚柱和丝杠的长度较短，且无内齿圈，丝杠两端加工有直齿与滚柱两端的直齿啮合。反向式**便于集成**，

一体化、小型化程度高，可将螺母作为电机转子实现电机和丝杠一体化设计，形成结构紧凑的一体式机电装置，缺点是螺母中深长的内螺纹不易加工，对加工条件和设备要求较高，而且行程受到螺母内螺纹长度的限制。

- **循环式行星滚柱丝杠：**相比于标准式，循环式去掉内齿圈，增加凸轮环结构，其功能类似于滚珠丝杠返回器，使滚柱在螺母内旋转一周后回到初始位置，另外滚柱上无螺纹、齿轮结构，为环槽状，环槽间距与丝杠、螺母的螺纹匹配，安装在具有凹槽结构的保持架上。循环式行星滚柱丝杠的结构特点增加了参与啮合的螺纹数量，因此具有较高的刚度和较大的承载能力，主要应用于要求高刚度、高承载、高精度的场合。循环式的缺点在于其凸轮环结构会产生振动冲击，存在噪音问题，而且凸轮环的设计与装配是循环式的难点。
- **差动式行星滚柱丝杠：**与标准式相比，差动式无内齿圈，滚柱上也无齿轮段，滚柱和螺母均为环槽结构。滚柱的环槽分为多段，小直径段环槽与螺母啮合，大直径段环槽与丝杠啮合。差动式丝杠的结构特点使其可获得更小的导程，适用于传动比大、承载能力高的应用场合。但在其运动过程中，螺纹会产生滑动现象，在重载情况下容易产生磨损，导致精度丧失、可靠性降低等问题。
- **轴承环式行星滚柱丝杠：**滚柱与循环式相同为环槽结构，相比标准式，其螺母去掉内齿圈，增加壳体、端盖及推力圆柱滚子轴承等部件；轴承环式丝杠上的推力圆柱滚子轴承提高了承载能力，同时也减小各构件间磨损，增大传动效率，适用于高承载、高效率领域，但结构复杂，径向尺寸大，成本高。

图188: 行星滚柱丝杠类型特点及应用领域

行星滚柱丝杠类型	特点	应用领域	示意图
标准式	- 丝杠、螺母为三角形多头螺纹，滚柱为具有一定螺旋升角的球形单头螺纹，并在其两端加工有直齿，内齿圈固定在螺母两端并与滚柱两端的直齿轮啮合。 - 一般情况下，丝杠为主动件，螺母为输出构件。它能够实现较大行程，适用于环境恶劣、高负载、高速等场合，是目前应用最广泛的类型。	精密机床、机器人、军工装备等	
反向式	- 结构形式与标准式类似，不同在于没有内齿圈。滚柱不沿丝杠进行轴向运动，其行程运动是在螺母的内螺纹。丝杠两端加工有直齿与滚柱两端的直齿轮啮合，且螺母作为主动件，丝杠为输出构件，滚柱、丝杠之间无相对轴向位移，主要用于中小负载、小行程和高速的应用场景。 - 优点：可将其螺母作为电机转子实现电机和丝杠一体化设计，形成结构紧凑的一体式机电作动器，可替代传统液压、气压伺服作动系统。 - 缺点：行程受到螺母内螺纹长度的限制。	航空、航天、船舶、电力等	
循环式	- 相比标准式去掉了内齿圈，增加了凸轮环结构，功能类似于滚珠丝杠的返回器，目的是让滚柱在螺母内旋转一周后回到初始位置。滚柱上无螺纹、齿轮结构，为环槽状，环槽间距与丝杠、螺母的螺纹匹配，安装在具有凹槽结构的保持架上。 - 优点：增加了参与啮合的螺纹数量，刚度高、承载能力大，主要应用于要求高刚度、高承载、高精度的场合。 - 缺点：凸轮环结构会产生振动冲击，存在噪音问题。	医疗器械、光学精密仪器等	
差动式	- 与标准式相比去掉了内齿圈，滚柱上没有齿轮段。滚柱、螺母均为环槽结构，且滚柱的环槽分为多段，其中小直径段与螺母啮合，大直径段与丝杠啮合。 - 优点：可以获得更小的导程，适用于传动比大、承载能力高的应用场合。 - 缺点：运动过程中螺纹会产生滑动现象，在重载情况下容易产生磨损，导致精度丧失、可靠性降低等问题。	航空航天、武器装备、机器人、汽车、高精精密机床和石油化工等	
轴承环式	- 滚柱与循环式相同，为环槽结构，相比标准式，其螺母上去掉了内齿圈，增加了壳体、端盖及推力圆柱滚子轴承等部件。 - 优点：推力圆柱滚子轴承大大提高了其承载能力，减小构件间的磨损，增大传动效率，适用于高承载、高效率等领域。 - 缺点：结构复杂，径向尺寸大，制造成本高等。	石油化工、重型机械等	

资料来源：GGII，柯浩，《行星滚柱丝杠传动精度分析与设计》，华中科技大学，2020:1-100，郑正鼎，《差动式行星滚柱丝杠传动特性理论研究》，重庆大学，2020:1-98；国信证券经济研究所整理

2. 壁垒：壁垒高筑，制造设备与工艺技术 Know how 为核

总结：行星滚柱丝杠优异性能的背后支撑是极高的工艺要求和设备壁垒，同时行

星滚柱丝杠生产的另一关键点主要体现为**精度与效率的权衡**，如何在保持加工精度的同时提高加工效率，是降低制造成本、打开应用空间的重要前提。总体来看，行星滚柱丝杠的核心在设备能力、制造工艺 know how、批量生产能力：1) 设备方面，丝杠高精度特性对设备要求高，国产磨床加工精度不及进口磨床，出品易不稳定，因此目前高端加工设备依赖进口，但海外高端磨床成本高（近千万元/台）+采购周期长（1 年+）；2) 工艺方面，螺纹加工存在轧、磨、车、铣等多种方案，目前磨制是应用相对广泛的方案；螺母的内螺纹加工是核心壁垒所在，制造工艺难度较大；3) **一致性批量生产**：人形机器人远期需求有望达百万台，对于零部件公司的批量生产能力和一致性保持能力同样提出较高要求。

行星滚柱丝杠难度高、壁垒高筑，是人形机器人最高价值环节的零件之一。特斯拉 Optimus 行星滚柱丝杠的核心壁垒在于制造设备和工艺技术的 Know-how，我们从设备采购、热处理工艺、加工工艺等方面分析研究行星滚柱丝杠的技术壁垒。

- **设备资金**：丝杠的高精度特性使其对制造设备要求高，目前高精密加工设备主要依赖进口，购置成本较高；1) 设备受限于进口，**到货周期长**：螺纹磨床是提升精度关键设备，包括内螺纹与外螺纹磨床（或车磨一体），国产磨床可满足 C3~C4 精度加工，但批量加工高端丝杠（C0~C2）时易存在出品不稳定现象，外资设备需从日、欧、美等国家采购，交付周期长，**到货周期至少一年起步**，且设备到场后需定向调试；2) **资金要求高**：进口精密磨床和精密铣床价格高昂，**例如大型丝杠切削制造机床每台价格超过百万美元**。
- **热处理**：热处理工序可改善丝杠副各零件材料性能、切削性能及消除残余应力，提高材料的表面硬度及耐磨性；技术设备落后、热处理工艺参数选择不当等原因都可能导致热处理质量较差、热处理后材料变形较大，产生接触疲劳磨损，降低使用寿命。

表29：行星滚柱丝杠不同部位热处理方法

部位	热处理方法
丝杠表面	采用感应淬火，硬化层深度 1.5~2.0mm
螺母表面	理采用渗碳淬火，硬化层深度 1.0~1.4mm
滚柱和内齿圈	整体进行调质处理，调质硬度 HB235，齿面氮化处理，齿面硬度不低于 HV600，硬化层深度 0.4~0.5mm

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》，南京理工大学，2021:1-108，GGII；国信证券经济研究所整理

- **加工工艺：效率+精度+一致性批量生产**。螺纹滚柱、螺母、丝杠作为行星滚柱丝杠传动机构的关键部分，其成形加工工艺的效率和精度直接决定丝杠的成本与性能。在丝杠整体加工工序中螺纹加工是重中之重。目前行星滚柱丝杠螺纹加工方式包括包括有轧制（滚轧）、车削、磨制（磨削）、旋风铣等。在丝杠制造过程中会产生误差与能量损失，行星滚柱丝杠主要有形变误差、制造误差、安装误差等，其中制造环节包括螺纹螺距、螺纹牙型、齿轮齿距、齿轮齿廓、制造偏心等误差，想要避免误差的干扰需较多制造工艺 Know-how。此外，人形机器人远期需求有望达百万台，对于零部件公司的批量生产能力和一致性保持能力同样提出较高要求。

图189：行星滚柱丝杠与加工制造相关的误差来源

与加工制造相关的误差来源		含义	示意图
安装误差	偏斜误差	由于加工误差，滚柱中心轴线无法与丝杠、螺母的中心轴线平行，导致滚柱出现偏斜，或者滚柱在装配过程中，保持架并未正确安装导致滚柱出现偏斜的误差。这两种偏移是对啮合间隙影响最大的因素，进而影响传动精度。	
	安装偏心误差	由于安装过程中，顶尖中心连线和拨盘轴线产生的直线度偏差。偏心误差会对螺纹啮合状态及齿轮啮合状态产生影响，从而降低行星滚柱丝杠的传动精度。	
	位置误差	在实际装配过程中，受各个零件加工一致性的不同，使得螺母内部齿圈和行星支架的左右对中性较差所产生的误差，即丝杠旋转轴线与螺母外圆轴线之间的偏差。螺母的位置误差会直接影响行星滚柱丝杠的传动精度。	
制造误差	螺纹螺距误差	丝杠螺纹在磨削加工过程中，机床传动误差、工件和机床母丝杠的热变形误差，以及砂轮与滚道之间的接触变形等因素会导致砂轮的实际进给量与理论值有所偏差。螺距误差是当滚柱沿轴向母线滚动通过丝杠滚道时，滚柱轴向运动的实际位置与理论位置之间的差异。螺距误差影响行星滚柱丝杠的传动精度和传动效率，对螺纹啮合产生较大影响。	
	螺纹牙型误差	也称牙侧角偏差。为实际值与理论设计值之间的误差，牙型半角误差过大会使螺纹副的接触角发生改变导致承载不均，加速螺纹表面的磨损并增大行程误差，且螺纹牙左右侧的牙型角误差不同，会导致行星滚柱丝杠副的正反行程传动性能有所差异，降低传动精度。	
	齿轮齿距误差	齿轮齿距实际值与理论值之间的偏差。Fpmin为齿距误差最小值，Fpmax为齿距误差最大值。由于每对齿均存在齿距误差，故一般考虑齿轮齿距累积误差，即各齿距误差累积的总幅值Fp。齿轮齿距误差影响对齿轮啮合、齿轮的转角误差，降低传动机构的传动精度。	
制造误差	齿轮齿廓误差	在齿廓的范围内，实际齿廓线的包络线有许多条，将距离为最小的两条称为设计齿廓线，它们之间的距离即为齿廓偏差。齿轮齿廓误差不仅会影响齿轮副受载和齿轮的转角误差，从而影响机构的传动精度。	
	制造偏心误差	行星滚柱丝杠的螺纹在机械加工的过程中，两端中心孔的轴线与螺纹滚道的轴线没有同轴，此误差导致丝杠在旋转的过程中滚道产生跳动，从而对行程误差产生周期性的影响。直接影响螺纹的啮合状态，从而影响行星滚柱丝杠的传动精度。	

资料来源：柯浩，《行星滚柱丝杠传动精度分析与设计》，华中科技大学，2020:1-100，牛星，《精密滚珠丝杠磨削加工精度及其测试方法研究》，山东建筑大学，2021:1-76，伍文博，《考虑综合误差的行星滚柱丝杠副接触特性分析及参数优化》，南京理工大学，2023:1-97，郑伟，《精密行星滚柱丝杠副工艺制造与传动性能研究》，南京理工大学，2021:1-108；国信证券经济研究所整理

2.1 工艺：螺纹加工工艺复杂，技术路径尚未收敛，壁垒深厚

在行星滚柱丝杠和滚珠丝杠中，丝杠通过螺纹啮合来实现精密传动，螺纹的加工精度将直接影响丝杠系统的传动精度、使用寿命、平稳性，故螺纹的加工工艺是影响行星滚柱丝杠性能的关键因素，壁垒深厚。

丝杠螺纹加工工艺主要包括轧制和切削法，其中切削包括硬态车削、磨削加工、旋风铣削等工艺，目前看磨削加工是精密丝杠的精加工主流方案。轧制法采用成形滚压模具使工件产生塑性变形以获得螺纹，而切削法则通过去除材料来形成螺纹。具体来看：1）轧制工艺使用硬化钢模具将工件材料变形为螺纹轮廓，无需切削，加工效率高，但一般精度较低（约 P5~P10 级）；2）磨制工艺加工工序复杂、效率较低，但最高精度可达 P0 级，是精密滚珠/滚柱丝杠的主流精加工工艺；3）车削工艺相对磨削效率有所提升（以车代磨的优势），但加工精度不及磨削，且车刀有时存在损耗问题；4）旋风铣介于磨制和轧制工艺之间，精度和加工效率平衡较好，但在高精度方面与磨削还有差距，且铣刀也存在损耗问题。

表30：丝杠加工工艺对比

对比项目	轧制	车削	磨削	旋风铣
工艺示意图				
适合加工对象	超细长、大导程丝杠加工，或适于长度 1m、螺距 6mm 以下长径比精度要求不高的丝杠加工	适于长度 1m、螺距 6mm 以下长径比小的丝杠	高精度丝杠螺纹加工	适于较长以及长径比大的丝杠

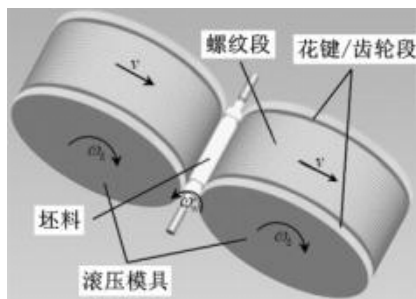
设备与刀具	丝杠轧机	CBN 刀具及数控车床	丝杠磨床或开槽磨床	CBN 刀具及数控车床
加工精度	IT10~IT11	粗车: IT11 半精车和精车: IT7~IT10 硬车削: IT5~IT7	精密磨削: IT5~IT8 超精密磨削: IT5 以下	粗铣: IT11~IT13 半精铣: IT8~IT11 精铣: IT16~IT8
表面粗糙度	Ra0.2~50 μm	粗车: Ra10~20 μm 半精车和精车: Ra0.16~10 μm 硬车削: Ra0.01~0.04 μm	精密磨削: Ra0.04~0.16 μm 超精密磨削: Ra0.01~0.04 μm 镜面磨削: Ra0.01 μm 以下	粗铣: Ra5~20 μm 半精铣: Ra2.5~10 μm 精铣: Ra0.63~5 μm
加工效率	高	中	较低, 工序多	较高, 加工周期一般在数小时
优点	生产效率最高	加工精度较高, 相当于半精磨、加工效率较高, 表面残余应力分布均匀, 螺纹部件疲劳寿命高	加工精度最高	精度与效率权衡较好
缺点	加工精度低、有脆性切削白层	排屑干涉现象增大切削能耗, 加快设备成本高、加工工序长、加工效率低, 刀具的磨损、降低加工质量	不高、表面易烧伤、有残余拉应力	铣刀损耗、有残余压应力

资料来源: 陈晖, 《行星滚柱丝杠螺纹的硬态车削加工技术研究》, 哈尔滨工业大学, 2018:1-86, 郑红, 《精密滚珠丝杠机械加工工艺规程研究》, 价值工程, 2018, 37(25):101-102, 宋树权, 《大型滚珠丝杠硬态铣刀具刀口表征及评价技术研究》, 南京航空航天大学, 2018:1-134, 黄祖尧, 《滚珠丝杠螺纹制造技术向高效、低耗、绿色方向发展》, 金属加工(冷加工), 2010, (20):14-17, 金属加工公众号; 国信证券经济研究所整理

1、轧制: 效率高但精度相对受限的加工工艺

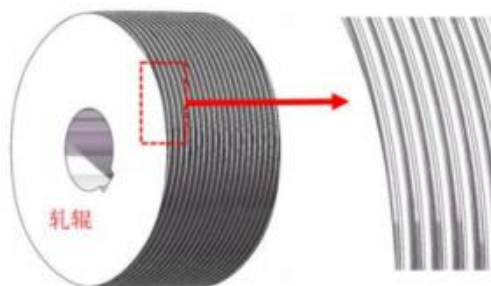
轧制成形螺纹工艺是一种局部连续渐进成形的加工方法, 使用滚压轮或搓丝板滚压轧件坯料, 利用金属材料的可塑性, 坯料表面在滚压力的作用下发生塑性变形而逐渐成形为螺纹。**轧制工艺生产滚柱效率高、损伤小**, 成形率远远高于切削加工成形, 其局部连续渐进成形, 极少损伤金属纤维, 塑性变形又能大大增加螺纹滚柱的表面强度, 提升螺纹滚柱的机械性能。

图190: 滚柱一次滚压成形原理



资料来源: 张敏华, 《滚珠丝杠斜轧工艺与试验研究》, 南京理工大学, 2023:1-85; 国信证券经济研究所整理

图191: 轧辊及其局部图



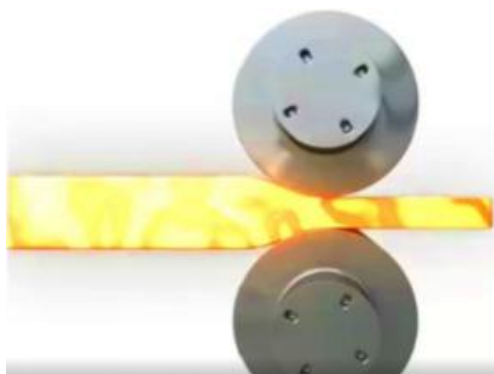
资料来源: 张大伟、赵升吨, 《行星滚柱丝杠副滚柱塑性成形的探讨》, 中国机械工程, 2015, 26(3):385-389; 国信证券经济研究所整理

轧制工艺一般可分为热轧和冷轧。冷轧与热轧的界限是以再结晶温度来区分的, 低于再结晶温度为冷轧, 高于再结晶温度为热轧(钢的再结晶温度 450~600℃)。

- **热轧**一般将钢材加热至 1100~1250℃进行轧制, 热轧后钢材具更高成型性和可加工性, 更易于在后续加工中使用。但热轧钢在冷却阶段有收缩, 其最终形状的可控制程度较低, 因此热轧常用于不需非常严格精度的场景。
- **冷轧**时钢材不进行加热, 需更高压力将其轧制成所需的尺寸。冷轧钢的强度更高, 表面光滑, 在成型后不会收缩, 比热轧钢具有**更高强度、硬度、精度**, 因此在**丝杠等高精度产品中**, 轧制工艺主要使用的是冷轧。

图192: 热轧示意图

图193: 冷轧示意图



资料来源：制造原理公众号，国信证券经济研究所整理

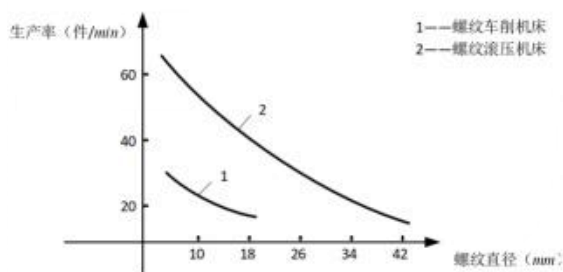


资料来源：制造原理公众号，国信证券经济研究所整理

丝杠冷轧过程可分为四个阶段：1) 进给阶段：滚压轮旋转并向工件表面快速进给，同时开启冷却液，使滚压轮所有齿在圆周上均能受到冷却作用（润滑全面、冷却充分）；**2) 切入阶段：**滚压轮与工件表面接触并压入一定深度形成齿痕，同时利用摩擦力带动工件旋转，实现工件轴向分度；形成齿痕的基础上连续进给直至终止位置，形成最终齿廓；**3) 精整阶段：**轧辊停止径向进给，但继续旋转（提高轧件圆度和表面粗糙度），精整螺纹；**4) 成型结束：**滚压轮以相对较慢的速度退出，离开成形区域后再快速退至初始位置，防止因弹性回弹导致工件齿形表面擦伤。

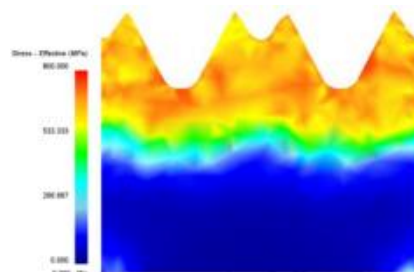
冷轧工艺具有生产周期短、高生产效率等优势，效率极高，且冷轧丝杠强度高、疲劳寿命长，抗拉强度高；材料利用率高，可达 90% 以上。但是相比磨制、旋风铣等工艺也存在精度不高、应力较为集中等劣势。

图194：轧制丝杠生产率高



资料来源：王旭，《行星滚柱丝杠滚柱冷滚压成形机理与实验研究》，重庆大学，2020:1-101；国信证券经济研究所整理

图195：轧制滚柱齿形的应力较为集中

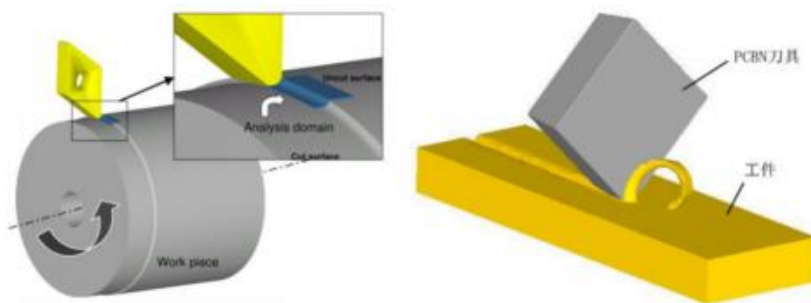


资料来源：王旭，《行星滚柱丝杠滚柱冷滚压成形机理与实验研究》，重庆大学，2020:1-101；国信证券经济研究所整理

2、车削：以车代磨提高效率，但加工精度仍不及磨削

螺纹车削是刀具在丝杆表面沿螺旋线切削出成型槽的工艺，将工件表面以直代曲，刀具沿直线方向施加主切削速度，工件沿进给方向施加进给速度，可以在工件表面以螺纹升角切出螺纹槽。车削的刀具材料是聚晶立方氮化硼 PCBN，硬度可高达 HV8000~9000（硬度仅低于金刚石）。

图196：螺纹车削加工原理图



资料来源：陈晖，《行星滚柱丝杠螺纹的硬态车削加工技术研究》，哈尔滨工业大学，2018:1-86；国信证券经济研究所整理

当前车削丝杠的加工工艺主要采用车削+磨削结合：车削工艺流程可大概总结为：下料-预备热处理-车削-淬火-磨削的流程。1) **车削**：丝杠加工螺纹滚道时，先对螺纹滚道进行粗加工即粗车螺纹，然后进行淬火（提升硬度）；2) **磨削**：淬火完成后，对滚道进行粗磨，之后进行时效处理（去应力），再进行精磨，制成丝杠。

而“以车代磨”的方式也有一定潜在的应用空间，但目前还需验证效果：行星滚柱丝杠的主要零件通常采用高硬度材料，如淬硬轴承钢、铬镍铁合金、工具钢等，硬度达 60HRC 左右。传统磨削精加工的生产效率低，同时产生大量的切削热造成丝杠螺纹滚道部分退火，导致硬度下降，而且磨削砂轮容易脱粒，并在工件表面产生磨削烧伤与微裂纹，影响丝杠可靠性。在此背景之下，**利用 PCBN 等超硬材料作为刀片进行“以车代磨”的精密加工技术逐步出现**，此方案能保证行星滚柱丝杠螺纹的加工精度与表面粗糙度，同时还能有效提升加工效率、降低制造成本。硬车削工艺效率较高，但加工精度不及磨削工艺，且刀具易损坏。

- **优点：**硬车削解决了使用砂轮进行大余量磨削加工的工艺难题，在一台机床上就能完成毛坯到成品的加工，有效提升加工效率。硬车削可使用 PCBN 刀具进行精车，获得的表面粗糙度相当于半精磨水准。车削加工过程中组件的定位精度高，易于保证被加工工件的形状精度和尺寸精度，且车削刀具结构简单，装夹方便，切削过程相对平稳，可采用较大的切削余量。表面残余应力分布更加均匀，增加螺纹部件的疲劳寿命。此外硬车削切屑带走大部分热量，不会产生磨削工艺的表面烧伤问题。
- **缺点：**加工精度不及磨削工艺。此外车削刀具刀刃部分硬而脆，在切削加工过程中产生的排屑干涉会导致刀尖受波动较大的冲击力，使刀具产生磨损。

表31：硬车削加工工艺情况

参数	具体情况
加工部位	冷轧滚珠丝杠轴端，硬度 HRC60~65，加工余量 10mm
刀具	CBN 高硬刀具，采用纯陶瓷作为结合剂高温高压烧结
切削参数	吃刀深度：8mm，线速度：70~90m/min，走刀量：0.1mm/r
优点	“以车代磨”大余量加工硬材料工艺，解决采用砂轮大余量磨削加工的工艺难题
缺点	刀具易产生磨损或破坏，加工精度不如磨削

资料来源：郑红，《精密滚珠丝杠机械加工工艺规程研究》，价值工程，2018，37(25):101-102；国信证券经济研究所整理

3、磨制：精度最高的关键精加工工艺，但加工效率较低

磨削是目前高精度丝杠螺纹的主要加工方法，实质是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切削，砂轮的表面磨粒划擦、刻划和切削工件表

面，进而获得更高的精度。磨削砂轮的截面形状与被磨削工件的螺纹截面形状类似，通过高精度的数控磨床可加工出高精度的小螺距螺纹，目前对于热后的高硬度螺纹面或硬脆材料螺纹面的高精度加工，磨削是最为行之有效的加工方式。以滚珠丝杠为例，使用磨削加工后精度最高可达到 P0 级。

表32：丝杆磨削加工工艺流程较长

步骤	工序	步骤	工序
1	丝杆毛坯	13	粗磨
2	预备热处理	14	探伤
3	校直	15	时效处理并检验
4	加工端面 and 中心孔	16	研中心孔
5	粗车	17	半精磨
6	高温时效并检验	18	低温时效并检验
7	加工端面 and 修中心孔	19	铣键槽
8	半精车	20	磨端部螺纹
9	铣	21	研中心孔
10	粗磨	22	精磨并全面检验
11	感应淬火并检验	23	入库
12	研中心孔		

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》，南京理工大学，2021:1-108, G11；国信证券经济研究所整理

行星滚柱丝杠中丝杠、螺母、滚柱等不同部位的磨削工艺存在差异，提高工艺壁垒。磨削工艺流程长、加工复杂繁琐，同时既需要针对丝杠和滚柱的外螺纹磨削，又需要针对螺母的内螺纹磨削，其中螺母内螺纹加工难度最高。

■ **外螺纹磨削：**主要针对丝杠和滚柱；磨削砂轮高速旋转，砂轮刀刃会在旋转过程中形成回转表面。工件一边绕自身轴线转动，一边沿轴线移动，且在转动一圈的同时沿轴向移动单位导程的距离；

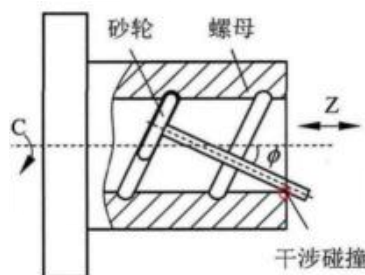
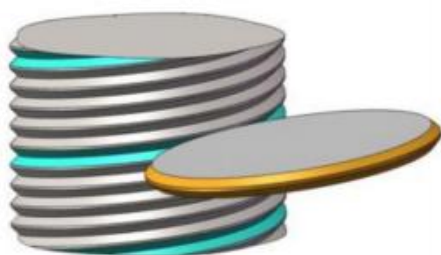
■ **内螺纹磨削：**主要针对螺母；内螺纹磨削是行星滚柱丝杠加工的关键难点：

加工过程：磨削内螺纹时，砂轮外径尺寸受螺纹内孔直径尺寸限制，为保证砂轮不与螺母发生干涉，砂轮直径不可大于螺母螺纹内孔最小直径，且需利用磨杆带动砂轮伸入螺母内螺纹加工位置进行磨削；在磨削中，螺母绕其轴线旋转，砂轮自身高速旋转的同时沿螺母轴线直线进给以完成螺母内螺纹磨削。

加工难点：①内螺纹磨削时磨杆须旋转一个螺旋角，从而使得磨杆可能会和螺母内孔碰撞，无法继续磨削，产生干涉问题，降低磨削精度；②由于磨杆的存在，磨削过程中易造成砂轮振动，振动过大会在加工表面产生振纹，降低螺纹精度，需通过材料和结构等方面改善磨杆振动问题；③螺母内螺纹一般需要经过多次磨削，需要让每次磨削时的砂轮进刀点一致，否则会因为砂轮轨迹（起点、速度）的不同而造成螺纹乱扣，损坏已切好的螺纹沟槽，影响内螺纹精度，需要进行对刀。但是螺母结构尺寸小，半封闭的内部空间非常有限，使得内螺纹自动对刀的难度大大增加；④当内螺纹的牙形尺寸较小时，成形砂轮在磨削加工过程中极易发生磨损和失效，需要对砂轮进行多次重复修整，加工精度和效率很难保证。

图197：砂轮磨削加工外螺纹螺旋面

图198：砂轮磨削加工螺母内螺纹



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》，南京理工大学，2021:1-108；国信证券经济研究所整理

资料来源：胡臣，《大导程滚珠螺母内滚道精密磨削关键技术研究》，厦门大学，2022:1-91；国信证券经济研究所整理

丝杠磨削工序整体流程较长，滚珠丝杠的螺杆部分和螺母部分各需经过十多道工序方可成形，其中包括粗磨和精磨工艺；行星滚柱丝杠则工艺流程更长，且在螺杆、螺母和滚柱中均需采用磨削工艺。

图199：滚珠丝杠的磨削加工工艺流程



资料来源：潘小英，《鸿鑫公司滚珠丝杠项目的商业计划书》，华南理工大学，2019:1-69；国信证券经济研究所整理

图200：行星滚柱丝杠的磨削加工工艺流程





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》，南京理工大学，2021:1-108；国信证券经济研究所整理

表33: 行星滚柱丝杠不同零部件加工参数及工艺细节

零部件	加工基准	精度约束-降低偏心误差	表面粗糙度要求	其他要求
丝杠	螺纹：确定丝杠两端轴颈的形位公差大小	对螺纹加工前丝杠外圆的圆跳动作严格的精度约束	- 丝杠螺纹外圆表面粗糙度 Ra0.8 - 螺纹两侧滚道表面粗糙度 Ra0.32	丝杠螺纹牙的左右牙型半角精度$\pm 0.5^\circ$
螺母	螺纹：确定螺母两端外圆的形位公差大小	对螺纹加工前螺母内孔的圆跳动作严格精度约束	- 螺母小径表面表面粗糙度 Ra0.8 - 螺母两侧滚道表面粗糙度 Ra0.32	- 螺母螺纹牙的左右牙型半角精度$\pm 0.5^\circ$ - 螺母内部装配内齿圈的内孔相对于螺纹的同轴度达 0.008mm - 螺纹端面圆跳动达 0.02mm - 螺母左右两端内孔的对称性需严格控制 - 滚柱螺纹牙的左右圆弧半径精度$\leq 0.03\text{mm}$ - 滚道两侧加工精度尽可能相同 - 滚柱螺纹的长度误差$\leq 0.5\text{mm}$ - 滚柱左右两端齿轮应严格对称 - 多个滚柱的尺寸一致性需较高
滚柱	螺纹：确定滚柱两端轴颈的形位公差大小	对螺纹加工前滚柱外圆的圆跳动作严格的精度约束	- 滚柱螺纹外圆表面粗糙度 Ra0.8 - 螺纹两侧滚道表面粗糙度 Ra0.32	
零部件	加工基准	加工要求		
内齿圈	外圆：控制内孔同轴度为 0.008mm	- 保证内齿圈和滚柱齿轮的齿形之间不发生干涉，控制齿顶圆和齿根圆公差$\leq 0.01\text{mm}$ - 内齿圈上销钉孔和螺母销钉孔相对于各自端面的位置精度要高 - 左右内齿圈装配后应严格对称，此对称性完全依靠销钉来实现，所以为了保证一对内齿圈销钉孔位置的一致性，应对一对内齿圈进行配制		
行星架	外圆：控制行星支架小孔位置度在 0.05mm 以内	- 行星支架内孔宜采用正公差，保证内孔直径大于丝杠螺纹大径，装配丝杠时不发生干涉 - 行星支架外圆直径略小于内齿圈内孔直径且行星支架外圆采用负公差		

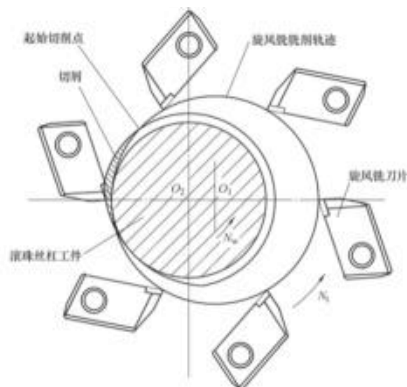
资料来源：郑伟，《精密行星滚柱丝杠副工艺制造与传动性能研究》，南京理工大学，2021:1-108；国信证券经济研究所整理

4、旋风铣：兼顾精度与效率，但国内工艺仍需摸索

旋风铣螺纹是采用旋风铣头来加工螺纹，只需一次切削就能完成螺纹的加工方法，借助刀盘旋转中心与工件中心的偏心量完成渐进式高速铣削加工，具有铣削速度高、加工效率高、高精度、低成本等优点。加工过程中，旋风铣被安装在车床中拖板上，采用 6~8 把均匀对称的高强度对称铣刀，车床夹持工件完成低速进给运动，旋风铣带动硬质合金刀具高速旋转，完成切削运动，从工件上铣削出螺纹，工件每转 360° 时，刀盘纵向进给一个导程，铣出螺纹。

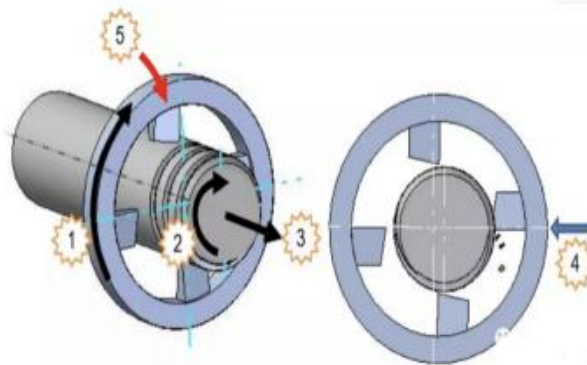
旋风铣的工艺壁垒主要体现在工艺积累和铣刀耗材等方面。工艺积累方面，旋风铣运动规律复杂，加工过程中刀架安装倾角、偏心距、刀盘直径及转速比等参数都会对最终加工质量产生影响，需较深的工艺积累；铣刀方面，丝杠工件往往硬度较高，铣刀存在损耗问题，影响刀具切削性能。目前海外在旋风铣的基础理论和关键技术等方面具一定领先优势，国内螺纹旋风铣削仍具改进和提升的空间。

图201: 旋风硬铣削加工原理图



资料来源：张广明等，《硬铣滚珠丝杠螺纹滚道工艺研究》，金属加工(冷加工)，2017，(5):28-31；国信证券经济研究所整理

图202: 旋风铣五大加工运动



资料来源：沐风机械公众号，国信证券经济研究所整理

旋风铣技术拥有以下优势：

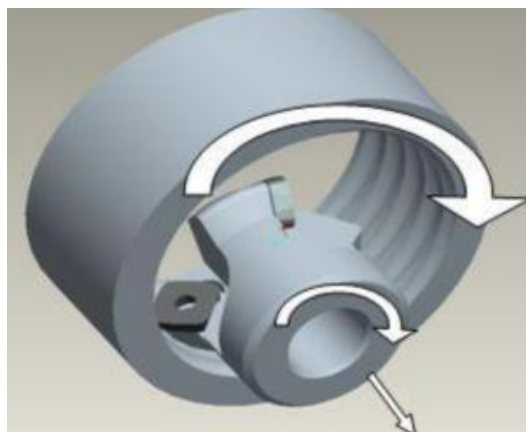
- **切屑轻薄、切削力小、材料去除率高、切削热量散失快：**在切削过程中，刀片只有旋转到靠近工件一侧才参与切削，为刀具提供足够的散热时间，且切削中产生的大部分热量被切屑带走；每次加工区域的空间位置相同，切入到切出的切削厚度与宽度变化为由小变大→由大变小，一定程度提高单位时间的金属切削率，提高整体工艺的性能。
- **提高加工精度与表面质量：**旋风硬铣削常用的刀具材料为PCBN材料，在加工过程中，高速铣床凭借自身高刚度与精度，进行渐进式的切向断续切削方式，切削深度小，加工精度较高。
- **提高切削速度，降低加工成本：**螺纹旋风铣技术可实现一体化加工、免去磨削和多余热处理工序，可保证加工后丝杠的尺寸精度和表面完整性指标；加工效率可达磨削的几倍，与传统切削相比，刀具使用寿命可提高近70%。
- **高速旋风铣技术可加工丝杠外螺纹和螺母内螺纹。**外螺纹旋风铣一次就可完成符合滚道廓型和表面质量要求的螺纹，同时也可用于螺母内螺纹加工。

旋风铣的缺点在于无法加工部分异形丝杠，且精度相对磨削仍存在一定差距。

图203: 外螺纹旋铣系统



图204: 内螺纹铣削示意图



资料来源：李彦凤，《滚珠丝杠旋风铣削加工热变形误差及其控制技术研究》，山东大学，2014:1-148；国信证券经济研究所整理

资料来源：张海栋，《高速滚珠丝杠副动力学性能提升的关键技术研究》，东南大学，2019:1-77；国信证券经济研究所整理

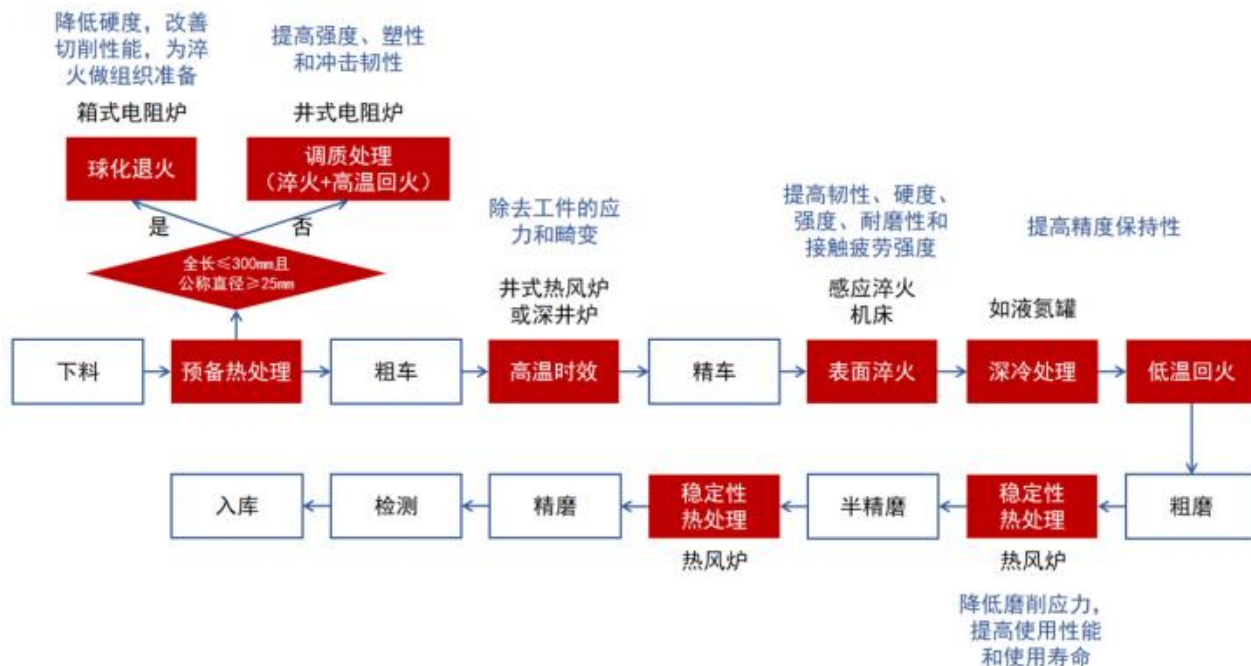
旋风铣设备方面，旋风铣床前端有负责夹持工件的三爪卡盘用来固定工件，径向移动的滑板位于床鞍上，滑板上的铣削头用来加工螺旋升角。床鞍上的随动支撑机构随铣削头移动而随动支撑工件。旋风铣机床主要包括旋风铣专机、普通车床+旋风铣刀座、走心机+旋风铣刀座三种，目前国内大多数厂商都采用普通车床+旋风铣刀座的方式，投资小但比较低端，只能加工大的丝杠等部件，不能加工接骨螺钉等微型零件且精度有限。**在刀片方面**，旋风铣多采用 PCBN 成型刀片，不使用冷却液，直接干切削硬后的工件，具有高硬度与高耐磨性、高热稳定性与化学稳定性、导热性良好、摩擦系数较低等优点。但是，丝杠的高硬度导致铣刀易产生磨损，影响切削性能。

2.2 热处理：工艺复杂、种类繁多，温度把控等多维度要求高

热处理作用是改善丝杠各零件的材料性能、切削性能及消除残余应力，从而提升硬度和韧性。丝杠的热处理工艺包括调质处理（或球化退火）、时效处理、表面热处理、深冷处理等。热处理对于温度把控、设备要求、工艺规范等多个维度有较高要求，技术壁垒较高。

丝杠各零件工作特性和尺寸结构不同，因而热处理方式也有所差异：1) **丝杠**：采用感应淬火作为表面热处理方法，满足“表面具有较高的硬度、耐磨性和强度，心部具备较强韧性以抵抗冲击载荷作用”的性能要求；2) **螺母**：采用渗碳淬火作为表面热处理方法，满足硬度和耐磨性，且可承受较大冲击载荷，延长寿命；3) **滚柱和内齿圈**：整体进行调质处理，使其在较大的动载荷作用下，能很好地承受弯曲和扭转力的作用，且硬度和耐磨性也显著提高。

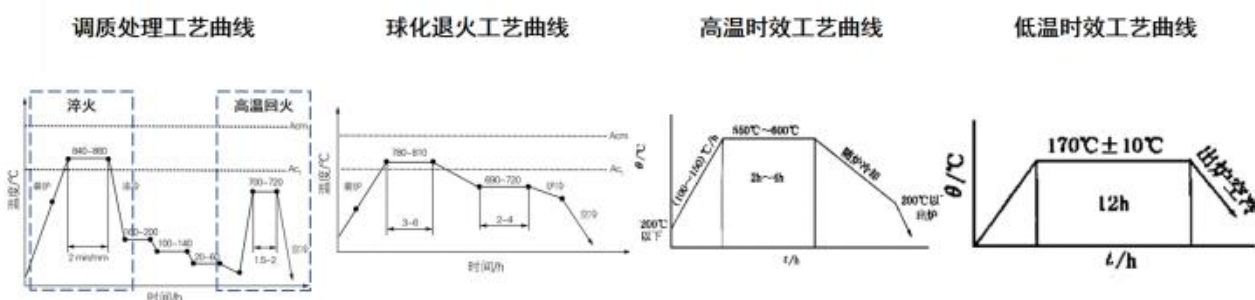
图205：丝杠热处理工艺流程



资料来源：樊伟、王科社、查初亮，《高性能 GCr15 钢滚珠丝杠的热加工工艺》，金属热处理，2014，39(12):55-59，雷日扬，《热处理工艺对机床滚珠丝杠用 GCr15SiMn 轴承钢性能的影响》，铸造技术，2015，36(8):2003-2006；国信证券经济研究所整理

- 预备热处理：**①调质处理：调质处理采用淬火和高温回火来获得均匀细致的回火索氏体组织，为表面淬火和渗氮处理时减少变形作准备；淬火需将炉温升高后，在 M_s 点以上进行快速冷却，在 M_s 点以下缓慢冷却，以防止淬火变形和开裂。高温回火则主要是为了防止淬火组织在室温下发生缓慢分解，引起体积、尺寸和形状变化。②球化退火：球化退火主要可降低工件的硬度，改善切削性能，为后续表面淬火做准备。
- 时效处理：**在滚珠/滚柱丝杠的机械加工过程中，车削、磨削等工艺会产生较大的应力，造成丝杠的畸变，降低使用寿命，需进行时效处理来消除应力，主要包括高温时效和低温时效；①高温时效：目的在于清除机械加工过程中由切削力引起的工件残余内应力，为减小中频淬火变形创造条件。精密丝杠刚性较差，常在粗加工、半精加工之间安排多次时效处理；②低温时效（稳定性热处理）：磨削加工会产生很大的磨削应力，可能引起尺寸变化和表面裂纹，加快磨损与疲劳，须进行低温时效，需注意工件的力学性能要求以及防止发生回火脆性和工件变形。
- 表面热处理：**丝杠和螺母在表面热处理时采用不同的淬火方式，丝杠采用表面感应淬火，螺母则采用渗碳淬火。
①感应淬火：丝杠表面热处理工艺，丝杠表面承受扭转、弯曲力，需具较高硬度、耐磨性和强度，且心部需有较强韧性。采用感应淬火，利用电磁感应原理（磁场中电流分布原理，表层电流密度大，中心处小），将丝杠表面快速加热至淬火温度后急剧冷却，使表面硬度提高，中心未被加热而变形小从而具备心部韧性。
②渗碳淬火：螺母的表面热处理工艺；螺母承受高强度的冲击、扭转及弯曲，螺纹部分须有足够硬度和耐磨性。渗碳淬火后螺母可承受较大冲击载荷，延长寿命。渗碳淬火的工艺存在较高的技术壁垒，不合理的渗碳淬火工艺可能会导致明显裂纹，降低接触疲劳寿命。
- 深冷处理：**一般以液氮作为低温介质，通过调控处理温度、处理时间、降温速率和冷热循环次数等参数，使工件冷却到 -190°C 以下，使材料的微观结构在低温环境下发生变化，可显著提高使用寿命、耐磨性及尺寸稳定性。

图206：丝杠热处理工艺曲线



资料来源：樊伟、王科社、查初亮，《高性能 GCr15 钢滚珠丝杠的热加工工艺》，金属热处理，2014，39(12):55-59，焦正音等，《GCr15 制滚珠丝杠热处理工艺研究》，山西机械，2001，(1):36-38；国信证券经济研究所整理

2.3 设备：尖端设备受制于海外厂商，进口价格高昂

据北特科技公告，人形机器人用丝杠产线相应工序的设备包括粗车设备、硬车设备、热处理淬火机、外圆磨磨床、螺纹磨床、检测设备、实验分析仪器等，高端机加工设备仍然受制于海外。尽管我国机床进口数量呈现下降趋势，说明国产机床能够产生替代效应，但进口机床的均价持续提升。一方面，国内制造业的升级导致对高精度、高效率、智能化机床的需求增加，推高了进口机床的均价。另一方面，进口机床均价升高也在一定程度上表明国产机床替代的进口机床主要是在中低端市场，高端机床的替代不明显。

图207：机床进口数量与均价情况



资料来源：华经情报网，海关总署，国信证券经济研究所整理

在热处理设备方面，国内热处理设备性能已接近国际水平，但可靠性和稳定性仍存不足。热处理工艺为装备制造的基础工艺之一，参与材料预处理以及后续精加工多个环节，对金属工件的硬度、韧性、尺寸稳定性和精度等起到至关重要的影响。以滚珠/滚柱丝杠为例，主要热处理工艺包括调质处理、球化退火、感应淬火、时效处理。目前我国热处理装备制造所需钢材/铜材、冷却机、传感器、液压系统等其性能已达到或接近国际先进水平，除数控系统外其余原材料及部件基本可自主供应。但国产配件的关键问题在于产品可靠性和稳定性较低，导致国产热处理设备在精度和寿命各方面较海外一流的同类型产品仍有差距，仍需依赖进口。

图208：热处理设备



资料来源：张敏华，《滚珠丝杠斜轧工艺与试验研究》，南京理工大学，2023:1-85；国信证券经济研究所整理

在加工设备方面，根据应用分类，金属加工机床可分为金属切削机床、金属成形机床和木工机床，其中金属切削机床是最主要的一类机床，占金属加工机床总量约2/3。在丝杠的加工工艺中，金属成形机床主要应用于轧制工艺，金属切削机

床则主要应用于切削工艺（车、磨、铣）。金属成形机床即锻压设备，指通过对金属施加压力使之成形的机床，主要包括冷锻机、液压机、机械压力机、冲压机、折弯机等。金属切削机床是用切削等方法主要用于加工金属工件的机器，使得工件被加工成要求的形状、尺寸精度和表面之类。按加工方式划分，金属切削机床可以分为铣床、车床、磨床、钻床、镗床等 12 类。

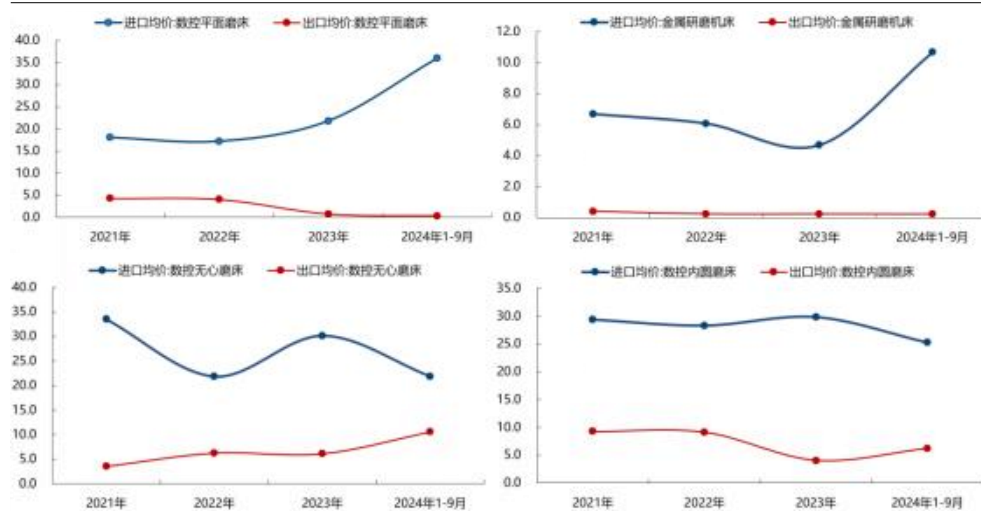
图209：金属加工机床分类



资料来源：思进智能招股说明书，纽威数控招股说明书，国信证券经济研究所整理

在磨床设备方面，目前精密磨床依然依赖于进口，到货周期长。磨床进口均价明显高于出口均价，国外高端磨床设备的获取成本高，本土品牌磨床的竞争力仍不足。欧洲磨床单价在七八百万元左右，甚至超过千万元，到货周期至少一年起步，而国产磨床价格为两三百万元左右，整体来看磨床设备对供应商资金实力要求高。

图210：我国进口与出口磨床均价情况（单位：万美元/台）



资料来源：海关统计数据平台，wind，国信证券经济研究所整理

表34：秦川机床募投项目车、铣、磨床部分设备价格情况

设备种类	单价（万元/台）	设备种类	单价（万元/台）
------	----------	------	----------

高精度内圆磨床	750	数控车铣复合机床	150
高精度数控导轨磨床	2400	数控旋风铣床（外）	800
数控高精度万能外圆磨床	230	车铣复合中心	95
数控导轨磨床	1200		
数控外圆磨床	100		
高精度立式内外圆磨床（自制 VG150）	800		
数控内孔磨床	300		

资料来源：秦川机床公告；国信证券经济研究所整理 注：表格数据均来自于秦川机床《关于秦川机床工具集团股份有限公司非公开发行股票申请文件反馈意见之回复（更新稿）》，左侧为项目中磨床价格，右侧为项目中车、铣相关设备价格

我国数控磨床市场的竞争格局可分为三个层次：第一梯队为国际性磨床企业，如日本三井精机、德国 Peter Wolters、美国 Lapmaster 等，产品技术含量高，价格昂贵，占据我国数控磨床的高端市场。第二梯队为国内具备一定核心竞争力的企业，比如宇环数控、上海机床厂有限公司、杭州杭机股份有限公司等。第三梯队为低端企业，产品技术含量低，同质化严重，缺乏核心竞争力，竞争激烈。

国内磨床向中高端领域突破。国内磨床企业包括华辰装备、秦川机床、日发精机、宇环数控、宇晶股份、华中数控等，依靠自身优势在不同磨床细分领域深耕，在加工精度、市场占有率、客户拓展、出海等方面均取得了一定进展。

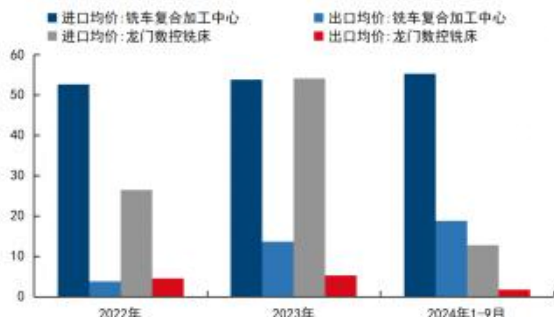
表35：国内磨床部分玩家相关信息梳理

公司	市值	营收	归母	研发	分业务收入	磨床业务情况
华辰装备	66	4.8	1.2	0.3	全自动数控轧辊磨床 4.04+备件产品 0.39+维修改造业务 0.35+其他业务 0.01	- 核心产品是全自动精密数控轧辊磨床，同时积极推动亚微米级高端复合磨削系列产品、精密螺纹磨床、数控直线导轨磨床、自主数控系统的开发及市场应用。 - 深耕行业近 20 年，已掌握了数控轧辊磨床领域“关键功能部件—整机技术—技术服务”全产业链的核心技术，轧辊磨床产品各项性能指标比肩世界一流产品，尤其在高速高精磨削领域确定了全球技术领先地位，打破了国外品牌对我国轧辊磨削高端装备的垄断。 精密螺纹磨床对标世界一流产品，各项精度指标达到世界一流产品同等水平，该产品磨削的标准丝杠试件加工精度等级最高可达 P0（GB/T17587.3-2017）级。
秦川机床	92	37.6	0.5	2	机床类 17.8+零部件类 13.9+工具类 3.2+仪器仪表类 1.0+贸易类 0.7+其他 0.9	- 产品包括数控外螺纹磨床、数控内螺纹磨床，可用于高端滚珠丝杠副、螺母内螺纹滚道的精密磨削加工。秦川机床已发展成为中国机床工具行业品类最多、精密复杂程度最高、产业链最完整的企业之一，在齿轮加工机床、螺纹磨床、加工中心、车削中心、外圆磨床等领域处于国内第一梯队。 - 承担在研国家和省级科技项目有序实施，围绕高精度磨齿机、高精度外圆磨床、精密车床、智能机床、核心功能部件及复杂刀具等，持续攻关 16 项关键核心“卡脖子”技术，开发 15 款工业机器人关节减速器一体机及 10 款裸机产品。 2023 年汉江机床 SGK7432×20/1 高精度数控丝杠磨床磨削精度能稳定达到 P1 级。
日发精机	41	20.8	-9	0.6	数控车床 11.63+固定翼工程、运营及租售 7.89+航空航天部件/总装智能装备 0.6+航天零部件加工 0.01+其他 0.69	- 日发机床公司的数控磨超机床及产线，有七大系列产品，涵盖轴承磨超自动线、轴承装配自动线、数控螺纹磨、滚子磨超自动线，数控通用磨床及单机数控磨床等，在该领域已发展为车、钻、磨超、装配的冷加工的整体解决方案的供应商。 数控螺纹磨床于 2023 年研发完成，用于加工新能源汽车、人形机器人、工业母机等行业的丝杆与螺母，高效且精度符合客户要求，获得了客户的认可，日发机床公司已具备了用于丝杆、螺母加工的数控磨削设备的生产能力。用于丝杆、螺母的内、外螺纹磨床及磨削中心已向部分客户交付使用，用于螺母的端面外圆专用磨床已向部分客户交付使用。
宇环数控	28	4.2	0.4	0.4	智能装备系列 0.37+数控研磨抛光机 2.35+数控磨床 0.81+配件及其他 0.67	公司数控磨床主要分为数控端面磨床（含双面磨床和单面磨床）、数控凸轮轴磨床、数控气门磨床、外圆磨床、复合磨床系列产品及其他磨床。
宇晶股份	41	13	1.1	0.8	抛光研磨机 7.99+热场系统系列产品 0.59+金刚石线 1.43+多线切割机技术改造 0.06+硅片代加工 2.56+其他 0.4	高端数控设备制造、配套核心耗材为主营业务，主要从事高硬脆材料切割、研磨抛光等设备和耗材的研发、生产和销售，产品主要服务于消费电子、光伏、半导体等行业。
华中数控	55	21.2	0.3	4.2	数控系统与机床 8.92+机器人 11.18+其他 1.05	- 数控系统为先进制造领域关键核心技术，是数控机床的“大脑”。公司的数控系统配套业务主要为各类数控机床企业、汽车、3C、木工、磨床及高端重点领域等行业用户提供数控系统配套和服务。 - 充分发挥磨床市场的示范效应，与湖南宇环、杰克机床、秦川格兰德等企业合作，扩大在内外圆磨、平面磨、五轴工具磨、立磨等行业的市场占有率。公司和上海机床厂在复合磨床、外圆磨床、双端面磨床等机型开展了多台套配套应用。

资料来源：wind，各公司公告，国信证券经济研究所整理 注：市值数据截至 2024 年 11 月 27 日，市值、营收、归母、研发投入、分业务收入均为 2023 年数值，单位为亿元人民币

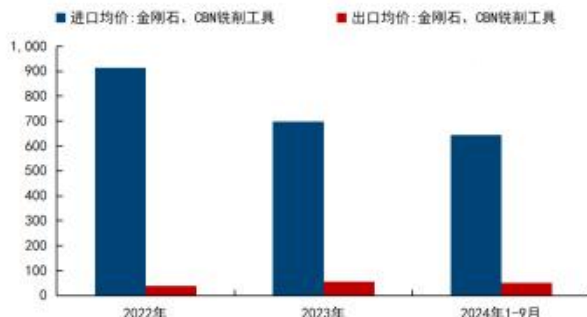
旋风铣设备方面，国外生产数控旋风铣床的厂家主要有 GWT 公司，德国 Lerstritz，Burgsmulle，Linsinger，奥地利 WEINGARTNER-MASCHINENBAU 等。欧美等发达国家已成功的将旋风切削技术应用于大型丝杠的制造，而我国发展较慢，大型丝杠切削制造机床主要依赖进口，**每台过百万美元的价格**是关键制约因素。

图211：我国进出口铣床均价情况（单位：万美元/台）



资料来源：海关统计数据平台，wind，国信证券经济研究所整理

图212：我国进出口铣刀均价情况（单位：美元/千克）



资料来源：海关统计数据平台，wind，国信证券经济研究所整理

3. 市场：外资品牌主导高端市场，国产替代+人形机器人催生成长机遇

总结：外资品牌舍弗勒基于长期技术积累、客户合作和产业整合等方式占据行业龙头地位，主导高端精密丝杠市场；国内产品受限于磨削等工艺、设备等方面限制，在精度、可靠性等指标与国外头部企业相比仍有提升空间；但部分国内优秀玩家也逐步基于原有的能力禀赋（如基于工业母机、车用丝杠等的工艺和设备储备）切入人形机器人丝杠产业布局，国产滚柱丝杠正逐渐被高端应用领域认可和采用；市场空间来看，测算中性情形下，中期全球人形机器人关节用行星滚柱丝杠市场空间约 150-200 亿元。

3.1 格局：外资品牌先发优势明显，国产品牌处于追赶阶段

外资滚柱丝杠玩家起步早，具有长期的技术研发积累和客户合作经验。

全球丝杠龙头舍弗勒已经积累大量的生产应用经验，并已经具备成熟的产品系列，形成明显的先发优势，占据市场主导地位。舍弗勒目前旗下三大行星滚柱丝杠业务主体：1) 旗下公司瑞士 GSA 行星滚柱制造公司；2) GSA 于 2016 年收购瑞士 Rollvis（1970 年开始研制行星滚柱丝杠）；3) 2022 年 7 月舍弗勒以约 5.8 亿欧元价格从 Triton 收购瑞典 Ewellix（前身为瑞典 SKF 线性运动技术事业部），23 年 1 月 Ewellix 正式成为舍弗勒集团的新业务板块。Rollvis、Ewellix、GSA 三家公司均在丝杠领域有长期耕耘，至此舍弗勒成为全球丝杠龙头厂商，经过多年技术积累与先发优势，占据主导地位。

行星滚柱丝杠领域国产玩家起步较晚。90 年代后随着数控机床对高精度丝杠的需求上升，中国企业开始研发相关产品。2016 年部分企业的行星滚柱丝杠进入生产阶段，小部分企业实现小批量供货，中国市场进入发展期。目前尽管国内滚柱丝杠已具一定产业基础，南京工艺、博特精工等厂商已能够小规模生产行星滚柱丝

杠，但是性能与国外竞品相比，在效率、承载能力和精度上仍有提升空间。

图213：滚珠丝杠和行星滚柱丝杠发展历程



资料来源：头豹产业研究院，国信证券经济研究所整理

在高端丝杠领域，国内产品在精度、可靠性等方面与国外头部企业相比仍存在一定差距，特别在行星滚柱丝杠领域，受限于磨削等加工工艺、加工设备等方面的技术限制，国外企业占据行星滚柱丝杠的绝大部分市场份额。精密丝杠制造具备较高的技术壁垒，中高端丝杠采用磨削加工，需经过热处理、车削、磨削等多道工序加工，对原材料、制造工艺要求较高。另外除加工过程中的工艺优化，想要实现性能的提升，最终面临的是“设计-制造-检测”的闭环体系。海外企业具有先发优势，国产品牌在在精度保持性、功能可靠性、寿命、精度、刚度等关键性能指标上依然落后于境外产品，国产品牌市场占有率低。

国产行星滚柱丝杠产品的导程精度最大动载荷、最大静载荷等性能与国际企业相比仍有较大差距。以南京工艺、EWELLIX和GSA30mm直径产品为例进行对比，可看出中国企业缺乏导程精度的统一标准，承载能力显著低于国际企业同规格产品。若要实现国产替代，仍需加大技术研发力度。

表36：国内外行星滚柱丝杠产品对比

品牌	产品种类	产品参数	应用领域
EWELLIX	- 超大功率行星滚柱丝杠 - 反转式行星滚柱丝杠 - 旋转螺母行星滚柱丝杠 - 标准式行星滚柱丝杠	- 导程精度：G1~G5 全覆盖 - 最大动载荷：133KN - 最大静载荷：197KN - 尺寸范围：公称直径 8~64mm	- 塑料成型 - 机电压力机 - 石油、天然气行业 - 铁路 - 太空望远镜
GSA	- 滚柱非循环式 - 滚柱循环式 - 反转行星滚柱丝杠	- 导程精度：G1~G5 全覆盖 - 极限速度：4700rpm - 最大动载荷：168.9KN - 最大静载荷：246.9KN - 尺寸范围：公称直径 20~63mm	- 数控机床 - 工业机器人 - 航空、航天 - 武器 - 冶金设备 - 汽车工业 - 伺服电动缸 - 注塑
南京工艺	- 行星滚柱丝杠副 - 循环滚柱丝杠副	- 最大动载荷：123.3KN - 最大静载荷：177.3KN - 尺寸范围：公称直径 18~60mm	- 压力机床 - 钢铁工业 - 军用装备 - 核工业

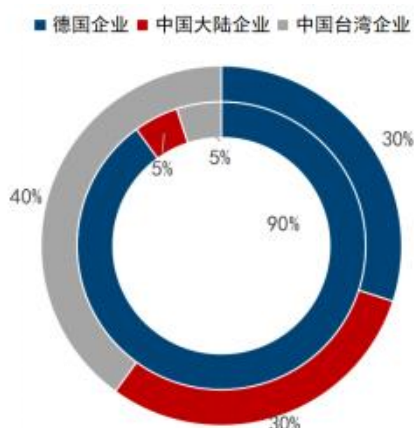
资料来源：头豹产业研究院，国信证券经济研究所整理

滚珠丝杠方面，中端市场国产替代相对明显，高端市场仍由德国企业主导。在中

国市场中，本土企业在中高端滚珠丝杠市场份额较高，中国企业份额合并达七成，三成为德国企业。高端市场由德国企业占主导，占据 90% 的份额。中国企业在丝杠领域起步较晚，企业规模较小，仍未掌握高精度产品技术。但中国企业在丝杠领域进展较快，五洲新春、恒立液压等企业均积极布局高精度丝杠领域，部分已实现量产，推动国产替代进程。

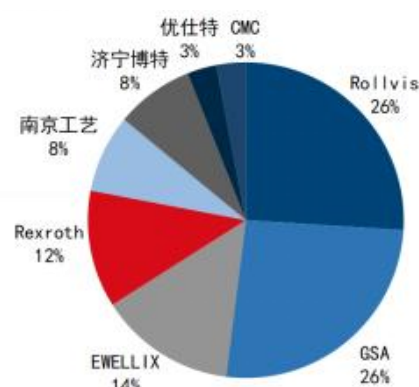
行星滚柱丝杠方面，中国行星滚柱市场基本由国际企业主导，市场集中度高。根据 GGII，外资企业如 Rollvis（瑞士）、GSA（瑞士）、Ewellix（瑞典）、Rexroth（德国）在国内市场份额占比分别为 26%、26%、14%、12%，而国内企业合计占比（含南京工艺、博特精工、优仕特）约 20% 左右。据 GGII，2023 年瑞士 GSA 在中国市场的份额已超过 50%。

图214: 2022 年国内中高端滚珠丝杠市场格局情况



资料来源：头豹产业研究院，国信证券经济研究所整理 注：内圈为高端市场份额，外圈为中端市场份额

图215: 2022 年国内行星滚柱丝杠市场格局情况



资料来源：头豹产业研究院，国信证券经济研究所整理

3.2 国产：机加工工艺和设备的共通性驱动零部件厂商积极入局

有精密机加工能力和设备的企业跨界布局滚柱/滚珠丝杠，为精密丝杠市场注入发展新动能。由于丝杠和其他机械零部件在机加工工艺和设备上具技术共通性，国内汽车零部件企业积极跨界精密丝杠市场，国产丝杠企业通过自主创新已经在滚动丝杠这一高精度、高性能传动领域取得一定突破，并且已经有国产行星滚柱丝杠正在逐渐被高端应用领域认可和采用，中国企业南京工艺和济宁博特亦被列入 TOP10 的行列，标志着国内企业在这一关键领域正在从追赶者向竞争者转变。

表37: 国内丝杠主要玩家相关信息梳理（单位：亿元）

公司	市值	营收	归母	研发	丝杠相关进展
北特科技	135.1	23.2	1.2	1.1	2024 年 10 月 14 日与江苏昆山经济技术开发区管理委员会签订《投资协议》，拟在江苏昆山经济技术开发区总投资 18.5 亿元，规划用地约 140 亩建设行星滚柱丝杠研发生产基地。设立江苏北特机器人科技有限公司，注册资本 3 亿元，公司持股比例为 100%。 - 持续配合客户开发各型号丝杠零部件，包括螺母、行星滚柱、丝杆、齿圈等，应用于人形机器人执行器及汽车后轮转向系统（RWS），但均处于样件阶段。 - 建设人形机器人用丝杠产线，相应工序的设备较为完备，包括粗车设备、硬车设备、热处理淬火机、外圆磨床、螺纹磨床、检测设备、实验分析仪器等，实现全工序均由公司独立完成生产，且能实现单工序自动化方案。目前，该产线主要配合客户持续开展相应丝杠零部件的样件生产，并未被客户定点。
贝斯特	90.3	15.0	2.8	0.8	- 全面布局直线滚动功能部件（高精度滚珠/滚柱丝杠副、高精度滚动导轨副等），瞄准机器人市场，自主研发了应用于标准式、反转式行星滚柱丝杠等，与机床商签订批量滚动交付订单，其中代表滚珠丝杠副最高制造水平的GO 级丝杠副实现突破，获得客户的首批订单。行星滚柱丝杠工艺不断优化，批量化生产工艺布局不断完善，关键工艺所需国产化设备合作开发有序推进，为2025 年批量供货做好了技术和设备储备。 2022 年 1 月，设立全资子公司“无锡宇华精机有限公司”，全面布局直线运动部件，产品包括高精度滚珠/滚柱丝杠副、高精度滚动导轨副等，生产的滚珠丝杠副、直线导轨副等产品已应用于国内知名机床商部分型号的机床上，自主研发的行星滚柱丝杠已于 2023 年顺利出样。

双林股份	123.9	54.8	5.0	2.2	- 公司汽车座椅水平驱动器与人形机器人行星滚柱丝杠产品在技术开发方面有同源性，在螺纹、齿轮加工等生产工艺上有相通性，进军行星滚柱丝杠领域。 2023年7月，公司对滚珠丝杠轴承单元项目进行立项，启动相关研发及制造工作，计划从EHB制动用滚珠丝杠轴承到EMB制动用滚珠丝杠、转向用滚珠丝杠轴承产品逐步进行开发。公司已完成车用滚珠丝杠样件制造，目前样件在三方验证中，预计2024年12月实现EHB制动用滚珠丝杠轴承PPAP（项目定点）。 - 在人形机器人滚柱丝杠方面，公司内部已经完成正式研发立项，制定了研发目标和开发计划，目前样件制作和设备投资等项目进度按计划快速推进中。
斯菱股份	240.0	7.9	1.7	0.4	- 新设立机器人零部件事业部，负责规划机器人零部件发展方向及整体布局，建设谐波减速器、执行器模组、滚珠丝杠、行星滚柱丝杠产品的生产线，打造专业的机器人零部件生产基地。 - 目前公司已经初步实现丝杠类产品和执行器模组产品的样品打造。
五洲新春	188.4	33.4	0.9	1.2	丝杠产品：梯形丝杠、滚珠丝杠副、行星滚柱丝杠。公司依托以轴承为基础的精密制造行业经验，发展以高端行星滚柱丝杠产品为切入点的各类丝杠产品，为直线执行器、旋转执行器和灵巧手提供部件或者成套产品。 - 公司目前在建设两个丝杠产品的专业化生产车间：一个是滚珠丝杠组件及零部件车间，产品主要用于新能源汽车转向系统及刹车系统；另一个是行星滚珠丝杠组件及零部件车间，产品主要用于机器人执行机构核心零部件。滚珠丝杠车间投资规模更大，主要是目前新能源汽车部分零部件线性执行器渗透率逐步提升，市场有需求。
恒立液压	1,431.9	109.4	27.3	7.1	- 公司投资14亿元用于线性驱动器项目，项目达产后将形成年产104000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、100000米标准滚珠丝杠和100000米重载滚珠丝杠的生产能力。预计2024年第二季度投产。 - 在丝杠方面，公司独立设计T型丝杆的牙形及滚压轮，采用先进滚压设备和生产工艺，丝杠精度、光洁度及传动效率等性能优异；螺母方面，采用自主研发材料配方，自主研发设计的模芯牙形及独特脱模装置，与丝杠配合使用背隙可达0.01mm以内，传动寿命达500万次（150mm行程往返）以上；行星滚柱丝杠方面，公司已完成零部件研发并送样客户，成套行星滚柱丝杠在研发阶段。
鼎智科技	44.3	2.7	0.3	0.3	- 向AIDIN提供空心杯、丝杆、齿轮箱等产品用于灵巧手。此外，鼎智科技负责AIDIN智能6维F/T传感器“AFT200系列”、超薄关节力矩传感器“ATSB系列”和微型6维F/T传感器“AFT系列”在中国的进口和经销。 - 参股鼎智科技，持股34.53%。
江苏雷利	142.8	41.8	3.0	2.0	拥有紧凑型丝杠电机、贯通式滚珠丝杠电机专利，持续加大行星滚珠及滚柱丝杠等产品的研发投入，在人形机器人领域积极拓展市场，获得下游客户的普遍认可。微型精密滚珠丝杠及行星滚柱丝杠产品已完成技术储备，进入产能提升阶段，定制机电软一体化的精密运动控制解决方案。高精度滚珠丝杠及行星滚柱丝杠处于样机测试及客户送样阶段，已送样多个国内人形机器人厂家。
震裕科技	220.6	97.4	5.1	3.8	- 设立马丁机器人产业发展平台，依托在超精密机械零件设计及制造领域的全球一流技术能力，公司已逐步在人形机器人领域所需精密零件，如直线执行器、旋转执行器中的传动模块中的核心零部件等精密零件中取得技术工艺突破，并实现产品的小批量交付。 - 在机器人线性关节核心零部件上，公司已建成一条手工线小批量生产，另外已有几家下游客户在积极送样中，还有一些正在与客户联合开发中，后续计划建成2条中试线，机器人相关领域已有收入但是体量级别比较小。
南京工艺	-	-	-	-	已实现大型、高精滚动功能部件全品种的批量生产，其产品与中国各大主机厂高速、高精度数控机床配套，极大地推动国产替代进程。
禾川科技	39.6	10.2	-1.3	1.3	募投约4亿元推进工业传动系统及精密导轨、丝杠等传动部件的研发及产业化应用其中导轨将包含多规格型号钢球滚珠导轨、滚柱导轨丝杠产品将包含多规格型号的研磨级滚动丝杠行星滚柱丝杠。其中，研磨级滚珠丝杠和行星滚柱丝杠产品目前处于设计规格评审阶段&单元概要设计评审阶段，后续尚需经过样机、中试、发布阶段，预计2025年9月达到可量产状态。
秦川机床	87.8	40.9	0.5	2.4	- 公司滚珠丝杠副产品下游市场集中在机床领域、铁路丝杠和登机桥丝杠配套市场，近两年开发替代进口的加工中心丝杠系列、电动缸丝杠系列产品，逐步进入中高端领域。滚动直线导轨副产品目前以重载滚柱为主进入中端市场，各规格系列产品齐全。子公司汉江机床拥有行星滚柱丝杠的研发、制造基础，近年来已有多种产品供给某些特殊行业，同时，部分新型号产品正在研制和试验验证，将逐步完善检测手段，扩大生产能力。 - 江机床自有设备具备对功能部件产品性能的提升，近年通过自主研发及制造，对螺纹磨床系列产品的高效升级改造，丝杠产品精加工水平有效改善，丝杠产品由P1级提升到P0级，精度水平达到国际先进水平，配置自制研发的高效设备，效率提高30%，缩减成本15%
新剑传动	-	3.8	0.6	-	具备滚珠丝杠、行星滚柱丝杠产品大批量生产能力，年产能超过350万套，其产品成功应用于汽车底盘EMB制动系统和人形机器人线性驱动。
雷迪克	35.3	10.4	1.4	0.5	- 公司积极推进机械臂关节丝杠轴承等适用于新车型、新领域的产品。 2024年10月22日，公司与上海狄兹精密签订股权收购意向性协议，狄兹精密专注于滚珠丝杠、行星滚柱丝杠、车用丝杠、电缸、直线模组、精密对位平台等研发、生产和销售。2024年11月21日，《股权收购意向性协议》终止。

资料来源：wind，各公司公告，头豹产业研究院，国信证券经济研究所整理 注：市值数据截至2026年7月24日，市值、营收、归母、研发投入均为2025年数值，单位为亿元人民币

3.3 空间：人形机器人有望催生丝杠全新增量空间

滚珠/滚柱丝杠的应用领域广泛，已成为高精密传动领域中广泛使用的丝杠方案。在机床制造领域，丝杠可做为传动系统核心部件；在汽车制造领域，滚珠丝杠在新能源汽车转向机构、电助力转向系统、电子驻车系统、刹车系统具有应用前景。在工业装备领域，丝杠、导轨亦作为基础传动部件有着广泛的应用；在机器人制造领域，滚珠丝杠可用于机器人传动装置，通过滚珠丝杠组成单轴机器人/电动缸

等完成线性驱动，据特斯拉 AI Day 信息，特斯拉人形机器人 Optimus 有望采用无框电机与行星滚柱丝杠的线性执行器。

图216: 滚珠丝杠应用领域



资料来源：头豹产业研究院，王有雪，《E 公司滚柱丝杠产品营销策略研究》，大连理工大学，2022:1-78；国信证券经济研究所整理

特斯拉 Optimus 机器人全身 14 个线性关节采用行星滚柱丝杠。线性执行器分别位于肘部 2 个、腕部 4 个、大腿前后 4 个和小腿 4 个。肘部和小腿使用负载 3900Nm 的中型行星滚柱丝杠，腕部使用负载 500Nm 的小型丝杠，大腿使用负载 8000Nm 的大型丝杠，其中部分采用了反向式行星滚柱丝杠。

图217: 特斯拉 Optimus 关节展示



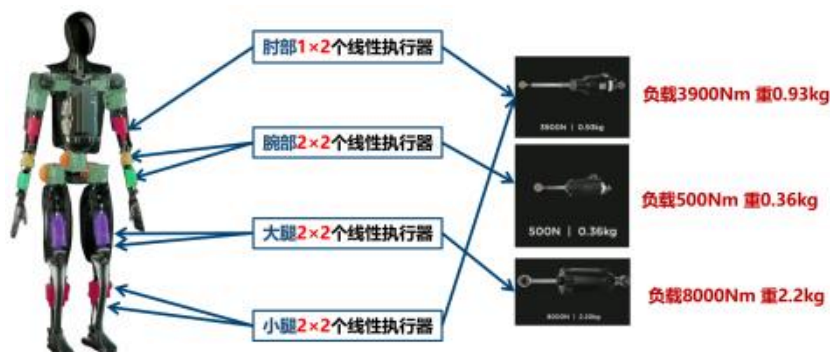
资料来源：Tesla AI DAY，国信证券经济研究所整理

图218: 特斯拉关节分布



资料来源：Tesla AI DAY，国信证券经济研究所整理

图219: 特斯拉 Optimus 机器人丝杠方案



资料来源：Tesla AI day，国信证券经济研究所整理

七、产业链拆解之六维力传感器

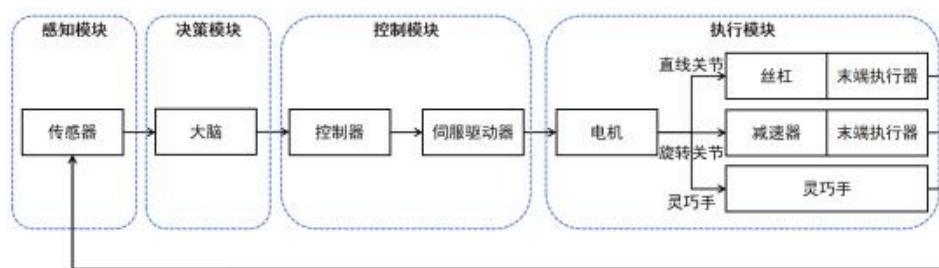
1. 传感器：人形机器人感知层、控制层关键部件

总结：传感器是人形机器人与外界交互的重要桥梁，人形机器人需搭载多种传感器（视觉、力觉、惯性、温度等），其中力传感器重要性高（感知并度量力）、价值量大（**头豹研究院测算其在机器人中价值量占比16%**）；力传感器按测量维度分为一至六维，其中六维力可给出最全面力觉信息，在人形机器人上主要安装于手腕、脚踝等部位，助力机器人实现精准感知和柔顺控制。

1.1 传感器是人形机器人与环境交互的重要桥梁，力传感器价值量高

传感器是一种能够感知外部信息的测量工具，可将物理、化学、生物等非电信号转化为便于精确分析的电信号。作为获取外部信息的关键起点，传感器在很大程度上决定了控制系统整体的性能。随传感器技术的不断进步，传感器已在汽车电子、工业控制、消费电子、国防军事、航空航天等诸多领域得到广泛应用。作为人形机器人与外部环境交互的重要桥梁，传感器是感知层和控制层不可或缺的关键部件。人形机器人可分为感知、决策、控制、执行模块，传感器作为感知模块的核心部件采集机器人的内外部信息，信号输入人形机器人“大脑”后由大脑做出决策，再由控制模块的控制器和伺服驱动器输出控制指令，如关节的启动顺序、速度和力矩等控制指标，从而控制电机提供动力，驱动直线关节、旋转关节和灵巧手等执行模块执行具体动作，再通过传感器获取反馈信号，比较输出和输入状态，以达到精准控制的目的。

图220：人形机器人关节感知、驱动原理



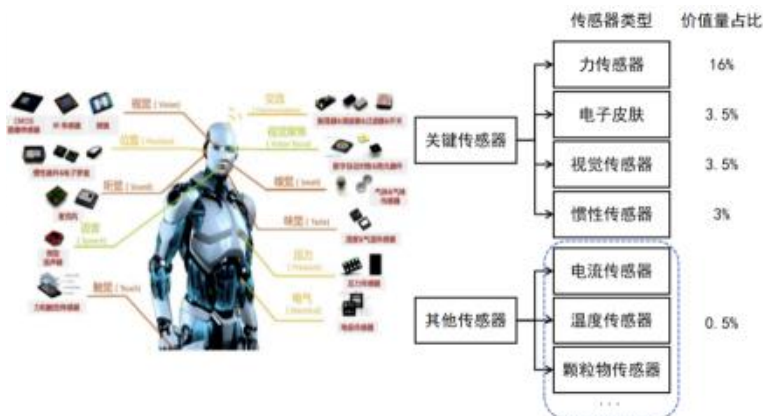
资料来源：秦智超，《关节机器人伺服系统的动态特性分析和参数优化》，沈阳工业大学，2020:1-70；国信证券经济研究所整理

人形机器人的传感器相当于人的感知器官，种类繁多。人形机器人需要传感器采集并处理机器人自身和周围环境的状况，以及机器人自身状态，包括对视觉、听觉、触觉等信息的处理和分析。因此人形机器人往往搭载多种类型的传感器，更全面、准确地感知周围环境和操作对象的状态。例如，在抓取易碎物品时，视觉和触觉传感器的协同作用使人形机器人能够精确控制抓取力度，避免物品损坏。

力传感器在人形机器人中的重要性高、价值量大。人形机器人用到的传感器类型众多，除了满足传统机器人需求的比如电流传感器、温度传感器、颗粒物传感器之外，还包括价值量较高、对于性能提升较为关键的传感器，如力传感器、电子皮肤、视觉传感器、惯性传感器等。其中力传感器价值量高，与人形机器人的智

能化、高精度控制紧密相连，对提升机器人性能具有决定性作用。因此本报告重点研究力传感器。

图221：人形机器人传感器类型及价值量占比

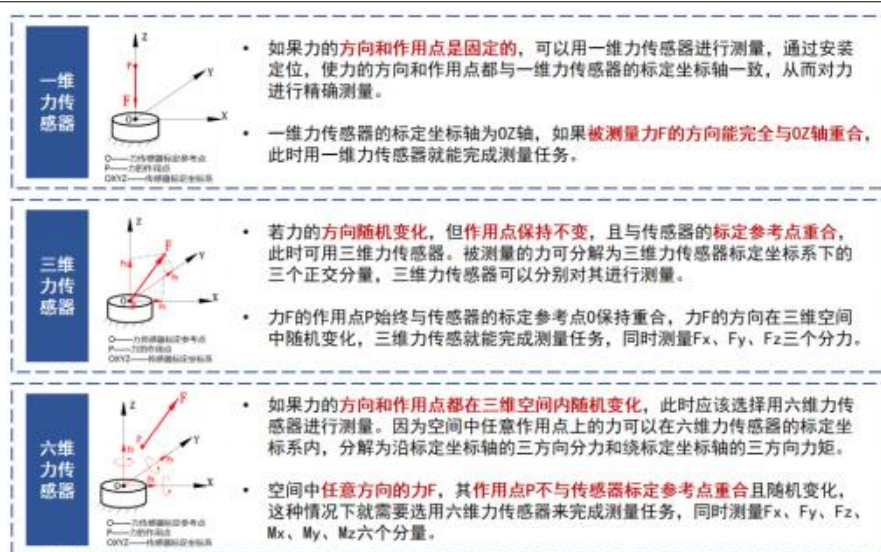


资料来源：Yole, GGII, 头豹研究院, 国信证券经济研究所整理

1.2 人形机器人打开力传感器广阔应用空间

力传感器可感知并度量力，将力的量值转换为相关电信号输出，从而检测压力、重力、扭矩等机械量；力传感器测量系统可实现从最初载荷到弹性应变、应变片的电阻值、输出电压，到最终的力/力矩信号的变换过程。按测量维度可分为一至六维力传感器，在指定的直角坐标系内，力传感器能够测量几个维度，它就是几维力传感器：一维力传感器较常见的是称重传感器，只能测量垂直于地面的重力；三维力传感器则可测量 X、Y、Z 空间坐标系内的力觉信息。而六维力传感器能同时测量沿三个坐标轴方向的力和绕三个坐标轴方向的力矩，能给出最为全面的力觉信息。六维力传感器的研发难度大，不是三个一维力传感器和三个扭矩传感器结构的简单叠加，非线性力学特征明显要考虑多通道信号的温漂、蠕变、交叉干扰、数据处理的实时性等问题，六维联合加载标定也较为复杂，坤维科技认为六维力传感器的技术难度是一维力传感器难度的“六次方”。

图222：一维、三维、六维力传感器作用示意图



资料来源：坤维科技，GGII，国信证券经济研究所整理

力传感器产业链拆解：

- **上游是原材料与零部件**：包括半导体、陶瓷、有机、金属材料等；零部件包括弹性体、应变片、电路板、粘接、外壳等。力传感器原材料成本占比高，以柯力传感为例，其直接材料成本占 73.6%；零部件层面，如应变片式传感器主要材料为应变片等；国际高端传感器主要使用硅应变片，中国企业多使用较为便宜的金属应变片。
- **中游为力传感器的生产制造**：关键工艺流程主要为弹性体的制造与加工、应变片的贴片、检测等环节。
- **下游应用领域较为广泛：机器人为重要应用场景**。当前力传感器主要应用于高精度抛光打磨、铣削、焊接及高精密装配等场景多关节机器人，以及对传感性能要求更高的协作机器人。

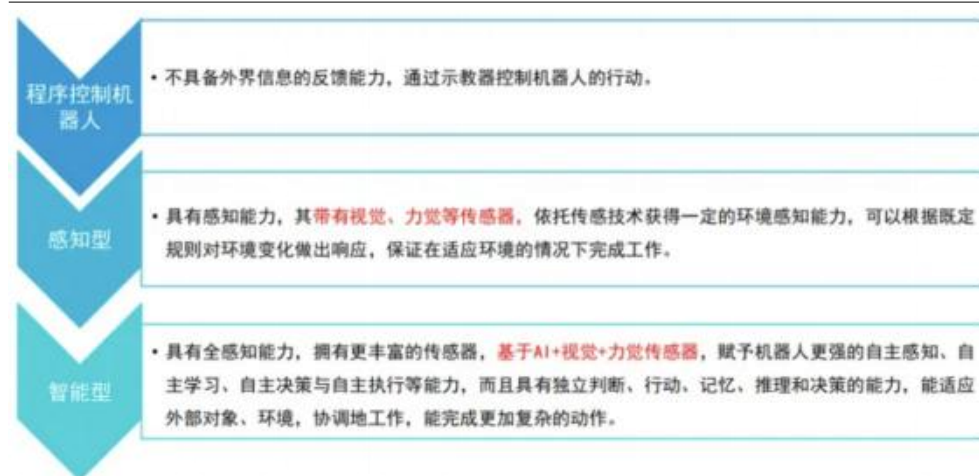
图223：力传感器产业链



资料来源：智研咨询，头豹研究院，国信证券经济研究所整理

在机器人应用领域，六维力传感器是机器人实现柔顺化、智能化控制的重要组成，为机器人的力控制和运动控制提供了力信息。力控技术的发展赋予机器人更强的感知、决策、执行能力，对机器人完成复杂精细作业、实现智能化起重要作用。

图224：机器人由自动化向智能化进化



资料来源：高工机器人，国信证券经济研究所整理

在人形机器人领域，六维力传感器主要装于手腕、脚踝等关键部位，可提升机器

人手部操作的精细化与柔性化程度、测量脚踝处的力和力矩，提高脚部行走的稳定性，实现人形机器人精准和柔顺控制。在机器人末端关节上使用的六维力传感器一般需要连接一个执行机构，例如打磨头、夹爪等，执行器工作过程中的力臂（力的作用线到支点的距离）在几十到两三百 mm 之间。

图225: 人形机器人中六维力传感器应用位置



资料来源：鑫精诚官网，GGII，头豹研究院，国信证券经济研究所整理

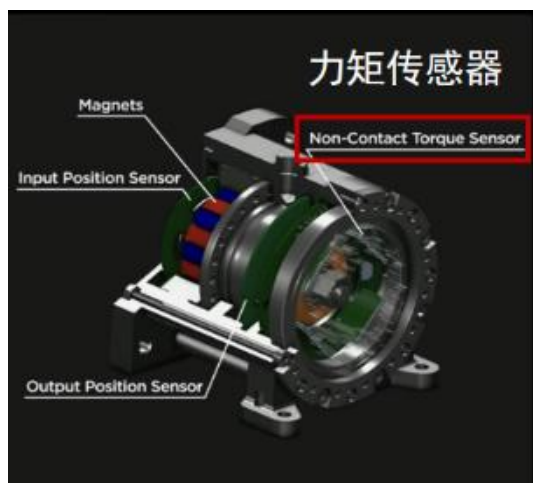
图226: 六维力传感器在机器人末端的应用



资料来源：坤维科技公众号，国信证券经济研究所整理

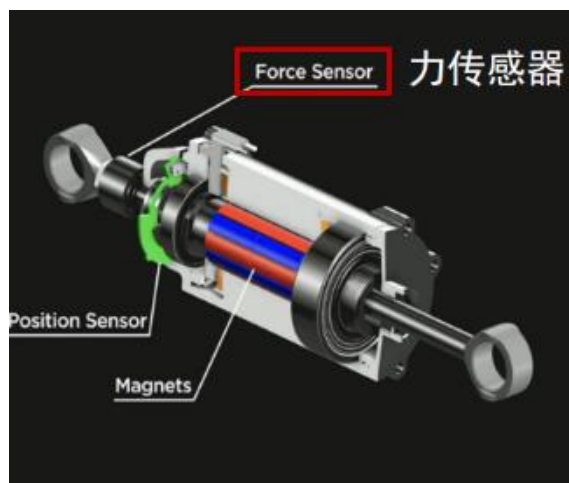
当前部分人形机器人厂商明确披露在机器人产品中使用力传感器，如特斯拉、优必选、智元等。以 Optimus 为例，其在旋转关节上采用力矩传感器，在直线关节上采用力传感器，同时预计在手腕和脚踝部位有望采用六维力传感器。

图227: Optimus 旋转关节采用力矩传感器



资料来源：特斯拉 AI Day，国信证券经济研究所整理

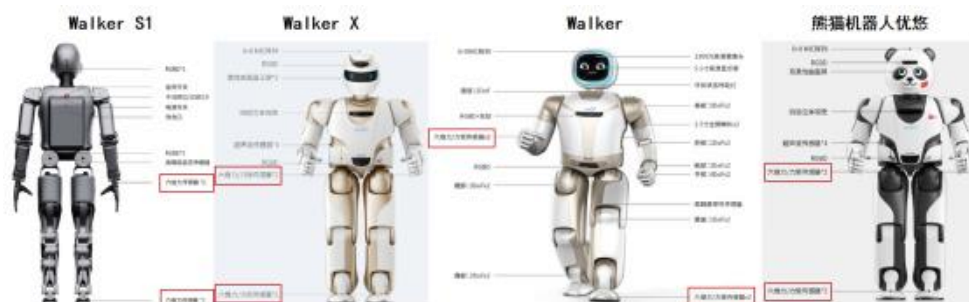
图228: Optimus 直线关节采用力传感器



资料来源：特斯拉 AI Day，国信证券经济研究所整理

优必选在人形机器人产品上均配备 4 个六维力传感器，分布在手腕和脚踝处。智元在远征 A2-W 机器人上配备 7 自由度双臂，配合六维力传感器，A2-W 能够精准执行多种力控任务。

图229: 优必选人形机器人产品使用六维力传感器情况



资料来源：优必选官网，国信证券经济研究所整理

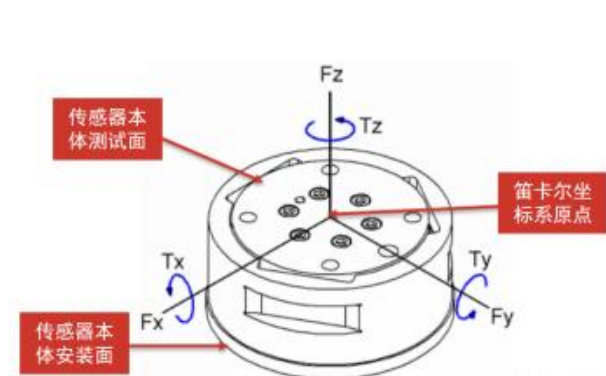
1.3 六维力传感器：高壁垒、高价值的精准力控传感器

总结：六维力传感器可测量空间坐标系中 3 方向力+3 方向力矩，1) **性能指标：**包括串扰、精度、准度、灵敏度、分辨率、过载能力等衡量指标；2) **技术路线：**应变式、电容式、压电式、光电式等类型，其中应变式技术成熟，精度高、成本较低、应用广泛；3) **结构拆解：**应变式六维力主要元件包括弹性体、应变片、底盘、基座、顶盖等，其中弹性体和应变片是核心部件；4) **工作原理：**基于弹性体形变，弹性体上粘贴的应变片发生形变导致电阻值变化，通过测量电路转为电压信号，算法解耦后得到六维力信息。

1、六维力传感器是人形机器人精准力控的关键

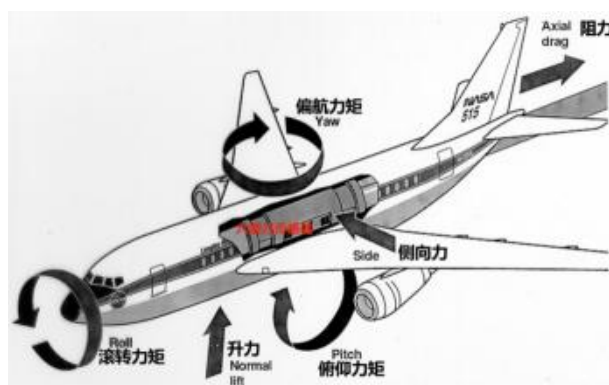
六维力传感器能够检测力在空间作用的全部信息，即在笛卡尔空间坐标系所形成的三个力分量 (F_x 、 F_y 、 F_z) 和三个力矩分量 (M_x 、 M_y 、 M_z) 都可以被完整描述，从而对力进行精密测量与控制；**六维力测量的需求最早来自航空航天飞行器领域**，飞行器内部的六维力传感器用来测量飞行器的空气动力学特性，包括正交三方向力（升力、阻力、侧向力），以及三方向力矩（俯仰力矩、偏航力矩和滚转力矩）。

图230：六维力传感器测量原理



资料来源：ATI，国信证券经济研究所整理

图231：飞行器中六维力传感器同时测量六分量

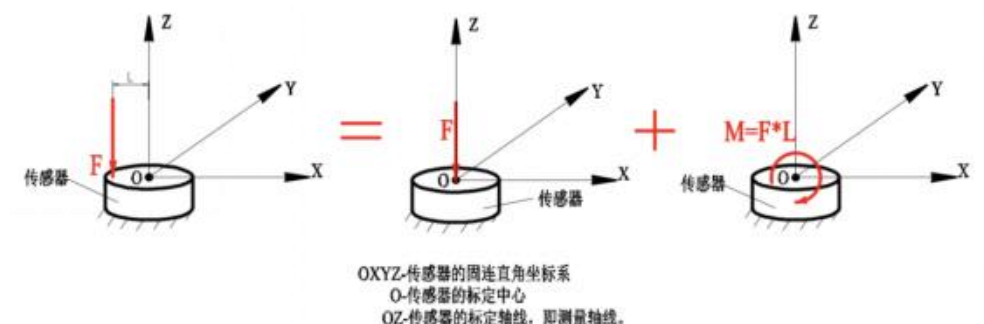


资料来源：坤维科技公众号，国信证券经济研究所整理

六维力传感器相对于三维力传感器增加对三方向力矩的测量，能够更精准地测量力觉信息。举例来看，当力的方向与传感器的测量轴线平行但不重合（即力的作用点与传感器标定参考点不重合）时，仅采用三维力传感器可能测量出现误差，因为基于理论力学中力的平移等效原理，相当于有一个力和弯矩同时作用在传感器上，此弯矩对传感器产生一定变形作用。三维力传感器加载标定时无法考虑弯矩，使得标定出的模型和参数无法将弯矩的干扰修正消除，导致误差。力经正交

分解并平移后，传感器既要承受力 $F_x/F_y/F_z$ 三分量作用，又要承受 $M_x/M_y/M_z$ 三个弯矩作用，弯矩越大，三维力的测量越不准确。六维力传感器可精准地修正三方向力和三方向弯矩之间的耦合误差，很大程度上消除弯矩对力测量干扰。

图232：六维力传感器能够同时测量力和力矩



资料来源：坤维科技公众号，国信证券经济研究所整理

核心指标：六维力传感器的核心指标包括串扰、精度、准度、满量程、满量程输出、灵敏度、迟滞、分辨率、过载能力等。

表38：六维力传感器关键技术指标及含义

技术指标	含义
串扰	衡量多维力传感器各测量方向间的耦合影响，可以反映测量误差水平，是体现产品性能的关键指标之一。比较优秀的串扰指标在 1% FS 左右，2~5% FS 比较常见。
精度	衡量测量结果之间的重复性。进行多次重复联合加载相同一组载荷后，计算传感器测量值的标准差除以量程。六维力传感器的精度主要受到结构设计、加工精度、解耦算法、电路设计、温度、标定和校准、材料选择等因素影响。
准度	衡量测量结果与理论真值的偏离程度。对传感器进行多组多维联合加载，计算传感器测量值与理论真值之间的标准偏差除以量程。
满量程	传感器能有效测量的最大加载力（转矩）。
满量程输出	在受到最大规定加载的力（转矩）时，传感器各通道输出的电信号值。
灵敏度	传感器在稳定工作条件下，输出微小变化增量与引起此变化的输入微小变化增量的比值。
迟滞	又称回差或变差，指传感器在正、反行程的输入输出特性曲线的不一致程度，用正向与反向施加相同输入时对应输出的最大偏差值与最大量程的比值计算。
线性度	反映了传感器输入与输出之间的线性程度，通常用非线性误差表示（实际输入输出关系曲线与拟合线的不一致程度）。
分辨率	传感器能分辨的最小信号，反映被测量的最低极限量。

资料来源：坤维科技公众号，谷向飞等，《六维力传感器静/动态性能指标综述》，机械工程与自动化，2019，（2）：224-226；国信证券经济研究所整理

串扰：用来衡量多维力传感器各测量方向间的耦合影响，可反映测量误差水平，是衡量六维力传感器性能关键指标之一。串扰需分别对六维力传感器的六个测量方向精确加载至各自的额定载荷，记录六个方向测量结果。如载荷组 1（图 14）中，仅对 F_x 方向加载到额定载荷，并假设加载方向和载荷值准确，所以理论上 F_x 是 100%FS，其它方向是 0%FS；而实际测试结果显示， F_y 、 F_z 、 M_x 、 M_y 、 M_z 测量结果并非为 0%FS，其值大小即为在 F_x 作用下的串扰。根据坤维科技，比较优秀的串扰指标在 1%FS 左右，2~5%FS 比较常见。

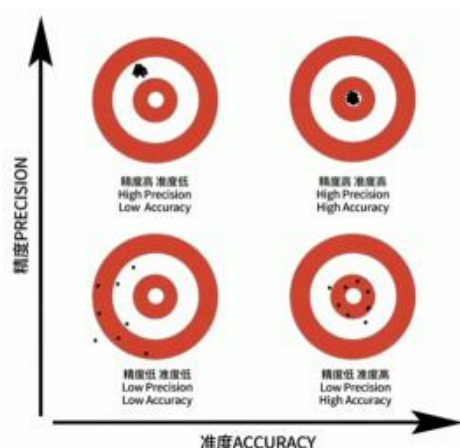
精度与准度：精度强调测量结果的重复性，准度强调测量结果与理论真值之间的偏离程度。准度涵盖滞后、线性、蠕变等误差因素，更能体现产品的综合性能，是多维力传感器最为核心的技术指标之一。

图233：六维力传感器串扰测量指标

图234：六维力传感器精度与准度区别

组别	额定载荷（理论真值）						测试结果					
	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
1	100% FS	0NFS	0NFS	0NFS	0NFS	0NFS	99.8% FS	1.2% FS	2.3% FS	1.7% FS	2.6% FS	2.9% FS
2	0NFS	100% FS	0NFS	0NFS	0NFS	0NFS	0.3% FS	100.1% FS	2.7% FS	1.1% FS	2.7% FS	1.4% FS
3	0NFS	0NFS	100% FS	0NFS	0NFS	0NFS	1.8% FS	1.2% FS	99.7% FS	1.9% FS	2.6% FS	2.7% FS
4	0NFS	0NFS	0NFS	100% FS	0NFS	0NFS	2.1% FS	1.6% FS	2.1% FS	100.5% FS	2.6% FS	1.2% FS
5	0NFS	0NFS	0NFS	0NFS	100% FS	0NFS	1.2% FS	2.1% FS	1.6% FS	1.7% FS	100.6% FS	2.5% FS
6	0NFS	0NFS	0NFS	0NFS	0NFS	100% FS	1.3% FS	1.3% FS	2.5% FS	2.3% FS	2.6% FS	99.4% FS

资料来源：坤维科技，国信证券经济研究所整理 注：FS(Full scale) 表示六维力传感器各方向的额定量程。



资料来源：坤维科技，国信证券经济研究所整理 注：假设理论真值是圆环的中心，黑点表示测量值。

精度等级：根据国家标准《GB/T33010-2016 中华人民共和国国家标准·力传感器的检验》，力传感器可分为 0.01~1 八个级别；2023 年 9 月工信部发布的《关于开展 2023 年未来产业创新任务揭榜挂帅工作的通知》中，《人形机器人揭榜挂帅任务榜单》提到：到 2025 年，完成人形机器人系列化力传感器的设计与制造，满足驱动关节、手指、足底等肢体末端力测量需要，并在人形机器人上开展实际应用。传感器采用低成本、高性能的设计，精度达到 0.5%FS，响应时间优于 0.03s，具有智能信息采集与处理能力，提升力传感器的智能化水平。

表39：力传感器分级和主要技术指标

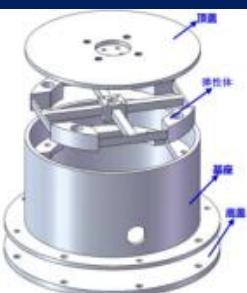
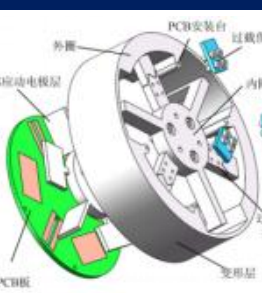
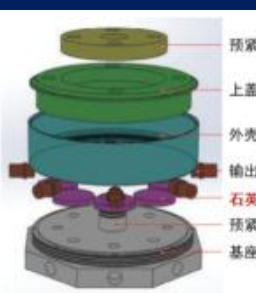
分级	0.01	0.02	0.03	0.05	0.1	0.3	0.5	1
零点输出（%FS）			±1.0			±2.0		±5.0
零点漂移（%FS）	0.005	0.01	0.015	0.025	0.05	0.15	0.25	0.5
重复性（%FS）	0.01	0.02	0.03	0.05	0.1	0.3	0.5	1.0
直线度（%FS）	±0.01	±0.02	±0.03	±0.05	±0.1	±0.3	±0.5	±1.0
滞后（%FS）	±0.01	±0.02	±0.03	±0.05	±0.1	±0.3	±0.5	±1.0
长期稳定性（%FS）	±0.02	±0.04	±0.06	±0.1	±0.2	±0.6	±1.0	±2.0
蠕变/蠕变恢复（%FS）	±0.01	±0.02	±0.03	±0.05	±0.1	±0.3	±0.5	±1.0

资料来源：《GB/T33010-2016 中华人民共和国国家标准·力传感器的检验》；国信证券经济研究所整理

2、应变式六维力传感器精度高、较成熟，应用广泛

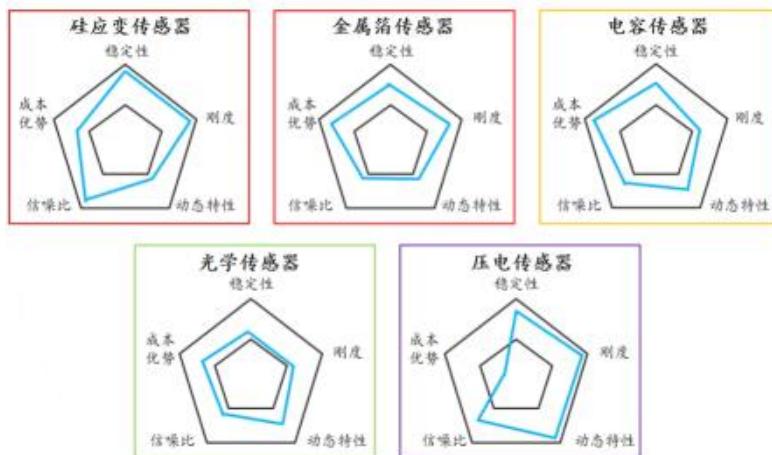
根据测量原理不同，六维力传感器可以分为应变式、电容式、光电式、压电式等类型。在产品性能方面，应变式传感器综合性能较优，其中硅应变和金属箔传感器的刚度接近，成本上金属箔占优，硅应变片在稳定性和信噪比方面更优。总体而言，应变式传感器较成熟，应用广泛，具有精度高、测量范围广、成本低、高频响特性好的特点（QYResearch 预计其使用量约占力传感器总量的 80%+）。

表40：不同类型六维力传感器原理、特点、优劣势对比

核心指标	应变式	电容式	压电式	光电式
结构图				
原理	采用金属应变片或硅应变片，传感器受力时，弹性体上的应变片发生形变，电阻值产生变化，通过电路输出电压，解耦后获得受力信息	受外力作用后，敏感元件（如弹性变形梁）发生变形，带动电容器产生运动，使电容器的动电极与静电极之间发生相对位移，电容值产生变化，计算获取力值	力作用下，压电材料（如石英晶体）产生变形，其内部产生极化现象，两个表面产生数量相等、方向相反的电荷，形成电场，不受力时恢复到不带电状态，从而产生电信号，处理后得到六维力信息	力作用于弹性体使其形变，改变光信号，通过转换电路将光信号转换成电压或电流信号，实现作用力测量
优点	- 精度高，技术成熟 - 测量范围广 - 成本低	- 动态范围广 - 灵敏度高，结构简单 - 耐用性强	- 动态范围广 - 适合动态测量 - 结构简单，可靠性高	- 高分辨率，精度与灵敏度高 - 抗电磁干扰能力强，可靠性高
缺点	- 受温度干扰大 - 应变片粘贴易老化脱落 - 生产工艺复杂	- 易受温度等环境因素影响 - 电容变化量微弱，调理电路复杂 - 易信号漂移	- 仅能测量动态力，不适合静态力测量 - 阻抗高	- 对光照等环境要求高 - 价格较高 - 结构刚度偏弱

资料来源：GGII，头豹研究院，孙永军，《空间机械臂六维力/力矩传感器及其在线标定的研究》，哈尔滨工业大学，2016:1-137；汤建华等，《多维力传感器研究现状及其小型化存在的问题与对策》，衡器，2021，50(12):40-45；张宇航等，《面向压电式六维力传感器的动态建模与性能分析方法》，中国惯性技术学报，2023，31(5):481-489，华力创科学专利文件；国信证券经济研究所整理

图235：六维力传感器性能指标对比



资料来源：刘涛，《针对智能假肢的六维力传感器设计与标定技术研究》，浙江大学，2023:1-83，高工机器人；国信证券经济研究所整理

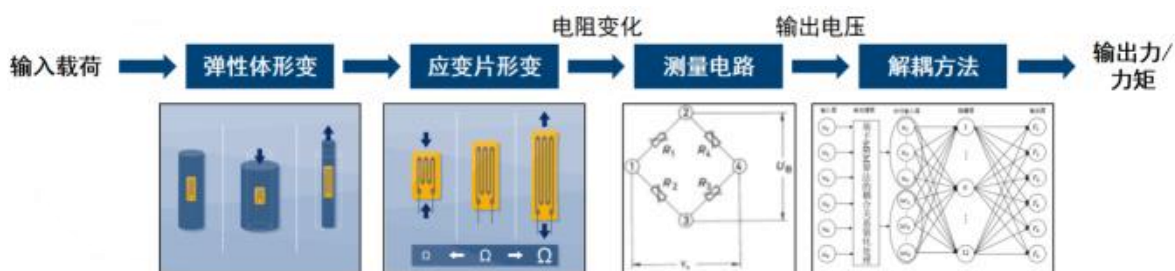
应变式六维力传感器的工作原理主要基于弹性体形变，整体过程包括4个阶段：

- ✓ **阶段①载荷→弹性体形变**：力的作用下，弹性体发生与所受力成一定关系的微小应变。
- ✓ **阶段②弹性体形变→应变片电阻值的变化**：在弹性体变形较灵敏的部位粘贴电阻应变片，弹性体发生形变时应变片同样发生形变，应变片由于应变效应（金属应变片）或压阻效应（半导体应变片）产生电阻值的变化。
- ✓ **阶段③应变片电阻值的变化→电压输出**：应变片被接入到一个电桥电路中，

该电路通常由四个电阻组成，其中两个固定电阻，另外两个应变片电阻。当弹性体受到力作用时，应变片的电阻值发生变化，导致电桥电路失去平衡，从而产生一个与力成比例的电压信号。

- ✓ **阶段④电压输出→力/力矩信息输出：**由于传感器包含多维力和力矩信息，每一个施加的力/力矩都可能对所有输出信号产生影响（即耦合）。因此需通过解耦算法将传感器输出电压向量进行解耦，得到实际加载的准确的力/力矩信息。最后力信号将会反馈给控制系统，控制系统根据感知到的力信号调整运动轨迹和力度，实现对力的精确控制。

图236: 应变式力传感器基本工作原理

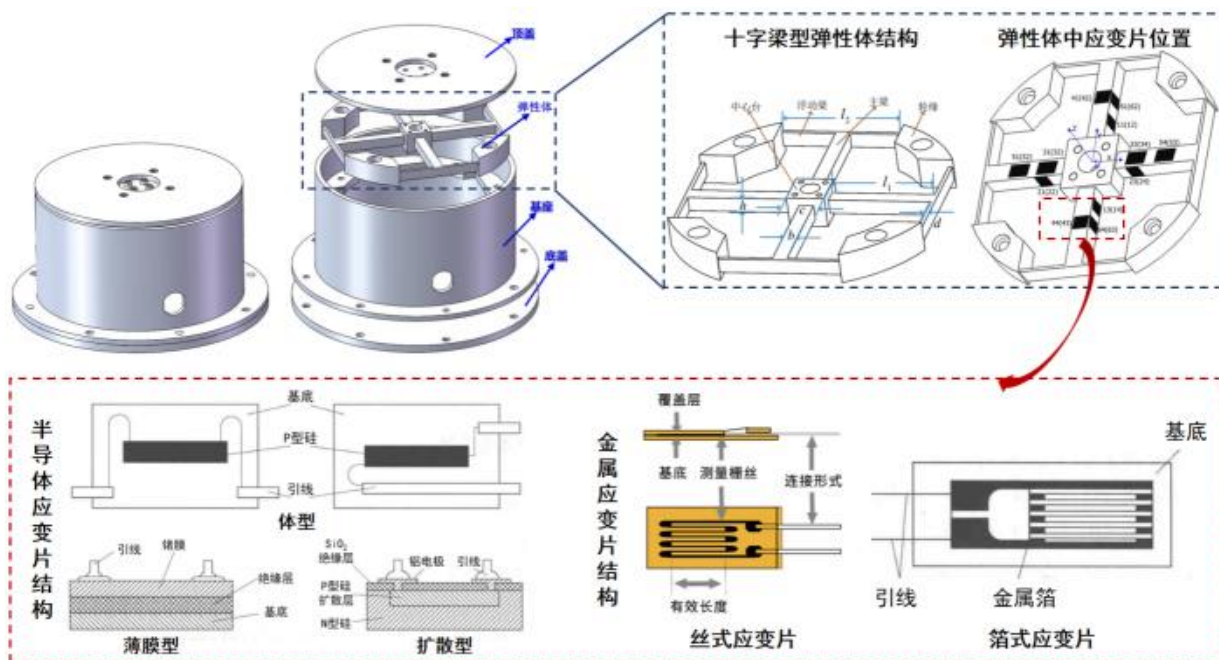


资料来源：付立悦，《多维力传感器的静态性能研究》，东南大学，2021:1-120；王佳瑞，《六维力传感器结构优化设计及其标定解耦研究》，浙江科技大学，2024:1-82，HBK 测试与测量；国信证券经济研究所整理

结构拆解：以应变式六维力传感器为例，其主要机械元件包括弹性体、应变片、底盘、基座、顶盖等：

- **顶盖**通过中心四个定位孔与弹性体直接连接，且顶盖与基座之间有一定缝隙，因此顶盖可直接受力并将力传递给与之相连的弹性体；
- **弹性体**目前主要是**十字梁型**，包括四个主梁、八个浮动梁、中心台、轮缘等。在每个主梁的正反面及两个侧面各贴有多个应变片。
- **应变片**通常由金属箔或半导体材料制成，具较好的力学和电学性能，可将机械应变转换为电阻变化。金属应变片主要包括丝式、箔式等，由敏感栅、导线、覆盖层、基底等部分构成。作为应变片的核心，敏感栅是将应变量转换成电阻变化量的电阻体，可以感知微小的应变变化，主要为金属或半导体材料；敏感栅的引出部分即为导线，可将应变片接入测量电路；覆盖层主要保护敏感格栅；半导体应变片则主要包括体型、薄膜型、扩散型等，采用半导体材料作为敏感栅，灵敏度较高。
- **基底**一方面能保护内部敏感元件，另一方面可传导被测单元的应变。

图237: 应变式六维力传感器结构



资料来源：付立悦，《多维力传感器的静动态性能研究》，东南大学，2021:1-120；王丰等，《传感器技术基础》，化学工业出版社，2023:1-222，HBK 测试与测量公众号；国信证券经济研究所整理

应变片系六维力传感器核心部件，主要包括金属应变片或硅应变片方案：

- ✓ **金属应变片**：应变效应，受力后尺寸变化导致电阻变化。传统金属应变片以金属应变效应为原理，金属受力后发生尺寸变化，产生电阻变化，这种应变效应引起的材料电阻值的变化幅度较小（相对于硅应变片）。
- ✓ **硅应变片**：压阻效应，受力后半导体的电阻率发生变化。以半导体压阻效应为原理：力作用下半导体晶格产生畸变→晶体内部能级构造变化→晶格对称性被破坏→改变载流子相对能量、迁移率→改变材料电阻率。**相对金属应变片，硅应变片灵敏系数更高，且机械滞后性（外力消失后不会立即恢复原样）、体积等都比较小**；缺点是温度稳定性弱，温度变化会导致电阻值变化，且承受较大外力时会导致其输出的非线性误差增加，需要采用温度补偿等措施。

图 238：应变式六维力传感器主要采用硅应变片或金属应变片



资料来源：刘晓东等，《光电效应对半导体应变片内载流子的影响》，工程机械，2024，55(1):18-22+6；覃永坚，《基于压阻的敏感结构应力测试及分析》，大连理工大学，2014:1-68；国信证券经济研究所整理

2. 壁垒：设计、算法、标定以及工艺多维壁垒

总结：六维力传感器的价值量高、技术难度大，Know how 要求多，技术壁垒主要体现在设计、算法、工艺的精湛结合，结构设计、解耦、标定检测、加工工艺等

多个方面共同构成六维力传感器制造“系统工程”：1) 结构设计方面，六维力传感器的结构设计涉及多个关键点，包括弹性体的选择与优化、应变片设计与选择等，弹性体需要平衡刚度与灵敏度，应变片种类较多且影响工艺路线选择；2) 解耦方面，消除维间耦合（即解耦）是六维力传感器需解决的核心问题，包括结构解耦和算法解耦；结构解耦存在加工难度高、不易实现、成本较高等难点，壁垒较高；算法解耦种类较多，各有优劣，尚未收敛，厂商也需要对模型改进，Know how 较深；3) 标定与检测方面，六维联合加载标定和检测的复杂程度高，设备需自研；4) 工艺方面，加工工艺流程长、复杂度高，弹性体和应变片的加工 Knowhow 较深，金属应变片贴片仍需依赖人工，大批量一致性自动化生产的壁垒较高。硅应变片精度、灵敏度高，与玻璃微熔工艺结合可提高自动化生产能力，有望成为未来大批量出货时的工艺方向。

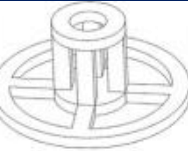
2.1 结构设计：弹性体和应变片设计涉及多个关键点

六维力传感器结构设计涉及多个关键点，如弹性体的选择与优化、应变片设计与选择等，共同构成六维力传感器高精度、高稳定性和高可靠性的基础。其中弹性体的结构直接影响传感器的灵敏度、刚度、动态性能、维间耦合等特性。

弹性体的结构设计是六维力传感器的核心，需要平衡刚度与灵敏度。弹性体的刚度决定传感器的测量范围，刚度越大，量程越大，但灵敏度就越小，因此如何在刚度和灵敏度之间平衡，成为弹性体的设计的壁垒之一，在结构设计和材料选择方面具较多 Know how：1) 结构：结构设计时需考虑量程、重量限制、尺寸限制、安全载荷下的强度、电路板放置、与其它结构的机械配合等多种因素，也需充分考虑力传递的均匀性和灵敏度，确保传感器能够准确感知多维力的变化；2) 材料：需考虑材料力学性能、刚度、稳定性及加工精度等因素，比较好的弹性体材料应具备良好的弹性恢复能力和缓解疲劳性能，以确保传感器在长期使用过程中保持高精度和稳定性。

当前弹性体的结构有多种类型，各有优劣，尚未收敛。美国斯坦福大学人工智能研究所设计的十字交叉梁结构的六维腕力传感器，其采用“马提斯十字梁”（Maltess Cross）结构，是应用最广泛的一种结构，优点是结构对称，同时降低了高度使得传感器结构紧凑，并且维间耦合小，易于实现温度补偿，但也存在抗过载能力较差，动态特性难于提高等缺点。

表41：不同弹性体结构的力传感器对比

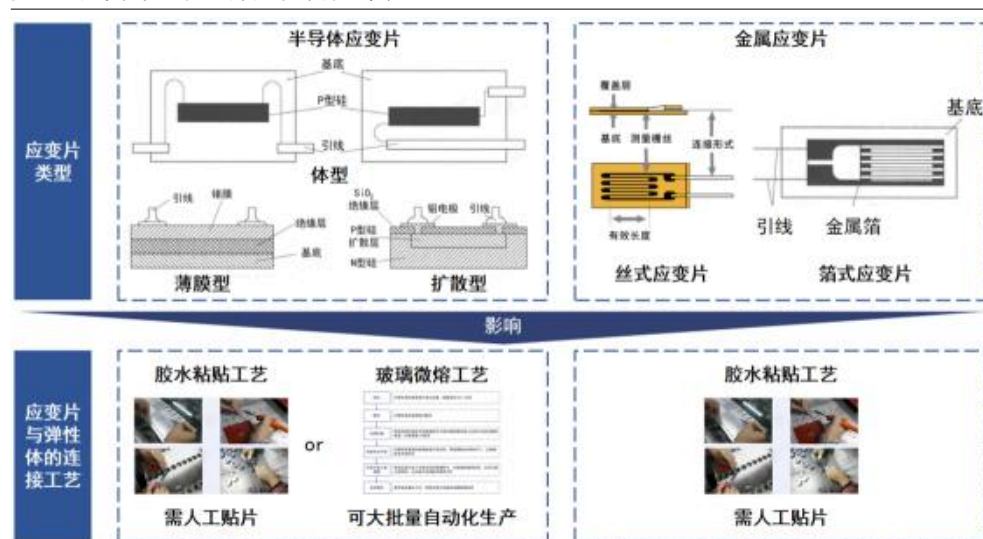
	竖梁	圆筒式弹性梁	十字弹性梁	非径向梁式	复合梁型	Stewart 并联
典型设计						
优点	承载能力强，结构简单，横向效应和抗冲击性好	耦合小	高对称性，结构紧凑，刚度大，易加工，由于柔性连接简化了力学模型	刚度大	可实现无耦合测量	刚度大，稳定性好，负载能力大
缺点	纵向灵敏度低，存在维间耦合问题	刚度较差	存在维间耦合和径向效应	输出存在非线性问题	结构复杂，受加工和装配精度的影响大	较难实现力和力矩的各向同性，适用静态力测量

资料来源：付立悦，《多维力传感器的静动态性能研究》，东南大学，2021:1-120；国信证券经济研究所整理

应变片设计与选择方面，应变片类型较多，且影响工艺路线，knowhow 较深。应变片主要包括金属应变片和半导体应变片，其中金属应变片主要包括丝式、箔式等，半导体应变片则主要包括体型、薄膜型、扩散型等，种类较多。不同类型的应变片影响其与弹性体的连接工艺。金属应变片在与弹性体相连接时主要采用胶水粘贴的工艺，需人工贴片；而半导体应变片则可以采用玻璃微熔工艺，可实现

大批量自动化生产。因此，应变片的设计与选择也具有较深壁垒。

图239：应变片包括金属和半导体两类



资料来源：HBK 测试与测量公众号，王丰等，《传感器技术基础》，化学工业出版社，2023:1-222；国信证券经济研究所整理

弹性体和应变片的选择会影响六维力的温度漂移与补偿。温度漂移是指不同环境的温度变化会对影响传感器性能，是传感器需要解决的重要问题之一。以应变式六维力传感器为例，应变片电阻值变化主要有两个来源，其一是正常的金属应变效应或者半导体压阻效应，另一来源则是温度漂移：

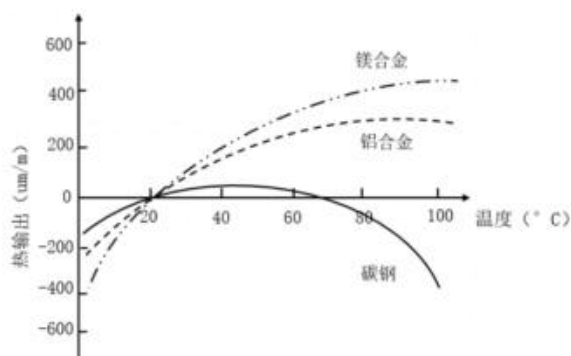
- ✓ **应变效应、压阻效应：**受力时，弹性体形变带动应变片形变，金属应变效应或者半导体压阻效应导致应变片的电阻值发生变化；此原因即为常温下力传感器的测量原理，应变片的形变仅由弹性体带动。
- ✓ **虚假应变（温度漂移）：**当环境温度变化时，一方面引起材料电阻系数的变化，直接导致电阻值变化（而不是力作用）；另一方面会引起应变片与弹性体的体积发生不同程度变化，产生不同应变值，导致电阻值变化。此时应变片的形变是虚假应变，又被称为**热输出**，**需要通过温度补偿进行消除**。

弹性体的材料可能影响温度漂移。同样的应变片粘贴于不同材料弹性体上时，温度变化会影响弹性体材料的弹性模量，进而导致六维力的产生不同程度的虚假应变。因此，弹性体设计时需注重材料选择。

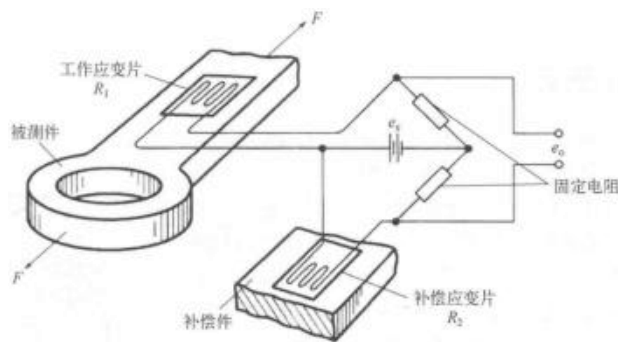
补偿应变片法是常用的温度补偿方法，高精度补偿需具备较高 Know how。补偿应变片法是使用两个相同的电阻应变片，一片为工作应变片，粘贴在需要测量应变的地方；另一片为补偿应变片，粘贴在与同材料、同温度条件但不受力的补偿件上，并与工作应变片作为邻臂接入电桥中，补偿应变片不承受应变，只感受温度变化。由于两个应变片处于相同的温度场中，所以温度变化引起的应变相同，因而可以消除温度的影响。然而整体来看，通过硬件设计进行温度补偿较难做到高精度补偿，高精度温度补偿还需结合软件算法，具备较高 Know how。

图240：弹性体采用不同材料时应变片的温度漂移

图241：六维力传感器补偿应变片法



资料来源：汪正全，《六维力传感器静态特性与温度补偿研究》，合肥工业大学，2021:1-79；国信证券经济研究所整理

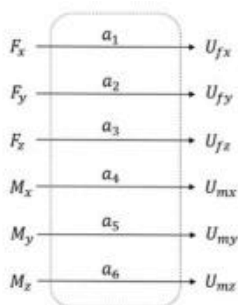


资料来源：王丰等，《传感器技术基础》，化学工业出版社，2023:1-222；国信证券经济研究所整理

2.2 解耦：结构、算法双解耦难度高

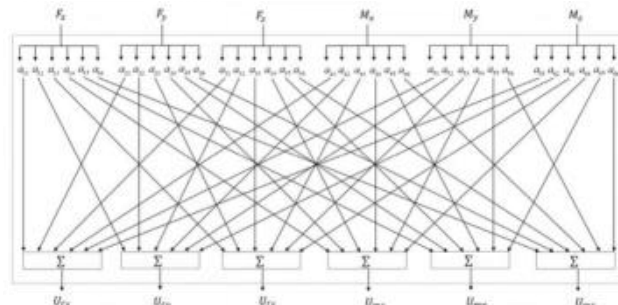
消除维间耦合（即解耦）是六维力传感器需解决的核心问题。理想情况下，六维力传感器各通道间不存在维间干扰，每个通道电压输出只与本通道的加载力/力矩有关，与其它通道无关；但事实上由于弹性体机械结构、传感器机械加工精度、应变片粘贴技术、测量方法等原因，几乎任何通道输出信号会受各个方向力/力矩的影响，某一通道的输出信息可认为是由该通道输入的力/力矩和其余耦合通道输入的力/力矩共同作用之和，即存在维间耦合。

图242：六维力传感器无耦合条件下的输入输出系统



资料来源：韩明，《灵巧手指尖六维力传感器的设计》，哈尔滨工业大学，2020:1-83；国信证券经济研究所整理

图243：六维力传感器存在维度耦合时的输入输出关系



资料来源：韩明，《灵巧手指尖六维力传感器的设计》，哈尔滨工业大学，2020:1-83；国信证券经济研究所整理

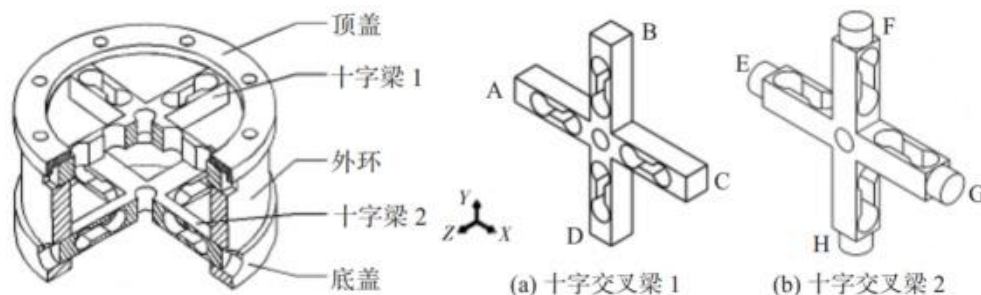
多维力传感器的耦合问题产生的原因包括结构性耦合和误差性耦合。结构性耦合主要是因为弹性体是一体化结构，在结构设计上某些方向存在耦合；误差性耦合产生的原因主要是制造工艺和贴片水平的限制。因此要提高六维力传感器感知的精确性需要进行解耦，主要包括结构解耦和算法解耦。

1、方案一：结构解耦

在解耦结构设计方面：由于结构加工和工艺误差等原因，不同维度之间的力信号可能会相互干扰，影响测量精度。可通过结构设计来提高解耦的精度，结构解耦是从误差根源入手，通过合理布局、制造工艺和机械设计，将不同维度的力信号分离开，减少相互间干扰。通过弹性体结构的设计，多维力传感器能够在受到外力作用时，将多维力及力矩分量转换为可测量的电信号。例如，一种具有滑移结构的六维力传感器通过滑移结构将十字梁进行限制，使其只在需要的方向移动，具备结构解耦的特性。但结构解耦存在加工难度高、不易实现、成本较高等难点，

壁垒较高。

图244: 具有滑移结构的六维力传感器整体结构图



资料来源: 何小辉等,《一种小量程六维力传感器的设计与分析》, 传感器与微系统, 2012, 31 (1) : 20-22+25; 国信证券经济研究所整理

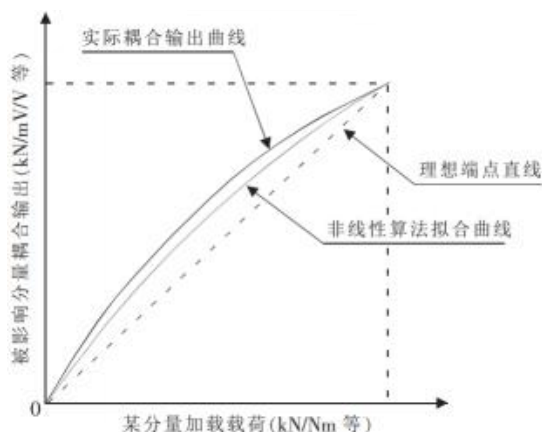
2、方案二：算法解耦

算法解耦通过软件算法的设计对六维力传感器进行解耦。相比结构解耦，算法解耦灵活性高、成本低、更易实现，分为线性解耦和非线性解耦：

1) **线性解耦**假设六维力传感器的输入和输出呈线性关系，基于最小二乘法来计算系数矩阵的广义逆，是最简单、应用最广泛的解耦算法。但不同通道的输入、输出数据之间并不总是线性关系，出现微小扰动可能使得解耦精度发生偏差。

2) **非线性解耦**算法种类较多，各有优劣，尚未收敛。非线性解耦算法包括反向传播神经网络（BP）、径向基函数（RBF）、支持向量机算法（SVR）、极限学习机算法（ELM）等等，可处理非线性映射关系，误差相比线性解耦有明显改善，但也存在计算复杂、所需训练样本多、耗时长等缺点，厂商也需要对解耦模型进行改进，增加解耦成本。

图245: 非线性解耦效果通常好于线性解耦



资料来源: 刘思博等,《多分量力传感器线性解耦算法研究》, 计量与测试技术, 2025, 51 (2) : 88-91; 国信证券经济研究所整理

图246: 解耦算法比较

解耦算法		数据要求	优点	缺点	硬件成本
线性解耦	最小二乘法	单轴标定数据	模型简单、数据获取容易	解耦精度不足	低
非线性解耦	支持向量回归 (SVR)	大量的六轴载荷数据集	泛化能力较强	依赖于超参的选择和优化, 数据获取难	高
	神经网络 (NN)	大量的六轴载荷数据集	泛化能力强	数据获取难	高

资料来源: 左盟,《六维力/力矩传感器的应变分析与数据驱动下的维间解耦》, 浙江大学, 2020: 1-72; 国信证券经济研究所整理

2.3 标定与检测：六维联合加载标定复杂度高，设备需自研

六维力传感器在设计、制造完成后，或者使用一段时间后，需对其进行标定和校准，以确定其输入、输出间的关系是否变化，确保各项性能指标满足要求。

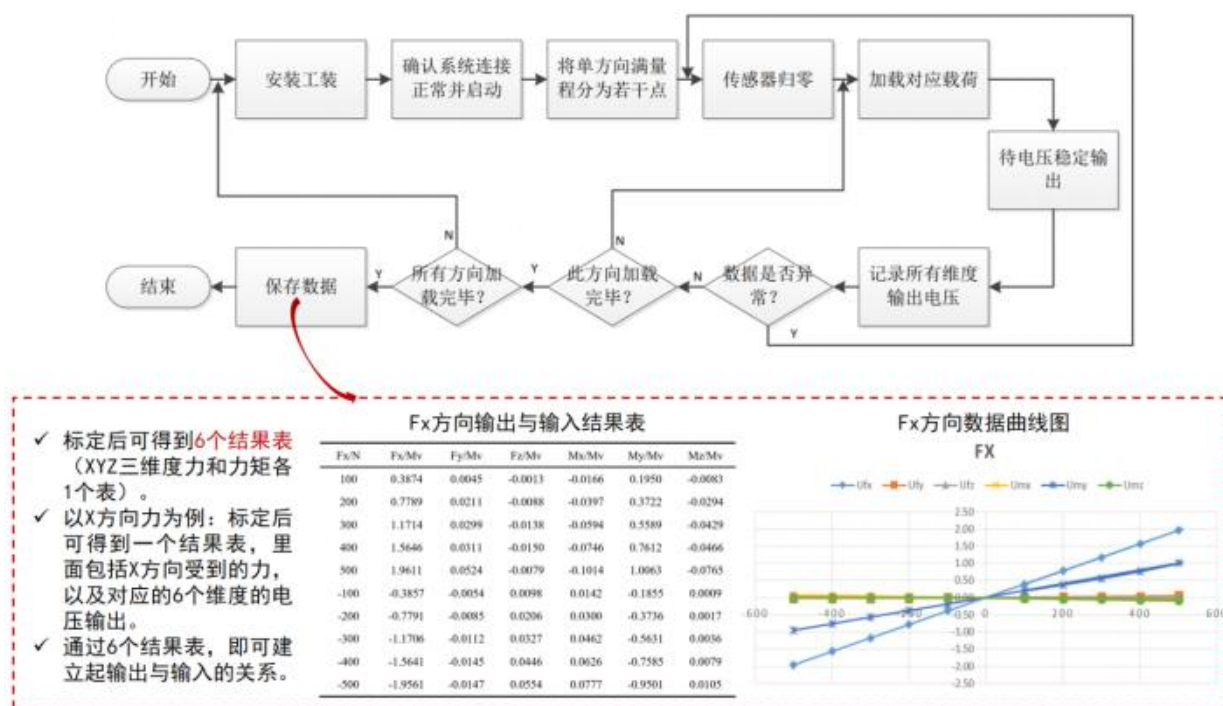
标定是指通过试验方法记录输入-输出数据，将已知的被测量（即标准量）输入传感器，得到传感器的输出量，建立输出量与输入量之间的对应关系，从而得到一系列表征两者关系的标定曲线，进而得到获得六维力传感器内部算法的各个参数，也就是建立传感器原始信号和受力之间的映射关系。

检测是指加载已知理论真值的载荷（输入）并同时记录传感器测量结果（输出），统计、比较测量结果和理论真值的差异，获得传感器的精度和准度，也就是测试传感器准不准。简单来说，**标定是获得传感器参数，检测是获得传感器的精准度。**

■ 标定

从原理上来看，六维力传感器在测量时，弹性体上会受到六维力/力矩的作用，以 F 来表示；而传感器输出的电压信号则用 V 表示。六维力的输入矩阵 F 和输出矩阵 V 之间的关系为： $F=C \times V$ ， C 即为标定矩阵。传感器的标定就是求标定矩阵 C ，即根据加载在传感器上的已知力 F （标定力）和传感器六通道的电压输出值 V ，求解出矩阵 C 。 C 已知后，在传感器上施加任意方向大小的载荷，就可以根据输出电压 V 得到传感器上加载的力 F 的大小。

图247: 标定流程图



资料来源：陈昌俊，《六维力传感器标定技术研究》，浙江理工大学，2022:1-79；国信证券经济研究所整理

六维力传感器的标定需要同时考虑六个维度，六维联合加载标定的样本空间复杂程度高。对于六维力传感器而言，在标定时需要**六维联合加载标定**，即三个方向的力（ F_x 、 F_y 、 F_z ）和三个方向的力矩（ M_x 、 M_y 、 M_z ）同时加载。从**难度对比**来看，假如同样每个维度取9个样本点，一维力传感器的样本空间包含9个样本点来，而六维力传感器的样本空间则包含531441个样本点，难度呈指数型上升。

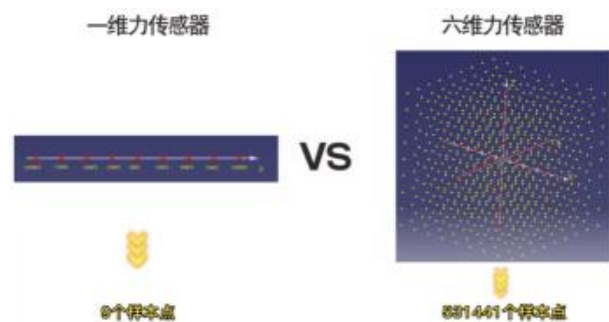
六维联合加载标定难度较高的主要原因在于非线性特性，六维力传感器并非多个单维传感器的简单叠加，需要通过**对交叉样本点的加载标定**来充分体现非线性效应，然后采用解耦算法的数学模型进行深入研究，之后还要精确拟合模型参数，

才能标定出高准度的六维力传感器，实现高准度。

■ 检测

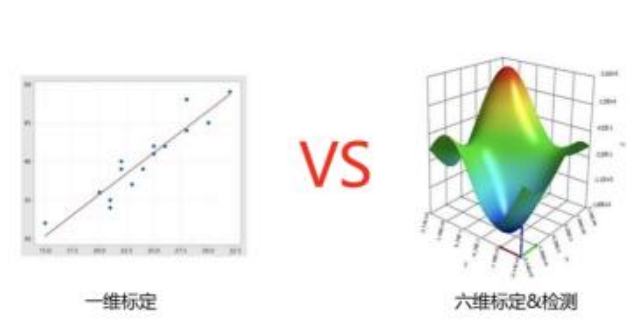
检测的主要功能是评价传感器的标定效果。检测也要采用六维联合加载的方式，所用到的设备与标定设备一样，但检测样本点需要与标定样本点都不相同。每个检测样本点都是三个方向力（ F_x 、 F_y 、 F_z ）和力矩（ M_x 、 M_y 、 M_z ）的组合。检测样本点的选择应该满足随机性和非相关性的要求，并且较为均匀地分布在样本空间中，才能准确、客观的评估标定结果的优劣。

图248：六维力传感器的联合加载标定和检测工作量大



资料来源：坤维科技公众号，国信证券经济研究所整理

图249：六维力传感器的联合加载标定和检测理论基础更深



资料来源：坤维科技公众号，国信证券经济研究所整理

■ 标定设备

标定设备方面，目前六维联合加载设备无标准产品，需厂商自研。六维联合加载设备是高精度六维力传感器研发和生产的必要条件，但是目前没有标准产品可以直接采购，一般由六维力传感器的厂商自行研制，因此不同厂商的六维联合加载设备的形态差别非常大。六维联合加载设备的研发涉及到空间光学定位、载荷位移补偿、机电一体化等多项综合技术，Knowhow 较深，依赖工程经验。一旦细节考虑不周全，加载效果就不理想，加载设备自己产生的耦合误差可能超过 1%FS，进而无法标定出高准度的六维力传感器。

图250：各国六维力传感器标定设备形态不一



资料来源：坤维科技公众号，国信证券经济研究所整理

2.4 生产加工工艺：一致性自动化生产难度高

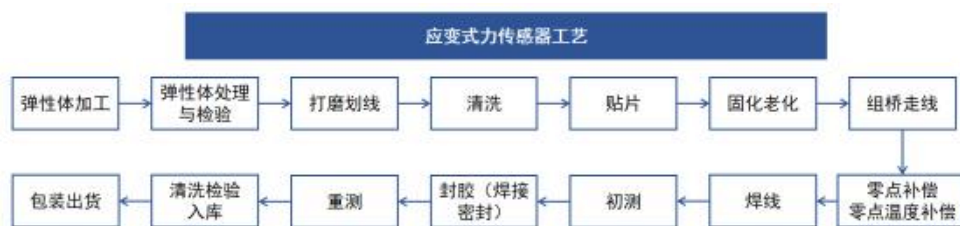
六维力传感器加工工艺流程长、复杂度高，核心零部件弹性体和应变片加工 Know how 较深，且当前小批量出货下，金属应变片的贴片工艺仍依赖人工，大批量一致性自动化生产的壁垒高；硅应变片+玻璃微熔的工艺路线可实现自动化贴片，

有望提高大批量生产的能力。

1) **弹性体加工方面**, 弹性体在加工中会产出各种加工应力, 其加工应力的积蓄与大小会影响到传感器的测试性能指标, 因此加工中应尽量避免加工应力积蓄或减少加工应力; 此外在贴片、组桥、补偿、调试、封胶等环节上需控制环境温度、湿度洁净度和流程节拍, Knowhow 较深。

2) **应变片贴片方面**, 当前小批量出货情况下, 大部分应变式六维力厂商仍采用金属应变片+人工贴片的方式, 尚未完全实现自动化生产, 仍需人工操作, 带来对人才、经验的要求, 提升大批量、一致性出货的难度。

图251: 应变式力传感器加工工艺流程



资料来源: 柯力传感招股说明书, 国信证券经济研究所整理

表42: 应变式力传感器具体工艺步骤

工艺步骤	具体内容
弹性体加工	按照传感器设计, 将特定材料进行机械加工, 成为满足应变测试用的弹性元件。
打磨、划线	打掉弹性体上加工产生纹路及电镀层, 活化金属表面, 改善贴片区表面的微观凸凹不平。划线目的为对应应变计的粘贴位置进行定位, 作为贴片时的基准线。
贴片	将敏感元件粘贴在弹性元件上, 通过金属机械变形改变阻值, 获得电信号的改变 ($\Delta R \rightarrow \Delta U$) 从而得到一个应变值。
固化、老化	将贴片后的弹性体放入一定的温度环境中, 将贴片胶烘干, 使应变计与弹性体紧密粘合。老化是通过人为升温降温来消除应变计、胶水的残余应力, 以达稳定的目的。
组桥走线	连接敏感元件(应变计), 组成惠斯通电桥, 将电信号有效地输入输出。
零点补偿、零点温度补偿	平衡桥臂电阻温度系数, 使其输出满足特定要求。
焊线	通过导线连接, 介入外部的输入、输出。
初测	测出传感器满量程的灵敏度, 并进行补偿达到一个统一的标准值以满足多个产品互换灵敏度的一致性及便于组秤使用时角度调整。
封胶、焊封	通过传感器贴片孔、补偿孔的密封, 隔离外界, 形成独立的内部气候环境。
重测	检测产品各项特性或指示是否符合或满足国际的要求或企业的内部控制指标(非线性、重复误差、滞后误差、蠕变、灵敏度、零点等)。

资料来源: 柯力传感招股说明书, 国信证券经济研究所整理

金属应变片主要是在基底的塑料薄膜上贴上由薄金属箔材制成的敏感栅, 然后再覆盖上一层薄膜做成迭层构造。主要生产工序包括基底制作、匀光刻胶、腐蚀、调阻、加盖层等。金属应变片主要通过胶水粘贴的工艺与弹性体相连接, 而胶水粘贴是一项工艺性较强的作业, 主要凭借贴片工人的经验, 工艺 knowhow 较深。

图252: 人工贴片流程

图253: 人工贴片示意图



资料来源：华兰海官网，国信证券经济研究所整理



资料来源：华兰海官网，国信证券经济研究所整理

硅应变片精度、灵敏度高，与玻璃微熔工艺结合可提高自动化生产能力，有望成为未来大批量出货时的工艺方向。金属应变片存在成本较高、灵敏度低、抗干扰能力和稳定性较差等劣势，而硅应变片有更好的压阻效应，在高精度和高灵敏度的力学测量的领域可实现对金属应变片的替代。硅应变片目前主要通过光刻单晶硅技术或蚀刻单晶硅技术制造；与传感器连接时，硅应变片常采用有机胶粘贴或玻璃微熔方式，其中玻璃微熔能够通过自动化工艺生产，提高批量化生产能力。

- ✓ **有机胶粘贴**是将硅应变片放置在固定胶上，通过加热使传感器上的固定胶熔化，从而将硅应变片固定在固定胶中；但高温环境中固定胶可能会熔化，使应变片位置发生改变，影响性能。
- ✓ **玻璃微熔**是使用高温熔化的玻璃粉作为黏合剂，将弹性体与硅应变片紧密结合。玻璃微熔工艺能够通过自动化工艺生产，消除传感器的零点漂移，改善稳定性，还使得传感器能够兼容各种气体和液体环境，拓宽应用场景。

安培龙在其发明专利《一种基于玻璃微熔工艺的六维力传感器及其制备方法》中详细介绍通过玻璃微熔工艺中将硅应变片和弹性体进行连接的方法：**采用 MEMS 硅基半导体应变片和玻璃微熔工艺相结合的技术，有效解决传统树脂粘接工艺带来的老化、蠕变影响，具有优异的稳定性和抗冲击能力：**

- **步骤 1：对弹性梁表面喷丸处理。**喷丸加工是一种在材料表面喷射高速颗粒来改变其表面形貌的方法，让弹性梁表面粗糙，提高后续与玻璃粉粘附性；颗粒大小 100-150 目可获得适度粗糙度，以提供良好的附着性和表面质量。
- **步骤 2：对弹性梁的表面进行酸洗。**喷丸处理后弹性梁的表面可能存在碎屑，通过清洗去除弹性梁表面的碎屑，避免对后续玻璃粉印刷造成影响；酸洗处理可以去除表面的氧化物、污垢和其他杂质，清洁表面并提高其粘附性。
- **步骤 3：使用丝网印刷技术将玻璃粉印刷到弹性梁的表面。**使用丝网印刷技术将玻璃粉均匀地印刷到弹性梁上应变片安装位置的表面，丝网印刷是常见的印刷技术，在网孔上涂覆墨漆并压榨使其通过网孔传输到弹性梁的表面上。
- **步骤 4：对弹性梁表面的玻璃粉进行预加热，**将玻璃粉加热成半熔状态，从而更好地与应变片嵌入并固化。相比粉末状，半熔状态的玻璃粉能够更好地对应变片进行预固定。
- **步骤 5：将应变片放在玻璃粉上，对玻璃粉继续加热，**使应变片嵌入玻璃粉中。将硅应变片嵌入半熔状态的玻璃粉中，去应力退火的同时，让其贴合弹

性元件，与玻璃粉有效结合。对弹性梁表面玻璃粉预加热（加热到 550℃）使其呈半熔状态，以确保它在后续可与应变片嵌入在一起，由于硅熔点远高于玻璃粉加热温度（550℃），因此无需担心高温加工对硅应变片造成损伤。

- **步骤 6：使用金丝键合工艺，将硅应变片连接形成惠斯通电桥。**金丝键合是一种常用的微电子封装技术，通过将金属线键合到应变片的焊盘上，使得传感器上的四个应变片实现电连接，形成惠斯通电桥，从而测量力的变化。

图 254：硅基应变片玻璃微熔工艺制备方法



资料来源：安培龙发明专利，国信证券经济研究所整理

3. 市场：国产玩家进展较快，人形机器人催生广阔空间

总结：六维力传感器高端市场以外资为主，近几年国内玩家逐步入局，产品性能不断迭代；当下六维力传感器单价约 1-2 万元，随后续机器人出货量以及搭载率的提升带来的成本摊销，其单价有望逐步下探有望下探至 1000-2000 元；结合 GGII 测算 2030 年人形机器人领域六维力传感器市场规模有望达 138.4 亿元。

3.1 竞争格局：国产替代进程加速

六维力传感器外资品牌先发优势明显，国内仍处产业早期，但已有国产替代趋势。全球六维力传感器厂商品牌主要分布在欧美、中国、日韩三大地区。根据 QYResearch，目前六维力传感器行业高端市场以外资品牌 ATI Industrial Automation、Epson 等为主，但外资品牌近几年市占率持续下降。近年来，国产入局者逐渐增加，但受限于该领域的高技术壁垒，真正具备批量化产品供应能力的厂商依然偏少。国内厂商包括坤维科技、鑫精诚、宇立仪器、柯力传感等。据智研咨询，2023 年国内六维力传感器 67.9% 市场份额由外资品牌占据，相比 2020 年国产替代趋势明显（增长 13pct）。国产产品性能不断提升，2023 年国产六维力传感器品牌市场份额 32.1%，本土企业宇立仪器市场份额仅次于 ATI，排名第二，占比 12.2%，其在工业机器人磨抛行业和汽车碰撞测试行业应用较多；蓝点触控、坤维科技也具备较强竞争力，分别占比 4.8%、4.7%；尽管国产品牌与外资产品在精准度方面已基本对齐，但在灵敏度、串扰、抗过载能力及维间耦合误差等指标

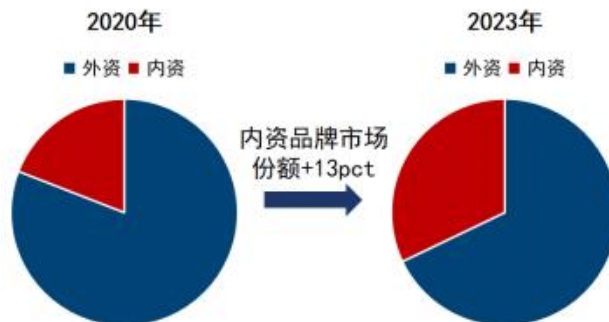
上仍有提升空间。

图255: 全球六维力/力矩传感器主流厂商



资料来源: 高工机器人, 国信证券经济研究所整理

图256: 2020 年、2023 年中国六维力传感器市场格局



资料来源: 智研咨询, 国信证券经济研究所整理

部分中国玩家如坤维科技、宇立仪器、蓝点触控等国产品牌厂商未上市，上市公司中如柯力传感、凌云股份等上市公司也依托前期在传感器产业的积累，积极布局六维力传感器。国内六维力传感器入局者逐步增多。

表43: 国内六维力传感器主要玩家相关信息梳理

公司	市值	营收	归母	研发投入	六维力传感器进展
柯力传感	130.3	15.6	3.4	1.4	- 主营业务属于应变式传感器行业。公司从称重传感器出发，研发试制了多维力传感器、力矩传感器、微型力传感器等产品。2011年起连续14年保持力学传感器国内市场占有率第一，海外市场收入在力学传感器领域占比超30%，每年高质量生产三百万只力学传感器。 2024年，公司六维力/力矩传感器已完成人形机器人手腕、脚腕，工业臂、协作臂末端的产品系列开发，掌握了结构解耦、算法解耦、高速采样通讯等技术要点，并已给50多家国内人形机器人、协作机器人、工业机器人客户送样，部分客户已进入批量订单阶段。2025年4月，公司购置并启用六维力自动化测试设备及机加工设备，将对六维力传感器实现全自动化标定检测，有助于提高产品精度、稳定性和可靠性，并将大幅提高公司生产六维力传感器的效率和产能。 - 六维力传感器的技术路线、工艺、ADC采集都属于力学传感器技术，柯力有成熟的技术基础和健全的研发团队。同时公司从应变计、弹性体、采集模块、封装测试，均有自主化设计和生产能力，可控制产品成本、质量、定制开发周期，有力学传感器全自动化生产经验。 - 公司将继续投入研发力量，向微型、高频响应、MEMS硅基、力控算法集成等方向进行突破，尝试以新的工艺、路径探索六维力传感器、扭矩传感器等高端力学传感器研发和生产制造。 - 产品矩阵包括关节扭矩传感器、六维力传感器、单轴力传感器、指端力传感器等。 - 坤维拥有多个核心技术点，包括多学科优化设计、非线性力学模型、六维联合加载标定检测、嵌入式智能电路等，六维力传感器产品精度达到0.5%FS（含干扰，行业普遍2-2.5%FS）。 - 坤维科技的六维力传感器直径从36mm到200mm，量程范围30N~20KN，可基本覆盖协作机器人应用场景和小负载六轴工业机器人及人形机器人的应用场景，已为近300家知名企业及院校提供解决方案。 - 坤维的自动六轴联合标定检测系统已具备1.5万台/年的产能。 - 公司主要从事多轴力传感器、力控打磨设备和汽车测试设备的研发和生产。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。 - 宇立仪器的M33XX系列工业级六维力传感器可做到10倍过载保护。即便是超薄型的M35XX系列，宇立仪器也做到了最大3倍过载。 - 宇立仪器是优必选的六维力传感器供应商。 2023年，凌云股份联合华工科技成立凌云华工智能系统（武汉）有限公司，开展智能制造业务；并作为牵头单位，联合相关单位开展传感器业务。 - 凌云股份作为牵头单位，联合中国科学院合肥物质科学研究院和中兵智能创新研究院，以“低成本高精度智能化人形机器人力感知关键技术及制造方法研究”项目，联合揭榜“人形机器人”方向力传感器创新任务，完成了拉压力传感器批量样件送检和小规模产线布局，六维力传感器设计任务也在进行中，将为公司带来新的增长点。 - 公司专注于压力传感器等传感器技术和生产工艺的研发。作为国内陶瓷压力传感器的主流厂商，始终坚持在研发领域的持续投入，子公司华培无锡拥有陶瓷压阻压力传感器、陶瓷电容压力传感器、基于金属基底的高压传感器及专用信号调理芯片技术相关的多项专利，具备“敏感元件—变送模块—变送器”全工艺链优势。子公司华培传感无锡具备包含陶瓷电容、MEMS压阻及其充油芯体技术和玻璃微熔的核心技术能力，实现了全量程压力传感器的覆盖。 - 利用公司已有的车规级MEMS压力芯片和硅应变计的自主设计及封装测试的能力，寻求从玻璃微熔MSG高压压力传感器向六维力矩传感器延展的突破。
坤维科技	-	-	-	-	
宇立仪器	-	-	-	-	
凌云股份	100.7	198.4	8.4	9.2	
华培动力	34.5	11.6	-0.4	0.7	

中鼎股份	213.3	198.0	15.9	9.5	2025年5月，公司与核心技术团队合资设立合肥星汇传感技术有限公司，以推进人形机器人力觉传感器产品的进一步落地。合肥星汇传感技术有限公司主要产品为机器人力觉传感器，包括六维力传感器、扭矩传感器以及一维拉力传感器等。其中六维力传感器产品综合精度将高于0.5%，达到国内产品第一梯队水平，扭矩及一维力传感器精度将达到0.1%以内。#公司产品将应用于人形机器人手腕和脚踝（六维力）、直线执行机构末端（一维拉力）以及旋转执行机构末端（扭矩）。
昊志机电	199.5	15.9	1.2	1.4	- 昊志机电于2024年3月1日审议通过了《关于对外投资设立全资子公司的议案》，拟设立全资子公司“广州市昊志机器人有限公司”承接机器人事业部业务，负责机器人核心功能部件（包括但不限于谐波减速器、无框力矩电机、刹车机构、编码器、电磁快换模块、六维力传感器、控制系统、关节模组、末端执行机构（气动手指、快换模块）以及RV减速器等机器人领域功能部件）研发、生产、销售等。 - 昊志机电攻克了智能机器人用六维力传感器等一系列核心功能部件技术。开发的六维力传感器具有以下特点：（1）力控精度$\leq 0.1\text{Nm}$；（2）温度自补偿，蠕变小，结构解耦；（3）18或24位A/D转换，采样率高达1KHz；（4）通信协议：Ethercat、以太网、CAN、R485等多种选择；（5）卡尔曼和巴特沃双重滤波算法，力/力矩输出更平顺；（6）6通道模拟信号输入，低噪声仪表放大。
安培龙	69.3	11.8	0.9	1.0	- 公司的压力传感器包括陶瓷电容式压力传感器、MEMS压力传感器、玻璃微熔压力传感器。 - 力传感器包括单向力传感器、力矩传感器以及六维力传感器。公司基于MEMS硅基半导体应变片+玻璃微熔工艺的单向力传感器以及力矩传感器已开发完成，用于机器人领域的单向力传感器及力矩传感器也与多家客户进行送样以及技术交流，六维力传感器公司目前正在研发过程及客户技术交流过程中。六维力传感器已有多项发明专利通过正式授权发布。
东华测试	37.8	5.3	1.4	0.6	- 公司主要产品包括多维力传感器、压力传感器、扭矩传感器等。 - 六维力传感器是基于金属薄膜应变片设计，处于小批量试制、局部市场推广阶段，串扰：$< 2\%FS$；非线性：$< 0.5\%FS$；迟滞：$< 0.5\%FS$。从成本考虑暂时采用人工贴片，后续根据产品需求情况逐步推进半自动化。 2025年公司开发压电式力传感器、压力传感器、超低温传感器等高性能传感器。
索辰科技	128.8	4.7	0.3	1.1	自90年代开始，在863计划支持下研究了六维力和力矩传感器，如今已经在产业化方面取得进展，不仅可以测量力，还能够区分重力和惯性力，去除末端影响，直接测得接触力。当前公司六维力传感器技术已成熟，后续发展将集中在力控算法，并将结合视觉控制实现多模态控制来构建完善的机器人控制系统。六维力传感器已经实际运用在工程项目，比如可以在数字孪生中进行信息采集，目前正在生产小批次的传感器，为客户送样准备过程中。
海伯森	-	-	-	-	- 海伯森推出六维力传感器产品系列，通过解耦算法创新，突破$< 0.5\%FS$非线性误差极限，同时通过结构创新，改善零漂温漂。 - 自主研发的六维力传感器已批量应用于20余家头部机器人企业，为人形机器人、协作机器人及高端工业场景提供克级力控精度。海伯森依托深圳“50公里产业生态圈”的供应链优势，以80%零部件本地化采购实现高效协同，大幅提升国产化响应速度，将六维力传感器交付周期压缩至最快一周内。
鑫精诚	-	-	-	-	- 产品矩阵方面，鑫精诚的六维力传感器产品直径跨度覆盖9.5mm-300mm，力量程跨度从5N到50KN，力矩量程跨度从0.1N.m到1000N.m，覆盖大部分应用领域。产品结构包括中空式，法兰式，IP68防水、微型式、自带紧固螺钉式等，几乎覆盖常规六维力传感器的所有结构。 - 客户方面，在人形机器人领域，鑫精诚有对应的产品开发，已给行业头部的多家人形机器人企业打样合作中。2023年鑫精诚已陆续给大族机器人、遨博智能、法奥意威、长广溪智能、越疆机器人等头部厂商打样。其主要配合协作机器人，针对焊接环节进行拖拽示教，完成焊接轨迹规划。 - 自动化生产方面，已实现全自动化生产，可做到保证品质的批量交付。 - 产品研发方面，鑫精诚坚持“多技术路线”创新开发，研发团队年轻且学习能力强，以压电六维力传感器为例，从研发到落地仅花了6个月。
杭州柯林	85.2	2.1	0.0	0.4	- 公司充分发挥智能传感与数字化平台技术的领先优势，基于高精度微弱信号采集、多维数据信号处理和深度学习力位神经网络解耦算法的既有技术储备，开发了六维力传感器、扭矩传感器等机器人核心部件，实现智能传感产品矩阵升级。 - 公司六维智能传感器项目于2024年9月立项，产品研发正稳步推进，目前正处于老化内测阶段，贴片与标定等生产环节的自动化工艺正同步研发中，且相关小批量试产设备已陆续到场。公司将于近期启动下游客户的适配送样，预计2025年下半年会产生相应收入。

资料来源：wind，各公司公告，各公司官网，高工机器人，ITES深圳工业展，国信证券经济研究所整理 注：市值数据截至2026年7月24日，市值、营收、归母、研发投入均为2025年数值，单位为亿元人民币

3.2 市场空间：人形机器人打开增量空间

六维力传感器应用领域广泛，未来人形机器人将为六维力传感器带来广大应用空间。当前主要应用于汽车行业的碰撞测试、轮毂测试和零部件测试等，以及航空航天、生物力学、医疗康复、科研实验、机器人与自动化等领域。**人形机器人对精准力控要求高，未来预计能够为六维力传感器带来庞大增量需求。**

图257：六维力传感器应用领域



资料来源：高工机器人，国信证券经济研究所整理

八、产业链拆解之固态电池

1. 固态电池

1.1 固态电池与液态电池对比

根据电解质的不同，锂电池技术体系可分为：液态电解质电池、混合固液电解质电池（半固态电池）、固态电解质电池。

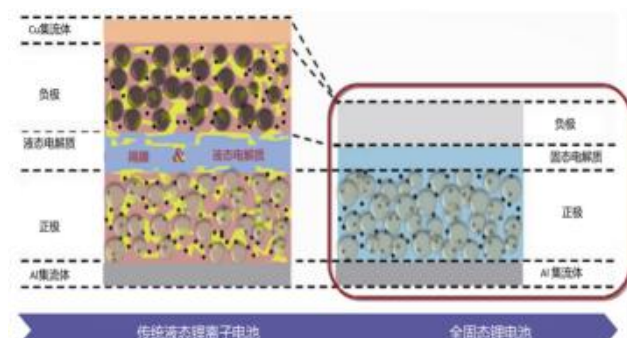
固态电池与液态电池工作原理相同。固态电池在电池结构上与液态电池变化明显：半固态电池由于仍存在部分液态电解液，故而保留了电解液和隔膜等结构。而全固态电池离子传导介质和通道由传统的电解液与隔膜变为固态电解质，电池结构实现进一步简化。半固态电池由于仍存在部分液态电解液，故而保留了电解液和隔膜等结构。而全固态电池离子传导介质和通道由传统的电解液与隔膜变为固态电解质，电池结构实现进一步简化。

图258：锂电池发展路线



资料来源：徐小明. 第十四届中国汽车蓝皮书论坛主题报告. 2022, 国信证券经济研究所整理

图259：液态电池与固态电池结构示意图



资料来源：许晓雄、邱志军、官亦标等，《全固态锂电池技术的研究现状与展望》，储能科学与技术，2013，2(4):331-341；国信证券经济研究所整理

1.2 固态电池核心优势：能量密度高、安全性高

固态电池能量密度更高：1) 固态电解质电化学窗口宽，能够适配更高电压的正极材料。2) 固态电解质具有良好的机械性能，能够有效抑制锂枝晶的形成，从而能够兼容更高能量密度的锂金属负极材料。3) 由于电解质的非流动性，电芯内部极

片可以串联连接以此提高单体电压，实现与多电芯串联而提升电压的同等效果，从而能够在成组时减少结构件使用、提升能量密度。目前，行业中常见的半固态电池能量密度多集中在 350-400Wh/kg，部分全固态电池样品能量密度超过 500Wh/kg。

固态电池安全性更高：固态电解质本身不可燃、且热分解温度高，固态特性完全避免了电解液腐蚀、挥发、漏液等问题，安全性能大幅提高。

图260：各类电池性能及结构对比

	液态锂离子电池	半固态电池	固态电池
液态含量 (%)	>10%	1~10%	<1%
电芯能量密度	大多<300Wh/kg	350-400Wh/kg	500Wh/kg+
快充性能	1-6C	目前在2C以下	
电池寿命	2000次+	1000次+	1000次以内
主要材料体系	正极+负极+隔膜+电解液	正极+负极+隔膜+复合电解质	正极+负极+固态电解质
封装形态	卷绕/叠片+圆柱/方形/软包	叠片+方形/软包	叠片+方形/软包

资料来源：许晓雄、邱志军、官亦标等，《全固态锂电池技术的研究现状与展望》，储能科学与技术，2013，2(4):331-341，李泓，《中国固态电池领域发展现状和未来挑战》，科学观察，2023，18(4):5-9；国信证券经济研究所整理

1.3 固态电池短期不足：倍率性能、循环寿命和成本制约产业化

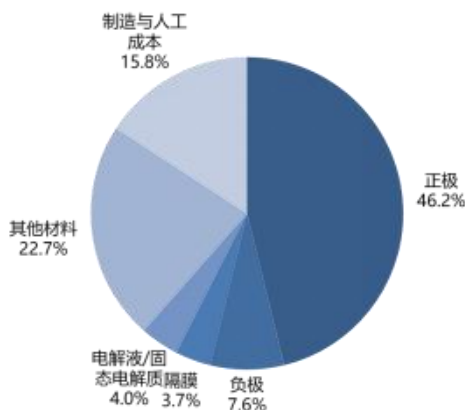
界面处机械稳定性较差影响寿命：充放电过程中，电极材料会产生体积变化，结构应力的累加会造成界面接触面积的下降、形成结构缺陷，从而影响循环寿命。

界面处电化学稳定性较差影响倍率性能：固态电解质与电极的接触是固-固接触，接触面积小且接触面有更高的阻抗，从而影响锂离子的传输。

固态电池成本仍相对较高：正极材料或采用高镍三元、富锂锰基等，负极或将搭载硅负极、金属锂等，材料成本明显提升。同时，电解质难以轻薄化、且部分搭载金属元素，成本亦有提升。部分电解质体系对于水分等较敏感，有些制造和后续处理环节中需要依赖于惰性气体或干燥室，生产制造成本也有所提升。

目前液态高镍三元电池成本普遍在 0.40-0.45 元/Wh，半固态三元电池成本在 0.8-1.1 元/Wh，全固态电池成本在 3.0 元/Wh 以上。

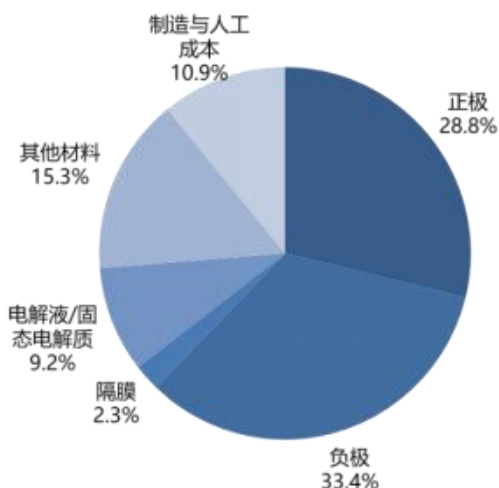
图261：液态电池成本结构



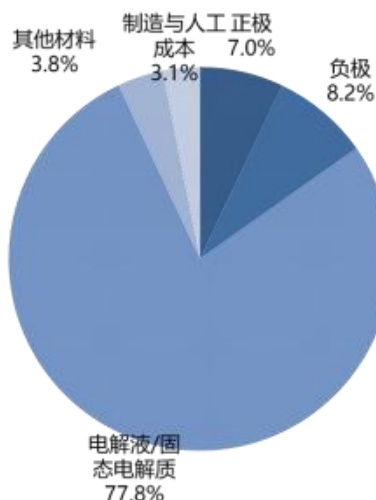
资料来源：卫蓝新能源官网、清陶能源官网、上海有色网；国信证券经济研究所整理与测算

图262: 半固态电池成本（目前材料价格及投资额下）

图263: 全固态电池成本（目前材料价格及投资额下）



资料来源：卫蓝新能源官网、清陶能源官网、上海有色网；国信证券经济研究所整理与测算



资料来源：卫蓝新能源官网、清陶能源官网、上海有色网；国信证券经济研究所整理与测算

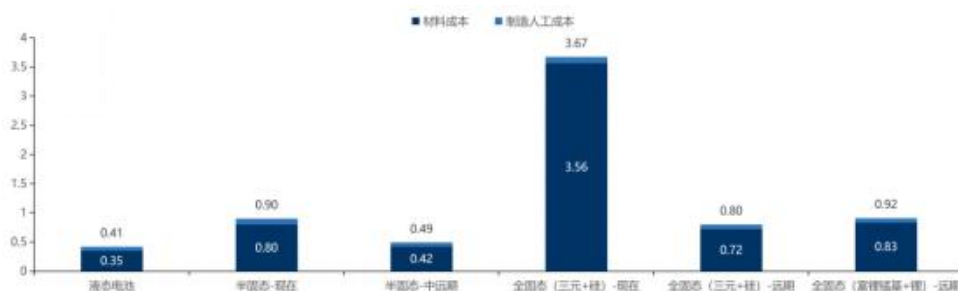
1.4 固态电池的成本比较与中远期展望

固态电池降本方案：1）技术突破，固态电解质的制备方案成本、设备投资额持续下降；2）规模效应助力，硅负极、固态电解质材料等价格有望下滑；3）产线良率优化，降低单位制造与人工成本。

中期来看，伴随固态电解质、硅基负极等材料价格有望加速下行，同时产线良率有望稳步提升，届时我们测算得到半固态电芯的单位总成本约为 0.49 元/Wh。

远期来看，全固态电池电解液也将全部被替换为固态电解质，我们测算得到届时全固态电芯单位总成本约为 0.80-0.92 元/Wh。

图264: 半固态/全固态电池成本比较与中远期展望（元/Wh）



资料来源：卫蓝新能源官网、清陶能源官网、上海有色网；国信证券经济研究所整理与测算

2. 固态电池产业链梳理

2.1 固态电池产业链

图265: 固态电池产业链梳理



资料来源：各公司公告、各公司官网，吴敬华、杨菁、刘高瞻等，《固态锂电池十年(2011—2021)回顾与展望》，储能科学与技术，2022，11(9):2713-2746；国信证券经济研究所整理

固态电池产业链发展总结：

- **固态电池：**半固态/凝聚态电池领域，卫蓝新能源、清陶能源等均已实现产品量产，能量密度集中在 300-400Wh/kg；宁德时代推出 500Wh/kg 凝聚态电池已经批量应用于峰飞航空等客户。目前半固态电池成本集中在 0.8-1.1 元/Wh，循环寿命已满足车用需求。全固态电池领域，企业目前仍处于样品试制和尺寸放大阶段，多数企业预计在 2025-2026 年试制出 20-100Ah 不等的电池样品，多数将在 2026-2027 年开始进行装车测试。
- **固态电池设备：**干法电极设备、叠片机、高压化成设备等已实现中试级别交付；2025 年内干法电极设备有望持续优化，在负极侧实现 GWh 级别设备量产交付。
- **固态电解质：**固态电解质在 2025 年处于产能扩展期，企业产能逐渐由十吨级走向千吨及万吨级，为后续量产铺垫。原材料硫化锂产能也由吨级实现产能的持续放大。价格方面，目前固态电解质普遍在几百万元/吨，伴随产业化推进，有望下降至几十万元/吨水平。

- **固态电池负极：**硅基负极体系在 2025 年开始批量供应，产品价格有望陆续下降。锂金属负极方案也处于积极探索中。
- **固态电池正极：**三元方案为主，富锂锰基与镍锰酸锂依旧处于产品开发测试和送样过程中。

2.2 固态电池产业链部分环节价值量显著变化：

图 266：全固态电池与液态电池相比核心变化环节

变化情况	环节	成熟前每 1GWh 电池对应价值量 / 设备投资额(亿元)	代表企业	备注
新增环节	纤维化设备	<0.2	宏工科技、曼恩斯特	
	薄片设备	0.3-0.4	德基科技	
	等静压设备	0.2	先导智能、纳科诺尔	
	富锂锰基正极	2.5-3.0	容百科技、当升科技	
	硫化物固态电解质	2.5-3.0	天目先导、中科赛能	
	硫化锂	1.0-1.5	厦钨新能、光华科技	
	金属锂	1.0-1.5	赣锋股份、天铁科技	
价值量显著环节	硅碳负极	0.7-1.0	贝特瑞	
	不锈钢/钢铁集流体	1.0	运晨精密、鼎泰股份等	
	干法镀膜设备	0.3	纳科诺尔	是液态方案价值量的 4 倍
	高压化成设备	0.4-0.5	杭可科技	是液态方案价值量的 1.2-1.5 倍
	碳纳米管	0.1	天奈科技、道氏技术	

资料来源：各公司公告、各公司官网，国信证券经济研究所整理；注：最新情况以各公司公告为准

1、国内电池企业：半固态与固态电池领域同步布局。

图 267：部分电池企业半固态与全固态电池布局进展

公司名称	量产进展	能量密度	主要客户/应用领域	电解质方案
宁德时代	凝聚态电池：2023 年 4 月正式发布，2025 年批量生产。 全固态电池：2026 年有望试制出样品，在 2026-2027 年装车。	凝聚态电池超 500Wh/kg	民用航空、乘用车等	凝聚态电解质 硫化物
卫蓝新能源	2023 年 6 月量产半固态电池交付给蔚来；2023 年 10 月与三峡共同研制的固态电池储能系统实现示范应用。	300-360Wh/kg	动力：蔚来、吉利等 储能：三峡集团、海博思创	氧化物+聚合物
清陶能源	2018 年实现半固态电池量产；2020 年与北汽、哪吒合作的固态电池样车下线；2022 年搭载于北汽福田商用车的固态电池系统下线；2024H1 量产半固态电池搭载于上汽智己新车型中。 2025 年第二代准固态电池量产并开始搭载于上汽 MG 等车型。	>368Wh/kg	动力：上汽、北汽、哪吒等 储能：智泰新能源	氧化物+聚合物； 氧化物+聚合物+ 硫化物
赣锋锂业	2021 年 1 月搭载公司固态电池的东风 E70 示范运营车全球首发；2022 年 8 月，与广汽埃安达成合作协议。 2023 年 6 月搭载公司半固态电池的赛力斯 SERES-5 在欧洲开始交付。2023 年 12 月，与长安汽车达成合作协议。2024 年全球首款 500Wh/kg 级 10Ah 产品实现小批量量产。	>500Wh/kg	动力：长安、广汽、赛力斯 低空飞行、消费电子手机等	氧化物+聚合物
辉能科技	2016 年开始进行车规级电芯送样；2019 年蔚来汽车等与公司签订战略合作协议；2024 年开始批量交付半固态电池。2025 年 3 月推出 100% 全固态钠离子电池，能量密度达 380Wh/kg。	>380Wh/kg	动力：蔚来、奔驰、Vinfast 等，可穿戴设备等	氧化物

比爱迪	2024年下线中试60Ah全固态电池, 2027年左右启动全固态电池批量示范装车应用, 2030年后实现大规模上车。		氧化物、硫化物、聚合物
亿纬锂能	2022年实现半固态电池技术定型, 2023年实现装车实验, 公司计划于2026年推出全固态电池, 主要用于混合动力领域; 于2028年实现技术突破, 推出400Wh/kg固态全固态电池。	>330Wh/kg	卤化物、氧化物、硫化物
国轩高科	2017年开始进行固态电解质、固态电池研发, 2022年公司发布半固态电池产品, 2024年推出硫化物全固态电池“金石”。2025年0.2GWh全固态中试线贯通, 并启动装车试跑。	>360Wh/kg	氧化物+聚合物、硫化物
蜂巢能源	2020年发布第一代固态电池; 2023年12月发布第二代方形固态电池(A样阶段), 2024年7月推出三元半固态产品。	>260Wh/kg	聚合物、硫化物
孚能科技	2021年量产第一代半固态电池产品; 2022年开始量产交付, 截至2024年底, 其半固态电池已装车超5万辆, 2025年第二代半固态电池能量密度达330Wh/kg并推进车规级认证, 目前其第一代eVTOL半固态电芯已实现商业化交付, 第二代eVTOL半固态电芯即将进入量产阶段。	>330Wh/kg	动力: 东风、远航汽车 航空经济: 上海时好科技、沃飞长空、零重力
中创新航	公司2024Q4半固态电池装车某外贸豪华品牌, 2024年公司发布无界全固态电池, 能量密度超430Wh/kg, 容量超50Ah, 计划2027年装车。	>430Wh/kg	
太辰新能	2022年首款半固态电池量产, 2026年预计实现全固态电池进行装车验证/测试, 2027年实现无隔膜全固态电池批量生产。	>350Wh/kg	索建电子等 氧化物+聚合物
金龙羽	公司成功与客户签订无人机高能量密度固态电芯采购订单, 该订单所采购的电芯为EC01系列超能固态电芯, 能量密度高达500Wh/kg, 订单约定, 一年内采购十万余电芯产品。	>500Wh/kg	

资料来源: 各公司公告、各公司官网, 国信证券经济研究所整理; 注: 最新情况以各公司公告为准

2、海外电池企业: 深耕全固态电池路线。

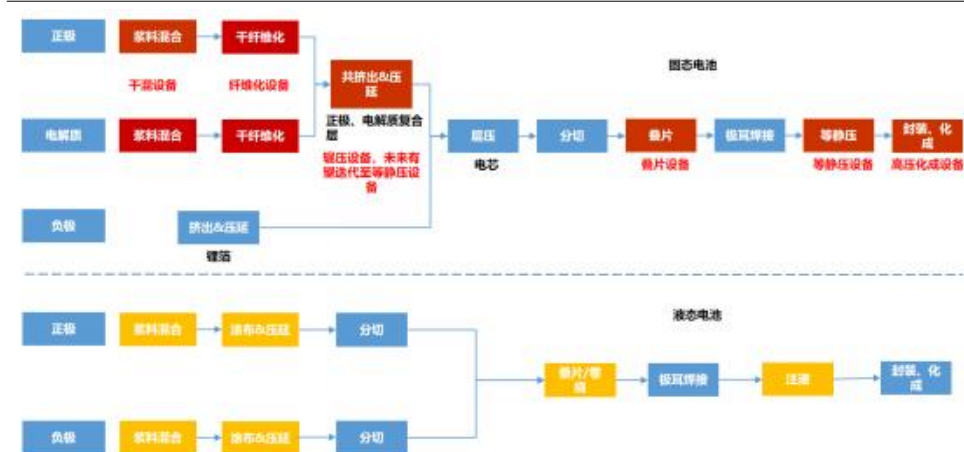
图268: 部分海外电池企业半固态与全固态电池布局进展

公司名称	量产进展	电解质方案
三星SDI	2022年3月公司开始建设固态电池试验线, 2023年内建成投产, 2025年初公司拟扩大韩国固体制电池生产线, 以保障2027年量产全固态电池的目标。	硫化物
LG新能源	公司与韩国科学技术院、首尔大学等积极推进固态电池开发, 公司计划2026年前实现聚合物半固态电池(能量密度约为650Wh/L)产业化, 2028年量产聚合物全固态电池(能量密度约为750Wh/L), 2030年量产硫化物全固态电池(能量密度约900Wh/L), 外媒报道称, 2023Q3 LG新能源开始计划在韩国工厂建设半固态电池生产线, 公司拟2025年建设硫化物全固态电池及干法电极中试线。	聚合物、硫化物
SK On	公司计划2026年前完成聚合物氧化物复合固态电解质和硫化物固态电解质研发, 并于2028年进行产业化, 目前正在开发两款新型固态电池原型产品, 预计分别于2028年与2030年量产, 公司与Solid Power合作建设的韩国试验工厂预计2025年下半年竣工。	聚合物+氧化物、硫化物
松下	2019年, 公司与丰田合资成立Prime Planet Energy & Solutions开发固态电池, 计划2027年开始为丰田提供固态电池, 公司计划2025-2029年间量产用于小型无人机的全固态电池。	硫化物

资料来源: 各公司公告、各公司官网, 国信证券经济研究所整理; 注: 最新情况以各公司公告为准

2.3 固态电池设备环节核心变化:

图269: 固态电池工艺设备环节核心变化



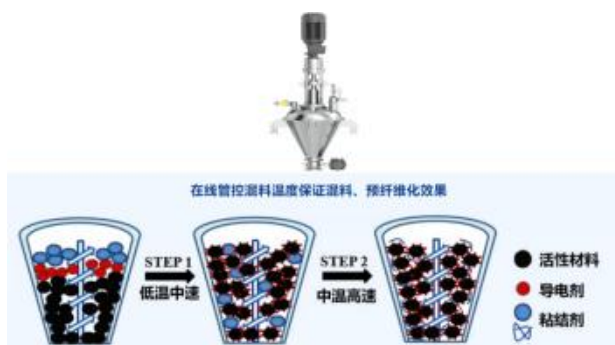
资料来源: Heimes H. H.、Kampker A.、vom Hemdt A. 等, 《Production of All-Solid-State Battery Cells》,

VDMA Battery Production, 2019:1-24, 曼恩斯特官网; 国信证券经济研究所整理; 注: 黄色、红色为固态电池与液态电池相比变化环节; 固态电池工艺尚未成熟, 没有形成固定工艺

1、前道工序：全固态电池更适配干法电极方案

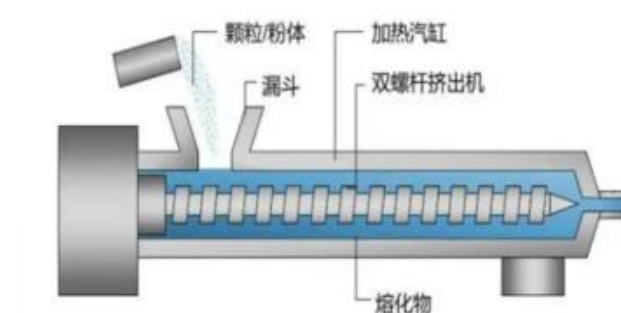
- **硫化物固态电池未来或采用干法电极工艺：**干混+纤维化+辊压成膜。干法电极工艺是在无溶剂环境下，将活性材料、导电剂、粘合剂混合后，在一定温度、剪切力作用下使粘结剂发生纤维化形成三维网状结构混匀材料，之后将其辊压覆盖在集流体表面来形成电极。硫化物电解质对于水、氧气等敏感并对部分溶剂的化学稳定性较差，故而与干法工艺更加适配。
- **针对干性粉料混合，需增加干混纤维化设备。**固态电池混料环节使用干性颗粒或者粉体，原有液态电池搅拌设备需要改进，对搅拌器位置、搅拌速度以及温度等做出调整，以保证混合的效率、混合后粘度以及均匀性。另外固态电池混料后需要增加纤维化设备以提升粉体成膜性能。干混与纤维化关联程度高，部分厂商对两者进行一体化设计。

图270：曼恩斯特高效混合机以及混合工序



资料来源：曼恩斯特官网，国信证券经济研究所整理

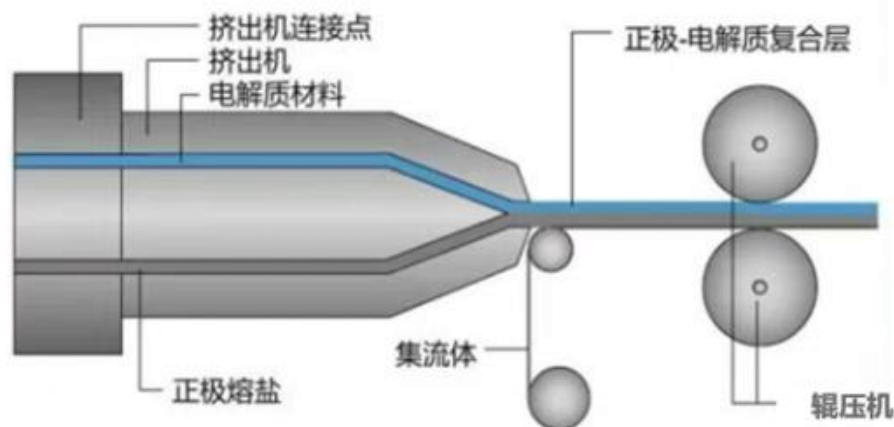
图271：双螺杆设备示意图



资料来源：Heimes H. H.、Kampker A.、vom Hemdt A. 等，《Production of All-Solid-State Battery Cells》，VDMA Battery Production, 2019:1-24; 国信证券经济研究所整理

- **成膜阶段新增辊压设备需求。**干法电极工艺中辊压设备主要用于成膜环节。干法辊压需要施加较大压力或者采用多辊差速辊压等方式、将干粉压实到特定密度与厚度；对于设备精度要求更高。
- 目前干法混料与纤维化环节，宏工科技等企业布局领先；辊压设备领域，纳科诺尔等企业积极布局。此外，先导智能、曼恩斯特、赢合科技等公司整合前道工序，已实现干法前段设备的全覆盖。

图272：全固态电池辊压成膜工序



资料来源：Heimes H. H.、Kampker A.、vom Hemdt A. 等，《Production of All-Solid-State Battery Cells》，VDMA Battery Production, 2019:1-24；国信证券经济研究所整理

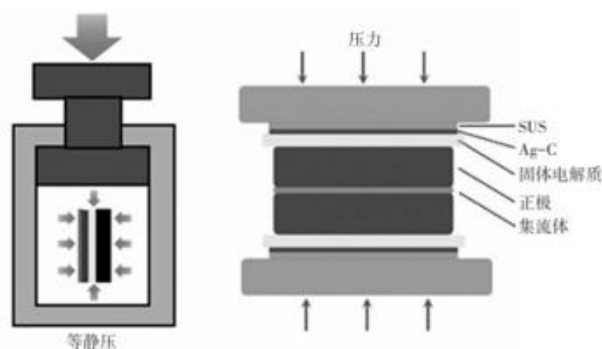
2、中段工序：卷绕更换为叠片设备、增加等静压设备

- 固态电池电解质层柔韧性较差，未来或全部采用叠片工艺。固态电解质具有脆性，不适用卷绕工艺，需全部采用叠片工艺。另外，由于固态电池各极片大小不一，边缘无隔膜部分易错位发生短路，对叠片设备精度提出更高要求。
- 为改善固态电池固-固界面接触问题，需要增加等静压工艺。固态电池各材料层堆积时，需要施加一定压力对其进行致密化处理。但是传统热压和辊压方案提供压力有限且施加压力不均匀，电极和电解质材料结合的紧密性以及材料密度均匀性难以保障。等静压技术是将带压实的粉料、胚料等置于密封容器中，以高压流体为介质，将其产生的静压力均匀从各个方向对加工件加压。等静压技术应用于固态电池中，可使电极和电解质材料紧密结合，优化界面接触，消除电芯内部空隙，减少界面阻抗，提升电池离子电导率和机械强度。

图273：先导智能 Z 型叠片机



图274：全固态电池等静压设备示意图



资料来源：先导智能官网，国信证券经济研究所整理

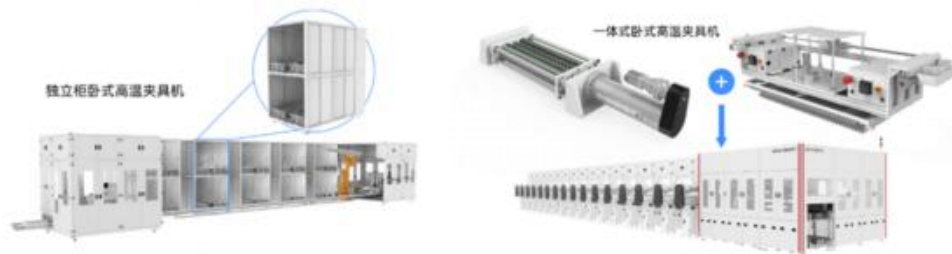
资料来源：翟喜民、孙笑寒、姜涛等，《全固态电池生产工艺分析》，汽车文摘，2022，（2）：31-35；国信证券经济研究所整理

3、后段工序：或采用高压化成工艺

固态电池内部阻抗相较液态电池更高，需要施加更大的压力强制锂离子穿透固-

固界面屏障，形成离子导通网络。常规电池化成压力在 6 吨左右；固态电池化成压力则需要 10-100 吨，同时化成时间亦显著增加。

图275：先导智能固态高压化成分容解决方案



资料来源：先导智能官网，国信证券经济研究所整理

4、固态电池设备产业化进程

图276：部分设备企业在固态电池设备领域布局情况

公司名称	主营业务	固态电池布局设备	固态电池设备进展	固态电池领域合作客户
纳科诺尔	锂电高精度辊压设备	干法辊压设备	公司与清研电子成立合资公司清研纳尔，共同开发干法辊压设备。2024年已启动干法试制线、中试线设备。2025Q3将量产GWh级负极干法辊压设备。	公司已与头部客户签订了干法电极设备采购合同。
光惠技术	锂电PACK设备；模组与PACK结构件	干法辊压设备	公司已经实现干法前道设备出货	清陶能源
宏工科技	物料自动化处理产线及设备	纤维化设备	公司与清研电子成立合资公司清研宏工。	已有订单
普宙斯特	锂电涂布模组	干法辊压+纤维化设备	2024年已有千万级固态辊压设备订单+千万级干法设备订单。	已实现出货
华亚智能	半导体后道工序；锂电材料后道工序	干法辊压+纤维化设备	已实现干法前道设备出货	海希通讯
倍千入	涂布设备	干法辊压+纤维化设备	已完试制机制造；客户开始接触送样中。	
赢合科技	锂电涂布辊压设备；电子模组等。	干法辊压+纤维化设备+叠片设备	2025年6月，固态辊压涂布设备、固态辊压设备及固态电解液转印设备顺利出货。	
德新科技	叠片设备	叠片设备		
普宙智能	包膜与装配设备	叠片设备	与客户积极接触	
先导智能	锂电光伏整线设备	整线设备	公司具备全固态整线解决方案，打通了全固态电池制造工艺环节。2025年6月，公司成功向一家全球领先的电池制造企业交付了多套固态电池核心装备，包括复合转印设备与高速叠片设备。	
海目星	激光设备	整线设备	公司2023年开始布局固态电池技术，2024年7月与清研能源达成5年期战略合作协议，并签订了价值4亿元的2GWh固态电池设备量产订单。	欣荣能源
利元亨	锂电整线设备	整线设备	2021年12月，公司与清研能源签署了4份固态电池产线设备采购合同。2022年，公司为国轩高科提供干法固态电池中试生产线设备。2024年6月，公司美国能奈固态电池前段设备顺利出货。	广汽、清陶能源、国轩高科
联赢激光	激光设备	激光设备		
杭可科技	锂电后道分容化成设备	高压化成设备	已对多个客户进行出货	

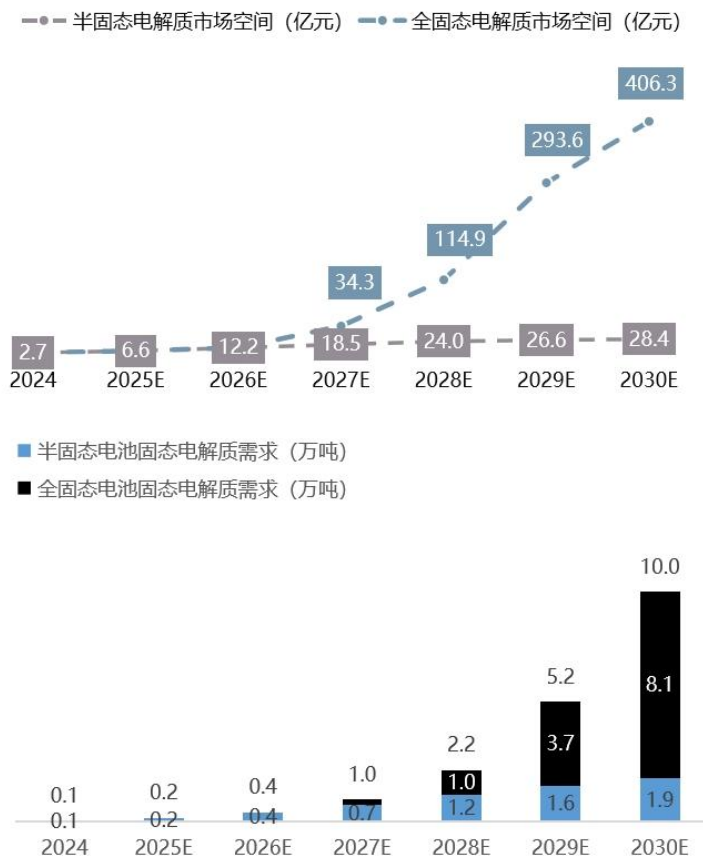
资料来源：各公司公告、各公司官网，国信证券经济研究所整理；注：最新情况以各公司公告为准

2.4 固态电解质：硫化物体系成为全固态电池主流路线

- **固态电解质主要分为：聚合物电解质、无机电解质以及复合电解质。**聚合物体系生产工艺简单、量产速度快；氧化物体系综合性能较好；硫化物体系导电率最优、但氧化稳定性差；卤化物体系电化学稳定性较高、电导率较高、但是制备成本高。

- **半固态电池：技术路线以氧化物为主；**主要以中国企业主导该技术路线发展。国内企业天目先导、清陶能源等均已实现量产。
- **全固态电池：技术路线以硫化物为主。**日本企业布局时间较长，中国企业近年发展迅猛。海外企业长期坚持硫化物技术路线；2024 年以来国内企业逐渐形成以硫化物作为全固态电池核心电解质路线的共识。部分企业采用硫化物为主的电解质体系，并在正极侧复合氧化稳定性好的卤化物电解质，以提升综合性能。

图 277: 全球固态/半固态电池电解质材料市场空间（亿元）及需求（万吨）



资料来源：卫蓝新能源官网、清陶能源官网、上海有色网、EV Tank，SNE Research，动力电池联盟；国信证券经济研究所整理与测算

图 278: 不同固态电解质特性比较

类型	材料体系	离子电导率 (S/cm)	优点	缺点
聚合物	聚环氧乙烷 (PEO)、聚甲基丙烯酸酯 (PMMA)、聚偏氟乙烯 (PVDF)	10 ⁻⁴ (65-78 °C), 10 ⁻⁵ ~ 10 ⁻⁷ (室温)	生产简单、加工性能好、机械性能佳	热稳定性有限, 电化学窗口窄 (<4V)、高电压耐受性差
氧化物	非薄膜: 钙钛矿型、石榴石型、钠超离子导体型 (NASICON)	10 ⁻⁵ ~ 10 ⁻³	高化学和电化学稳定性、高机械强度、宽电化学窗口	在低电势下容易被还原导致锂离子电导率降低, 晶界离子电导率小
	薄膜: LiPON	10 ⁻⁷ ~ 10 ⁻⁵	可选择金属锂负极, 正极材料选择面广	成本高, 难以大规模生产
硫化物	Li ₂ S-P ₂ S ₅ 、Li ₂ S-P ₂ S ₅ -MS _x	10 ⁻⁴ ~ 10 ⁻²	高离子电导率, 良好的机械强度和机械的灵活性	氧化稳定性差, 对水敏感, 与正极材料兼容性差
卤化物	LiMXb (M为金属元素, X为卤素元素)	10 ⁻³	高离子电导率、高氧化稳定性、宽电化学窗口	成本高、对水敏感

资料来源: 姚忠冉等, 《锂离子电池氧化物固态电解质研究进展》, 新能源进展, 2023, 11(1):76-84, 吴敬华、杨菁、刘高瞻等, 《固态锂电池十年(2011—2021)回顾与展望》, 储能科学与技术, 2022, 11(9):2713-2746; 国信证券经济研究所整理

1、固态电解质：硫化物体系处于量产初期阶段

- **氧化物固态电解质（半固态电池领域）**：天目先导、清陶能源、蓝固新能源等企业量产进度领先，并形成千吨级以上产能，在对外供货或自用。
- **硫化物固态电解质（全固态电池领域）**：日本三井金属、出光兴产等布局较早，目前均有百吨级产能并实现出货。国内企业中科固能、有研新材等布局较快，亦实现小批量供货。同时，由于目前产业化尚未成熟，硫化物固态电解质的产品售价普遍在上百万元/吨。

图279：部分公司固态电解质布局情况

公司名称	公司简介	电解质类别	电解质产能	产业进度	客户/产业合作	技术团队背景
天目先导	公司成立于2017年，主营产品为硅基负极、硬碳负极、石墨负极、固态电解质等。	氧化物-LATP	3000吨	量产	卫蓝新能源等，与赣锋股份、卫蓝新能源成立合资公司	中国科学院物理研究所立院院士、李海研究员、罗飞博士（董事长）
清陶能源	公司成立于2016年，主营产品为固态电池、新能源材料等。	氧化物+聚合物 氧化物-LiZTO/LLZO 硫化物	千吨级产能 2025年扩至千吨 长期规划万吨级	量产	主要自用	中国科学院院士、清华大学教授南策文团队
中科固能	公司成立于2022年，主营产品为硫化物固态电解质、全固态电池等。	硫化物	百吨级产能已建成 2025年扩至千吨 长期规划万吨级	量产	小批量供应宁德时代	中国科学院物理所博士生导师 吴凡（董事长）
蓝固新能源	公司成立于2021年，主营产品为锂离子/钠离子电池电解质、混合固相电解质、固态电解质等。	氧化物-LiTO/LiZTO/LATP 固相混合电解质	建成产能：超5万吨 后续规划：5万吨	量产	卫蓝新能源、天目先导等	李立飞博士，毕业于中国科学院物理所，师从黄学杰研究员、李泓研究员和孙立成院士
国能新材料	公司成立于2023年，原卫蓝新能源子公司，主营产品为固态电解质等。	氧化物-LATP/LLZO/LLTO	现有产能：超500吨 规划：2025年扩至1万吨 产能	量产	卫蓝新能源	
出光兴产	公司成立于1940年，主营业务为石油化学、石油及其相关产品开发、医药品等。	硫化物	2025年规划百吨级中试线、计划2026年投产万吨级。	小批量量产	丰田等	
三井金属	公司主要生产金属、汽车零部件等产品，是日本最大企业三井集团子公司。	硫化物	2021年开始进行产品测试，2024年产能扩至百吨级。	量产	丰田、本田、小批量供应宁德时代等。	
上海洗霸	公司成立于1994年，主营产品为水处理化学品、人机共融数字化消费技术解决方案等，并积极开展固态电解质、硅基负极、硬碳负极等业务。	氧化物-LLZTO/LLZO 硫化物	生产50吨硫化物电解质产能 规划中：生产20吨硫化物电解质产能已建成设计	该材料小批量量产	2024年固态电解质完成47个批次送样，覆盖26家客户（含清陶能源等）。	中国科学院上海硅酸盐研究所张清团队
赣锋锂业	公司成立于2000年，主营产品为锂化合物、金属锂、并积极开展锂电材料、锂电材料应用等。	氧化物-LLZTO/LLZO 氧化物-LATP 硫化物 聚合物	千吨级产能	小批量量产	主要自用	
当升科技	公司成立于1998年，主营产品为锂电正极材料。	氧化物-LATP/LAGP 硫化物 聚合物 混合固态电解质	完成百吨级中试线建设	氧化物体系小试阶段 硫化物与硫化物处于小试阶段		
赣锋股份	公司成立于2006年，主营产品为锂电材料等。	硫化物	规划1000吨产能，一期100吨产能已在2025年6月开工建设。		卫蓝新能源等	
康克股份	公司成立于2000年，主营产品为环氧乙烷衍生物、锂电材料。	聚合物-PEO		处于应用开发阶段		
金昊羽	公司成立于1996年，主营产品为锂电材料，并积极开展固态电池和固态电解质等业务。	氧化物		客户送样与评测		
贝特瑞	公司成立于2000年，主营产品为锂电负极材料、正极材料等。	氧化物-LATP/LLZO 聚合物固态电解质				
璞泰来	公司成立于2012年，主营产品为锂电负极、隔膜、设备等。	氧化物-LATP/LLZO	200吨中试线			
天目材料	公司成立于2000年，主营产品为电解质、磷酸铁及改性材料、有机硅改性材料等。	氧化物、聚合物 硫化物	2025年内建设硫化物中试线			
星源材质	公司成立于2003年，主营产品为锂电隔膜。	氧化物 硫化物			参股的新源利已实现氧化物电解质出货，2025年将量产硫化物电解质	

资料来源：各公司公告、各公司官网，国信证券经济研究所整理；注：最新情况以各公司公告为准

2、固态电解质原料

- **半固态电解质原料：**目前国内半固态电解质多为氧化物体系。
 - ✓ 氧化物固态电解质 LLZO 的原材料包括二氧化锆、硝酸锆、碳酸锆等。国内锆生产企业主要包括东方锆业、三祥新材、凯盛科技等。
 - ✓ 氧化物固态电解质 LLZO/LLTO 的原材料包括氧化镧、硝酸镧、氢氧化镧等。国内企业中北方稀土、盛和资源等具有氧化镧生产能力。
 - ✓ 氧化物固态电解质 LLTO/LATP 的原材料包括二氧化钛、焦磷酸钛等。国内主要钛白粉生产企业包括龙佰集团、中核钛白、钒钛股份等。
 - ✓ 氧化物固态电解质 LAGP、硫化物固态电解质 LGPS 等原材料包括二氧化锆、硫化锆等。
- **全固态电解质原料：**国内外全固态电解质多为硫化物体系、部分辅以卤化物，主要原料为硫化锂（1GWh 固态电池需要 300-500 吨硫化锂）。目前海外出光兴产产业化进度较快，国内厦钨新能、光华科技等均处于加速布局阶段。目前硫化锂单吨价格仍在数百万元。

3、固态电解质原料相关企业布局梳理

图280：部分公司固态电解质原料布局情况

公司名称	相关产品	主营业务情况	固态电解质原料相关布局	固态电解质下游客户
三祥新材	氧化锆、锆基氮化物	公司主营产品为电熔氧化锆、铸造氧化锆、单晶电熔氧化锆等。公司建有2.6万吨电熔氧化锆、2万吨氧化锆产能；在建氧化锆产能8万吨。	氧化锆向下游客户小批量供应，锆基氮化物初步通过客户验证，目前已向下游固态电池工厂实现小批量供应。	蔚来能源等
东方锆业	氧化锆	公司深耕氧化锆近三十年，公司建有2.6万吨电熔氧化锆、0.54万吨二氧化锆、5万吨氧化锆产能；在建电熔氧化锆产能2万吨。	公司提供的样品已获得部分固态电池材料厂家研发试用初步认可，后续将进行大批实验。	
厦钨新能	硫化锂	公司主营产品为三元正极、磷酸铁锂、磷酸锰铁锂等。	送样验证中。	
钒钛股份	硫化锂	公司主营产品为锂电隔膜等。	已完成四吨级中试线，计划建设十吨级中试线。	
天赐材料	硫化锂	公司主营产品为电解液、磷酸铁等。	已通过湿相法开发出硫化锂产品。	
容百科技	硫化锂	公司主营产品为三元正极等。	硫化锂与硫化物固态电解质配套开发中。	
天际股份	硫化锂	公司主营产品为六氟磷酸锂等锂盐。	天际股份与ATL合资建设锂材料已经取得国内硫化锂发明专利。	
光华科技	硫化锂	公司主营产品为PCB化学品、三元前驱体、动力电池回收等。	现有产能300吨，规划产能3000吨。	
出光兴产	硫化锂	公司成立于1940年，主营业务涵盖石油化工、石油及其他矿物资源开发、医药等。	产能预计2027年中期达到1000吨。	丰田等

资料来源：各公司公告、各公司官网，国信证券经济研究所整理；注：最新情况以各公司公告为准

2.5 固态电池正极：高镍三元为中短期方案，富锂锰基加快开发

- **中短期内高镍三元体系是主流方案。**目前，固态电池正极开发主要集中在高镍三元正极、镍锰酸锂、富锂锰基等路线。其中高镍三元正极凭借能量密度高、倍率性能好、商业化程度高等优势，成为当前主流正极材料体系。富锂锰基、镍锰酸锂等材料高能量密度优势突出，未来有广阔应用前景。目前，容百科技正就富锂锰基进行吨级验证，当升科技在进行5V尖晶石镍锰酸锂正极样品验证。
- **当升科技、容百科技等产业化布局领先。**大多数三元正极企业均拥有高镍三元产品布局，其中容百科技、当升科技等均已经实现对固态电池企业的出货。厦钨新能、振华新材、长远锂科、贝特瑞等正极企业也有固态电池材料布局。此外，宁夏汉尧、巴斯夫杉杉、华友钴业等企业也积极布局富锂锰基等新型正极材料。

图281：全球固态/半固态电池正极材料市场空间（亿元）及需求（万吨）



资料来源：卫蓝新能源官网、清陶能源官网、上海有色网、EV Tank，SNE Research，动力电池联盟，国信证券经济研究所整理与测算

图282：部分正极材料性能对比

类型	磷酸铁锂	三元材料	富锂锰基	锰酸锂	镍锰酸锂	硫化物正极
克容量 (mAh/g, 0.1C)	155-163	150-220	130-320	100-140	130-147	800-2000
电压平台 (V)	3.2	3.7	3.7-4.6	3.7-3.8	4.7	-
压实密度 (g/cm ³)	2.2-2.7	3.4-3.7	2.9-3.1	2.9-3.2	2.8-3.3	-
循环寿命 (次)	3000-12000	1000-3000	1000-6000	400-2000	400-1000	50-1850
倍率性能	一般	较好	较差	较好	优秀	较好

资料来源：姚忠冉等，《锂离子电池氧化物固态电解质研究进展》，新能源进展，2023，11(1):76-84，吴敬华、杨菁、刘高瞻等，《固态锂电池十年(2011—2021)回顾与展望》，储能科学与技术，2022，

11(9):2713-2746; 国信证券经济研究所整理

固态电池正极：传统三元企业优势明显。

固态电池正极材料目前仍以三元高镍正极为主，其中传统优势企业容百科技、当升科技等在固态电池客户开拓方面依旧处于领先地位。未来，富锂锰基、镍锰酸锂等材料有望成为重要技术路线，但目前大多处于吨级送样阶段。

图283：部分正极企业固态电池材料布局情况

公司名称	主营业务情况	固态电池相关材料布局	固态电池领域客户
容百科技	公司主营业务为锂电正极材料销售，产品涵盖三元正极、磷酸盐正极材料等。	9系高镍正极材料批量供应半固态电池客户；高镍三元和富锂锰基在动力电池客户进行吨级送样验证。	与国内外40多家电池及整车企业建立了合作关系。
当升科技	公司主营业务为锂电正极材料销售，产品涵盖三元正极、磷酸盐正极材料、钴酸锂等。	公司固态电池正极2024年送样近千吨，富锂锰基在进行客户送样与验证。	已导入清陶、卫蓝、赣锋、蜂巢等；通过鹏辉、瑞浦兰钧等性能测试并已获得订单。
德方纳米	公司主营业务为锂电正极材料销售，产品涵盖三元正极、磷酸盐正极材料、钴酸锂等。	公司高镍三元正极材料已实现量产；高镍三元正极材料已与下游客户开展技术验证。	
华友钴业	公司主营业务为钴、铜、镍等金属以及前驱体、正极材料等生产与销售。	公司中国市地地正材料已应用于乘用车长续航车型，全国市地地正材料性能领先企业开发认证。巴盟科技已布局富锂锰基材料专利。	2025年3月，公司控股子公司天津巴盟与卫蓝新能源签订战略合作协议，合作期限为5年。
振华新材	公司主营业务为锂电正极材料生产与销售，产品涵盖三元正极等。	公司研发高镍三元正极材料，越南德方纳米等客户送样。	
巴斯夫材料	公司系巴斯夫与杉杉股份的合资公司，业务涵盖正极前驱体与正极材料、电池制造等。	公司开发高镍三元正极材料，预计今年进入量产阶段。	
璞泰来	公司主营业务为负极材料、三元正极、磷酸盐正极材料等生产与销售。	2024年公司开始与国内头部客户联合开发高镍三元、富锂锰基正极，目前积极推进中试产品验证。	
宁波微纳	公司主营业务为锂电正极材料、磷酸盐、磷酸盐正极材料等生产与销售。	公司研发高镍三元正极材料，富锂锰基材料等送样验证，2009年开始启动富锂锰基材料产业化，2023年在宁夏建成万吨级富锂锰基材料产线。	2022年公司与宁德时代、中国科学院宁波微纳等共同合作富锂锰基材料国家重点专项。

资料来源：各公司公告、各公司官网，国信证券经济研究所整理；注：最新情况以各公司公告为准

2.6 固态电池负极：掺硅体系为中短期主流方案，锂金属具备长期空间

- **硅基负极或成为固态电池负极材料中短期主要解决方案。**固态电池的负极材料主要包括石墨、硅负极、合金负极、金属锂等。硅理论比容量高达4200mAh/g，是石墨类负极的十倍以上，其优势在于：1）电位低、克容量高，能量密度高；2）地壳中含量高，理论成本低；未来其有望成为中短期重要的负极材料方案。
- **长期来看，金属锂有望在固态电池负极实现应用。**金属锂理论克容量高、电极电位低，是固态电池的理想负极材料。但目前产业化还存在挑战：金属锂电化学活性高，影响负极和电解质的利用率；锂金属在循环过程中容易出现枝晶生长的问题，从而影响电池的循环稳定性。
- **硅基负极方面**，贝特瑞、杉杉股份、翔丰华、璞泰来等已经初步量产硅碳负极等产品。**金属锂负极方面**，赣锋锂业、天齐锂业、英联股份、天铁科技等积极进行产业布局。

图284：全球固态/半固态电池负极材料市场空间（亿元）及需求（万吨）

—●— 半固态电池负极市场空间 (亿元) —■— 全固态电池负极市场空间 (亿元)



资料来源：卫蓝新能源官网、清陶能源官网、上海有色网、EV Tank，SNE Research，动力电池联盟，国信证券经济研究所整理与测算

图285：部分负极材料性能对比

类型	材料	克容量 (mAh/g)	优点	缺点
石墨	天然石墨、人造石墨	310-370	成本低、储量大、商业化程度高、稳定性好	克容量小、电池能量密度小
硅基负极	硅碳、硅氧、纳米硅、微米硅等	400-4000	高理论克容量、环境友好、储量大	体积膨胀大、电子电导率低、锂离子扩散系数低、纳米硅负极成本高
合金负极	Li-Al、Li-Sn、Li-In、Li-Si	400-4000	界面润湿性好、抑制界面副反应与锂枝晶	体积膨胀率高、结构变化大、电池能量密度下降
金属锂	锂箔、锂膜	3860	高理论克容量、极低电极电位	易界面反应、体积膨胀率大、易形成锂枝晶、使用条件苛刻

资料来源：贾理男、杜一博、郭邦军、张希，《基于硫化物电解质的全固态锂离子电池负极研究进展》，化工学报，2022，73(12):5304-5318；国信证券经济研究所整理

固态电池负极：2025 年硅基负极产能将快速释放。

中短期来看，硅基负极依托其能量密度较高、技术相对成熟等优势，将成为固态电池的主流负极方案；企业硅负极扩张产能预计在 2025 年开始陆续大规模投放，其中贝特瑞等企业布局相对领先。长期来看，锂金属依托能量密度高的优势将成为固态电池重要技术路线，锂资源领域企业在该细分领域布局领先。

图 286：部分企业固态电池负极材料布局情况

公司名称	路线	硅基负极/金属锂负极布局情况	产业化进度情况	硅基材料/金属锂产能
贝特瑞	硅基	公司 2006 年开始研发硅基负极材料，目前硅基负极已开发至第六代，能量密度 2900mAh/g，硅基负极比容量已突破 1500mAh/g。	公司硅基负极材料量产，CVD 硅基负极产品获多家主机厂客户认可，预计 2025 年批量供应。	建成产能：0.5 万吨； 在建产能：4.5 万吨
杉杉股份	硅基	2009 年公司发布首个硅基负极专利，2021 年公司硅基负极产品在消费电子和小动力电池市场批量应用，公司新一代硅基负极产品已实现海外客户订单销售。	公司硅基负极材料量产并供应海外主机厂客户，通过认证，在消费电子领域实现量产，已通过海外头部客户认证并实现批量交付。	建成产能：0.1 万吨； 在建产能：4 万吨
翔丰华	硅基	公司开发的硅基负极材料产品处于中试阶段，已具备产业化条件。	公司与海能达签订战略合作协议。	中试阶段
建康来	硅基	公司早期与中科院物理所合作研发，2021 年完成第二代硅基负极产品研发，在湖南建立氧化硅中试线，2022 年公司在湖南新一代石墨负极产品量产。	公司硅基负极产品订单快速增长，硅基负极处于中试阶段实现小批量出货。	2025 年计划 400 吨 规划产能：1.2 万吨
道氏技术	硅基 金属锂	硅基负极方面，公司已实现批量供货，动力电池和储能电池应用。	公司与比亚迪新能源动力电池正极材料及负极材料达成战略合作，公司委托电子科技大学进行硅基金属锂负极的研究。	现有 10 吨产能 2025 年计划扩至 1000 吨
上海洗霸	硅基	硅基负极产品，公司已实现批量供货，动力电池和储能电池应用。	硅基负极产品已交付多家客户测试，部分进入产品验证、测试和验证阶段。	现有 500 吨产能 规划 5000 吨
德业科技	金属锂	公司已实现 300mm 宽带的金属锂负极量产；铜箔厚度可控制在 10μm。	金属锂负极产品已交付多家客户测试，部分进入产品验证、测试和验证阶段。	规划：0.7 万吨金属锂负极
天齐锂业	金属锂	公司与卫蓝新能源成立合资公司，共同开发金属锂负极材料及应用，金属锂负极及锂基合金负极材料等。	2025 年 5 月与卫蓝新能源签订 5 年，每年采购不低于 100 吨金属锂负极材料合同。	规划：0.2 万吨金属锂负极
天齐科技	金属锂		2025 年 5 月与卫蓝新能源签订 5 年，每年采购不低于 100 吨金属锂负极材料合同。	
贝特瑞	金属锂		开发应用于固态电池的锂金属/合金负极材料，并与头部汽车公司开展相关的技术合作。	

资料来源：各公司公告、各公司官网，国信证券经济研究所整理；注：最新情况以各公司公告为准

2.7 固态电池集流体

硫化物固态电解质易与铜箔发生反应生成铜硫化物进而腐蚀集流体表面，影响电子传导并破坏电解质表面致密性。因此需要对原有铜箔集流体进行表面改性或者替换为更为致密以及耐腐蚀的不锈钢集流体等。

图 287：部分企业固态电池集流体布局情况

公司名称	公司简介	固态电池集流体布局情况
道氏股份	公司主要生产锂电铜箔、电子电路铜箔	公司自 2018 年起研发多孔铜箔，目前已实现 5μm/6μm 铜箔技术，2024 年公司推出耐高湿电解液腐蚀集流体和耐酸性腐蚀，2025 年推出全球首款耐高湿电解液腐蚀集流体。
德业科技	公司主要生产锂电铜箔、电子电路铜箔	公司目前为平/全固态电池提供的集流体解决方案有氧化铜箔、微孔铜箔、镀镍铜箔等，以上产品均已实现批量供货。
嘉元科技	公司主要生产锂电铜箔	公司平/全固态（凝聚态）电池用铜箔已实现批量供货，全固态电池用铜箔及微孔铜箔、高纯合力铜箔已小批量供货，耐酸性特种铜箔已实现送样。
远航精密	公司主要生产精密锂电材料	前期与固态电池领域客户进行技术对接
南金股份	公司主要生产不锈钢箔等	前期与固态电池领域客户进行技术对接

资料来源：各公司公告、各公司官网，国信证券经济研究所整理；注：最新情况以各公司公告为准

2.8 固态电池辅材

软包为主流封装方式：固体电池主要封装形态为软包，亦有部分企业提出方形方案。软包电池优势：

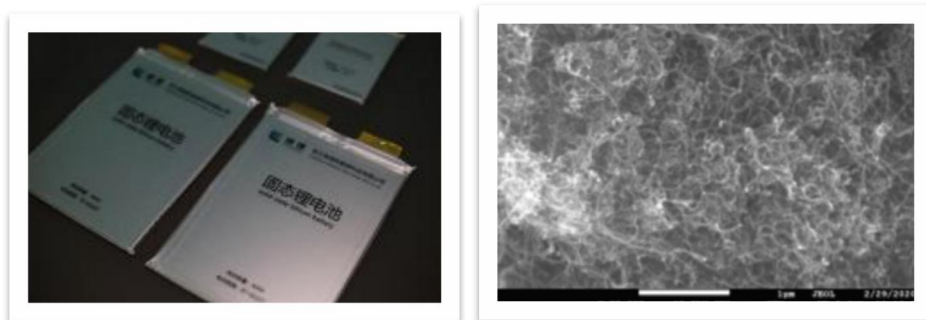
- ✓ 固态电池安全性高、不易胀气，能够较好解决软包电池的潜在安全隐患；
- ✓ 软包形态能量密度高能够更好的发挥固态电池材料的优势；
- ✓ 固态电池材料整体相对缺乏弹性，采用软包封装形态能够在入壳时更好地保护其结构。

目前国内外铝塑膜主要生产企业包括 DNP、昭和电工、新纶新材、紫江新材、明冠新材等。

固态电池或添加新型导电剂以及添加剂：

- ✓ 固态电池方案中所采用的超高镍、富锂锰基、硅负极等材料导电性均相对较差，为优化电池电化学性能、碳纳米管添加量有望提升。目前国内外碳纳米管生产企业主要包括 OCSiAl、天奈科技、道氏技术、捷邦科技等。
- ✓ 固态电解质导电性和倍率性能较差，可以通过添加 LITFSI 等添加剂来优化导电性能。代表生产企业包括瑞泰新材等。

图288：软包固态电池（左）与碳纳米管（右）



资料来源：赣锋锂业官网、天奈科技官网，国信证券经济研究所整理

3. 市场空间

3.1 应用场景：电动车实现小批量应用，电动航空等领域前景广阔

- **消费产品市场：**固态电池具有能量密度高、安全性强等优势，能够满足无人机、便携式储能等产品对于电池长续航、轻量化的要求。松下宣布将在 2025-2029 年量产用于无人机的全固态电池；富士康与 Blue Solutions 将合作生产固态电池应用于二轮车领域；2024 年 11 月，VIVO S20 搭载蓝海半固态电池。
- **新能源车市场：**固态电池能够提升新能源车安全性、助力新能源车达到 1000km 以上续航，2024 年开始在国内批量装车。2024 年 4 月上汽发布智己 L6，其中光年版车型搭载半固态电池、续航超 1000km；2024H1 蔚来发布 150kWh 超长续航电池包，并搭载于 ET9；上汽、东风、北汽等均计划在 2025-2026 年推出半固态电池车型；广汽、长安、上汽、比亚迪、奇瑞、丰田、福特等预计在 2026-2027 年推出全固态电池车型，并加速其量产。
- **储能市场：**固态电池应用目前多以示范性项目为主。2023 年 10 月，卫蓝新能源与三峡集团合作的兆瓦时级固态锂离子电池储能系统项目入选国家能源局第三批能源领域首台（套）重大技术装备（项目）名单。2024 年 12 月，太蓝新能源与南都电源签署固态电池战略合作协议，双方将推进固态电池在储能领域及民用领域规模化应用。
- **其他场景：**应用于特种车辆（如矿业重卡等）、航空飞行器等领域。特种车辆：2025 年 3 月北汽福田推出行业首款半固态电池重卡产品。机器人：软通动力已经搭载准固态电芯，广汽计划搭载固态电池产品。低空飞行器：亿航

智能、峰飞航空等均已搭载半固态电池进行试飞试验。

图 289：固态电池应用场景



资料来源：大疆、三一集团、阳光电源、蔚来汽车官网，国信证券经济研究所整理

创新场景耦合性能优势，固态电池产业加速发展

产业链发展阶段：

- ✓ 2025-2027 年：固态电解质突破。着重打通产业路线，采用三元 + 掺硅负极方案。
- ✓ 2027-2030 年：负极材料突破。攻关高掺硅负极材料。
- ✓ 2030-2035 年：各方面体系材料优化。攻关锂金属负极、复合固态电解质、高容量正极材料等。

终端应用进展：

- ✓ **2024 年以来加速产业化。**在消费电子领域，VIVO 手机、小米便携式储能等已经搭载半固态电池产品。在车端，2024 年蔚来、上汽推出半固态电池车型。在低空领域，峰飞航空、亿航智能均已搭载半固态电池。
- ✓ **进入 2025 年：**北汽福田推出半固态重卡，上汽计划年内发布新一代搭载半固态电池版本的 MG4。奔驰、宝马、奇瑞等车企开启全固态电池车型路试。美国固态电池公司 Factorial Inc. 已向加拿大客户交付首批固态锂金属电池，用于其远程货运无人机。国内企业金龙羽新能源也与客户签订每年 10 万支无人机用高能量密度固态电芯采购订单。在储能领域，2025 年 6 月中绿电获内蒙古固态电池储能项目建设指标。
- ✓ **展望 2026 年：**长安、广汽、福特拟推出全固态电池车型；小鹏汇天或将搭载半固态电池。
- ✓ **展望 2027 年：**比亚迪、上汽、奇瑞、丰田、现代等车企将推出全固态电池车型。

1、新能源车：半固态车型陆续上市，全固态样车开启路测。

图 290：车企在半固态与全固态电池车型领域布局进展

公司名称	量产进展	供应商/合作企业
上汽集团	2024H1公司发布智己L6，光年极本搭载光年半固态电池。2025年底公司新一代固态电池将在全新MG4上量产应用。2027年首款全固态电池电动车将实现量产。2024年半固态电池充电12min续航400km。	公司属清陶能源第一大股东投资者，与其进行产品联合研发
广汽集团	公司计划在2026年将全固态电池搭载于昊铂旗下车型。	与赣锋锂业有合作协议
长安汽车	2025年2月公司推出全固态金属锂电池，计划2025年底实现样车首发，2026年实现装车验证，2027年逐步量产。	自研固态电池；与太华新能源、赣锋锂业有合作协议
比亚迪	2024年下线60Ah全固态电池（中试产品），2027年左右启动全固态电池批量示范装车应用，2030年后实现大规模上车。	弗迪电池
吉利汽车	2023年建设固态电池实验室，2024年年中宣布全固态电池能量密度达到400Wh/kg，电芯已完成20Ah样品试制。	与卫蓝新能源有合作协议
北汽集团	2020年搭载清陶能源固态电池的样车下线。2022年北汽福田完成固态电池搭载测试。2025年3月发布北汽福田半固态电池卡车。	清陶能源
奇瑞汽车	2025年星途星纪元搭载固态电池开始热试。	国轩高科；安瓦新能源等
蔚来	2023年12月搭载半固态电池的蔚来ET7实测续航1000km。2025年4月搭载半固态电池的蔚来ET9亮相上海车展。	卫蓝新能源
奔驰	2025年2月，梅赛德斯-奔驰使用搭载新电池的EQS原型车进行固态电池技术的测试，预计续航超1000km。	辉能科技、Factorial Energy
丰田	2019年公司与松下成立合资公司联合研发固态电池。公司计划2027年开始固态电池车型量产，该车型预计续航超1200km。	自研、松下
本田	公司投资SES联合开发固态电池产品。公司2024年建设全固态电池示范生产线。2025年1月开始生产，并在2025-2030年左右实现量产。	自研、SES、松下
现代	公司预计2027年实现部分固态电池车型量产，2030年左右实现全面量产。	SES、LG新能源、SK On、Factorial Energy
通用	公司投资SES，联合开发固态电池产品；2021年进行了A样品测试，预计2027年上市。	SES
日产	公司计划2025年实现全固态电池试生产，2026年全固态电池装车测试，2028年推出全固态电池车型。	自研、松下

资料来源：各公司公告、各公司官网，国信证券经济研究所整理

2、创新场景：低空与机器人领域贡献可观增量。

图291：机器人等领域固态电池应用情况

领域	公司名称	量产进展	供应商/合作企业
机器人	广汽集团	2024年12月广汽集团发布第三代具身智能人形机器人GoMate，该机器人搭载了固态电池（续航能力超6小时）。2026年GoMate 将完成小批量生产。	自研
	软通动力	2025年1月软通天擎机器人发布旗下首款交互与教育双足机器人天擎C1，该机器人搭载了全极耳准固态电池。	
低空经济	广汽集团	2024年12月广汽集团发布全新飞行汽车品牌“高域”，并发布该品牌下第二款飞行汽车GOVY Aijet。该产品未来将搭载广汽自研的全固态电池。	自研
	亿航智能	2024年11月完成全球首次eVTOL固态电池飞行试验，亿航智能将争取在2025年底前实现固态电池在EH216-S的认证和装机量产。	欣界能源、国轩高科
	小鹏汇天	eVTOL在2026年有望搭载中创新的半固态大圆柱电池产品。	中创新航、亿纬锂能、孚能科技
	峰飞航空	2024年与宁德时代签署战略合作协议，已搭载宁德时代的凝聚态电池。	宁德时代
消费电子	vivo	2024年3月，公司首发应用半固态电池技术的全新一代折叠旗舰vivo X Fold3系列；2024年12月推出S20系列新机，采用6500mAh半固态电池。	宁德时代（ATL）

资料来源：各公司公告、各公司官网，国信证券经济研究所整理

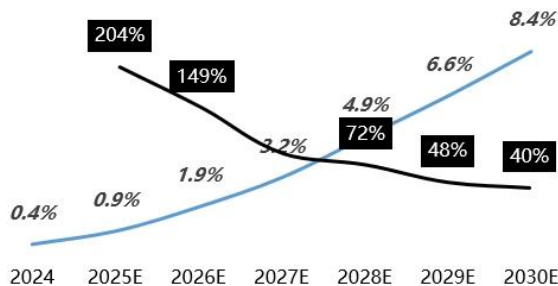
3.2 市场空间测算

随着车企积极推动固态电池产业化，并在 2025-2030 年陆续推动固态电池车型量产；同时无人机、电动船舶等场景对于长续航高安全电池需求持续提升，固态电池进入发展快车道。

我们预计 2025–2030 年各环节固态电池渗透率：

- 动力电池 1.2/2.5/4.0/6.0/8.0/10.0%；
- 消费电池 0.5/1.5/3.0/5.0/7.0/10.0%；
- 储能电池 0.1/0.2/0.4/0.6/0.9/1.5%；
- 其他电池 3.0/5.0/10.0/20.0/30.0/40.0%。

图292：固态电池渗透率（蓝）和容量增速（黑）



资料来源：EV Tank, SNE Research, 动力电池联盟；国信证券经济研究所整理与测算

图293：全球固态电池市场空间展望（亿元）



资料来源：卫蓝新能源官网、清陶能源官网、上海有色网、EV Tank, SNE Research, 动力电池联盟；国信证券经济研究所整理与测算

图294：全球固态与半固态电池市场规模展望

	2024	2025E	2026E	2027E	2028E	2029E	2030E
全球动力电池需求 (GWh)	1051	1259	1490	1700	1914	2110	2322
其中：全球固态动力电池需求 (GWh)	5.3	15.1	37.3	68.0	114.9	168.8	232.2
全球消费电池需求 (GWh)	128	135	141	147	153	158	162
其中：全球固态消费电池需求 (GWh)	0.1	0.7	2.1	4.4	7.6	11.0	16.2
全球储能电池需求 (GWh)	315	400	480	550	600	644	696
其中：全球固态储能电池需求 (GWh)	0.4	0.4	1.0	2.2	3.6	5.8	10.4
全球飞行器&船舶及其他电池需求 (GWh)	3.5	6.5	9.0	15.0	22.5	25.0	30.0
其中：全球固态飞行器&船舶及其他电池需求 (GWh)	0.2	0.2	0.5	1.5	4.5	7.5	12.0
合计：全球锂电池需求 (GWh)	1498	1800	2121	2412	2690	2937	3210
其中：合计：全球固态锂电池需求 (GWh)	5.4	16.4	40.8	76.1	130.6	193.1	270.8

资料来源：EV Tank, SNE Research, 动力电池联盟；国信证券经济研究所整理与测算

风险提示

人形机器人相关政策推进不及预期

当前人形机器人产业仍处于发展早期，政策引导和产业扶持对技术研发、产品准入、示范应用及商业化落地具有重要影响。部分关键环节的行业标准、质量检测、安全认证、数据合规及责任认定机制仍需逐步完善，政策进度可能对产业化节奏和应用推广产生影响。

商业化应用落地进展不及预期

人形机器人未来有望应用于工业制造、仓储物流、商业服务、家庭服务及特种作业等场景，但当前多数应用仍处于研发验证、小规模试点或示范阶段。受产品可

靠性、使用成本、场景适配、客户接受度及投资回报周期等因素影响，相关产品可能难以在短期内实现规模化部署，可能影响产业发展和市场需求释放进度。

关键软件技术与核心零部件进展不及预期

人工智能大模型、世界模型、运动控制、环境感知、灵巧操作等软件技术，是提升人形机器人智能化水平和综合性能的关键。减速器、丝杠、伺服系统、力传感器、灵巧手及高性能芯片等核心零部件直接影响产品性能、成本及量产能力。若关键技术突破、核心零部件国产化或软硬件协同进展不及预期，整体产业化进程可能受到延缓。

量产降本与供应链建设不及预期

人形机器人结构复杂、零部件数量众多，对制造工艺、供应链协同、产品一致性和质量控制能力要求较高。现阶段行业尚未完全形成成熟的规模化生产体系。若产线建设、供应链配套、良率提升或成本下降速度不及预期，可能影响产品市场竞争力和企业盈利能力，进而制约行业规模扩张。

免责声明

分析师声明

作者保证报告所采用的数据均来自合规渠道；分析逻辑基于作者的职业理解，通过合理判断并得出结论，力求独立、客观、公正，结论不受任何第三方的授意或影响；作者在过去、现在或未来未就其研究报告所提供的具体建议或所表述的意见直接或间接收取任何报酬，特此声明。

国信证券投资评级

投资评级标准	类别	级别	说明
报告中投资建议所涉及的评级（如有）分为股票评级和行业评级（另有说明的除外）。评级标准为报告发布日后 6 到 12 个月内的相对市场表现，也即报告发布日后的 6 到 12 个月内公司股价（或行业指数）相对同期相关证券市场代表性指数的涨跌幅作为基准。A 股市场以沪深 300 指数（000300.SH）作为基准；新三板市场以三板成指（899001.CSI）为基准；香港市场以恒生指数（HSI.HI）作为基准；美国市场以标普 500 指数（SPX.GI）或纳斯达克指数（IXIC.GI）为基准。	股票 投资评级	优于大市	股价表现优于市场代表性指数 10%以上
		中性	股价表现介于市场代表性指数±10%之间
		弱于大市	股价表现弱于市场代表性指数 10%以上
		无评级	股价与市场代表性指数相比无明确观点
	行业 投资评级	优于大市	行业指数表现优于市场代表性指数 10%以上
		中性	行业指数表现介于市场代表性指数±10%之间
		弱于大市	行业指数表现弱于市场代表性指数 10%以上

重要声明

本报告由国信证券股份有限公司（已具备中国证监会许可的证券投资咨询业务资格）制作；报告版权归国信证券股份有限公司

关本报告的摘要或节选都不代表本报告正式完整的观点，一切须以我公司向客户发布的本报告完整版本为准。

本报告基于已公开的资料或信息撰写，但我公司不保证该资料及信息的完整性、准确性。本报告所载的信息、资料、建议及推测仅反映我公司于本报告公开发布当日的判断，在不同时期，我公司可能撰写并发布与本报告所载资料、建议及推测不一致的报告。我公司不保证本报告所含信息及资料处于最新状态；我公司可能随时补充、更新和修订有关信息及资料，投资者应当自行关注相关更新和修订内容。我公司或关联机构可能会持有本报告中所提到的公司所发行的证券并进行交易，还可能为这些公司提供或争取提供投资银行、财务顾问或金融产品等相关服务。本公司的资产管理部门、自营部门以及其他投资业务部门可能独立做出与本报告中意见或建议不一致的投资决策。

本报告仅供参考之用，不构成出售或购买证券或其他投资标的的要约或邀请。在任何情况下，本报告中的信息和意见均不构成对任何个人的投资建议。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。投资者应结合自己的投资目标和财务状况自行判断是否采用本报告所载内容和信息并自行承担风险，我公司及雇员对投资者使用本报告及其内容而造成的一切后果不承担任何法律责任。

证券投资咨询业务的说明

本公司具备中国证监会核准的证券投资咨询业务资格。证券投资咨询，是指从事证券投资咨询业务的机构及其投资咨询人员以下列形式为证券投资人或者客户提供证券投资分析、预测或者建议等直接或者间接有偿咨询服务的活动：接受投资人或者客户委托，提供证券投资咨询服务；举办有关证券投资咨询的讲座、报告会、分析会等；在报刊上发表证券投资咨询的文章、评论、报告，以及通过电台、电视台等公众传播媒体提供证券投资咨询服务；通过电话、传真、电脑网络等电信设备系统，提供证券投资咨询服务；中国证监会认定的其他形式。

发布证券研究报告是证券投资咨询业务的一种基本形式，指证券公司、证券投资咨询机构对证券及证券相关产品的价值、市场走势或者相关影响因素进行分析，形成证券估值、投资评级等投资分析意见，制作证券研究报告，并向客户发布的行为。

国信证券经济研究所

深圳

深圳市福田区福华一路 125 号国信金融大厦 36 层

邮编：518046 总机：0755-82130833

上海

上海浦东民生路 1199 弄证大五道口广场 1 号楼 12 层

邮编：200135

北京

北京西城区金融大街兴盛街 6 号国信证券 9 层

邮编：100032