



# 机器人行业研究

买入（维持评级）

行业专题研究报告

证券研究报告

机械组

分析师：满在朋（执业 S1130522030002） 分析师：倪赵义（执业 S1130524120001）

manzaipeng@gjzq.com.cn

nizhaoyi@gjzq.com.cn

## 机器人行业系列三：传感器-外界互动的必备感知

### 传感器是机器人与外界感知的桥梁，看好视觉、力觉、触觉三个方向

- 机器人智能化的提升在于感知能力的提升，传感器是感知层面核心部件。人形机器人主要感知维度来自于力觉、惯性、触觉、视觉、速度/位置这五大方面，我们结合产品壁垒、行业格局、产业进展程度后，认为视觉、力觉、触觉是未来人形机器人传感器领域值得重点关注的三个细分方向。

### 视觉-机器之“眼”，软硬皆为壁垒，国内厂商差异竞争

- 3D 视觉传感器具有精度高、信息量大、集成度高等多个优势，适用于复杂、精密的识别，更有望成为未来人形机器人的主流方案。1) 产业进展尚早：目前主流机器人厂商在视觉方案领域各不相同，尚处于前期阶段，如波士顿动力 Atlas、特斯拉 Optimus、小米 CyberOne、优必选 Walkers X 选择方案分别为 TOF 深度相机方案、多目摄像头、深度视觉模组和多目视觉传感器四类不同方案，产业方案尚未形成统一。2) 壁垒：3D 视觉传感器在软件、硬件均有较高要求。3D 视觉传感器的核心指标为深度分辨率、精度等，实现高性能的 3D 视觉传感器要求对于硬件的芯片设计、软件的算法研发等均提出较高要求。3) 格局：海外头部厂商苹果、微软在 3D 视觉传感器领域技术领先、算法优势强；国内部分厂商通过攻克芯片、关键元器件等环节实现差异竞争，在部分技术指标（如分辨率、精度、功耗等）已经超过海外头部厂商，未来有望打入人形机器人产业链。

### 力觉-高壁垒、高价值，机器人灵活操作的核心

- 我们判断人形机器人的手腕、脚踝处需六维力矩传感器、其他关节预计使用关节扭矩传感器。1) 产业进展：从特斯拉 AI day 的技术路线来看，末端执行机构对于精度要求更高，预计使用六维力矩传感器；其他关节对于里的感知相对简单，预计单维力矩传感器即可满足要求；2) 壁垒高：维度越多的力矩传感器生产壁垒越高，六维力矩传感器的壁垒在于核心材料应变片的质量、生产工艺、检测设备等环节；3) 价值量大：由于六维力矩传感器较高的人工成本、材料成本，目前单个产品价值量较高，根据 ATI 官网，该公司六维力矩传感器的价格在 4000-8000 美元之间；4) 格局：海外厂商性能优异，先发优势强。六维力矩传感器海外龙头为 ATI 厂商，技术水平领先，而国内多数厂商尚未形成大规模收入，部分国产厂商在多维力矩传感器领域进展顺利，后续有望进入人形机器人产业链。

### 触觉-机器之“肤”，实现精细交互

- 电子皮肤是机器人触觉实现精细交互的关键技术，视觉+触觉的方案技术指标更优、有望成为未来的主流方案。1) 产业进展：23 年 12 月特斯拉 Optimus Gen2 实现抓鸡蛋动作，国内厂商帕西尼新一代灵巧手具有近 1 千个触觉传感器，大大提升操作精度；从技术路径来看，帕西尼的触觉结合视觉的方案技术指标更优、成本更低，有望成为未来触觉的主流方案。2) 壁垒：电子皮肤的壁垒主要在材料和算法；电子皮肤敏感材料制造难度大、生产成本高；从软件来看，算法对于传感器的处理结果精确度起到重要意义，软硬件缺一不可。3) 格局：目前行业头部厂商主要以外国品牌为主，国内部分厂商技术相对领先。

### 投资建议

- 我们看好人形机器人产业逐渐落地后带来传感器需求提升，相关产业链标的有望受益。

### 风险提示

- 人形机器人商业化落地不及预期、机器人传感器技术路线发生变化。



## 内容目录

一、传感器：机器人感知世界的桥梁.....	5
1.1 机器人的智能化在于感知层能力提升.....	5
1.2 力觉、视觉、触觉传感器为重点关注方向.....	5
二、视觉：机器人之“眼”，捕捉信息的关键.....	6
2.1 机器人的主流方案为 3D 视觉，打开视觉传感器新空间.....	6
2.2 机器人 3D 视觉方案较多，奥比中光是国内 3D 视觉头部厂商.....	6
2.3 海外头部厂商地位领先，国产逐渐打开市场.....	8
三、力觉：高壁垒、高价值，机器人精确、灵活操作的核心.....	8
3.1 力控在人形机器人担任什么角色？.....	8
3.2 人形机器人的不同关节需要哪类力矩传感器？.....	9
3.3 如何看待力矩传感器的壁垒？.....	12
3.4 价格&成本：高端力矩传感器价格高，成本来自于人工成本+材料成本.....	14
3.5 国内厂商仍处前期发展阶段，人形机器人有望打开力矩传感器增量空间.....	15
四、触觉：机器人之“肤”，实现精细交互.....	16
4.1 电子皮肤：实现机器人精细操作的关键技术，视觉+触觉为目前技术前沿.....	16
4.2 产业进展：特斯拉 Optimus、帕西尼对于触觉持续提高要求.....	18
4.3 电子皮肤核心壁垒在于材料和算法.....	19
4.4 触觉传感器厂商梳理.....	21
五、编码器：反馈机器人的关节位置，精准控制的关键.....	22
5.1 编码器是测量位移、角度的高精度传感器，人形机器人多个环节需要编码器.....	22
5.2 编码器行业空间稳步增长，产品壁垒高、海外厂商占据主流份额.....	24
六、投资建议：重点关注奥比中光、柯力传感.....	25
6.1 奥比中光：卡位机器人 3D 视觉标的，下游多点开花.....	26
6.2 柯力传感：卡位人形机器人力矩传感器性感赛道.....	27
七、风险提示.....	28

## 图表目录

图表 1： 具身智能机器人的核心在于感知层、认知层.....	5
图表 2： 机器人用传感器分类.....	5
图表 3： 人形机器人传感器的主要类型.....	5
图表 4： 机器人视觉感知由芯片、算法、传感器影响.....	6
图表 5： 机器人视觉感知向 3D 化发展.....	6



图表 6:	2025 年全球 3D 视觉感知市场规模将达 150 亿美元.....	6
图表 7:	主流机器视觉传感方式.....	7
图表 8:	主流传感器的感知方式.....	7
图表 9:	主流人形机器人厂商视觉传感方案.....	7
图表 10:	主流厂商短距离 3D 视觉传感器性能对比.....	8
图表 11:	主流厂商长距离 3D 视觉传感器性能对比.....	8
图表 12:	主流视觉传感器厂商梳理.....	8
图表 13:	运动控制系统包括控制器、驱动、执行器、运动反馈单元.....	9
图表 14:	力控是实现曲面打磨等高精操作的重要技术.....	9
图表 15:	机械化工作和仿人化控制的区别.....	9
图表 16:	人型机器人力矩传感器应用场景.....	10
图表 17:	常见无耦合型传感器结构框图.....	10
图表 18:	力传感器不同检测方法优缺点对比.....	10
图表 19:	硅/箔电阻应变式传感器具有更强的综合性能.....	11
图表 20:	一维、三维、六维传感器作用示意图.....	12
图表 21:	ATI 六轴力矩传感器的内部结构.....	12
图表 22:	应变片需要安装在弹性体上来感受力的变化.....	12
图表 23:	应变片的生产工艺.....	13
图表 24:	应变片的性能对比.....	13
图表 25:	应变片贴合弹性体工艺要求高.....	13
图表 26:	海外各个国家六维力矩传感器标定设备.....	14
图表 27:	六维力矩传感器标定样本点数量超过 50 万个.....	14
图表 28:	海外龙头厂商单个应变片的价格高达 180 元/个.....	14
图表 29:	某六维力矩传感器上需要 32 个应变片.....	14
图表 30:	ATI 不同系列六维力矩传感器的价格.....	15
图表 31:	中国六维力矩传感器市场集中度高.....	15
图表 32:	六维力矩传感器国产占比逐渐上升.....	15
图表 33:	力矩传感器代表厂商梳理.....	16
图表 34:	电子皮肤能感知压力、剪切力、接触力等多种类型力.....	16
图表 35:	电子皮肤主要分为基底层、导电层、传感层.....	17
图表 36:	传统的主要触觉传感器类型优缺点介绍.....	17
图表 37:	帕西尼的 Dex13 多维触觉灵巧手结合了视觉和触觉.....	18
图表 38:	帕西尼 IPTUGEN2 触觉传感器在多项指标技术领先.....	18
图表 39:	特斯拉 OptimusGen2 完成拿放鸡蛋动作.....	19
图表 40:	帕西尼新一代灵巧手实现多角度柔顺操作.....	19



图表 41:	帕西尼新一代灵巧手具有近千个触觉传感器	19
图表 42:	触觉传感器主要材料	20
图表 43:	可量化生产的“基于石墨纳米片/聚氨酯纳米复合材料”的电子皮肤	20
图表 44:	帕西尼 ITPU 实现毫秒决策和高级感知	21
图表 45:	帕西尼多维触觉可视化软件实现信号可视化	21
图表 46:	2023 年全球柔性触觉传感器行业集中度高	21
图表 47:	触觉传感器代表厂商梳理	22
图表 48:	编码器是测量位移、角度的高精度传感器	23
图表 49:	光电式编码器精度高、抗电磁干扰强，占据 70%份额	23
图表 50:	编码器在人形机器人的关键关节与执行器中的应用解析	24
图表 51:	编码器全球、中国市场规模稳定增长	24
图表 52:	编码器下游以电梯为主，占比达 25%	24
图表 53:	光栅编码器技术壁垒	25
图表 54:	2022 年中国编码器市场超 40%份额被多摩川、海德堡占据	25
图表 55:	人形机器人传感器全景图	25
图表 56:	奥比中光收入结构以生物识别、AIOT 为主	26
图表 57:	奥比中光归母净利润亏损持续收窄	26
图表 58:	公司研发费用长期坚持高投入	26
图表 59:	掌握 3D 传感器全栈式技术能力	26
图表 60:	奥比中光 iTOF 3D 相机 Fento Bolt 性能优异	27
图表 61:	柯力传感近年来收入保持增长	27
图表 62:	柯力传感产品结构主要以力传感器为主	27
图表 63:	柯力传感机器人多维力传感器	28
图表 64:	柯力传感机器人关节扭矩传感器	28



## 一、传感器：机器人感知世界的桥梁

### 1.1 机器人的智能化在于感知层能力提升

传感器是能接收到被测量对象信息，并将该信息转换为电信号或其他所需信号类型，是获取环境、设备信息的主要手段。机器人的核心在于其感知和认知层面的提升，传感器是感知层面核心部件。

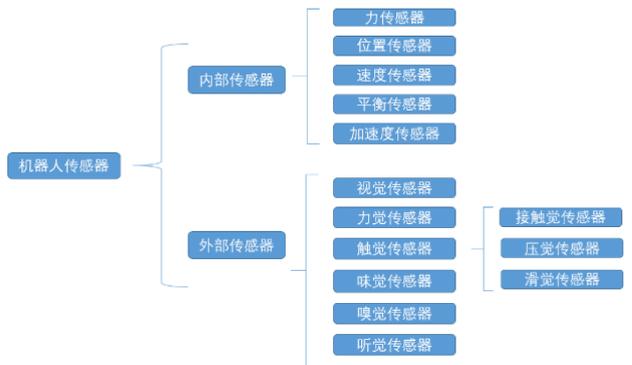
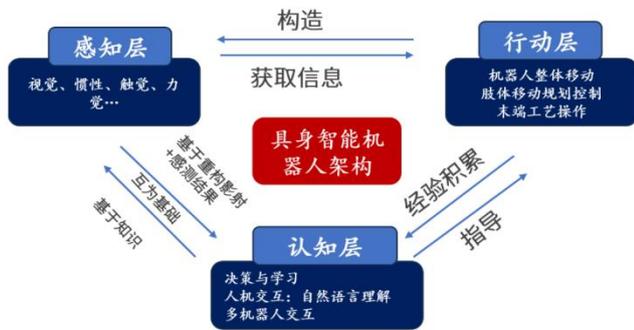
与传统工业机器人相比，人形机器人的传感器除了需满足传统机器人需求的电流传感器、温度传感器之外，还有一些价值量较高、对于性能提升较为关键的传感器，包括力传感器、电子皮肤、视觉传感器、惯性传感器等。

机器人的传感器可以根据监测目标的不同被划分为两类：内部传感器和外部传感器。

- 内部传感器主要用于检测机器人本身的状态（如位置、手臂间角度）的传感器，具体包括位置传感器、速度传感器、惯性测量单元（IMU）以及力/力矩传感器。
- 外部传感器主要通过视觉、听觉和触觉等感官系统和外界实现信息交互，用于检测机器人所处的环境（如距物体距离）及状况（如抓取的物体是否滑落）的传感器，具体包括视觉传感器、语音识别系统、红外传感器和压力传感器。

图表1：具身智能机器人的核心在于感知层、认知层

图表2：机器人用传感器分类



来源：具身智能机器人公众号，国金证券研究所

来源：《关于传感器在机器人中的应用分析》，国金证券研究所

### 1.2 力觉、视觉、触觉传感器为重点关注方向

具身智能机器人是指将AI融入机器人物理实体，赋予它们像人一样感知、学习和与环境动态交互的能力。具身智能机器人根据其功能和应用场景，配备了多种类型的传感器，包括视觉传感器（如摄像头、激光雷达、毫米波雷达、红外传感器等）、听觉传感器（如麦克风）、嗅觉传感器（如气味传感器）、触觉传感器（包括力传感器）、编码器、IMU等，以实现感知和分析外部环境并进行自身状态反应，实现复杂的交互和操作任务。

图表3：人形机器人传感器的主要类型

传感器类型	原理	获得的信息	在工业机器人中的应用
触觉传感器	电容式、压电式、压阻式、光学式	接触力、面积、位置	人机协作、物体抓取、质量监控
视觉传感器	CCD 或 CMOS 成像	图像	人-机器人协作 (HRC)、导航、机械手控制、装配、机器人编程
激光传感器	飞行时间 (TOF)、三角测量、光学干涉	距离、位移	人-机器人协作 (HRC)、导航、操纵器控制
编码器	光电、磁性、电感性、电容性	角位移	导航、操纵器控制
接近传感器	电容式、电感式、光电式	物体接近	人-机器人协作 (HRC)、物体抓取
惯性的传感器	航位推算 (DR)	加速度、角速度、方位角	导航、操纵器控制
扭矩传感器	感应电阻应变	扭矩	人-机器人协作、物体抓取、机器人编程
声传感器	电容的	声音信号	人-机器人协作 (HRC)、焊接
磁性传感器	霍尔效应	磁场强度	航行



超声波传感器

飞行时间 (TOF)

距离

障碍物回避

来源：《工业机器人传感器技术综述》，国金证券研究所

结合行业进展、产业趋势，我们建议重点关注视觉、力觉、触觉三个方向。

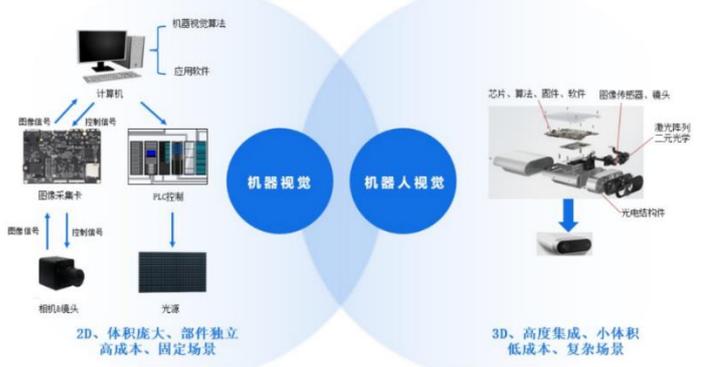
## 二、视觉：机器人之“眼”，捕捉信息的关键

### 2.1 机器人的主流方案为 3D 视觉，打开视觉传感器新空间

视觉方案主要分为 2D 视觉和 3D 视觉：1) 2D 视觉：通过 2D 相机分析灰度或彩色图像中的像素灰度特征获取目标中的有用信息，识别纹理形状。容易受到光照影响，且无法实现三维精准测量。2) 3D 视觉：精度更高、信息量更大（三维图像）、集成度更高，适用于更加复杂、精密的识别、检测需求。

机器人的视觉感知属于高度集成的模组方案，对于体积、成本、精准度都有较高要求，因此 3D 视觉高度集成、体积小、精度高的优势更适合机器人的场景。

图表4：机器人视觉感知由芯片、算法、传感器影响



图表5：机器人视觉感知向 3D 化发展

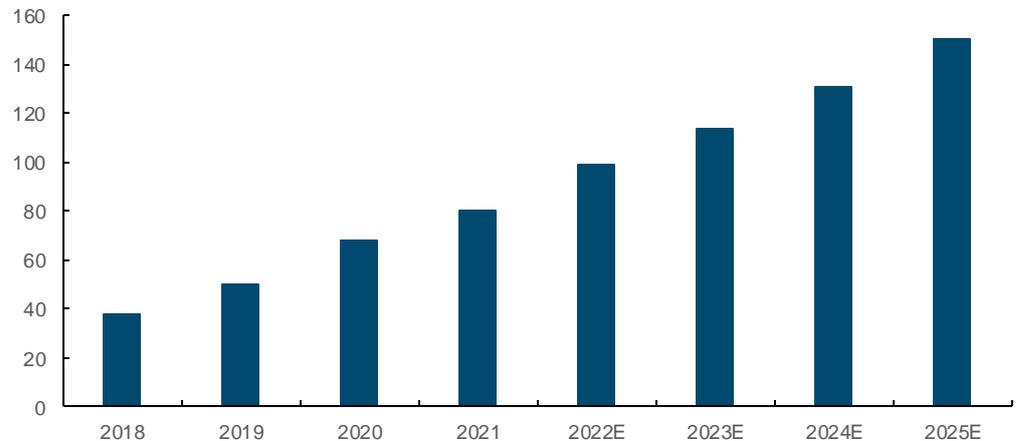
对比指标	2D	3D
产品形态	模块化视觉设备 (体型大)	嵌入式视觉设备 (高度集成)
应用场景	一般固定	复杂多变
扫描精度	工业产线范围内	毫米级甚至更高
维度	平面维度	立体维度
技术要求	较低	技术壁垒较高
下游市场	识别、检测、测量	刷脸支付、FaceID、智能机器人

来源：奥比中光官网，国金证券研究所

来源：奥比中光官网，国金证券研究所

全球 3D 视觉传感器市场空间超 150 亿美元，机器人有望进一步打开行业天花板。根据 Yole 数据，2019 年全球 3D 视觉感知市场规模为 50 亿美元，且随着机器人、汽车自动驾驶等下游需求扩张，市场规模将快速发展，预计在 2025 年达到 150 亿美元，2019-2025 年复合增长率约为 20%，随着人形机器人产业进展持续落地，中长期 3D 传感器的市场需求有望被进一步打开。

图表6：2025 年全球 3D 视觉感知市场规模将达 150 亿美元



来源：Yole，国金证券研究所

### 2.2 机器人 3D 视觉方案较多，奥比中光是国内 3D 视觉头部厂商

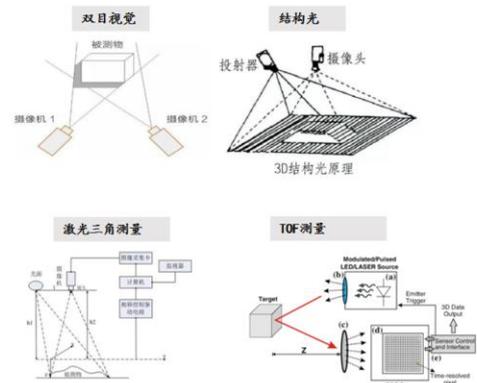
根据奥比中光官网，目前主流的 3D 视觉的方案包括这四种：单目结构光、TOF、双目结构光、激光三角测量等。



图表7: 主流机器视觉传感方式

技术路线	最佳测量距离	分辨率	精度	用途	优缺点
双目结构光	近距离	高	近距离: 高 中远距离: 低	识别、避障、交互、测量	分辨率高, 响应速度慢、成本高
TOF	近距离	中低	近距离: 低 远距离: 高	识别、避障、交互、测量	具有响应快、软件简单、识别距离远, 分辨率低
双目视觉	中近距离	高	低	识别、避障、交互、测量	灵活、成本低; 但受光照影响大
激光三角测量	中远距离	低	近距离: 低 远距离: 高	导航、定位	精准、快速、成本低; 但分辨率低

图表8: 主流传感器的感知方式

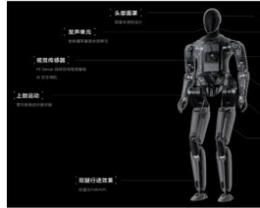


来源: 奥比中光官网, 国金证券研究所

来源: 中天智能, 国金证券研究所

目前主流机器人厂商的视觉方案各不相同。其中波士顿动力 Atlas 选择的是 TOF 深度相机方案, 特斯拉 Optimus 选择多目摄像头方案, 小米 CyberOne 采用深度视觉模组, 优必选 WalkersX 采用多目视觉传感器。

图表9: 主流人形机器人厂商视觉传感方案

TOF深度相机	Autopilot多目摄像头	Mi-Sense深度视觉模组	Coarse-to-fine多目视觉传感器
波士顿动力Atlas	特斯拉OPTIMUS	小米CyberOne	优必选WALKER X
			

来源: 奥比中光官网, 波士顿动力, TeslaAIDAY, 优必选, 小米官网, 国金证券研究所

3D 视觉传感器的性能由芯片、算法、传感器模组影响。从硬件端来看, 壁垒在于感光芯片、多传感器融合模组设计以及生产中标定、对齐等工艺把控。从软件端来看, 3D 视觉传感器对于算法研发、光学系统等有较高要求。

- 从性能表现来看, 壁垒在于精度、视角、测量范围、分辨率:
- 深度分辨率: 代表每一帧图像深度数据点数, 分辨率越高细节越优;
- 深度帧率: 帧率越高, 动态场景支持越好。
- 视场角/测量范围: 视场角/测量范围越大覆盖场景范围越大。
- 精度: 体现 3D 测量数据值与真实值之间的差异。
- 功耗: 同性能下, 功耗越低适配性越好。

从性能指标来看, 国内头部厂商奥比中光在部分指标(如: 分辨率、精度和功耗等)已经对标、甚至超过海外竞争对手, 有望引领国产厂商实现替代。



图表10: 主流厂商短距离 3D 视觉传感器性能对比

技术指标	公司				
	英特尔	瑞芯微	华捷艾米	奥比中光	
型号	D435	RMSL201-1301	A100S+mini	AstraE	Astra—MiniS
深度分辨率、深度帧率	1280x720@30fps		640×480@30fps	1280×800@30fps	1280x1024@7fps
视场角(H,V)	85.2, 58.46	0, 68.2	60, 47	67.9, 45.3	60, 49.5
测量范围	0.1~10m		0.28~1m	0.25~1.5m	0.35~1m
精度	±20mm@2m		±5mm@1m	±5mm@1m	±1mm@1m
功耗	<4.5w	<2.5w	3.2~4w	<2.2w	<2.4w

图表11: 主流厂商长距离 3D 视觉传感器性能对比

技术指标	公司				
	微软	英特尔	英特尔	华捷艾米	奥比中光
型号	Kinect1.0	R200	D435	A100M	AstraPro
深度分辨率、深度帧率	640×480@30fps	640×480@30fps	1280x720@30fps	640×480@30fps	1280x1024@7fps
视场角(H,V)	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

来源: 奥比中光招股书, 国金证券研究所

来源: 奥比中光招股书, 国金证券研究所

### 2.3 海外头部厂商地位领先, 国产逐渐打开市场

海外头部厂商先发优势明显, 国内厂商多技术布局、通过芯片自研逐渐打开市场。海外头部 3D 视觉传感器厂商通过芯片自制、自身产品依托, 业务规模较大, 国内代表公司奥比中光等通过自研芯片, 实现 3D 视觉传感器部分技术指标逐渐接近海外龙头厂商, 未来有望实现国产替代。

图表12: 主流视觉传感器厂商梳理

公司	主要技术	市场地位 (3D视觉领域)	核心竞争力
苹果	结构光dToF	全球最大的内置3D视觉传感器的移动产品制造商, 在消费电子领域基于3D视觉感知技术的布局一直处于领先地位	①芯片自主性: 一款以上带结构光深度引擎加速的芯片, 与STMicro合作结构光感光芯片, 与索尼合作dToF感光芯片 ②关键元器件自主性: 自主设计且有高质量的供应商、代工厂资源 ③量产能力: 高于百万级 ④其他: 有手机、平板等终端产品线做依托
微软	结构光iToF	3D视觉传感器以及配套的算法服务知名度高	①芯片自主性: 自主研发的iToF芯片 ②关键元器件自主性: 自主设计加采购(微软已经宣布和奥比中光合作设计制造下一代Kinect3D视觉传感器) ③量产能力: 高于百万级(代工) ④其他: 有算法(如骨架等)平台、云计算平台(Azure云)、操作系统(Windows系列)以及游戏机(Xbox)等作为依托
英特尔	结构光双目Lidar	目前世界上规模最大的消费级双目3D视觉传感器制造商	①芯片自主性: 双目3D深度引擎芯片自主, 芯片的设计及制造是英特尔的领先优势 ②关键元器件自主性: 自主设计加采购 ③量产能力: 百万级
华捷艾米	结构光	自研结构光3D视觉传感器, 有一定的量产能力。	芯片自主性: 深度引擎芯片自主设计
奥比中光	结构光双目iToF/dToF Lidar	在3D传感器领域持续出货到手机、人脸、机器人、三维扫描等多个潜力领域, 市场规模稳步扩大, 在客户中的认可程度也逐步提高	①芯片自主性: 结构光、双目深度引擎芯片自主设计, iToF感光芯片自主设计, dToF、结构光感光芯片在研; ②关键元器件自主性: 自主设计加采购; ③量产能力: 百万级; ④其他: 全球化技术团队+本土化产业链配套+本土化庞大市场规模(消费电子、移动支付等), 形成了对国际巨头差异化及本土化优势, 对国内企业的先发技术储备及应用优势

来源: 奥比中光招股书, 国金证券研究所

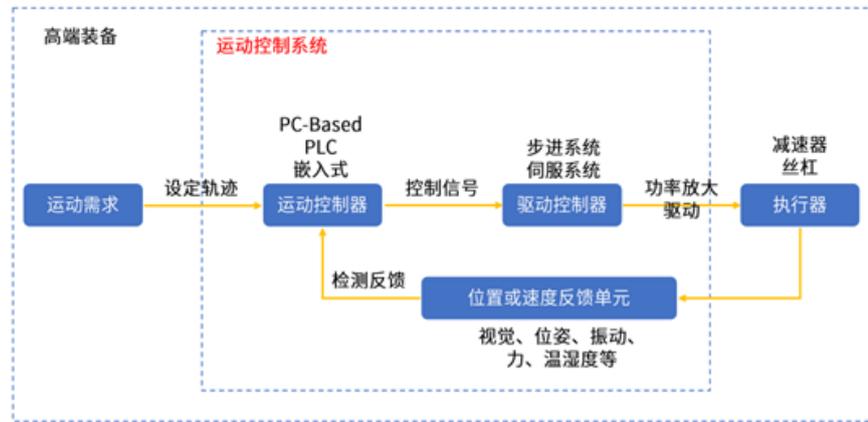
## 三、力觉: 高壁垒、高价值, 机器人精确、灵活操作的核心

### 3.1 力控在人形机器人担任什么角色?

力控能够感知力量并具有实时控制能力, 实现高度灵活和精确的操作。传统工业机器人(如生产机械臂)通过简单的位置控制实现机器人动作, 如机器人沿着事先规划好的轨迹在封闭、确认的空间中运动, 或可配合简单的视觉系统反馈, 使得位置控制的机器人具备基础适应外界可变环境的能力, 但位置控制无法完全适应需要末端执行器力控制的场景。



图表13: 运动控制系统包括控制器、驱动、执行器、运动反馈单元



来源:《运动控制系统(第2版)》,固高科技招股说明书,国金证券研究所

力控的引入能够让机器人实现精准的柔顺控制。力觉的引入能够让机器人作业时实现对于外界信息变化的感知。以坤维科技的六维力矩传感器应用场景为例,能够根据实际的环境调整力的大小,实现高精度操作,如恒力抛光、轨迹贴合等。

图表14: 力控是实现曲面打磨等高精操作的重要技术



来源:坤维科技官网,国金证券研究所

图表15: 机械化工作和仿人化控制的差别

对照维度	机械化方式	仿人化方式
实现形式	高度视觉、精准轨迹	视觉概况,手
关键技术	位置控制、位置规划、机器视觉	复杂力觉、力
应用特点	固定环境、针对性优化	开放环境、适
任务类型	非接触、简单接触	复杂接触、持
典型任务	焊接、喷涂、搬运、分拣	装配、抛光、

来源:非夕科技高云帆,国金证券研究所

### 3.2 人形机器人的不同关节需要哪类力矩传感器?

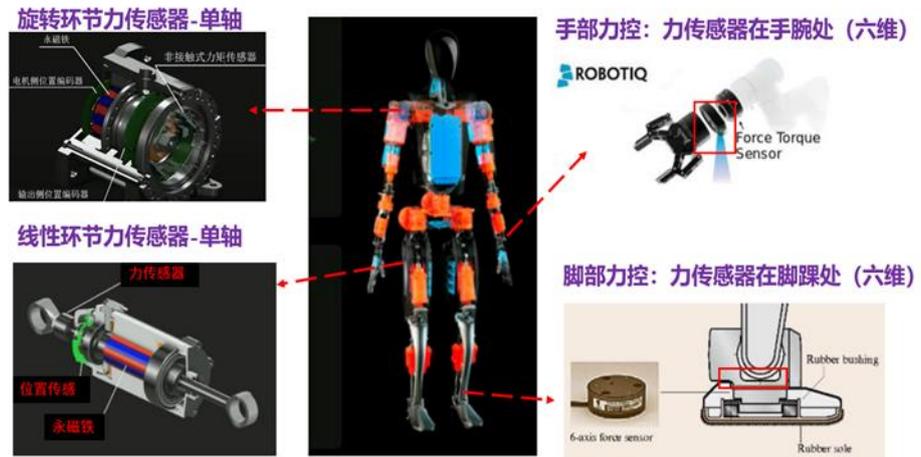
从人形机器人的工作原理来看,我们判断未来人形机器人的手腕、脚踝环节需六维力矩传感器、其他关节可以适用关节扭矩传感器。

1) 末端执行机构(手部、脚部)---六维力矩传感器:由于人形机器人末端执行机构主要为手部和脚部,执行的过程中力臂在几十到几百毫米之间,力臂较大且属于随机变化;而对于这两类环节的力也要求实现精确处理,因此这两类关节所受的力并非简单的一维、三维力,我们判断这个关节需要适用六维力矩传感器。

2) 其他关节---关节扭矩传感器:特斯拉人形机器人旋转执行机构类似协作机器人关节,而线性执行机构也通过滚珠丝杠完成直线运动,整体对于力的感知相对简单,我们预计其他关节需单轴力矩传感器。



图表16: 人型机器人力矩传感器应用场景

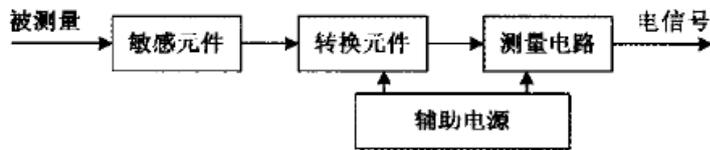


来源:《Force-Torque Sensing in Robotics》, Tesla AI Day, 国金证券研究所

从检测原理来看,电阻应变式传感器综合性能更优。

电阻应变式传感器原理:电阻应变式多维力/力矩传感器一般选用金属丝或应变片作为敏感元件。在外力的作用下,通过改变金属丝的形状实现其阻值的变化,从而将力/力矩转换为电量输出。该类传感器是目前国内外应用最多、技术最成熟的一种多维力/力矩传感器,在人型机器人及其他领域广泛应用。

图表17: 常见无耦合型传感器结构框图



来源:《面向机器人的多维力/力矩传感器综述》, 国金证券研究所

从检测方法来看,电阻应变式、电容式两类检测模式优势明显。力传感器可分为电阻式、电容式、电感式,光电式等。电阻应变式、电容式两类检测模式优势明显,有望在人形机器人中得到应用。

图表18: 力传感器不同检测方法优缺点对比

检测方法	方法描述	优点	缺点
电磁式	基于霍尔效应在力/力矩作用下产生与之相应的磁通量的变化	<ul style="list-style-type: none"> <li>动态测量范围大</li> <li>功耗小</li> <li>系统简单可靠</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>非线性误差较大</li> <li>互换性较差</li> <li>分辨率不高</li> </ul>
光电式	基于光电效应在力/力矩作用下产生与之相应的光学量的变化	<ul style="list-style-type: none"> <li>可靠性高</li> <li>测量范围广</li> <li>动态响应好</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>价格昂贵</li> <li>对测试环境要求高</li> </ul>
电感式	在力/力矩作用下产生与之相应的电感量的变化	<ul style="list-style-type: none"> <li>高灵敏度和高分辨率</li> <li>线性度好</li> <li>重复性高</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>不适用于动态测量</li> <li>可靠性不高</li> </ul>
电阻应变式	在力/力矩作用下,应变片形状会发生变化,电阻会随着应变片的形变而增大/减小,进而检测力的大小	<ul style="list-style-type: none"> <li>精度高、技术成熟</li> <li>测量范围广、成本低</li> <li>频响特性好</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>存在非线性误差</li> <li>信号输出微弱</li> </ul>
电容式	可变电容压力传感器由两个电容板组成,压力的变化会导致两个之间间隙变窄/变宽	<ul style="list-style-type: none"> <li>高灵敏度和高分辨率</li> <li>频率范围宽,结构简单</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>调理电路复杂</li> <li>寄生电容影响大</li> </ul>

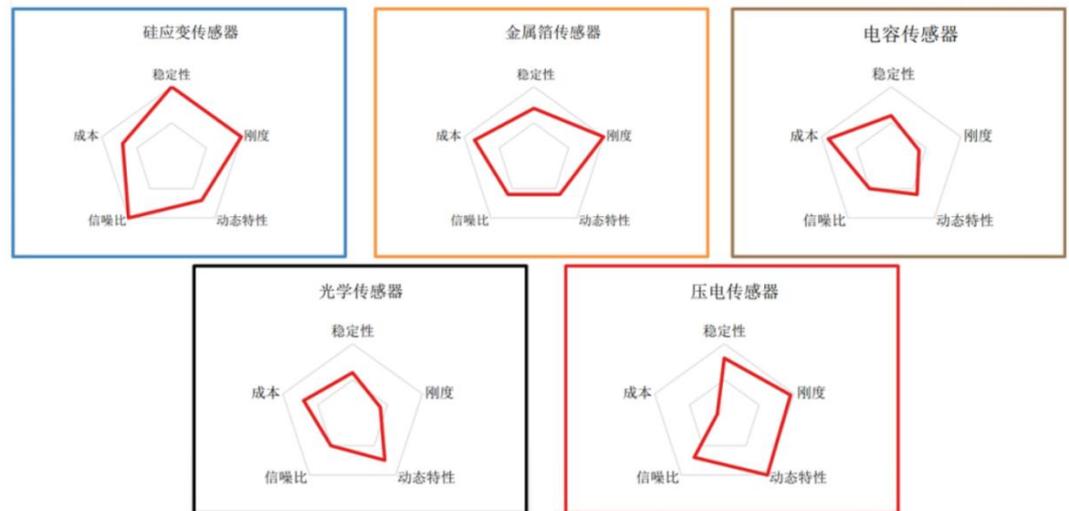


宽，从而改变电容，进而识别力的变化 • 环境适用性强

来源：《机器人多维力传感器》，国金证券研究所

**硅/金属箔电阻应变传感器性能更优秀。**从不同类型的力矩传感器在稳定性、刚度、动态特性、成本与信噪比五个维度的比较后，硅/金属箔电阻应变式传感器在稳定性、刚度、信噪比等多个方面具有优势，有望在人形机器人中得到应用。

**图表19：硅/箔电阻应变式传感器具有更强的综合性能**



来源：leaderobot，国金证券研究所

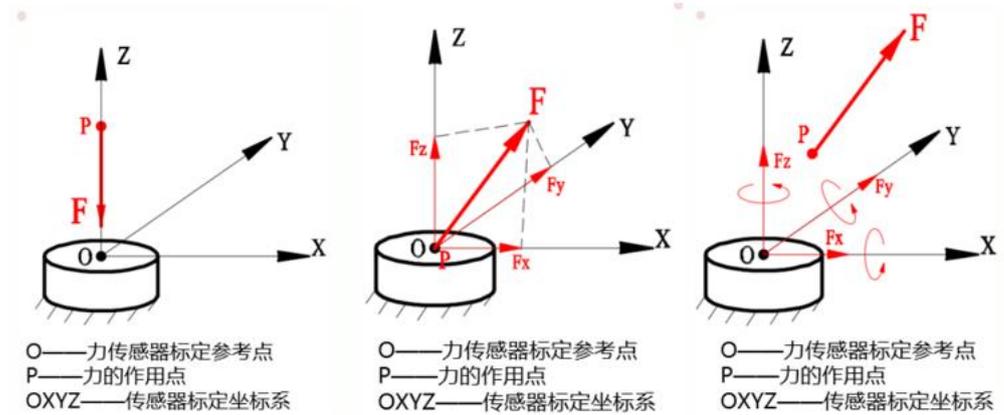
从感知维度来看，力传感器主要感知一维、三维、六维力

从力传感器的感知维度来看，力矩传感器可以分为一维到六维，测量维度的数量越多，产品难度越大、档次越高；从主流的传感器的测量维度来看，一、三、六维力矩为常见产品的，二、五维力矩传感器相对较少：

- 一维力传感器：标定坐标轴为OZ轴，如果被测量力F的方向能完全与OZ轴重合，那么此时用一维力传感器就能完成测量任务；比如称重传感器，只能测量垂直于地面的力，就属于一维力矩传感器。
- 三维力传感器：力F的作用点P始终与传感器的标定参考点O保持重合，力F的方向在三维空间中随机变化，这种情况下用三维力传感就能完成测量任务，它可以同时测量Fx、Fy、Fz这三个F的分力。
- 六维力传感器：空间中任意方向的力F，其作用点P不与传感器标定参考点重合且随机变化，这种情况下就需要选用六维力传感器来完成测量任务，同时测量Fx、Fy、Fz、Mx、My、Mz六个分量。六维力传感器内部的算法，可以实现解耦各个方向的力和力矩的干扰，使得测量的力矩更为准确；这类传感器更适用于参考点的距离较远，且随机变化情景，测量精度要求较高。



图表20：一维、三维、六维传感器作用示意图



来源：坤维科技公众号，国金证券研究所

### 3.3 如何看待力矩传感器的壁垒？

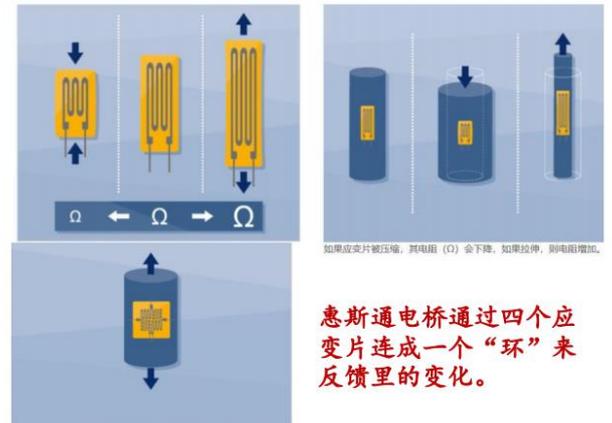
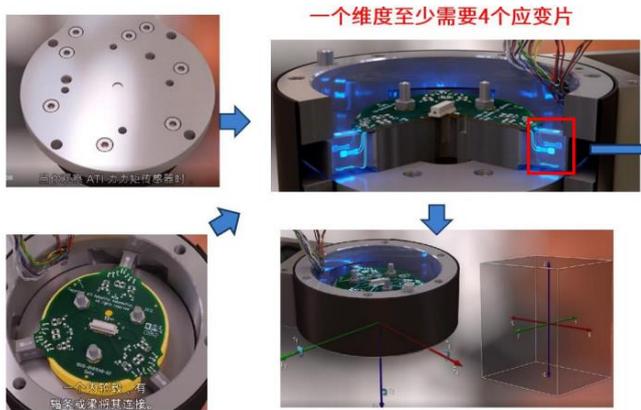
多维力矩传感器壁垒 1：应变片质量决定六维力矩传感器性能。

应变式传感器感应力的原理为电阻应变式，需要通过应变片的形变来感受外力的变化。其原理是：应变片作为电导体附着在弹性体上，应变片牢固的黏贴在弹性体上，随着弹性体的形变，应变片长度变化会导致电阻发生变化，惠斯通电桥通过四个应变片形成的电环输出信号来反馈形变的信息，进而计算力的大小。

从全球龙头六维力矩传感器公司 ATI 的产品内部构造来看，六维力矩传感器的内部为内轮毂，通过梁与外壳来连接，每个维度具有至少 4 个应变片，考虑到抗温漂等性能需求，单个六维力矩传感器的上可能需要 30-40 个应变片。

图表21：ATI 六轴力矩传感器的内部结构

图表22：应变片需要安装在弹性体上来感受力的变化



来源：ATI, MDPI, 国金证券研究所

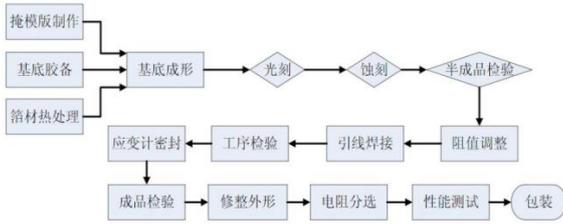
来源：HBM, 国金证券研究所

应变片的生产工艺复杂：需要基地成形、光刻、刻蚀等多个环节，不同环节的工艺差距会导致最终导致产品的性能受到影响。

应变片性能：对于多维力矩传感器而言，寿命、应变系数、蠕变影响都会影响最终的测量结果。



图表23: 应变片的生产工艺



图表24: 应变片的性能对比

	应变极限	疲劳寿命 (次)	使用温度范围	应变系数
HBM	2.50%	10 <sup>7</sup>	-200° -300°	2.2
中航电测	2%	10 <sup>7</sup>	-50° -150°	2

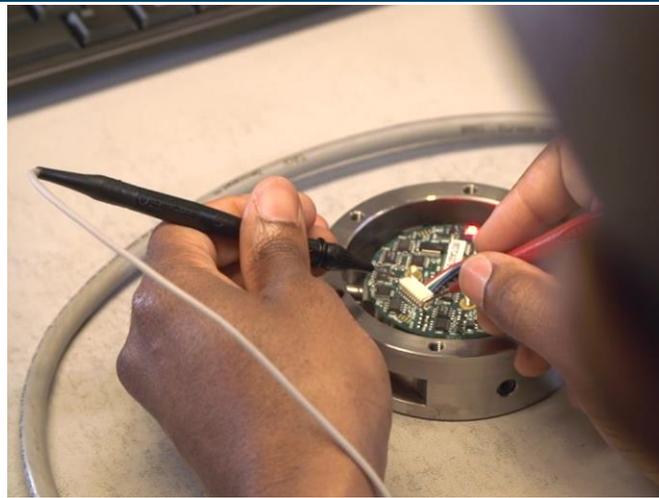
来源: 中航电测招股说明书, 国金证券研究所

来源: HBM, 国金证券研究所

### 多维力矩传感器壁垒 2: 应变片生产环节的“手艺”要求高

由于目前六维力矩传感器市场规模较小, 核心关节应变片并未进入自动化生产阶段; 而应变片的焊接环节, 对于“手艺人”的要求较高, 生产过程中约有 10-20% 的六维力矩传感器因为焊点误差大导致最终产品精度受到影响。

图表25: 应变片贴合弹性体工艺要求高



来源: ATI 官网, 国金证券研究所

### 壁垒 3: 六维力传感器高精度的实现对设备&工艺提出高要求。

标定&检测设备:

- 标定: 建立传感器原始信号和受力之间的映射关系——目的是获取固件参数。
- 检测: 统计、对比理论真值和实际测量结果的差异——目的是获得传感器的精度和准确度。

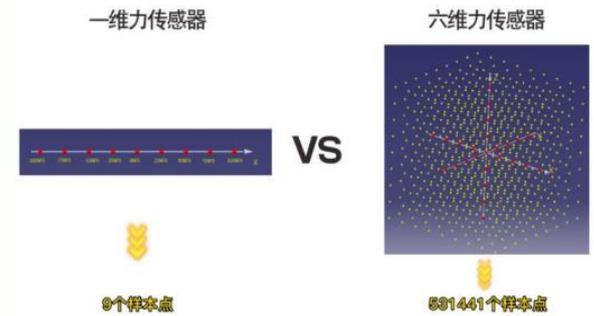
六维力矩传感器研发难度大, 设计空间光学定位、载荷位移补偿、机电一体化等多项技术, 标定设备设计 100 多种 know-how, 目前多数六维力矩传感器厂商的设备为自研, 标定设备属于目前行业的进入又一重要壁垒。此外, 标定设备的算法理解和历史数据积累均为核心要义。



图表26: 海外各个国家六维力矩传感器标定设备



图表27: 六维力矩传感器标定样本点数量超过 50 万个



来源: 坤维科技公众号, 国金证券研究所

来源: 坤维科技公众号, 国金证券研究所

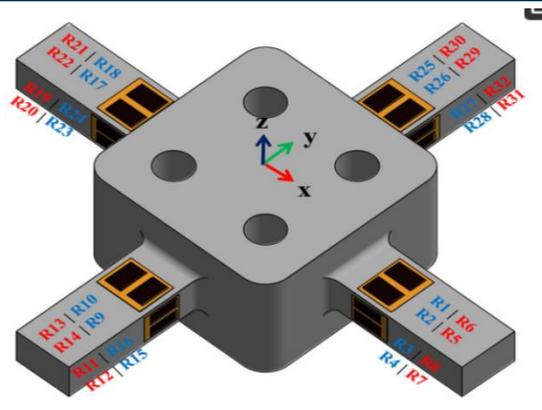
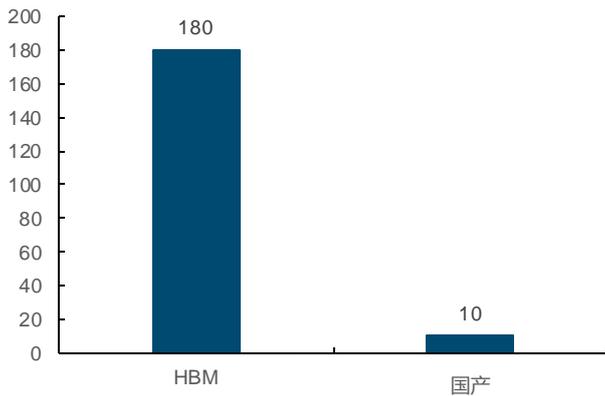
### 3.4 价格&成本: 高端力矩传感器价格高, 成本来自于人工成本+材料成本

成本端: 我们判断六维力矩传感器的成本核心在于应变片、加工成本。

- 应变片: 根据前文分析, 单个六维力矩传感器所需要应变片的数量至少为 24 个, 考虑到抗温漂、蠕变等需求, 一般单个六维力矩传感器的应变片的数量约为 30-40 个; 根据淘宝价格, 海外应变片头部厂商 HBM 单个应变片的价格在 100-200 元, 因此单个六维力矩传感器应变片的成本在 5000-6000 元。

图表28: 海外龙头厂商单个应变片的价格高达 180 元/个

图表29: 某六维力矩传感器上需要 32 个应变片



来源: HBM, 华兰海电测, 国金证券研究所

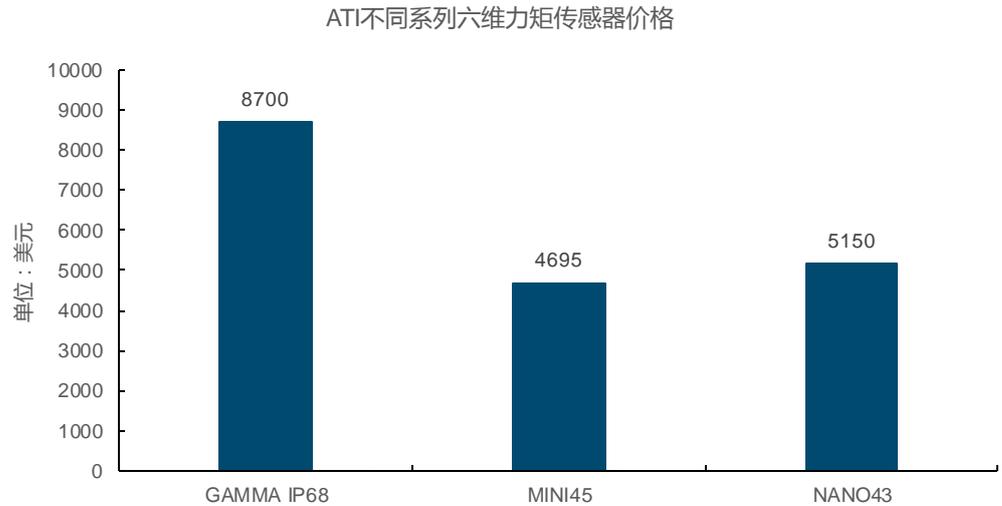
来源: MDPI, 国金证券研究所注: 红色、蓝色为应变片安装的位置。

- 加工成本: 六维力矩传感器成品对于精度、准度要求极高, 因此人工加工技术壁垒较高, 短期无法实现自动化生产, 我们预计六维力矩传感器人工成本超过 10%。

价格端: 目前海外六维力矩传感器龙头 ATI 产品价格 4000-8000 美金之间。



图表30: ATI 不同系列六维力矩传感器的价格

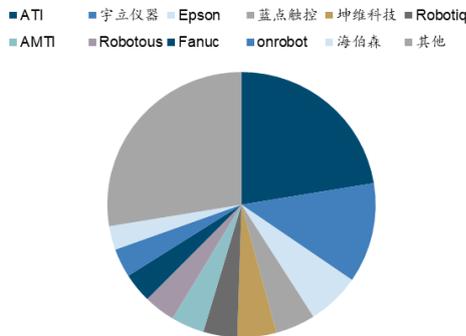


来源: ATI, 国金证券研究所

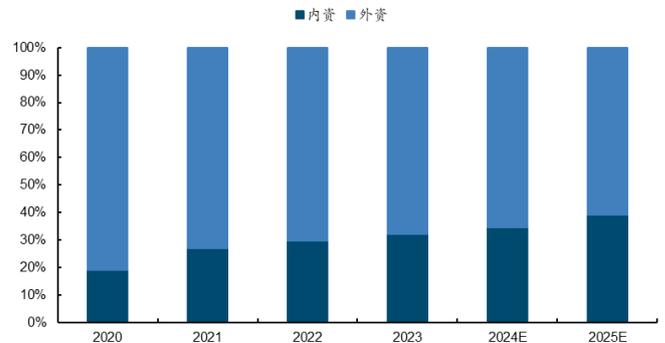
### 3.5 国内厂商仍处前期发展阶段, 人形机器人有望打开力矩传感器增量空间

中国六维力矩传感器行业集中度高, 国产替代空间大。2023 年国内六维力矩传感器行业 CR10 达 70%, 集中度较高, 其中七成为外资品牌, 国产品牌中宇立仪器居第二, 市占率 12.2%。2020-2023 年国产六维力矩传感器厂商市场份额不断上升, 从 2020 年的 19.1% 上升至 2023 年的 32.1%, 预计 2024/2025 年继续提高至 34.7%/39.1%, 国产替代空间广阔。

图表31: 中国六维力矩传感器市场集中度高



图表32: 六维力矩传感器国产占比逐渐上升



来源: 中商情报网, 国金证券研究所

来源: 中商情报网, 国金证券研究所

全球力矩传感器的龙头为美国 ATI, 国内目前力矩传感器技术领先的企业主要为创业公司 (南宁宇立仪器、常州瑞尔特), 上市公司主要为柯力传感、中航电测、东华测试等。



图表33: 力矩传感器代表厂商梳理

	公司	是否上市	力矩传感器进展
Tier1	ATI	否	ATI 致力于机器人末端执行器的研发制造有三十余年, 已生产制造了世界上高性能的六维力和力矩传感器, 目前已在机器人、航空航天、生物医学、科研等领域得到了广泛应用, 特别是在机器人领域, 在 <b>为机器人提供触觉感知</b> 方面起了关键作用。
	宇立仪器	否	宇立仪器是集研发、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。多轴力传感器包括六维力传感器、三维力传感器、一维力传感器和关节扭矩传感器。
Tier2	常州瑞尔特	否	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。公司所生产的三维、六维以及多维力测量传感器: 精度高、抗偏载能力强、容易安装、串扰小、耐冲击力、稳定性好、体积小、响应快、过载能力强, 已用于军工、航空航天、核电等级的测量, 机器人手臂精密控制、曲面研磨抛光、加工中心精雕加工、医疗精密设备测试。
	坤维科技	否	2020年12月实现了KWR46/96系列六维力传感器的量产; 2021年成功开发出基于MEMS器件的低成本高可靠性六维传感器制造技术; 公司六维力传感器产品矩阵完善, 已经形成了从直径36毫米到直径200毫米的传感器, 可以覆盖各类智能机器人的全部应用场景。
Tier3	柯力传感	是	截至24H1, 公司六维力/力矩传感器已完成人形机器人手腕、脚腕, 工业臂、协作臂末端的产品系列开发, 掌握了结构解耦、算法解耦、高速采样通讯等技术要点, 并已给多家国内协作机器人、人形机器人客户送样。
	中航电测	是	公司面向国产大飞机、民用直升机、公务机等, 形成压力、接近、力矩传感器等传感器配套, 力争实现通航领域吊挂投放系统的专业配套
	东华测试	是	公司已投入六轴力传感器研发, 支持RS485、CAN和工业以太网等通信方式, 可应用于机器人、科学研究、自动化检测等领域。目前处于内部研发状态, 拟达到目标参数: 串扰: < 2%FS, 非线性: <0.5%FS, 迟滞: <0.5%FS

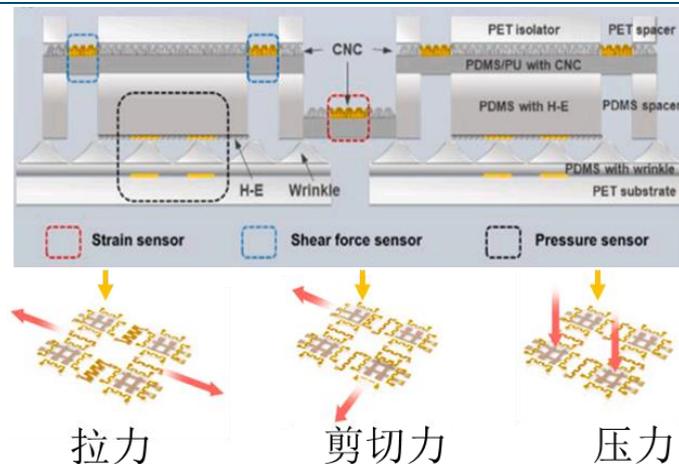
来源: ATI 工业自动化公众号, 宇立仪器官网, 高工机器人公众号, 坤维科技官网, 柯力传感公告, 中航电测公告, 东华测试公告, 国金证券研究所

## 四、触觉：机器人之“肤”，实现精细交互

### 4.1 电子皮肤：实现机器人精细操作的关键技术，视觉+触觉为目前技术前沿

电子皮肤是新型的仿生柔性触觉传感系统, 通过柔性传感器进行信号感知转换。从表面的接触方向来看, 电子皮肤能够感知压力、剪切力、接触力等多多个类型的力, 能够助力机器人在手部实现更加精细的操作。

图表34: 电子皮肤能感知压力、剪切力、接触力等多种类型力



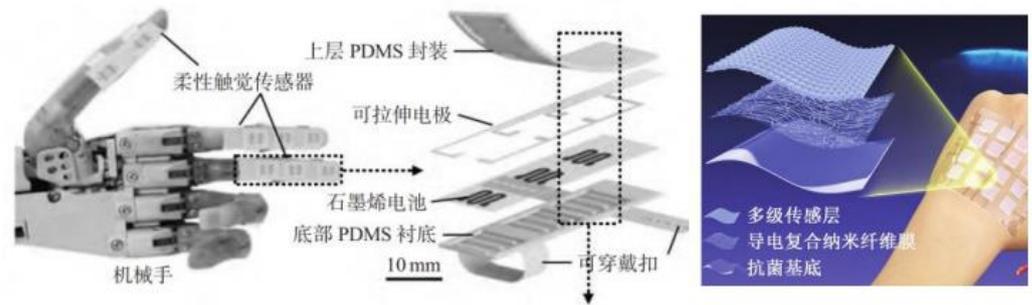
来源: 《Abioinspiredthree-dimensionalintegratede-skinformultiplemechanicalstimulirecognition》, 国金证券研究所

电子皮肤主要分为基底层、导电层、传感层。



- **基底层**：基底层是电子皮肤的最内层，通常由柔性材料制成，以模拟人体皮肤的弹性和柔韧性。又称为支撑层，起到支撑作用。
- **导电层**：导电层在电子皮肤中起到传导电信号的作用，通常包含导电材料，如导电石墨或特定的导电聚合物，用于检测并传输由外界刺激引起的电信号变化。导电层的设计和材料选择对于电子皮肤的灵敏度和响应速度至关重要。
- **传感层**：传感层位于电子皮肤的中间层，包含了大部分的传感元件，负责精确识别压力和摩擦力并转化为电信号。传感层可以实现对外界刺激的精细感知，是电子皮肤的核心材料。

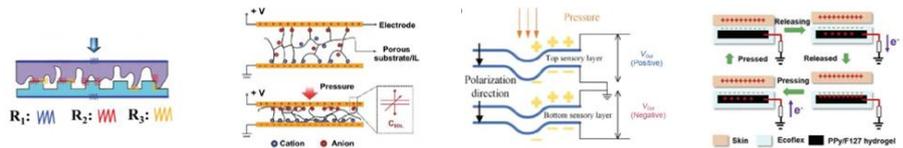
图表35：电子皮肤主要分为基底层、导电层、传感层



来源：《纤维基自供能电子皮肤的构建及其应用性能研究进展》，国金证券研究所

电子皮肤主要内部的柔性传感器是触觉传感器的一个子集。从检测方法来看，柔性触觉传感器传统方案主要包括压阻式、电容式、压电式、摩擦式四种类型，其中压阻式触觉传感器具有成本低、稳定性好等多个优点，是目前的主流方案。

图表36：传统的主要触觉传感器类型优缺点介绍



压阻式	电容式	压电式	摩擦式
<p><b>原理</b></p> <p>材料的压阻效应，即将机械信号转换成电信号，具体机制包括材料的电阻率变化、接触电阻的变化以及复合材料中的量子隧穿效应等。</p>	<p>电容效应，将力学信号转化为电容信号，通过测量电容值的变化来获取物体与电子皮肤之间接触状态的信息</p>	<p>压电效应，压电材料由于形变而产生电极化</p>	<p>柔性摩擦纳米发电机，通过摩擦效应和静电感应耦合作用将外部机械能转换为电能</p>
<p><b>优点</b></p> <p>成本较低、制造结构简单、稳定程度高、灵敏度高、响应快</p>	<p>灵敏度高，能够测量微小接触力</p>	<p>高灵敏性、响应快</p>	<p>结构简单，制备简便</p>
<p><b>缺点</b></p> <p>电阻变化可能受到环境因素的影响</p>	<p>对噪声敏感，介电常数易受到环境温度影响</p>	<p>压电材料常常会受到温度和湿度等环境因素的影响</p>	<p>受环境影响大，只能检测动态压力</p>

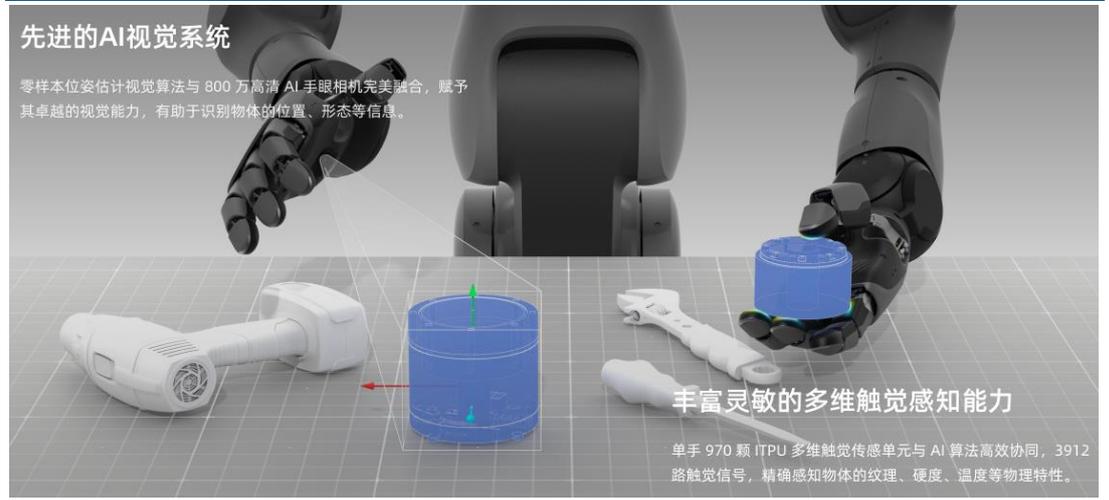
来源：《柔性触觉传感电子皮肤研究进展》，国金证券研究所

国内头部厂商帕西尼提出了视觉+触觉方案，在触觉的多项技术指标实现领先，有望成为未来的主流方案。



在去年的 2024WRC 大会上，帕西尼正式发布了、第二代多维触觉灵巧手 DexH13，及基于 IPTU 技术的多维度触觉传感器 PX-6AXGEN2。在帕西尼感知科技的 DexH13 双手上，搭载了近 2000 颗自研生产的高精度触觉传感器 PX-6AXGEN2；此外，该双手还集成了 DexH13 双手集成了有 800 万高清 AI 手眼相机，基于先进的零样本位姿估计视觉算法，能够识别和抓取物体六维位姿，适应多种复杂环境和任务。

图表37: 帕西尼的 Dex13 多维触觉灵巧手结合了视觉和触觉



来源：帕西尼官网，国金证券研究所

帕西尼的 IPTUGEN2 触觉传感器在多项技术指标领先、且成本低。根据帕西尼官网，IPTUGEN2 多维触觉传感器在灵敏度、抗干扰等多项指标表现优异，且通过全集成方案，产品成本相对较低。

图表38: 帕西尼 IPTUGEN2 触觉传感器在多项指标技术领先

	PaXini专业级机器人IPTU GEN2	光学触觉传感	压阻触觉传感	电容触觉传感
灵敏度	高	高	低	高
动态范围	高	低	低	中
响应速度	高	低	高	高
迟滞	低	高	高	低
尺寸	小	大、厚	小	小
抗干扰能力	软硬件优化，抗干扰能力强	中	强	弱
柔性抓取能力	高	高	低	低
多维力表征能力	六维力+量化的9种人类触觉参数	有一定切向力表征能力但较难直接定量测量	无	无
模组集成度	高集成度测、算、传一体	低集成度，需上位机提供图像处理算力	低集成度，需外置信号采集处理装置	低集成度，需上位机提供时序信号处理算力
成本	全集成，成本低	需高成本采集卡+视觉算力	需高成本采集卡	需高成本采集卡

来源：帕西尼官网，国金证券研究所

#### 4.2 产业进展：特斯拉 Optimus、帕西尼对于触觉持续提高要求

23 年 11 月特斯拉 Optimus 二代：23 年 12 月底特斯拉 Optimus 二代正式发布，手部关节全新升级，活动更加自然，手指部分搭载触觉传感器，似乎能更精准地抓握细小易碎物品，如抓鸡蛋等动作；且单只手具有 11 个自由度，助力实现精细操作。并且 Optimus 宣布明年能够用这双手完成穿针引线，预计对于手部触觉提出更高的要求，触觉对于手部精细化的要求持续提升。



图表39: 特斯拉 OptimusGen2 完成拿放鸡蛋动作



来源: 机器之心公众号, 国金证券研究所

国内触觉领域头部厂商帕西尼的新一代灵巧手 DexH13 能够实现抓、握、旋转、拿捏等多个复杂动作, 实现柔顺交互。此外, 从传感器的数量和灵敏度来看, 帕西尼新一代灵巧手具有 978 个触觉传感器, 对于手指重复定位精度达到 $\pm 0.05\text{mm}$ ; 助力实现更高精度的操作。

图表40: 帕西尼新一代灵巧手实现多角度柔顺操作

图表41: 帕西尼新一代灵巧手具有近千个触觉传感器



手指数量	4
触觉感知能力	搭载978个触觉传感器, 15种多维触觉感知能力
触觉信号路数	3912路
视觉能力	800万像素高清AI手眼相机
主动自由度	13
指尖力	14N
负载	5kg
手指重复定位精度	$\pm 0.05\text{mm}$

来源: 帕西尼官网, 国金证券研究所

来源: 帕西尼官网, 国金证券研究所

### 4.3 电子皮肤核心壁垒在于材料和算法

**壁垒 1: 敏感材料的制造难度大、生产成本低。**敏感材料的性能要求高, 同时满足高弹性、优良电学和力学性、耐久性的材料少之又少, 材料配方、制作工艺有赖于厂商在长期生产中的经验积累和规模效应, 能够形成更高的技术壁垒以及生产成本优势。

电子触觉皮肤传感器的性质主要取决于以下 3 类材料:

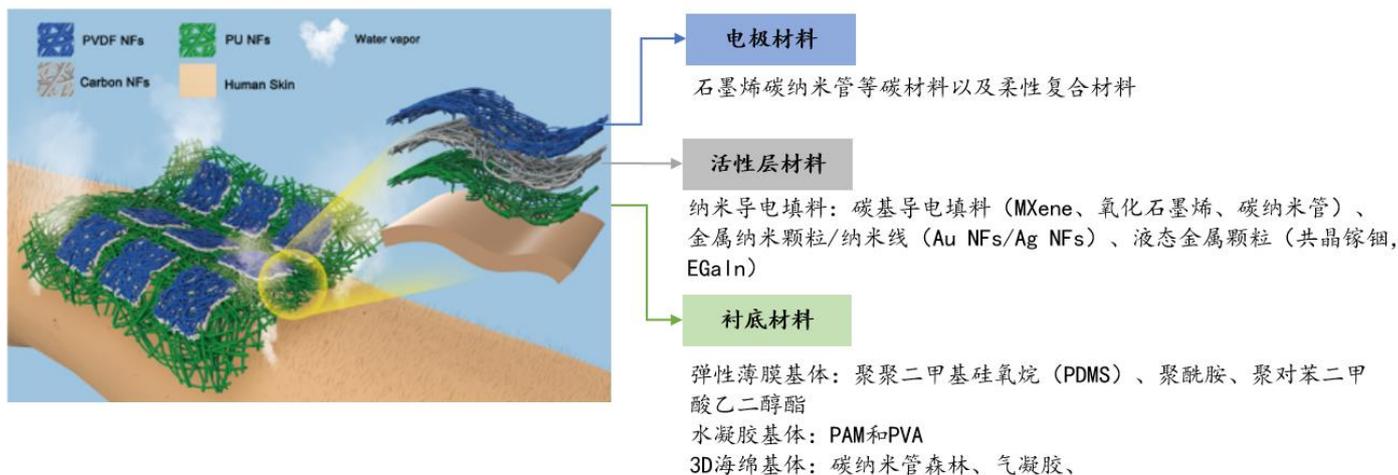
① 衬底材料: 决定柔性触觉传感器的弹性形变性能, 要求具有高柔韧性。目前多使用聚合物材料如 PDMS 聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET) 聚酰亚胺(PI) 聚乙烯(PE) 和 PU 等。

② 活性层材料: 决定柔性触觉传感器灵敏度, 目前多使用石墨烯、碳纳米管导电高分子、离子导体、金属纳米材料等。

③ 电极材料: 影响器件灵敏度和稳定性, 常选用具有优异导电性能和机械性能的石墨烯碳纳米管等碳材料以及柔性复合材料。



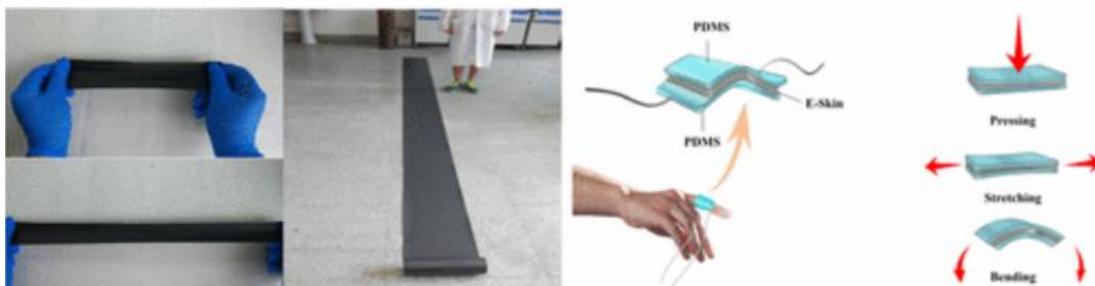
图表42: 触觉传感器主要材料



来源：《面向电子皮肤的智能材料构建策略》，东华大学纺织科技创新中心，国金证券研究所

高灵敏度、高柔性的电子皮肤材料制造工艺复杂、成本高和难以批量生产。目前，具备量产条件的“基于石墨纳米片/聚氨酯纳米复合材料的高柔性、高灵敏度、可穿戴的‘电子皮肤’”，厚度仅为40微米，接近一根头发丝粗细，生产技术上需要突破石墨纳米片的制备技术、石墨纳米片与高分子均匀分散技术、成膜技术三大难题，对生产商技术要求高。

图表43: 可量化生产的“基于石墨纳米片/聚氨酯纳米复合材料”的电子皮肤



来源：中国聚合物网，国金证券研究所

**壁垒 2：算法决定了输出结果**

算法用于满足传感器输出结果的精确度，决定传感器在实际应用时的效果。传感器使用过程中需要对传感器采集到的信号进行及时处理和可视化，主要有两种可视化方法：直观地显示颜色变化和通过无线通信技术在屏幕上显示，实现实时监测。

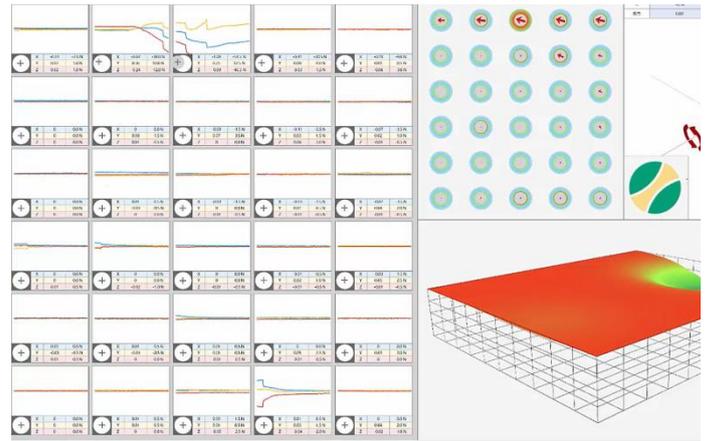
以国产厂商帕西尼为例，帕西尼率先发布了全球首款搭载 HAPTA 异构多核阵列软硬件架构的 ITPU 多维触觉处理单元，能够支持在复杂通用场景中的准确感知，并为用户提供易于使用且丰富的触觉信息，以实现毫秒级决策和高级感知。同时，研发多维触觉可视化软件系统，实现实时显示 3D 多维触觉数据、支持多种触觉传感器设备、支持 10 路多维信号实时渲染。



图表44: 帕西尼 ITPU 实现毫秒决策和高级感知



图表45: 帕西尼多维触觉可视化软件实现信号可视化



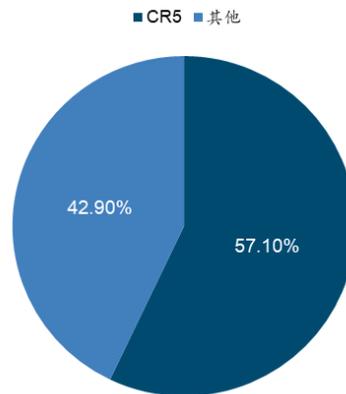
来源：帕西尼官网，国金证券研究所

来源：帕西尼官网，国金证券研究所

#### 4.4 触觉传感器厂商梳理

全球市场以外资品牌为主，行业集中度高。全球柔性触觉传感器市场主要以外资品牌为主，其中CR5为57.1%，头部厂商包括Novasentis、Tekscan、JapanDisplayInc. (JDI)、Baumer、Fraba。国内柔性传感器厂商以帕西尼科技、汉威科技、钛深科技、弘信电子等企业为代表，近年来迅速发展。

图表46: 2023 年全球柔性触觉传感器行业集中度高



来源：华经产业研究院，国金证券研究所

国内目前触觉传感器技术领先的企业主要为创业公司(钛深科技、柔宇科技、苏州慧闻)，上市公司主要为汉威科技旗下的苏州能斯达。



图表47: 触觉传感器代表厂商梳理

名称	概况	主要产品
国内厂商		
帕西尼	为业内首家实现多维度大阵列触觉传感器及机器人产品批量商业化公司。公司技术来源于日本早稻田大学菅野实验室，该实验室在机器人自动化和传感器领域拥有数十年丰富经验，发布了数款行业前沿的人形机器人、及灵桥手等产品	具有多维触觉人形机器人、多为触觉灵巧手、ITPU 多为触觉传感器等多个产品
苏州能斯达	具有稳定的纳米敏感材料体系；柔性压阻、柔性压电、柔性温湿度、柔性电容四大核心技术；一条年产 1000 万支柔性传感器的超净印刷线和组装线	柔性压力传感器、柔性压电传感器、柔性织物、柔性应变传感器、柔性温湿度传感器、柔性热敏传感器、柔性电容传感器
钛深科技	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	脉搏波测量、压力分布测量、柔性压力传感器、触觉传感器、压力阵列传感器、压力薄膜传感器、压力分布测量系统、压电式压力传感器
柔宇科技	成立于 2012 年，拥有自主研发的核心柔性电子技术，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	生产全柔性显示屏和全柔性传感器
苏州慧闻	成立于 2014 年，是国内少数能够提供人工嗅觉解决方案的智能传感器企业	柔性薄膜压力传感器、气体传感器
国外厂商		
Tekscan	成立于 1987 年，公司拥有薄型触觉传感器技术，专注于超薄、柔性压力传感器，具有极高的分辨率和超薄性，既可用作测试和测量工具，也可用作嵌入式传感组件	压力传感器 5051、压力传感器 3000、压力传感器 7202、压力传感器 6300
JapanDisplay	成立于 2002 年，从事中小型显示设备及相关产品的开发、生产和销售，通过结合静电容量式玻璃指纹传感技术和柔性显示屏技术，成功开发静电容量式柔性指纹传感器	透明传感器、柔性 OLED 面板
Canatu	成立于 2004 年，是 3D 可成型和可弯曲透明导电薄膜和触摸传感器的开发商和制造商	汽车 3D 触摸控制面板
Sensel	成立于 2013 年，开发了一种多点触控输入设备，该设备能感施加在各个点上的压力	压敏输入设备
Forciot	成立于 2015 年，可穿戴设备、汽车和物流行业的压力传感器组件供应商，传感器可以通过集成来监控力分布、负载平衡、运动等参数。适用于运动状态跟踪、物流和汽车跟踪，以优化负载平衡并防止机器组件颤动等。	基于物联网的压力传感器

来源：传感器专家网，CINNO，人形机器人场景应用联盟，国金证券研究所

## 五、编码器：反馈机器人的关节位置，精准控制的关键

### 5.1 编码器是测量位移、角度的高精度传感器，人形机器人多个环节需要编码器

编码器是测量位移、角度的高精度传感器。编码器是集光、机、电、算技术于一体的高精度位移传感器，可将机械运动转换为电信号输出。

编码器基于莫尔条纹与光电转换原理工作，当电动机旋转时，光栅盘与电动机以相同速度旋转，光栅盘与固定光栅发生相对位移，产生莫尔条纹，经发光二极管等电子元件组成的检测装置检测输出若干脉冲信号，通过计算每秒光电编码器输出脉冲的个数就能反映当前电动机的转速。



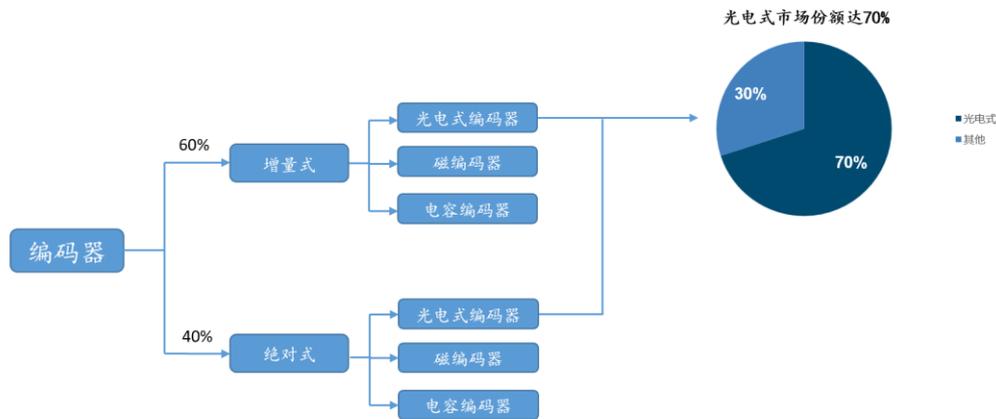
图表48: 编码器是测量位移、角度的高精度传感器



来源：禹衡光学官网，国金证券研究所

光电式编码器精度高、抗电磁干扰强，占据 70% 份额。1) 按照码盘的刻孔方式划分，可分为增量式和绝对式，其中增量式/绝对式分别占比 60%/40%；2) 按照工作原理分，编码器有光电式、磁、电容式三种，其中光电式是精度更高、不受电磁干扰，占据 70% 份额，是主流选择。

图表49: 光电式编码器精度高、抗电磁干扰强，占据 70% 份额



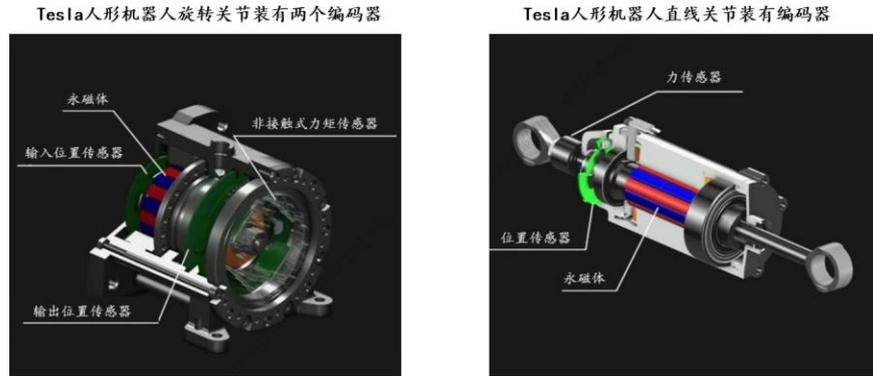
来源：旺财伺服与控制系统，尚普咨询，国金证券研究所

编码器分布在人形机器人的旋转关节、线性关节、手部关节。

- 旋转关节: 输出侧和电机侧各有一个编码器。输出侧编码器用于测量输出位置的变化，电机侧编码器用于计算得到输出轴的理论位置，与输出侧编码器的数据进行对比，得到位移、角速度的反馈，从而交付驱动器进行后续控制。
- 线性关节: 放置一个线性编码器，对线性位置进行测量。
- 手部关节: 放置一个线性编码器，对线性位置进行测量。



图表50: 编码器在人形机器人的关键关节与执行器中的应用解析



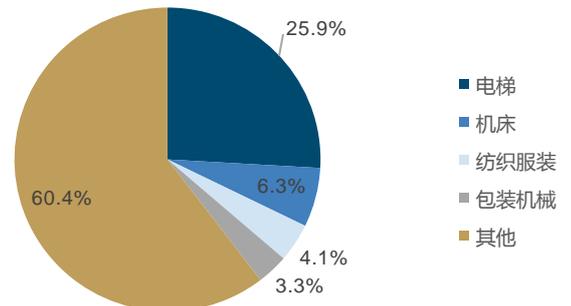
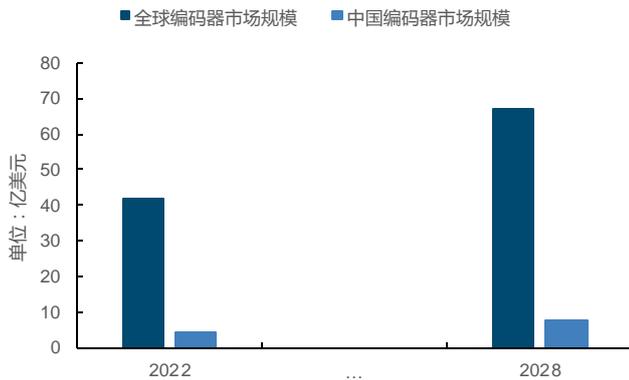
来源: 本末研究公众号, 国金证券研究所

5.2 编码器行业空间稳步增长, 产品壁垒高、海外厂商占据主流份额

预计 2028 年国内编码器市场空间为 7.4 亿美元。编码器主要应用于电梯产业、机床、电动机、食品和包装等领域, 预计 2028 年全球编码器市场达 67 亿美元, 国内编码器市场规模达 7.4 亿美元, 2022-2028CAGR 为 9.9%。

图表51: 编码器全球、中国市场规模稳定增长

图表52: 编码器下游以电梯为主, 占比达 25%



来源: 尚普咨询, 智研咨询, 国金证券研究所

来源: 尚普咨询, 智研咨询, 国金证券研究所

编码器的壁垒主要是由在于码盘精度、装配工艺、误差补偿技术。这些关键技术主要影响的编码器的核心性能分辨率、精度、重复性。

- 分辨率: 编码器能够检测到的最小运动度量, 一般由码盘精度、信号细分技术影响。
- 精度: 实际位置与编码器报告位置之间的差异, 一般由装配工艺精度、加工精度、误差补偿技术影响。
- 重复性: 在同一个实际位置取得的不同测量值之间的最大差异, 表现其抗温漂、信号等干扰能力, 由光栅材料热敏系数、信号质量影响。



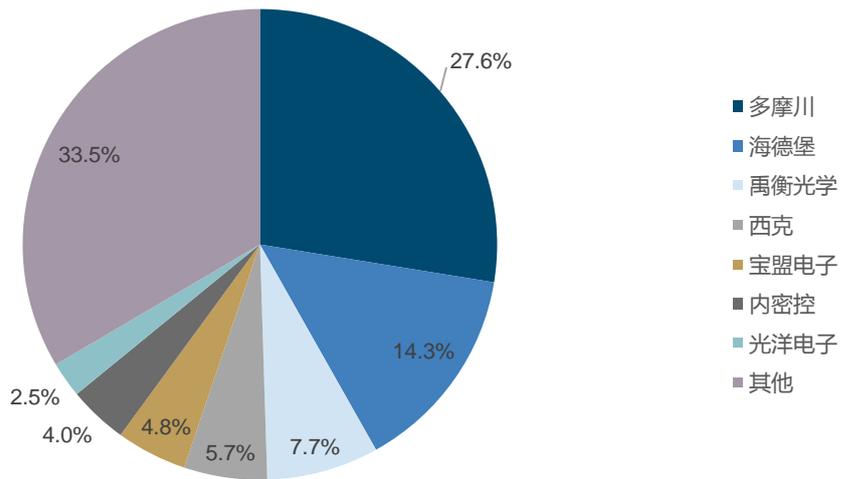
图表53: 光栅编码器技术壁垒



来源: 禹衡光学,《绝对式光栅传感器关键技术研究》, 国金证券研究所

编码器市场多数份额被海外巨头多摩川、海德堡占据, 国产替代道阻且长。

图表54: 2022年中国编码器市场超40%份额被多摩川、海德堡占据



来源: MIR, 各公司官网, 国金证券研究所

## 六、投资建议：重点关注奥比中光、柯力传感

根据前文分析, 我们对机器人传感器板块做出如下梳理, 重点看好视觉、力觉、触觉三个方向, 重点推荐奥比中光、柯力传感。

图表55: 人形机器人传感器全景图

感知维度	主要产品	主要应用场景	产品作用	主流厂商
力觉	六维力矩传感器、力觉传感器	人形机器人末端执行器(手部、脚部)	实现末端多个方向力控制	ATI、宇立仪器、坤维科技、柯力传感、东华测试
触觉	电子皮肤、触觉传感器	机器人的手部、其他部位	感知手部表面的力	汉威科技、帕西尼科技
视觉	摄像头、3D视觉传感器	机器人头部实现视觉感知	机器人进行视觉3D定位	苹果、奥比中光



速度、位置

编码器

机器人的各个执行器内部

对于机器人各个执行关节的速  
度、位置实现反馈

奥普光电

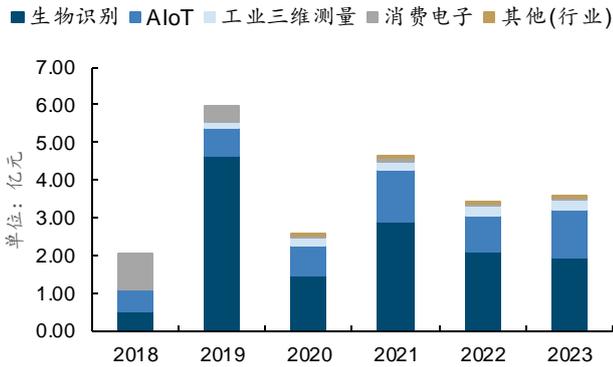
来源：国金证券研究所整理

### 6.1 奥比中光：卡位机器人 3D 视觉标的，下游多点开花

奥比中光是国内 3D 视觉传感器领域头部公司，亏损持续收窄。公司 3D 视觉传感器下游主要以生物识别、AIOT 等领域为主。公司今年以来持续发力多个下游，从归母净利润来看，24Q3 单季度亏损为 700w 元，亏损已经环比持续收窄，看好公司明年逐渐实现利润转正。

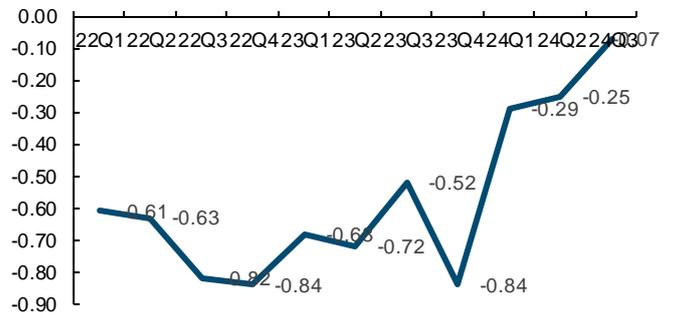
图表56：奥比中光收入结构以生物识别、AIOT 为主

图表57：奥比中光归母净利润亏损持续收窄



来源：wind，国金证券研究所

奥比中光单季度归母净利润 (亿元)



来源：wind，国金证券研究所

具有 3D 视觉传感器全栈式解决方案能力，长期研发投入夯实技术壁垒。根据公告，18-23 年奥比中光全年研发费用长期保持在 3 亿元附近，保持较高水平；根据官网，奥比中光掌握 3D 感知全栈技术能力，尤其在芯片设计高壁垒关节，奥比中光具有深度引擎芯片、iTOF 感光芯片、dTOF 芯片的设计技术。

图表58：公司研发费用长期坚持高投入

图表59：掌握 3D 传感器全栈式技术能力



来源：wind，国金证券研究所



来源：奥比中光官网，国金证券研究所

奥比中光在 3D 视觉的主流技术路径均有布局，与人形机器人厂商进展顺利。根据官网，奥比中光在结构光、双目、iTOF、dTOF 等领域均有技术布局；且根据公司投资者关系记录，在 iTOF 领域，公司与微软联合研发的高性能 iTOF 3D 相机 Femto Bolt 具有高精度、尺寸小、同比精准等优势，可以用于人形机器人领域，且目前公司部分产品已经与部分人形机器人客户进行适配，看好人形机器人产业落地后，奥比在人形机器人领域产品进入放量期。



图表60: 奥比中光 iTOF 3D 相机 Femto Bolt 性能优异

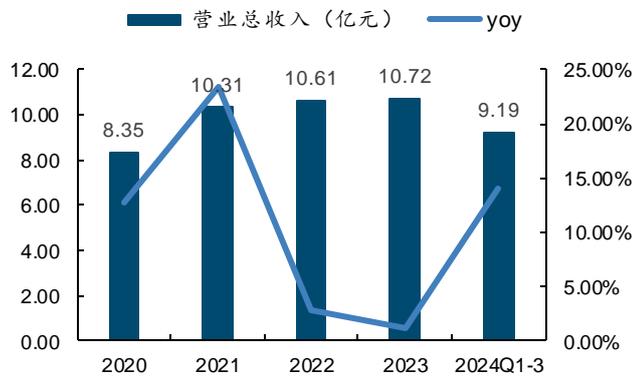


来源: 奥比中光官网, 国金证券研究所

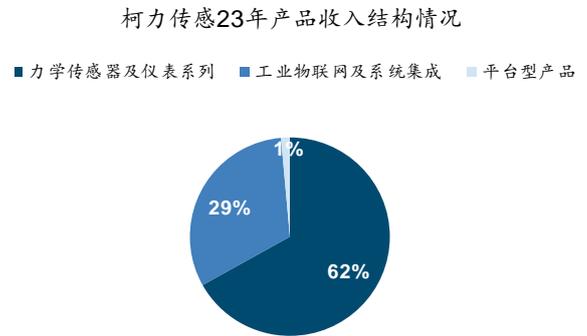
## 6.2 柯力传感: 卡位人形机器人力矩传感器性感赛道

应变式传感器头部厂商, 收入长期稳定增长。柯力传感的收入主要由力学传感器贡献为主, 过去5年公司营业收入保持稳定增长, 24Q1-3公司实现收入9.19亿元, 同比+14%。

图表61: 柯力传感近年来收入保持增长



图表62: 柯力传感产品结构主要以力传感器为主



来源: wind, 国金证券研究所

来源: wind, 国金证券研究所

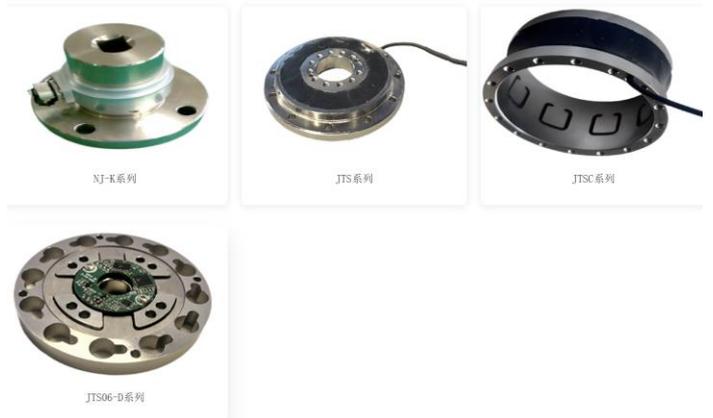
**机器人领域布局广泛, 具有多类力矩传感器。**根据官网, 公司具备多种机器人所需力传感器, 如多维力传感器、关节扭矩传感器、微型力传感器。此外, 公司目前在人形机器人领域进展顺利, 未来有望充分受益于人形机器人产业化落地; 根据24年中报, 公司六维力/力矩传感器已完成人形机器人手腕、脚腕, 工业臂、协作臂末端的产品系列开发, 掌握了结构解耦、算法解耦、高速采样通讯等技术要点, 并已给多家国内协作机器人、人形机器人客户送样, 看好柯力传感长期在机器人领域的发展前景。



图表63: 柯力传感机器人多维力传感器



图表64: 柯力传感机器人关节扭矩传感器



来源: 柯力传感官网, 国金证券研究所

来源: 柯力传感官网, 国金证券研究所

## 七、风险提示

人形机器人商业化落地不及预期: 目前不同环节传感器的潜在增量市场中有较大一部分来自人形机器人行业, 若人形机器人产业化进展不及预期, 将对市场需求造成负面影响。

机器人传感器技术路线发生变化: 机器人不同环节技术路线尚未统一, 若部分环节的传感器出现技术路线的大幅变化, 可能对部分传感器需求造成负面影响。



**行业投资评级的说明：**

- 买入：预期未来 3—6 个月内该行业上涨幅度超过大盘在 15%以上；
- 增持：预期未来 3—6 个月内该行业上涨幅度超过大盘在 5%—15%；
- 中性：预期未来 3—6 个月内该行业变动幅度相对大盘在 -5%—5%；
- 减持：预期未来 3—6 个月内该行业下跌幅度超过大盘在 5%以上。



**特别声明：**

国金证券股份有限公司经中国证券监督管理委员会批准，已具备证券投资咨询业务资格。

形式的复制、转发、转载、引用、修改、仿制、刊发，或以任何侵犯本公司版权的其他方式使用。经过书面授权的引用、刊发，需注明出处为“国金证券股份有限公司”，且不得对本报告进行任何有悖原意的删节和修改。

本报告的产生基于国金证券及其研究人员认为可信的公开资料或实地调研资料，但国金证券及其研究人员对这些信息的准确性和完整性不作任何保证。本报告反映撰写研究人员的不同设想、见解及分析方法，故本报告所载观点可能与其他类似研究报告的观点及市场实际情况不一致，国金证券不对使用本报告所包含的材料产生的任何直接或间接损失或与此有关的其他任何损失承担任何责任。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，在不作事先通知的情况下，可能会随时调整，亦可因使用不同假设和标准、采用不同观点和分析方法而与国金证券其它业务部门、单位或附属机构在制作类似的其他材料时所给出的意见不同或者相反。

本报告仅为参考之用，在任何地区均不应被视为买卖任何证券、金融工具的要约或要约邀请。本报告提及的任何证券或金融工具均可能含有重大的风险，可能不易变卖以及不适合所有投资者。本报告所提及的证券或金融工具的价格、价值及收益可能会受汇率影响而波动。过往的业绩并不能代表未来的表现。

客户应当考虑到国金证券存在可能影响本报告客观性的利益冲突，而不应视本报告为作出投资决策的唯一因素。证券研究报告是用于服务具备专业知识的投资者和投资顾问的专业产品，使用时必须经专业人士进行解读。国金证券建议获取报告人员应考虑本报告的任何意见或建议是否符合其特定状况，以及（若有必要）咨询独立投资顾问。报告本身、报告中的信息或所表达意见也不构成投资、法律、会计或税务的最终操作建议，国金证券不就报告中的内容对最终操作建议做出任何担保，在任何时候均不构成对任何人的个人推荐。

在法律允许的情况下，国金证券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多种金融服务。

本报告并非意图发送、发布给在当地法律或监管规则下不允许向其发送、发布该研究报告的人员。国金证券并不因收件人收到本报告而视其为国金证券的客户。本报告对于收件人而言属高度机密，只有符合条件的收件人才能使用。根据《证券期货投资者适当性管理办法》，本报告仅供国金证券股份有限公司客户中风险评级高于C3级(含C3级)的投资者使用；本报告所包含的观点及建议并未考虑个别客户的特殊状况、目标或需要，不应被视为对特定客户关于特定证券或金融工具的建议或策略。对于本报告中提及的任何证券或金融工具，本报告的收件人须保持自身的独立判断。使用国金证券研究报告进行投资，遭受任何损失，国金证券不承担相关法律责任。

若国金证券以外的任何机构或个人发送本报告，则由该机构或个人为此发送行为承担全部责任。本报告不构成国金证券向发送本报告机构或个人的收件人提供投资建议，国金证券不为此承担任何责任。

此报告仅限于中国境内使用。国金证券版权所有，保留一切权利。

上海	北京	深圳
电话：021-80234211	电话：010-85950438	电话：0755-86695353
邮箱：researchsh@gjzq.com.cn	邮箱：researchbj@gjzq.com.cn	邮箱：researchsz@gjzq.com.cn
邮编：201204	邮编：100005	邮编：518000
地址：上海浦东新区芳甸路 1088 号 紫竹国际大厦 5 楼	地址：北京市东城区建国内大街 26 号 新闻大厦 8 层南侧	地址：深圳市福田区金田路 2028 号皇岗商务中心 18 楼 1806



【小程序】  
国金证券研究服务



【公众号】  
国金证券研究