

六维力传感器：人机末端力觉来源，行业格局变化在即

人形机器人专题报告四

机器人

投资评级：推荐（维持）

分析师：曾文婉

分析师登记编码：S0890521020007

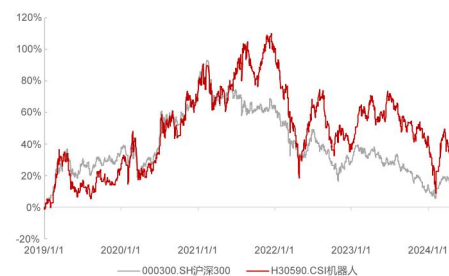
电话：021-20321380

邮箱：zengwenwan@cnhbstock.com

销售服务电话：

021-20515355

行业走势图（2024年4月15日）



资料来源：iFind，华宝证券研究创新部

相关研究报告

1、《拆解人形机器人结构，寻找高价值量细分领域——人形机器人专题报告三》

2024-01-23

2、《供应端从0到1有望突破，需求端人机替代市场广阔——人形机器人专题报告二》

2023-12-21

3、《智能化进阶开启，商业化落地在即——人形机器人专题报告一》

2023-12-20

投资要点

①力传感器作为力的感知及测量工具，上游材料成本占比高，下游应用广泛。从产业链上看：1、力传感器上游直接材料成本占比达80%以上，关键环节包括应变片的加工制造；2、中游为加工制造与封装检测，重要工艺流程包括弹性体的制造与加工、应变片的贴片、检测等环节；3、下游行业应用领域广泛，包括工业自动化、汽车、消费电子、医疗设备、航空航天等。

②六维力传感器是维度最高的力传感器，已成为高性能人形机器人的标配。根据所测力的维数不同，力传感器可被分为一到六维力传感器；根据其测量原理不同，又可以分为光电式、应变式、电容式、压电式等类型。六维力传感器是维度最高的力传感器，能给出最为全面的力觉信息、提升传感精度，并非多个低维力传感器可替代的。在人形机器人领域，六维力传感器可提升机器人手部操作的精细化与柔性化程度以及脚部行走的稳定性，主要安装手腕、脚踝等的末端部位，已成为高性能人形机器人的标配。

③六维力传感器生产技术难度大、生产效率低，产品价格昂贵、利润较高。相比其他维度力传感器，六维力传感器技术、资金壁垒最高，其核心技术包括解耦方法、六维联合加载标定检测系统、降低零点漂移和温度漂移等。同时，六维力传感器相比普通力传感器在工艺流程上更为复杂，且尚未完全实现自动化生产，例如贴片环节仍需人工操作。最后，六维力产品平均单价在2-4万左右、价格昂贵，而成本在数千元，利润率较高、降价空间充足，在人形机器人量产加速、降价迫切的预期下，六维力传感器或将迎来降价潮以及行业洗牌。

④目前六维力传感器市场规模化不足，但未来人形机器人量产将带来较大市场增量。国内六维力传感器市场相对小众，2022年市场规模不到3亿人民币、销量不到1万套。在下游应用中，工业自动化（包含传统机器人）领域应用规模占比最大，但人形机器人行业应用规模增速最快，长远来看，人形机器人量产将是六维力传感器市场较大的增长来源。

⑤国内六维力传感器市场以外资品牌为主，国产化率有望提升。从国内市场来看，六维力传感器市场呈现集中度较高、外资品牌占主导等特点。国外厂商ATI市占率远超其他厂商，而国内市占率较高的厂商主要为非上市公司，包括宇立仪器、蓝点触控、坤维科技，位于TOP5以内。比较国内外产品差异，国产与外资主流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方面仍存在差距。从价格上看，国产品牌性价比更高，将有望加速推动国产替代进程。

⑥国内相关公司情况梳理：涉及六维力传感器的国内上市公司较少，主要为昊志机电、柯力传感以及敏芯股份，且它们的六维力产品业务仍处于小规模商业化或研发阶段。

⊕**投资建议：**1、后续需进一步关注六维力传感器、人形机器人行业发展趋势，关注能尽快适应人机行业需求的六维力产品厂商以及在新生产技术、新产品技术、规模化生产上有重要突破的企业。2、需跟踪六维力传感器国产替代进程，关注替代进程中取得竞争优势的企业。3、需跟踪六维力产品厂商与人形机器人厂商合作情况，关注在人形机器人应用领域有布局、且最终能获得订单的企业。

⊕**风险提示：**产业政策支持力度不及预期、人形机器人等终端行业需求不及预期、市场规模测算模型存在失效风险、国产替代进程不及预期、行业内价格战加剧、产品规模化生产不及预期。本报告中所提及的公司旨在对行业现状进行说明，不代表推荐或覆盖。

内容目录

1. 力传感器作为力的感知及测量工具，上游材料成本占比高，下游应用广泛.....	5
1.1. 力传感器可感受力或力矩大小并将力学量转换成相关电信号.....	5
1.2. 力传感器上游材料成本占比较高，下游行业应用领域广泛.....	6
2. 六维力传感器是维度最高的力传感器，已成为高性能人形机器人的标配.....	10
2.1. 六维力传感器是维度最高的力传感器，且市场产品较多为应变片式.....	10
2.2. 六维力传感器的优点使之成为高性能人形机器人的标配.....	13
3. 六维力传感器生产技术难度大、生产效率低，产品价格昂贵、利润较高.....	16
3.1. 六维力传感器生产技术难度大，存在技术、资金、人才壁垒.....	16
3.1.1. 壁垒一：需要通过解耦来减少串扰，解耦方法的掌握存在技术门槛.....	17
3.1.2. 壁垒二：需要六维联合加载检定来进行解耦、提高精准度，设备研制存在门槛.....	18
3.1.3. 壁垒三：需要降低漂移来减少误差、提升稳定性，控制漂移误差存在难度.....	20
3.2. 六维力传感器工艺流程更为复杂，且尚未完全实现自动化生产.....	21
3.3. 六维力传感器价格高、利润空间大，人形机器人量产预期下或将掀起降价潮.....	22
4. 六维力传感器市场规模化不足，但未来人形机器人量产将带来市场增量.....	23
4.1. 六维力传感器市场相对小众，暂未形成规模化出货.....	23
4.2. 人形机器人量产将是六维力传感器市场的较大增长来源.....	24
5. 国内六维力传感器市场以外资品牌为主，国产化率有望提升.....	26
6. 相关公司情况梳理.....	29
6.1. 宇立仪器：从汽车碰撞假人到机器人打磨再到人形机器人，六维力产品类型丰富.....	29
6.2. 坤维科技：核心技术源于航天测试，主攻协作机器人赛道，已向人形机器人领域拓展.....	31
6.3. 蓝点触控：在国内品牌中六维力产品营收仅次于宇立仪器，从硬件到软件提供全面解决方案.....	32
6.4. 海伯森：视觉传感器与力传感器，六维力传感器价格较高.....	33
6.5. 鑫精诚：3C 细分赛道起家，以高性价比产品切入低要求应用领域.....	34
6.6. 神源生智能：具备高校背景，国内市场份额占比较低.....	35
6.7. 埃力智能：扎根运动健康领域，已被人机厂商傅利叶智能收购.....	35
6.8. 瑞尔特测控：依托德国先进技术，产品单价远低于国内其他品牌.....	36
6.9. 昊志机电：立足主轴业务向机器人领域扩张，六维力产品处于初步商业化阶段.....	36
6.10. 柯力传感：以称重传感器起家，六维力产品处于开发试制阶段.....	36
6.11. 敏芯股份：聚焦 MEMS 传感器，六维力产品处于研发阶段.....	37
7. 投资建议.....	40
8. 风险提示.....	40

图表目录

图 1：力（或力矩）传感器基本工作原理.....	5
图 2：力传感器工作中，应变片被压缩，其电阻减少；如果拉伸，电阻会增加.....	5
图 3：力传感器结构（以应变式力传感器为例）.....	6
图 4：力传感器结构（以应变式力矩传感器为例）.....	6
图 5：力传感器产业链.....	7
图 6：电阻应变片结构（以丝式电阻应变片为例）.....	8
图 7：力传感器生产工艺流程（以应变式传感器为例）.....	8
图 8：2018-2026 年全球 MEMS 压力传感器下游应用市场规模（单位：亿美元）.....	10
图 9：2019-2026 年全球 MEMS 压力传感器下游应用市场规模预测（单位：百万美元）.....	10
图 10：不同类型力传感器性能比较.....	12
图 11：六维力传感器下游应用.....	14

图 12: 传统机器人六维力传感器与关节扭矩传感器安装部位.....	15
图 13: 人形机器人六维力传感器与关节扭矩传感器安装部位.....	15
图 14: 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, 记录六个方向的测量结果, 最终得到串扰指标.....	17
图 15: 力传感器的精度与准度.....	19
图 16: 六维力传感器的检定与一维力传感器相比更为复杂.....	19
图 17: 相比一维传感器, 六维力传感器对检定设备的要求更高.....	20
图 18: 各国航空航天领域科研机构研发出的六维力传感器标定检测设备, 尚未有标准产品.....	20
图 19: 单维力传感器一般需要 4 个应变片, 4 个应变片组成一个惠斯通电桥.....	22
图 20: 六维力传感器至少有 6 个惠斯通电桥, 需要 24 个应变片.....	22
图 21: 全球力和力矩传感器市场规模 (单位: 亿人民币)	23
图 22: 2017-2027 年中国六维力传感器市场规模及预测 (单位: 百万元, %)	24
图 23: 2017-2027 年中国六维力传感器销量规模及预测 (单位: 套, %)	24
图 24: 2023 年六维力传感器分行业市场份额.....	24
图 25: 2023 年六维力传感器分行业市场规模同比增长率.....	24
图 26: 2023 年中国市场六维力传感器厂商营收份额占比.....	27
图 27: 2022 年国内协作机器人用六维力矩传感器市场份额占比 (按销量划分)	27
图 28: 2020-2030E 六维力传感器内外资出货 (按价值量) 占比及预测.....	27
图 29: 宇立仪器简介与发展历程.....	30
图 30: 宇立仪器主营业务.....	30
图 31: 宇立仪器力传感器相关产品介绍.....	30
图 32: 坤维科技核心技术.....	32
表 1: 力传感器生产工艺流程 (以应变式力传感器为例)	8
表 2: 按所测力的维数不同给力传感器进行分类, 常见的有一维力传感器、三维力传感器和六维力传感器.....	10
表 3: 力传感器分类.....	11
表 4: 不同类型六维力传感器的代表企业及产品案例.....	13
表 5: 六维力传感器在机器人领域的应用.....	14
表 6: 使用力传感器的人形机器人代表产品情况梳理.....	16
表 7: 不论是结构解耦, 还是算法解耦, 均存在一定技术门槛.....	18
表 8: 六维联合加载设备的组成结构.....	20
表 9: 六维力传感器在下游各领域的应用现状.....	24
表 10: 对全球人形机器人量产带来的六维力传感器市场增量进行预测.....	25
表 11: 国内外六维力传感器主要生产商.....	26
表 12: 国内外六维力传感器产品对比.....	28
表 13: 六维力传感器相关公司情况梳理.....	37

1. 力传感器作为力的感知及测量工具，上游材料成本占比高，下游应用广泛

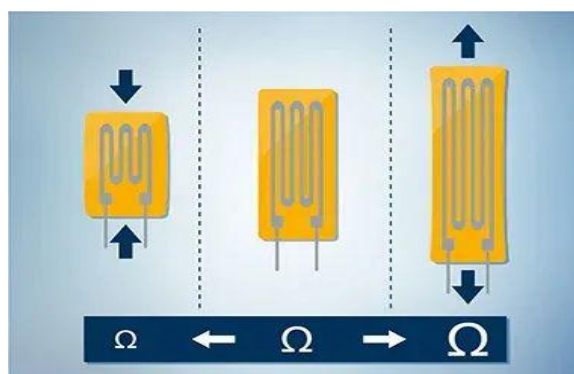
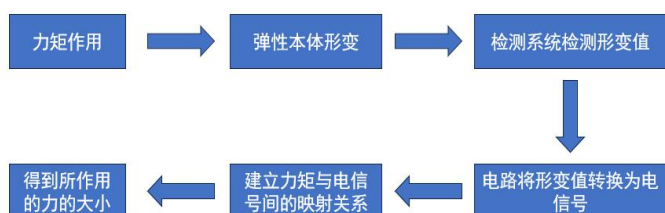
1.1. 力传感器可感受力或力矩大小并将力学量转换成相关电信号

力（或力矩、力觉）传感器是一种能感知力（或力矩）并转换成可用输出信号的传感器。力（或力矩、力觉）传感器的核心原理是将力作用下的形变转换成电信号，能检测张力、拉力、压力、重量、扭矩、内应力和应变等力学量。下文将力或力矩、力觉传感器统称为力传感器。

力传感器主要包括本体单元和应变/形变检测系统两大部分，由力敏元件、转换元件和信号处理单元等具体元件组成。当有力作用时，力施加于传感器本体单元上，并引起本体单元的应变或形变，检测系统（应变片或光学系统）可感知本体的应变或形变，通过电路将其转化为相应电压，继而通过测量电压值来表征力的大小，并转换成可用输出信号，最终实现力的测量。在组成元件中，力敏元件指力传感器中直接感受或相应被测量的部分，转换元件指力传感器中能将力敏元件感受或相应的被测量转换成适于传输或测量的电信号部分。例如应变式力传感器的力敏元件是弹性敏感元件（弹性体），常见的弹性体材料有铝合金、合金钢和不锈钢，转换元件为贴在弹性体上的应变片（计），最常见的应变片是电阻应变片，信号处理单元一般为电路，包括漆包线、PCB板等，应变片在电路中充当电阻。

图 1：力（或力矩）传感器基本工作原理

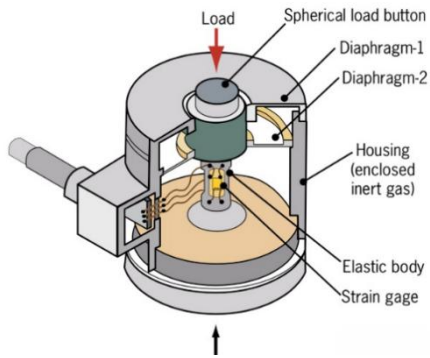
图 2：力传感器工作中，应变片被压缩，其电阻减少；如果拉伸，电阻会增加



资料来源：《与人共融机器人的关节力矩测量技术》（刘玉旺、刘金国、骆海涛），华宝证券研究创新部

资料来源：HBM 测试与测量公众号，华宝证券研究创新部

图 3：力传感器结构（以应变式力传感器为例）



资料来源：蓝炬光科公司官网，华宝证券研究创新部

图 4：力传感器结构（以应变式力矩传感器为例）



轴式扭矩传感器

法兰式扭矩传感器

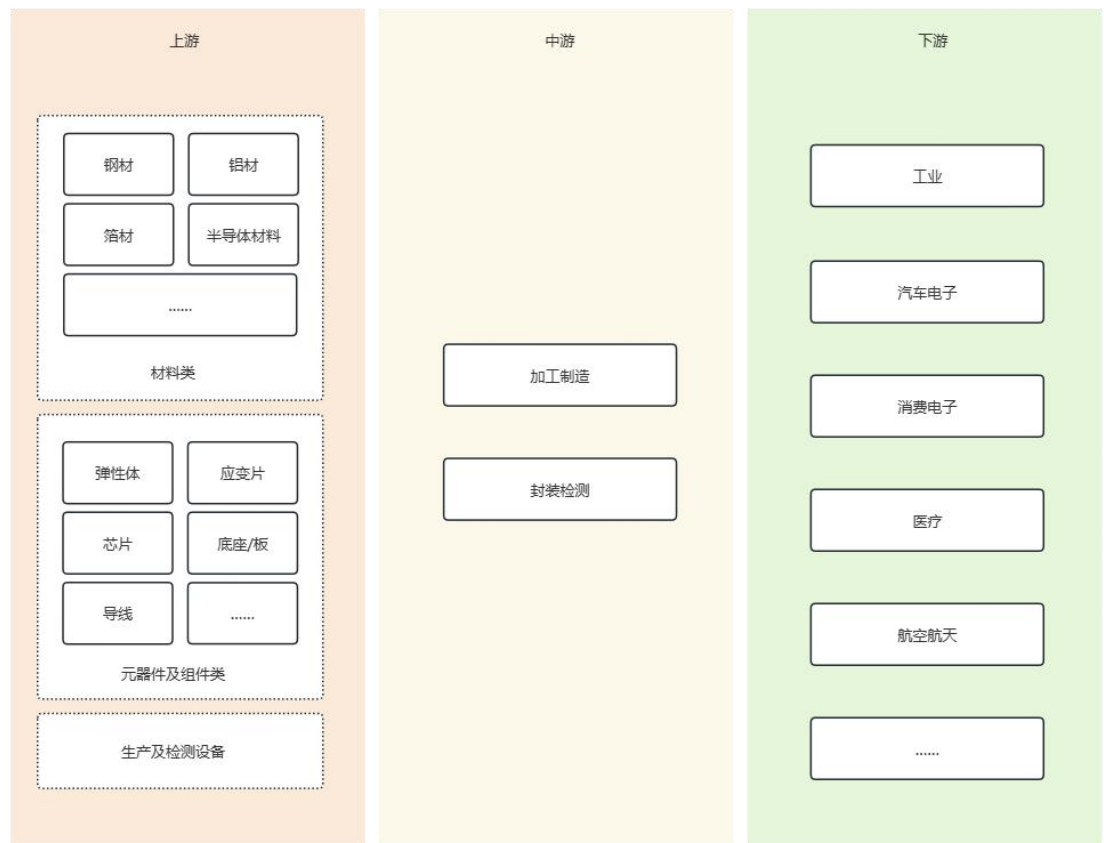
资料来源：HBM 测试与测量公众号，华宝证券研究创新部

力传感器的精度、稳定性、适用性和成本是用户购买力传感器产品的关键考量因素。具体在精确度、稳定性及适用性上，一般关注测量量程范围、测量精准度、体积及质量大小、抗电磁干扰性能等指标。例如由于传感器量程和精度成反比关系，选择合适量程的传感器才能使精度达到最大；在精密机构当中的传感器如何安装在狭小空间内，如何与机构融为一体等等。此外，在复杂应用场景下，传感器本体除精度外是否能适应应用场合也需要考量。

1.2. 力传感器上游材料成本占比较高，下游行业应用领域广泛

以应变式传感器为例，力传感器产业链上游主要为材料类、元器件及组件类、生产或检测设备细分行业，中游主要为力传感器的加工制造和封装检测，下游应用领域广泛，力传感器可应用于工业、消费电子、汽车电子、医疗、航空航天等领域。

图 5：力传感器产业链



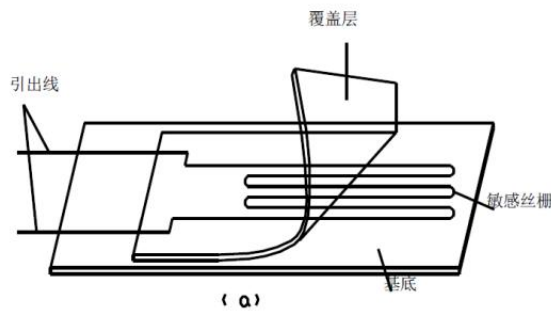
资料来源：柯力传感招股说明书，头豹研究院，华宝证券研究创新部

以应变式传感器为例，上游直接材料成本占比达 80% 以上。上游具体包括材料类如金属材料或金属箔材（钢材、铝材）、半导体材料等，元器件及组件类，包括芯片、电缆等，以及生产或检测设备。根据柯力传感 2022 年年报，柯力传感应变式传感器产品主要为应变式称重传感器，产品上游直接材料成本在产品营业成本中所占比重达到 80% 以上，其中金属材料如钢材等占比较高。

上游关键环节包括应变片的加工制造，其性能（灵敏系数和疲劳寿命等）将会直接影响传感器的性能。应变片一般由敏感丝栅、基底、覆盖层、粘贴剂、引出线组成。敏感丝栅是应变片的核心部分，其作用是将应变变化转换为电阻值变化。以金属电阻应变片为例，一般采用直径为 0.025mm 左右的镍铬或康铜细丝制成（或用很薄的金属箔通过光刻、腐蚀等工艺制成栅状），为了更好的使应变片感受结构的变形，电阻丝一般做成栅状。金属箔式应变片相对于金属丝式敏感栅粘贴面积大，可以更好地随被测物体变形，横向效应小，散热条件好，允许通过的电流值较大，可根据实际需要制成各种形状，便于批量生产等，因此已逐渐取代金属丝式应变片。金属电阻应变片的疲劳寿命与金属材料、基底材料以及后续的安装过程等相关。

应变片价格差异较大。根据京东工业品以及爱采购平台数据，国外品牌金属应变片（包括美国 Vishay、德国 HBM）价格区间 200-3500 元/片之间，国内品牌中航电测应变片（一般为金属应变片）价格区间为 6-110 元/片之间，国外品牌硅应变片（包括日本 NMB、美国 All Sensors、美国 Nova sensor 品牌）价格区间为 110-860 元/片之间，国内品牌硅应变片价格区间为 20-50 元/片之间。可见国内外品牌应变片价格差异较大，进口应变片价格较高。

图 6：电阻应变片结构（以丝式电阻应变片为例）

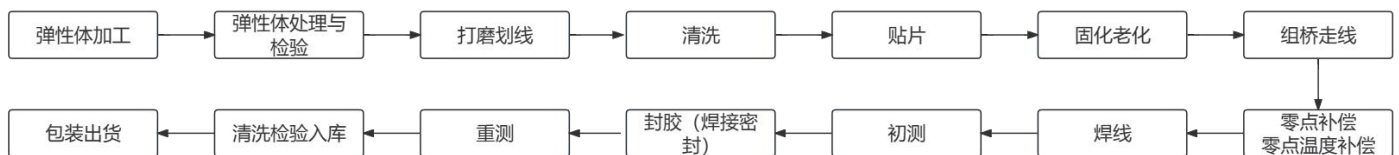


资料来源：中辽检测公众号，华宝证券研究创新部

以应变式力传感器为例，中游生产制造中主要环节包括弹性体加工，打磨、划线，贴片，固化、老化，组桥走线，零点补偿、零点温度补偿，焊线，初测，封胶、焊封，重测等多个流程。其中对最终产品性能影响较大的工艺流程包括弹性体的制造与加工、应变片的贴片、检测等环节。

- 弹性体结构、材料及所选加工工艺将直接关系到传感器工作性能的优劣（测力精度、灵敏度、寿命等）。原因在于力传感器在工作时，弹性体会产生变形，并在其表面产生应变，对弹性体的要求是尽可能线性并高重复性地转换力为应变，弹性体对力传感器的综合性能和长期稳定性起关键作用。结构设计方面，例如对于多维力传感器，由于存在耦合效应必须进行力的解耦，其中一个办法就是通过设计合理弹性体结构进行结构解耦，以提高力传感器的测力精度。材料与工艺方面，由于要求弹性体能够精确传递受力信息并保持在一样受力时的形变共同性和彻底复位性，且不随时间明显变化，故需要选择强度极限和弹性极限高，弹性模量的时间、温度稳定性好，弹性滞后小，机械加工和热处理产生的残余应力小的材料，例如不锈钢、合金钢、铝合金等，同时在工艺上也需要对材料进行特殊的热处理。此外，由于表面变形的不均匀会产生较大的残余应力，而切削用量越大、残余应力就越大，磨削加工产生的残余应力最大，因此需针对弹性体制定合理的加工工艺和规定适当的切削用量。
- 应变片贴片质量的优劣也将影响力传感器的精度、可靠性和稳定性。应变片的粘贴要求粘贴牢固、定位准确、焊接可靠、绝缘性好、防潮措施充足。

图 7：力传感器生产工艺流程（以应变式传感器为例）



资料来源：柯力传感招股说明书，华宝证券研究创新部

表 1：力传感器生产工艺流程（以应变式力传感器为例）

工艺流程	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

工艺流程	具体内容
	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 ($\Delta R \rightarrow \Delta U$) 从而得到一个应变变量。
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，华宝证券研究创新部

力传感器下游应用领域广泛，包括工业自动化、汽车、消费电子、医疗设备、航空航天等。力传感器的终端应用主要分为衡器与非衡器两大类。衡器主要指力传感器用于称重，如电子衡器、工业控制、在线控制、安全过载报警及材料试验机等领域。非衡器主要指力传感器通过测力用于过程控制、自动化等环节。以 Yole 统计的 2020 年全球 MEMS 压力传感器下游市场规模情况为例，汽车电子、消费电子、医疗、工业以及国防及航空航天为压力传感器的主要下游市场。

- 汽车为力传感器应用占比最大的领域，力传感器可用于保证作业质量，例如在碰撞测试、轮毂测试、座椅等零部件测试中发挥重要作用。
- 消费电子中的力传感器则主要用于触屏功能的实现，以及为用户提供更准确的导航信息、运动数据及健康数据。
- 在医疗行业中，力传感器可用于测量人体运动、重力、压力等，帮助医生了解病人的生理状态以及治疗方案的评估，以及应用于手术机器人等医疗设备的精密控制等。
- 在工业自动化领域，力传感器被广泛应用于各种机械臂、生产线上的力控环节，通过使用力传感器，可以精确地测量和控制力的输出，以确保生产过程中的各个环节都能够准确地完成各自的任务，如工业打磨、力控装配、拖动示教等，是应用最广泛的领域之一。当前力传感器在动力设备、工程机械、各类工作母机和工业自动化系统中，已成为不可缺少的核心部件，同时在人形机器人（以下简称人机）使用 TSA（刚性驱动器）方案的执行器中也有所应用。

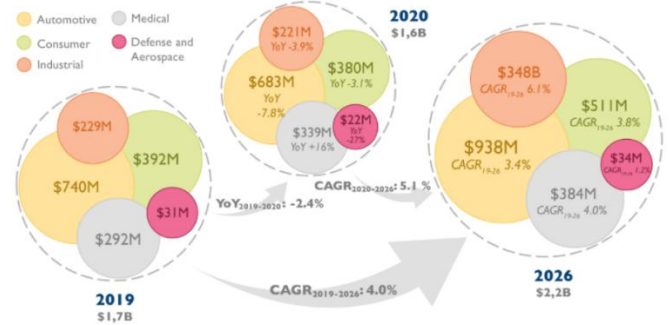
工业将是力传感器需求增长最为迫切的行业。以 MEMS 压力传感器为例，根据 Yole 统计，2019-2026 年间力传感器需求增长最快的行业为工业，CAGR 达到 6.1%。

图 8：2018-2026 年全球 MEMS 压力传感器下游应用市场规模（单位：亿美元）



资料来源：Yole 《Status of the MEMS Industry 2021》，歌尔微招股说明书，华宝证券研究创新部

图 9：2019-2026 年全球 MEMS 压力传感器下游应用市场规模预测（单位：百万美元）



资料来源：Yole 公众号，华宝证券研究创新部

2. 六维力传感器是维度最高的力传感器，已成为高性能人形机器人的标配

2.1. 六维力传感器是维度最高的力传感器，且市场产品较多为应变片式

根据所测力的维数不同，力传感器可被分为单维力传感器和多维力传感器。单维（或单轴）力传感器指测量单一维数方向上的力或力矩，同理多维（或多轴）力传感器则是可以检测多个维数方向上的力或力矩。最常见的是—维、三维和六维力传感器，二维和五维的力传感器较少。—维力传感器指测量单一维数方向上的力或力矩，一般包括称重传感器和拉力传感器。如果传感器只能测量三个维度的力或力矩，那么它就三维力传感器，以测量两个力和一个力矩的情况居多。如果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，那么这类力觉传感器一般被称为六维（轴）力传感器，六维力传感器是维度最高的力觉传感器。

表 2：按所测力的维数不同给力传感器进行分类，常见的有一维力传感器、三维力传感器和六维力传感器

表头	适用场景	适用场景图示	案例产品图示
一维力传感器	如果力的方向和作用点是固定的，此时可以选择用—维力传感器进行测量。可以通过安装定位，使力的方向和作用点都与—维力传感器的标定坐标轴一致，这样就可以对力进行精确测量。	<p>O——力传感器标定参考点 P——力的作用点 OXYZ——传感器标定坐标系</p>	

表头	适用场景	适用场景图示	案例产品图示
三维力传感器	如果力的方向随机变化，但力的作用点保持不变，并且与传感器的标定参考点重合，那么就应该用三维力传感器。因为被测量的力可以分解为三维力传感器标定坐标系下的三个正交分量，三维力传感器的三个测量单元可以分别对其一一测量。		
六维力传感器	如果力的方向和作用点都在三维空间内随机变化，此时应该选择用六维力传感器进行测量。因为空间中任意作用点上的力可以在六维力传感器的标定坐标系内，分解为沿标定坐标轴的三方向分力和绕标定坐标轴的三方向力矩。		

资料来源：坤维科技官方公众号，鑫精诚公司官网，华宝证券研究创新部

根据其测量原理不同，力传感器可以分为光电式、应变式、电容式、压电式等类型。其中，应变式传感器在稳定性、刚度、信噪比等多个方面具备优势，且因其精度高、价格低和易用而最受欢迎，应用范围最广。根据蓝炬光科官网数据，在所有力传感器中，应变式力传感器应用最为广泛，其使用量约占力传感器总量的90%左右，因此本文我们主要以应变式力传感器为例进行讨论。相比应变式传感器，压电、电容和光电等测量原理的传感器有一定的理论研究和实验基础，但下游尚未得到广泛应用。不过随着相关研究的不断深入，不同测量机理的传感器将会发挥自身优势被应用到各种场合，进而推动力传感器向多元化方向发展。

在应变式力传感器中，硅（或半导体）应变片式力传感器性能更优。应变式传感器按照应变片的分类，可以分为金属电阻应变片（工具钢、不锈钢、铝合金或钛铜等）或硅（半导体）应变片力传感器。半导体应变片式传感器与金属应变片式传感器相比，具有灵敏系数高（约高50-100倍）、机械滞后小、体积小（相比金属应变片式传感器小几个量级）、耗电少等优点。例如ATI的传感器（六维力传感器）使用的就是硅应变片，极大的提高了信噪比，内部结构稳固，稳定性极高，使用硅应变片的传感器厂商还包括SCHUNK、埃力智能。不过半导体应变片式传感器也存在温度系数大，非线性比较严重，价格略高（硅应变的工艺）等缺点。

- 金属电阻应变片又有丝状应变片和金属箔状应变片两种。通常是将应变片通过特殊的粘和剂紧密的粘合在产生力学应变基体上，当基体受力发生应力变化时，电阻应变片也一起产生形变，使应变片的阻值发生改变，从而使加在电阻上的电压发生变化。
- 硅应变片是利用半导体单晶硅的压阻效应制成的一种敏感元件，在实际应用中半导体应变片式传感器被称为压阻式压力传感器。早期该类传感器需要将半导体应变片粘贴在试件上测量试件应变或粘贴在弹性敏感元件上间接地感受被测外力，上世纪70年代后期，研制出了周边固定的力敏电阻和硅膜一体化的扩散型压阻式压力传感器，克服了粘贴带来的滞后、蠕变及固有频率较低和集成化困难的缺点，且把应变电阻条和误差补偿、信号调理等电路集成在一块硅片上，例如MEMS压阻式压力传感器。

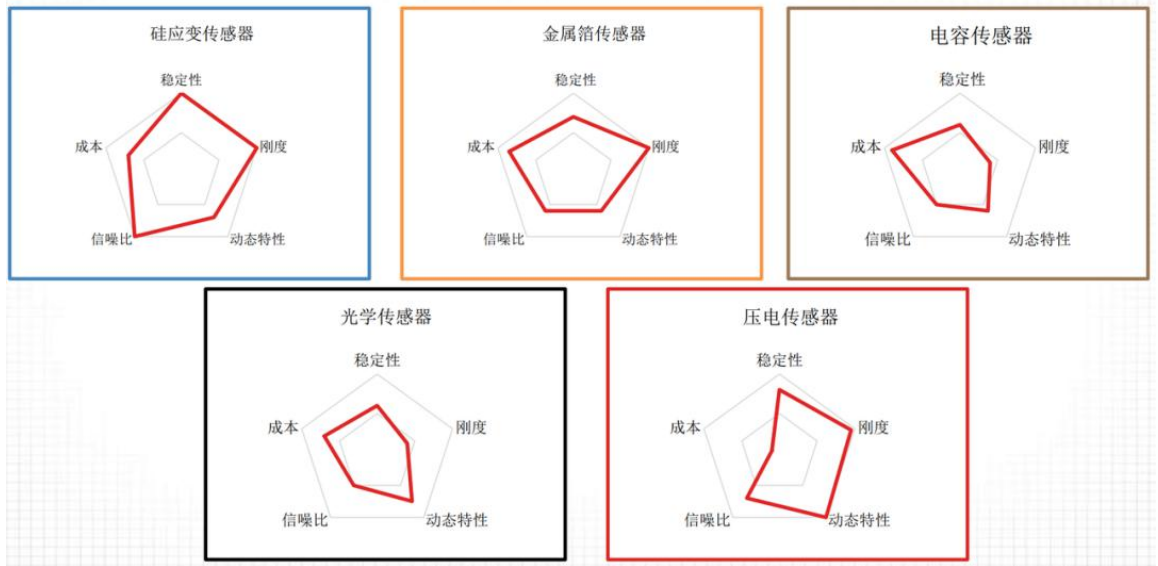
表 3：力传感器分类

分类	基本原理	优点	缺点
接触式 应变式	通常采用应变片测量其粘贴处的弹性元件的形变量，并利用相	结构简单、价格较低	金属应变片容易老

分类	基本原理	优点	缺点
测量	应的力/力矩换算公式（形变转化为电阻变化）及搭建的电桥电路，建立传感器输出的电信号与力矩值之间的关系，从而确定机器人关节输出力矩大小。	廉、测量精度较高、刚度高	化、脱落，易受温度影响及电磁干扰，动态响应差
压电式	压电式力/力矩传感器是基于介质材料的压电效应来实现测量的，它是一种典型的有源传感器。压电效应的作用，可以使得压电材料上所作用的机械量与压电材料所输出的电学量进行相互转换（形变改变电荷），即可实现利用压电材料测量力/力矩以及其他参量的目的。目前在嵌入式力矩传感器中的应用较少，过去较少用于六维力传感器。	测量范围大、刚度好、无电磁干扰、动态性能好	测量精度低、静态表现差、结构尺寸大
非接触式测量	电容式力矩传感器是将被测非电量的变化转换成电容量的变化的一种传感器。电容式力矩传感器的设计通常采用面积变化或极距变化的形式。	成本较低、非接触式测量、动态响应快、鲁棒性好、适用于高温辐射等恶劣环境	线性度及测量精度较低，易受电磁干扰、稳定性较差
光电式	光电（光学）式力矩传感器是将被测量的变化转换成光信号的变化，再通过光电器件把光信号的变化转换成电信号的一种传感器。	测量精度高、非接触式测量、无电磁干扰、动态性能良好	刚度差，结构尺寸大、价格高、工作温度范围窄、多维实现困难

资料来源：《与人共融机器人的关节力矩测量技术》（刘玉旺、刘金国、骆海涛），《多维力传感器的研究现状分析》（张晨），ATI，GGII（高工业机器人），传感器技术公众号，华宝证券研究创新部

图 10：不同类型力传感器性能比较






资料来源：ATI，华宝证券研究创新部

注：稳定性指传感器在一段时间内保持其性能的能力；刚度是指材料或结构在受力时抵抗弹性变形的能力，是材料或结构弹性变形难易程度的表征；动态特性是指输入量随时间变化时传感器的响应特性，一个动态特性好的传感器，其输出将再现输入量的变化规律，既具有相同的时间函数；信噪比指信号的强度与噪声（干扰因素）的强度之比，信噪比越高表示传感器的测量精度越高，测量结果更加可靠；成本指成本优势。

目前市场应用的六维力传感器大部分也是应变片式。与一般力传感器分类类似，六维力传感器主要包括电容式、压电式、光电式和应变片式等类型。相较于因原理和结构限制而较难用于多维力/力矩测试的电容式和电感式传感器、以及因静态性能较差而无法在多场景使用的压电

式传感器，电阻应变式力传感器能够广泛兼顾不同需求，既能测静态载荷、又能测动态载荷，因此更受研究领域和市场欢迎。不过随着相关研究的不断深入，不同测量机理的传感器将会发挥自身优势被应用到各种场合，进而推动六维力传感器向多元化方向发展。

表 4：不同类型六维力传感器的代表企业及产品案例

传感元件类型	代表企业	产品案例
应变片式	ATI（美国）、AMTI（美国）、宇立仪器（中国）、坤维科技（中国）、鑫精诚传感器（中国）、海伯森（中国）、神源生智能（中国）、Sintokogio（日本）、Bota Systems AG（瑞士）、SCHUNK（德国）、ME-Meßsysteme GmbH（德国）、埃力智能（中国）	
光学式	OnRobot（丹麦）	
压电/电容式	Robotiq（加拿大）、Robotous（韩国）、WACOH-TECH（日本）、Kistler（瑞士）	

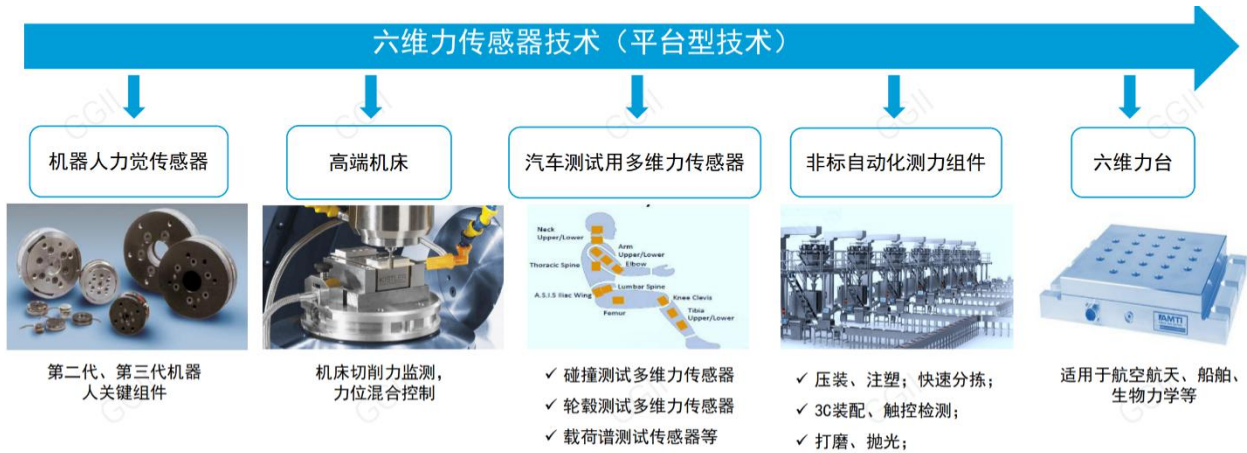
资料来源：GGII，宇立仪器公司官网，OnRobot 官网，WACOH-TECH 公司官网，AMTI 官网，华宝证券研究创新部

2.2. 六维力传感器的优点使之成为高性能人形机器人的标配

六维力传感器能给出最为全面的力觉信息以及提升传感精度，并非多个低维的力传感器可替代的。由于力是矢量的属性，意味着它既有大小也有方向，只有当作用力的方向与传感器的测量轴线完全一致时，测量结果才是准确的。否则即便是三维力传感器，也会因为力作用点的位置变化引入弯矩，导致测量误差。而相比其他维度传感器，首先六维力传感器能提供更全面的力或力矩数据，增加了测量的维度；其次六维力传感器通过高精度的联合加载标定，可获得强大的非线性拟合能力，其内部算法会解耦各方向力和力矩间的干扰，增加了测量准确性；最后，在获取力矩信息后，六维力传感器还可以利用力矩信息来推算获取受力部件的姿态，监测力矩是否在安全范围内，以避免传感器的过载损坏。因此当应用场景中力的作用点离传感器标定参考点的距离较远、随机变化或测量精度要求较高时，六维力传感器以其独特的测量能力和高级解耦算法，成为提高测量准确性和可靠性的必选方案。

当前六维力传感器被广泛应用于汽车行业的碰撞测试、轮毂、座椅等零部件测试以及航空航天飞行器、生物力学、医疗领域、科研实验、机器人与工业自动化等众多科技领域。六维力传感器的需求最早来自航空航天飞行器研究领域，安装在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，包括飞行器的升力、阻力、侧向力、俯仰力矩、偏航力矩和滚转力矩，后来逐渐应用到汽车测试、生物力学和机器人等众多科技领域。六维力测量技术实际上是个平台技术，因此根据应用场景的环境、载荷、安装、通讯、算力、动力学特性等需求不同，六维力传感器在不同行业中体现出了不同的产品形态。

图 11：六维力传感器下游应用






资料来源：GGII，华宝证券研究创新部

在机器人领域，为提升机器人操作的精细化与柔性化程度，六维力传感器是不可或缺的零部件之一。六维力传感器在传统机器人中的应用场景包括力控、力觉反馈、质量检测、动态控制，在人形机器人中的应用场景包括力控、摆动稳定控制、安全控制。

表 5：六维力传感器在机器人领域的应用

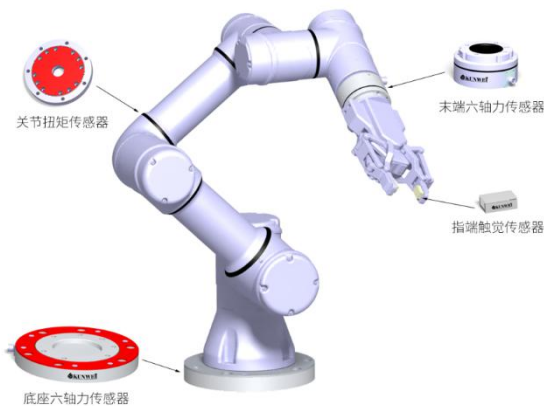
应用场景	具体用途	案例
在传统机器人领域的应用场景：		
力控制	六维力传感器可以测量机器人末端执行器施加的力和力矩，从而实现机器人的力控制。例如，在装配过程中，机器人需要施加一定的力来将零件装配在一起，六维力传感器可以帮助机器人控制施加的力度和方向，从而确保装配的准确性和质量；在抛光打磨应用中，六维力传感器可以赋予机器人更好的力感知能力，更好的满足复杂曲面的抛光打磨作业需求。	
力觉反馈	六维力传感器可以将机器人末端执行器施加的力和力矩转换成电信号，通过控制系统反馈给机器人，从而实现力觉反馈。例如，在搭载作机械臂的医疗手术机器人中，六维力传感器可以帮助医生感知手术器械与人体组织之间的力度和压力，从而更加精准地进行手术操作。	
质量检测	六维力传感器可以测量机器人末端执行器施加的力和力矩，从而实现对产品质量的检测。例如，在焊接过程中，六维力传感器可以测量焊接枪施加的力度和方向，从而判断焊接质量是否符合要求。	
动态控制	六维力传感器可以实时测量机器人末端执行器施加的力和力矩，从而实现机器人的动态控制。例如，在搬运过程中，机器人需要根据物体的重量和形状来调整施加的力度和方向，六维力传感器可以帮助机器人实现动态控制，从而更加高效地完成搬运任务。	

应用场景	具体用途	案例
在人形机器人领域的应用场景：		
力控	机器人手臂可以用于进行复杂的力控操作，比如对物品的抓取、装配或拍打等操作，六维力传感器可以感知机器人手臂施加在物品上的力和扭矩，以便机器人控制系统进行精密控制。	
摆动稳定控制	人形机器人的行走过程中需要保持平衡，此时也需要用到六维力传感器，它可以感测机器人脚下地面反作用力，以便机器人控制系统可以调整人形机器人手臂和身体的姿态。	
安全控制	六维力传感器可以用于安全控制系统，以实现机器人在进行危险操作之前或者人类接近机器时的自动停止，避免对人体造成伤害。	

资料来源：GGII，蓝点触控，特斯拉 2023 年 12 月通过 X 平台发布的第二代 Optimus 人形机器人展示视频，ATI 公众号，华宝证券研究创新部

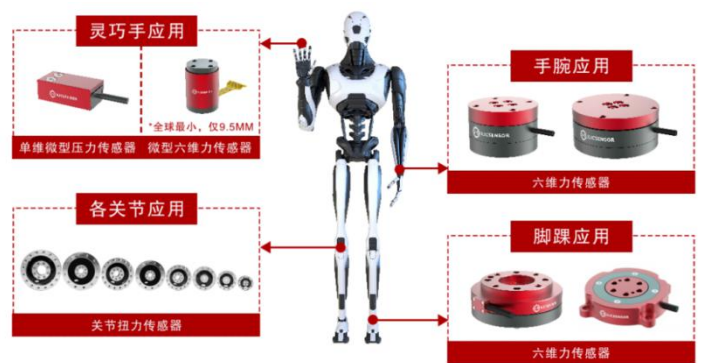
六维力传感器主要安装在机器人的末端部位，已成为高性能人形机器人的标配。尽管对于不同类型的机器人，使用传感器的力控方案采用的力传感器类型略有区别，但六维力传感器主要安装位置位于机器人末端。工业机器人中，有可能使用到一维力传感器、三维力传感器或六维力传感器，在实际应用过程中，一种力控方案是末端集成多维力传感器，另一种是各关节集成一维的扭矩力传感器。协作机器人则一般使用关节扭矩传感器（单轴力矩传感器）和六维力传感器（安装在末端），有些也会用到电子皮肤。人形机器人可能使用三维力传感器、六维力传感器以及关节扭矩传感器或一维拉力传感器，同时有些也会用到触觉传感器、电子皮肤等。正是由于人形机器人对双足行走和手部精细操作的柔顺控制要求很高，因此六维力传感器通常安装在手腕、脚腕、足底或手部，在运控规划、姿态调整、力度感知等中起到重要作用，以提升手部操作的灵活性以及脚部行走的稳定性。目前已使用六维力传感器的人机产品包括特斯拉 Optimus、优必选 Walker X、达闼小紫 XR-4、本田 ASIMO、美国宇航局 Valkyrie 等。

图 12：传统机器人六维力传感器与关节扭矩传感器安装部位



资料来源：坤维科技，华宝证券研究创新部

图 13：人形机器人六维力传感器与关节扭矩传感器安装部位



资料来源：鑫精诚，华宝证券研究创新部

表 6：使用力传感器的人形机器人代表产品情况梳理

公司	型号	六维力传感器	其他力传感器
优必选	Walker X	手部与脚部分别有 2 个六维力/力矩传感器	/
达闼	小紫 XR-4 (双足)	脚部采用了六维力矩传感器	关节可选配扭矩传感器
	Ginger 2.0 (轮式)	有配置	关节可选配扭矩传感器
小米	CyberOne (铁大)	/	未配置 (以公司自研的微电机 Cybergear 为例, 半直驱设计)
傅利叶	Fourier GR-1	/	自主多维力传感器
追觅	通用的人形机器人	/	或配置多维力传感器 (高性能伺服关节具有多维力觉感知)
帕西尼	Tora (轮式)	/	手指表面搭载自研高精度三维力传感器以及多维度触觉传感器
开普勒	先行者 r K1 D1 S1	/	拉压力传感器
特斯拉	Optimus	Gen2 或配置六维力传感器 (手部、脚部)	扭矩传感器、一维力传感器
本田	ASIMO	两只脚分别带有六维力传感器	手掌上有触觉传感器
美国宇航局	Valkyrie	脚部配置六维力传感器	/
Aldebaran	NAO	/	九个触觉传感器和八个压力传感器
Robotics (软银)	Pepper (轮式)	/	触觉传感器

资料来源：各公司或研究机构官网，各公司官方微信公众号，Explorer Robots，高工机器人，2023 年世界机器人大会官网，机器人大讲堂公众号，新智元公众号，机器之心公众号，DF 创客社区公众号，华宝证券研究创新部

注：“/”为未公布，未公布不代表没有。

3. 六维力传感器生产技术难度大、生产效率低，产品价格昂贵、利润较高

3.1. 六维力传感器生产技术难度大，存在技术、资金、人才壁垒

相比其他维度力传感器，六维力传感器技术、资金壁垒最高。六维力传感器的技术难度和使用难度都比较大，它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，它的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，再加之六维联合加载标定的复杂性，六维力传感器的技术难度可谓是一维力传感器难度的六次方。因此除了传统力传感器的关键技术外，为了保证六维力传感器的稳定性和精确度，其核心技术包括解耦方法、六维联合加载标定检测系统、降低零点漂移和温度漂移等。以上这些技术既涉及到非常专业的硬件、软件设计开发能力，又必须依赖大量的实践经验指导和高精度的设备，且部分设备需要自研，投入成本较高。六维力传感器行业也存在人才壁垒。六维力传感器有两个特点，一个是作为测量仪器它对可靠性要求很高，所以需要完善的专业工程师团队；另外，六维力传感器涉及的领域众多且附加值很高，需要专业的有行业深耕的技术专家。研发六维力传感器需要涉及多个领域的专业人才，以确保从理论到实践的全面覆盖。

3.1.1. 壁垒一：需要通过解耦来减少串扰，解耦方法的掌握存在技术门槛

多维力传感器的维间耦合又称维间干扰（串扰），即在涉及多个负载的测量任务时，当精确施加（输入）某一单维度力或力矩时，原理上基于泊松效应，由于传感器的横向灵敏度，在其他轴上也有很小的输出信号，即其他维度会产生力分量的输出，影响传感器的精度。多维力传感器不可避免地会存在维间耦合，其误差大小与传感器的结构参数、加工精度、贴片工艺、测量原理等多重因素有关，一般用串扰指标来衡量多维力传感器各测量方向间的耦合影响，反映测量误差水平。比较优秀的串扰在 1%FS（Full Scale，全量程）左右，2-5%FS 比较常见。

图 14：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，记录六个方向的测量结果，最终得到串扰指标

载荷组	标定载荷 (理论真值)						测试结果					
	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
1	100%FS	0%FS	0%FS	0%FS	0%FS	0%FS	99.8%FS	1.2%FS	2.3%FS	1.7%FS	2.6%FS	2.9%FS
2	0%FS	100%FS	0%FS	0%FS	0%FS	0%FS	0.3%FS	100.1%FS	2.7%FS	1.1%FS	2.7%FS	1.4%FS
3	0%FS	0%FS	100%FS	0%FS	0%FS	0%FS	1.8%FS	1.2%FS	99.7%FS	1.9%FS	2.6%FS	2.7%FS
4	0%FS	0%FS	0%FS	100%FS	0%FS	0%FS	2.1%FS	1.6%FS	2.1%FS	100.5%FS	2.6%FS	1.2%FS
5	0%FS	0%FS	0%FS	0%FS	100%FS	0%FS	1.2%FS	2.1%FS	1.6%FS	1.7%FS	100.6%FS	2.5%FS
6	0%FS	0%FS	0%FS	0%FS	0%FS	100%FS	1.3%FS	1.3%FS	2.5%FS	2.3%FS	2.6%FS	99.9%FS

备注：FS——Full scale；FS表示六维力传感器各方向的额定量程。

资料来源：坤维科技公众号，华宝证券研究创新部

注：载荷组 1 中，仅仅对 Fx 方向加载到额定载荷，并且假设加载方向和载荷值是非常准确的，所以 Fx 是 100%FS，其它方向是 0%FS。表格右侧 Fy、Fz、Mx、My、Mz 的测量结果就是在 Fx 作用下的串扰。因为此时 Fy、Fz、Mx、My、Mz 的理论真值都是 0。Fy、Fz、Mx、My、Mz 测量结果就体现了 Fx 对其它五个测量方向的耦合干扰情况。同理，载荷组 2-6 中的测量结果，分别体现了在单独加载 Fy、Fz、Mx、My、Mz 时，各自对其它测量方向造成的耦合干扰情况。多维力传感器的厂商往往选择表格中的最大串扰值作为产品的串扰指标。比如，这张表格中的 2.9%是串扰结果的最大值，可以在产品手册里写“串扰≤3%”。

减少多维力传感器耦合误差的方式主要有结构解耦和算法解耦两种。其中，结构解耦指改变结构和材料、改善加工工艺等，即从根源上进行结构解耦，例如采用并联式的传感器结构等。尽管结构解耦理论上可以完全解耦，但在实际应用中传感器的本体结构无论如何优化，都无法实现对载荷的完全解耦，因此为了彻底对三个方向的力和力矩进行解耦，还必须引入数学模型，即算法解耦。算法解耦也被称为软件解耦，指利用合适的算法推导出六维力传感器输入值与输出值的关系。实现软件解耦的方法有两种：第一种是线性解耦，最常用的是最小二乘法；第二种是维间（非线性）解耦，适用于线性解耦无法解决问题的场合，最常使用的是机器学习算法，包括 BP（back propagation，反向传播）神经网络、随机森林和极限学习机等，将传感器的八通道输出信号代入机器学习模型就可以计算出三个方向的力和力矩的精确值。由于传感器结构和电桥电路的非线性，最小二乘法求得的结果误差较大，因此工业中多用非线性解耦算法来进行求解。

不论是结构解耦，还是算法解耦，均存在技术门槛。结构解耦虽然原理简单，但结构设计存在较多难点，包括每个测量单元的变形模式必须有选择性、测量单元的结构必须和电路相结合、传感器本体（弹性体结构）刚性与灵敏度以及小型化之间的平衡等等，因此结构设计及优化是六维力传感器产品能成功研制的基础，且需要深入的专业知识和丰富的设计经验才能驾驭这项工作。此外，结构解耦会增加加工难度和制造成本，综合国内外现状，维间耦合较小的弹性体结构普遍过于复杂、制造困难，而且都有其特定的应用范围，不利于传感器产品的一致性。而算法解耦中，非线性算法的训练样本以及模型的非线性模拟能力将会直接影响传感器新能与生产效率，同时高效的软件解耦技术涉及到 MDOE（现代试验设计）和统计分析等专业知识和某些特定的经验方法，是常规力学传感器厂商无法在短期内掌握和摸索出来的，构成了一定技术门槛。

表 7：不论是结构解耦，还是算法解耦，均存在一定技术门槛

结构解耦	算法解耦
1、为抑制各轴间的相互干扰，每个测量单元的变形模式必须有选择性，即对某方向载荷敏感并产生较大应变的同时，在其它方向上又具有较大刚性，从而在结构上首先对被测载荷进行解耦。	1、对于非线性算法解耦，训练样本的合理性以及强迫学习算法模型的非线性模拟能力直接影响到传感器的测量性能和生产效率。
2、测量单元的结构必须和电路相结合，即使在非测量方向载荷的作用下存在明显扰动，也能达到不输出或输出较小干扰信号的效果，从而进一步对被测载荷进行解耦。	2、高效的机器学习技术涉及到 MDOE 和统计分析等专业知识和某些特定的经验方法，而这些都是常规力学传感器厂商无法在短期内掌握和摸索出来的。
3、为了减小各方向间的相互干扰，传感器本体刚性越大越好，但需要考虑必要的灵敏度，否则影响测量性能。在提高传感器刚性的同时保证传感器灵敏度，需要运用结构优化技术。	/
4、为了提高产品的通用性，传感器本体结构必须小型化。但小型化会降低传感器刚性。解决这个矛盾也需要采用相应的结构优化技术。	/

资料来源：GGII，华宝证券研究创新部

3.1.2. 壁垒二：需要六维联合加载检定来进行解耦、提高精准度，设备研制存在门槛

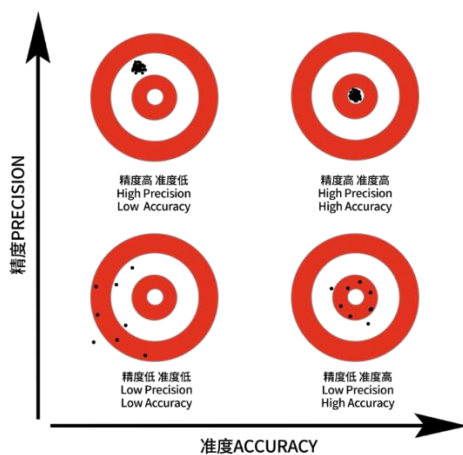
六维联合加载标定与检测对于研发和生产高精度多维力传感器来说尤为必要。

- 首先，检定（检测与标定）将直接影响传感器的解耦过程和解耦结果的检验。传感器的标定是指获得传感器固件参数，检测是获得传感器的精准度。标定指通过加载理论值的载荷并同时记录传感器输出的对应原始信号的方式，获得六维力传感器内部算法的各个参数，即建立传感器原始信号和受力之间的映射关系，并由此获得解耦算法的数学模型和参数。检测指通过加载已知理论真值的载荷并同时记录传感器测量结果的方式，统计、比较测量结果和理论真值的差异，获得传感器的精度（测量结果之间的重复性）和准度（测量结果与理论真值的偏离程度），可用于检验解耦方法的好坏。
- 其次，需要对多维力传感器以其最高测量维度进行联合加载检定，才能使传感器的精度更好、串扰更低。例如六维力传感器需要六维联合加载检定，即采用三个方向的力和三个方向的力矩同时加载的方式，每组检验载荷都必须是 F_x 、 F_y 、 F_z 、 M_x 、 M_y 及 M_z 的随机组合、满足非相关性的要求且较为均匀地分布在样本空间中。原因在于六维力传感器在承受多个维度的力的同时作用时，非线性特性非常显著，六个维度的线性模型叠加是无法精准描述这种非线性效应的。对于检测来说，六维联合加载的方

式获得的精度和准度，可以很清晰地评价传感器各测量方向在量程范围内的测量误差水平。例如若某个六维力传感器产品（以下简称为六维力产品）的准度优于 0.5%FS，对于 F_x 的测量结果，在测量过程中不论 F_y 、 F_z 、 M_x 、 M_y 及 M_z 以什么样比例和绝对值对 F_x 进行干扰， F_x 的测量结果与理论真值的偏差在 0.5%FS 以内，对于其它五分方向来说也是如此。对于标定来说，交叉样本点可以使传感器的受力情况模拟得非常接近真实的使用情况，其次这种方式的标定便于考察传感器在多维载荷同时作用下的非线性力学特性，可以有效改善传感器结构设计，也可以大幅优化解耦算法的数学模型。简单来说，只有在六维力传感器标定和检测过程中采用这种六维联合加载的方式，才能实现传感器 0.5%FS 的准度。

六维联合加载检测或标定设备是高精度六维力传感器研发和生产的必要条件，但当前该类设备尚不属于标准品，其研制存在一定技术门槛和较高成本投入。与一维力传感器相比，六维力传感器对检定设备（六维联合加载设备）的要求较高，无法通用一维传感器的检定设备。六维联合加载设备主要组成部件包括传感器支撑装置、自动加载系统、位移测量系统及数据采集系统。六维联合加载设备目前还没有标准产品可以直接采购，一般都是由六维力传感器厂商自行研制，不同公司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，有上百个 Know How，同时又非常依赖工程经验和大量的六维力传感器标定操作经验。一旦某个细节考虑不周全，加载效果就会不理想，加载设备自己产生的耦合误差可能超过 1%FS，这势必无法标定出高准度的六维力传感器。此外，该设备的成本较高，造价约在 500-800 万/套，同时为了适应不同量程的传感器，一般至少需要建设 3-5 套系列化的标校系统。

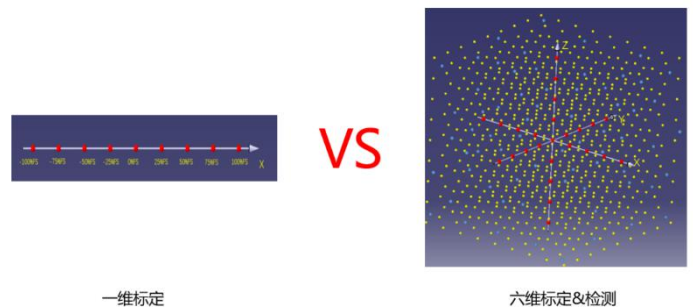
图 15：力传感器的精度与准度



资料来源：坤维科技公众号，华宝证券研究创新部

注：假设理论真值是圆环的中心，黑点表示测量值。右上方图示就可以看出是准度高，精度也高。

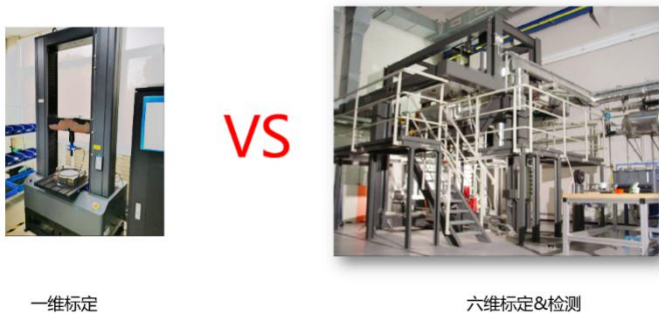
图 16：六维力传感器的检定与一维力传感器相比更为复杂



资料来源：坤维科技公众号，华宝证券研究创新部

注：一维标定的样本点（约 9 个）远小于六维检定的样本点（约 53 万个）。

图 17：相比一维传感器，六维力传感器对检定设备的要求更高

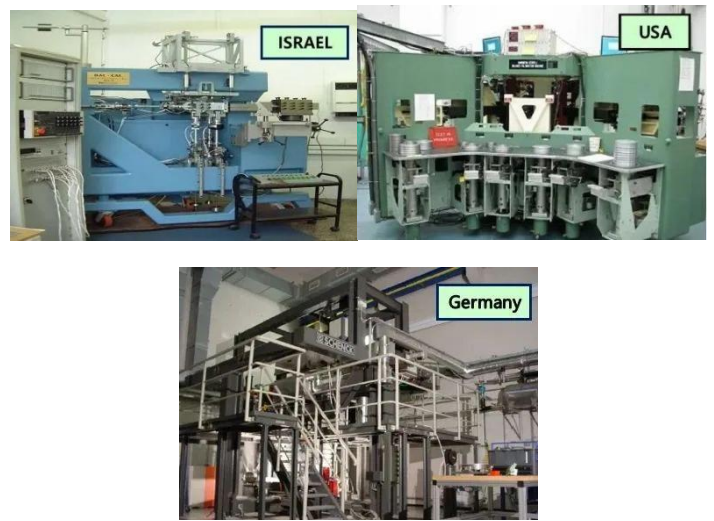


一维标定

六维标定&检测

资料来源：坤维科技公众号，华宝证券研究创新部

图 18：各国航空航天领域科研机构研发出的六维力传感器标定检测设备，尚未有标准产品



资料来源：坤维科技公众号，华宝证券研究创新部

表 8：六维联合加载设备的组成结构

组成部分	具体包括
传感器支撑装置	支撑传感器的装置部分。
自动加载系统	加载系统包括自动加载装置、载荷适配器及其传力组件、载荷换向装置。自动加载装置采用高精度砝码作为力源施加标校载荷。载荷适配器及其传力组件将传感器与自动加载系统连接，使标准载荷作用在被校传感器上。
位移测量系统	位移测量系统由 7 台高分辨率激光位移传感器和支架组成，用于测量标校过程中载荷适配器的空间位移。
数据采集系统	数据采集系统用于采集传感器输出的电压信号。

资料来源：GGII，华宝证券研究创新部

3.1.3. 壁垒三：需要降低漂移来减少误差、提升稳定性，控制漂移误差存在难度

传感器的漂移是指在外界的干扰下，输出量发生与输入量无关的、不需要的变化。零漂和温漂都代表着传感器长时间工作的稳定性。

- **零点漂移**，又被称为**零点温度漂移或零漂**，当传感器无输入时，每隔一段时间进行读数，其输出偏离零值，即为零点漂移，一般用温度每变化 10℃时，引起的零平衡变化量对额定输出的百分比来表示。传感器的零点如果漂移，则必须经常进行仪器调零，以消除测量误差，这给实际应用带来困难。且一旦零点漂移量超出传感器的调零范围，将使传感器无法正常使用。
- **温度漂移**，也被称为**灵敏度温度漂移或温漂**，当温度变化时，传感器输出值的便宜程度，一般以温度变化 1℃，输出最大偏差与满量程的百分比进行表示，温漂将影响力传感器的测量结果。

应变式力传感器产生零漂及温漂的原因在于三个方面。一是材料的弹性形变，所有的压力传感器都是基于材料的弹性形变来工作的，每次弹性恢复后总会产生一定的弹性疲劳，这可能导致传感器的输出发生漂移。二是温度变化，温度变化是影响力传感器输出的重要因素。由于温度会使弹性体及应变片材料（不论是金属还是硅）产生热胀冷缩效应，电阻会随温度发生变化，因此温度的变化可能导致传感器的输出发生漂移，且传感器上电后，内部元件的温度会逐

步升高。因此为了减小这种影响，通常需要进行温度补偿。三是电路设计及元器件质量，传感器的电路设计以及元器件的质量也可能导致漂移。例如，电路中的虚焊点、应变计本身性能不稳定、弹性体的应力释放不完全以及应变片胶层有气泡或杂质等都可能导致传感器的输出发生漂移。

尽管漂移是不可避免的，但可以通过**硬件补偿（合理的设计、选择适当的材料）、软件补偿、温度补偿以及自我矫正法**等来减小漂移。以上方法可同时使用，但对于力传感器厂商来说，**将漂移控制在上电后的一定时间范围内以及将整体漂移量控制在较低水平仍存在技术壁垒。**

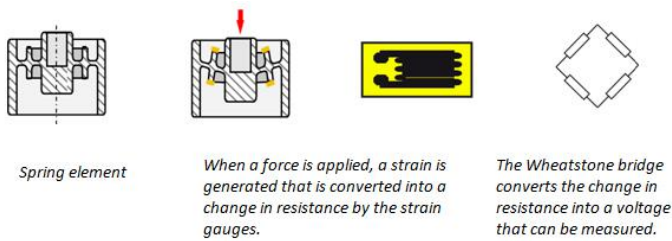
- **硬件补偿法：**对于应变力传感器，硬件补偿方法包括在桥臂上串、并联恰当恒定电阻法，桥臂热敏电阻补偿法，桥路外串、并联热敏电阻补偿法等。
- **软件补偿法：**在信号采集过程中，对于零点漂移的问题，可以采用软件补偿的方法。通过软件对这些零点漂移进行补偿，可以提高传感器的测量精度。
- **温度补偿法：**为了消除温度对零点的影响，可以进行温度补偿。常见的温度补偿方法有两点法和多点法。两点法是在两个已知温度点进行校正，通过线性插值得到其他温度下的零点值。
- **自动校正法：**自动校正法是一种较为智能的校正方法，通过使用专业的自动调零装置或反馈校正算法来实现。自动调零装置可以根据设定的参数进行自动调零，而反馈校正则是根据传感器输出的实际值与期望值的差异，对传感器进行实时校正，以保持准确性。

3.2. 六维力传感器工艺流程更为复杂，且尚未完全实现自动化生产

六维力传感器作为高精度力传感器的一种，相比普通力传感器在工艺流程上更为复杂。以柯力传感高精度传感器项目为例，相比普通力传感器，高精度传感器增加的工艺包括：在弹性体材料处理工艺比，高精度传感器增加了深冷工艺，消除组织内应力，确保弹性体材质更精良和更稳定的金属组织；增加了贴片后的老化工艺和前道过载预压及振动处理，对零点稳定性做分析筛选，以满足环境应力筛选的要求；采用焊接性能更可靠的连续激光焊接和精密氩弧焊接工艺，提升防护能力；内置高精度的数字芯片，提高信号分辨率，具有自动修正补偿功能；集成多种物理量的传感器，对工作状态进行监测，并进行大数据分析，进行故障判断和预警。

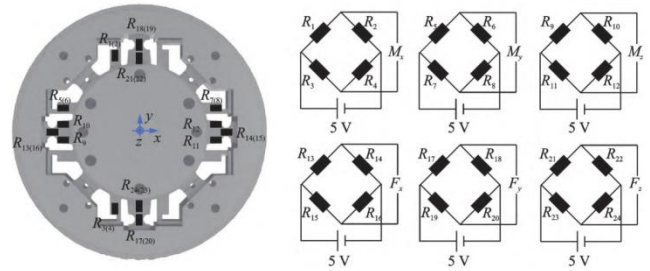
六维力传感器工艺流程尚未实现全自动化生产，例如贴片环节尚未自动化，而六维力传感器应变片数量较多。首先，六维力传感器所需应变片的数量远高于单维力传感器，单维力传感器会采用4个应变片，两个被拉伸，另外两个被压缩，四个应变片被组成一个惠斯通电桥。而六维传感器最少有6个测量桥路，每个桥路的应变片的布置方式应确保输出信号仅为三个方向之一的力矩或力，因此一般来说至少需要24个应变片，部分产品设计在此数量上略有调整，一般在16-40片之间。其次，尽管已有部分企业针对单维传感器进行自动化贴片生产的尝试，但是目前力传感器尚未实现完全自动化贴片，国内外技术条件下贴片仍然必须由人工完成，尤其是对性能要求较高的六维力传感器。因此，六维力传感器仅在贴片环节就需要耗费更多的时间和人力成本。

图 19：单维力传感器一般需要 4 个应变片，4 个应变片组成一个惠斯通电桥



资料来源：HBM 官网，华宝证券研究创新部

图 20：六维力传感器至少有 6 个惠斯通电桥，需要 24 个应变片



资料来源：中国知网，《一种低耦合高精度六维力传感器设计及应用》（宋逸），华宝证券研究创新部

3.3. 六维力传感器价格高、利润空间大，人形机器人量产预期下或将掀起降价潮

六维力产品平均价格在 2-4 万左右，远高于低维力传感器。根据 GGII 数据，2022 中国六维力/力矩传感器市场规模 2.39 亿元、市场销量 8360 套，机器人用六维力传感器市场规模约为 1.56 亿元、市场销量为 4840 套。故 2022 年平均每套六维力传感器（传感器+数据采集卡+软件）价格约为 2.86 万元，平均每套机器人用六维力传感器（传感器+数据采集卡+软件）价格约为 3.23 万元，因此国内市场每套六维力传感器价格约在 2-4 万左右。对比低维的关节力矩传感器，据 MIR（睿工业）调查，2022 年整个中国市场关节力矩传感器销量大约在 1.5 万台左右，市场规模大约在 5000 万元左右，关节力矩传感器均价在 2000-4000 元。可见，六维力传感器平均价格是低维力传感器的 10 倍左右。

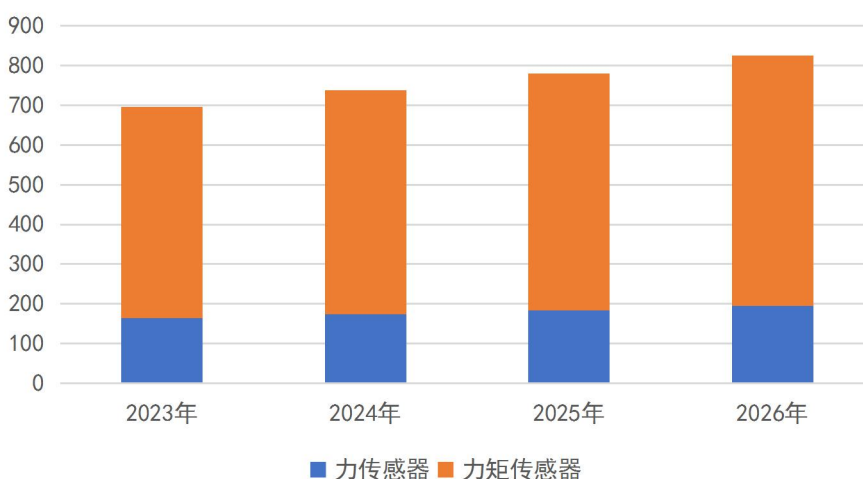
在人形机器人量产加速、降价迫切的预期下，六维力传感器或将迎来降价潮。根据 MIR 调研，六维力传感器成本在数千元，对比 2-4 万元的产品单价，其利润率较高，降价空间充足。此外，根据我们的报告《人形机器人专题报告一：智能化进阶开启，商业化落地在即》（2023-12-20），近一两年发布新产品的多家机器人厂商已经大多规划在近 1-3 年内量产，且将量产成本控制在 10-30 万人民币之间、而价格控制在 10-60 万人民币之间，大幅低于过去的人形机器人产品如 ASIMO、Atlas。同时，在我们的报告《人形机器人专题报告三：拆解人形机器人结构，寻找高价值量细分领域》（2024-01-23）中亦有分析，特斯拉 Optimus 方案整体方案硬件零部件成本总计约 35 万元人民币，距离其目标单价 2 万美元，仍约有 60% 下降空间，其中价值量占比较高的细分领域就有多维力/力矩传感器（价值量占比为 15%）。故未来对于六维力传感器，为拥抱人形机器人行业，降价将是未来数年市场的主旋律之一，根据 MIR 2023 年调研，两年内单个产品价格下降至 5000 元以内是完全可能的，六维力传感器市场将迎来降价潮，行业也将迎来新一轮的洗牌。

4. 六维力传感器市场规模化不足，但未来人形机器人量产将带来市场增量

4.1. 六维力传感器市场相对小众，暂未形成规模化出货

当前全球力和力矩传感器的市场规模预计已接近 700 亿人民币，2023-2026 年间复合增速约为 5.81%。根据 The Business Research Company 数据，2023 年全球力传感器市场规模（仅包含拉压力传感器）为 23.4 亿美元（按汇率 7 计算，折合人民币 163.8 亿元），预计到 2024 年将达到 24.9 亿美元（按汇率 7 计算，折合人民币 174.3 亿元）、2028 年将达到 30.9 亿美元（按汇率 7 计算，折合人民币 216.3 亿元），2023-2028 年间复合年增长率为 5.72%。根据 Markets and Markets 报告数据，2021 年全球力矩传感器市场规模为 68 亿美元（按汇率 7 计算，折合人民币 476 亿元），将以复合年增速 5.77% 增长至 2026 年的 90 亿美元（按汇率 7 计算，折合人民币 630 亿元）。根据以上数据，我们预计 2023 年全球力和力矩传感器市场规模约为 696 亿人民币，2023-2026 年全球力和力矩传感器市场规模复合年增长率约为 5.81%。

图 21：全球力和力矩传感器市场规模（单位：亿人民币）



资料来源：The Business Research Company, Markets and Markets, 华宝证券研究创新部

注：根据资料来源数据可知 2023-2028 年间全球力传感器市场规模复合年增长率为 5.72%，2021-2026 年间全球力矩传感器市场规模复合年增速为 5.77%，故分别假设 2024-2026 年全球力传感器、2021-2026 年全球力矩传感器的市场规模每年分别以增速 5.72%、5.77% 的大小增长，得到 2023-2026 年每年力传感器以及力矩传感器的市场规模数据。

相比之下，国内六维力传感器市场相对小众，2022 年市场规模不到 3 亿人民币、销量不到 1 万套。GGII 数据显示，2022 中国六维力/力矩传感器市场规模 2.39 亿元、同比增长 52.04%，市场销量 8360 套，同比增长 57.97%。其中，机器人用六维力传感器市场规模占比较高、约占 65% 左右，2022 年市场规模约为 1.56 亿元、同比增长 54.35%，市场销量为 4840 套、同比增长 62.58%。

六维力传感器行业未能形成规模化出货的原因在于：一是产品生产难度大，调试时间长，生产效率低，价格昂贵，二是力控算法以及基于力控场景工艺算法等技术存在堵点，导致

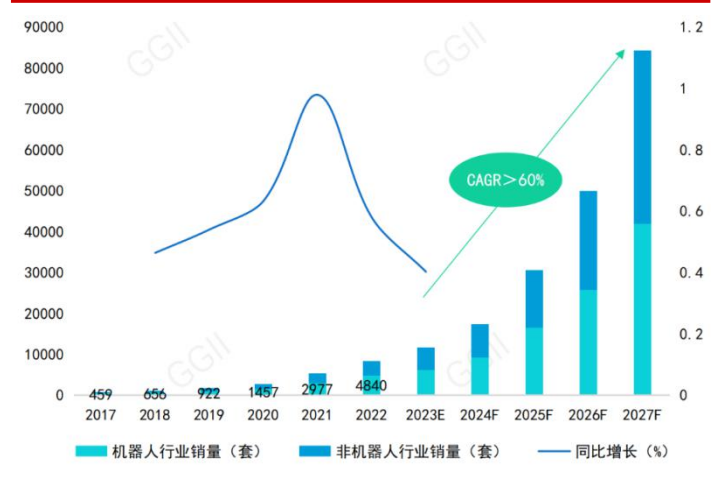
下游需求乏力，始终未能形成规模化出货。

图 22：2017-2027 年中国六维力传感器市场规模及预测（单位：百万元，%）



资料来源：GGII，华宝证券研究创新部

图 23：2017-2027 年中国六维力传感器销量规模及预测（单位：套，%）

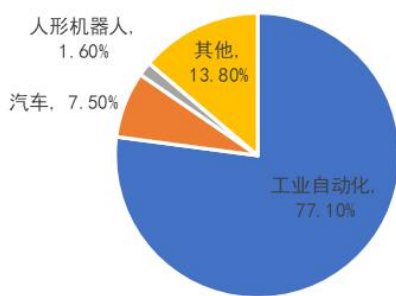


资料来源：GGII，华宝证券研究创新部

4.2. 人形机器人量产将是六维力传感器市场的较大增长来源

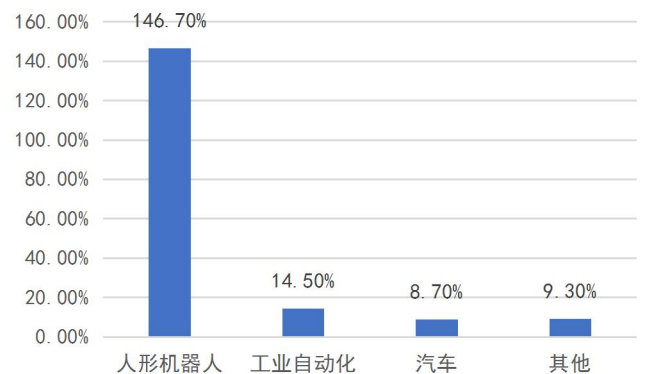
在六维力传感器下游应用中，工业自动化（包含传统机器人）领域应用规模占比最大，但人形机器人行业应用规模增速最快。根据 MIR 数据，2023 年六维力传感器仍主要应用于工业自动化领域，应用规模占比超过 77%，其次是汽车；但在人形机器人行业应用规模同比增长 146.7%，远超其他行业增速。另外根据 MIR 调研，单独观察机器人领域的应用，六维力传感器在此领域的应用比例超过 50%、占比较高。

图 24：2023 年六维力传感器分行业市场份额



资料来源：MIR，华宝证券研究创新部

图 25：2023 年六维力传感器分行业市场规模同比增长率



资料来源：MIR，华宝证券研究创新部

表 9：六维力传感器在下游各领域的应用现状

应用场景	应用现状
工业自动化（包含传统机器人）	高柔性化的产线对六维力传感器的需求不断增多，尤其是搭配机器人进行打磨、装配等，受限于工艺原因难以大批量使用

应用场景	应用现状
汽车	应用较为成熟，缺乏新的应用场景，增量相对有限
人形机器人	六维力传感器目前可预见的最大应用场最，随着人形机器人量产以及批量化投入应用，六维力传感器出货量也将大幅度提升
其他	包含军工、航空航天、医疗等场景，对成本的敏感度相对较低，价格相对较高，增量较为稳定

资料来源：MIR，华宝证券研究创新部

长远来看，人形机器人量产将是六维力传感器市场的较大增长来源。基于我们的报告《人形机器人专题报告二：供应端从0到1有望突破，需求端人机替代市场广阔》（2023-12-21）、《人形机器人专题报告三：拆解人形机器人结构，寻找高价值量细分领域》（2024-01-23）中对人机产量、人机价格的预测与假设，以及人机对六维力传感器需求量的分析、六维力传感器价格等相关数据，我们进一步假设：1、每台人形机器人需要在每只手腕、脚部安装一台六维力传感器，即每台人机至少应用4台六维力传感器；2、六维力传感器的价格下降速度与人形机器人价格下降速度保持一致。根据以上假设，我们预计在悲观/中性/乐观情景下，2030年全球由于人形机器人行业带来的六维力传感器销量增量为197/425/753万台，市场规模增量预计为260/337/409亿元人民币，对于当前六维力传感器不到3亿人民币、不到1万套销量的国内市场，将是较大的增长来源。

表 10：对全球人形机器人量产带来的六维力传感器市场增量进行预测

项目	2023年	2024年	2025年	2026年	2027年	2028年	2029年	2030年	2031年	2032年	2033年	2034年	2035年
悲观情景下：													
人形机器人产量（万台）	0.05	0.20	2	5	10	16	32	49	69	98	130	164	206
六维力传感器需求增量（万台）	0.2	0.8	8	20	40	64	128	197	278	392	520	654	824
六维力传感器平均价格（万元）	3	2.70	2.43	2.19	1.97	1.72	1.49	1.32	1.18	1.07	0.98	0.91	0.84
价格下降速度	/	-10.00%	-10.00%	-10.00%	-10.00%	-12.37%	-13.49%	-11.84%	-10.24%	-9.36%	-8.40%	-7.47%	-6.88%
六维力传感器市场规模增量（亿元）	0.60	2	19	44	79	111	191	260	328	420	510	593	696
中性情景下：													
人形机器人产量（万台）	0.05	0.5	5	10	23	45	74	106	155	212	273	351	434
六维力传感器需求增量（万台）	0.2	2	20	40	91	182	298	425	619	847	1093	1406	1737
六维力传感器平均价格（万元）	3	2.55	2.17	1.84	1.44	1.14	0.93	0.79	0.69	0.60	0.54	0.48	0.44
价格下降速度	/	-15.00%	-15.00%	-15.00%	-21.94%	-20.95%	-17.95%	-14.96%	-13.63%	-12.25%	-10.89%	-10.00%	-9.09%
六维力传感器市场规模增量（亿元）	0.60	5	43	74	130	207	278	337	424	509	586	678	761
乐观情景下：													

项目	2023年	2024年	2025年	2026年	2027年	2028年	2029年	2030年	2031年	2032年	2033年	2034年	2035年
人形机器人产量(万台)	0.05	1	10	25	50	86	127	188	260	336	432	531	630
六维力传感器需求增量(万台)	0.2	4	40	98	200	342	507	753	1040	1346	1728	2125	2521
六维力传感器平均价格(万元)	3	2.46	2.02	1.40	1.03	0.80	0.65	0.54	0.46	0.40	0.35	0.32	0.29
价格下降速度	/	-18.00%	-18.00%	-30.56%	-26.45%	-22.34%	-18.56%	-16.69%	-14.82%	-13.04%	-11.86%	-10.70%	-9.61%
六维力传感器市场规模增量(亿元)	0.60	10	81	138	206	274	330	409	481	541	612	673	721

资料来源：华宝证券研究创新部测算

注：人形机器人尚处于行业发展早期，测算基于人口、经济、技术、行业发展的各类假设与历史规律定律，鉴于现实情况的复杂性，以上测算结果仅供参考。

5. 国内六维力传感器市场以外资品牌为主，国产化率有望提升

从全球范围来看，六维力传感器主要分为日韩品牌、欧美品牌和国产品牌三大阵营。各阵营企业呈现不同的配套特点，日韩地区六维力/力矩传感器厂商主要配套当地机器人本体厂商，其中，韩国企业 Robotous、Aidin Robotics 主要合作厂商包括 Doosan Robotics、Neuromeka 和 Rainbow Robotics；日本企业 Sintokogio 和 WACOH-TECH 主要合作厂商包括发那科、电装、三菱、那智不二越、安川等，Epson 的六维力传感器则主要配套 Epson 的工业机器人使用。欧美地区六维力传感器厂商可分为两类：一类是传统的传感器生产商，包括 ATI、Bota Systems AG、ME-Meßsysteme GmbH、AMTI、Kistler 等；另一类是全球知名的机器人末端工具生产商，主要有 SCHUNK、OnRobot、Robotiq 等，欧美地区厂商合作企业以协作机器人本体厂商为主，主要包括优傲机器人、达明机器人和欧姆龙等。国内厂商主要为传统的传感器或测量仪器生产商，包括坤维科技、宇立仪器、鑫精诚、海伯森、蓝点触控等。

表 11：国内外六维力传感器主要生产商

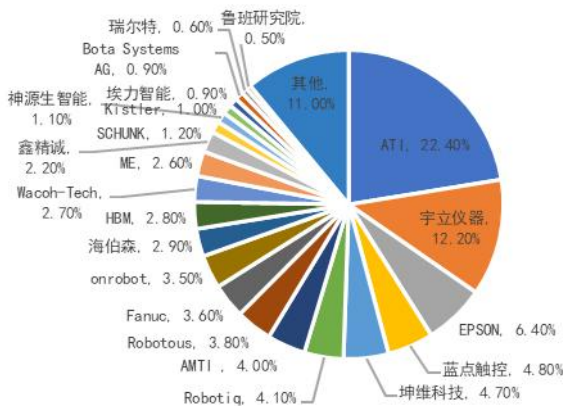
类型	代表公司
日韩	Robotous、Sintokogio、WACOH-TECH、Aidin Robotics
欧美	ATI、OnRobot、SCHUNK、Robotiq、Bota Systems AG、Nordbo Robotics、ME-Meßsysteme GmbH、AMTI、Kistler
中国	坤维科技、宇立仪器、鑫精诚、海伯森、蓝点触控、神源生智能、瑞尔特测控、重庆鲁班机器人技术研究院、昊志机电、埃力智能等

资料来源：GGII，华宝证券研究创新部

从国内市场来看，六维力传感器市场集中度较高，CR5 占比超过 50%。其中 ATI（美国）占据绝对龙头地位，份额占比为 22.4%，其次是宇立仪器（中国）占比 12.2%、Epson（日本）占比 6.4%、蓝点触控（中国）占比 4.8%、坤维科技（中国）占比 4.7%。各家厂商下游应用侧重点有所差异：ATI 作为全球龙头，通过多年的积累，应用面相对更广，在国内下游市场中的工业机器人领域占据较高份额；宇立仪器在工业机器人磨抛场景和汽车碰撞测试行业应用更多；坤维科技则在协作机器人、医疗手术机器人、医疗检测机器人和康复机器人领域具备明显

优势，例如在协作机器人六维力传感器这一细分市场，2022年坤维科技出货量排名第一，市场占有率超过50%，同时在航空航天领域具备核心竞争力；蓝点触控则在国内关节力矩传感器市场占据较大份额，根据GGII数据，蓝点触控占据了关节力矩传感器70%-80%左右的市场份额；鑫精诚凭借苹果供应商的身份已将其产品推广至3C行业，同时在机器人和医疗行业也有布局。

图 26：2023 年中国市场六维力传感器厂商营收份额占比



资料来源：MIR，华宝证券研究创新部

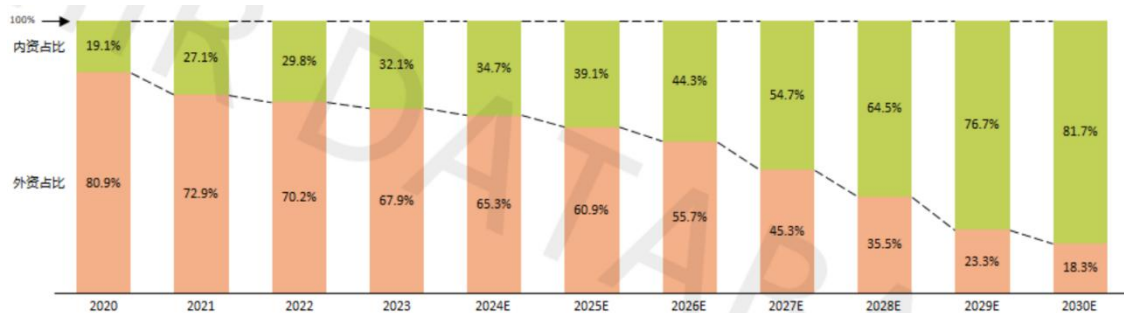
图 27：2022 年国内协作机器人用六维力矩传感器市场份额占比（按销量划分）



资料来源：GGII，华宝证券研究创新部

从国内范围来看，当前国内六维力传感器市场依然以外资品牌为主导。根据MIR数据，近几年国内品牌凭借供应链优势进一步降低成本，在保证性能的同时提供价格更低的产品以及优质的服务，国产化率逐步提升。但目前国产厂商市场份额仅仅略高于30%，国内六维力传感器市场仍以外资品牌为主，外资品牌在产品和应用上占有较大先发优势。根据MIR预测，随着国产品牌性价比稳定的提升、对下游应用场景的探索以及人形机器人市场规模的扩大，未来六维力传感器国产化率将逐步提升。

图 28：2020-2030E 六维力传感器内外资出货（按价值量）占比及预测



资料来源：MIR，华宝证券研究创新部

国产与外资主流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方面仍存在差距。近几年，入局六维力/力矩传感器领域的国产相关厂商越来越多，除了宇立仪器（SRI）之外，如坤维科技、鑫精诚、海伯森、蓝点触控、神源生智能、瑞尔特测控等，均已有相关的产品落地并进入产业化应用。其他厂商如重庆鲁班机器人技术研究院、昊

志机电、埃力智能等，通过自主研发力传感器技术，已经具备六维力/力矩传感器的生产能力，部分产品型号开始进入下游用户的验证测试阶段。根据 GGII 调研，尽管入局国内厂商越来越多、产品越做越好，从国内外产品对比情况来看，产品性能上国内厂商与国外仍存在差距，尤其是在抗过载能力、串扰、线性误差等指标层面，但在精准度方面已基本对齐。

从价格上看，国产品牌性价比更高，将有望加速推动国产替代进程。例如根据爱采购及 emotion-supply 平台数据，海外龙头 ATI 几款典型六维力传感器（Axia80 系列、Gamma 系列、Delta 系列、Nano17 系列、Mini45 系列、Omega160 系列）的价格处于 3-14 万人民币/台之间，同时根据《机器人力触觉感知技术》（梁桥康、徐菲、王耀南）中数据，海外多维力传感器生产厂商定价约为 1 万美元左右/台（按汇率 7 折算为 7 万人民币/台），而根据爱采购网站数据，国产六维力传感器价格在 0.1-4 万人民币/台之间，明显低于外资产品，将有望加速推动国产替代。

表 12：国内外六维力传感器产品对比

生产商	国家	参考型号	应变片类型	过载能力	精准度	串扰	线性误差	单价
ATI	美国	Axia80 系列、Gamma 系列、Delta 系列、Nano17 系列、Mini45 系列、Omega160 系列	硅应变片	3-32 倍	0.5%-2%	<0.5%	<0.05%	3-14 万人民币/台
AMTI	美国	AD2.5D 系列	/	/	/	<2%	0.2%	/
HITEC-SDI	美国	Mod 77016	/	/	2%	/	0.5%	/
ME	德国	6DT27、6DT40、6DT80	金属应变片	/	0.5%	0.3%-0.5%	≤0.2%	/
SCHUNK	德国	AXIA80 系列、Omega85 系列	硅应变片	/	≤2%或≤1%	/	/	/
Bota Systems AG	瑞士	MiniONE Pro 系列、MEDUSA 系列、SENSONE 系列、MegaONE 系列	/	/	<2%	<2%	<0.2%	/
OnRobot	丹麦	HEX-E 系列（此产品为光学式力传感器）	/	/	3%	5%	2%	/
WACOH-TECH	日本	WEF-6A200-4-ECP 系列（此产品为电容式力传感器）	/	2-4 倍	1-3%	5%	3%	/
EPSON	日本	S250 系列	/	/	0.5%	/	/	/
Robotous	韩国	RFT 系列（此产品为电容式力传感器）	/	/	/	3%	/	/
坤维科技	中国	KWR36 系列、KWR63 系列	/	1.5-3 倍	0.5%	/	/	/
宇立仪器	中国	M33XX 系列、M38XX 系列、M35XX 系列	/	3-10 倍	0.2%或<0.5%	<5%或<3%或<2%	<1%或<0.5%	/
蓝点触控	中国	Wrist 系列-ST 型、Wrist 系列-EQ 型	/	5 倍	0.3%-0.5%	/	/	/
鑫精诚	中国	XJC-6FM-D26-H19、XJC-6F-D30-C、XJC-6F-D40-H18-A、XJC-6F-D50-H19、XJC-6F-D62-H27-A、XJC-6F-D65-H24、XJC-6F-D75-H19-A	/	3 倍	1-3%	≤3%或≤2%	≤0.5%	/
海伯森	中国	HPS-FT025、HPS-FT060S、	/	3.5 倍	1-2%	<2%或<1%	<2%或	4 万人民币

生产商	国家	参考型号	应变片类型	过载能力	精准度	串扰	线性误差	单价
		HPS-FT120、HPS-FT060E					<1.25% 或<1%	/台
神源生智能	中国	DTH 系列	/	4-5 倍	≤1%	1%	≤1%	/
埃力智能	中国	六维力传感器仅一个型号	硅应变片	1.5-12 倍	/	<2%	<1%	/
昊志机电	中国	DSA-16050、DSA-8025、DSA-4003、 DSA-2008、DSA-1003	/	3-5 倍	/	2%	0.5%	/
瑞尔特测控	中国	T521M2	/	2 倍	0.5%	/	/	1000-2000 人民币/台

资料来源：GGII，各公司官网，爱采购，emotion-supply，华宝证券研究创新部

注：“/”为未公布。

6. 相关公司情况梳理

6.1. 宇立仪器：从汽车碰撞假人到机器人打磨再到人形机器人，六维力产品类型丰富

南宁宇立仪器有限公司（简称宇立仪器或 SRI）成立于 2007 年，总部位于上海，是集研发、生产为一体的技术密集型企业，公司主营多轴力传感器、力控打磨设备和汽车测试设备，围绕力测量和力控制，为全球客户提供系列化的解决方案，是全球领先的六轴力传感器供应商。SRI 拥有 30 多年传感器设计和力控经验，坚持 100% 自主研发、100% 生产工艺，传感器型号超过 500 种，实际应用超过 2000 例。其产品国外认可度高，一度 90% 出口到欧、美地区。SRI 客户涵盖汽车安全、汽车耐久、机器人自动化和医疗等领域，包括全球大部分汽车企业、美敦力、ABB、KUKA、YASKAWA、富士康、Kistler、Magna，以及清华、北大、哈工大、北理工、中科院、帝国理工、东京大学、密歇根大学、米兰理工、新加坡国立大学、卡内基梅隆大学等全球各大高校、研究所等。根据 MIR 统计（请见图 26），宇立仪器 2023 年六维力传感器营收居于国内品牌首位。

从应用领域来看，宇立仪器最开始靠汽车碰撞假人领域起家，后逐渐拓展至机器人及自动化行业。由于国产高端传感器性能的欠缺，汽车碰撞假人领域一直被国外品牌垄断。2007 年，SRI 由美国 FTSS（现 Humanetics ATD，全球汽车碰撞假人龙头企业）的总工黄约博士创立，成为我国为数不多具有汽车碰撞假人多轴力传感器生产能力的企业，与上汽、大众等车企合作，让汽车假人碰撞行业脱离了美国 Humanetics 品牌的垄断格局，拥有其他选择。此后随着中国成为机器人最大应用市场，开始不断拓展并覆盖到机器人及自动化行业，尤其是打磨应用领域，并取得了良好的效果。

SRI 在多轴力传感器设计领域积累了近 20 年经验，是全球多轴力传感器领导企业。多年来前后一共设计生产了 9 大系列、300 多个型号的多轴力传感器，从一轴至六轴，都有相应的产品覆盖，在力传感器板块扎根较深。从应用领域来看，其产品线覆盖各类力矩传感器、数据采集、力控打磨等，且适用于各种复杂工业环境、水下力测量等环境。此外，SRI 以力传感器硬件为核心不断向解决方案、力控系统延伸，例如联合 ABB、KUKA 设计开发智能力控打磨解决方案等。

六维力传感器方面，SRI起步于2012年前后，产品覆盖量程、尺寸均较广，兼具结构解耦与矩阵解耦产品，价格相比国外品牌具有竞争力。SRI的六轴力传感器早在2012年前后，就陆续在ABB、YASKAWA、KUKA、FOXCONN等国际领先的机器人企业得到良好应用。目前，SRI设计生产了7大系列、共计256种类型的六维力传感器，量程范围从9N至600KN、从0.15Nm-40KNm，直径从15mm至450mm，厚度从7.5mm至600mm。SRI六轴力传感器有矩阵解耦和结构解耦两种解耦方法，如M37XX系列、M38XX系列和M35XX系列都是矩阵解耦型六轴力传感器，M33XX系列和M39XX系列都是结构解耦型六轴力传感器。

SRI已进入人形机器人领域，产品相对国外品牌更具性价比。全球大多数汽车企业都在使用SRI六轴力传感器，SRI是ABB、富士康的长期供应商。在机器人应用方面，SRI的六维力传感器集中在工业机器人领域，但正向人形机器人领域渗透。根据SRI官网合作伙伴信息，SRI与人形机器人厂商优必选有相关合作，根据优必选招股说明书中六维力传感器价格以及宇立仪器微信公众号，SRI六维力传感器单价约在1.5万/台，与其他国外制造商相比更具性价比。

图 29：宇立仪器简介与发展历程



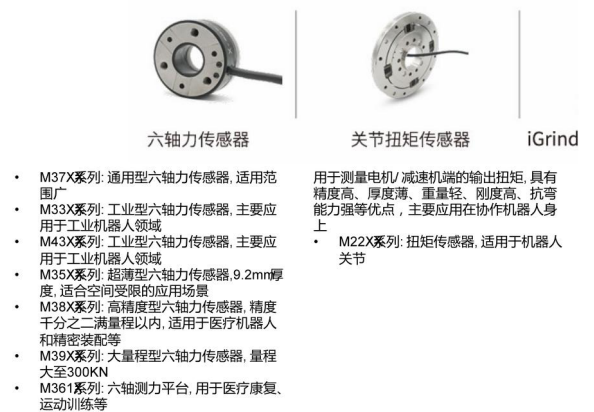
资料来源：宇立仪器官网，华宝证券研究创新部

图 30：宇立仪器主营业务



资料来源：宇立仪器官网，华宝证券研究创新部

图 31：宇立仪器力传感器相关产品介绍



资料来源：宇立仪器官网，华宝证券研究创新部

6.2. 坤维科技：核心技术源于航天测试，主攻协作机器人赛道，已向人形机器人领域拓展

常州坤维传感科技有限公司（简称坤维科技）成立于2018年，总部位于江苏常州，是一家致力于提供高精度力觉传感器及力控解决方案的高新技术企业。公司主营智能力觉传感器（主要为六维力传感器）的研发、制造、销售、及技术推广，主要面向机器人及其他智能装备、工业过程监控、质量检测与科研测试等领域，下游典型客户主要包括协作机器人领导品牌遨博、节卡、越疆等。公司团队具备多年航天科研经验，掌握力觉测量核心技术，具备相关产品的自主知识产权，同时在多维力测量领域还拥有大量工程实践经验。

公司自2018年成立以来总共进行了五轮股权融资，受到资本市场关注，投资人包括汇川产投、三花资本、瀚川智能。坤维科技创业至今近六年，根据天眼查已进行了5轮股权融资。最近一次投融资事件为2024年2月，坤维科技完成了数千万元A2轮融资，领投方为汇川产投，三花资本、博昶基金、明荟致远跟投。

坤维科技六维力产品源于航天测试技术，相比民用级竞品具备技术优势。在核心团队方面，坤维科技创始团队背景深厚，四位核心成员均源自航天十一院这一国家重点研究机构，拥有超过15年的多轴力传感器研发及应用领域的宝贵经验。通过在成熟的航天技术上创新并结合机器学习技术，坤维科技自主研发智能六维力产品打破海外公司在高端六维力传感器领域的长期垄断地位。正是由于坤维科技六维力传感器技术最开始应用在火箭、导弹等高速飞行器的空气动力学性能参数测试，相比于海外厂商在国内销售的民用级竞品，坤维科技的六维力传感器技术具有明显优势。

公司坐落于协作机器人产业重镇常州，在协作机器人领域竞争方面具备地理优势。协作机器人的行业龙头遨博、节卡的生产基地均位于江苏常州，因此相比其他传感器厂商来说，坤维科技在协作机器人细分领域竞争方面具备地理优势，故在2022年协作机器人六维力传感器这一细分市场，坤维科技出货量排名第一，市场占有率超过50%。

当前公司产品以协作机器人、航空航天应用为主，已向人形机器人领域渗透。在应用层面，公司六维测力产品已服役于各种航空航天飞行器的风洞实验，为之提供了准确可靠的六分量气动力数据。与此同时，公司已与节卡、遨博、睿尔曼、越疆、思灵、大族、法奥等国内协作机器人著名厂商开展了深度合作，将六维力传感器广泛应用于防碰撞安全监测、自动化装配生产线、力控切削打磨、拖动示教、精密装配等多个领域，大幅提高协作机器人的安全性、易用性、柔性。此外，公司已有数十位医疗行业的企业客户。根据GGII调研，小米人形机器人已经开始向坤维科技购买小批量KWR63系列六维力产品，应用在机器人的手腕部位。

从产业链上看，坤维科技深耕于力传感器核心技术和低成本高性能产品开发的垂直领域。根据GGII调研，坤维科技对于产品研发的思路非常清晰，即在材料、工艺、芯片三个智能力觉传感器的核心技术领域深入研究从而开发低成本高性能的产品，而非向力控技术集成应用领域拓展。而这种垂直深耕的经营思路或可加快公司在材料、工艺、芯片三方面实现技术突破，同时和机器人本体厂商以及集成商在应用端达成紧密合作，尽早实现六维力产品的规模优势。

在产品方面，坤维科技技术扎实、量产能力较强、产品覆盖类型较广、产品性能较高、性价比优于进口产品。坤维科技在六维力传感器领域积累了六轴联合标校与检测技术、传感器结构解耦技术、高精度算法解耦技术、高精度嵌入式智能电路四大核心技术，可有效提升六维力传感器的准度、串扰、迟滞等产品性能。从产品覆盖范围上看，坤维科技六维力产品覆盖16大系列，产品类型共计52种，尺寸覆盖直径36mm-200mm，厚度18mm-47.5mm，量程覆盖

30N-10KN, 1.5Nm -1600Nm。在生产设备方面, 坤维科技耗资数千万元, 共建立了 8 台标定检测设备用来完善六维力传感器中的算法并检测六维力产品, 其中 3 台拥有全自动化标定能力, 可有效提高工作效率。在最终产品的精度和稳定性方面, 坤维科技采用应变电测原理、航天测试技术和品控工艺, 其六维力/力矩传感器产品的串扰精度优于 0.3%FS, 重复性精度优于 0.1%FS, 部分产品抗过载能力最高可达到 800%FS。与此同时, 凭借军工级的质量管控能力和产品批量化生产能力, 坤维科技可大幅降低优质力觉传感器的成本, 性价比远超进口产品。

图 32: 坤维科技核心技术

核心技术

我们不断在产品的研发上精益求精, 坤维凭借优秀的产品技术已获得多项发明专利



资料来源: 坤维科技官网, 华宝证券研究创新部

6.3. 蓝点触控: 在国内品牌中六维力产品营收仅次于宇立仪器, 从硬件到软件提供全面解决方案

蓝点触控科技有限公司(以下简称蓝点触控)成立于 2019 年, 是一家专注于智能机器人前沿力控技术研发及应用的 国家高新技术企业, 提供机器人力传感器硬件、力控算法、行业工艺算法。通过深度整合柔性力控算法与工艺算法, 蓝点触控已在医疗、卫浴、航空航天、3C、汽车、重工等多个行业规模化落地, 应用于打磨、装配、医疗手术机器人、焊接、工业自动化、科研等众多领域。根据 GGII 调研, 蓝点触控机器人六维力传感器与关节力矩传感器累计出货量达数万台, 其机器人关节力矩传感器占据国内 80% 以上市场份额。

蓝点触控核心团队来自于航天科技集团、中国科学院等知名机构。公司创始人刘吴月毕业于西北工业大学, 曾任职于航天科技集团, 负责多项航天前沿技术开发, 具备丰富的航天级力控技术研发和系统级应用经验; 研发总监丰继民毕业于中国科技大学少年班, ICT 领域连续成功创业者, 曾任多家创业公司 CTO, 擅长复杂通信、实时控制和 AI 算法; 董事兼顾问王田苗是北京航空航天大学博导, 北航机器人研究所名誉所长。

公司共完成两轮投资, 最新一轮融资金额将主要用于新产品研发和进一步提升批量化交付能力。2020 年 1 月 17 日, 蓝点触控获新松投资、雅瑞资本 1000 万元人民币天使轮投资。2023 年 6 月 27 日, 蓝点触控获中关村协同创新基金 Pre-A 轮投资, 本轮融资将主要用于新产品研发和进一步提升批量化交付能力。

蓝点触控原有业务以力传感器研发、生产为核心, 主要面向机器人厂商提供力传感器核心零部件产品, 开启了第一增长曲线。产品层面, 公司已经推出三大核心传感器产品, 包括 ST 系列协作机械臂六维力传感器、EQ 系列工业机械臂六维力传感、Joint 系列协作机械臂关节力矩传感器, 并搭建了自适应工艺库。基于此, 蓝点触控建立了通用柔性力控机器人平台, 可应

用于打磨、去毛刺、装配、医疗、特种作业等跨行业的多个细分场景。其中，六维力产品覆盖 2 大系列，产品类型共计 7 种，尺寸覆盖 $\phi 80\text{mm} \times \text{H}25.5\text{mm}$ 、 $\phi 60\text{mm} \times \text{H}27.5\text{mm}$ ，量程覆盖 170N-3000N、6Nm-40Nm。技术层面，蓝点触控力传感器主要包含解耦算法、结构解耦设计、高精度数据采集、多轴同步校准等核心技术，可满足复杂环境对力传感器和力控系统的高精度、高带宽和易用性需求。目前公司六维力产品精准度范围在 0.3%-0.5% 之间，处于行业较高水平。

2020 年公司开始探索第二增长曲线，进入下游应用场景，从硬件到软件直接面向行业客户提供整套解决方案。在第一条业务线相对成熟的基础上，公司进一步走入打磨和去毛刺等下游细分应用场景，搭建了百余项参数的工艺算法模型，并建立了相应的工艺数据库，直接面向医疗器械、卫浴、航空航天等行业企业客户提供完整解决方案，在提高客单价与营收规模的同时，触达到了更多的行业和客户，沉淀产业 know-how，对产品、技术迭代优化进行反哺。

在机器人领域，蓝点触控以协作机器人关节力矩传感器、六维力传感器为起点，向人形机器人领域拓展。蓝点触控在 2021 年开始探索人形机器人领域，组建独立研发团队。针对人形机器人的手腕以及脚腕单元，打造高性价比、高精度和强冲击性的核心零部件单元，提供从六维力传感器、直线模组拉压力传感器、关节扭矩传感器、以及力控算法方面的全方位支持。

6.4. 海伯森：视觉传感器与力传感器，六维力传感器价格较高

海伯森技术（深圳）有限公司（以下简称海伯森）2015 年成立，始终专注工业传感技术的创新，并在光学精密测量、工业 2D/3D 检测、机器人智能应用等领域形成了成熟的产品矩阵，主力产品包括 3D 闪测传感器、3D 线光谱共焦传感器、点光谱共焦位移传感器、超高速工业相机、六维力传感器、激光对刀仪、激光对针传感器及各类激光检测传感器。目前公司全面布局海内外市场，旨在为 3C 电子、工业自动化、精密工件检测、医疗、科研等行业领域提供精密智能传感技术。公司已进行了 5 轮融资，目前处于 B 轮（2022 年 9 月），投资机构包括汉字集团（持股比例为 5.52%）、珠海北清河投资基金、创东方投资、华信资本等。

公司具备较为领先的传感器综合研发实力。多年研发积累下，海伯森在力学、光学、声学、机械、电子、算法等方面均拥有自主核心技术，取得了数十项专利，同时已经全面掌握了高端传感器相关的综合研发能力，且保持着每年推出 1-2 款新品的速度。

公司产品有两条主线，覆盖人形机器人两大领域。一方面是光学和视觉产品线，赋予了机器人感知，让机器人能够看到；另一方面是力学产品线，能够让机器人在看到的同时感知到力的反馈。但当前产品以视觉传感器为主、六维力传感器为辅，主要专注于标准产品销售而非整体解决方案。根据 GGII 调研，据海伯森创始人王国安介绍，海伯森视觉传感器产品销售占比较多，而六维力产品的销售仅占总销售量的 15% 左右，尽管存在客户同时需要六维力传感器和视觉两类传感器的情况，但海伯森很少出售解决方案，以售卖标准品为主。

海伯森六维力传感器量程较大，主要应用于 3C 电子、工业自动化、精密工件检测、医疗、科研等行业，价格高于国内其他品牌。海伯森六维力传感器覆盖 5 种类型产品，尺寸覆盖直径 26.2mm-126mm，厚度 23mm-50mm，量程覆盖 200N-4000N，4Nm-150Nm。当前公司产品可装载于工业机器人、协作机器人、外骨骼机器人、医疗康复机器人、人形机器人上，被广泛应用于工业柔性装配/抓取、力控打磨、自动化测控、拖动示教、力学实验研究、风洞测试等场景以及相应的 3C 电子、工业自动化、精密工件检测、医疗、科研等行业，可支持库卡、ABB、安川、川崎、三菱、爱普生、东芝、优傲、珞石、节卡、遨博等国内外近 20 个品牌的机器人系统。此外在产品价格方面，根据爱采购平台的公司店铺官方报价，单个六维力传感器价格为 4 万人民币，高于国内品牌。

6.5. 鑫精诚：3C 细分赛道起家，以高性价比产品切入低要求应用领域

深圳市鑫精诚科技有限公司与深圳市鑫精诚传感技术有限公司（以下统一简称为鑫精诚），分别成立于 2009 年与 2021 年，总部位于深圳，公司专注于微型压力、称重、多轴力、扭力等多样化的智能传感器与控制仪表等工业级产品的创新研发和精益生产。

公司致力于专精深，早年力学检测产品切入 3C 赛道，随后切入锂电设备赛道，并向机器人应用领域渗透。早年鑫精诚抓住了力学检测应用的风口，以压力传感器、微型测力传感器、高精度称重传感器等产品切入 3C 消费类电子赛道，积累了丰富的产品解决方案，并进入苹果、华为等头部企业的供应链。在新能源行业“风起”期间，公司敏锐捕捉到市场动向，其力学传感器（张力、压力等产品）已广泛应用于匀浆、涂布机等电池多工艺环节，实现了锂电整线设备下的研发项目沉淀。随着力学传感器的在机器人领域应用场景日趋广泛，鑫精诚的业务已涵盖工业领域的机械设备、工业机器人，医疗行业的康复理疗、手术机器人，汽车行业的组装、焊接、测试环节，农业领域的农用机械设备和航空航天测试等领域中。成立以来，公司合作客户遍布全球，如华为、苹果、比亚迪、大族、越疆、ABB、发那科、库卡、安川、爱普生、图灵、伯朗特等。2022 年，鑫精诚六维力传感器客户仍集中在手机等 3C 行业，未来将继续专注于力学传感器的研发，相继规划并延伸至压电式、电磁力、半导体、MEMS 传感器等技术与应用。

鑫精诚传感器是国内最早一批进入六维力传感器研发和应用的非研究型企业。自 2005 年起公司开始关注六维力传感器，通过不断比对半导体应变片、电阻式应变片、硅微熔、溅射、电容、光学、MEMS、压电等原理六维力传感器的优缺点及适用场合，组建了国内最早一批设计开发六维力传感器的研发团队（非研究机构）30 余人。在专利方面，鑫精诚传感器团队自 2012 年提交并取得六维力传感器相关专利，目前已获得发明专利 5 个，实用新型专利 9 个。

公司独特开发纯结构解耦产品，可节省标定和制造时间和成本。2021 年，鑫精诚在原有六维力传感器的技术沉淀下又成功开发出纯结构解耦的六维力传感器系列。区别国外领先力矩传感器所采用的软件解耦，鑫精诚所独特开发的纯结构解耦六维力传感器：1、长期耦合误差小，信号长期稳定；2、安装替换简单，当传感器其中任一通道损坏，其余 5 个通道可以正常使用，且替换后无需重新进行解耦标定，反复安装对耦合误差影响小，大大地节省产品全生命周期中的标定和制造时间与成本。

鑫精诚六维力产品类型较丰富，但量程覆盖范围较窄。经过十多年的学习沉淀，鑫精诚完成六维力传感器多尺寸、多量程、多结构的系列化开发，官网上共计有 16 种型号的六维力产品，共计 61 种类型。其六维力产品直径跨度从 25mm 到 118mm，力量程跨度从 10N 到 1000N，力矩量程跨度从 0.5Nm 到 50Nm，量程覆盖范围较窄。此外，产品结构包含中空式，法兰式，IP68 深水、微型式、自带紧固螺钉式，几乎覆盖了常规六维力传感器的所有结构，并支持为客户提供非标传感器订制。

公司六维力产品价格相对其他国产品牌较低，下游应用主要面向低要求应用领域。从价格来看，据 GGII 调研数据，鑫精诚一套传感器+数据采集卡+软件，均价仅 1.3-1.5 万/套，远低于 GGII 统计的 2022 年六维力传感器的平均价格（2.86 万元/套）。此外，根据公司在 2023 年高工机器人年会上的发言，公司产品主要切入对六维力传感器的精度、抗震、防水防潮等要求不高的应用领域，例如焊接行业拖拽示教的应用。横向对比看，公司产品准确度略低于国内其他品牌，由此可见公司产品策略为牺牲一部分产品性能但同时降低产品价格，以切入低要求应用领域。

6.6. 神源生智能：具备高校背景，国内市场份额占比较低

南京神源生智能科技有限公司（以下简称为神源生智能）成立于2012年，致力于力测试技术的研究及其产业化，主营产品包括多维力传感器、扭矩传感器、摩擦磨损试验机、测力平台、刚度仪等，已应用于航天航空、机器人、自动化、教科研等行业，并已销售至美国、德国、丹麦、瑞典等欧美国家，得到国际客户高度认可。根据GGII数据，目前神源生智能的六维力传感器累计出货1000多台，国内市场份额占比不高（2023年为1.1%）。当前公司进行了一次融资，为A轮阶段，投资方为中科海创。

公司具有南京航空航天大学高校背景。公司以南京航空航天大学江苏省仿生功能材料重点实验室为技术依托，拥有以董事长戴振东教授为核心的研发人员22人，其中硕、博士11人。其依托南京航空航天大学雄厚的力学、特种加工和仪器设计等学科基础，掌握了兼顾高刚度和高灵敏度的应变式多维力传感器正向设计及结构优化技术，建立了完整的产品质量保障体系，实现了高性价比六维力传感器、测力阵列和机器人的力控应用。此外凭借技术能力，公司承接了国家研发计划项目，负责机器人用六维力传感器和触觉传感器的技术突破和产业化：承接了航天集团多个跟力控应用相关的攻关项目；公司产品在企业中也被广泛应用于机器人关节及末端的力反馈控制并得到高度评价。

公司在多维力传感器方面已掌握较多关键技术。神源生智能建立了多维力传感器结构设计及优化技术；发明了与传感器结构一体化、多通道、集成式微信号处理器，解决了微信号容易受到干扰的问题；掌握了规模生产中材料/加工、装配技术等对传感器性能影响的规律，确定了装配流程、温度场等因素的自适应补偿方法；发明了多维力传感阵列，实现了分布式多维力同步采样；建立了重力/惯性力快速高精度补偿技术。

总的来说，公司六维力产品覆盖量程较广、产品精度良好、耦合较低。神源生智能六维力产品覆盖10大系列、29种类型，尺寸覆盖直径50mm-219mm，厚度34.5mm-130mm，量程覆盖10N-100KN，0.2Nm-8KNm。公司产品精度最低可做到0.1%，串扰可做到1%，性能指标良好。

6.7. 埃力智能：扎根运动健康领域，已被人机厂商傅利叶智能收购

安徽埃力智能科技有限公司（以下简称为埃力智能）2005年成立，专注致力于运动生物学领域的设备研发生产，其主营产品包括压力分布（健身助手、鞋垫智能适配、智能选鞋、单板、步道、坐/靠垫等）、表面肌电仪、测力台、六维力传感器和坐站走一体化步态与平衡评估训练系统，产品主要用于医疗健康、体育运动、体检筛查、大健康服务等领域。

公司已被人机厂商傅利叶智能收购。2021年初，通过战略并购，公司加入上海傅利叶机器人集团，专注于医疗健康和机器人领域的技术及产品研发。

公司六维力产品较为单一，且主要应用于康复机器人、外骨骼机器人。埃力智能六维力产品覆盖4种类型，尺寸均为 $\phi 70\text{mm} \times \text{H}53.5\text{mm}$ ，量程覆盖125N-1000N，3.75Nm-30Nm。从产品应用角度来看，其产品六维力传感器主要应用在康复机器人领域及上下肢外骨骼机器人协作中。

6.8. 瑞尔特测控：依托德国先进技术，产品单价远低于国内其他品牌

常州瑞尔特测控系统有限公司（以下简称为瑞尔特测控）成立于2013年，是一家提供各类高端标准测力传感器以及非标定制服务于一体的综合性高新技术企业。

公司依托德国先进力传感器设计、生产技术与经验，生产研发了各类力传感器产品。瑞尔特测控核心技术团队拥有20年德国先进传感器设计、生产经验，对国外各类测力称重传感器的结构和材料特性的处理以及加工造诣颇深。在国外技术与经验的基础上，公司扎根于传感器设计制造技术的研究，改良产品设计，并引进国内外先进的生产设备及制造工艺，增强自我核心竞争力。

公司生产多维力传感器性价比较高、产品量程较大，已应用于军工、航空航天、核电、工业自动化、医疗精密设备测试等领域。瑞尔特测控六维力产品覆盖4大系列、28种类型，尺寸覆盖直径50mm-352mm，厚度35.5mm-180mm，量程覆盖150N-100KN，4Nm-1.5KNm。横向比较看，公司产品综合精度较高（0.5%），且根据爱采购公司官方店铺，其六维力传感器单价为1280元/台，远低于其他国内品牌。

6.9. 昊志机电：立足主轴业务向机器人领域扩张，六维力产品处于初步商业化阶段

广州市昊志机电股份有限公司（以下简称昊志机电）成立于2006年，是一家专业从事中高端数控机床、机器人、新能源汽车核心功能部件等的研发设计、生产制造、销售与维修服务的国家高新技术企业，于2016年在创业板上市（股票代码300503.SZ）。

昊志机电立足主轴行业，逐步向机床、机器人等高端装备核心功能部件领域扩张，产品类型丰富。公司电主轴领域全球市场占有率第一，同时立足主轴行业，借助在研发、制造、客户、品牌等方面的积累，稳步向数控机床和工业机器人等高端装备的核心功能部件领域横向扩张。其中应用于机器人领域的产品包括数控系统、谐波减速器、直驱电机、驱动器、编码器、六维力矩传感器、刹车机构、机器人关节模组、低压驱动、末端执行器等。

即将成立广州市昊志机器人有限公司，承接公司机器人事业部业务，负责机器人核心功能部件。根据公司2024年3月公告，拟设立全资子公司“广州市昊志机器人有限公司（暂定）”承接公司机器人事业部业务，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、末端执行机构以及RV减速器等机器人领域功能部件）研发、生产、销售等。

目前公司六维力产品仍处于初步商业化阶段，销售规模和应用市场较小。公司六维力产品覆盖5种类型，尺寸覆盖直径50mm-90mm，厚度20mm-28mm，量程覆盖100N-1600N，3Nm-50Nm。目前产品主要应用于公司与客户共同开发的按摩机器人上，且已形成小批量销售。

6.10. 柯力传感：以称重传感器起家，六维力产品处于开发试制阶段

宁波柯力传感科技股份有限公司（以下简称柯力传感）成立于1995年，2019年上交所上市（股票代码603662.SH），是智能传感器行业领军企业，主要研制和生产各类型物理量传感器，以及不同工业物联网系统及多场景应用解决方案。公司从力学起步融合多物理技术发展多

品种传感，展开多维度产业布局 and 经营。

公司在主业层面坚持“两条腿走路”，一条为传感器、仪表等硬件的研制、生产和销售，一条为工业物联网系统解决方案。公司一方面研制和生产多物理量传感器、称重仪表、电子称重系统、工业物联网系统成套设备，另一方面，提供不停车检测系统、建筑机械物联网、港机及海洋工程装备物联网、起重机械物联网、畜牧业、智能物流、环保设备等工业物联网系统解决方案。

目前柯力传感拥有六维力传感器开发能力，但产品仍处于开发试制阶段，官网上尚未有相关产品推出。根据公司公告，公司开发的六维力传感器未应用于人形机器人，目前处于开发试制阶段，2019年-2021年累计销售金额为34250.00元，该产品2022年末产生销售收入，该产品对公司2023年主营业务收入不产生任何影响。

6.11. 敏芯股份：聚焦 MEMS 传感器，六维力产品处于研发阶段

公司产品主要聚焦在 MEMS 传感器及相关芯片的研发和生产方面，涉及多种类型传感器。苏州敏芯微电子股份有限公司（以下简称为敏芯股份）创立于2007年，是一家以 MEMS 传感器研发与销售为主的半导体芯片设计公司。2020年8月登陆上海证券交易所科创板（股票代码688286.SH）。目前主要产品线包括 MEMS 声学传感器、MEMS 压力传感器、MEMS 惯性传感器、MEMS 力传感器、MEMS 流量传感器等。经过多年的技术积累和研发投入，公司在上述 MEMS 传感器芯片设计、晶圆制造、封装和测试各环节都拥有了自主研发能力和核心技术，同时能够自主设计为 MEMS 传感器芯片提供信号转化、处理或驱动功能的 ASIC 芯片，并实现了 MEMS 传感器全生产环节的国产化。

在六维力传感器方面，公司仍处于研发阶段。根据公司公告，在六维传感器等领域公司也有产品研发布局，并且有成熟的技术积累，研发进度在按计划推进中，但上述相关产品研发及市场推广均存在不确定性。

表 13：六维力传感器相关公司情况梳理

公司	是否上市	成立时间	生产地	公司简介	六维力产品业务情况	六维力产品精度	六维力产品系列	产品应用	潜在合作的人机厂商
坤维科技	否,瀚川智能参股(比例为4.56%)	2018年	江苏常州、苏州	坤维科技是一家致力于提供高精度力觉传感器（六维力传感器）及力控解决方案的高新技术企业。	根据 MIR 统计，坤维科技 2023 年六维力传感器营收位于国内品牌第 3 位、占比 4.7%，在国内六维力传感器市场属于第一梯队（TOP5）。	小于 0.5%，部分产品可做到 0.2%	覆盖 16 大系列，产品类型共计 52 种，尺寸覆盖直径 36mm-200mm，厚度 18mm-47.5mm，量程覆盖 30N-10KN，1.5Nm-1600Nm	协作机器人、航空航天、医疗手术机器人、人形机器人、自动化集成、运动或康复测试	小米
宇立仪器	否	2007年	广西南宁	宇立仪器是集研发、生产为一体的技术密集型企业，主营多轴力传感器、力控打磨设备	根据 MIR 统计，宇立仪器 2023 年六维力传感器营收位于国内品牌首位、占比 12.2%，	小于 0.5%，部分产品可做到 0.2%	覆盖 7 大系列，产品类型共计 256 种，尺寸覆盖直径 15mm-450mm，厚度 7.5mm-600mm，量程	汽车测试与安全、工业机器人（打磨）、协作机器人、人形机器人、	优必选、特斯拉

公司	是否上市	成立时间	生产地	公司简介	六维力产品业务情况	六维力产品精度	六维力产品系列	产品应用	潜在合作的人机厂商
				和汽车测试设备，围绕力测量和力控制，提供系列化的解决方案。	在国内六维力传感器市场属于第一梯队（TOP5）。		覆盖 9N-600KN, 0.15Nm-40KNm。	医疗康复、科学研究等	
蓝点触控	否	2019年	北京、广东、浙江、河南、江苏、安徽、阜阳	蓝点触控是一家提供机器人力传感器硬件、力控算法、行业工艺算法的力控方案提供商。	根据 MIR 统计，蓝点触控 2023 年六维力传感器营收位于国内品牌次位、占比 4.8%，在国内六维力传感器市场属于第一梯队（TOP5）。	0.3%-0.5%	覆盖 2 大系列，产品类型共计 7 种，尺寸覆盖 $\phi 80\text{mm}*\text{H}25.5\text{mm}$ 、 $\phi 60\text{mm}*\text{H}27.5\text{mm}$ ，量程覆盖 170N-3000N, 6Nm-40Nm。	工业机器人（打磨、抛光）、协作机器人、人形机器人、医疗手术机器人、科研、医疗、卫浴	/
鑫精诚	否	2009年（鑫精诚科技），2021年（鑫精诚传感技术）	广东、深圳、惠州	鑫精诚传感器重点专注于微型压力、称重、扭力、六维力等多样化的智能传感器及控制仪表的工业级产品研发和创新，提供力控系统解决方案与技术合作。	根据 MIR 统计，鑫精诚 2023 年六维力传感器营收位于国内品牌第 5 位、占比 2.2%。	1%-3%	覆盖 16 个系列、61 种类型，直径跨度从 25mm-118mm，厚度 18mm-35mm，量程覆盖 10N-1000N, 0.5Nm-50Nm	工业自动化设备，医疗康复理疗设备、手术机器人，汽车组装、焊接、测试环节，农用机械设备和航空航天测试	/
海伯森	否，汉字集团参股（比例为 5.52%）	2015年	广东、深圳、江苏、苏州、四川、成都、湖北、武汉	海伯森 2015 年成立，始终专注工业传感技术的创新，并在光学精密测量、工业 2D/3D 检测、机器人智能应用等领域形成了成熟的产品矩阵。	海伯森视觉传感器产品销售占比较多，而六维力产品的销售仅占总销售量的 15%左右。根据 MIR 统计，海伯森 2023 年六维力传感器营收位于国内品牌第 4 位、占比 2.9%。	1%-2%	覆盖 5 种类型产品，尺寸覆盖直径 26.2mm-126mm，厚度 23mm-50mm，量程覆盖 200N-4000N, 4Nm-150Nm。	工业机器人（装配/抓取、力控打磨）、协作机器人、自动化测控、拖动示教、力学研究、风洞测试	/
柯力传感	603662.SH	1995年	浙江、宁波、安徽、池州、河南、郑州等	柯力传感是智能传感器行业领军企业，主要研制和生产各类型物理量传感器，以及不同工业物联网系统及多场景应用解决方案。	公司开发的六维力传感器未应用于人形机器人，仍处于开发试制阶段，2019 年-2021 年累计销售金额为 34250.00 元，该产品 2022 年未产生销售收入，该产品对公司 2023 年主营业务收入	/	官网尚未披露相关产品	/	/

公司	是否上市	成立时间	生产地	公司简介	六维力产品业务情况	六维力产品精度	六维力产品系列	产品应用	潜在合作的人机厂商
					不产生任何影响。				
瑞尔特测控	否	2013年	江苏常州, 广东惠州	瑞尔特测控成立于2013年, 是一家提供各类高端标准测力传感器以及非标定制服务于一体的综合性高新技术企业。	根据MIR统计, 瑞尔特测控2023年六维力传感器营收较小, 位于国内品牌第8位、占比0.6%。	小于等于0.5%	覆盖4大系列、28种类型, 尺寸覆盖直径50mm-352mm, 厚度35.5mm-180mm, 量程覆盖150N-100KN, 4Nm-1.5KNm。	军工、航空航天、核电、工业自动化、医疗精密设备测试	/
昊志机电	300503.SZ	2006年	广东广州	公司是一家专业从事高精密电主轴及其零配件的研发设计、生产制造、销售与维修服务的环保型高新技术、创业板上市企业。	公司六维力产品已应用于公司按摩机器人, 并已形成小批量销售。公司官网上已有5款六维力产品。	/	覆盖5种类型, 尺寸覆盖直径50mm-90mm, 厚度20mm-28mm, 量程覆盖100N-1600N, 3Nm-50Nm。	按摩机器人	/
神源生智能	否	2012年	江苏南京、北京、广东深圳	神源生智能成立于2012年, 致力于力测试技术的研究及其产业化, 主营产品包括多维力传感器、扭矩传感器、摩擦磨损试验机、测力平台、刚度仪等。	根据MIR统计, 神源生智能2023年六维力传感器营收位于国内品牌第6位、占比1.1%。	0.1%-1%	覆盖10大系列、29种类型, 尺寸覆盖直径50mm-219mm, 厚度34.5mm-130mm, 量程覆盖10N-100KN, 0.2Nm-8KNm。	航天航空、机器人、自动化、教科研等行业	/
埃力智能	否	2005年	安徽合肥	埃力智能2005年成立, 专注致力于运动生物力学领域的设备研发生产, 产品主要服务医疗健康、体育运动领域。	根据MIR统计, 埃力智能2023年六维力传感器营收位于国内品牌第7位、占比0.9%。	/	覆盖4种类型, 尺寸均为 $\phi 70\text{mm} \times \text{H}53.5\text{mm}$, 量程覆盖125N-1000N, 3.75Nm-30Nm。	康复机器人、外骨骼机器人、工业机器人	/
敏芯股份	688286.SH	2007年	江苏苏州	敏芯股份是一家以MEMS传感器研发与销售为主的半导体芯片设计公司。目前主要产品线包括MEMS声学传感器、MEMS压力传感器、MEMS惯性传感器、MEMS力传感器、MEMS流量传感器等。	在六维传感器等领域有产品研发布局, 并且有成熟的技术积累, 研发进度在按计划推进中, 但上述相关产品研发及市场推广均存在不确定性。	/	官网尚未披露相关产品	/	/

资料来源：各公司官网，iFind，GGII，MIR，华宝证券研究创新部

注：与人机厂商潜在合作不代表相应公司一定可获得人机量产后的订单。

7. 投资建议

后续需进一步关注六维力传感器、人形机器人行业发展趋势。当前人形机器人硬件+软件方案尚未统一，需进一步关注人形机器人对六维力传感器产品在性能、量价上的具体需求，关注能尽快适应人机行业需求的六维力产品厂商。同时，六维力传感器当前市场较小，产品未实现规模化生产，此外也受到 MEMS 等新型传感技术的影响，关注在新生产技术、新产品技术、规模化生产上有重要突破的企业。

需跟踪六维力传感器国产替代进程，关注替代进程中取得竞争优势的企业。当前国内六维力传感器市场近 70% 的份额仍由 ATI 等外资品牌占据，尽管外资品牌整体性能上强于国内品牌，但价格昂贵，且国内品牌已经在精准度等部分指标上已对齐国外产品。因此在人形机器人量产降价的预期下，进一步关注能在性价比上取得竞争优势的国内厂商。

需跟踪六维力产品厂商与人形机器人厂商合作情况，关注在人形机器人应用领域有布局、且最终能获得订单的企业。由于大部分人机厂商产品处于样机到量产的过程中，因此对六维力传感器等上游零部件仍处于供应商准入或送样或定点等环节，距离批量采购仍需要一定时间，需跟踪六维力产品厂商与人机厂商的合作情况。此外，人形机器人理论应用场景较多、大部分应用场景尚未商业化落地，因此在合作过程中，具备垂直应用场景相关产品技术、工艺算法经验积累的公司竞争优势或更明显。因此，关注能与量产确定性强的的人形机器人厂商进行深度合作、并最终获得采购订单的六维力传感器企业。

8. 风险提示

产业政策支持力度不及预期、人形机器人等终端行业需求不及预期、市场规模测算模型存在失效风险、国产替代进程不及预期、行业内价格战加剧、产品规模化生产不及预期。本报告中所提及的公司旨在对行业现状进行说明，不代表推荐或覆盖。

分析师承诺

本人承诺，以勤勉的职业态度，独立、客观地出具本报告，本报告清晰准确地反映本人的研究观点，结论不受任何第三方的授意或影响。本人不曾因，不因，也将不会因本报告中的具体建议或观点而直接或间接收到任何形式的补偿。

公司和行业评级标准

★ 公司评级

报告发布日后的 6-12 个月内，公司股价相对同期市场基准（沪深 300 指数）的表现为基准：

买入：	相对超出市场表现 15% 以上；
增持：	相对超出市场表现 5% 至 15%；
中性：	相对市场表现在 -5% 至 5% 之间；
卖出：	相对弱于市场表现 5% 以上。

★ 行业评级

报告发布日后的 6-12 个月内，行业指数相对同期市场基准（沪深 300 指数）的表现为基准：

推荐：	行业基本面向好，行业指数将跑赢基准指数；
中性：	行业基本面稳定，行业指数跟随基准指数；
回避：	行业基本面向淡，行业指数将跑输基准指数。

风险提示及免责声明

- ★ 华宝证券股份有限公司具有证券投资咨询业务资格。
- ★ 市场有风险，投资须谨慎。
- ★ 本报告所载的信息均来源于已公开信息，但本公司对这些信息的准确性及完整性不作任何保证。
- ★ 本报告所载的任何建议、意见及推测仅反映本公司于本报告发布当日的独立判断。本公司不保证本报告所载的信息于本报告发布后不会发生任何更新，也不保证本公司做出的任何建议、意见及推测不会发生变化。
- ★ 在任何情况下，本报告所载的信息或所做出的任何建议、意见及推测并不构成所述证券买卖的出价或询价，也不构成对所述金融产品、产品发行或管理人作出任何形式的保证。在任何情况下，本公司不就本报告中的任何内容对任何投资做出任何形式的承诺或担保。投资者应自行决策，自担投资风险。
- ★ 本公司秉承公平原则对待投资者，但不排除本报告被他人非法转载、不当宣传、片面解读的可能，请投资者审慎识别、谨防上当受骗。
- ★ 本报告版权归本公司所有。未经本公司事先书面授权，任何组织或个人不得对本报告进行任何形式的发布、转载、复制。如合法引用、刊发，须注明本公司出处，且不得对本报告进行有悖原意的删节和修改。
- ★ 本报告对基金产品的研究分析不应被视为对所述基金产品的评价结果，本报告对所述基金产品的客观数据展示不应被视为对其排名打分的依据。任何个人或机构不得将我方基金产品研究成果作为基金产品评价结果予以公开宣传或不当引用。

适当性申明

- ★ 根据证券投资者适当性管理有关法规，该研究报告仅适合专业机构投资者及与我司签订咨询服务协议的普通投资者，若您为非专业投资者及未与我司签订咨询服务协议的投资者，请勿阅读、转载本报告。