

传感器：人形机器人与外界互动核心零部件

相关研究：

1. 《20240418湘财证券-机械行业-《以旧换新方案》最新解读，工业机器人有望受益》2024.04.18
2. 《20250225湘财证券-机械行业-Grok3大模型发布，助力人形机器人产业化落地》2025.02.25

行业评级：增持（维持）

近十二个月行业表现



%	1个月	3个月	12个月
相对收益	-12.2	18.8	42.9
绝对收益	-13.6	16.7	53.5

注：相对收益与沪深300相比

核心要点：

关注人形机器人传感器三大细分方向：力觉、触觉和视觉

人形机器人智能化的关键在于感知能力的增强，而传感器作为感知的核心部件，起着至关重要的作用。对于人形机器人而言，其主要感知维度包括力觉、触觉、视觉等三大方面。根据我们测算，特斯拉人形机器人BOM成本中，零部件价值量占比按高低排列分别为：传感器、电机、谐波减速器、丝杠，传感器价值量占比约为33.4%，占比较高。综合考虑产品技术壁垒、行业竞争格局等，我们认为力觉、触觉和视觉是未来人形机器人传感器领域最具发展潜力和值得关注的三大细分方向。

力觉-高壁垒、高价值量，人形机器人灵活操作的关键

人形机器人领域，柔性力控是关键，而力传感器作为核心零部件，发挥着至关重要的作用。力传感器依据测量维度，可划分为一维至六维等多种类型。预计机器人力控的最佳方案为，每个关节使用1个力传感器，其中旋转关节使用扭矩传感器，线性关节使用单向力传感器，机器人的手腕、脚踝各2个六维力传感器。六维力传感器在机器人领域的应用广泛，但目前受限于价格因素，其应用范围受到一定限制。尽管国产厂商如坤维科技、蓝点触控等在六维力传感器领域取得一定进展，但与外资主流传感器相比，仍存在差距，主要体现在灵敏度、串扰、抗过载能力以及维间耦合误差等方面。随着技术进步以及人形机器人量产带来的降本需求，六维力传感器市场有望迎来快速增长。据睿工业数据，预计到2030年，六维力传感器出货量将达到119.54万台，市场规模将达到143.31亿元。

触觉-电子皮肤具备物理柔性与仿生特性，人形机器人智能交互的核心

电子皮肤是一种兼具物理柔性和仿生特性的新型柔性电子器件，能够精准模拟人类触觉感知功能，制备柔性触觉传感器的关键在于材料、结构和制造工艺。柔性触觉传感器在消费电子、医疗、汽车、机器人等领域展现出广阔的应用前景，未来人形机器人有望成为新的增长点。目前全球柔性触觉传感器市场主要由外资品牌主导，行业集中度较高，华经产业研究院预计2023年全球柔性触觉传感器市场的CR5为57.10%，但国内企业如纽迪瑞、汉威科技、钛深科技等也逐渐崭露头角，并在国际市场上展现出较强的竞争力。

视觉-环境感知的“眼睛”，人形机器人感知世界的窗口

3D视觉传感器凭借精度高、信息量大、集成度高的优势，特别适合复杂和精密的识别场景，更有可能成为未来人形机器人的主流视觉方案。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。全球3D视觉传感器市场正迎来快速增长期，据观研天下数据，预计到2025年市场有望达150亿美元。海外头部厂商占据先发优势，但国内厂商如奥比中光等正通过多技术布局和芯片自研逐渐打开市场，并在部分技术指标上逐渐接近海外龙头厂商。

□ 投资建议

视觉、力觉和触觉传感器是人形机器人的核心部件，其成本占比较高，它们使机器人能够感知环境、实现精准操作与智能交互，对提升机器人智能化水平具有重要意义。随着人形机器人技术的发展，传感器需求持续攀升，展现出巨大的市场潜力。目前，全球传感器市场主要由外资品牌主导，但国内企业正逐渐崭露头角，通过不断的技术创新，在部分技术指标上逐渐接近海外龙头厂商，并在国内市场上展现出较强的竞争力。随着人形机器人技术的不断成熟和应用场景的拓展，视觉、力觉和触觉传感器的需求有望迎来大幅增长，相关产业链标的有望受益，因此我们对机器人行业维持“增持”评级。

□ 风险提示

机器人销量不及预期。产品技术突破受阻风险。行业竞争风险。传感器技术发展不及预期的风险。宏观经济波动风险。

正文目录

1 传感器是人形机器人关节核心零部件.....	3
1.1 传感器是人形机器人与外部环境交互的关键纽带.....	3
1.2 传感器是机器人感知系统核心，价值量占比较高.....	4
2 力控：机器人力控必不可少，力传感器为核心零部件.....	5
2.1 力控为机器人运动的核心.....	5
2.2 六维力传感器是人形机器人实现智能化控制重要传感器.....	6
2.3 六维力传感器性能优异，但技术壁垒较高.....	8
2.4 六维力传感器国产厂商入局者增加，市场空间有望实现快速增长.....	11
3 触觉：赋予人形机器人敏锐的“触感”.....	13
3.1 电子皮肤概述和技术分类.....	13
3.2 制备柔性触觉传感器核心：材料和结构以及制造工艺.....	16
3.3 触觉传感器厂商梳理.....	20
4 视觉：使得机器人能够通过眼睛捕捉信息.....	21
4.1 视觉概述和技术分类.....	21
4.2 人形机器人的主流方案为 3D 视觉，未来空间较大.....	24
4.3 海外厂商地位领先，国产逐渐打开市场.....	26
5 投资建议.....	27
6 风险提示.....	27

图表目录

图 1 人形机器人三大核心能力.....	3
图 2 人形机器人传感器分类.....	3
图 3 阻抗控制方法.....	5
图 4 力控方法（混合控制）.....	5
图 5 力传感器示意图.....	6
图 6 六维力和力矩传感器示意图.....	7
图 7 力传感器在人形机器人中的应用.....	7
图 8 硅/箔电阻应变式传感器具有更强的综合性能.....	8
图 9 一维和六维标定区别.....	10
图 10 全球力/力矩传感器主流厂商.....	11
图 11 国内六维力传感器公司对比.....	11
图 12 2023 年中国六维传感器营厂商营收份额排名.....	12
图 13 2023 年六维传感器内外资占比.....	12
图 14 2020-2030 年中国六维力传感器市场出货量.....	12
图 15 2020-2030 年中国六维力传感器市场销售规模.....	12
图 16 2023 年六维力传感器分行业市场份.....	13
图 17 人体皮肤和电子皮肤对比.....	13
图 18 电子皮肤分层.....	14
图 19 电子皮肤工作原理.....	15

图 20 触觉传感器在汽车领域应用.....	16
图 21 触觉传感器在机器人领域应用.....	16
图 22 电子柔性传感器结构和表征.....	18
图 23 MCNF 柔性压力传感器的制备工艺（溶液浇铸法）	19
图 24 全球柔性触觉传感器市场份额.....	20
图 25 双目立体视觉原理和结构	23
图 26 结构光技术原理图	24
图 27 人形机器人企业视觉方案对比.....	25
图 28 全球 3D 视觉感知市场规模(单位：亿美元).....	25
表 1 测算传感器在人形机器人中成本占比约为 33.4%	4
表 2 不同类型六维力传感器介绍	7
表 3 六维力传感器核心指标	8
表 4 不同弹体结构的力/力传感器特性比较	10
表 5 触觉传感器比较	15
表 6 基底层材料分类	16
表 7 电极层材料分类	17
表 8 活性层材料分类	18
表 9 国内供应商柔性触觉传感器产品布局.....	20
表 10 机器视觉化 2D 和 3D 技术对比.....	21
表 11 主流 3D 感知技术对比.....	22
表 12 dToF 和 iToF 对比.....	23
表 13 主流视觉传感器厂商梳理	26

1 传感器是人形机器人关节核心零部件

1.1 传感器是人形机器人与外部环境交互的关键纽带

人形机器人包含人机交互、环境感知、运动控制三大核心能力，使得它们像人一样具有感知、学习和与环境动态交互的能力。人形机器人通过配备多种传感器来实现对外部环境的感知和自身状态的监测，从而完成复杂的交互与操作任务。这些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）以及触觉传感器（如力传感器）。通过这些传感器的协同作用，人形机器人能够准确感知和分析周围环境，并做出相应的反应。

根据功能，人形机器人的传感器可分为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自身的状态，如位置、角度、速度和力矩等，常见的包括位置传感器、速度传感器、惯性测量单元（IMU）以及力/力矩传感器。这些传感器帮助机器人实时了解自身的运动状态和力学特性，从而实现精确的控制和调整。外部传感器则通过视觉、听觉、触觉等系统与外界交互，感知环境信息。例如，视觉传感器（如摄像头、激光雷达、3D 视觉传感器）用于环境感知、物体识别和导航；触觉传感器（如电子皮肤、电容式传感器）用于感知接触物体的形状、硬度和压力；力/力矩传感器则用于感知交互时的力度和力矩。这些传感器使机器人能够感知和理解周围环境，从而做出相应的反应和决策。

图 1 人形机器人三大核心能力



资料来源：未来智库、湘财证券研究所

图 2 人形机器人传感器分类



资料来源：中国传动网、湘财证券研究所

1.2 传感器是机器人感知系统核心，价值量占比较高

特斯拉人形机器人 BOM 成本中，传感器价值量占比约为 33.4%。根据我们测算，特斯拉人形机器人 BOM 成本大约为 49719 美元。其中，关节的 BOM 成本大约为 34719 美元，占总成本的 69.8%。在特斯拉人形机器人 BOM 成本中，除开软件系统 (FSD)，零部件价值量占比按高低排列分别为：传感器、电机、谐波减速器、丝杠，传感器价值量占比约为 33.4%。

表 1 测算传感器在人形机器人中成本占比约为 33.4%

部位	零件	单价 (美元)	数量	总价	占比
躯干	电池包	460	1	460	0.93%
旋转执行器	谐波减速器	233	14	3262	6.56%
	机械离合器	180	14	2520	5.07%
	滚珠轴承	7	28	202	0.41%
直线执行器	滚柱丝杆 (反向、行星)	86	28	2400	4.83%
编码器	编码器	71	40	2856	5.74%
电机	无框力矩电机	143	28	4001	8.05%
	空心杯电机	129	12	1543	3.10%
传感器	力学传感器	71	14	1000	2.01%
	力矩传感器	143	14	2001	4.02%
	位置传感器	71	44	3124	6.28%
	六维传感器	2143	4	8572	17.24%
	触觉传感器	30	14	420	0.84%
	计算盒子	1500	1	1500	3.02%
	摄像头模组				
毫米波雷达					
软件系统	FSD	15000	1	15000	30.17%
外壳架构件	合金、碳纤维	26	33	858	1.73%
总计				49719	100%

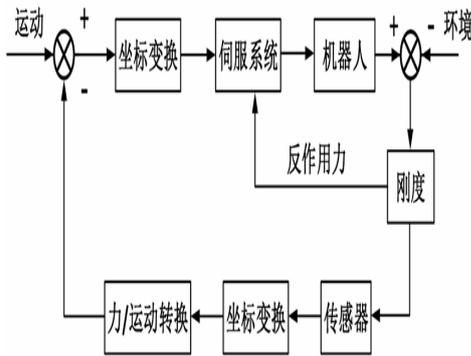
资料来源：新浪财经、盖德化工网、1688 网、中国能源网、湘财证券研究所

2 力控：机器人力控必不可少，力传感器为核心零部件

2.1 力控为机器人运动的核心

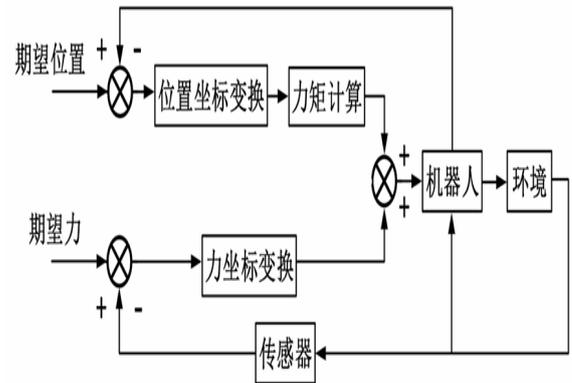
力控的基本原理在于通过传感器实时检测机器人与环境之间的接触力或力矩，并将测量到的力信号反馈给控制系统，作为控制算法的输入。根据预设的控制策略(如阻抗控制、混合控制)，系统调整机器人的运动轨迹或输出力，以实现对接触力的精确调节。最终，通过执行器(如电机或液压系统)实现机器人的运动调整，确保其与环境之间的相互作用力符合预期。这一过程涵盖了力感知、力反馈、力调节和运动执行四个关键环节，使机器人能够适应复杂、动态的工作环境，并完成高精度、高灵活性的操作任务。

图 3 阻抗控制方法



资料来源：《机器人的力控制技术及应用进展》赵宗圣、湘财证券研究所

图 4 力控方法（混合控制）



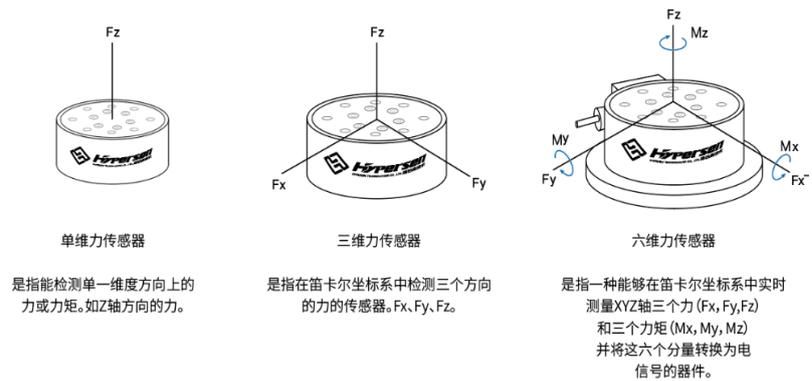
资料来源：《机器人的力控制技术及应用进展》赵宗圣、湘财证券研究所

在现代机器人技术中，力控（Force Control）是实现机器人精确运动和执行复杂任务的核心技术之一。与传统的基于位置控制的机器人运动方式不同，力控通过感知和调节机器人与环境之间的相互作用力，使机器人能够适应复杂、动态的工作环境，并完成高精度、高灵活性的操作任务。力控技术的应用范围广泛，涵盖了工业装配、医疗手术、人机交互、服务机器人等多个领域。

2.2 六维力传感器是人形机器人实现智能化控制重要传感器

根据测量维度，力传感器可分为一维、三维和六维力传感器，其中六维力传感器最为复杂。一维力传感器适用于力的方向和作用点固定不变的场景，其测量的力方向与标定的 OZ 轴完全重合。三维力传感器则适用于力的方向在三维空间中随机变化，但作用点保持不变且与传感器标定参考点重合的场景，能够同时测量 F_x 、 F_y 、 F_z 三个分力。六维力传感器功能最为强大，适用于力的方向和作用点均在三维空间内随机变化的复杂场景，可同时测量 F_x 、 F_y 、 F_z 三个力分量和 M_x 、 M_y 、 M_z 三个力矩分量。这三种力传感器分别适用于不同的应用场景，满足不同需求。

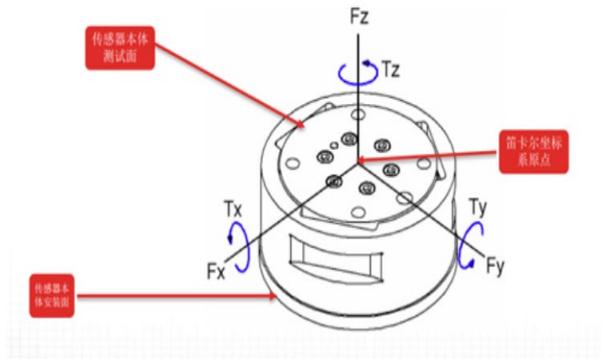
图 5 力传感器示意图



资料来源：海伯森技术官网、湘财证券研究所

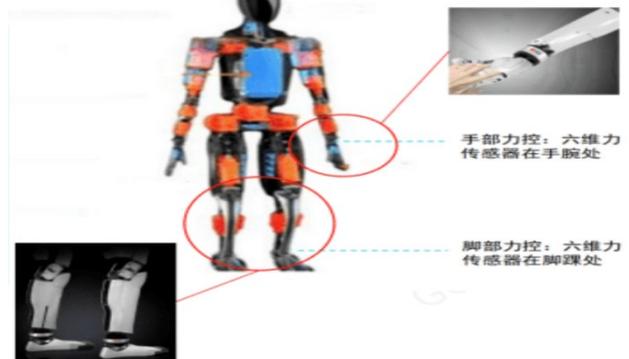
力矩传感器可为机械臂提供实时力和力矩，人形机器人对柔顺控制要求高的手腕和脚踝或将使用六维力矩传感器。力矩传感器是机械臂的关键部件之一，可为机械臂提供实时力和力矩信息。力矩传感器可实现机械臂对操作对象的力感知，从而协助机械臂完成精细和智能的操作任务。六维力矩传感器主要用在对柔顺控制要求高的手腕和脚踝。六维力传感器也被称为六轴力/力矩传感器、F/T 传感器，用于精确测量 X、Y、Z 三个方向的力信息和 M_x 、 M_y 、 M_z 三个维度的力矩信息。人形机器人中，对柔顺控制要求高的手腕和脚踝或将使用六维力矩传感器，而身体的其他关节将使用关节扭矩传感器（单维）。

图 6 六维力和力矩传感器示意图



资料来源：ATI 工业自动化、湘财证券研究所

图 7 力传感器在人形机器人中的应用



资料来源：高工机器人、湘财证券研究所

根据敏感元件的种类，多维力矩传感器可以分为电阻应变式、压电式、电容式和光学式等多种类型。其中，电阻应变式传感器是目前最为成熟的技术路线，广泛应用于市场。应变式传感器利用电阻应变片将物体受力变形产生的应变转换为电阻变化，进而实现力的测量。这种传感器具有高灵敏度、大测量范围和良好的可靠性，适用于多种工业和机器人应用场景。压电式传感器则基于压电效应，通过压电材料受力后产生的电荷来测量力和力矩。其优点是频带宽、灵敏度高，但输出直流响应较差，需要高输入阻抗电路或电荷放大器。电容式传感器具有非接触式结构，成本较低，但动态特性可能受限于电容充放电速度，且刚度较低，不适合承受极端载荷。光学式传感器则利用光信号的变化来测量力，具有良好的动态特性，但成本较高。在实际应用中，应变式六维力传感器因其成熟的技术和综合性能优势，成为目前市场的主流选择。

表 2 不同类型六维力传感器介绍

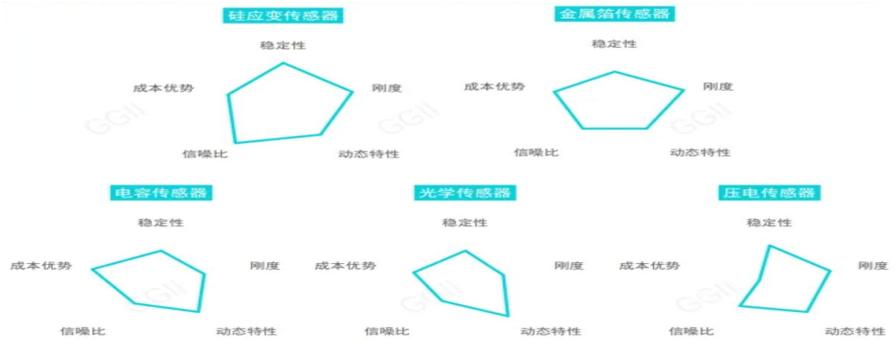
传感器元件类型	原理及特点	优点	缺点	代表企业
应变片式	通常采用的是硅应变片或金属箔，本质是材料本身发生形变进而转化为阻值变化	1. 精度高、技术成熟、 2. 测量范围广、成本低	1. 生产工艺复杂 2. 金属箔式应变计输出微弱	ATI、宇立仪器、坤维科技、鑫精诚、蓝点触控、海伯森、神源生智能等
光学式	通过光纤、光栅反映形变，再转化成力	1. 可靠性高 2. 测量范围广 3. 抗电磁干扰能力强	1. 对测试环境要求高 2. 刚性偏弱	OnRobot、松果体、华力创等
压电/电容式	电容是通过极距的变化导致电压变化；压电是通过形变改变电荷	1. 高灵敏度和高分辨率 2. 频率范围宽，结构简单 3. 环境适用性强	1. 调理电路复杂 2. 信号漂移难以抑制	Robotiq、Robotous、WACOH-TECH、Kistler 等

资料来源：高工机器人、湘财证券研究所

硅/金属箔电阻应变传感器性能更优秀, 后续有望在人形机器人领域推广。

经过对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综合比较，硅/金属箔电阻应变式传感器在稳定性、刚度以及信噪比等方面展现出显著优势，后续有望在人形机器人领域推广。

图 8 硅/箔电阻应变式传感器具有更强的综合性能



资料来源：高工机器人、湘财证券研究所

2.3 六维力传感器性能优异，但技术壁垒较高

六维力传感器的主要性能参数包括量程、过载能力、分辨率、重复精度、串扰、准度等。量程指的是传感器能够测量的最小值到最大值的范围，它直接决定了传感器在实际应用中能够处理的力的大小。而过载能力则表示传感器在超出其额定量程时仍能正常工作的能力，这在实际使用中可以有效防止传感器因意外过载而损坏。分辨率是指传感器能够检测到的最小力变化，它决定了传感器对微小信号的敏感程度。重复精度则反映了传感器在多次测量相同力时结果的一致性，是衡量传感器稳定性和可靠性的重要指标。串扰是指当传感器在某一维度上受到力作用时，其他维度上可能出现的干扰信号，它影响传感器测量结果的准确性。准度则是衡量传感器测量结果与真实值接近程度的指标，它综合反映了传感器的线性度、滞后性、蠕变等误差因素，是评价传感器整体性能的核心指标。

表 3 六维力传感器核心指标

指标名称	衡量维度	备注
量程	传感器能够测量的最大力量和力矩的范围	选择传感器时，需要确保其量程能够覆盖预期的最大力量和力矩
过载能力	传感器能够承受的最大力量和力矩超过其额定量程的程度，而不会导致传感器损坏或性能下降	过载能力对于确保传感器在意外或极端条件下的耐用性非常重要
分辨率	分辨率是传感器能够检测的最小力量或力矩变化	对于需要精细力控制的应用，高分辨率的传感器是必要的

重复精度	传感器在多次测量同一值时的一致性	高重复精度意味着传感器在连续测量中提供的结果更加稳定和可靠
串扰	衡量传感器不同方向的力间的耦合干扰，是反映六维力传感器制造、标定水平的核心指标之一	低串扰意味着传感器在测量时各方向之间的干扰较小，这对于精确测量至关重要
准度	准度是传感器测量值与实际值之间的差异的综合体现，包括了滞后、线性度和蠕变等误差因素。	高准度的传感器能够提供更接近真实值的测量结果，是评价传感器性能的关键指标

资料来源：中国传动网、湘财证券研究所

六维力传感器相较于一维和三维力传感器，具有显著的优势。首先，六维力传感器在结构设计上更为紧凑，体积更小。一个六维力传感器所需的空间远小于六个一维力传感器组合的空间，能够更好地适配机器人关节等狭小空间，从而降低机器人结构设计的难度。此外，六维力传感器在信号同步性方面也表现出色。由于其能够同时解算出三个方向的力和力矩，不存在传感器间相互作用的问题，因此协调同步性大大提高，避免了多个一维力传感器组合可能出现的信号不同步现象。最后若采用多个一维力传感器组合解耦，其耦合误差比六维传感器更高，这将严重影响测量的准确性。

六维力传感器的技术壁垒：弹性体结构（耦合）设计、标定校准、解耦算法。弹性体结构需在刚性、灵敏度和小型化之间平衡，以抑制各轴间的相互干扰。标定过程复杂，样本点数量呈指数级增长，且标定设备成本高、精度要求高。数据采集需处理多通道信号，解决温漂、蠕变等问题，对实时性和准确性要求高。解耦算法方面，非线性力学特征显著，需采用高精度的非线性解耦算法，同时对训练样本和模型模拟能力要求极高。这些壁垒使得六维力传感器的研发和生产难度大，但也为其高精度测量应用提供了独特优势。

在六维力传感器的研究中，弹性体结构设计（耦合）是核心问题。传感器的结构设计受到其应用场合的限制，而力敏感元件的形式和布置方式将直接影响传感器的灵敏度、刚度、线性度、动态性能以及维间耦合等关键性能参数，从而在很大程度上决定了传感器的整体性能。从现有研究成果来看，六维力/力矩传感器的结构主要分为一体化结构和斯图尔特(Stewart)并联结构两种。一体化结构的六维力传感器包括竖梁式、横梁式、复合梁式和圆筒式等多种形式。其中，十字型弹性体结构由于其良好的对称性，能够兼顾横向和竖向的应变效果，且十字梁与轮缘之间采用柔性连接，从而简化了力学模型，实际使用效果较好，被广泛应用。

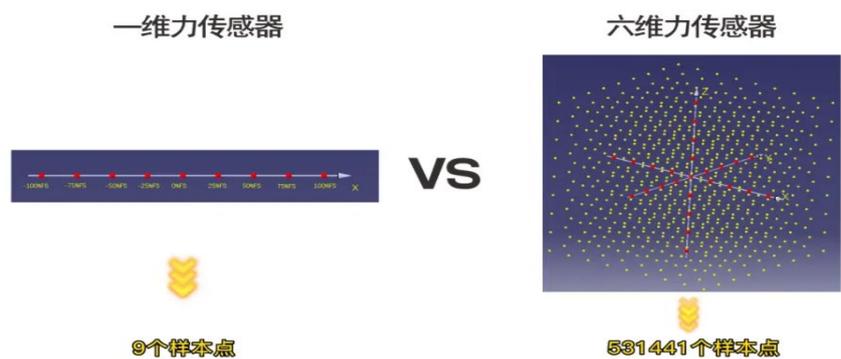
表 4 不同弹体结构的力/力传感器特性比较

机械结构	优点	缺点
竖梁	承载能力强,结构简单,横向效应和抗冲击性能好	纵向灵敏度低,维间耦合差
圆筒式弹性梁	耦合小	刚度差
十字弹性梁	高对称性,结构紧凑,刚度大,易加工,由于柔性连接简化了力学模型	存在维间耦合和径向效应
非径向梁式	刚度大	输出为强非线性
复合梁型	可实现无耦合测量	结构复杂,受加工和装配精度的影响大
Stewart 并联结构	刚度大,稳定性好,负载能力大	较难实现力和力矩的各向较难实现力和力矩的各向

资料来源:《多维力传感器的静动态性能研究》付立悦、湘财证券研究所

六维力传感器的标定精度是其技术壁垒之一。标定是建立传感器原始信号与受力之间映射关系的核心环节,通过标定实验数据获得输入量(六维力向量)与输出量(输出电压)之间的关系,并为耦合误差模型和解耦算法提供依据。六维力传感器具有显著的非线性特性,采用六维联合加载标定(三维力和三维力矩同时加载)可更接近真实使用情况,考察其多维载荷下的非线性特性,优化传感器结构和解耦算法。例如,一维传感器标定仅需9个样本点,而六维传感器每个维度取9个样本点时,样本空间达531441个样本点,复杂度大幅提升。

图 9 一维和六维标定区别



资料来源:坤维科技、湘财证券研究所

六维力传感器的解耦算法是应对耦合误差的关键技术。耦合误差的产生与机械结构、加工误差、应变片粘贴位置及标定方式密切相关。解耦方法主要分为结构解耦和软件解耦。结构解耦通过优化设计和材料减少误差,但会增加制造难度和成本;软件解耦则通过算法推导输入输出关系,成本低但计算复

杂，易受病态矩阵影响，精度受限。常用的软件解耦方法包括线性解耦（如最小二乘法）和非线性解耦（如机器学习算法，包括 BP 神经网络、随机森林等）。

2.4 六维力传感器国产厂商入局者增加，市场空间有望实现快速增长

中国六维力(矩)传感器市场近年入局者逐年增加，但受限于该领域高技术壁垒，具备批量化产品供应能力厂商依然偏少。我国力矩传感器行业仍处在初期阶段，竞争格局较为分散。相比于单轴传感器，六维力矩传感器生产技术和流程较为复杂，具有较高的技术壁垒，目前我国参与企业主要有昊志机电、宇力仪器(未上市，ABB、安川、KUKA 等的合作供应商)、以及坤维科技(未上市，与节卡、遨博等国内协作机器人著名厂商开展深度合作)、安培龙、柯力传感等。

图 10 全球力/力矩传感器主流厂商



资料来源：高工机器人、湘财证券研究所

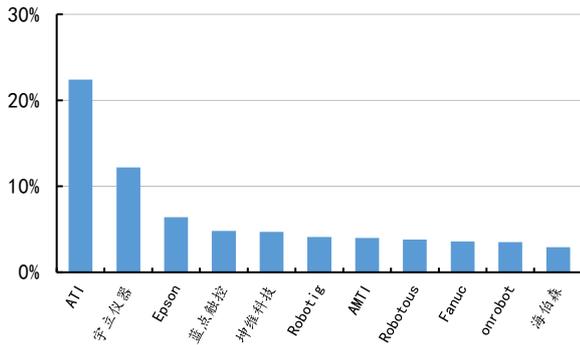
图 11 国内六维力传感器公司对比

公司	总资产 (2025年03月24日) 单位: (亿元)	2023年收入 单位: (亿元)	基本情况
柯力传感	197.02	10.72	研发、生产和销售应变式传感器、仪表等元器件，电子称量系统，工业物联网系统集成设备等
昊志机电	80.96	10.00	产品涵盖高端主轴、转台、直线电机、数控系统、谐波减速机、伺服电机等功能部件
安培龙	92.19	7.47	公司已形成了热敏电阻及温度传感器、霍尔传感器、压力传感器三大产品线，包含上千种规格型号的产品，目前主要应用于家电、通信及工业控制领域
宇力仪器(未上市)	/	/	多轴力传感器，包括六轴力传感器、三轴力传感器、一轴力传感器和关节扭矩传感器
坤维科技(未上市)	/	/	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

资料来源：Wind、高工机器人、湘财证券研究所

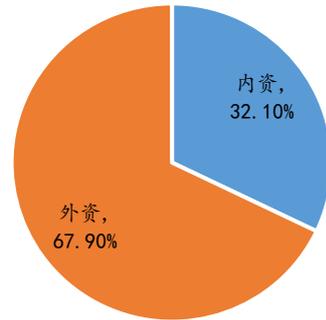
2023 年中国六维力传感器市场集中度较高，外资厂商占据接近 70% 的市场份额。在国产厂商中，宇立仪器、蓝点触控、坤维科技排名靠前，分别位居第二、第四、第五位。然而，目前六维力传感器行业整体仍以外资品牌为主，外资品牌占比近 70%，在产品和应用上具有较大的先发优势。不过，国内部分上市公司如何力传感、昊志机电等也在不断攻关，凭借大量的研发投入和资金支持，有望获得一定的市场份额。

图 12 2023 年中国六维传感器厂商营收份额排名



资料来源：睿工业、湘财证券研究所

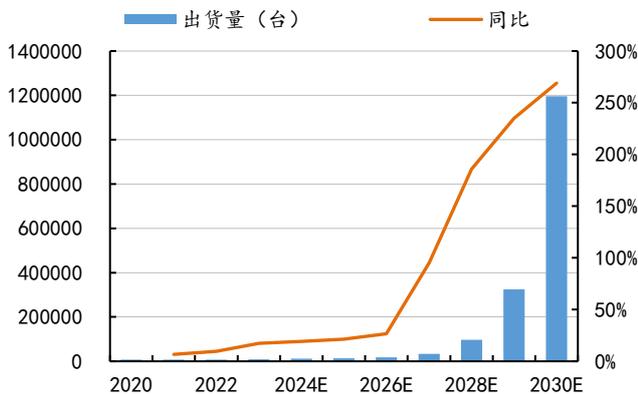
图 13 2023 年六维传感器内外资占比



资料来源：睿工业、湘财证券研究所

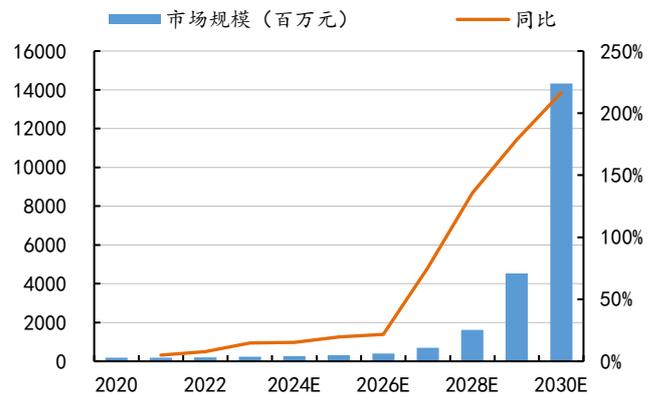
六维传感器前期发展较为缓慢，2027 年后六维力传感器市场有望迎来爆发式增长。据睿工业数据，2020-2026 年，六维力传感器市场发展相对缓慢，应用场景较为有限且价格昂贵，出货量不足两台。在这一阶段，尽管柔性化生产的需求推动了六维力传感器出货量的提升，但整体市场增量较小，价格变化也不明显。然而，2023 年人形机器人概念的火热为市场注入了新的活力，吸引了更多厂商入局，产品价格开始出现较大幅度下滑，行业竞争逐渐加剧，厂商们纷纷致力于开发新的应用场景以拓展市场空间。随后，在 2027-2030 年，六维力传感器市场迎来了爆发式增长，预计到 2030 年出货量将达到 119.54 万台。这一显著增长主要得益于人形机器人的规模化落地，其对六维力传感器的需求急剧上升。随着需求的大幅增加，产品生产成本得到有效控制，从而促使六维力传感器价格明显下降。受此影响，六维力传感器市场规模呈现出与出货量类似的上升曲线，预计到 2030 年将达到 143.31 亿元。

图 14 2020-2030 年中国六维力传感器市场出货量



资料来源：睿工业、湘财证券研究所

图 15 2020-2030 年中国六维力传感器市场销售规模

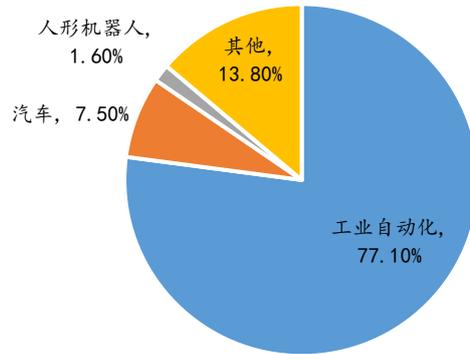


资料来源：睿工业、湘财证券研究所

2023 年，六维力传感器主要应用于工业自动化领域，人形机器人未来有望成为六维传感器最大增长需求。据睿工业报告，2023 年，六维力传感器主要应用于工业自动化领域高柔性化产线的需求不断增长，尤其在机器人打磨

和装配等场景中不可或缺，但受限于工艺，难以大批量使用。汽车领域应用成熟，缺乏新场景，增量有限。人形机器人是六维力传感器最大增长来源，随着其量产和应用，六维力传感器出货量将大幅提升。此外，军工、航空航天、医疗等领域对成本敏感度低，价格较高，增量稳定。

图 16 2023 年六维力传感器分行业市场份额



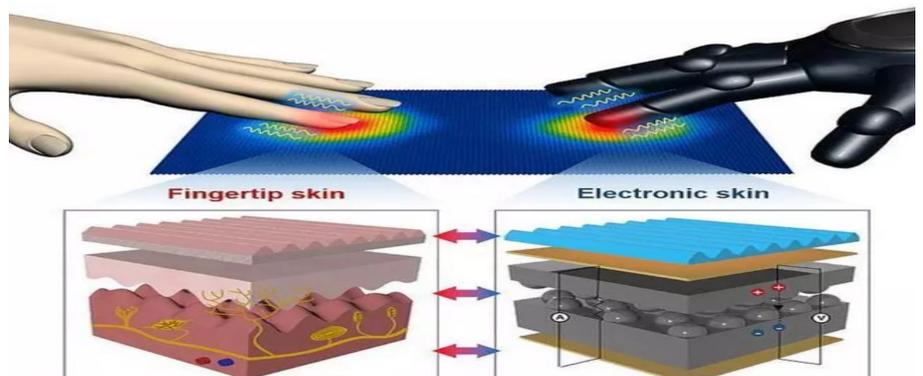
资料来源：睿工业、湘财证券研究所

3 触觉：赋予人形机器人敏锐的“触感”

3.1 电子皮肤概述和技术分类

电子皮肤是一种兼具物理柔性和仿生特性的新型柔性电子器件，能够精准模拟人类触觉感知功能。人体皮肤的触觉感知功能极为强大，可感知接触物体的形状、尺寸、温度、质地等多维信息。电子皮肤是通过电学信号的集成与反馈来模拟人体皮肤感受外界刺激（压力、温度、湿度）的新型电子器件。电子皮肤作为一种柔性触觉仿生传感器已经广泛地应用于人体生理参数检测与机器人触觉感知等领域。

图 17 人体皮肤和电子皮肤对比



资料来源：电子工程世界、湘财证券研究所

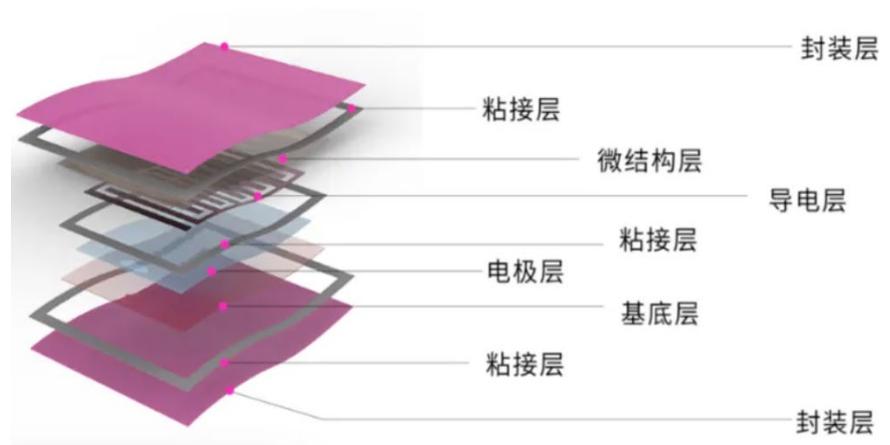
电子皮肤拆分来看，主要分为基底层、导电层、传感层。电子皮肤的结构主要由以下三层构成：

基底层：作为电子皮肤的最内层，基底层通常采用柔性材料制成，旨在模拟人体皮肤的弹性与柔韧性。它也被称为支撑层，主要起到支撑整个电子皮肤结构的作用。

导电层：导电层是电子皮肤的关键部分，负责传导电信号。它通常包含导电材料，如导电石墨或特定的导电聚合物。这些材料能够检测并传输外界刺激（如压力、温度等）引起的电信号变化。导电层的设计和材料选择对电子皮肤的灵敏度和响应速度有着决定性的影响。

传感层：传感层位于电子皮肤的中间位置，是核心功能层。它包含大量的传感元件，能够精确识别外界的压力和摩擦力，并将其转化为电信号输出。传感层的性能直接决定了电子皮肤对外界刺激的感知精度，是整个电子皮肤系统的核心部分。

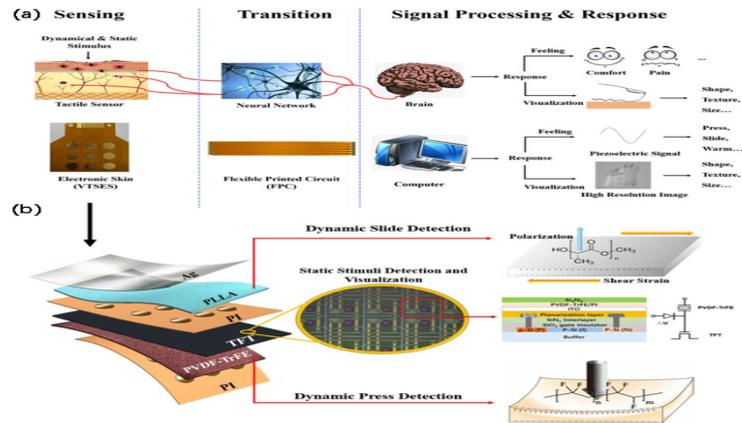
图 18 电子皮肤分层



资料来源：腾讯网、湘财证券研究所

电子皮肤，使用电子设备将物理信号转换为电子信号的触觉模拟，模仿人体感知系统，对于未来人工智能和人机交互的发展有着重大意义。以电子科技大学设计的一种基于 PVDF-TrF/TFT/PLLA 结构的可视化电子皮肤器件 (VTSES) 为例，该器件通过压电、热电和介电电容的高度耦合，精确感知外界动态力、静态力及温度刺激。该器件具有类人类皮肤的多功能传感特性及良好的生物相容性。通过自行设计的电路阵列和分析软件，该电子皮肤可以再现大脑的触觉信息处理过程，实现对触碰物体的高分辨率可视化重构功能。

图 19 电子皮肤工作原理



资料来源：中国聚合物网、湘财证券研究所

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。从原理上，触觉传感器可分为压阻式、电容式、压电式、电感式和光学式，其中压阻式、电容式和压电式最为常用，而光学式则属于较新颖的技术。触觉传感器正逐步模拟生物皮肤的复杂属性和功能，例如柔性、自愈合能力，以及对细微力、温度、湿度和物体表面纹理的感知能力。从检测方法来看机器人的触觉传感系统通过与物体的接触来测量其物理特征，从而实现对环境感知。

表 5 触觉传感器比较

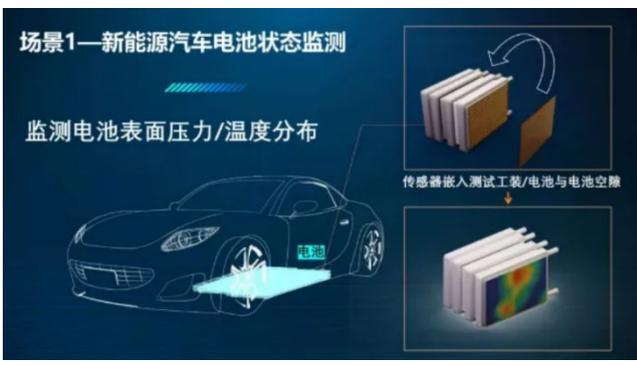
原理	测量参数	优点	缺点
电阻式	电阻值	结构简单、动态范围大、制备成本低	易受温度干扰、迟滞较大
电容式	电容值	灵敏度高、响应速度快、易于阵列化集成	易受周围导电物体产生边缘电容干扰，响应非线性
压电式	电荷	灵敏度高，响应速度快，对高频响应有优势	无法测量静态力，受温度影响较大
电磁式	磁通量	动态范围大，可靠性好	易受外界磁场干扰
光电式	光信号	信号不易受干扰，分辨率高响应速度快	功耗较大，光路复杂，无法全柔性、小型化集成
气压式	气压	柔软度高	封装结构复杂易受损
摩擦电式	电荷	结构简单，灵敏度高，可以用于滑动检测	动态范围小，技术成熟度低

资料来源：传感器专家网、湘财证券研究所

凭借这些独特的产品特性，柔性触觉传感器在多个领域展现出广阔的应用前景。例如，在消费电子领域，可用于耳机、智能穿戴设备等，提升设备的交互体验；在医疗领域，可用于健康监测设备、假肢等，增强设备的舒适性和功能性；在汽车领域，可用于智能座椅、方向盘检测等，提升驾驶安全性和舒适性；在机器人领域，可用于灵巧手等部位，使机器人能够更精准地感知和操

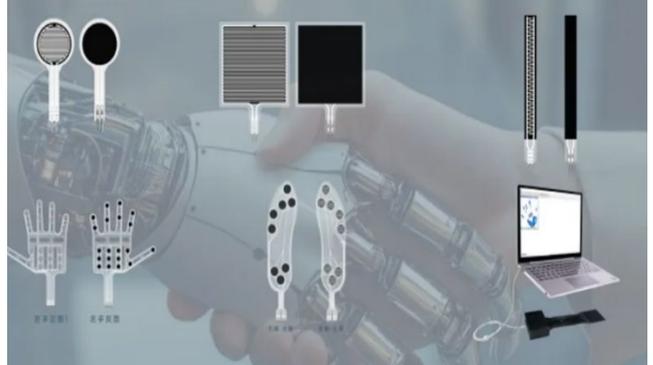
作物体。这些应用不仅增强了设备的感知能力，还推动了人机交互和环境感知技术的发展。

图 20 触觉传感器在汽车领域应用



资料来源：腾讯网、湘财证券研究所

图 21 触觉传感器在机器人领域应用



资料来源：腾讯网、湘财证券研究所

3.2 制备柔性触觉传感器核心：材料和结构以及制造工艺

制备柔性触觉传感器时，关键在于材料和结构以及制造工艺。材料方面，电子皮肤的构筑材料按其特定功能大致可分为柔性基底层、导电电极层和活性传感层三大类。材料的柔韧性、可拉伸性、高弹性是制备柔性触觉传感器的关键，具有优良电学和力学性能的软体功能材料是触觉皮肤研究的基础和核心。多层结构设计有助于提高传感器的灵敏度、稳定性和可靠性。制造工艺则包括光刻蚀刻、印刷涂覆、模压成型、集成封装等步骤，最终形成完整的柔性触觉传感器系统。材料和制造工艺共同决定了最后的柔性触觉传感器性能。

基底材料：为了满足柔性电子设备需求，基底材料需具备良好的拉伸性、轻薄透明、柔性耐腐蚀等特点。按照结构和物理特性，柔性基底层可分为薄膜类、橡胶类和纤维类三大类。薄膜类基底具有柔韧性好、适形性强、耐久性佳、重量轻、耐磨性好，且器件集成简单、成本低等优点，已广泛应用于柔性电子领域，常用材料有聚酰亚胺(PI)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)等。橡胶类材料是最常用的弹性基底，拉伸性能优异，伸长率高，主要包括聚二甲基硅氧烷(PDMS)和聚(苯乙烯-乙烯-丁烯-苯乙烯)(SEBS)，其中 PDMS 还具有透明、生物相容性好等特点。纤维类材料具有多孔透气、结构柔软舒适、选材范围广、加工简单、易于表面处理、成本低等优势，可与织物结合，利于人体穿戴，按照纤维集合体的结构组成，可分为纱线、织物、纳米纤维膜等形式。

表 6 基底层材料分类

材料分类	特点	代表材料	应用领域
薄膜类	柔韧性好、适形性强、耐久性佳、重量轻、耐磨性好，	聚酰亚胺(PI)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)、聚苯二甲酸乙二酯	广泛应用于柔性电子领域，如柔性显示屏、可穿戴设备等

	且器件集成简单、成本低	(PEN)、聚酰亚胺(PEI)、聚砜(PES)、聚醚醚酮(PEEK)	
橡胶类	具有优异的拉伸性能, 伸长率高, 弹性好	聚二甲基硅氧烷(PDMS)、聚(苯乙烯-乙烯-丁烯-苯乙烯)(SEBS)	电子皮肤、柔性传感器等, 其中PDMS 还具有透明、生物相容性好、耐热、耐化学腐蚀等特点, 适用于生物医学领域
纤维类	多孔透气, 结构柔软舒适, 选材范围广, 加工简单, 易于表面处理, 成本低, 可与织物结合	纱线、织物、纳米纤维膜等形式	柔性电子皮肤基底, 智能织物等, 可用于制备可穿戴设备, 提高设备的舒适性和透气性

资料来源: 《纤维基自供电电子皮肤的构建及其应用性能研究进展》吕晓双等、湘财证券研究所

电极层材料: 电极层是电子皮肤电信号传输关键部分, 其导电性能取决于材料导电率。常见导电材料有金属、无机碳等。金属材料导电性好且资源丰富, 常用的是银(Ag)和铜(Cu)。但金属材料硬而脆, 不利于制备柔性电子皮肤。不过, 银纳米线(AgNWs)和金纳米线(AuNWs)等纳米金属材料质量轻、柔软且导电性能好, 是柔性可穿戴设备电极的理想材料。无机碳材料导电性良好, 还具备材质轻、比表面积大、环境稳定性强等优点, 主要包括炭黑(CB)、碳纳米管(CNTs)、石墨烯、还原氧化石墨烯(rGO)。其中, 碳纳米管是一维碳材料, 导电、力学性能优异, 载流子迁移率高, 且导热性能良好, 在电子皮肤领域前景广阔。与金属材料 and 碳材料相比, 导电聚合物本身就具有优良的柔韧性, 是制备柔性电子皮肤的重要材料, 但导电聚合物的导电性能相对较差。

表 7 电极层材料分类

导电电极层	代表材料	优点	缺点
金属	Au、Ag、Cu、Al 及其纳米线、纳米棒等	高导电率、机械稳定性好、易于加工	柔性差、易于氧化和生锈
碳材料	CB、石墨烯、rGO、CNTs	高导电率、纳米多孔结构、机械稳定性好	溶液分散性差、结构不易控制
导电聚合物	PEDOT、PEDOT:PSS、PANI、PPy	良好的柔性、易于溶液加工处理	成本高、导电率低、稳定性差

资料来源: 《纤维基自供电电子皮肤的构建及其应用性能研究进展》吕晓双等、湘财证券研究所

活性层材料: 电子皮肤的活性传感层是其核心组件, 能够感知外界的物理机械刺激并转化为电信号。在仿生电子皮肤中, 传感材料的选择对器件灵敏度至关重要。根据自供电电子皮肤的传感原理, 活性功能材料主要分为压电材料和摩擦电材料。压电材料具有压电效应, 包括压电陶瓷、压电聚合物和压电复合材料。常见的压电陶瓷有钛酸钡、锆钛酸铅、氧化锌等, 这些材料具有高灵敏度、高能量转化效率、高力学强度和高化学惰性等优点, 但存在质地硬且脆、耐久性差、质量较大等缺点, 限制了其在柔性电子皮肤中的应用。相比之

下，摩擦电材料选材范围广、电输出性能好，但在摩擦过程中传感层易磨损，导致传感性能不稳定且灵敏度相对较低。材料在摩擦序列表中的位置是摩擦电式电子皮肤选材的重要参考。根据摩擦电序列表及综合考虑摩擦电极性、柔韧性等因素，PTFE、PVDF 和 PDMS 等吸引电子能力强的材料，常作为摩擦电负极材料使用，而摩擦电正极材料则主要采用聚酰胺 66、金属材料 and 乙基纤维素等。

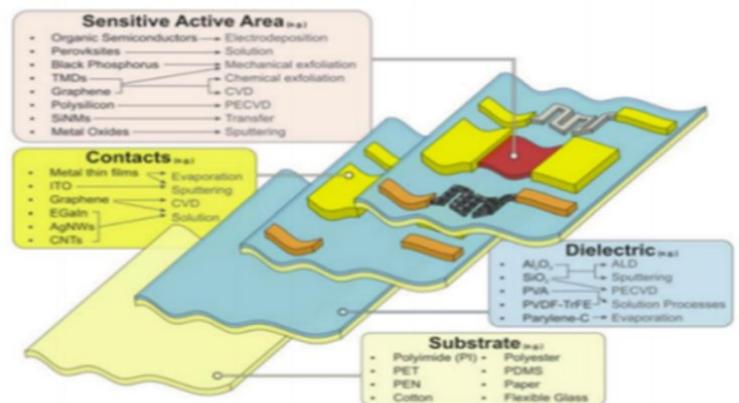
表 8 活性层材料分类

传感层	分类	代表材料	优点	缺点
压电材料	压电陶瓷	BTO、ZnO、PZT	压电常数高、强度高、化学惰性	柔性差、硬而脆
	压电聚合物	PVDF、P(VDF-TrFE)	柔性好、易于加工	压电常数小
摩擦电材料	摩擦电正性材料	乙基纤维素、聚酰胺	选材范围广、能量转化效率高	灵敏度低
	摩擦电负性材料	PTFE、PVDF、PDMS		

资料来源：《纤维基自供电电子皮肤的构建及其应用性能研究进展》吕晓双等、湘财证券研究

电子柔性传感器的结构通常由多层组成，从底层到顶层依次为基底层、介电层、电极层层和活性传感层。第一层是传感器的基底，使用的材料包括聚酰亚胺(PI)、聚酯(PET)、聚醚醚酮(PEEK)、纸张和可弯曲的玻璃等。第二层是介电层，使用了氧化铝(Al₂O₃)、二氧化硅(SiO₂)、聚乙烯醇(PVA)和聚偏二氯乙烯-四氟乙烯(PVDF-TFE)等材料。第三层是传感器的电极层，包括了金属薄膜、氧化铟锡(ITO)、石墨烯、氮化镓(GaN)和纳米银线(AgNWs)等材料，最顶层是活性传感区。这种多层结构设计有助于提高传感器的灵敏度、稳定性和可靠性，使其能够更好地适应各种复杂的环境和应用场景。

图 22 电子柔性传感器结构和表征

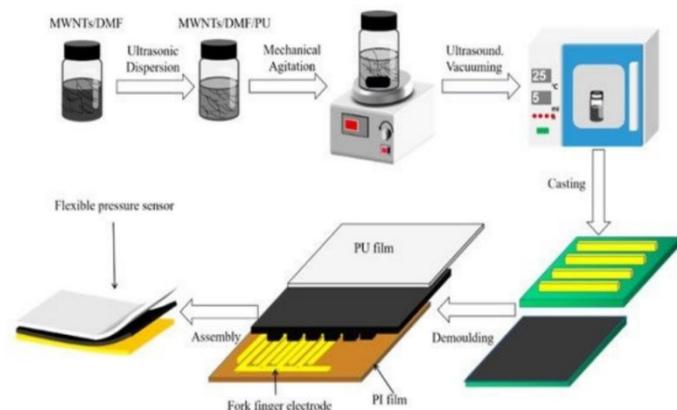


资料来源：中国传感器网、湘财证券研究所

目前柔性触觉传感器制备工艺主要有溶液浇铸法、3D 打印技术和自组合法。溶液浇铸法是将含有敏感材料和基底材料前体的溶液均匀浇铸在模具或基底上，通过加热、固化等处理步骤形成柔性传感器薄膜。例如，把含有石墨烯和 PDMS 前体的溶液浇铸在玻璃基底上，经固化后就能得到石墨烯/PDMS 柔性传感器。该方法操作简单，成本较低，适合大批量生产，但精度相对较低，且对溶液的均匀性要求较高。3D 打印技术利用其高精度成型能力，可直接打印出具有复杂结构的柔性传感器。如采用导电油墨作为打印材料，在柔性基底上打印出特定的电极图案和敏感结构，能实现个性化定制的柔性传感器制备。它优势在于可实现复杂结构的精确制备，快速成型，但设备成本高，打印材料的选择相对受限。自组合法借助分子间的相互作用力，像氢键、静电作用等，使敏感材料在基底上自组装形成有序的结构。比如，利用 DNA 分子与金属纳米粒子之间的相互作用，将金属纳米粒子自组装在柔性基底上，形成具有特殊性能的柔性传感器。此方法能够制备出具有特殊性能的传感器，精度高，但工艺复杂，对环境条件要求苛刻，大规模生产难度较大。

MCNF 柔性压力传感器的制备工艺属于溶液浇铸法。其过程如下：首先，采用机械有限元法 (FEM) 优化微观结构尺寸参数，通过模拟不同尺寸参数下微观结构的力学行为，分析对传感器性能 (灵敏度、检测范围和稳定性等) 的影响，据此调整几何形状、尺寸和分布，达到最佳性能指标。接着，使用 PCB 基材模压 MWCNT/PU 导电复合材料制备活性层，将 MWCNT 与 PU 混合均匀后，置于加热的 PCB 基材上，施加压力使其紧密结合，形成均匀活性层，其厚度和均匀性可通过模压工艺参数精确调节。最后，制备叉指电极并将其与活性层结合，叉指电极采用导电性良好的金属材料，通过光刻等技术制作高精度图案，与活性层贴合并热压处理，形成良好的电气连接和物理结合，完成传感器制备。

图 23 MCNF 柔性压力传感器的制备工艺 (溶液浇铸法)

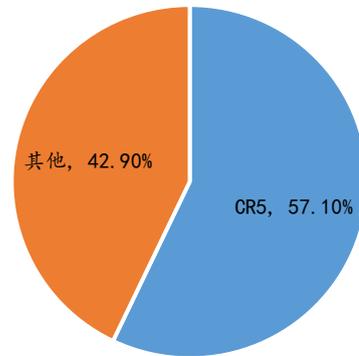


资料来源：麦姆斯咨询、湘财证券研究所

3.3 触觉传感器厂商梳理

全球柔性触觉传感器市场主要由外资品牌主导，行业集中度较高。根据市场研究数据，2023 年全球柔性触觉传感器市场的 CR5（前五大厂商市场占有率）为 57.10%，头部厂商包括 Novasentis、Tekscan、Japan Display Inc. (JDI)、Baumer 和 Fraba。在国内市场，柔性触觉传感器行业近年来发展迅速，部分企业凭借技术研发和市场应用优势逐渐崭露头角。代表企业包括纽迪瑞、汉威科技、钛深科技等。这些企业不仅在国内市场取得了一定份额，还在国际市场上展现出较强的竞争力。例如，帕西尼感知科技在 2024 年完成了数亿元的 A 轮及 A1 轮融资，刷新了全球触觉传感器公司的融资纪录。

图 24 全球柔性触觉传感器市场份额



资料来源：中国传感器网、湘财证券研究所

国内目前触觉传感器技术领先的企业主要为创业公司(帕西尼感知科技、纽迪瑞科技、钛深科技、奥迪威)，上市公司主要为汉威科技和申昊科技。这些公司在传感器技术领域各具特色和优势，涵盖了多维触觉、柔性压力、压电式等多种传感器技术，应用领域广泛，包括消费电子、机器人、汽车、医疗等。随着相关技术的不断成熟和市场对智能设备需求的增加，这些公司有望在各自的领域中取得更大的发展，尤其是在人形机器人、智能汽车等新兴市场中发挥重要作用。同时，它们也面临着技术竞争、市场推广等挑战，需要不断加大研发投入，提升产品质量和性能，以保持市场竞争力。

表 9 国内供应商柔性触觉传感器产品布局

供应商	相关产品	应用领域	产品进展
帕西尼感知科技	多维触觉传感器	3C 电子、车机产线、物流仓储、医疗康养、工业制造、商业服务等	产品已小批量应用于机器人、车机等场景
纽迪瑞科技	柔性压力传感器	消费电子、家居家电、汽车、机器人	产品已上市
钛深科技	柔性压电式传感技术	医疗、消费电子、机器人及汽车	获小米长江产业基金投资

汉威科技	柔性压力温度一体化传感器	消费电子、泛医疗、人形机器人等	子公司能斯达专注柔性微的传感器研发,与小米、比亚迪、宇树科技进行技术合作
申昊科技	电子皮肤	机器人	处于小批量适用的阶段
奥迪威	压电式电子皮肤技术	汽车、人形机器人	成立合资子公司奥感微(广州)科技有限公司,专注新型柔性传感器的研究、生产、销售

资料来源：水清木华研究中心、湘财证券研究所

4 视觉：使得机器人能够通过眼睛捕捉信息

4.1 视觉概述和技术分类

机器视觉，即视觉传感器技术，是一种利用机器替代人眼进行视觉识别和判断的技术。在工业生产中，机器视觉的引入主要目的是提高生产效率、降低误差率、减少成本，并将人力从重复性高或危险的工作环境中解放出来。根据图像数据的维度，机器视觉在工业中的应用主要分为二维(2D)和三维(3D)两大类，其核心功能包括物体识别、尺寸测量、精确定位以及质量检测等。其中，识别功能相对容易实现，而检测功能则更具挑战性。

二维(2D)技术主要用于获取平面图像，三维(3D)技术能够提供更全面的物体信息，并在二维空间内对目标进行定位和识别。二维(2D)技术主要用于获取平面图像，然而，2D技术无法提供物体的三维信息，例如高度和体积，且对光照条件和物体运动较为敏感，容易受到干扰。相比之下，三维(3D)技术能够提供更全面的物体信息，并在三维空间内实现目标的精确定位，从而支持更复杂的功能，如人脸识别、三维建模和复杂结构的检测。尽管3D技术在数据处理和存储方面仍面临一些挑战，但其在许多应用场景中展现出独特的优势，能够满足更高精度和更复杂任务的需求。

表 10 机器视觉化 2D 和 3D 技术对比

对比指标	2D	3D
产品形态	模块化设备	嵌入式设备
应用场景	一般固定	复杂多变
扫描精度	工业产线范围内	毫米级别
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、智能机器人

资料来源：奥比中光招股说明书、湘财证券研究所

按照成像原理，3D 视觉感知技术可划分为光学和非光学两大类。其中，光学方法因其技术成熟度高、应用场景广泛而占据主导地位。非光学方法（虽然在某些特定场景下具有独特优势，但整体应用范围相对较窄。光学类技术涵盖了飞行时间（ToF）法、结构光法、双目立体视觉、激光扫描法等多种方法；非光学类技术则包括基于运动的形状恢复、基于阴影的形状推断等。此外，还有一些新兴的 Shape-from-X 方法不断涌现，为 3D 视觉感知技术的拓展提供了更多可能性。

表 11 主流 3D 感知技术对比

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
TOF	iToF	<3.5m	中	手机前置、后置、扫地机器人、AR/VR、门禁等
	dToF	<5m	低	手机后置、平板后置、扫地机器人等
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
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	20mm-30m	极高	极高	高精度工业测量，材料、结构检测

资料来源：奥比中光招股说明书、湘财证券研究所

ToF 技术分为直接飞行时间（dToF）和间接飞行时间（iToF）两种。dToF 原理较为简单，通过发射光脉冲并测量反射光与发射光之间的时间间隔来计算飞行时间。其核心是高精度的计时器，当发射光脉冲时启动，接收到反射光时停止，从而记录往返时间。dToF 常用于单点测距，但由于亚纳秒级电子计时器的实现难度较大，其成本和技术门槛较高。目前，dToF 多采用单光子雪崩二极管（SPAD）结合技术，以精确检测光子的时间和空间信息，实现三维场景重构。然而，dToF 的精度受限于计时器和脉冲信号的精度，且 SPAD 的制作工艺复杂，成本较高，因此多数厂商更倾向于推进 iToF 技术。iToF 原理相对复杂，发射的是调制光，通过检测反射调制光与发射光之间的相位差来间接计算飞行时间，从而估算距离。iToF 不需要高精度计时器，而是通过时间选通光子计数器或电荷积分器来实现像素级测量，计算工作量和硅面积需求较小，更适合大规模应用。

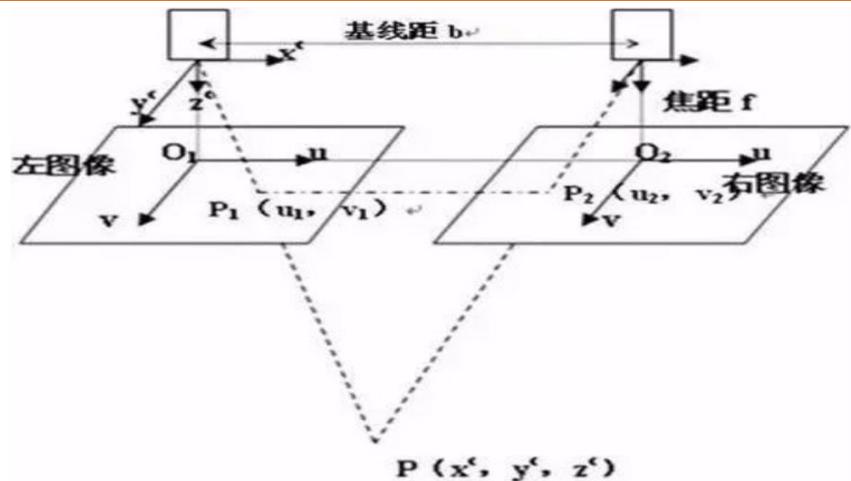
表 12 dToF 和 iToF 对比

	dToF	iToF
基本原理	直接测量飞行时间	通过相位差的方式间接得到飞行时间
核心组件	SPAD 单光子雪崩传感器	iToF CIS 传感器
探测距离和探测精度	探测距离可以较远，主要原因是其精度不随距离下降	随着探测距离增加，探测精度随之下降
空间图像分辨率	空间图像分辨率较低	较高的像素数量
抗干扰能力	抗干扰能力较强	更容易收到干扰
工艺	工艺难点在 SPAD 的获得和 TDC 电路的制造商	工艺类似于传统手机内照相机系统工艺，相对简单

资料来源：超光、湘财证券研究所

双目立体视觉技术基于模拟人类双眼视觉的原理，通过两个相机从不同视角捕捉同一物体的图像，从而获取物体在不同视角下的视差信息。这种视差反映了物体与相机之间的距离关系，即物体越靠近相机，视差越大；物体越远离相机，视差越小。利用三角测量原理，结合已知的相机位置和参数，可以精确计算出物体到相机的距离，进而重建出物体的三维结构。例如，当我们把手指放在鼻尖前方时，左右眼看到的手指位置会有明显差异，这种差异正是双目立体视觉所利用的视差现象。

图 25 双目立体视觉原理和结构



资料来源：视觉系统设计、湘财证券研究所

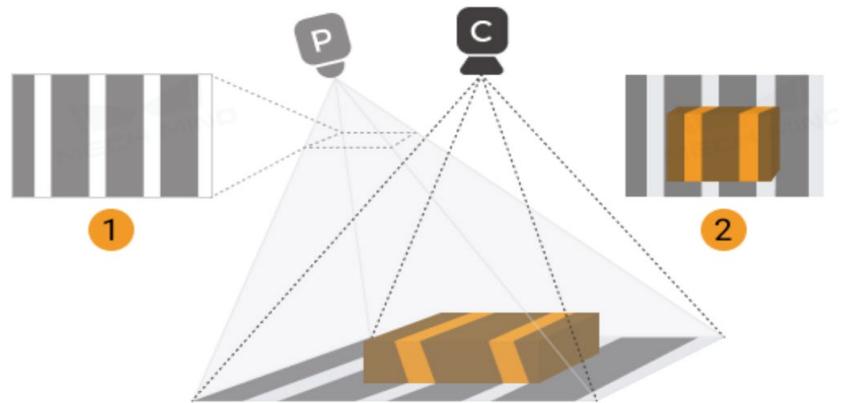
双目立体视觉技术的优势明显，但是也存在一些局限性。双目立体视觉技术的优势在于其高 3D 成像分辨率、高精度以及较强的抗强光干扰能力，同时能够保持较低的成本。然而，该技术也存在一些局限性。首先，其深度和幅度信息的获取依赖于复杂的算法，需要大量的 CPU 或 ASIC 运算来实现，这增加了技术实现的难度。其次，双目立体视觉对环境光照条件较为敏感，容易受到光照强度变化的干扰，且对物体表面纹理的依赖性较强。如果被拍摄物体表

面缺乏明显纹理，或者在暗光环境下拍摄，双目立体视觉技术的匹配效果会大打折扣，难以准确获取深度信息。

结构光法是一种基于主动双目视觉的三维成像技术。结构光法核心原理是利用近红外激光器将具有特定结构特征（如离散光斑、条纹光或编码结构光）的光线投射到目标物体表面，随后通过专用红外摄像头捕捉物体表面因结构光畸变而形成的图像。通过分析采集到的图像与原始结构光图案之间的形变差异，计算出每个像素的视差，从而重建出物体的三维结构。这一过程本质上类似于双目立体视觉，其中红外激光器和摄像头分别扮演左右眼的角色，通过光学手段获取物体的三维信息，并进一步应用于更广泛的场景。

结构光技术与双目立体视觉相比具有显著优势。首先，在暗光环境下，结构光技术依然能够正常工作。这是因为其红外激光器作为主动光源，能够直接照亮被扫描物体，而不像双目技术那样依赖环境光照。其次，结构光技术能够在表面平整、缺乏明显纹理的物体上实现深度扫描，从而准确测量物体的三维深度信息。这使得结构光技术在处理复杂物体表面时更具适应性和可靠性。

图 26 结构光技术原理图

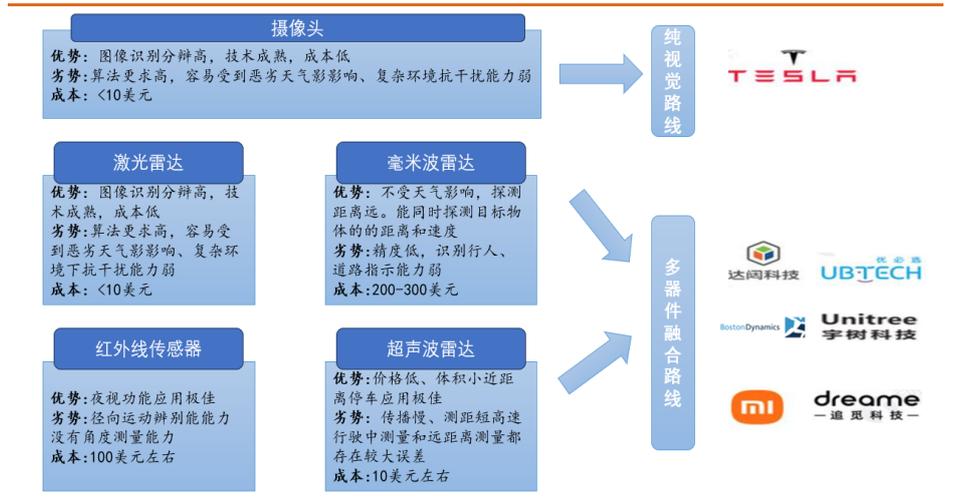


资料来源：Mech-Eye 工业级 3D 相机手册、湘财证券研究所

4.2 人形机器人的主流方案为 3D 视觉，未来空间较大

目前人形机器人的主流方案为 3D 视觉。特斯拉 Optimus 机器人的 3D 传感模块以多目视觉为主，波士顿动力 Atlas 采用激光雷达+深度相机，优必选 WALKERX 采用基于多目视觉传感器的 3D 视觉定位，小米 CyberOne 机器人所搭载的 Mi-Sense 深度视觉模组是由小米设计，欧菲光协同开发完成，其机器人视觉深度相机模块主要由 iToF 模组、RGB 模组、可选的 IMU 模块组成。

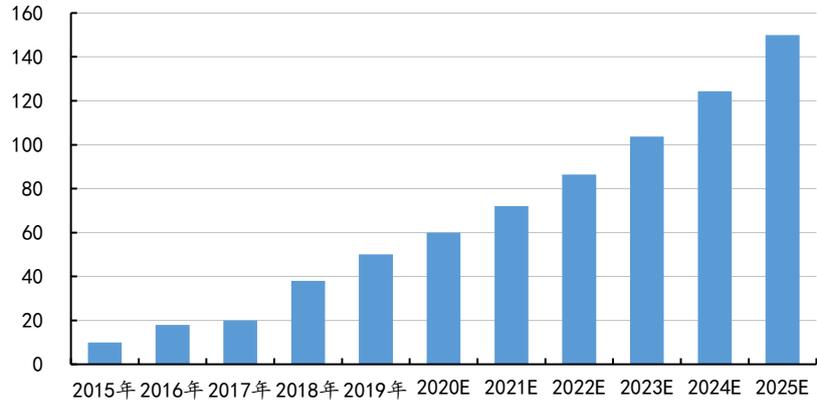
图 27 人形机器人企业视觉方案对比



资料来源: 前瞻经济学人、湘财证券研究所

全球 3D 视觉传感器市场正迎来快速增长期, 预计 2025 年市场有望达 150 亿美元。2019 年, 全球 3D 视觉感知市场规模约为 50 亿美元, 预计到 2025 年将达到 150 亿美元, 2019-2025 年期间的复合增长率约为 20%。这一增长主要得益于机器人、汽车自动驾驶等下游需求的持续扩张, 尤其是人形机器人产业的快速发展, 为 3D 视觉传感器市场带来了新的增长机遇。

图 28 全球 3D 视觉感知市场规模(单位: 亿美元)



资料来源: 前瞻经济学人、湘财证券研究所

4.3 海外厂商地位领先，国产逐渐打开市场

全球 3D 视觉传感器市场，海外头部厂商占据先发优势，国内产商逐渐打开市场。在全球 3D 视觉传感器市场中，海外头部厂商凭借芯片自制和成熟的产品体系，业务规模较大，占据了显著的先发优势。然而，国内厂商正通过多技术布局和芯片自研逐渐打开市场。例如，国内代表企业奥比中光通过自研芯片，在 3D 视觉传感器的部分技术指标上已逐渐接近海外龙头厂商。未来，随着技术的不断进步和市场需求的持续增长，国内厂商有望在 3D 视觉传感器领域实现更广泛的国产替代。

表 13 主流视觉传感器厂商梳理

公司	主要技术	市场地位	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，在手机、平板以及 VR、AR 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 STMicroelectronics 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
微软	结构光 iToF	微软的 3D 视觉传感器以及配套的算法服务（如骨架，云计算等）在开发者及学术领域有着高知名度	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）
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
华为	结构光 iToF	国内领军的高科技企业，在智能手机 3D 视觉传感器领域投入程度领先其他制造商	1. 芯片自主性：未公布，拥有自己设计芯片的能力，同时还支持第三方的 iToF 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：高于百万级其他：有手机、平板等终端产品线做依托
瑞芯微	结构光	瑞芯微的结构光 3D 视觉传感器刚刚对外公布不久，属于新兴的、潜在的竞争对手	芯片自主性：通用型计算芯片自主设计（非专用 3D 视觉感知芯片）
华捷艾米	结构光	近年来主要服务于腾讯支付体系，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

资料来源：奥比中光招股说明书、湘财证券研究所

5 投资建议

视觉、力觉和触觉传感器是人形机器人的核心部件，其成本占比较高，它们使机器人能够感知环境、实现精准操作与智能交互，对提升机器人智能化水平具有重要意义。随着人形机器人技术的发展，传感器需求持续攀升，展现出巨大的市场潜力。目前，全球传感器市场主要由外资品牌主导，但国内企业正逐渐崭露头角，通过不断的技术创新，在部分技术指标上逐渐接近海外龙头厂商，并在国内市场上展现出较强的竞争力。随着人形机器人技术的不断成熟和应用场景的拓展，视觉、力觉和触觉传感器的需求有望迎来大幅增长，相关产业链标的有望受益，因此我们对机器人行业维持“增持”评级。

6 风险提示

机器人销量不及预期。产品技术突破受阻风险。行业竞争风险。传感器技术发展不及预期的风险。宏观经济波动风险。