

# 传感器专题研究：

## 传感器：人形机器人感知交互基础，重视技术路线变化及产业进展

【华西机械团队】

分析师：黄瑞连

SAC NO: S1120524030001

邮箱：[huangr1@hx168.com.cn](mailto:huangr1@hx168.com.cn)

分析师：石城

SAC NO: S1120524080001

邮箱：[shicheng@hx168.com.cn](mailto:shicheng@hx168.com.cn)

2025年2月

◆**传感器：人形机器人感知交互基础，重视技术路线变化及产业进展。**人形机器人传感器主要分布于传感系统，常见的类型包括视觉、触觉、听觉传感器，嗅觉和味觉传感器可能在人形机器人特定应用场景中应用。目前六维力传感器、激光雷达、柔性电子皮肤、高性能惯性测量单元（IMU）及力控扭矩传感器等在该领域具有较高的技术价值和市场潜力。我们按照不同功能，将人形机器人的传感器分为视觉听觉、力及触觉、编码器及惯性。据CSDN，2030年人形机器人的零部件价值量，力传感器+IMU占比达到13%。各类传感器中，力及力矩传感器价值链占比较大。

◆**多类型传感器：力及触觉传感器高价值量，国内企业进展加速；其他环节老玩家的新进展。**1) **视觉及听觉传感器：**在人形机器人领域，3D视觉感知技术可以让机器人获得更加准确的外部环境信息，降低误差，帮助机器人快速地进行各种动作反应。听觉领域，多采用麦克风阵列，麦克风阵列常采用多个麦克风分布在三维空间，对空间中信号的不同方向和方位的立体感知能力有所提升。2) **力/力觉及触觉传感器：**力/力矩传感器价值量较大，且六维力传感器技术壁垒较高，目前ATI占据了最高的市场份额。国内企业如宇立仪器、坤维科技、蓝点触控等正在积极开拓六维力传感器市场。电子皮肤领域，处于发展提速的阶段，难度较大且与其他传感器的交互存在较高壁垒。皮肤及灵巧手终端的触觉，将一直是技术及产业迭代的主要方向。3) **惯性传感器：**国内IMU行业玩家相对固定，且IMU结构相对成熟，目前机器人企业的IMU方案仍存在不确定性，建议此环节持续关注老玩家的新进展，以及关注机器人企业的IMU方案进展。

◆**投资建议：**目前人形机器人的发展提速，国内外厂商开展了军备竞赛，传感器作为人形机器人必不可少的部件，有望需求迎来较快增长，且技术路线有望持续迭代，国内技术实力较强的企业有望迎来快速发展。人形机器人的传感器，包括视觉、听觉、力觉及触觉、惯性传感器等。1) **视觉传感器：**受益标的包括深耕3D视觉传感器的奥比中光，以及机器视觉领域领先的凌云光、奥普特等。2) **听觉传感器：**受益标的包括国内麦克风领域领先的敏芯股份等。3) **力/力矩传感器：**受益标的包括平台型传感器龙头柯力传感、六维力传感器有进展的安培龙、东华测试、凌云股份等。4) **触觉传感器：**作为应用广泛且难度较大的环节，相关企业尚处于研发阶段，受益标的包括汉威科技、福莱新材、日盈电子等。5) **惯性传感器：**用途及产品形态相对成熟，建议关注具备陀螺仪芯片设计能力的龙头芯动联科，受益标的包括发布机器人IMU新产品的华依科技等。

◆**风险提示：**行业开拓及应用进展不及预期的风险；传感器技术难度大且路线多变，国内企业进展及降本不及预期的风险；行业竞争加剧的风险。

一

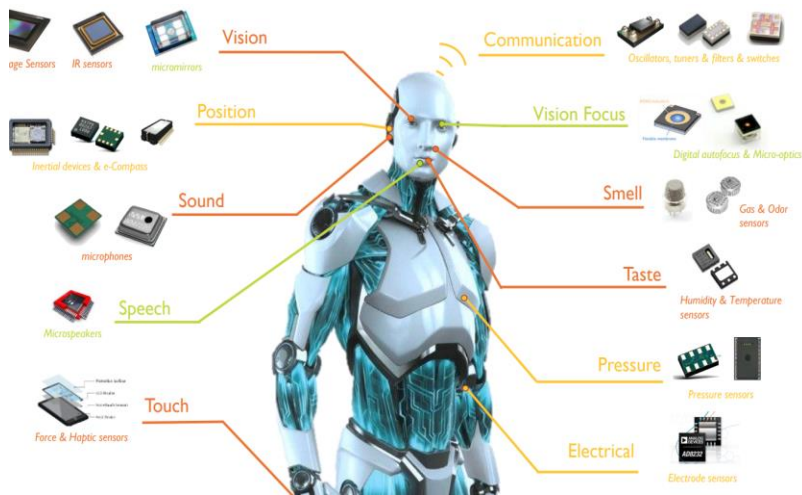
## 传感器：人形机器人感知世界的基础

# 1. 传感器：人形机器人感知世界的基础

◆**传感器：人形机器人交互和感知的关键。**人形机器人传感器主要分布于传感系统，常见的类型包括视觉、触觉、听觉传感器，嗅觉和味觉传感器可能在人形机器人特定应用场景中应用。目前六维力传感器、激光雷达、柔性电子皮肤、高性能惯性测量单元（IMU）及力控扭矩传感器等在该领域具有较高的技术价值和市场潜力。我们按照不同功能，将人形机器人的传感器分为视觉听觉、力及触觉、编码器及惯性传感器。

◆**智能传感器：更适合人形机器人交互。**较为常见的传感器类型有电阻应变式传感器、电容式传感器、电感式传感器、压电式传感器、压阻式传感器以及MEMS传感器等。智能传感器是融合了传感器、微处理器、信号调理模块、存储模块、ADC模块、通信模块、智能算法等软硬件为一体的微型系统，具备信号感知、信号处理、数据存储、人工智能、双向通信、数字信号输出等诸多功能。

图：传感器在人形机器人中的用途广泛



图：传统传感及与智能传感器的区别

分类	代际	内部结构	功能特点
传统传感器	第1代	只有敏感元件，不包含电路模块	将非电信号转换成微弱的模拟电信号输出
	第2代		构成传感器的感知部分，可远程控制
智能传感器	第3代	包含微电机系统和信号调理模块	开始采用MEMS工艺，可进行信号调理
	第4代	包含MEMS、信号调理和数据处理模块、数字端口等	允许传感器寻址，可对自身状态进行评估
	第5代	包含多个MEMS、微处理器以及数据存储、信号调理、数据处理、模数转换和数字端口等模块	具备指令和数据双向通信、数字信号传输、本地数据处理、自检测、自补偿、自定义算法等功能

# 1. 传感器：人形机器人感知世界的基础

◆**机器人传感器的分类**：机器人上传感器是指机器人将对内外环境感知的物理量转换为电量输出的装置，一般分为内部传感器和外部传感器。**1) 内部传感器**：内部传感器主要用来感知和监测机器人自身的状态参数，以调整并控制机器人的运动。**2) 外部传感器**：用来检测机器人周边环境、目标的状态特征等，使机器人能够根据不同的环境进行自动校正和自适应调整，如避障和路线规划等。

◆**国内外玩家技术迭代加速，对传感器的需求也逐步提升**。**1) TESLA**：Optimus gen3，特斯拉最新发布的机器人方案中，灵巧手的自由度提升至22个，对手部传感器要求进一步提高。**2) Figure**：Figure AI在完全自主研发端到端机器人AI方面取得进展，在25M2发布了Helix模型。**3) 其他**：包括国内及海外很多公司都在重点发展人形机器人，传感器是人形机器人必不可少的环节，且有望随着技术迭代而不断发展。

图：机器人的内部传感器和外部传感器

图：Optimus gen3

图：Figure 02

内部传感器	外部传感器
	距离传感器
速度传感器	力觉传感器
加速度传感器	听觉传感器
位置传感器	温度传感器
振动传感器等	物体识别传感器
	气压传感器等



# 1. 传感器：人形机器人感知世界的基础

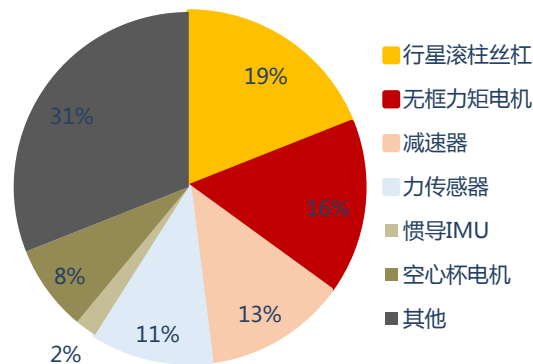
◆**人形机器人传感器**：人形机器人对感知要求较高，涵盖了视觉、力觉、听觉、触觉等方面。

◆**传感器价值量**。据CSDN，2030年人形机器人的零部件价值量，力传感器+IMU占比达到13%。各类传感器中，力及力矩传感器价值链占比较大。

图：人形机器人的主要传感器介绍

类型	基本介绍	特点
视觉传感器	通过相机硬件和计算机算法，让机器人处理来自现实世界的视觉数据，技术路线可分为结构光、ToF、双目/多目视觉，激光扫描等。	通常配备先进的机器视觉系统，结合多感知能力和AI算法，以实现环境感知、追踪、导航规划、人机交互等。
听觉传感器	主要为麦克风，包括声音接收器、信号处理器和音频处理软件等部分。	模拟人类听觉功能，用于接收和识别声音信号，进而实现语音识别、语音合成、声源定位等。
力传感器	主要为力矩传感器，其可以在各种旋转或非旋转机械部件上对扭转力矩感知进行检测，将扭力的物理变化转为精确点信号的一种传感器。	力传感器主要作用为感知并度量力，应用于人形机器人关节部位，其中六维力传感器是维度最高的力矩传感器，能给出最为全面的力觉信息，力传感器领域的高价值品类。
运动传感器	人形机器人运动传感器主要是惯性传感器（IMU），人形机器人位移姿态检测和稳定性控制主要依赖于MEMS IMU。	通过采集角速度与加速度等惯性信息，可以用于推算人形机器人的实时位置与运动轨迹。同事，可以与机器人搭载的多传感器融合，在数据类型和数据频率间实现互补。
触觉传感器	大多被排列成矩阵组成阵列触觉传感器，空间分辨率可达毫米级，接近人类的皮肤，因而被称为“电子皮肤”。	可覆盖于人形机器人三维载体表面，实现与环境接触力、温度、湿度、振动、材质、软硬等特性检测，是人形机器人实现类人触觉的关键。

图：2030年人形机器人零部件价值量占比



二

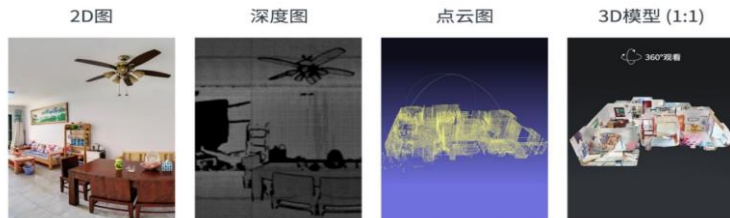
视觉及听觉传感器：机器人观察及对话的基础

## 2.1 视觉传感器：多种路线并行，新技术仍在演绎

◆**视觉传感器：重视3D机器视觉传感器。**视觉传感器指的即是机器视觉。机器视觉可以分为3D视觉感知及2D视觉成像，在应用上，3D视觉感知技术相比2D成像技术而言也更加广泛。在人形机器人领域，3D视觉感知技术可以让机器人获得更加准确的外部环境信息，降低误差，帮助机器人快速地进行各种动作反应。

◆**DVS相机：不同于传统图像传感器，DVS传感器仿照生物眼镜成像，且具备独特的成像机制。**DVS像素阵列是并行整列，两个像素单元之间事件发生没有关联性，因此在同一时刻，可能是部分像素单元会有事件发生需要往外传输。DVS传感器尚处于发展早期的阶段，再加上其像素单元结构的复杂性，现阶段的像素阵列大小相较于传统的图像传感器要小很多。

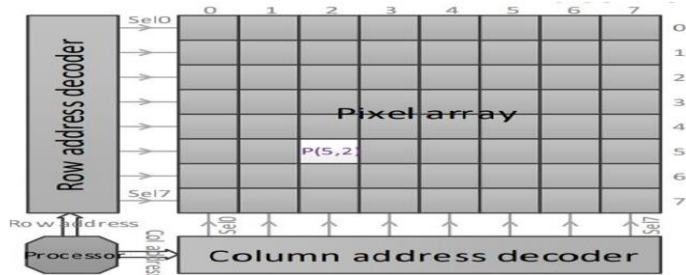
图：空间三维测量示意图



图：不同场景对3D测量要求的区别

3D视觉感知主要技术	最佳测量距离	分辨率	测量精度	主要适用场景
结构光	<5m	高	近距离：高 中远距离：低	手机前置、刷脸支付、刷脸门锁、服务机器人、安防监控、屏下3D结构光等
iToF	<3.5m	中	近距离：低 中距离：高	手机前置、后置、扫地机器人、AR/VR、门禁等
dToF	<5m	低	近距离：低 远距离：高	手机后置、平板后置、扫地机器人等
双目	<15m	高	低	汽车侧面、室外机器人、智能安防等
Lidar	<200m	低	近距离：低 远距离：高	汽车自动驾驶、汽车ADAS、低速物流车自动驾驶等
工业三维测量	200mm-30m	极高	极高	高精度工业测量、材料、结构检测

图：DVS传感器像素阵列



## 2.1 视觉传感器：多种路线并行，新技术仍在演绎

◆**技术路线：不同厂商技术路线不同。**人形机器人视觉方案目前主要以结构光、双目或多目RGB、TOF等的组合方案为主；算法基础强的厂商会采用更为简单的传感器方案，而算法相对薄弱的厂商会选择更为核心的硬件。国内大多厂商使用多传感器融合方案实现环境感知。

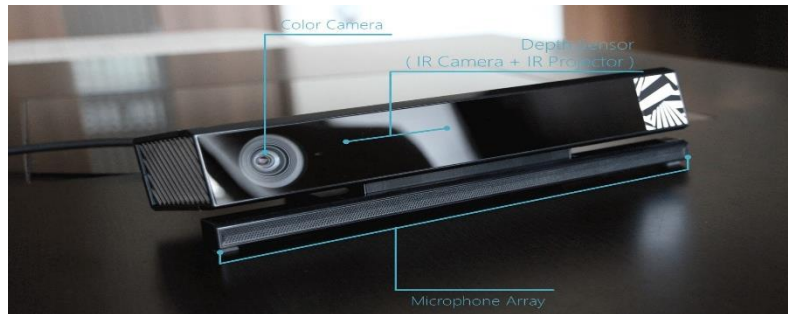
图：国内外各人形机器人企业的视觉方案

企业	型号	视觉方案		
		激光/毫米波雷达	相机	摄像头
优必选	Walker X	腰部4*毫米波雷达	RGBD相机+四目相机	
智元机器人	远征A2	激光雷达	RGBD相机+鱼眼相机	
宇树科技	H1	3D激光雷达	深度相机	
星动纪元	星动STAR1		深度视觉相机	摄像头
开普勒	先行者K1		RGBD相机+鱼眼360°环视相机	红外双目摄像头
乐聚机器人	KUAVO3.0		高清RGB相机	结构光深度摄像头
帕西尼感知科技	TORA-ONE			摄像头+深度摄像头
众擎机器人	SE01	激光雷达		高清摄像头
傅利叶智能	GR-1			RGB摄像头
小米	CyberOne		RGB相机+iToF	
达闼机器人	Cloud Ginger 2.0	激光雷达	3D深度相机+TOF相机	RGB单目摄像头
腾讯Robotics X	小五	激光雷达	3D视觉传感器	
普渡机器人	PUDU D7	激光雷达	RGBD相机+全景相机	
特斯拉	Optimus Gen2			2D摄像头+鱼眼摄像头

图：不同传感器方案的优劣势比较

	激光雷达	可见光摄像头	深度相机
<b>优势</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 稳定性强，对环境、光照影响不敏感；</li> <li>2) 能精确定位物体位置及其距离；</li> <li>3) 探测范围大，最大可实现360°视图</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 可获取的环境数据信息量较大；</li> <li>2) 设备成本低廉，视觉识别技术成熟；</li> <li>3) 体型小便于安装</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 可同时获取场景深度信息及视觉信息；</li> <li>2) 稳定性强，距离计算不受光照影响；</li> <li>3) 体型小便于按照</li> </ol>
<b>劣势</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 只能产生点云图像，提供的信息数据量小；</li> <li>2) 价格昂贵，要求的安装空间比较大；</li> <li>3) 不能进行视觉识别</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 不能大范围检测，视角广度较小；</li> <li>2) 获取距离信息困难，算法耗时长；</li> <li>3) 图像质量受环境光照影响较大</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 视角广度小，测距范围一般在10m内；</li> <li>2) 传感器成本偏高；</li> <li>3) 设备获取深度图像质量偏低</li> </ol>

图：微软Kinect V2 TOF深度相机

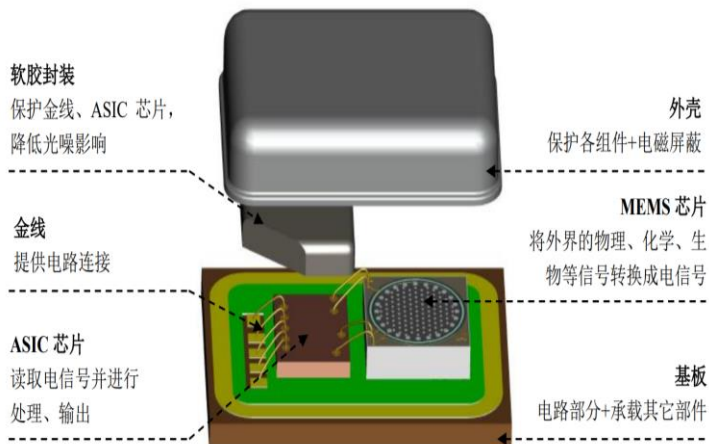


## 2.2 听觉传感器：技术方案以麦克风为主

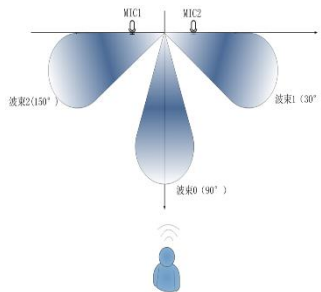
◆**机器人听觉：主要基于麦克风阵列。**机器人听力系统，最基本的两个方面，一是自动语音识别，二是声源定位（本质是从所获得的信号中提取目标的位置信息）。对于声源定位，传感器阵列主要是麦克风阵列。MEMS麦克风正逐步成为主流的技术方案。

◆**麦克风阵列：相较于单一传感器，麦克风阵列可以提供高质量的信号。**麦克风阵列常采用多个麦克风分布在三维空间，对空间中信号的不同方向和方位的立体感知能力有所提升。麦克风数量一般超过2个，消费级麦克风阵列一般不超过8个。

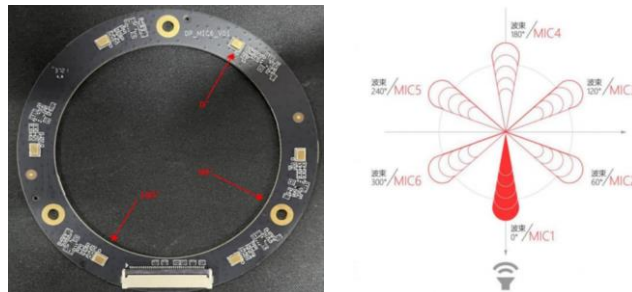
图：MEMS声学传感器结构



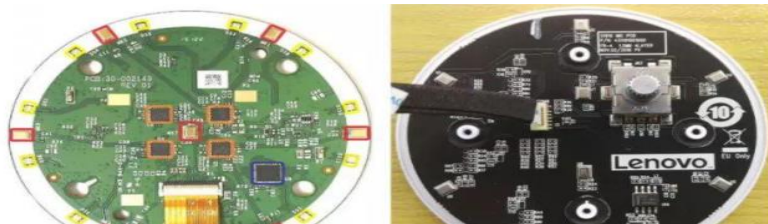
图：双麦阵列波束



图：科大讯飞M260C 6麦环形阵列及波束



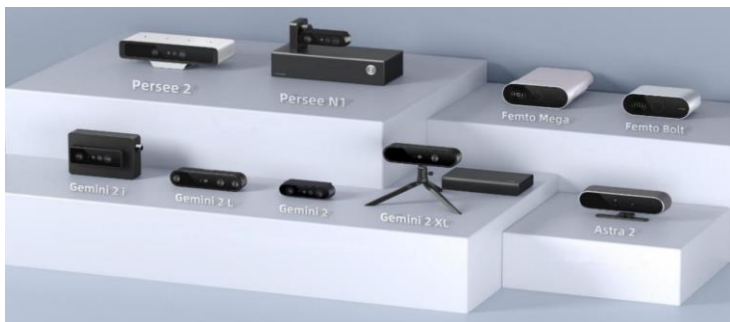
图：Amazon echo 6+1及联想6+2阵列



## 2.3 重点公司—奥比中光：3D视觉领先企业，机器人助力腾飞

◆奥比中光：公司主要产品包括3D视觉传感器、消费级应用设备和工业级应用设备。公司持续拓展新的3D视觉感知产品系列，在生物识别、机器人、三维扫描、AIoT、工业三维测量等领域实现了多项商业应用，已成为全球3D视觉传感器重要供应商之一。公司全面布局结构光、iToF、dToF、双目、Lidar、工业三维测量六大3D视觉感知技术，可对不同路线的技术进行借鉴、相互促进，拥有对3D视觉感知技术的深刻理解和融合创新能力。

图：奥比中光机器人与AI视觉产品矩阵



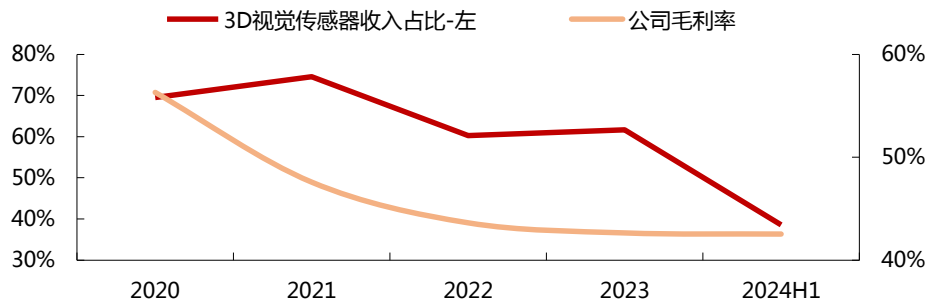
图：奥比中光机器人与AI视觉产品矩阵

技术指标	公司				
	微软	英特尔	英特尔	华捷艾米	奥比中光
型号	Kinect	R200	D435	A100M	Astra Pro
深度分辨率、深度帧率	640x480@30fps	640x480@30fps	1280x720@30fps	640x480@30fps	1280x1024@7fps ; 640x480@30fps
视场角	57, 43	59, 46	85.2, 58	60, 48	60, 49.5
测量范围	0.8~3.5m	0.4~2.8m	0.1~10m	0.4~6m	0.6~8m
精度	±1mm@1m	±12mm@2m	±20mm@2m	±20mm@1m	±1mm@1m
功耗	<2.5W	1.3~1.6W	<4.5W	<3.5W	<2.4W

图：3D视觉传感器及底层核心芯片达到量产时间节点



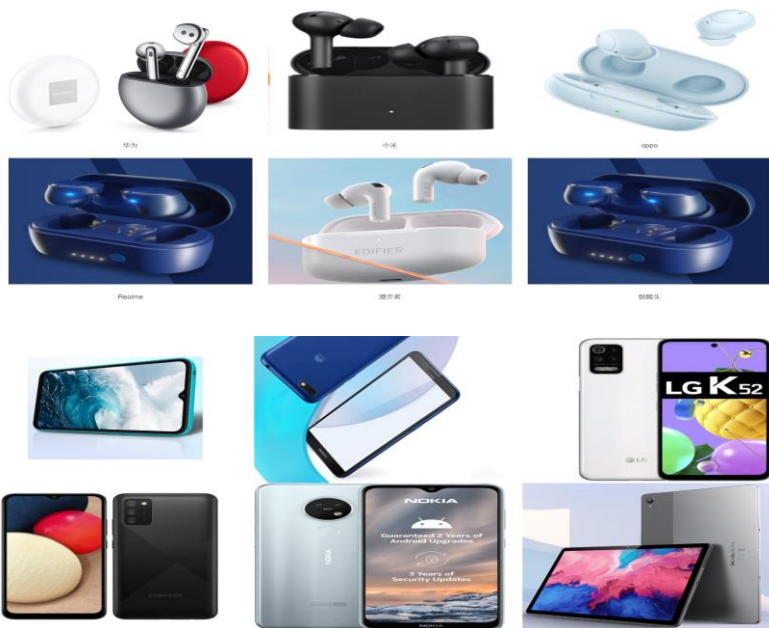
图：公司近年3D视觉传感器收入占比及综合毛利率



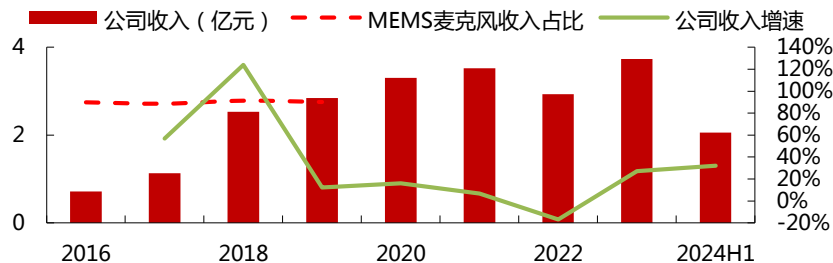
## 2.3 重点公司—敏芯股份：MEMS全产业链布局，声学领域成熟

◆**敏芯股份**：主要产品线包括MEMS麦克风、MEMS压力传感器和MEMS惯性传感器。在MEMS麦克风领域，公司的产品应用较为广泛，主要包括智能手机、笔记本电脑、智能家居、可穿戴设备等多个系列。公司在MEMS传感器的芯片设计、封装和测试等各方面都有技术积累，并且在麦克风领域打下了坚实的技术和市场基础。根据公司招股书，使用公司产品品牌包括华为、传音、小米、百度、阿里巴巴、联想、索尼、LG等。经过多年的研发投入，公司完成了MEMS传感器芯片设计、晶圆制造、封装和测试等各生产环节的基础研究工作和核心技术积累，并帮助国内厂商开发了MEMS制造工艺，搭建起本土化的MEMS生产体系。

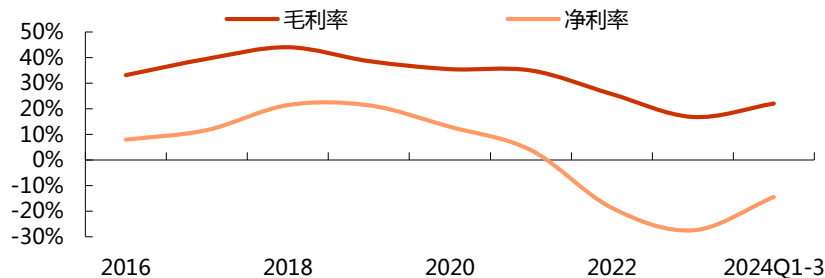
图：敏芯股份硅MEMS在耳机及手机领域的案例



图：公司近年收入、毛利率及麦克风收入占比（亿元，%）



图：公司近年毛利率及净利率表现



三

力觉及触觉传感器：机器人精准力控、灵巧感知的基础

# 3.1 力传感器：机器人的力控核心

◆**力传感器的作用。**通过力反馈，机器人可以实时感知与环境之间的接触力，并调整动作以适应；通过力控制，机器人可以运用这些力信息主动调整及做出动作。力及力矩传感器，可以让机器人在面对不同环境时候更加灵活，也可以提升机器人作业的可靠性。

◆**力传感器的分类及原理：按测量原理分类，多维力传感器可以分为压变式、压电式、电容式、光电式等。**目前应用最广的是电阻应变式多维力传感器：粘贴应变片的弹性体作为敏感元件，当受到外力作用时，弹性体发生形变并将形变传递给应变片，应变片丝栅形状的变化导致其阻值的变化，从而将所受力/力矩转换成电信号输出，具有如精度高、测量范围广、技术成熟等优点。

◆**力传感器按照测量维度划分：一维、三维、六维力/力矩传感器的最常见。**一维力传感器适用于力的方向和作用点固定的场景，标定坐标轴为OZ轴；三维力传感器适用于力的方向随机变化，但作用点不变且与标定参考点重合的场景，可同时测量  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$  三个分力；六维力传感器则适用于力的方向和作用点都在三维空间内随机变化的场景，能同时测量  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$ 、 $M_x$ 、 $M_y$ 、 $M_z$  六个分量。

图：力传感器按工作原理分类

种类	优点	缺点
应变式	精度高、测量范围广、技术成熟	动态响应差、桥路易受外界影响
压电式	重量较轻、工作可靠、结构很简单、信噪比高、灵敏度高以及信频宽	存在电荷泄露、静态力测量困难、分辨率不高
电容式	灵敏度高、准确性好；结构简单；恶劣环境下也可适用；温度稳定性好；动态响应性好；过载能力强	输出非线性；寄生电容、分布电容的灵敏度、测量精确度易受影响，不稳定；连接电路较复杂
光电式	响应速度快、可靠性高、使用寿命长、精度高、体积小、重量轻等	灵敏度低、温度漂移大、环境干扰较大等

图：力传感器按测量维度分类

种类	一维	三维	六维
示意图			
简介	如果力的方向和作用点是固定的，此时可以选择用一维力传感器进行测量。	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，那么我们就应该选用三维力传感器。	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。

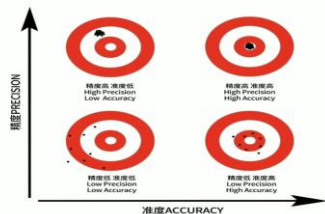
# 3.1 力传感器：机器人的力控核心

◆**六维力传感器**：六维力传感器也是维度最高的力觉传感器，它能给出最为全面的力觉信息。六维力传感器的技术难度和使用难度都比较大，对于机器人产业链和其它智能装配来说又非常重要。**结构设计、标定与检测、算法设计**是六维力/力矩传感器领域的三大壁垒。

◆**六维力传感器核心参数**：精度及准度是多维力传感器的核心指标。**1) 精度**：衡量测量结果之间的重复性。在相同环境条件下，多次重复加载相同载荷后，计算得到的传感器测量值的标准差，并除以量程；**2) 准度**：衡量测量结果与理论值的偏离程度，是多维力传感器的核心指标。进行多组多维联合加载，得到的测量值与理论值之间的标准偏差，并除以量程。准度涵盖了滞后、线性、蠕变等误差因素，更能体现产品的综合性能。

◆**六维力传感器的结构核心部件——弹性体**。弹性体是传感器中感知外部受力信息变化的载体，是多维力传感器核心部件。一体化结构（竖梁式、横梁式、十字梁式、圆柱式等）和Stewart并联结构为例，一体化结构加工难度相对较低，但在测量多维力时可能存在维间耦合等问题；Stewart并联结构理论上能更准确测量多维力，但结构复杂，加工与装配难度大。

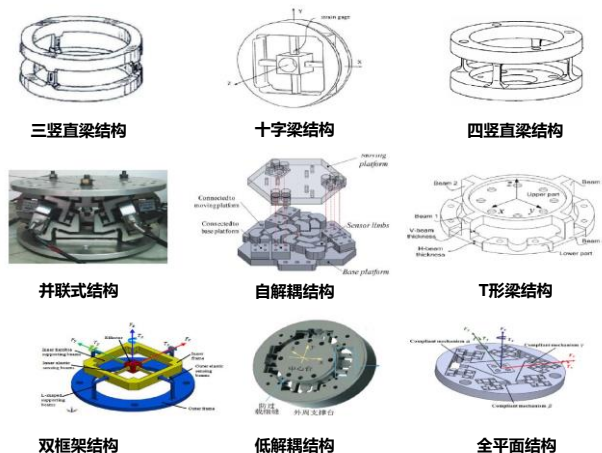
图：六维力传感器的精度与准度关系



图：ATI六维力传感器的内部结构



图：不同的弹性体结构



图：各结构弹性体的优缺点

结构类型	优点	缺点
三横梁	结构简单，灵敏度，响应速度快	刚度较小；径向效应大，存在较大结构耦合
十字梁	改善了力和力矩的分离性能；结构较为坚固，稳定性好	制造难度及成本高；体积较大，不易集成
圆柱	可承受较大负载，适用于高压环境	灵敏度较低；结构复杂，维护及调校复杂
斯图尔特式	六自由度控制，灵活性高，适用动态测量	制造及维护成本很高，结构复杂；标定过程复杂

# 3.1 力传感器：机器人的力控核心

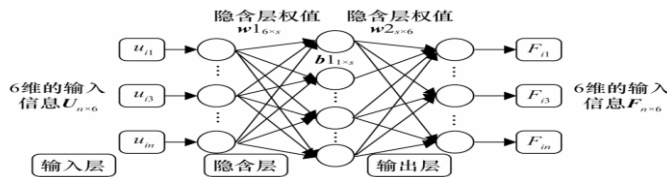
◆**六维力传感器的标定**：标定是加载标准值载荷，并记录传感器的对应输出原始信号，建立传感器输出信号与所加载荷之间的映射关系。六维力传感器的标定分为静态标定及动态标定，**1) 静态标定**：是在静止工况下对传感器施加载荷，然后根据稳定时的输入输出值来进行计算矩阵标定；**2) 动态标定**：考虑负载运动对传感器的影响，在运动状态下进行标定，多维力传感器的动态特性重要性较高。多维力传感器的动态性能指标有响应时间、超调量、固有频率、阻尼比、工作带宽等,其中最重要的是响应时间和工作带宽。

◆**六维力传感器的解耦**：六维力传感器不可避免地产生维间耦合现象，分为结构性耦合及误差性耦合。传统的应用最多的静态解耦方法是基于最小二乘法，求解标定矩阵的广义逆阵，是最广泛的解耦方法。坤维科技作为六维力传感器的领先企业，技术端积累了结构解耦（剥离其他方向的载荷）及算法解耦（直接决定了传感器的抗串性能）。根据坤维科技官网，坤维科技的准度可达0.3%FS以内，达到了国际标准要求。

图：地面在线标定六维力/力矩传感器的实验系统



图：单层BP神经网络后向传播结构图



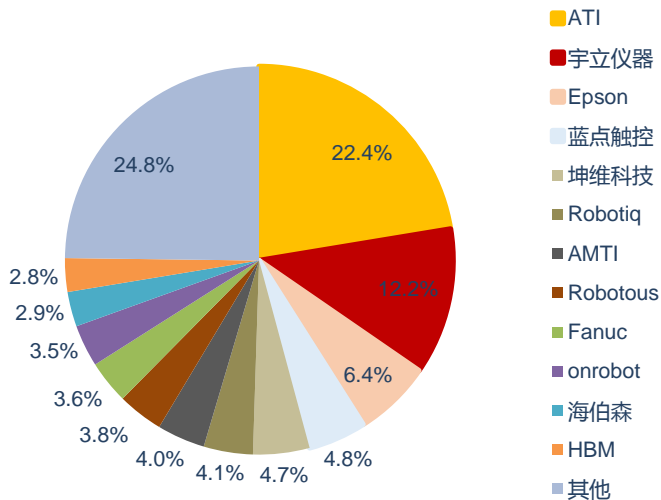
图：各解耦方法结果比较

解耦方法	优点	缺点
最小二乘法	实现简单，实现方式多样，便于理解，意义明确，计算方便	效果相对非线性解耦较差，解耦精度低
BP神经网络	具有良好的非线性解耦能力，精度高，I类与II类误差均控制得很好，准确度高	实现复杂，解耦时间长
随机森林	有良好的抗噪、抗异常值性能，不容易出现过拟合现象，II类误差控制得很好，I类误差较小，解耦精度高，解耦时间短	实现复杂
RF-GA	精度高，性能优良，解耦时间介于上述两种非线性方法之间	实现复杂，解耦时间较普通随机森林延长

# 3.1 力传感器：机器人的力控核心

◆六维力市场的竞争格局。根据中商产业研究院，2023年中国六维力传感器主要被外资企业占据，ATI作为市占率最高的企业，2023年中国市占率超过了20%。国内企业如宇立仪器、坤维科技、蓝点触控等正在积极开拓六维力传感器市场。随着人形机器人产业的加速发展，其他厂商也正在逐步布局六维力传感器，看好国内厂商在未来的市占率逐步提升。

图：2023年中国六维力传感器竞争格局



图：典型六维力传感器代表厂商

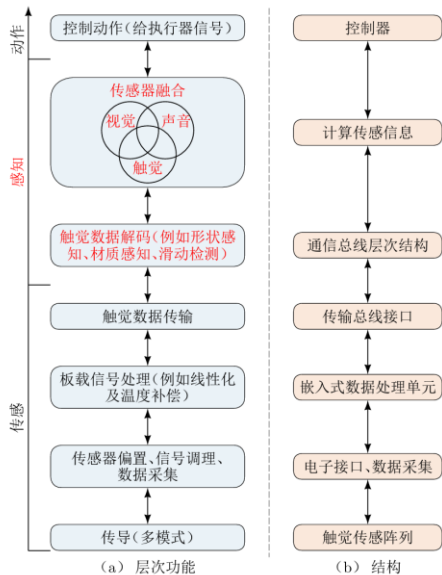
企业	地区	简介
坤维科技	中国	公司主营智能力觉传感器的研发、制造、销售、及技术推广，开发面向机器人及其他智能装备行业的力觉传感器产品，为机器人及其它智能装备等领域提供力觉测量解决方案及相关产品。
ATI	美国	世界领先的机器人配件和机械臂工具的开发商，产品种类丰富。
ME	德国	生产各类标准传感器、力传感器、扭矩传感器以及用于力和扭矩的多轴和多分量传感器。
BOTA	瑞士	起初用于四足机器人开发，测量地面反作用力，现已用于机械臂、外骨骼机器人手术平台等。
Robotiq	加拿大	主要生产夹持器、相机、力矩传感器
SCHUNK	德国	世界领先的夹持技术及抓取系统解决方案供应商
Onrobot	丹麦	主要为轻型协作机械臂提供夹持器、传感器、工具快换装置等，主持主流机械臂即插即用。
OptoForce	匈牙利	专注研究机器人视觉传感器、力矩传感器及人机交互，已被 Onrobot收购。
HBM	德国	产品线涵盖各类传感器、应变片、放大器、数据采集系统等，其扭矩传感器一直是行业标准，广泛应用于发动机和零部件测试台架。

# 3.2 触觉传感器（电子皮肤）：机器人的柔性仿生变革力量

◆**触觉传感器**：机器人的触觉传感系统通过接触来测量物体的物理特征，从而实现对周围环境的感知。触觉传感器从原理上可分为压阻式、电容式、压电式、电感式和光学式，最常用的是压阻式、电容式、压电式，比较新颖的是光学式。触觉传感器可逐渐模拟生物皮肤的复杂属性与功能，如模拟皮肤的柔性、自愈合能力以及对细微力、温度、湿度、物体表面纹理等的感知能力。

◆**电子皮肤**：电子皮肤在不断发展的过程中逐渐实现了多功能传感等特性，并且其灵敏度和精度不断被优化。柔性触觉传感电子皮肤不断发展，在智能医疗、智能控制系统等多个领域发挥着越来越重要的作用。

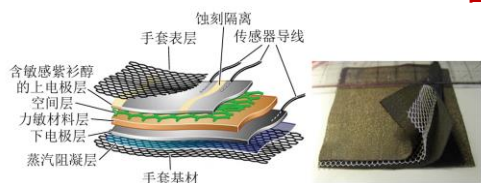
图：机器人触觉传感系统的层次功能及结构



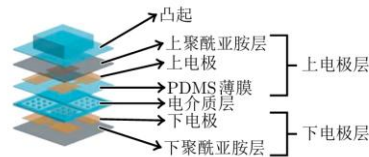
图：不同类型触觉传感器的比较

	压阻式	电容式	压电式
<b>原理</b>	利用压阻效应：压阻材料受到应力时，内部电阻率变化，采集电路将电阻变化转化为电信号	当受到切向和法向力时，极板间距及重合面积会发生变化，导致传感器的电容值发生变化	晶体受到法向力时，内部产生电极化现象，撤掉外力时，晶体又恢复到不带电状态，采集其与所受外力相关的电信号，从而实现触觉检测
<b>优点</b>	负载能力强、鲁棒性好、电信号测量便捷	便于测量三维力，灵敏度及空间分辨率高，响应幅度宽	便于携带，材料刚度好，线性度好，响应灵敏
<b>缺点</b>	迟滞性较大、温漂大、线性度较差	测量电路复杂，容易受电气干扰的影响	容易受噪声干扰，介电性会受温度影响

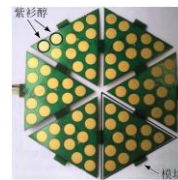
图：不同类型触觉传感器



压阻式柔性传感器结构及实物



电容传感器结构



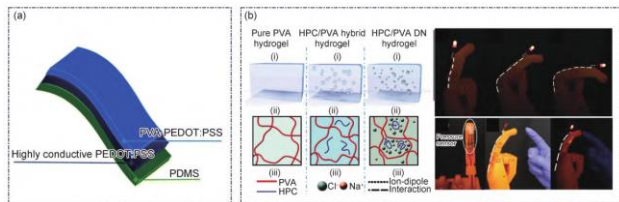
压电式触觉传感阵列

## 3.2 触觉传感器（电子皮肤）：机器人的柔性仿生变革力量

◆**触觉传感器的壁垒及难点**：**1) 技术壁垒**：技术端，电子皮肤难以兼顾高柔性和高弹性，且实现多种功能需要多种传感器的融合，会影响到电子皮肤的轻薄性；另外，电子皮肤传感器需要接入采集电路，复杂接线会一定程度影响活动。**2) 生产及降本壁垒**：具备特殊性能的柔性基底材料、高导电活性材料以及用于微加工的材料等价格不菲，且柔性触觉传感器的生产需要基底保持较好的一致性，确保数字稳定性和温度稳定性达到高标准。一些用于活性层的石墨烯、碳纳米管等材料，制备工艺复杂，导致成本居高不下，增加了大规模生产的成本压力。

◆**触觉传感器的市场空间**。根据QYResearch，2029年全球柔性触觉传感器规模达到53亿美元，其中机器人触觉传感器空间将达到4.3亿美元。我们认为随着机器人技术路线的不断迭代，以及量产的到来，触觉传感器市场规模有望持续增长及超预期。全球柔性触觉传感器市场主要被海外企业占据，主要厂商包括Novasentis、Tekscan、Japan Display Inc.(JDI)、Baumer、Fraba，根据QY Research，22年CR5市占率合计约57%。

图：不同导电介质电子皮肤



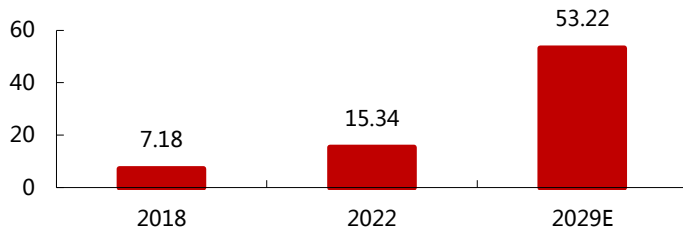
PSS三层复合结构电子皮肤

水凝胶用作机械手神经

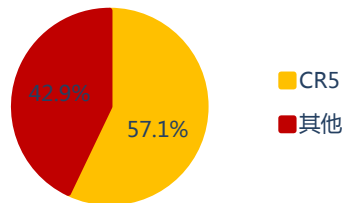


离子导电弹性体

图：全球柔性触觉传感器市场规模（亿美元）



图：2022年全球触觉传感器竞争格局



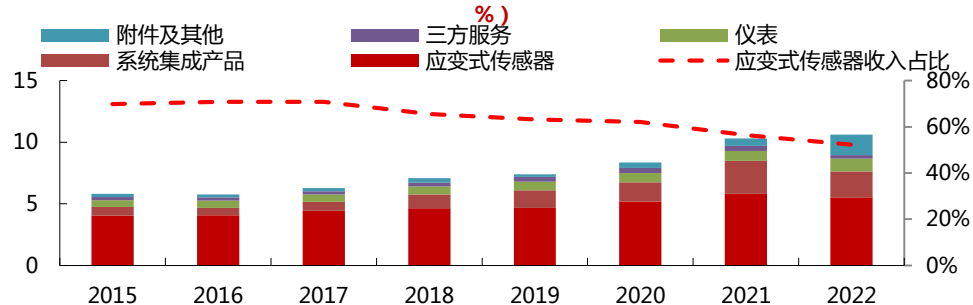
## 2.3 重点公司—柯力传感：平台型传感器龙头，六维力拓展提速

◆**柯力传感：传感器领域的平台型企业。**根据公司财报，公司从2011年至今，连续14年保持力学传感器国内市场占有率第一，不断强化国家制造业单项冠军的“护城河”。公司拥有传感器产业最完善的技术、制造、业务、采购共性平台，且公司逐步引进不同物理量的先进技术。根据公司官网，目前公司产品涵盖机器人传感器、力传感器、光学传感器、电量及流量传感器、气体传感器、惯性传感器、压力传感器等。根据公司公告，目前公司的六维力传感器已经给华为以及国内多家客户测试，看好公司在机器人领域的多重受益。

图：柯力传感多维力传感器产品



图：柯力传感近年收入结构及应变传感器占比（亿元，%）



图：柯力六轴传感器产品



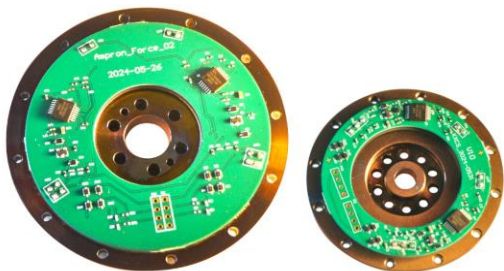
KL6F-C96系列

KL6D-B75-B系列

## 2.3 重点公司—安培龙：主营温度压力传感器，六维力进展顺利

◆安培龙：公司主营业务是热敏电阻及温度传感器、氧传感器、压力传感器产品，六维力传感器进展顺利。在热敏及压阻传感器市场，公司与主要客户美的合作紧密，且正在加速与其他品牌合作，国际领域已与TTI、雀巢等公司合作；压力传感器将是公司收入重要的增长点。产品布局包括成熟产品线温度传感器和热敏电阻，战略产品线陶瓷电容式压力传感器及储备产品线MEMS压力传感器、氧传感器、氮氧传感器、硅微熔压力传感器等。根据公司官网，2024年公司先后发布了《一种低应力六维力传感器及其制备方法》、《一种基于玻璃微熔工艺的六维力传感器及其制备方法》等发明专利，为六维力传感器的性能提升和可靠性保障提供了有力支持。

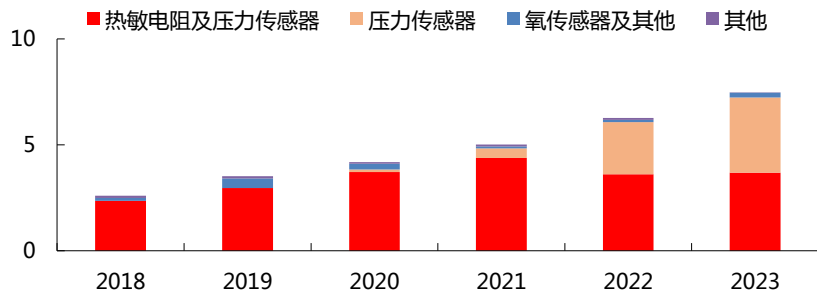
图：安培龙力矩传感器 Force02



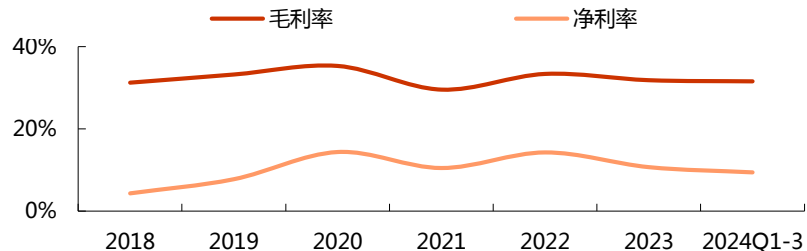
图：安培龙汽车进气管温压一体传感器



图：安培龙近年收入结构（亿元）



图：安培龙近年毛利率及净利率



## 2.3 重点公司—汉威科技：电子皮肤发展提速，技术能力领先

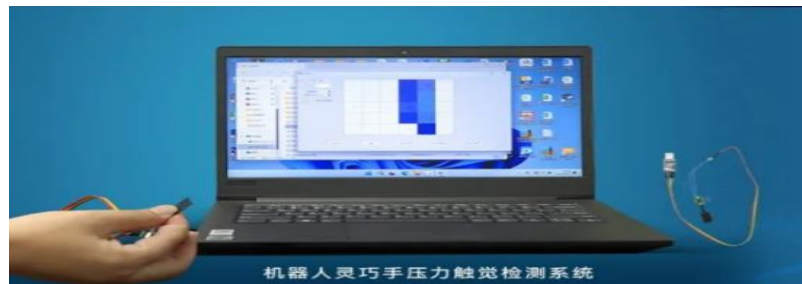
◆**汉威科技**：公司依托子公司能斯达机器人布局触觉传感器产品。根据能斯达官方公众号，苏州能斯达在机器人的关键部位集成柔性微纳触觉传感器，能斯达目前推出两款电子皮肤触觉模块PPT100\FPT200，能够与机器人高度融合，可以模拟人类的触觉感知能力，实现法向力、剪切力、温度等多模态工作场景。根据能斯达官网，能斯达目前已形成了自主知识产权的多品种、多量程的柔性微纳力学量传感器（压力、压电、应变）及阵列的核心设计能力、敏感材料及导电墨水合成制备能力、大面积印刷电子批量制造能力等核心能力，解决了柔性微纳传感器灵敏度低、稳定性差和规模化制造难等关键技术难题，在柔性传感器产业化方面具有国际领先水平。

图：能斯达推出的电子皮肤触觉模块PPT100及FPT200

图：能斯达布局的柔性传感器产品



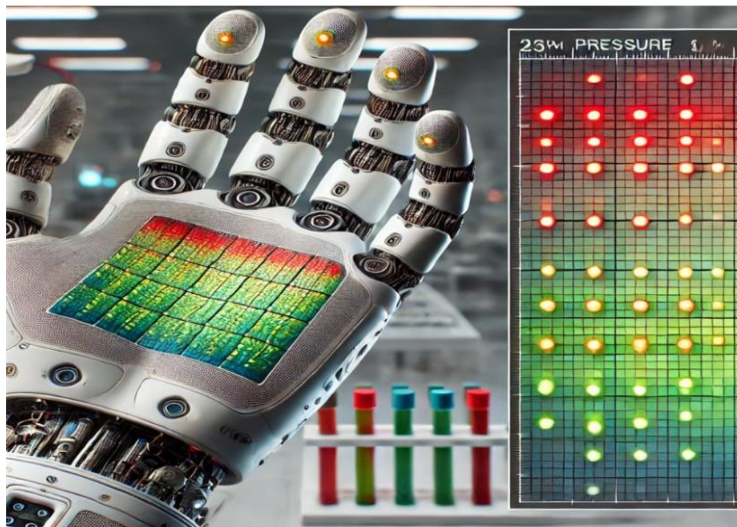
图：机器人灵巧手压力触觉检测系统



## 2.3 重点公司—福莱新材：发力柔性传感器，新产品成功发布

◆**福莱新材**：公司主业是功能性涂布胶膜材料，重点发展柔性传感器。根据公司官方微信公众号，2025年2月，公司举办了柔性传感新技术新产品推介暨投资者交流会，首次详细披露了公司柔性传感项目的研发详情和进展。福莱新材在做的柔性传感器均可定制化。譬如，阵列式压力传感器的最小传感点面积可做到零点几平方毫米，线性度高，性能在业内处于较高水平。

图：机器人触觉与电子皮肤



图：福莱新材柔性传感器与电子皮肤样品展示



四

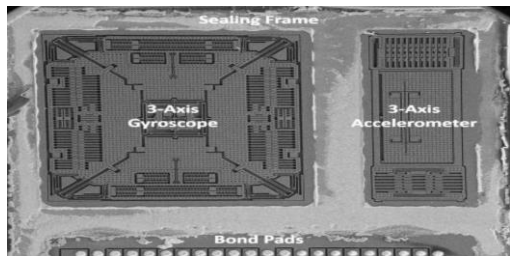
惯性传感器：机器人运控及导航的基础

# 4.1 惯性传感器：机器人运控及导航的基础

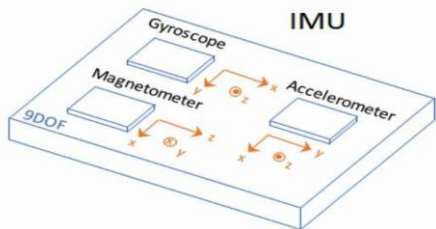
◆**惯性传感器：对内的传感器，是机器人运控及导航的基础。**按被测物理量划分，可分为加速度传感器（加速计）和角速度传感器（陀螺仪）。将加速度计与陀螺仪整合，可以得到惯性测量单元（IMU）。IMU用于测量物体三轴的角速度与加速度，一般包含三个单轴加速度计和三个单轴陀螺仪，部分还配有磁力计。

◆**人形机器人领域：**IMU能测量机器人的加速度与角速度，助力跟踪机器人姿势和运动状态；通过提供并分析实时运动数据，实现对机器人运动轨迹和速度的精确控制；还能检测机器人的偏移与倾斜，实时进行姿态稳定和调整。

图：ST的IMU结构图



图：IMU的构成



图：陀螺仪的主要性能及等级划分

类别	战略级	导航级	战术级	消费级
应用领域	航天，航海	航空，长航时无人系统	高端工业（测绘、资源勘探）、车辆和飞行体	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
陀螺仪技术	机电、激光、光纤陀	激光、光纤、动力调谐、MEMS	激光、光纤、动力调谐、MEMS	MEMS
代表厂商	Honeywell	Honeywell、Northrop、Grumman、Emcore、芯动联科	Honeywell、Sensoror、ADI、Silicon Sensing、Emcore、芯动联科	Honeywell、Sensoror、ADI、Silicon Sensing

# 4.1 惯性传感器：机器人运控及导航的基础

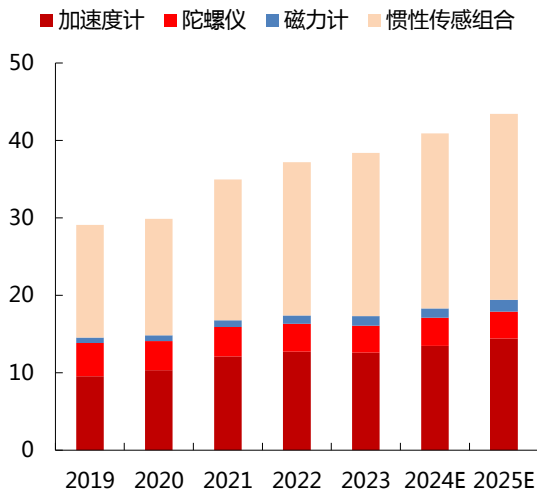
◆**MEMS惯性传感器市场空间。**根据Yole，2021年MEMS惯性传感器市场空间约为35亿美元。2021年MEMS陀螺仪和MEMS加速度计市场规模达到15.93亿美元，占全球MEMS惯性传感器总市场规模45.4%。根据芯动联科招股书，中国惯性传感器市场空间2021年达136亿元，预计仍将以稳健速度增长。

◆**MEMS惯性传感器下游领域：**MEMS惯性传感器下游领域广泛，包括工业通信、高可靠领域、汽车电子、消费电子、医疗健康等多领域。

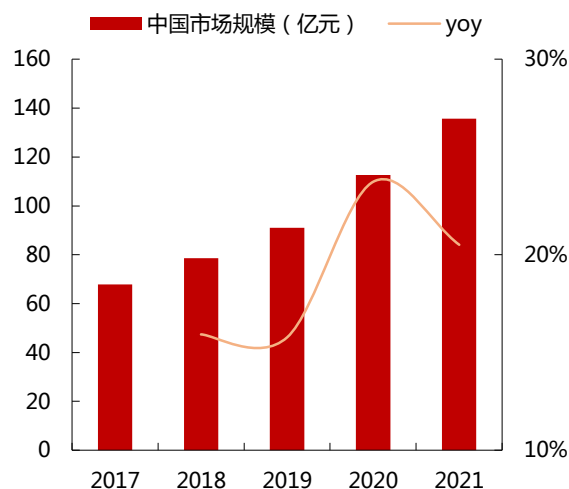
图：MEMS惯性传感器下游应用领域

领域	应用
工业与通信	无人系统、工业机器人、石油勘探、测量测绘、高速铁路、精密农业、工程机械、寻北仪、光电吊舱、动中通、天线姿态监测、光伏跟踪系统、结构健康监测、振动监测等
高可靠	卫星姿态控制、航姿备份系统等
汽车电子	安全气囊、车身稳定系统、TPMS 胎压传感器、GPS 辅助导航、自动驾驶高精定位等
医疗健康	健康监测设备、植入式心脏起搏器、手术机器人、康复训练设备等
消费电子	智能手机、平板电脑、游戏机、智能手表、智能手环、TWS 耳机、笔记本电脑、数码相机、智能玩具等

图：MEMS惯性传感器市场空间及分布（亿美元，%）



图：中国惯性传感器市场规模及增速（亿元，%）

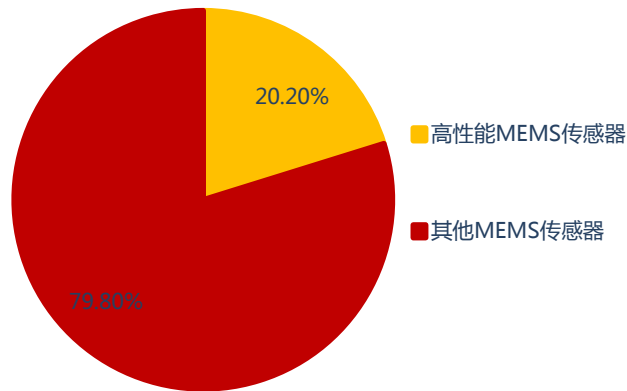


## 4.1 惯性传感器：机器人运控及导航的基础

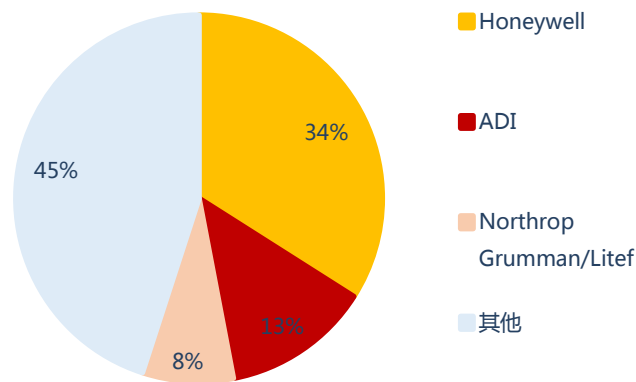
◆**高性能MEMS惯性传感器。**1) **市场空间**：根据Yole，2021年高性能MEMS惯性传感器市场空间约为7.1亿美元，占惯性传感器比例为20.2%。

2) **竞争格局**：根据芯动联科招股书，全球高性能MEMS惯性传感器份额集中在霍尼韦尔、ADI、Northrop Grumman/Litef 等巨头手中，市占率CR3超过50%。2021年芯动联科高性能MEMS传感器收入约为1.66亿元，有一定市占率，但与国际巨头仍有一定差距。

图：MEMS惯性传感器按等级分布



图：2021年全球高性能MEMS惯性传感器格局

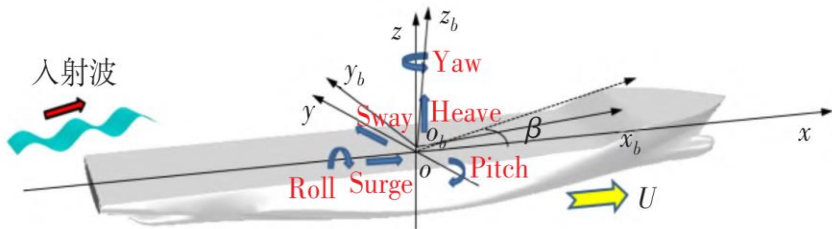


# 4.1 惯性传感器：机器人运控及导航的基础

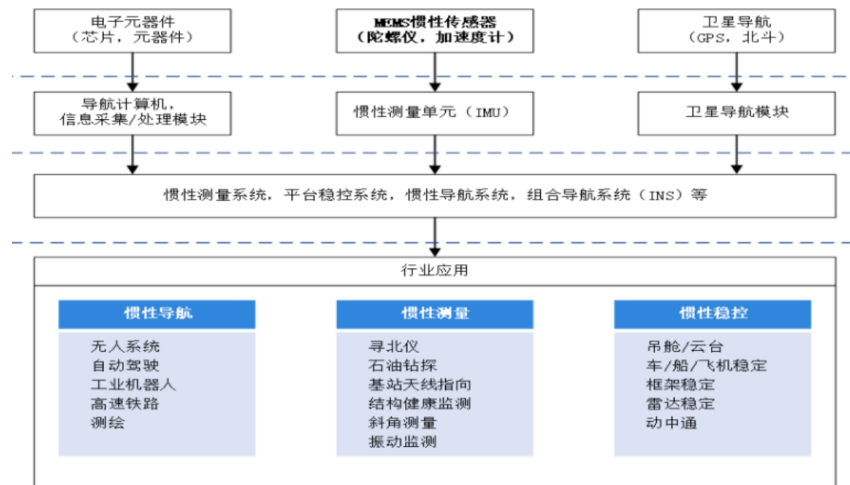
## ◆高性能MEMS惯性传感器的三大应用领域——按功能划分。

- 1) **惯性导航**：核心器件是陀螺仪和加计。每套惯性系统包含三轴陀螺仪和三轴加速度计，分别测量三个自由度的角速率和线加速度。惯性导航不借助外源信息，也不向外发送任何信号，可免受外界干扰影响。除独立使用外，惯性导航还可以与卫星导航结合使用，形成组合导航系统。
- 2) **惯性测量**：利用陀螺仪、加速度计等惯性敏感元件和电子计算机测量载体相对于地面运动的角速率和加速度，以确定载体的位置和地球重力场参数的组合系统。目前已被应用于石油测斜、城市测绘、地质监测、寻北仪表等领域。
- 3) **惯性稳控**：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，使被稳定对象与设定目标保持相对稳定。

图：以船舶为例的六自由度运动及坐标



图：MEMS惯性传感器应用领域——按功能划分



# 4.1 惯性传感器：机器人运控及导航的基础

◆可比公司主要是海外头部企业。目前国外从事高性能 MEMS 惯性传感器业务的代表企业主要为 Honeywell、ADI、Sensoror、Silicon Sensing、Colibrys等。Honeywell、ADI 等国外巨头整合了芯片设计、晶圆制造、封装和测试整个产业链，其MEMS产品体系相对丰富。Sensoror、Silicon Sensing除开发MEMS惯性器件外，还进行相关模组、系统产品的生产。

图：MEMS惯性传感器主要玩家

公司名称	主要产品	主要应用领域	市场地位
Honeywell	航空航天产品和服务等	通信、工业设备、船舶及潜航器、石油和天然气、机器人、地图测绘、稳定平台、交通运输、无人机和地面无人车辆等	目前MEMS陀螺仪研制开发领域代表世界最高水平公司之一
ADI	数据转换器、放大器和线性产品、射频芯片、电源管理产品、基于 MEMS技术的传感器、其他类型传感器以及信号处理产品	工业、汽车、通信和消费电子市场等	高性能模拟、混合信号和数字信号处理集成电路设计、制造和营销方面世界领先
Sensoror	MEMS陀螺仪传感器、加计、惯性传感器模块	工业、航空航天、汽车及船舶航海等高精度传感器应用	在开发和制造抗振动、抗冲击和恶劣环境适用的高性能传感器领域拥有多年经验
Silicon Sensing	陀螺仪和惯性系统	航空、平台稳定、测绘、石油勘探、工业机器人、惯性导航、船舶、自动驾驶等	提供可靠、高质量陀螺仪和惯性系统产品的供应商。被SAFRANS收购。
Colibrys	惯性传感器、高温加计、震动感应器、地震传感器	航空和安全关键应用等领域	全球领先MEMS技术加速度传感器供应商之一
美泰科技	MEMS 惯性器件与系统、MEMS 惯性传感器、汽车传感器、压力传感器、射频 MEMS 器件等	航空航天、智能驾驶、智慧城市、物联网和 5G 通信等	是国内较知名MEMS企业
芯动联科	MEMS 陀螺仪和加速度计	终端产品应用于高端工业、无人系统高可靠等领域	高性能MEMS惯性传感器核心性能指标达到国际先进水平

图：芯动联科主要的竞争对手产品及技术路线布局

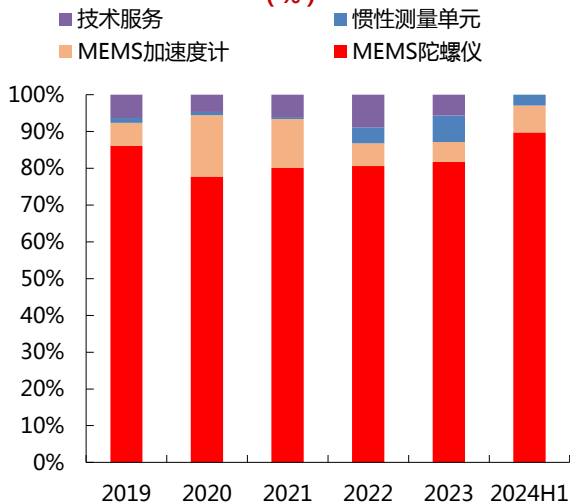
公司	产品类别				技术路线			性能等级			
	加速度计	陀螺仪	惯性单元	惯导系统	硅基MEMS	激光	光纤	工业级	战术级	导航级	战略级
Honeywell	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
ADI	√	√	√		√			√	√		
Sensoror		√	√		√			√	√		
Silicon Sensing	√	√	√		√			√	√		
SAFRAN	√				√			√	√	√	√
美泰科技	√		√					√	√		
芯动联科	√	√	√		√			√	√	√	

## 4.2 重点公司——芯动联科：深耕MEMS陀螺仪加计，应用领域不断拓展

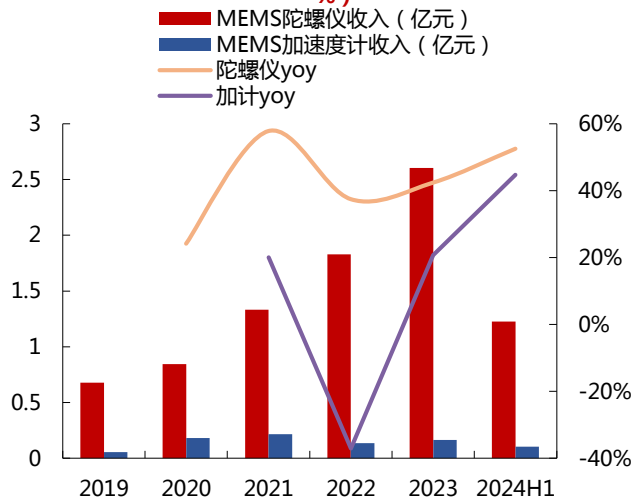
◆**芯动联科**：主要产品为高性能MEMS惯性传感器，主要包括MEMS陀螺仪、加速度计、惯性测量单元等。公司长期致力于自主研发高性能 MEMS 惯性传感器，经过多年的探索和发展，公司高性能MEMS惯性传感器的核心性能指标达到国际先进水平。主营产品端，MEMS陀螺仪收入占比持续超过70%，近年MEMS加速度计也保持较高收入增长。公司产品下游应用领域逐步拓宽，在高端工业、惯性系统、无人系统等领域不断深耕。

◆**产品长期保持高毛利率**。根据公司24年三季报，2024Q1-3公司实现收入2.7亿元，同比增长 41.2%；24Q1-3公司归母净利润为1.38亿元，同比增长42.4%。毛利率端，公司MEMS陀螺仪与MEMS加计核心参数指标达到了国际先进水平，议价能力较强，长期保持较高的毛利率水平。近年公司主营产品毛利率有所波动，主要系售价、原材料价格等的影响。

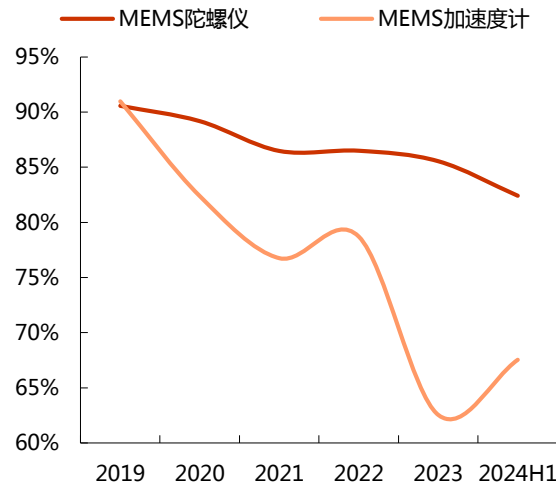
图：公司近年收入结构 (%)



图：公司近年主要产品收入及增速 (亿元, %)



图：公司近年主要产品毛利率



## 4.2 重点公司—华依科技：IMU在智驾与人形机器人领域进展较快

◆**华依科技：公司主营动力总成测试设备及服务，惯导业务开始有较快进展。**公司近年加大对高精度惯导研发力度，实现车规级惯导技术的产品化。高精度惯导产品不依赖外部信号，逐渐成为L3及以上智能驾驶车辆的重要定位系统，在汽车智能驾驶应用领域尚处于起步阶段，具有广阔的成长空间。根据公司财报，2023年公司智能驾驶业务收入已经突破1000万元，预计未来公司的惯导产品，在智能驾驶和机器人领域将显著受益。

◆**25M2发布机器人新产品ARU8010。**根据公司官网，华依科技集团旗下全资子公司华依智造推出自主研发的ARU8010姿态参考传感器，在国内某头部人形机器人制造商的竞标中脱颖而出，成为其新一代人形机器人的IMU供应商。

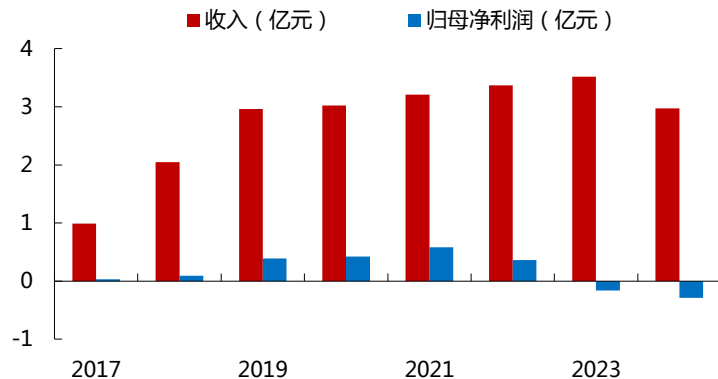
图：华依科技惯导产品



图：华依科技ARU8010人形机器人专用姿态传感器



图：华依科技近年收入及归母净利润（亿元）



五

投资建议与风险提示

◆ 目前人形机器人的发展提速，国内外厂商开展了军备竞赛，传感器作为人形机器人必不可少的部件，有望需求迎来较快增长，且技术路线有望持续迭代，国内技术实力较强的企业有望迎来快速发展。人形机器人的传感器，包括视觉、听觉、力觉及触觉、惯性传感器等。

◆1) **视觉传感器**：受益标的包括深耕3D视觉传感器的奥比中光，以及机器视觉领域领先的凌云光、奥普特等。

◆2) **听觉传感器**：受益标的包括国内麦克风领域领先的敏芯股份等。

◆3) **力/力矩传感器**：受益标的包括平台型传感器龙头柯力传感、六维力传感器有进展的安培龙、东华测试、凌云股份等。

◆4) **触觉传感器**：作为应用广泛且难度较大的环节，相关企业尚处于研发阶段，受益标的包括汉威科技、福莱新材、日盈电子等。

◆5) **惯性传感器**：用途及产品形态相对成熟，建议关注具备陀螺仪芯片设计能力的龙头芯动联科，受益标的包括发布机器人IMU新产品的华依科技等。

- 1) 人形机器人开拓及应用端进展不及预期的风险。**目前人形机器人行业刚刚起步，国内外主流玩家纷纷布局。但是目前在应用端仍在在摸索阶段，量产及下游的具体需求尚存在不确定性。若未来的量产进度偏慢，以及下游应用和需求相对较慢，对产业内企业会造成影响。
- 2) 传感器技术难度较大，技术路线多变，国内企业进展及降本不及预期的风险。**人形机器人需要使用多种传感器，如六维力、电子皮肤、3D视觉等，细分产品难度较大，且新的技术路线仍然在演变。国内企业在布局新技术，若未来技术提升进展偏慢，进入国内及海外大客户仍存在一定不确定性。细分产品的价格相对较贵，若未来降本的节奏偏慢，也会对相关企业产生影响。
- 3) 行业竞争加剧的风险。**目前很多企业都在布局人形机器人领域，不乏很多跨界跨行业的公司。未来若细分环节技术突破较快，或将引发竞争加剧的风险，影响行业内整体的盈利水平。

## 分析师承诺

作者具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格或相当的专业胜任能力，保证报告所采用的数据均来自合规渠道，分析逻辑基于作者的职业理解，通过合理判断并得出结论，力求客观、公正，结论不受任何第三方的授意、影响，特此声明。

## 评级说明

公司评级标准	投资评级	说明
以报告发布日后的6个月内公司股价相对上证指数的涨跌幅为基准。	买入	分析师预测在此期间股价相对强于上证指数达到或超过15%
	增持	分析师预测在此期间股价相对强于上证指数在5%—15%之间
	中性	分析师预测在此期间股价相对上证指数在-5%—5%之间
	减持	分析师预测在此期间股价相对弱于上证指数5%—15%之间
	卖出	分析师预测在此期间股价相对弱于上证指数达到或超过15%
行业评级标准		
以报告发布日后的6个月内行业指数的涨跌幅为基准。	推荐	分析师预测在此期间行业指数相对强于上证指数达到或超过10%
	中性	分析师预测在此期间行业指数相对上证指数在-10%—10%之间
	回避	分析师预测在此期间行业指数相对弱于上证指数达到或超过10%

### 华西证券研究所：

地址：北京市西城区太平桥大街丰汇园11号丰汇时代大厦南座5层

网址：<http://www.hx168.com.cn/hxzq/hxindex.html>

# 免责声明

华西证券股份有限公司（以下简称“本公司”）具备证券投资咨询业务资格。本报告仅供本公司签约客户使用。本公司不会因接收人收到或者经由其他渠道转发收到本报告而直接视其为本公司客户。

本报告基于本公司研究所及其研究人员认为的已经公开的资料或者研究人员的实地调研资料，但本公司对该等信息的准确性、完整性或可靠性不作任何保证。本报告所载资料、意见以及推测仅于本报告发布当日的判断，且这种判断受到研究方法、研究依据等多方面的制约。在不同时期，本公司可发出与本报告所载资料、意见及预测不一致的报告。本公司不保证本报告所含信息始终保持在最新状态。同时，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，投资者需自行关注相应更新或修改。

在任何情况下，本报告仅提供给签约客户参考使用，任何信息或所表述的意见绝不构成对任何人的投资建议。市场有风险，投资需谨慎。投资者不应将本报告视为做出投资决策的惟一参考因素，亦不应认为本报告可以取代自己的判断。在任何情况下，本报告均未考虑到个别客户的特殊投资目标、财务状况或需求，不能作为客户进行客户买卖、认购证券或者其他金融工具的保证或邀请。在任何情况下，本公司、本公司员工或者其他关联方均不承诺投资者一定获利，不与投资者分享投资收益，也不对任何人因使用本报告而导致的任何可能损失负有任何责任。投资者因使用本公司研究报告做出的任何投资决策均是独立行为，与本公司、本公司员工及其他关联方无关。

本公司建立起信息隔离墙制度、跨墙制度来规范管理跨部门、跨关联机构之间的信息流动。务请投资者注意，在法律许可的前提下，本公司及其所属关联机构可能会持有报告中提到的公司所发行的证券或期权并进行证券或期权交易，也可能为这些公司提供或者争取提供投资银行、财务顾问或者金融产品等相关服务。在法律许可的前提下，本公司的董事、高级职员或员工可能担任本报告所提到的公司的董事。

所有报告版权均归本公司所有。未经本公司事先书面授权，任何机构或个人不得以任何形式复制、转发或公开传播本报告的全部或部分内容，如需引用、刊发或转载本报告，需注明出处为华西证券研究所，且不得对本报告进行任何有悖原意的引用、删节和修改。