

| 证券研究报告 |

人形机器人产业系列报告（二）

——传感器行业深度研究

2023.12.31

冯胜

中泰中游制造负责人&先进产业研究首席

执业证书编号：S0740519050004

曹森元

中泰先进产业研究组 研究助理

核心观点

□ **传感器是人形机器人感知层的关键，基于MEMS工艺的力控、触觉、惯性传感器有望充分受益。**

1) 人形机器人将更重视感知层和交互层，传感器的重要性凸显。在智能机器人中，传感器用量大，成本占比高，特斯拉optimus机器人上各类传感器成本占比接近30%。

2) 人形机器人即将迎来快速发展阶段，传感器将在此过程中充分受益；其中力控、触觉、惯性三类传感器的成本较高，且国内外在高端产品的技术水平上仍存在较大差距。MEMS传感器由于其高集成性、小体积、规模化生产成本低等诸多优势，是应用于机器人传感器的上佳解决方案之一。

□ **六维力传感器是机器人精准力控的优选方案，技术壁垒较高，我国正快速追赶世界先进水平。**

1) **力/力矩传感器是机器人实现力感知的重要途径。**人形机器人通过主动力控实现“触觉”感知，以力传感器为主的力控是机器人精准力控的优选。而六维力传感器是维度最高的力觉传感器，能给出最为全面精准的力觉信息。

2) **MEMS有望加速替代金属箔片式力传感器。**从技术路线看，当前六维力以金属箔片式为主，但这类产品存在在人工成本高，效率低等缺陷，相比之下，硅基MEMS式成本低、功耗低、可靠性高、适于批量化生产，未来有望成为主流。

3) **海外先发优势明显，国内企业快速追赶。**目前ATI等海外企业主导全球市场，我国的六维力传感器行业起步较晚；受制于维间耦合和标定检测等技术壁垒，目前仍处于产业早期，2022年市场规模仅约2.4亿元。以坤维科技、蓝点触控、南宁宇立等为代表的民族品牌正快速实现六维力传感器的国产化和高端化；其中，坤维科技已成功自主研发量产精度高于0.5%的六维力传感器，目前在国内市占率超50%。

□ 柔性触觉传感器有望进一步强化机器人感知能力，目前处于产业化早期，成长空间广阔。

1) 柔性触觉传感器有望升级机器人感知能力。柔性触觉传感器相比传统的刚性传感器，具备可弯折、延展性等特质，可广泛应用于医疗保健、消费电子、工业等领域。人形机器人所需的“电子皮肤”即使用柔性材料制备而成的阵列式触觉传感器，有望使机器人具备多物理量（温度、力、粗糙度等）感知能力，帮助机器人实现精细操作。根据其感应原理，主要可分为压电式、压阻式、电容式触觉传感器。

2) 预计2028年全球柔性传感器市场空间超500亿元，国内增速有望大幅高于海外。根据汉威科技微信公众号，2021-2028年全球柔性传感器市场的年复合增长率达6.8%，预计2028年可达84.7亿美元；国内市场，2022年中国柔性传感器行业市场规模为21.12亿元，2017-2022年CAGR超过23%，其中消费电子、医疗为主要需求来源。

3) 海外龙头占据优势，国内企业加速追赶。随着MEMS技术、电子印刷工艺、3D打印技术等加工工艺的升级，“电子皮肤”有望向高密度、高灵敏、快响应、多功能、高集成的方向发展。竞争格局方面，Novasentis、Tekscan、JDI等海外企业市占率仍然居于前位，根据QY Research数据，全球前八大柔性触觉传感器企业2022年占据57.1%的市场份额，市场集中度较高；国内企业中，能斯达（汉威科技子公司）、帕西尼传感、力感科技等诸多公司均有柔性传感器生产布局，但均处于早期；人形机器人的需求驱动有望加速国产品牌技术进阶。

□ 惯性传感器助力人形机器人实现姿态控制、导航定位，高性能传感器的国产替代空间巨大

1) MEMS惯性传感器具备体积小、功耗低、集成能力强等优势，在人形机器人领域适用性较高。利用IMU（惯性测量单元）能够实时测量机器人的角速度和加速度，从而帮助机器人维持稳定的姿态和平衡，结合GPS或卫星定位，可实现精确的导航和定位。按照精度由高到低，惯性传感器分为战略级、导航级、战术级和消费级，预计人形机器人所使用的IMU与L3级别智能驾驶精度要求接近，通常适配战术级及精度接近战术级的消费级产品。

2) **2021年全球MEMS惯性传感器市场规模约35亿美元，预计将维持8-10%的年化增速。**其中，高性能MEMS惯性传感器（除消费级外的MEMS惯性传感器）约占整体的20%。我们预计高性能惯性传感器受益于智能驾驶、机器人、物联网等下游高速发展，增速应高于整体行业水平。

3) **MEMS惯性传感器竞争格局分析。**2021年全球MEMS惯性传感器CR5达到85%以上。海外头部厂商博世、霍尼韦尔等多采用IDM模式；芯动联科等国内生产商多采用Fabless模式。未来部分国内消费级MEMS惯性传感器厂商有望切入高性能领域，加速高性能MEMS惯性传感器国产化进程。

□ 人形机器人传感器市场规模敏感性测算：六维力/柔性/惯性传感器对应市场空间约为103/103/62亿元

1) 假设条件：机器人产业尚处于发展初期，六维力传感器和高性能MEMS惯性传感器、柔性触觉传感器的价格仍然较高。随着下游高精度力控、惯性应用场景不断扩充，特别是即将爆发的人形机器人所带来的需求，上述类型传感器或将迎来规模化应用和量产机遇，成本有望大幅降低并实现高速增长。

2) **结论：中性假设下，预计人形机器人带动主要三类传感器需求量2030年有望达到268亿元。**根据我们测算，保守/中性/乐观情况下，2030年人形机器人产量有望达到约72万/103万/146万台，届时六维力传感器市场规模分别约为72/103/146亿元；柔性触觉传感器市场规模分别约为72/103/146亿元；IMU的市场规模分别约为43/62/87亿元。

3) **建议关注：力传感器标的柯力传感、中航电测；柔性触觉传感器标的汉威科技；惯性传感器标的芯动联科、华依科技**

□ 风险提示：人工智能&大模型技术发展不及预期、人形机器人商业化进程不及预期、行业规模测算偏差风险、研报使用的信息存在更新不及时风险等。

目录

CONTENTS

- ① 力、触觉、惯性传感器是人形机器人感知层的关键部件
- ② 多维力传感器或是机器人精准力控的最优解
- ③ 柔性触觉传感器有望进一步升级机器人感知能力
- ④ 惯性传感器助力机器人实现姿态控制、导航定位
- ⑤ 相关标的：海外龙头优势明显，国内企业迎头追赶
- ⑥ 投资建议



1

力、触觉、惯性传感器是人形
机器人感知层的关键部件

领先 | 深度

1.1 传感器是人形机器人感知层的关键

□ 人形机器人的具身智能更重视感知层和交互层。人形机器人强调具身智能，即能够感知并理解周边环境，通过自主学习完成任务的智能体。传感器及软件是具身智能的关键，感知层和认知层是机器人向具身智能机器人迈进的门槛，机器视觉和多态语言大模型的快速迭代有望大幅提升机器人的感知能力和认知能力。传感器是“感知”的核心，其质量和技术水平将直接影响到机器人的性能和稳定性。机器人传感器可以根据检测对象的不同，分为内部传感器和外部传感器。部传感器用来感知机器人自身的状态，如速度、位置等；外部传感器用来感知机器人周边环境情况，如视觉、听觉、触觉、嗅觉、压力、温度、湿度、距离等。

□ 特斯拉人形机器人上传感器的成本占比接近30%。在一个机器人中，传感器的用量是巨大的，除摄像头（图像传感器）、雷达（激光、毫米波、超声波）、六维力矩传感器、编码器、触觉传感器外，还有位置、速度、加速度、平衡、力觉、触觉、视觉、听觉、接近觉、距离、嗅觉等等10多种传感器应用于人形机器人中。由传感器专家网数据，特斯拉optimus机器人上各类传感器成本占比接近30%。

图表1：与人相对应的传感器系统

人类	功能	机器人传感器
视觉	物体的大小、明暗、颜色、动静	CCD CMOS LiDar深度相机等
听觉	音高（音调） 音响（音强） 音色（音质）	Mic振动传感器
味觉	酸甜苦辣咸	味觉传感器
触觉	触摸的压迫感	触觉传感器
嗅觉	各种气味	气敏传感器
痛觉	机械/温度/化学等刺激导致疼痛	力传感器、温度传感器
前庭觉	平衡觉	IMU
本体觉	本体的位置与姿态	码盘、超声波距离传感器等

还有：超越人类感知能力和感知类型的传感器

图表2：机器人的常用传感器

传感器	检测元件	应用举例
位置	光电开关、限位开关	运动平台限位与规定位置检测
速度	光电编码、测速发电机	轮式机器人里程计算； 机械臂关节转动及操作控制；
加速度	应变式、微电容、压电式、压阻式加速度计	振动控制与飞行加速度控制；
平衡	陀螺仪、惯性传感器组、GPS	移动机器人空间定位与导航； 飞行机器人姿态控制；
力觉	应变片、压阻、压电	腕力、指力控制；柔性装配；
触觉	导电橡胶、PVDF、光纤	抓取判断防止冲击、 抓取物体轮廓与材质识别；
视觉	CCD摄像机、激光雷达	目标识别、定位、导航
听觉	麦克风、超声波传感器	语音识别与交互
接近觉	电涡流、电容式、红外、 超声、光电接近传感器	避障、探索与轨迹控制；
距离	超声、红外、激光距离传感器	障碍物定位、自身标的物定位；
嗅觉	气敏元件	嗅觉定位、导航

1.2 力、柔性触觉、惯性传感器壁垒高，价值量大，国内厂商蓄势待发

□ **力矩传感器是机械臂感知力度的重要部件，应用前景广阔。**按照测量维度，力矩传感器可分为一至六维力矩传感器，人形机器人中，灵巧手或将使用微型压力传感器或微型六维力传感器，对柔顺控制要求高的手腕和脚踝或将使用六维力矩传感器，而身体的其他关节将使用关节扭矩传感器。根据高工机器人的数据，以模拟关节及肢体末端触感的力传感器为例，其在人形机器人成本中占比约为15%。六维力传感器研发和制造工艺难度高，国内已具备量产能力，降本空间有望打开。

□ **柔性触觉传感器有望进一步提升机器人感知能力。**触觉传感器可以为机器人感知提供压力、温度、等信息，进一步提升机器人的感知能力；而电子皮肤则是由点状的触觉传感器组合构成，多被排列成矩阵。由于电子皮肤具备高柔韧性、拓展性、高弹性等特点，因此又称柔性触觉传感器。目前国内公司已具备柔性传感器的生产能力，但由于加工工艺难、成本高等问题，尚无法批量化应用在机器人方案中。

□ **惯性传感器有望成为机器人标配。**惯性传感器又称惯性测量单元（IMU: Inertial Measurement Unit）在机器人上可以与摄像头、力传感器等多传感器数据融合，以达到维持身体平衡，预测速度和轨迹并进行定位导航等功能，在四足机器人、人形机器人上均有望标配。**惯性传感器技术壁垒高，目前单个高精度IMU售价约为几千元至万元，价值量较高，国内已有公司掌握核心技术并实现稳定量产。**

图表3: 国内外主要机器人传感器使用的传感器类型

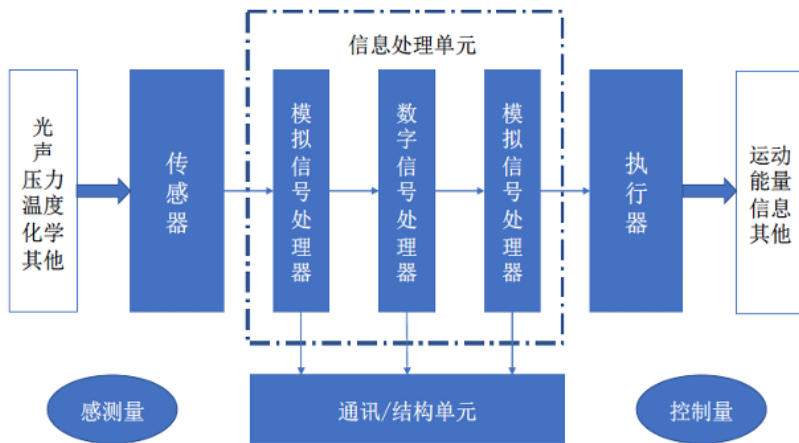
机器人名称	传感器模块
ATLAS (美国)	激光雷达、力、力矩、陀螺仪、加速度计等
ASIMO (日本)	激光、红外、超声波、压力传感器等
WABIAN-2R(日本)	六维力、位置、惯性、图像传感器等
Pepper (日本)	力/力矩、陀螺仪、加速度计、红外、激光传感器等
优必选WALKER (中国)	六维力\力矩、超声波、高精度惯导传感器等

1.3 MEMS技术有望广泛应用于各类传感器

MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) 微电机系统技术被广泛用于IMU及传感器的制造过程中。MEMS可利用大规模集成电路制造技术和微加工技术，把微传感器、微执行器、微结构、信号处理与控制电路、电源以及通信接口等集成在一片或者多片芯片上。

- MEMS传感器在人形机器人的适应性较高。通过MEMS技术制成的传感器具有体积小、重量轻、成本低、功耗低、可靠性高、适于批量化生产、易于集成和智能化等优点。随着机器人感知功能的提升，所需求的传感器数量势必增加，对于小体积、轻重量、低成本的诉求十分强烈。
- MEMS技术助力传感器实现高度集成化。通过MEMS技术，可以在同一衬底上集成多种敏感元件，使其能同时检测多种物理量并能输出多个信号，提高MEMS芯片的集成度。

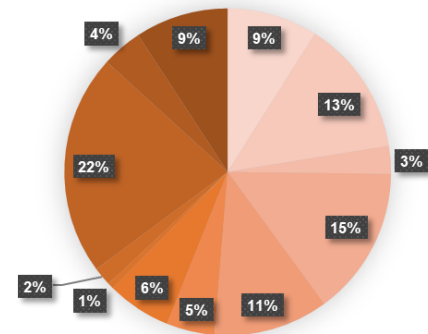
图表4: MEMS传感器工作原理



来源：芯动联科招股书，中泰证券研究所

图表5: 2021年MEMS行业市场结构

■ 加速度计 ■ 惯性传感组合 ■ 陀螺仪 ■ 压力传感器 ■ 麦克风 ■ 光学MEMS
■ 喷墨打印头 ■ 磁力计 ■ 热电堆 ■ 射频MEMS ■ 微测辐射热计 ■ 其它



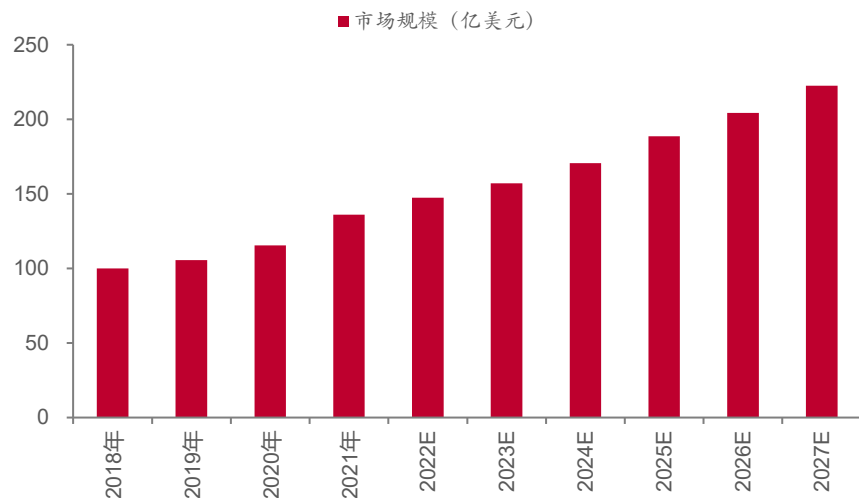
来源：Yole Intelligence，明碁传感招股书，中泰证券研究所

1.4 MEMS市场处于高速增长过程中

□ **全球MEMS市场CAGR平均在8-9%**。跟据Yole Intelligence 数据，MEMS 的全球销售量从2018年的201.68 亿颗增加至2021年的303.59亿颗，预计2027年将达到487.08亿颗，2021-2027 年CAGR达8.20%。MEMS的全球市场规模从2018年的99.94亿美元增加至2021年的135.95亿美元，预计2027年将达到222.53亿美元，2021-2027 年CAGR达8.56%。

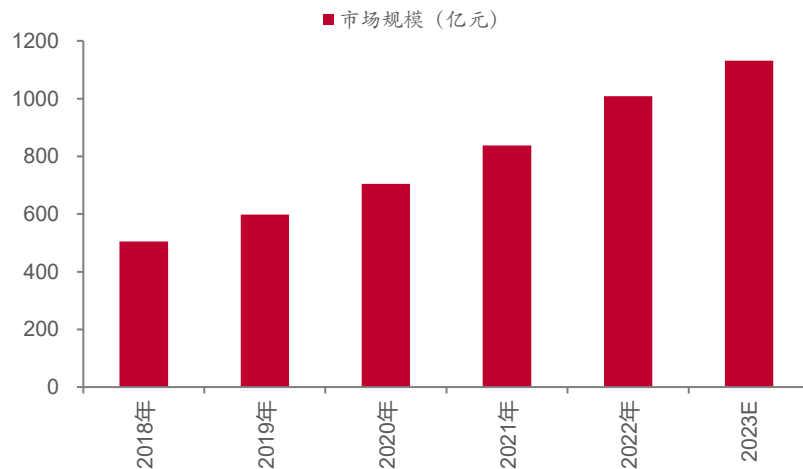
□ **国内MEMS市场增速高于全球平均增速**。受益于工业物联网、智能制造、人工智能等战略的实施，加之各级政府加速推动智慧城市建设、智能制造、智慧医疗发展，MEMS 市场海内外呈现高速增长趋势。根据中商产业研究院整理；2018-2022 年中国MEMS行业市场规模CAGR为14.82%，近年增速仍在持续提升，2022年中国MEMS市场规模达到1008亿元，同比增长20.29%，国内市场增速显著高于海外市场。

图表6: MEMS全球市场规模



来源：明碁传感招股书，yole intelligence，中泰证券研究所

图表7: 中国MEMS行业市场规模统计预测



来源：中商产业研究院，中泰证券研究所



2

多维力传感器或是机器人精准力控的最优解

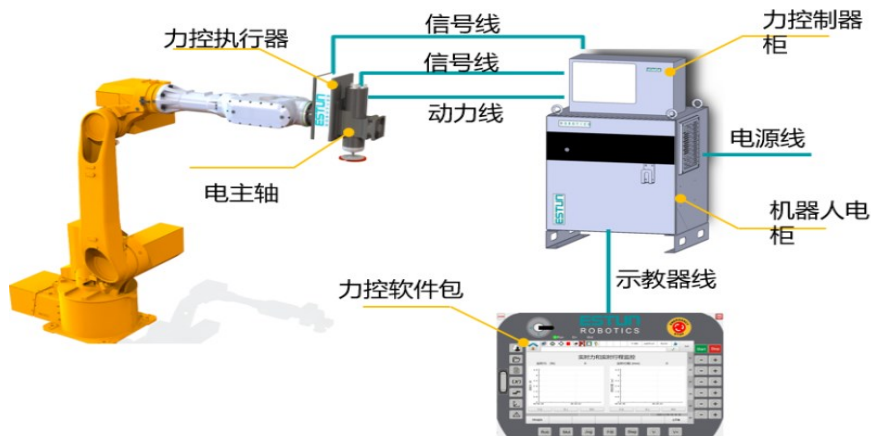
领先 | 深度

2.1 机器人通过力控制系统获得“触觉”

□ 力控制系统给予机器人以“触觉”。对应于人的触觉，机器人的触觉传感系统就是一种可以通过接触来测量物体给定属性的装置或系统。一般来说，机器人的触觉感知与在预定区域内的力的测量有关。为了改进机器人的应用效果，也应当为机器人配备先进的触觉感知系统，以使其能够感知周围环境，远离潜在的破坏性影响，并为后续任务（如手部操作）提供有效信息。

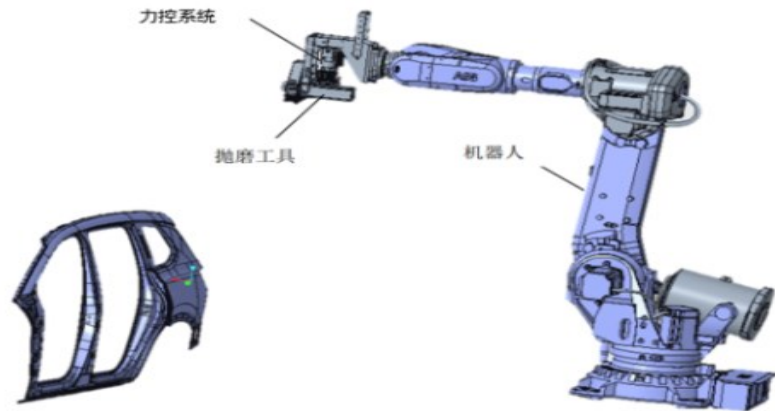
□ 以力传感器为核心的力/位控制是机器人主要控制方式之一。力控制一般泛指机器人应用领域中，利用力传感器作为反馈装置，将力反馈信号与位置控制（或速度控制）输入信号相结合，通过相关的力/位混合算法，实现的力/位混合控制技术。也称力/位混合控制技术，简称力控制。

图表8: 埃斯顿一体化打磨方案



来源: ESTUN, 中泰证券研究所

图表9: iGrinder智能浮动磨头 (独立力控系统)

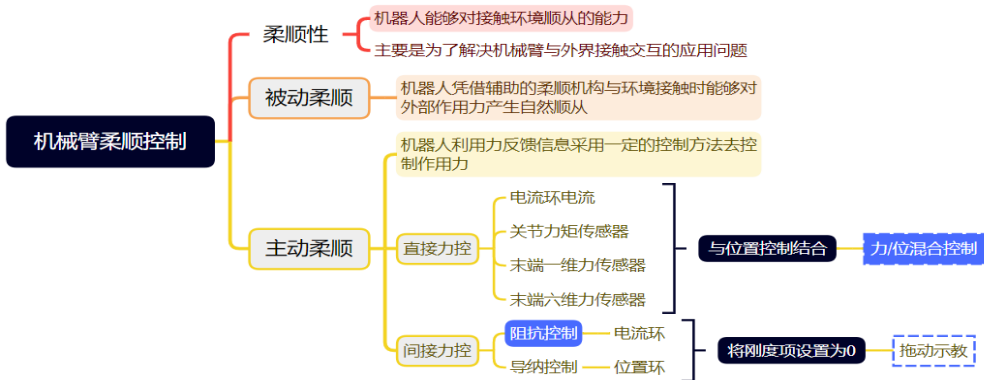


来源: 《宇立仪器: 机器人智能力控打磨方法及案例展示》, 中泰证券研究所

2.1.1 机器人力控方式不断演进 - 从位置控制到力/位混合控制

- 传统位置控制引起的瞬间过载易损害机器人。位置控制下，机器人严格按照预先设定的位置轨迹进行运动。若机器人运动过程中遭遇到了障碍物的阻拦，导致位置追踪误差变大，此时机器人会努力地“出力”去追踪预设轨迹，最终导致了机器人与障碍物之间产生巨大的内力，从而伤害零件或机器人。
- 柔顺控制提高机器人在复杂场景下对接触环境顺从的能力。传统的位置控制技术无法满足柔性装配或不均匀复杂曲面打磨等任务的需求。由于空间不一致性造成的位置偏差可能引发系统超载和损坏，因此必须引入力矩/力控制作为输出或反馈，实现更精细的控制，提高机器人对外界环境中的力的顺从或控制能力就是提高机器人的柔顺性。
- 机器人的柔顺性来自对位置和力的综合控制。柔顺控制分为被动柔顺和主动柔顺，被动柔顺是对外部作用力的顺从，而主动柔顺是对外部作用力的控制，从而解决与外界环境的交互问题。

图表10：柔顺控制的分类



来源：小牛机器人，中泰证券研究所

图表11：机械臂打磨物料



来源：“Robot for Sanding and Polishing: Our Full Guide”，中泰证券研究所

2.1.2 力传感器是精准直接力控最佳解决方案

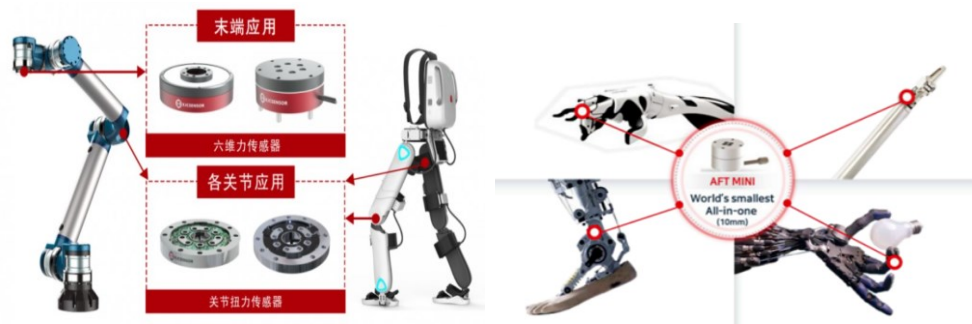
➤ 直接力控通过不同的力反馈方式实现，其中使用多维力矩/力传感器是最佳方案。

a. **电流环**：通过电流反馈和辨识的动力学模型估计外力，适用于直驱电机或者带小减速比的应用场景，如小型阻抗控制的人机交互的机械臂和小型四足等。对于大减速比的机器人，其关节back-drive的摩擦力巨大，电机电流不足以精确估计末端执行器上收到的外力。优势是无需额外的传感器，缺点是受摩擦力影响导致的力控精度差，适用场景有限。

b. **弹性体——抗外界冲击性能强**：SEA（串联弹性驱动器）用弹性的形变和高精度的位置传感器来间接地测量力距的大小，往往适用于人型机器人集成度较高和驱动器输出力矩要求较高的应用场合。

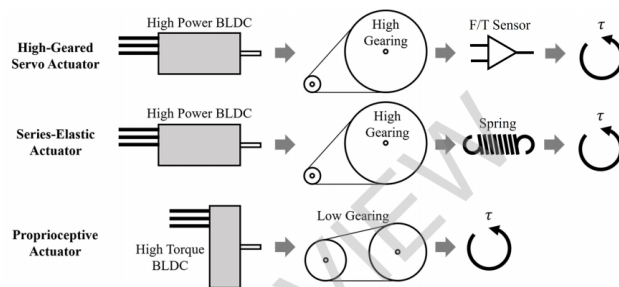
c. **力传感器**：通过在机械臂末端加装一个力传感器来实现。相对于一维力传感器，六维力传感器的力控维度更多，能够测量物体在三维空间内所有受力情况，可测量在任何方向、任何轴上的应用负载，并能承受额定测量范围5到20倍的过载，精度甚至可达0.01N，相应的价格也更贵。典型应用案例包括KUKA LBR iiwa机械手等机械臂及特斯拉Optimus人形机器人。

图表12：力传感器的应用



来源：鑫精诚，中泰证券研究所

图表13：三种力反馈方式对比



来源：《Design of a Highly Dynamic Humanoid Robot》，中泰证券研究所

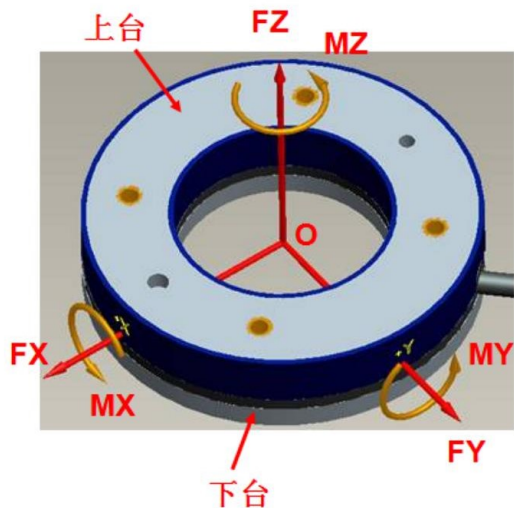
2.2 六维力传感器结构分类-应变片为主，MEMS技术有望成为主流

□六维力传感器是维度最高的力觉传感器，它能给出最为全面精准的力觉信息。六维力传感器，又叫六维力/力矩传感器、六轴力传感器、F/T传感器，是基于应变原理的高性能力学传感器，可实时测量XYZ三个方向所受到的力和力矩。

□六维力传感器一般分成上台（或内圈）、下台（或外圈）、测力梁和应变计。当上台（或内圈）和下台（或外圈）有相对受力时，测力梁产生与外力大小成比例的应变，应变计将该应变转换成电信号输出。

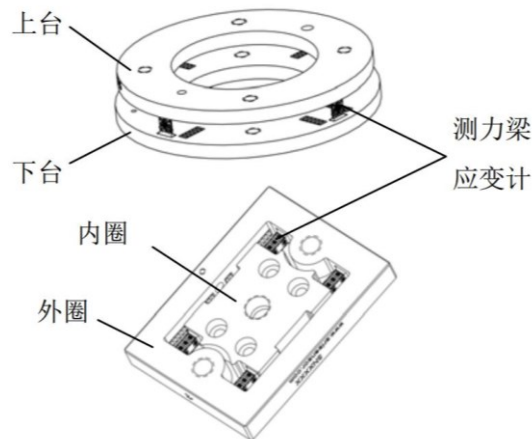
□目前市场应用的六维力/力矩传感器大部分是基于应变式的测量。根据其传感元件的不同，六维力/力矩传感器主要分为：应变片式、光学式以及压电/电容式。应变片式是市场主流，基于压电、电容和光学等原理测量的传感器有一定的理论研究和实验，下游尚未得到广泛应用。

图表14：六维力传感器测量原理



来源：俊德科技，中泰证券研究所

图表15：六维力传感器结构示意图



来源：俊德科技，中泰证券研究所

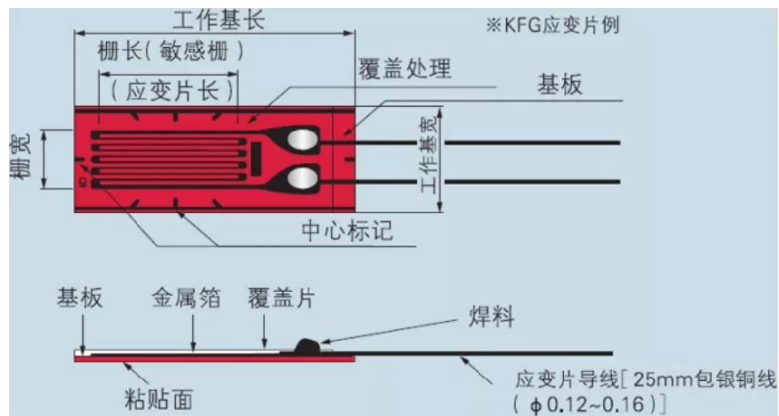
2.2.1 六维力传感器结构分类 - 应变片为主，MEMS技术有望成为主流

□应变片是电阻应变式多维力传感器的核心。应变片是由排列成栅状的高阻金属丝、高阻金属箔或半导体粘贴在绝缘的基片上构成。应变片包括金属电阻应变片和半导体应变片（即硅应变片）。

□金属/箔式电阻应变片目前应用更广。电阻变化是由尺寸变化(几何形状)引起的，类型包括丝式、箔式和金属薄膜应变片，其中目前使用最广泛的是箔式应变片，它具有横向效应小，容许电流大，生产效率高特点。但此类应变片仍需人工打磨，耗时久，生产效率较低，成本较高。

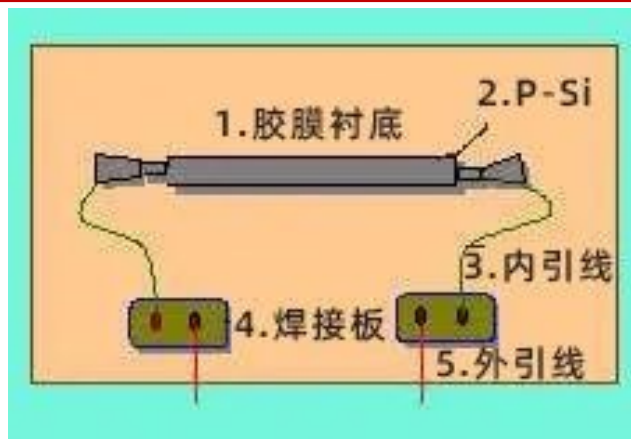
□硅应变片的综合性能更优异。在半导体材料中，压阻效应比金属应变片要显著约50倍，硅应变率系数高达几十至一百（金属应变片为2~3）。经过对稳定性、刚度、动态特性、成本与信噪比五个维度的比较，硅应变片的稳定性、信噪比、动态特性要好于金属应变片，刚度上两者差异不大，成本上金属略优，但近年来硅应变片的工艺有了提升和改进，综合成本也在大幅降低。

图表16: 传统应变片结构



来源：《应变片的粘贴》，中泰证券研究所

图表17: 半导体应变片结构



来源：《压阻传感器基本工作原理及其相关知识》中泰证券研究所

2.2.2 六维力传感器结构分类 - 应变片为主，MEMS技术有望成为主流

□硅基MEMS技术主要用来替代传统的压阻式和电容式传感器，相比之下，MEMS传感器具有微型化、重量轻、成本低、功耗低、可靠性高、适于批量化生产、易于集成和实现智能化的特点。MEMS技术将微型机构、微型传感器、微型执行器以及信号处理和控制电路、通信接口、电源等集成于一块或多块芯片上，微米量级的特征尺寸使得它可以完成部分传统力传感器所不能实现的功能。

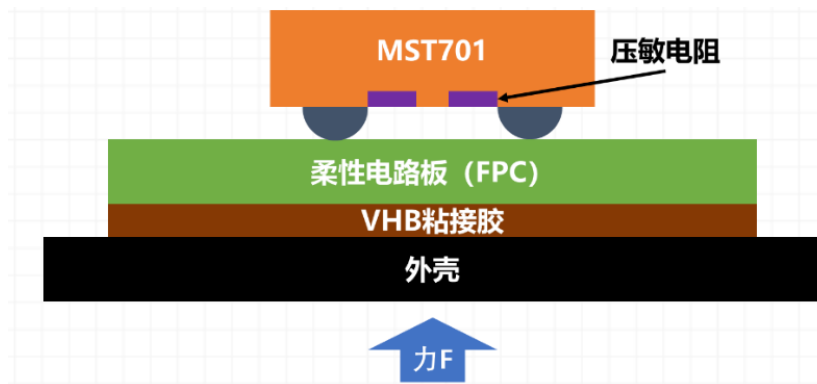
□MEMS技术制造半导体应变片可实现大批量和低成本。若单个MEMS传感器芯片面积为5 mm x 5 mm，则一个8英寸(直径20厘米)硅片可切割出约1000个MEMS传感器芯片，分摊到每个芯片的成本则可大幅度降低。相比之下，当前六维力传感器的加工依然以小批量、人工贴片焊接为主。

□MEMS技术制造半导体应变片可实现高精度。硅应变片比箔片传感器具有更高的应变灵敏度，从而使测量结果更加精确。基于MEMS技术的应变片还具有更高的断裂强度，能够承受较高的工作温度和粘接温度，因此比箔式应变片更耐用，应用范围更广。

图表18: Mitsumi 微型MEMS六维力传感器



图表19: MEMS力传感器工作原理

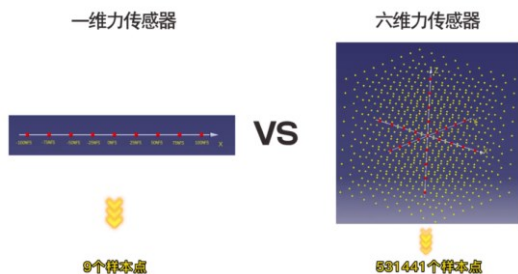


2.2.3 六维力传感器壁垒主要在于维间数据耦合与标定检测

□ **维间耦合**：由于传感器的结构设计、机械加工的精度、贴片技术、应变片横向效应与检测方式等方面的原因，几乎每一维作用到传感器上的力/力矩分量都会对传感器的各路输出信号产生影响，造成维间耦合问题。一般消除耦合或者抑制耦合可以从两个方向来做：第一种是在生产传感器之前进行的工作，一般叫做结构解耦，即从传感器的设计上来消除或者抑制耦合，该方法涉及到了传感器的制造工艺问题，这个往往比较困难，并且可能会增加成本；第二种则是利用系统性的数学模型，要矩阵解耦，运用数字信号处理的方法来减少或者消除传感器的维间耦合，该方法对制作工艺要求比较低，比较容易达到，而且还能取得很好的效果。

□ **标定检测**：标定是获得传感器固件参数，检测是获得传感器的精准度。对于六维力传感器而言，标定需要同时考虑六个维度，一维力传感器仅仅只需要9个样本点来标定，而同样是每个维度取9个样本点，六维力传感器的样本空间就包含531441个样本点，因此需要采用六维力联合加载标定，才能使传感器的准度更好、串扰更低。标定设备为六维力联合加载设备，是高精度六维力传感器研发和生产的必要条件，目前不能直接采购，一般由六维力传感器厂商自行研制，若设备存在误差或不能同时对六个方向同时加载力或力矩，将影响六维力传感器标定的准确性。

图表20：一/六维力传感器标定样本空间



来源：搜狐新闻，中泰证券研究所

图表21：美国的六维力传感器标定及检测设备



来源：坤维科技，中泰证券研究所

2.3 六维力传感器行业格局：日韩欧美起步较早，占据高端市场

□全球六维力/力矩传感器主要分为日韩品牌、欧美品牌和国产品牌三大阵营。上世纪七十年代初期，美国、日本等国家率先研发出六维力传感器，目前国际龙头ATI的产品精度可达0.5%。1987年中科院合肥智能机械研究所研制出我国第一台六维力传感器，此后，国内企业和科研机构也在加速研发，根据公开数据，坤维科技的产品精度已可对标ATI，而大部分中国企业的产品精度也已到达1%-3%的高精度区间。

□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。

□欧美地区六维力/力矩传感器厂商：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。

图表22：全球六维力/力矩传感器主流厂商



来源：高工机器人产业研究所，中泰证券研究所

图表23：国内六维力传感器市场竞争格局



来源：高工机器人产业研究所，中泰证券研究所

2.3.1 六维力传感器行业格局：国内企业快速跟进，部分产品国际领先

国内六维力传感器企业数量逐年增加，但真正具备批量化产品供应能力的厂商仍偏少，产品性能距离国际头部企业仍有差距。受高技术壁垒的影响，国产六维力/力矩传感器与外资主流传感器在灵敏度、串扰、抗过载能力及维间耦合误差等方面仍存在差距。坤维科技、宇立、鑫精诚、海伯森、蓝点触控、神源生智能、瑞尔特测控等均已有的产品落地并进入产业化应用。

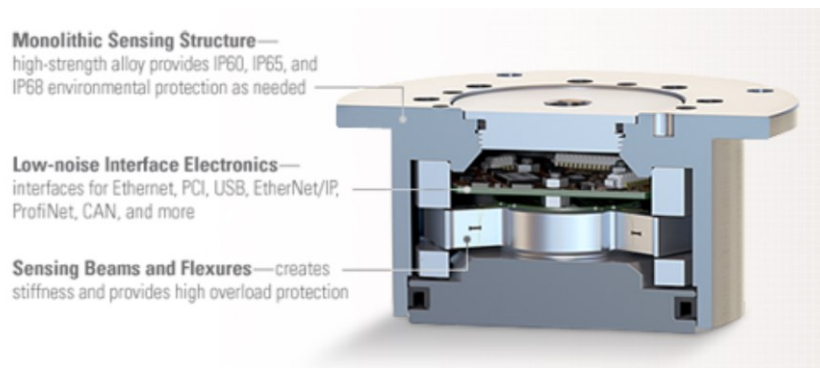
国内企业正快速跟进，有望加速国产替代。六维力传感器国际龙头ATI目前的高精度产品准度为0.5%。坤维科技借助自主研发的六维联合加载标定设备，已经量产准度高于0.5%六维力传感器，这一精度可满足绝大多数服务业、精密工业、医疗领域用途。其余国内企业，如蓝点触控、宇立仪器、鑫精诚等，产品准度亦可达1%-3%，可应用于对准度要求相对较低的领域。国内企业生产的六维力传感器单价仅为约2万元，而ATI生产的可比产品价格一般在4万元以上，国产品牌成本优势显著，有望加速推动国产替代。

图表24：国内外主要厂商产品性能指标对比

企业	准度(%FS)	企业	准度(%FS)
坤维科技	0.50%	ATI	0.5%-2%
宇立仪器	1%-3%	SCHUNK	2%
蓝点触控	1%-2%	WACOH-TECH	1%-3%
鑫精诚	1%-3%	Robotiq	3%
海伯森	1%-2%	Sintokogio	1%-3%
国内企业		海外企业	

来源：高工机器人产业研究所，中泰证券研究所整理

图表25：ATI多维力传感器结构图



来源：ATI，中泰证券研究所整理

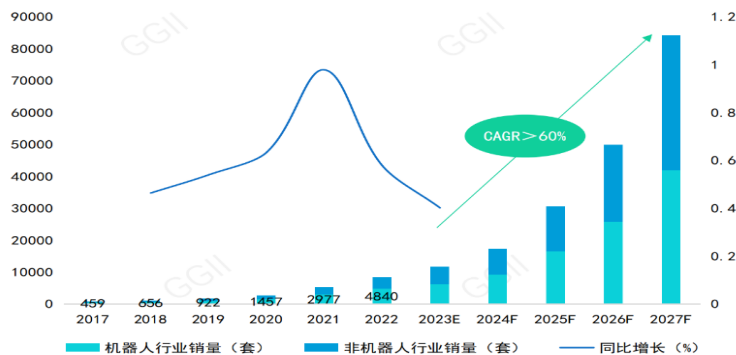
2.3.2 我国六维力传感器市场规模小，增速高，国产化率快速提升

□ **2022年机器人行业销量占比超50%**。2022年中国市场六维力传感器销量8360套，同比增长57.95%，其中机器人行业销量4840套，同比增长63.58%。预计到2027年中国市场六维力传感器销量有望突破84,000套，复合增长率超60%。

□ **中国六维力传感器市场规模增长迅速**。2022年中国六维力矩传感器市场规模2.39亿元，同比增长52.04%，其中机器人行业市场规模1.56亿元，同比增长54.35%。预计到2027年中国六维力传感器市场规模将超过15亿元，复合增长率超45%。

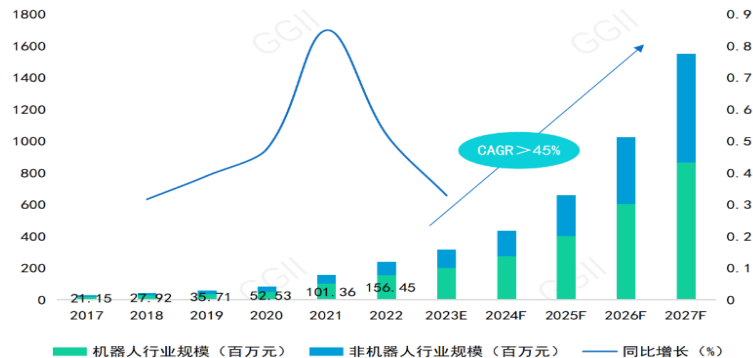
□ **国产化率快速提升**。根据华经产业院数据，我国传感器国产化率已达40%。在技术壁垒较高的六维力传感器领域，国产化趋势更加明显。据高工机器人统计，2022年中国协作机器人领域六维力传感器国产化率近80%，出货量第一为国内企业坤维科技（未上市），市场份额占比超过50%；第二为国际龙头ATI，其后为分别为蓝点触控、宇立仪器、鑫精诚，均为国内企业。

图表26：中国六维力传感器销量及预测（2017-2027）



来源：高工机器人产业研究院，中泰证券研究所

图表27：中国六维力传感器市场规模及预测（2017-2027）



来源：高工机器人产业研究院，中泰证券研究所

2.4 六维力传感器的应用领域广泛

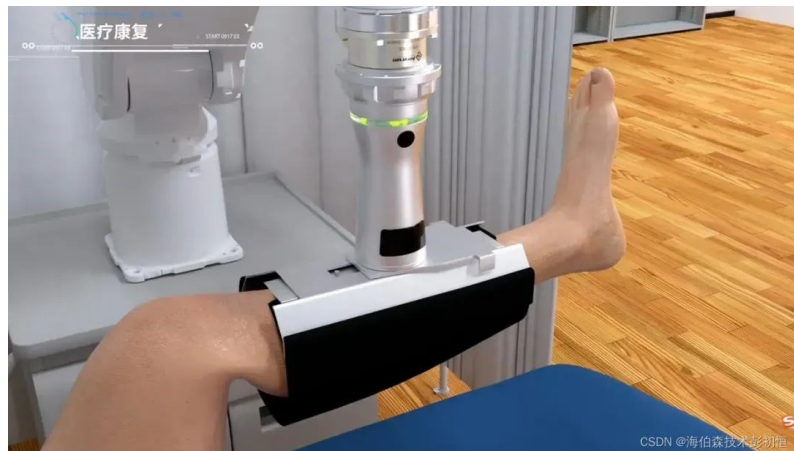
- **智能制造**：包括机器人控制（通过测量机器人末端的力和力矩，帮助机器人实现高精度的控制和操作），质量检测、加工过程监控（在加工过程中，六维力传感器可以用于监测切削力、刀具磨损情况并及时反馈相应数据给操作者）、设备测试、汽车工业（用于测试引擎、变速器、转向装置等各种零部件的性能）等。
- **生物医学**：包括手术辅助系统、运动康复评估、步态分析、姿势评估、功能性评估等。
- **科学实验**：材料性能测试（可以用于测量材料在受力作用下的强度、刚度、塑性变形等性能参数，以便科研工作者进行材料性能评估和优化）、航空航天（可以用于测试航空航天器在不同状态下的受力情况，以检测其设计是否合理，并提供数据支持给设计师进行优化）等。

图表28：六维力传感器在机器人领域的应用



来源：高工机器人公众号，中泰证券研究所

图表29：六维力传感器测量人体肌肉的力学特性



来源：CSDN@海伯森技术彭初恒，拥湾资本UoneCapital，中泰证券研究所

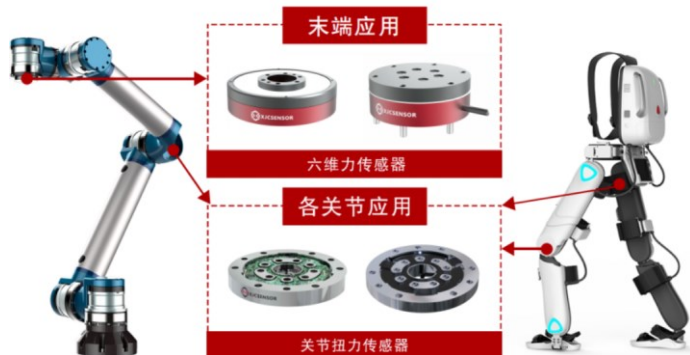
2.4.1 目前六维力传感器主要应用在协作机器人上

□ 六维力/力矩传感器在机器人领域的应用占据较大的市场份额，在协作机器人领域的应用尤为广泛。

- 在工业制造领域，通过安装在协作机器人的末端，用以实现高精柔性装配、焊接、去毛刺作业、拖动示教等应用。
- 在商业应用领域，通过在协作机器人末端安装六维力传感器，可以让机器人更加智能地感知人体部位的力度和压力，实现更加准确和舒适的按摩理疗服务，达到仿人按摩机器人柔顺性控制。
- 在医疗领域，六维力传感器可以帮助手术机器人感知人体各个方面的实时参数，包括力量、重量等，从而实现更精细、高质量的手术操作，降低手术风险。医生在协作机器人的协同操作下，通过六维力传感器感知手部的运动，从而实现更加精准、安全的操作和治疗。

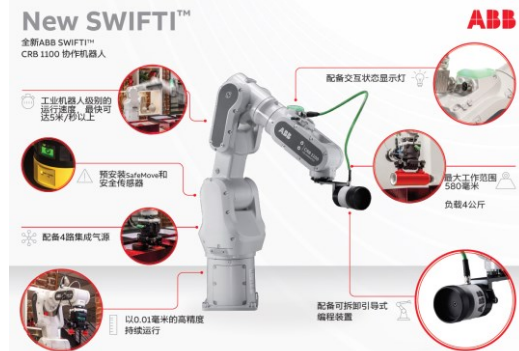
□ 协作机器人的需求增长是近年来六维力传感器市场规模的扩大的主要原因。2022年我国六轴及以上协作机器人出货量为1.95万台，同比增长4.71%。从市场规模来看，2022年中国六轴及以上协作机器人市场规模约为21.53亿元，同比2021年增长5.61%。预计到2023年，我国六轴及以上协作机器人出货量将达2.5万台。预计2026年中国协作机器人销量将达6万台。

图表30：六维力传感器在协作机器人领域的应用



来源：鑫精诚传感器官网，中泰证券研究所

图表31：ABB协作机器人



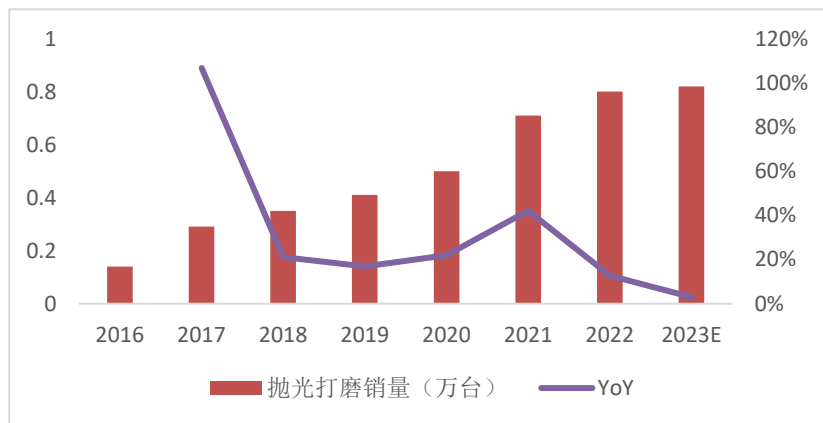
来源：ABB官网，中泰证券研究所

2.4.2 打磨抛光机器人对六维力传感器需求更直接

□抛光打磨机器人替代人工是大势所趋，但目前国内外尚无成熟产品。传统打磨抛光行业存在诸多痛点：包括依赖“老师傅”、人工成本高、打磨效率低、工作环境对人体的危害较大（噪音、粉尘等）。因此，使用机器人替代人工是未来发展的趋势，但目前在打磨抛光行业，尚未看到机器人和自动化实现成熟的解决方案，渗透率比较低。高工机器人产业研究所（GGII）统计数据显示，2022年中国抛光打磨机器人销量为0.8万台，同比增长12.68%。GGII估计，2023年中国抛光打磨机器人销量预计为0.82万台，增速预计继续下降，为2.88%。

□打磨抛光机器人替代人工仍存在较多难点，六维力传感器是关键突破口。待抛光打磨的材料复杂、来料一致性差、精度差别大、形状迥异、工艺多样、生产产品切换频次高等均是目前机器人无法完美解决的问题。而在机器人末端加装一个六维力传感器，可以直接无累计误差地测量末端六维力，实现最柔顺的拖动示教和高精度/高速度/高刚度末端力感知和输出，随着六维力传感器性能不断提升，成本逐步下降，有望成为打磨抛光机器人加速渗透的重要突破口。

图表32：2016-2023年抛光打磨机器人销量及预测



来源：高工机器人公众号，中泰证券研究所

图表33：打磨抛光机器人面临的难点

材质众多	既有金属材料如不锈钢、铜、铝、锌、铁、钛等；也有非金属材料如木材、塑料、漆料、石材、玻璃、复合材料等
多种精度	有mm级加工精度的内部功能件，如去毛刺工艺；也有6K、8K、10K精度；还有10um级加工精度的外观件，如12K超精磨镜面，光度强，能清晰地照出人影且不会倾斜
形状差异	既有平面和准平面如手机中框、汽车车门；也有复杂曲面如水龙头、人工关节、汽车复杂零部件
一致性差	既有来料一致的3C、汽车零部件；也有每件尺寸都有mm级公差的卫浴五金(但同时要求随形加工精度10um级)
换件频繁	既有3C行业，单SKU百万件；也有每千台就换件的众多行业
工艺多样	轻抛抛光、硬刀去毛刺、软刀磨砂。有的抓工件，有的抓磨头

来源：硬科技加速器，中泰证券研究所

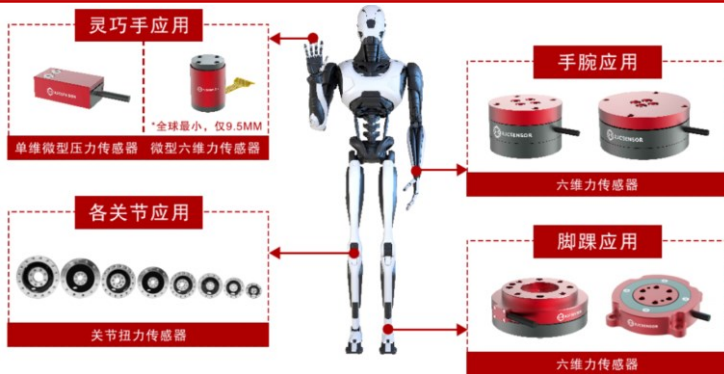
2.4.3 人形机器人有望大量使用六维力传感器

□ 六维力矩传感器能够全面反馈力觉信息，有效提升人形机器人的力度感知性能。在传统协作机器人中，六维力传感器的使用相对较少，通常依赖精确的编程和导航来完成工作，对于环境的适应性和灵活性相对较低。人形机器人需要更高的环境适应性和灵活性，需要在各种复杂的环境中行动，与人进行交互，处理各种预期的和意外的情况，这就要求能够实时感知自身的力状态。

□ 目前的主流设计方案中，人形机器人需要4个六维力传感器，分布在腕部和踝部。为实现对人手的模仿，人形机器人需要精准测量手关节的受力情况。由于手关节的执行器工作过程中的力臂较大且随机变化，一、三维力传感器不能满足需求，所以一般机器人腕部采用六维力传感器。人形机器人在行走过程中，需要测量落脚时所受的力和力矩，以控制机器人的身体姿态并维持平衡，因此需要在两个脚踝处安装六维力传感器。

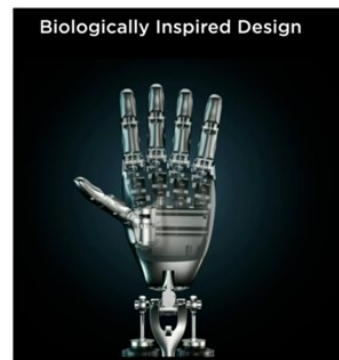
□ 未来有望应用于机器人灵巧手。特斯拉Optimus灵巧手是现有人形机器人中最精细的，它通过空心杯电机驱动，尚未借入力传感器，但考虑到抓取操作端的需求，指尖力感知能力是进行灵巧与柔性操作的刚需，未来可能会加入多个六维力传感器，通过力矩和位置的结合使得机器人实现更加柔性的控制。

图表34：六维力传感器在人形机器人领域的应用



来源：鑫精诚传感器官网，中泰证券研究所

图表35：特斯拉Optimus灵巧手



来源：特斯拉AI DAY，中泰证券研究所

2.4.4 六维力传感器价格较高，降本空间可观

□ 目前六维力传感器价格昂贵。国产六维力传感价格大概在10,000-60,000元/个不等，而海外老牌厂商生产的六维力传感器售价显著高于国内，ATI的六维力传感器产品价格约10万元左右。

□ 六维力传感器的制造成本主要集中在应变片，弹性体加工成本和人工成本上。

- 应变片：六维力传感器中使用的应变片包括金属应变片和半导体应变片。国内应变片龙头中航电测单个金属应变片售价约12元，以使用24片应变片的六维力传感器为例，金属应变片成本约288元。MEMS技术成为主流后，半导体应变片大规模量产，有望进一步降低成本。
- 弹性体：弹性体自身的价格比较低，TPE传感器弹性体材料的价格在每公斤10元到50元之间。按照双工作台+双方箱的带交换工作台功能的卧式加工中心计算，弹性体装卡人工时间成本约120秒/件，单件人工成本为2分钟，通过加工方式的改进（如在立式加工中心上采取连续送料多工位自动加工的方法可以大大降低人工介入时间），从而降低成本。
- 人工成本：产品组装、调试等。
- 我们认为，六维力传感器综合硬件成本约在千元左右，当前仍存在较大的降本和降价空间。

图表36：中航电测应变片售价



高精度/中航电测原装/应变片
BE120-10AA

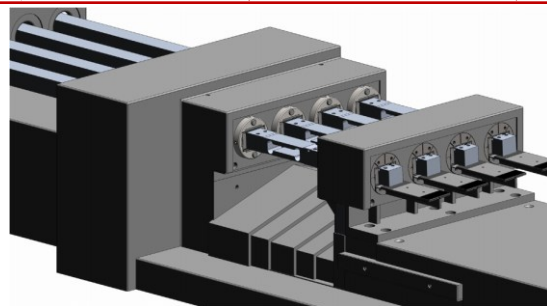
¥12.00

7天价保

5条评价

中航电测应变测试服务小店

图表37：弹性体连续送料4工位自动加工装置



2.5 人形机器人有望为六维力传感器新增百亿元市场空间

□我们预计六维力传感器单价随人形机器人量产进程逐年下降。高盛预测，如果克服诸如产品设计、用例、技术、可负担价格，以及广泛公众接受度等障碍，到2035年人形机器人市场规模将达1520亿美元，CAGR可达到94%。到2030年，人形机器人出货量可能达到100万台，并有可能成为继智能手机、电动汽车之后的下一个被广泛采用的设备。

- **产量：**保守/中性/乐观假设下，2030年人形机器人产量分别约为72万/103万/146万台
- **价格：**单机体使用4个六维力传感器，分布于腕部和踝部，2030年价格有望降至2500元，单机器人价值量为10000元
- **测算：**保守/中性/乐观情况下，2030年人形机器人所需的六维力传感器市场规模分别约为72/103/146亿元

图表38：2030年人形机器人六维力传感器市场空间测算

情况	2023年	2024E	2025E	2026E	2027E	2028E	2029E	2030E
单台机器人模组用量	4	4	4	4	4	4	4	4
六维力传感器平均单价	10000	9000	7500	6000	5000	4500	3500	2500
产量(台)	6000	16800	47040	89376	169814	276797	451180	715120
保守 YOY		180%	180%	90%	90%	63%	63%	59%
市场空间预测(亿元)	2.4	6.0	14.1	21.5	34.0	49.8	63.2	71.5
产量(台)	6000	18000	54000	108000	216000	367200	624240	1029996
中性 YOY		200%	200%	100%	100%	70%	70%	65%
市场空间预测(亿元)	2.4	6.5	16.2	25.9	43.2	66.1	87.4	103.0
产量(台)	6000	19200	61440	129024	270950	479582	848861	1455796
乐观 YOY		220%	220%	110%	110%	77%	77%	72%
市场空间预测(亿元)	2.4	6.9	18.4	31.0	54.2	86.3	118.8	145.6



3

柔性触觉传感器有望进一步升级机器人感知能力

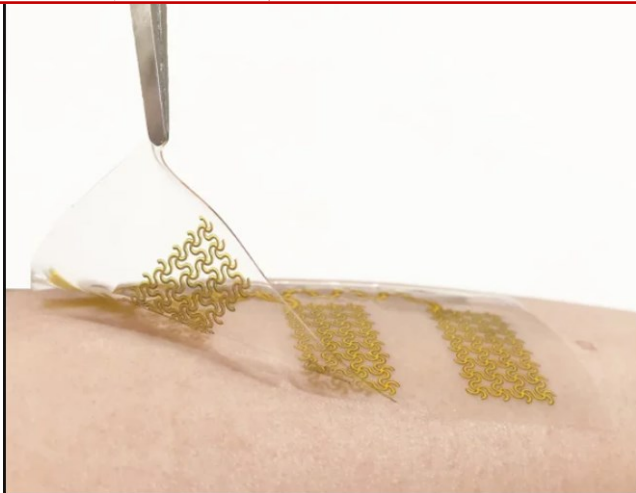
领先 | 深度

3.1 柔性触觉传感器：助力机器人感知能力再上一层楼

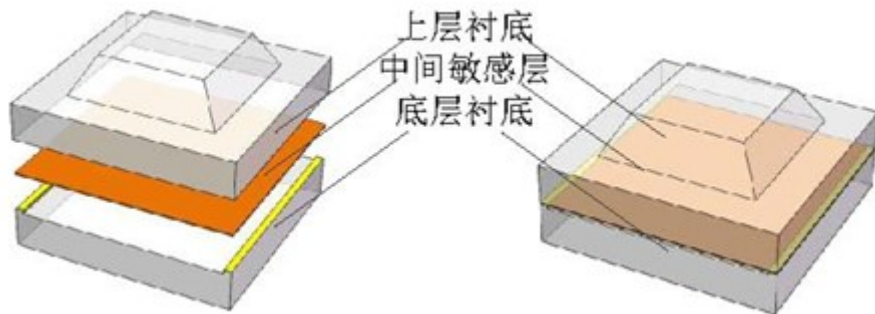
□ “电子皮肤”的应用有望赋予机器人更丰富的触觉，进一步升级其感知能力。人体皮肤中分布着众多由不同类型的神经元组成的感受器，其中默克尔细胞和鲁菲尼小体主要感受持续的低频压力，二触觉传感器正是对人体这两个触感受器的模仿。触觉传感器的原理是将触觉刺激转换为电信号，为机器人感知提供压力、温度、等信息；而电子皮肤则是由点状的触觉传感器组合构成，多被排列成矩阵。同时，由于电子皮肤由柔性材料制备而成，具备高柔韧性、拓展性、高弹性等特点，因此又称柔性触觉传感器。

- 柔性触觉传感器有望集成更强的信息收集能力。六维力传感器通常仅能反映机器人关节（单点）受力情况，而分布于肢端、表皮的柔性传感器可以收集更为丰富的信息，以帮助机器人完成精细动作。目前，柔性触觉传感器主要仅能够感受压力，未来有望收集粗糙度、温度等其它物理量，具备真正意义的触觉。
- 柔性触觉传感器的结构主要分为外层的基底材料和内层的敏感材料。基底材料通常采用PET、PDMS等高柔性、高拓展性的材料制成；而敏感层材料通常包括有机聚合物、碳纳米管、石墨烯等。

图表39：电子皮肤（阵列式压力传感器）外观



图表40：柔性传感器结构



3.1.1 柔性触觉传感器：助力机器人感知能力再上一层楼

□ 机器人触觉传感器从敏感元件感应原理上主要分为压阻式、压电式、电容式、光电式、磁敏式、超声式，目前易于集成和批量化制作的主要是压阻、压电、电容式触觉传感器。

- **电容式：**电阻式触觉传感器是利用传感单元电阻值变化情况来检测施加力的位置和大小。其问题在于制造体积过小后，电容值非常小，对检测不敏感，结果容易受噪声影响。
- **电阻式：**电阻式触觉传感器是利用传感单元电阻值变化情况来检测施加力的位置和大小，整体成本相对较低，但是响应有所滞后。
- **压电式：**压电式触觉传感器是利用压电材料在受力变形时产生电压的特性来进行测力的，用于制备的材料主要是PVDF。其特点在于仅适用于动态测量、且拉伸性较为有限。

图表41：柔性触觉传感器技术原理及优劣势

传感技术	调节参数	优点	缺点
电容式	电容值	高灵敏度、空间分辨率高、动态范围大	存在寄生电容，对噪声敏感，测量电路复杂
压阻式	电阻值	频率响应高，空间分辨率高，噪音干扰小，易于结构化	可重复性差，功率消耗高，工艺复杂
压电式	电荷	响应频率高，灵敏度高，动态范围大，可靠性高	空间分辨率差，测量电路复杂，仅适用动态监测
光电式	光强度	空间分辨率高，无电气干扰，响应速度快，成本低	结构缺乏柔性
磁敏式	磁场强度	灵敏度高，体积小	结构设计复杂，分辨率低
超声式	超声波	空间分辨率高，不受电磁干扰	存在滞后性，易于受干扰

3.1.2 柔性传感器提供更稳定的传感性能，应用场景拓宽

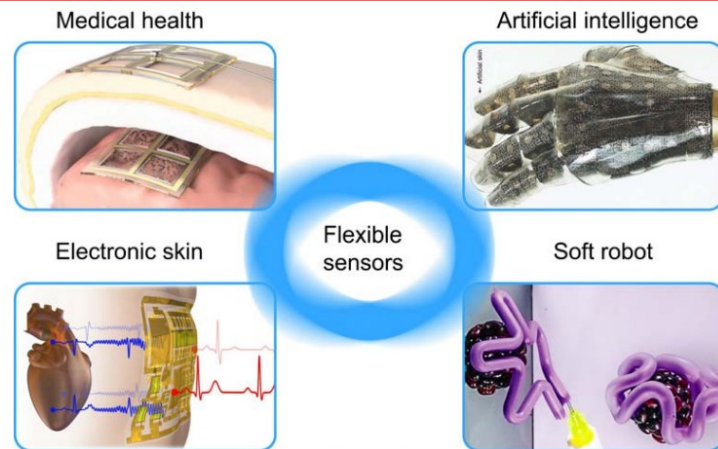
- 与传统刚性传感器相比，柔性传感器最大的优势在于应用场景更为丰富。
 - 特点一：具备柔性、可拓展性、稳定性能稳定。柔性传感器可以测量动态、或形状变化的物体和大面积的非平面，由于其机械柔韧性和可拉伸性，在传感器受到一定程度的弯折、拉伸后，传感性能仍然稳定。
 - 特点二：易于规模生产、环保处理。柔性传感器基质为有机材料或塑料薄膜等，重量轻，成本低，有利于集成分布和规模生产，同时可以提供更环保的传感器生产和处置方式，解决电子废物问题。

- 传统刚性传感器小而硬的外形限制了它们在许多应用中的使用，而柔性传感器具备更广泛的使用范围。如医疗保健中的心温监测、智能创可贴、智能绷带、柔性血氧计、人造器官等；消费领域中的智能服装、穿戴设备等；工业领域中的环境监测、设备检测等，新兴应用领域主要包括机器人、虚拟现实等。

图表42：传统刚性传感器和柔性传感器对比

	刚性传感器	柔性传感器
性能		
延展性	<1%	1000%
杨格模量（弹性模量）	1-200GPa	10kPa-200GPa
非平面顺应性	无	有
机械形变测量	无	有
生产制造		
生产方法	MEMS	印刷/MEMS/...
尺寸	0.01-0.1m ² (wafer)	1-100m ² (web)
单步吞吐量	0.001 ⁻¹ m ² min ⁻¹	10-1000m ² min ⁻¹
单位面积的潜在成本	高	低
碳排放量	高	低
应用	智能手机、自动驾驶汽车、工业机器人...	皮肤贴片、电子皮肤、智能纺织品、工业物联网标签传感器、供应链、食品...

图表43：柔性传感器应用领域



3.1.3 机械性能和阵列性能是柔性传感器的特有指标

- 柔性传感器的性能包括经典的**3S(稳定性、选择性和灵敏度)**，以及其特有的**机械性能、阵列性能**。
- **稳定性**：稳定性是指传感器在不断变化的环境中可重复和可靠地使用。柔性传感器由于使用的有机和聚合材料制造，这些材料往往会随着时间的推移而退化，其特性很容易被环境因素改变。
- **选择性**：选择性是指传感器区分目标分析物和可能的干扰物的能力。在实际应用场景中，通常同时存在多种化学物质和机械力，它们通过相似的机制与传感材料相互作用，从而产生模糊的传感器响应，使所需要的信号无法被监测。
- **灵敏度**：高灵敏度允许传感器检测刺激中的微小变化，减少假阴性信号，并提高信噪比和准确性。大多数机械传感器存在灵敏度和感应范围之间的权衡，以及非线性问题。
- **机械性能**：机械性能主要指传感器在受到弯曲、拉伸或压缩时的稳定性和持久性。这些传感器设计成能承受重复的机械应力而不损坏，保证在各种机械条件下都能保持高灵敏度和准确性。例如，它们可以被应用在可穿戴设备上，需要适应人体运动带来的各种弯曲和拉伸。
- **阵列性能**：阵列性能指的是多个传感器协同工作时的整体表现。在阵列中每个单元都能独立响应，但它们共同构成一个更大的检测网络，能确保在大面积或复杂形状的物体上进行精确和均匀的感知。优秀的阵列性能能够提供更广阔的监测范围和更高的空间分辨率。

图表44：柔性传感器关键性能

基本指标			机械性能		阵列性能	
稳定性	选择性	灵敏度	鲁棒性	信号稳定性	信号读取	多模态传感
有机物降解封装与包装、温度敏感性、生物污垢与生命受体不稳定性、信号漂移	机械传感器、生物传感器、气体传感器	传感距离、线性、低浓度分析	软硬接口、弹性范围、抗疲劳性	应变效应解耦、去除运动伪影、损伤不敏感	串扰、信噪比、接线复杂性、电力消耗、延迟	集成密度串扰

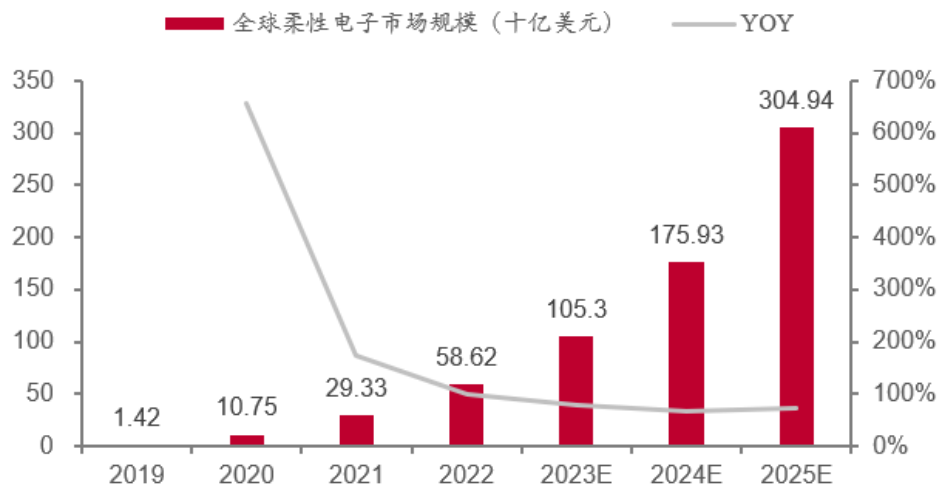
3.2 需求端：消费电子、医疗领域需求驱动柔性传感器市场规模快速增长

□全球柔性传感器市场空间有望超500亿元。据汉威科技微信公众号的数据，根据相关机构统计，2021-2028年全球柔性传感器市场CAGR达6.8%，预计2028年市场空间可达84.7亿美元。其中柔性电子领域有望成为其中最大的需求增量，据弗若斯特沙利文预测，2019-2025年全球柔性电子市场CAGR有望达到144.71%，2025年市场规模可达3049.4亿美元。

□中国柔性传感器市场规模呈现快速增长的趋势。2017年我国柔性传感器市场规模约为7亿元，2022年中国柔性传感器行业市场规模为21.12亿元，2017-2022年CAGR超过23%。其中，市场主要分布在华北、中南、华东地区，2022年占比分别为19.84%、34.66%、27.79%。2022年国内柔性传感器需求量同比增长16.2%，产量同比增长26.9%，

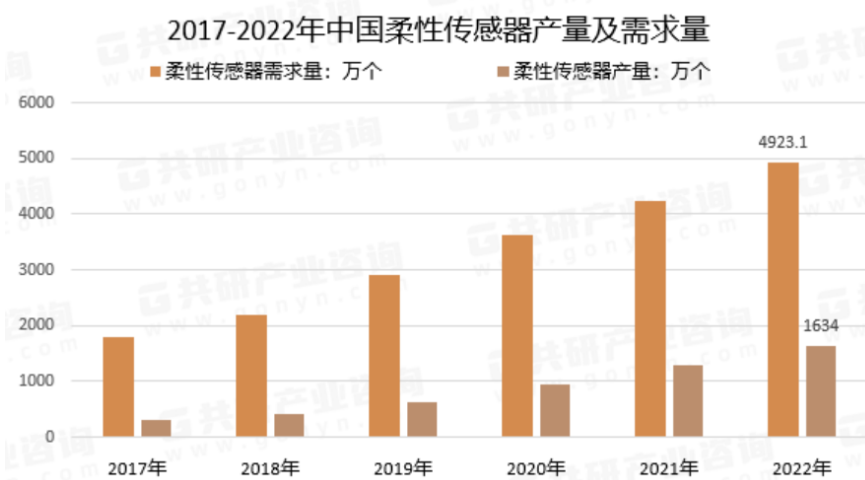
□消费电子、医疗领域市场需求为主要驱动。2022年中国柔性传感器市场规模同比增长20.4%，其中医疗领域市场规模同比增长16.5%；消费电子领域市场规模同比增长24.4%。

图表45：全球柔性电子市场规模及预测



来源：弗若斯特沙利文，华经产业研究院，中泰证券研究所

图表46：中国柔性传感器产量需求量 (万个)

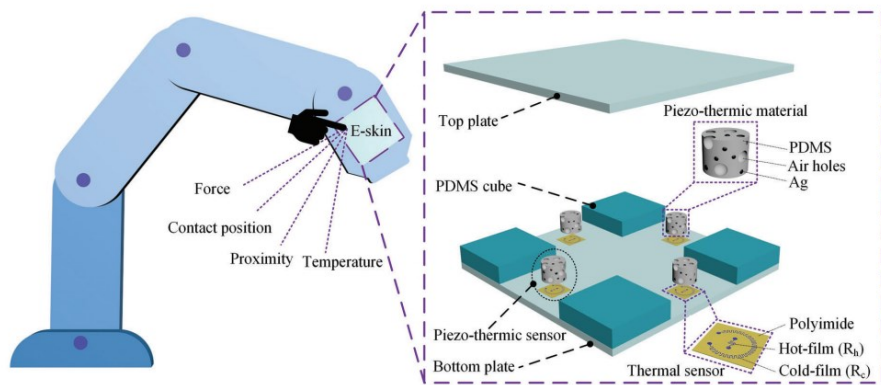


来源：共研产业咨询、中泰证券研究所

3.2 需求端：人形机器人为柔性传感器需求新增长极

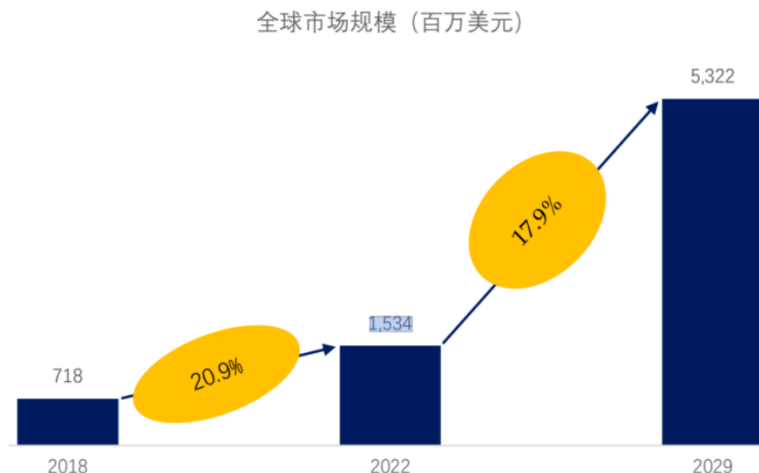
- 对于人形机器人，除了手指、肢端等需要高灵敏度的部位外，四肢、前胸、后背等外露的部位也期望进行全面覆盖以实现类似人类的触觉感知。
- 机器人灵巧手：机械手注重手的驱动控制，对电子皮肤和相关柔性传感器的需求较高，是灵巧手领域催生的主要新硬件，清华大学研究团队研发的新型多功能电子皮肤仅采用4个分布式压热传感单元就实现了大覆面电子皮肤的力感知与接触位置感知，而且其还集成了温度传感和接近感知功能，可实现人机碰撞前的安全预警和防控，保障人机交互安全。
- 机器人领域为柔性触觉传感器市场增长的主要驱动力。根据QYResearch数据，2022年全球柔性触觉传感器约15.3亿美元市场，预计2029年全球柔性触觉传感器市场规模将达到53.2亿美元，2022-2029CAGR为17.9%，机器人领域需求为市场增长的主要驱动力。

图表47：多功能电子皮肤原理结构



来源：《Multifunctional Electronic Skins Enable Robots to Safely and Dexterously Interact with Human》、中泰证券研究所

图表48：全球柔性触觉传感器市场规模预测

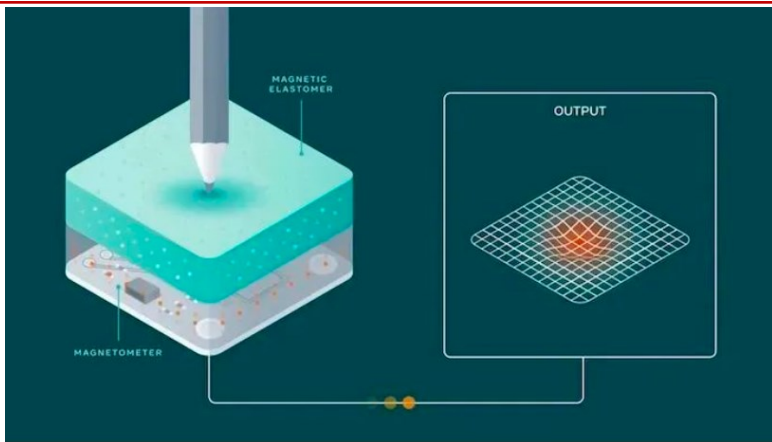


来源：QY research、中泰证券研究所

3.3 供给端：电子皮肤商业化仍面临几大难点

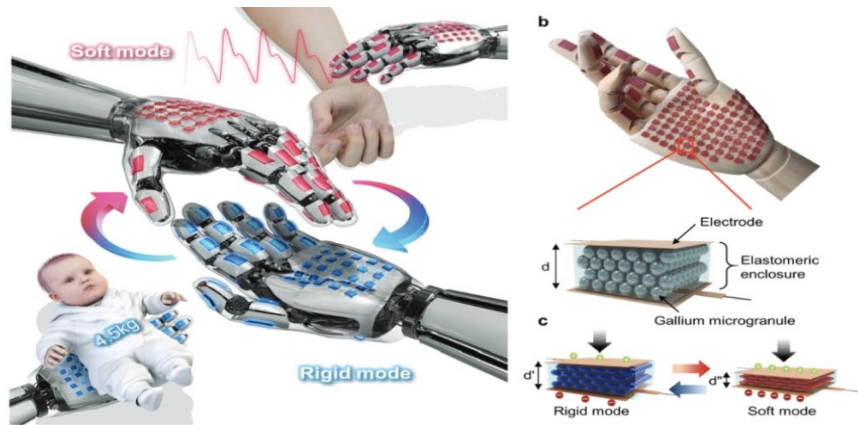
- 1) **材料选择与加工难度较大。**电子皮肤需要兼顾高柔性和高弹性，甚至需要能够弯曲、延展、挤压、扭转或变形成复杂的曲面形状。要想实现人类手腕部位的拉伸，仿生皮肤必须有较大的弹性范围，因此优化仿生皮肤触觉传感器，实现其在大拉伸率状态下正常工作研究的重点与难点之一。
- 2) **信号处理机制复杂。**阵列式的触觉传感器，一次测量往往会涉及三维力，甚至温度、硬度等多种物理量；如果是集成式触觉传感器，单体触觉感知单元信号之间存在串扰问题。所以，触觉传感器的标定机制远复杂于其他类型传感器，但精度却不一定保证，目前研究人员现在主要通过图形处理系统和AI来完成传感器的纠偏和标定。
- 3) **产品定制化属性强且加工设备昂贵，目前制造成本仍然偏高。**应用场景的不同，会导致所需的触觉传感器规格也会有差异，订单定制化水平较高。而目前尚无能够批量化使用的下游场景，导致单批次的加工成本较高。其次设备价格高昂，高灵敏度电子皮肤触觉传感器的制作通常涉及聚合物微加工、氧等离子体处理、电子束蒸镀、磁控溅射等复杂的工艺和技术，相应的设备价格高昂。

图表49：触觉传感器图形处理系统示例



来源：帕西尼传感官网、中泰证券研究所

图表50：韩国团队研制的增强压力传感机器人皮肤



来源：国际仿生工程学会、中泰证券研究所

3.4 供给端：柔性传感器产业加速，国内企业逐步跟进

□ **加工技术升级，柔性传感器的发展日趋成熟。**基于MEMS的硅压阻式传感器具有高精度和微小体积的特点，近年柔性衬底的MEMS传感器有了较大突破，柔性衬底具备较好的挠曲性、耐冲击性和机械性能。同时，聚合物微加工技术、电子印刷工艺、3D打印技术的发展颠覆了传统设计和制造方式，可以把特定导电材料注入高分子材料中，为柔性传感器制造提出了新的方案。

□ **国内电子皮肤产业逐步跟进。**电子皮肤在全球的发展尚处于早期阶段，但整体看传感器行业海外公司呈引领之势。Novasentis、Tekscan、JDI等海外企业市占率仍然居于前位，根据QY Research数据，全球前八大柔性触觉传感器企业2022年占据57.1%的市场份额，市场集中度较高；国内企业中，汉威科技子公司能斯达在柔性压电传感器领域掌握自主知识产权，柔性微纳传感器目前已在智能机器人领域有明确的应用。另外，帕西尼感知在触觉传感器领域耕耘较深，其研发的多维度触觉传感器PX-6AX的柔性传感阵列能额外为机器人提供滑动、摩擦、纹理、温度等额外信息。

图表51：中国主要柔性传感器厂商

名称	公司简介&技术水平
苏州能斯达电子科技有限公司	苏州能斯达是上市公司汉威科技控股子公司，成立于2013年。目前公司形成了自主知识产权的多品种、多量程的柔性微纳力学量传感器（压力、压电、应变）及阵列的核心设计能力、敏感材料及导电墨水合成制备能力、大面积印刷电子批量制造能力等核心能力。公司解决了柔性微纳传感器灵敏度低、稳定性差和规模化制造难等关键技术难题，实现了柔性微纳传感器在消费电子、健康医疗、IOT等战略新兴产业中的应用，在柔性传感器产业化方面具有国际领先水平。
帕西尼传感	帕西尼传感是一家以多维触觉为核心的商用机器人产品公司，产品包含多维度触觉传感器PX-6AX、消费级触觉传感器PX-3A、触觉灵巧手DexH5以及人形机器人Tora，为智能制造、康养医疗、工业生产、消费电子等领域客户提供行业领先机器人产品和解决方案。
钛深科技	成立于2018年，公司开发并拥有全球最灵敏、最柔性的触觉传感技术-柔性离电式传感技术（FITS），能够提供实时的、高质量的、低噪声的触觉/压力信号，并拥有全柔性、光学透明及超薄封装等物理特性，致力于解决各行业压感及压力分布需求的痛点。
深圳柔宇科技股份有限公司	柔宇科技成立于2012年，拥有自主研发的核心柔性电子技术生产全柔性显示屏和全柔性传感器。柔宇科技推出全球最薄彩色柔性显示屏，建立全球首条全柔性显示屏大规模量产线。柔宇具有多项自主知识产权传感器由柔性显示技术衍生而来，具有良好的传感性能，同时兼备极佳的柔韧性，应用于移动终端、智能交通、智能家居、等众多领域。
三三智能科技（苏州）有限公司	三三智能科技（苏州）有限公司是一家以柔性薄膜传感技术为核心，集材料研发、产品设计、软硬件开发、生产销售、技术服务于一体的高科技企业，专注于声学超声、医疗健康、航空航天、智能交通、人机交互、控制检测、可穿戴设备等行业领域的深度应用开发，是智能柔性传感技术及行业应用解决方案提供商。
深圳力感科技有限公司	力感科技成立于2016年，是一家中国科学院孵化的创新型企业，2017年获中国科学院先进技术研究院优秀青年创新基金一等奖。
苏州慧闻纳米科技有限公司	苏州慧闻纳米科技有限公司是一家从事智能传感器研发、生产和销售，同时提供人工嗅觉解决方案的国家级高新技术企业。公司于2014年由具有多年传感器研发和应用经验的科学家团队在苏州成立，目前已研发出针对多种有毒有害气体（如甲醛、酒精、氨气、一氧化碳、氮氧化物、硫化氢、甲烷、TVOC等）的传感器芯片及相应的检测模块。
宁波初和科技有限公司	宁波初和科技有限公司成立于2018年10月，是中科院宁波材料所孵化的科技型企业，也是国内率先从事弹性电子材料与器件产业化的公司。主要从事弹性电子材料、器件及其在智能服装、智能家居、智能体育、智慧微电流技术应用及智能机器人等领域的相关应用技术开发。

来源：各公司官网，中泰证券研究所整理

3.5 人形机器人领域柔性传感器国产替代加速推进，未来降本空间可观

- 柔性触觉传感器材料占传感器模组成本的**40%左右**。以一个包含43个模组和40个阵列点的传感器模组为例，其成本大致由以下部分组成：传感器材料占40%，生产制造占30%，算法和软硬件等其他部分占30%。对于人形机器人，除了手指等需要高灵敏度的部位外，理想情况下，四肢、前胸、后背等外露部位也期望进行全面覆盖以实现类似人类的触觉感知。
- 规模量产助力柔性触觉传感器实现降本，单机价值量有望随降本后逐渐增加。
 - 产量：保守/中性/乐观假设下，2030年人形机器人产量分别约为72万/103万/146万台
 - 价格：单模组价格有望逐步降至1000元，随价格下降，单机体模组数量有望增加，2030年单机价值量为10000元
 - 测算：保守/中性/乐观情况下2030年人形机器人所需的柔性触觉传感器市场规模分别约为72/103/146亿元。

图表52：2030年人形机器人柔性触觉传感器市场空间测算

情况	2023年	2024E	2025E	2026E	2027E	2028E	2029E	2030E
保守	单台机器人模组用量	8	8	8	8	10	10	10
	模组平均单价	3000	2500	2200	2000	1800	1500	1000
	产量（台）	6000	16800	47040	89376	169814	276797	451180
	YOY		180%	180%	90%	90%	63%	63%
	市场空间预测（亿元）	1.4	3.4	8.3	14.3	30.6	41.5	54.1
中性	产量（台）	6000	18000	54000	108000	216000	367200	624240
	YOY		200%	200%	100%	100%	70%	70%
	市场空间预测（亿元）	1.4	3.6	9.5	17.3	38.9	55.1	74.9
乐观	产量（台）	6000	19200	61440	129024	270950	479582	848861
	YOY		220%	220%	110%	110%	77%	77%
	市场空间预测（亿元）	1.4	3.8	10.8	20.6	48.8	71.9	101.9



4

惯性传感器助力机器人实现姿态控制、导航定位

领先 | 深度

4.1 何为惯性传感器和IMU?

□ 惯性技术广泛应用于海、陆、空、天各种载体的导航、定位与控制。而惯性传感器是将物体运动的加速度、位置和姿态转换为电信号的器件，主要包括**加速度计、陀螺仪和惯性测量单元（IMU）**。

□ **惯性测量单元(Inertial measurement unit, 简称 IMU)**，是测量物体三轴姿态角（或角速率）及加速度的装置。一个IMU模组通常包含三个轴向的陀螺和三个轴向的加速度计（或增加三个轴向的磁力计），甚至包含磁力计、GPS等辅助单元以完成更复杂的测量。

➤ **构成**：IMU模组通常包括一个速度传感器（加速度计）和一个角速度传感器（陀螺仪）。加速度计用于测量物体的线性加速度，而陀螺仪则用于测量物体的角速度。

➤ **重要性**：单独使用MEMS加速度计的测量结果会受到运动加速度的影响，使倾角测量不够准确，所以通常需利用MEMS陀螺仪和磁传感器补偿。同理，单独使用陀螺仪亦无法准确判断设备的姿态。因此需要确认运动状态的设备通常组合使用三轴加速度计、三轴陀螺仪和三轴磁传感器，即为六轴IMU或九轴IMU。

图表53: 惯性传感器分类介绍

	介绍
陀螺仪	可应用于静态物体和运动物体的检测。静止的物体受到重力加速度的作用，将重力矢量投影在加速度计轴上可确定静止物体的倾斜角度；运动物体通过对加速度积分得到相对运动距离，通过记录物体加速度的变化来判断运动状态的改变。MEMS陀螺仪可以测量角速度的绝对值，计算后得到被检测物体的相对旋转角度。
IMU	是由两个及以上惯性测量MEMS芯片及ASIC芯片合封后具有完整功能的器件。根据内置传感器的不同，其分为六轴和九轴IMU，满足不同应用场景下高精度测量的需求
加速度计	利用重力加速度以检测设备的倾斜角度和掉落旋转等操作，但是测量结果会受到运动加速度的影响，使倾角测量不够准确，所以通常需利用MEMS陀螺仪和磁传感器补偿。

图表54: IMU结构示意图

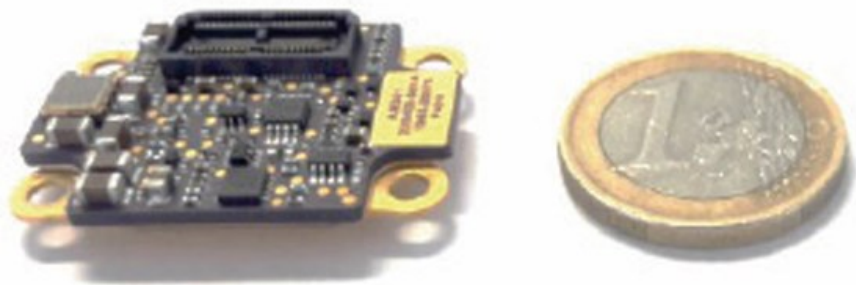


4.1 何为惯性传感器和IMU?

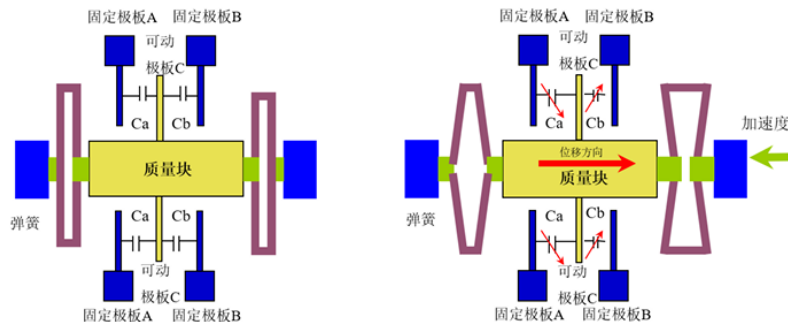
MEMS 加速度计通常由质量块、阻尼器、弹性元件、电容极板（适用于电容式加速度计）和ASIC芯片（专用集成电路芯片）等部分组成。根据测量维度的不同，加速度计分为单轴、二轴、三轴三种类型。相比单轴、二轴加速度计仅能检测平面的运动状态改变，三轴加速度计可以实现单一产品测量三维空间的加速度，从而满足微型化及更多领域的应用需求。

- **分类：**根据感测原理，MEMS 加速度计可分为压阻式、电容式以及热式等多种类型。由于电容式MEMS 加速度计具有高灵敏度、高精度、低温度敏感的特点，其在市场中占据主导地位。
- **工作原理：**电容式MEMS加速度计是将质量块和可动极板一体制造成梳状结构，并与固定极板形成距离可变的平行电容板结构。当被测量物体运动状态变化带动芯片内质量块移动时，会带动可动极板移动，使得可动极板和固定极板间的距离改变，导致两极板间电容值随之改变。此时，ASIC芯片再将电容值的变化转化成电学信号，运算得到加速度物理量。

图表55: MEMS加速度计产品模块



图表56: MEMS加速度计内部结构图及原理



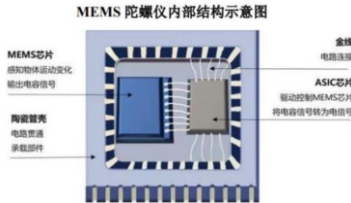

4.1 何为惯性传感器和IMU?

MEMS 陀螺仪具有体积小、重量轻、环境适应性强、价格低、易于大批量生产等特点，率先在汽车和消费电子领域得到了大量应用。随着性能的进一步提高，MEMS 陀螺仪应用也被拓展到了工业、航空航天等领域，使得惯性系统应用领域大为扩展。目前无人系统、高端工业、高可靠等高精度场景仍然主要应用两光陀螺。

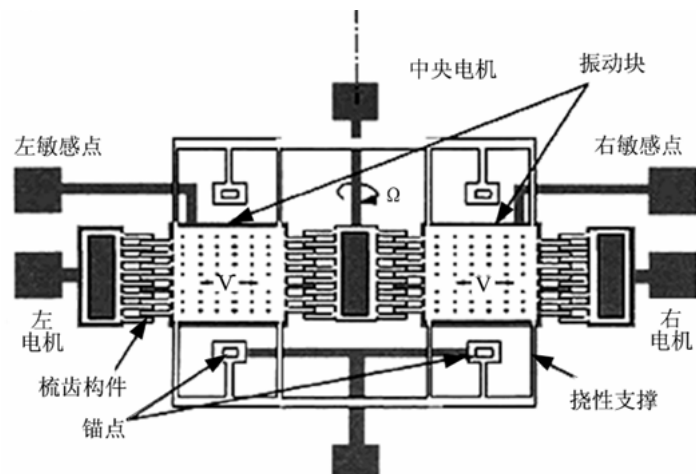
分类：目前市场上主要使用的为激光陀螺仪、光纤陀螺仪和MEMS陀螺仪，激光陀螺仪和光纤陀螺仪分别属于第一代光学陀螺仪和第二代光学陀螺仪，亦被称为“两光陀螺仪”，而MEMS陀螺仪是基于哥氏振动效应和微纳加工技术设计而成的第三代陀螺仪。

工作原理：MEMS 芯片感知外部信号、ASIC 芯片实现信号转化，并利用科里奥利效应测量角速度。下图为陀螺仪内部结构，在MEMS陀螺仪中该部分被集成在MEMS芯片中。

图表57: MEMS陀螺仪和两光陀螺仪优劣势对比

应用场景及客户群体	优势	劣势	图例
MEMS 陀螺仪 主要应用场景以及客户群体面向于消费领域、汽车、无人系统、高端工业、高可靠等；高性能 MEMS 陀螺仪主要面向无人系统、高端工业、高可靠等	低成本，小体积，高可靠，易批产	精度接近中低精度两光陀螺	MEMS 陀螺仪内部结构示意图 
激光陀螺仪/光纤陀螺仪 两光陀螺主要应用场景以及客户群体面向于无人系统、高可靠等，部分光纤陀螺仪也用于高端工业领域	超高精度	体积大，成本高，功耗大，难批产	

图表58: TFG陀螺仪结构图



4.2 何为惯性传感器和IMU?

□ 根据下游应用场景不同，对惯性传感器的精度要求亦不相同，通常其精度与制造成本和售价呈正相关。我们认为由于智能驾驶、机器人、人机交互等新兴应用领域对惯性传感器需求的增加，传统的分类可能无法准确划分下游应用领域，仅可作为参考。

- **消费级**：普通的消费级电子产品所使用到的IMU都是低精度且十分廉价的IMU，对精度要求较低，普遍应用于手机、运动手表等消费电子产品中，通常售价在几十元至几百元级别。
- **战术级**：战术级IMU的精度高于消费级，广泛应用于高端工业领域、车辆控制、无人机等领域。制造成本相对可控，售价通常在几百至几千元不等，可用于智能驾驶领域。
- **导航级**：精确度极高，主要用于无人系统和航空领域。根据其参数和下游应用不同，售价波动较大。
- **战略级**：主要用于航天工业、航海等尖端领域，通常体积较大，且价格极为昂贵。

图表59：不同参数的陀螺仪、加速度计使用领域及主要制造商

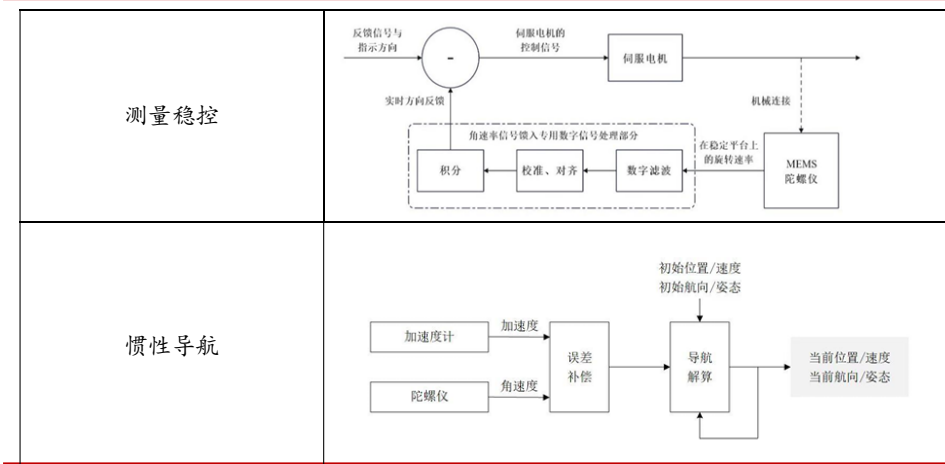
类别		战略级	导航级	战术级	消费级
陀螺仪	应用领域	航天、航海	航空、无人系统	高端工业、车辆、飞行体	消费电子
	零偏稳定性 (°/h)	<0.01	0.01-0.15	0.15-15	>15
	标度因数精度 (ppm)	<1	1-100	100-1000	>1000
	角度随机游走 (°/√h)	<0.01	0.01-0.05	0.05-0.5	>0.5
	厂商	霍尼韦尔	霍尼韦尔、诺斯罗普格鲁曼、埃姆科等	霍尼韦尔、ADI、sensoror等	霍尼韦尔、ADI、sensoror等
加速度计	应用领域	航天、航海	航空、无人系统	高端工业、车辆、飞行体	消费电子
	零偏稳定性 (°/h)	<5	5-50	50-1000	>1000
	标度因数精度 (ppm)	<10	<500	<1000	>1000
	厂商	霍尼韦尔、诺斯罗普格鲁曼	霍尼韦尔、Safran	霍尼韦尔、ADI、Safran、Silicon Sensing、美泰科技	Bosch、TDK

4.3 IMU在人形机器人中扮演什么角色？

□IMU在人形机器人中发挥的作用主要体现在**精确的姿态控制和平衡维持、导航和定位、动作执行和路径规划**3个方面，具体看其应用方向在于惯性导航和测量稳控。

- **姿态控制和平衡：**惯性稳控是通过连续监测系统姿态与位置变化，利用伺服机构动态调整系统姿态，帮助机器人维持稳定的姿态和平衡。人形机器人在执行各种动作中，需要精确地控制机体姿态和平衡。
- **导航和定位：**通过对角速率和线加速度按时间积分以及叠加运算，可以动态确定自身位置变化，其优势在于不借助外源信息，可以独立使用。同时IMU可以与卫星定位结合，提供准确的室内和室外定位信息，人形机器人在复杂环境中导航和定位的能力大大提升。
- **动作执行和路径规划：**基于IMU的测量数据，人形机器人可以更精确地执行各种动作，如行走、转弯、跳跃等。此外，IMU数据还可以用于路径规划，帮助机器人避开障碍物，规划出更合理的运动轨迹。

图表60：惯性导航、测量稳控原理示意图



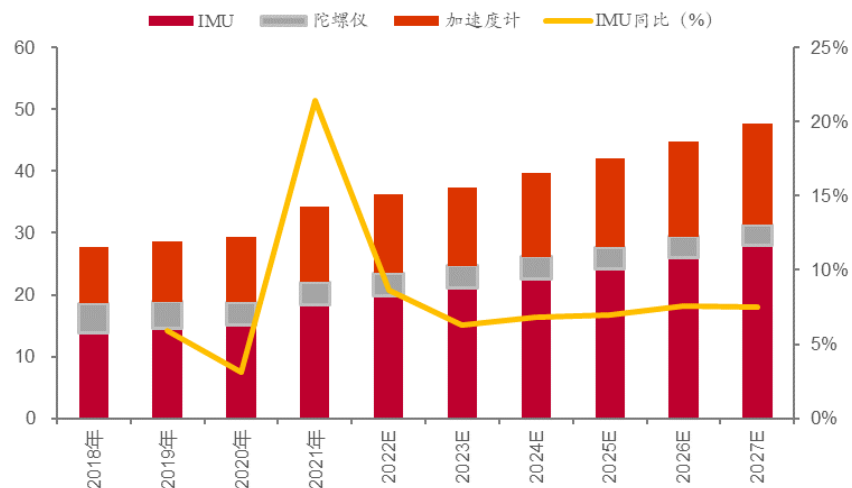
来源：芯动联科招股书、中泰证券研究所

4.4 MEMS惯性传感器市场空间广阔

□ 预计未来整体MEMS惯性传感器市场平均维持8%-10%年化增速。根据 Yole Intelligence 的统计，全球MEMS惯性传感器的市场规模从2018年的28.31亿美元、31.21亿颗增长至2021年的35.09亿美元、39.39亿颗，预计该市场将于2027年增长至49.43亿美元、60.60亿颗，2018-2027年销售额及销售量的CAGR分别为6.39%和7.65%。

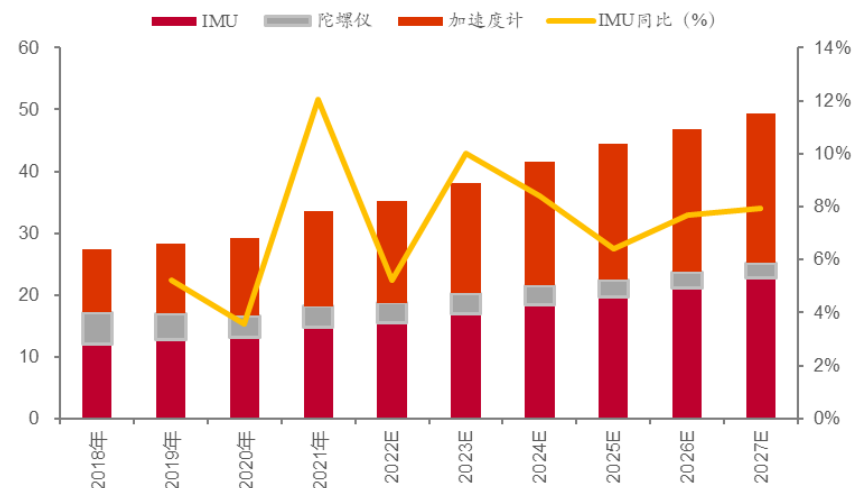
- **IMU**：预计市场规模从2018年的13.19亿美元、12.04亿颗增长至2027年27.92亿美元、22.82亿颗，2018-2027年销售额及销售量的CAGR分别为8.15%和7.36%。
- **MEMS加速度计**：预计市场规模从2018年的9.14亿美元、10.23亿颗增长至2027年16.41亿美元、24.28亿颗，2018-2027年销售额及销售量的CAGR分别为6.72%和10.08%。

图表61：2018-2027年全球MEMS惯性传感器市场结构 (亿美元)



来源：Yole Intelligence, 中泰证券研究所

图表62：2018-2027年全球MEMS惯性传感器市场结构 (亿颗)



来源：Yole Intelligence, 中泰证券研究所

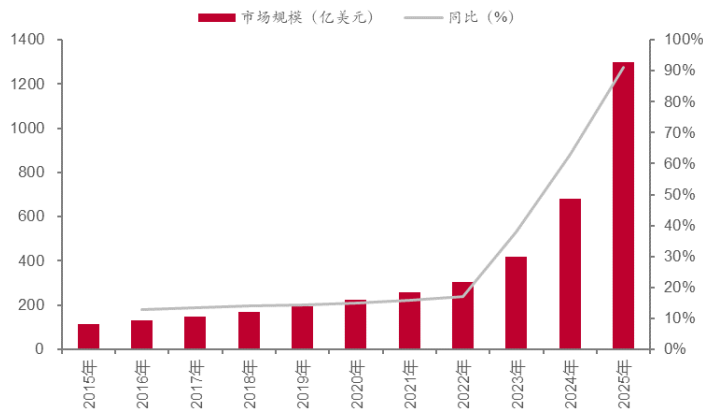
4.5 高性能MEMS惯性传感器较为稀缺

□ 2021年高性能MEMS惯性传感器约占MEMS惯性传感器市场的20%。高性能MEMS惯性传感器主要适用于高端工业、无人系统、高可靠等应用领域。根据Yole统计的数据，2021年，全球高性能MEMS惯性传感器市场规模约7.1亿美金（含MEMS惯性传感器系统），对应约45亿元人民币，目前惯性MEMS传感器的主要市场仍然集中在消费级领域，对产品的整体参数、性能要求相对较低。

□ 我们预计，高性能MEMS惯性传感器的增长速度应远高于整体MEMS惯性传感器市场增速。

- **L3级别智能驾驶打开成长空间。**无人系统、自动驾驶是高性能MEMS惯性传感器的重要下游。汽车最初应用MEMS加速度计测量汽车运行状态；MEMS陀螺仪用于检测车身稳定性。随着自动驾驶进入L3时代，使用IMU+卫星导航是目前高精度定位的主要解决方案。根据艾媒咨询预测估算，全球无人驾驶汽车市场规模2021-2025年复合增长率为49.74%。
- **需求测算：**按目前全球汽车销量平均8000万台估算，若2030年全球L3级别智能驾驶渗透率达到10%，单台汽车使用1颗IMU，全球智能驾驶IMU市场规模为136亿元。

图表63：全球无人驾驶汽车市场规模（亿美元）



来源：IImedia，中泰证券研究所

图表64：2030年全球无人机市场规模及预测（亿美元）

全球汽车销售量 (万台)	L3级别渗透率 (%)	单车IMU价值量 (元)	IMU市场空间(亿元)
8000	10%	1700	136

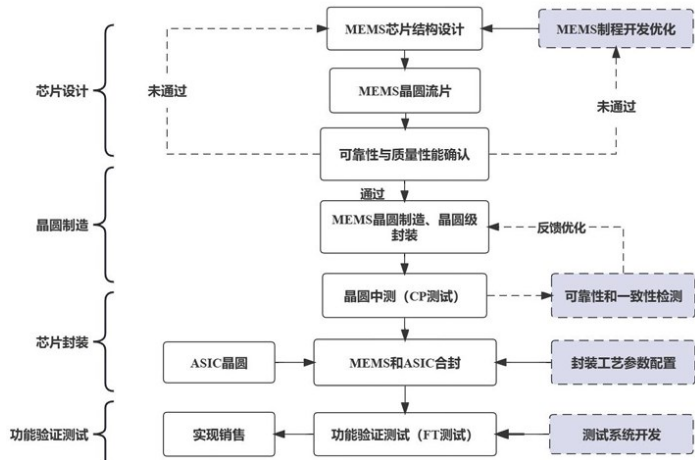
来源：Yole Intelligence，中泰证券研究所

4.6 竞争格局：国外厂商主导，国内企业追赶

□ MEMS行业主要采用Fabless和IDM两种经营模式。IDM是指公司整合产业链上下游业务，集芯片设计、晶圆制造、芯片封装和芯片测试于一体。拥有晶圆厂和与产品相适应的工艺平台，能够更好地进行工艺与设计的协同优化并加快产品迭代，但同时投资规模巨大。采用IDM模式的企业主要包括博世、霍尼韦尔、ST、英特尔和三星等。而采用Fabless模式的MEMS企业主要负责MEMS产品的设计与销售，将生产、封装、测试等环节外包。通常对资金和规模要求相对较低，因此大部分集成电路生产企业采用Fabless模式。

□ 国外厂商占据主导地位。根据Yole Intelligence数据，MEMS加速度计、MEMS陀螺仪、IMU领域海外前五大公司2021年市占率分别为84%、83%、88%，处于绝对领先地位。

图表65: MEMS传感器生产流程



来源：明瑞传感招股书，中泰证券研究所

图表66: 2021年各类型惯性传感器市场占有率

MEMs加速度计		MEMs陀螺仪		IMU	
博世	32%	TDK	24%	博世	35%
ST	21%	ADI	18%	ST	20%
MURATA	13%	霍尼韦尔	19%	TDK	20%
NXP	11%	博世	12%	霍尼韦尔	6%
ADI	7%	ST	10%	ADI	7%
合计	84%	合计	83%	合计	88%

来源：Yole Interlligence，中泰证券研究所

4.6 竞争格局：国外厂商主导，国内企业追赶

□ 国内厂商尚处于追赶状态。由于国内起步较晚，涉足研发MEMS的公司相对较少，产业集群效应偏弱。目前，国内具备MEMS惯性传感器制造能力的上市公司主要包括芯动联科、明皜传感、敏芯股份等；非上市公司包括美泰科技、深迪半导体等，以上公司多采用的是Fabless经营模式。

□ 国内具备高精度MEMS惯性传感器制造能力的企业较为稀缺。从主要技术指标看，人形机器人所使用的惯性传感器的技术指标要求与自动驾驶类似，战术级和接近战术级的消费级产品预计可以满足其需求。上市公司中，目前具备高精度MEMS传感器制造能力的企业仅有芯动联科，华依科技、星网宇达等主要为IMU模组生产商和惯性导航产品生产商，产品未来有望在机器人领域获得应用。明皜传感、敏芯股份等公司的MEMS惯性传感器目前主要应用于消费级场景。

图表67：国内外主要企业陀螺仪技术指标对比

类别	Honeywell (HG4930)	SiliconSensin g(CRH03)	Sensorer(STI M210)	芯动联科 (33系列)	华依科技 (IMU3000)	星网宇达 (XW-IMU5100)
零偏稳定性 (°/h)	0.25	0.12	0.3	<=0.1	<=1	<=0.2
标度因数精度 (ppm)	-	200	500	<=100	-	-
角度随机游走 (°/√h)	0.04	0.017	0.15	<=0.05	0.15	<=0.3

来源：芯动联科招股书，公司官网、中泰证券研究所

图表68：国内外主要企业加速度计技术指标对比

类别	Honeywell (HG4930)	Colibrys(MS1 030)	美泰科技 (8000D)	ADI (ADXL35 7)	芯动联科 (35系列)	华依科技 (IMU3000)	星网宇达 (XW-IMU5100)
零偏稳定性 (°/h)	25	30	<=100	10	<=20	<=50	30
标度因数精度 (ppm)	500	2000	3000	13000	<=500	-	<=1000
线速度随机游走 (ug/√hz)	30	100	50	110	<=30	-	-

来源：芯动联科招股书，公司官网、中泰证券研究所

4.7 人形机器人惯性传感器市场空间

□ 目前惯性传感器在人形机器人中的应用尚未完全成熟，由于价格较高，尚未作为广泛认可的导航方案。目前部分人形机器人制造企业已经采用IMU作为惯性传感解决方案。未来假设1个人形机器人预计需要4个IMU用以控制姿态和稳定机体，主要分布在头部（1个）、胸部（2个）和髋部（1个）。

□ 预计高精度IMU单价随量产进程逐年下降。根据芯动联科招股书，2020-2022年生产的IMU单价分别为2.7万元、0.77万元、0.56万元。目前市面上的车规级IMU通常在2000-8000元之间。我们认为，高性能IMU降本空间仍然较大，未来有望控制在2000元以内。

- 产量：保守/中性/乐观假设下，2030年人形机器人产量分别约为72万/103万/146万台
- 价格：单机体使用4个IMU，单价1500元，2030年单机价值量为6000元
- 测算：保守/中性/乐观情况下2030年人形机器人所需的IMU市场规模分别约为43/62/87亿元。

图表69：2030年人形机器人IMU市场空间测算

情况	2023年	2024E	2025E	2026E	2027E	2028E	2029E	2030E
单台机器人IMU用量	4	4	4	4	4	4	4	4
IMU平均单价	3000	2500	2200	2000	1900	1700	1600	1500
产量(台)	6000	16800	47040	89376	169814	276797	451180	715120
保守 YOY		180%	180%	90%	90%	63%	63%	59%
市场空间预测(亿元)	0.7	1.7	4.1	7.2	12.9	18.8	28.9	42.9
产量(台)	6000	18000	54000	108000	216000	367200	624240	1029996
中性 YOY		200%	200%	100%	100%	70%	70%	65%
市场空间预测(亿元)	0.7	1.8	4.8	8.6	16.4	25.0	40.0	61.8
产量(台)	6000	19200	61440	129024	270950	479582	848861	1455796
乐观 YOY		220%	220%	110%	110%	77%	77%	72%
市场空间预测(亿元)	0.7	1.9	5.4	10.3	20.6	32.6	54.3	87.3



5

相关标的：海外龙头优势明显，国内企业迎头追赶

领先 | 深度

5.1 柯力传感：应变式传感器领军企业，市占率蝉联国内第一

□ 柯力传感成立于1995年，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。目前公司已是全球大型钢制传感器制造企业和工业物联网应用拓展引领者之一。

□ 主要产品包括应变式传感器，微型、扭矩、多维力等高端力学传感器，在国内力学传感器市占率第一。重点跟进和储备了一批光电传感器、温湿度传感器、高端力学传感器，加快从单一物理量传感器企业向多物理量传感器融合的平台型企业的转型发展。已经进行了多款扭矩传感器、多维力传感器等产品的送样和试制（人形机器人领域）。产品种类齐全，具有精度高，稳定性好等特点。

图表71：应变式传感器（钢制）



来源：柯力传感官网、中泰证券研究所

图表72：微型传感器



来源：柯力传感官网、中泰证券研究所

5.2 中航电测：建立应变计生产线的首家国防企业

- 中航电测成立于2002年，是一家以提供军民用智能测量和控制产品及系统解决方案为主的企业。依靠自主研发的应变计技术,通过生产线网络化测试及管理，采用世界领先的灵敏度高低温检测及控制手段，实现了传感器的逐个补偿和调校，在国内中高端应变计和传感器市场占据主导地位，产品销往北美、欧洲等世界各地。重点服务于航空、航天、兵器、船舶、核工业等防务市场，以及高校、科研院所、电力、高铁等民用行业。
- 主要产品是电阻应变计，应变式传感器，汽车综合性能检测设备。自主研发出十几种具有自主知识产权的高精度称重、测力传感器，确立了在国内称重、测力传感器制造及研发领域内的领先地位。

图表73：金属箔式应变传感器



来源：中航电测官网、中泰证券研究所

图表74：5804军品级别应变信号放大器



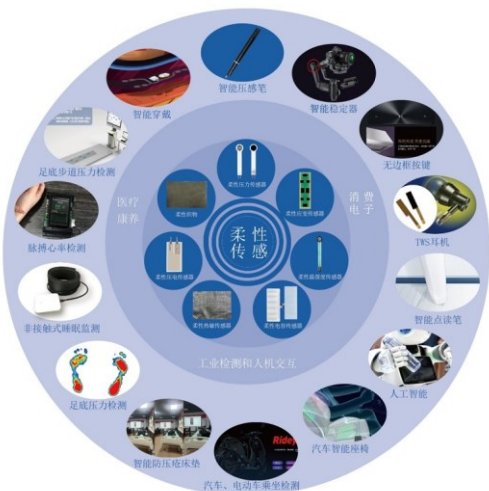
来源：中航电测官网、中泰证券研究所

5.3 汉威科技：电子皮肤领域国内龙头，实现国产化完全替代

□ 汉威科技成立于1998年，是国内知名的气体传感器及仪表制造商、物联网解决方案提供商。公司以传感器为核心，将传感技术、智能终端、通讯技术、云计算和地理信息等物联网技术紧密结合，形成了“传感器+监测终端+数据采集+空间信息技术+云应用”的系统解决方案。近年公司聚焦传感器业务，传感器业务收入在2020年后呈现较大幅度增长。

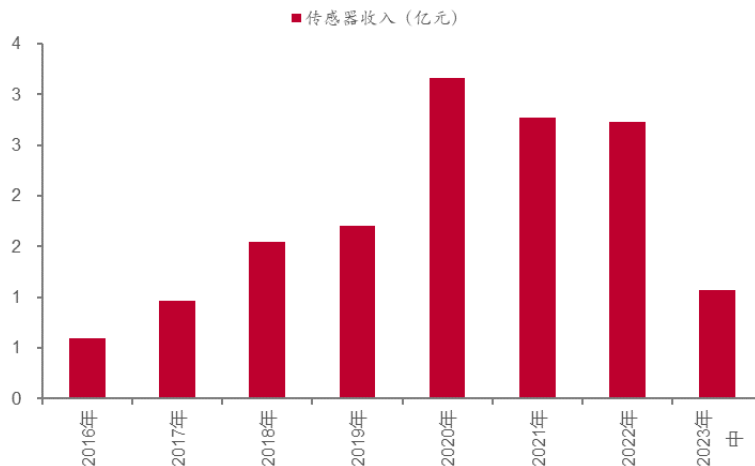
□ 子公司具备柔性传感器技术储备，柔性传感器有望成为公司未来增长极。公司旗下控股子公司能斯达在柔性压电传感器领域掌握自主知识产权，实现国产化完全替代。目前子公司生产柔性微纳传感器已在智能机器人领域有明确的应用，与小米科技、九号科技、科大讯飞、深圳科易机器人等积极开展业务合作。能斯达具有自主知识产权的ZNS-01 柔性薄膜压力传感器具有灵敏度高、超薄、响应速度快等优良性能，可广泛应用于人机交互、智能机器人、可穿戴设备、生理健康检测等领域。

图表75：汉威柔性传感器布局



来源：汉威科技官网，中泰证券研究所

图表76：近年公司传感器收入呈现阶梯性增长



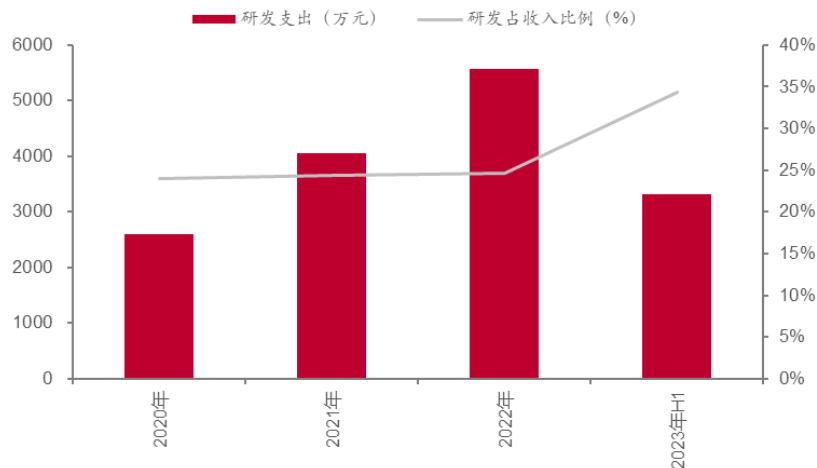
来源：wind、中泰证券研究所

5.4 芯动联科：国内高精度MEMS传感器生产商

□ 公司于2015年研制出第一代MEMS陀螺仪，2019年实现第三代量产，并以此为基础拓展MEMS传感器领域，主要下游为高端工业、无人系统和高可靠领域。目前公司生产的惯性传感器的核心参数已经达到国际先进水平，可以与霍尼韦尔、ADI等海外品牌产品进行竞争，并且公司部分产品具有价格优势。2020-2022年，公司综合毛利率维持85%以上，净利润率维持45%-55%，亦侧面证明公司产品在市场上具有较强竞争力。

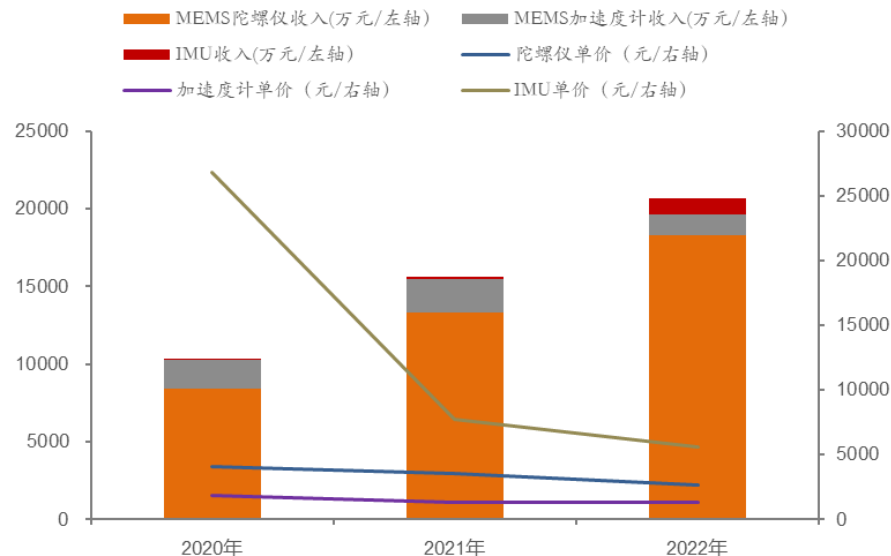
□ 公司持续大力研发投入，核心技术人员结构稳定。公司研发支出持续占整体收入20%以上，2022年研发人员数量占公司总人数50%以上，具备研发型公司的特征。公司核心人员具备半导体、芯片设计领域丰富工作经验，并持有公司股权，人员结构较为稳定。

图表77：公司研发投入情况



来源：WIND、中泰证券研究所

图表78：公司惯性传感器经营情况



来源：芯动联科招股书、中泰证券研究所

5.5 华依科技：智能驾驶方案提供商，应用有望拓展至机器人领域

□华依科技成立于1998年，公司主要专注于新能源汽车动力总成和自动驾驶技术领域。公司于2018年开始前瞻布局智能驾驶赛道，并于2022年具备IMU量产能力。目前公司凭借IMU+GNSS紧耦合定位技术、虚拟传感器级联技术和自研算法，已经成为智能驾驶领域解决方案提供商，并已经与奇瑞汽车、智己汽车进行产品定点。根据公司官网展示的惯导系统IMU产品参数，其产品有望在机器人等下游领域得到应用。

图表79：公司惯性导航产品



来源：华依科技官网、中泰证券研究所

图表80：公司IMU产品核心参数

陀螺仪	量程	± 250 °/s
	零偏不稳定性	$\leq 0.8^\circ/\text{h}$
	零偏稳定性	$\leq 1^\circ/\text{h}$
	全温零偏	$\pm 0.02^\circ/\text{s}$
加速度计	角度随机游走ARW	$0.15^\circ/\sqrt{\text{hr}}$
	量程	$\pm 4\text{g}$
	零偏稳定性	$\leq 0.015\text{mg}$
	零偏稳定性	$\leq 0.05\text{mg}$
	全温零偏	$\pm 0.5\text{mg}$

来源：华依科技官网、中泰证券研究所

5.6 坤维科技：产品准度0.5%，国内首个通过防爆认证的六维力传感器

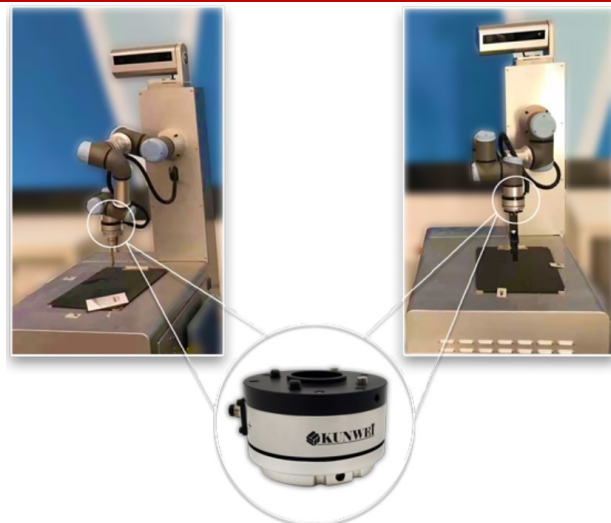
- 坤维科技成立于2018年，致力于提供高精度力觉传感器（六轴力传感器）及力控解决方案，主要开发面向机器人及其他智能装备行业的力觉传感器产品。成立仅仅6年，就作为主要单位负责起草国家标准GB/T 43199-2023《机器人多维力/力矩传感器检测规范》。
- 最早量产的系列之一KWR75系列六维力传感器产品是国内首个通过防爆认证的六维力传感器，量程范围涵盖30N-800N，可基本覆盖协作机器人应用场景和小负载六轴工业机器人的应用场景。目前正在研发面对医疗行业的18mm直径高精度六维力传感器产品，计划明年上半年上市。
- 低串扰度和千分之五的准度的产品让公司收获了小米等人形机器人厂商的批量订单。

图表81：KWR75系列六轴力传感器



来源：坤维科技官网、中泰证券研究所

图表82：搭载力传感器实现精准力控



来源：坤维科技官网、中泰证券研究所

5.7 鑫精诚传感器：六维力传感器全尺寸、多量程、多结构的系列化开发

▣ 鑫精诚传感器成立于2009年，是国内最早关注并研发六维力传感器的企业之一，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。

▣ 六维力传感器产品作为最具竞争力的产品之一，其直径跨度从9.5mm到300mm，力量程跨度从5N到50KN，力矩量程跨度从0.1N.m到1000N.m，可覆盖大部分应用领域；该产品结构包括中空式，法兰式，IP68深水、微型式、自带紧固螺钉式等，几乎覆盖了常规六维力传感器的所有结构。

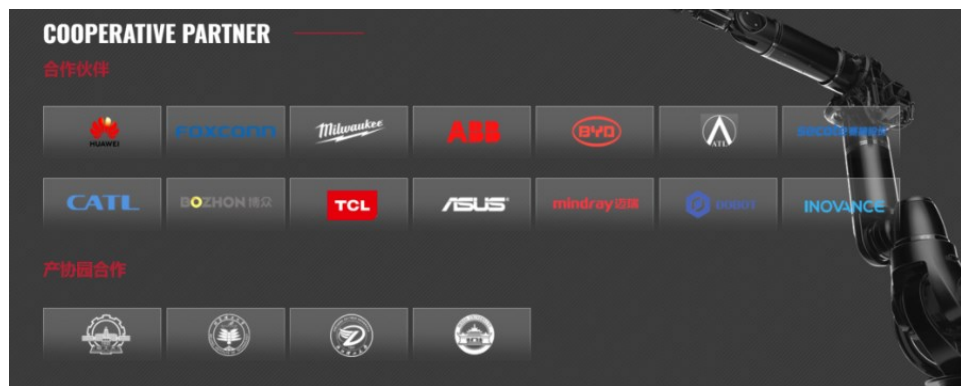
▣ 纯结构解耦的六维力传感器耦合误差精度达到1%-3%，在人形机器人、协作机器人等设备领域有着广泛的应用前景。

图表83: XJC-6F系列结构解耦型六轴力传感器



来源：鑫精诚官网、中泰证券研究所

图表84: 鑫精诚主要合作客户



来源：力合科创惠州区域公司公众号《专精特新巡礼 | 传感器&力控系统解决方案制造商——鑫精诚传感器》、中泰证券研究所

5.8 宇立仪器：自主研发国内唯一一条汽车碰撞模拟人力传感器生产线

□ 宇立仪器（SRI）是全球先进的六轴力传感器和智能力控打磨厂商。自主研发了国内唯一一条汽车碰撞模拟人力传感器生产线，是世界上两家具有汽车碰撞模拟人力传感器生产能力的企业之一，通过了ISO9001质量体系认证。公司产品全部出口到欧、美地区发达国家。

□ 全球约60%的模拟人多轴力传感器出自宇立公司。绝大部分多轴力传感器均采用自主专利的结构解耦技术及严格的传感器生产工艺，各个轴的信号完全独立，无需解耦算法，便于系统集成。

□ 设计生产了200余种机器人及自动化用多轴力传感器，量程范围从25N至600KN，直径从15mm至1500mm，厚度从5mm至110mm，输出形式多样，包括数字及模拟量输出，适用于各种复杂工业环境，水下力测量等环境。

图表85：全球最小的商业化六轴力传感器

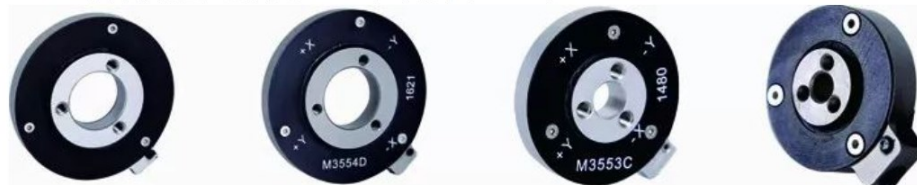
M37XX系列直径15至135mm，50至6400N，0.5至320Nm，是矩阵解耦型6轴力传感器。M3701的直径15mm，厚度14mm，是全球最小的商业化六轴力传感器。M37XX系列非线性、迟滞小于0.5%F.S，串扰小于2%F.S。3倍过载能力。传感器标定报告中会提供一个6X6的解耦矩阵。信号放大器M830X系列和数据采集卡M8128X系列可用于信号调理和采集。放大器或采集卡也可内置于传感器中。



来源：传感器技术公众号《宇立仪器 SRI 多轴力传感器》、中泰证券研究所

图表86：全球最薄的商业化六轴力传感器

M35XX系列为SRI超薄型6轴力传感器，是矩阵解耦型6轴力传感器。其技术受专利保护，其厚度薄至9.2mm，是全球最薄的商业化六轴力传感器。最大允许3倍过载。IP60防护等级，M35XX系列非线性、迟滞小于1%F.S，串扰小于3%F.S。

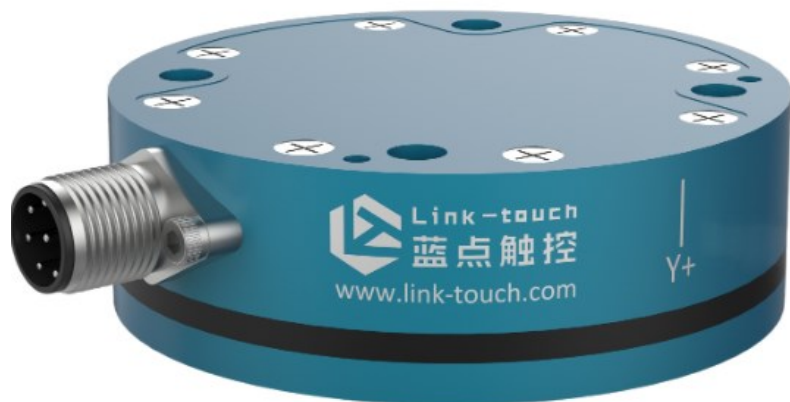


来源：传感器技术公众号《宇立仪器 SRI 多轴力传感器》、中泰证券研究所

5.9 蓝点触控：机器人关节力矩传感器占据国内80%以上市场份额。

- 蓝点触控成立于2018年，围绕解耦算法、结构解耦设计、高精度数据采集、多轴同步校准四个方面，从事高精度、高性能力传感器，以及力控产品的研发和生产。
- 三大核心传感器产品——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器、Joint系列协作机械臂关节力矩传感器。其中，ST型六维力传感器为工业级多维力传感器，能提供5倍过载能力，内置低噪声放大器，综合精度优于1.2%。机器人关节力矩传感器占据国内80%以上市场份额。
- 公司产品的动态力控精度可控制在0.1N（牛顿力），响应速度能达到毫秒水平。

图表87: Wrist系列-ST型六维力传感器



来源：蓝点触控官网、中泰证券研究所

图表88: ST型关节扭矩传感器



来源：蓝点触控官网、中泰证券研究所

5.10 海伯森：专注于工业级传感器的深度学习技术创新

- 海伯森成立于2015年，专注于工业级传感器的深度学习技术的创新，集光、机、电、算技术综合应用于一体，具备传感器系列产品的研发能力和规模化生产能力。
- HPS-FT系列六维力传感器采用了高精度应变计和紧凑型结构设计，实现了更高的信噪比和灵敏度。高达2000Hz的输出频率可使机器人实时感知并控制力和力矩的大小，力控精度达0.05N（Fxy、Fz方向），0.001Nm（Mxy、Mz方向）。HPS-FT120最大量程达5000N、150Nm，传感器HPS-FT025最小可达150N、4Nm，最高可达500%的静态抗过载能力，覆盖了大部分应用的负载范围。
- 研发全国首台同轴3D线光谱传感器，是精度可达纳米级的高精度非接触式位移传感器，突破国外技术垄断，不受被测物材质、形状、颜色和反光的影响，具有超大角度特性，同轴测量没有检测死角，适用于各种不同要求的高精密测量场合。

图表89：HPS-FT120六维力传感器



来源：海伯森官网、中泰证券研究所

图表90：六维力传感器用于机器人力控曲面打磨



来源：海伯森官网、中泰证券研究所

5.11 ATI：六维力传感器全球龙头，市占率、产销量全球领先

□ ATI工业自动化是世界领先的机器人附属产品的工程研发公司，上个世纪80年代，ATI公司就创造性地发明了六维力和力矩传感器。主营业务包括机器人快速转换装置和力传感器。

□ ATI六维力和力矩传感器最大量程88000N和6000Nm，最小的达到12N和50Nmm，均匀的覆盖了所有的负载范围。，ATI产品Delta系列高端产品准度可达0.5%，Axia高性价比系列准度亦可达2%，高于业内常规水平（2%~5%）。

□ ATI Axia80是一款高性能、低成本的六轴力和力矩传感器，拥有极高的分辨率、精度和刚度，可以提供触觉感知。整个放大电路整合入传感器内部，从而降低成本、节约空间并极大提高稳定性。可用于Ethernet、Ether CAT或串行通讯方式，并具有高信噪比和高过载保护功能。

图表91：ATI六维力和力矩传感器种类



图表92：Axia80六维力传感器



Loading Characteristics	Fxy	Fz	Txy	Tz
Rated Range 1	500 N	900 N	20 Nm	20 Nm
Rated Range 2	200 N	360 N	8 Nm	8 Nm
Overload Rating	2500 N	4500 N	100 Nm	100 Nm
Effective Resolution	0.1 N	0.1 N	0.005 Nm	0.005 Nm

来源：leaderobot《ATI 资深力控专家苏哲 | 六维力和力矩传感器的技术与应用》，中泰证券研究所

来源：上海研创测试《ATI工业自动化高性能力和扭矩传感器》，中泰证券研究所

5.12 SCHUNK：夹持技术和抓取系统领域的全球领军企业

- 德国SCHUNK成立于1945年，是全球夹持技术和抓取系统领域的全球领军企业。
- SCHUNK FT-AXIA力/力矩传感器是专为小型和轻型机器人设计的高性价比产品，共有 16 种规格，荷载测量范围介于 12 N 至 40,000 N 之间，可检测力部件 F_x 、 F_y 和 F_z 小到 1/320 N 的分辨率，以及扭矩部件 M_x 、 M_y 和 M_z 起始为 1/64,000 Nm 的分辨率。常规力/力矩传感器使用箔测量条，而SCHUNK FT 传感器均配有硅膨胀测量条。

图表93：SCHUNK FT-AXIA力/力矩传感器



来源：SCHUNK雄克公众号《揭秘一项不为人熟知的雄克技术》、中泰证券研究所

图表94：协作机器人机械手夹持



来源：华意智信公众号《德国雄克SCHUNK二指平动机械手JGP-P产品升级》、中泰证券研究所

5.13 WACOH-TECH：专注力传感器和MEMS传感器

- ❑ WACOH-TECH成立于2007年，总部位于日本，主营业务包括力传感器和MEMS传感器(加速度、陀螺仪产品的开发、生产、销售)。
- ❑ DYNPICK六维力觉传感器是电容式力传感器，其中WEF Series系列防水防尘防噪音，持久耐用(可使用2000万次以上)，适合应用于工业场景。电容式六维力传感器力矩额定值增强型在保持传统WEF-6A系列的耐久性、可靠性和性能的同时，将Fx、Fy、Fz和Mx、My、Mz分别升级为200N和20Nm，额定载荷比为10:1。

图表95: DynPick六维力传感器V



来源：WACHO-TECH官网、中泰证券研究所

图表96: DynPick六维力传感器在DENSO产品的应用



来源：株式会社ワコーテック，DynPick产品介绍资料、中泰证券研究所



6

投资建议

领先 | 深度

6.1 重点关注人形机器人传感器核心标的

图表97：人形机器人传感器标的企业一览

公司	介绍
柯力传感	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。主要产品包括应变式传感器，微型、扭矩、多维力等高端力学传感器。
中航电测	主要产品是电阻应变计，应变式传感器，汽车综合性检测设备等。重点服务于航空、航天、兵器、船舶、核工业等防务市场，以及高校、科研院所、电力、高铁等民用行业。
力传感器	
坤维科技（未上市）	提供高精度力觉传感器（六轴力传感器）及力控解决方案，主要开发面向机器人及其他智能装备行业的力觉传感器产品。拥有国内首个通过防爆认证的六维力传感器。
鑫精诚（未上市）	专注微型压力、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。六维力传感器产品作为最具竞争力的产品之一，可覆盖大部分应用领域。
宇立仪器（未上市）	自主研发了国内唯一一条汽车碰撞模拟人力传感器生产线，是世界上两家具有汽车碰撞模拟人力传感器生产能力的企业之一，全球约60%的模拟人多轴力传感器出自宇立。公司产品全部出口到欧、美地区发达国家。
蓝点触控（未上市）	围绕解耦算法、结构解耦设计、高精度数据采集、多轴同步校准四个方面，从事高精度、高性能力传感器，以及力控产品的研发和生产。机器人关节力矩传感器占据国内80%以上市场份额。
海伯森（未上市）	专注于工业级传感器的深度学习技术的创新，集光、机、电、算技术综合应用于一体，具备传感器系列产品的研发能力和规模化生产能力。
ATI	世界领先的机器人附属产品的工程研发公司，六维力传感器市占率、产销量全球领先，具有品牌效应。主营业务包括机器人快速转换装置和力传感器。
SCHUNK	成立于1945年，是夹持技术和抓取系统世界市场领导者。
WACOH-TECH	成立于2007年，总部位于日本，主营业务包括力传感器和MEMS传感器。
汉威科技	公司旗下控股子公司能斯达在柔性压电传感器领域掌握自主知识产权，实现国产化完全替代。目前子公司生产柔性微纳传感器已在智能机器人领域有明确的应用，与小米科技、九号科技、科大讯飞、深圳科易机器人等积极开展业务合作。
柔性触觉传感器	
帕西尼传感	帕西尼传感是一家以多维触觉为核心的商用机器人产品的公司，产品包含多维触觉传感器PX-6AX、消费级触觉传感器PX-3A、触觉灵巧手DexH5以及人形机器人Tora，为智能制造、康养医疗、工业生产、消费电子等领域客户提供行业领先机器人产品和解决方案。
力感科技	公司成立于2016年，是一家中国科学院孵化的创新型企业，开发出智能床垫传感器、硬件开发模块等产品，服务于智慧养老、保健康复等领域。目前公司产品包括薄膜压力传感器、阵列传感器等。
芯动联科	高精度MEMS惯性传感器生产商，产品核心参数对标国际先进水平。
华依科技	智能驾驶方案解决商，具备车规级IMU量产能力，有望持续拓展下游应用领域
惯性传感器	
星网宇达	公司具备惯性技术及产品制造能力，产品可用于自动驾驶、无人机等军民领域
美泰科技（未上市）	公司是中国电子科技集团公司(CETC)第十三研究所控股的有限责任公司，是国内第一批研发MEMS技术与产品的公司，公司连续多年荣获中国半导体MEMS十强企业，IC独角兽企业。

来源：各公司官网，中泰证券研究所整理

风险提示

- 人工智能&大模型技术发展不及预期；
- 核心零部件成本高居不下带来的需求不及预期；
- 下游落地场景拓展不及预期；
- 人形机器人商业化进程不及预期；
- 行业规模测算偏差风险
- 政策支持力度减弱带来的风险；
- 研报使用的信息存在更新不及时风险。

投资评级说明：

	评级	说明
股票评级	买入	预期未来6~12个月内相对同期基准指数涨幅在15%以上
	增持	预期未来6~12个月内相对同期基准指数涨幅在5%~15%之间
	持有	预期未来6~12个月内相对同期基准指数涨幅在-10%~+5%之间
	减持	预期未来6~12个月内相对同期基准指数跌幅在10%以上
行业评级	增持	预期未来6~12个月内对同期基准指数涨幅在10%以上
	中性	预期未来6~12个月内对同期基准指数涨幅在-10%~+10%之间
	减持	预期未来6~12个月内对同期基准指数跌幅在10%以上

备注：评级标准为报告发布日后的6~12个月内公司股价（或行业指数）相对同期基准指数的相对市场表现。其中A股市场以沪深300指数为基准；新三板市场以三板成指（针对协议转让标的）或三板做市指数（针对做市转让标的）为基准；香港市场以摩根士丹利中国指数为基准，美股市场以标普500指数或纳斯达克综合指数为基准（另有说明的除外）。

重要声明

- 中泰证券股份有限公司（以下简称“本公司”）具有中国证券监督管理委员会许可的证券投资咨询业务资格。本公司不会因接收人收到本报告而视其为客户。
- 本报告基于本公司及其研究人员认为可信的公开资料或实地调研资料，反映了作者的研究观点，力求独立、客观和公正，结论不受任何第三方的授意或影响。本公司力求但不保证这些信息的准确性和完整性，且本报告中的资料、意见、预测均反映报告初次公开发布时的判断，可能会随时调整。本公司对本报告所含信息可在不发出通知的情形下做出修改，投资者应当自行关注相应的更新或修改。本报告所载的资料、工具、意见、信息及推测只提供给客户作参考之用，不构成任何投资、法律、会计或税务的最终操作建议，本公司不就报告中的内容对最终操作建议做出任何担保。本报告中所指的投资及服务可能不适合个别客户，不构成客户私人咨询建议。
- 市场有风险，投资需谨慎。在任何情况下，本公司不对任何人因使用本报告中的任何内容所引致的任何损失负任何责任。
- 投资者应注意，在法律允许的情况下，本公司及其本公司的关联机构可能会持有报告中涉及的公司所发行的证券并进行交易，并可能为这些公司正在提供或争取提供投资银行、财务顾问和金融产品等各种金融服务。本公司及其本公司的关联机构或个人可能在本报告公开发布之前已经使用或了解其中的信息。
- 本报告版权归“中泰证券股份有限公司”所有。事先未经本公司书面授权，任何机构和个人，不得对本报告进行任何形式的翻版、发布、复制、转载、刊登、篡改，且不得对本报告进行有悖原意的删节或修改。