



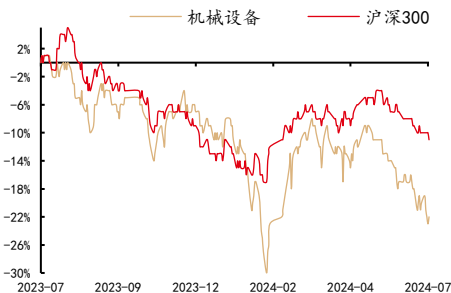
行业投资评级

强于大市|维持

行业基本情况

收盘点位	1212.59
52周最高	1583.67
52周最低	1090.08

行业相对指数表现(相对值)



资料来源：聚源，中邮证券研究所

研究所

分析师:刘卓
SAC 登记编号:S1340522110001
Email:liuzhuo@cnpsec.com
研究助理:傅昌鑫
SAC 登记编号:S1340123050006
Email:fuchangxin@cnpsec.com

近期研究报告

《出海系列专题(2):高空作业平台-掘金欧美市场,出海空间广阔》-
2024.07.01

力传感器——高价值量零部件，人形拉动广阔需求空间

● 投资要点

力传感器在人形机器人领域具备巨大增量应用空间。以特斯拉 Optimus 为例,力传感器能助力人形机器人实现触觉感知及精准操作,多维力传感器在人形机器人领域中主要作用有三方面:力控制、平衡稳定控制、安全防护控制。人形机器人上会组合使用各类力传感器以满足不同的控制需求。其中少部分位置已经开始使用六维力传感器,它们在不同部位的安装可以显著提升机器人的操作性能和稳定性。预测 2027E/2030E 人形机器人产量突破 20.27/122.36 万台时,人形机器人领域带来力传感器的增量市场规模为 141.70/560.81 亿元。

力传感器结构特点、行业及市场格局解析。力传感器是一种检测和度量力/力矩的装置,由力敏元件、转换元件和信号处理单元等具体元件组成,按照测量维度的不同,可以分为一维至六维力传感器,最常见的是一维、三维和六维。根据测量原理不同,可以分为光电式、应变式、电容式、压电式等类型,应变式为主流。力传感器产业链上游主要为材料类、元器件及组件类、生产或检测设备等行业,中游主要为力传感器的加工制造和封装检测,下游应用领域广泛,可应用于工业、消费电子、汽车电子、机器人、医疗、航空航天等领域。目前六维力/力矩传感器市场基数依然偏小,尚未形成明显规模效应。从价值量较高的六维力矩传感器市场来看,国外老牌厂商众多,但受益于机器人市场需求催化,中国市场近年来入局者也在逐年增加,国产厂商正逐步追赶。

六维力传感器的核心技术壁垒在于对精度、准度及串扰性能的提升,未来降本空间大。六维力传感器不光形态多,研发难度也非常大。其主要性能参数包括:量程、过载能力、分辨率、重复精度、串扰、准度等,其中体现六维力/力矩传感器综合性能的关键指标是串扰、精度和准度。降低多维力传感器耦合误差的策略大体上可分为结构性解耦和算法性解耦。为了能够达到更高的精度和准度,需要在传感器标定和检测过程中采用六维联合加载的方式,然而六维联合加载设备需自行研制,技术门槛较高。另外,六维力传感器还存在全方位机械过载保护、温度漂移和稳定性控制、多通道信号及实时数据处理和传感器融合等技术壁垒。六维力传感器单价较高,其成本中应变片、人工成本占比较高,未来有望随着市场基数扩大从而有效降本。

产业链相关标的:坤维科技、宇立仪器、鑫精诚传感器、柯力传感、昊志机电、安培龙

● 风险提示:

人形机器人规模化不及预期风险;六维力传感器技术路径变化风险;产品降价程度不达预期风险。

目录

1 人形机器人的触觉实现.....	4
1.1 力传感器助力人形机器人实现触觉感知及精准操作.....	4
1.2 力传感器在人形机器人中的具体应用	5
2 解析力传感器行业.....	7
2.1 什么是力传感器.....	7
2.2 力传感器的具体分类.....	9
2.3 力传感器产业链解析.....	11
2.4 六维力传感器市场格局.....	12
2.5 六维力传感器的核心参数及技术问题.....	14
2.6 六维力传感器成本分析.....	19
3 产业链相关标的.....	20
4 风险提示.....	22

图表目录

图表 1: Optimus 处理传递鸡蛋等精细物体.....	4
图表 2: Optimus 在特斯拉工厂娴熟分装电池.....	4
图表 3: 多维力传感器技术应用.....	5
图表 4: 多维力传感器适用于人形机器人的关节、手腕、脚踝、灵巧手等部位.....	6
图表 5: 人形机器人领域带来的力传感器增量市场情况测算.....	7
图表 6: 人形机器人具身智能架构.....	8
图表 7: 六维力矩传感器结构示意图.....	9
图表 8: 一维、三维、六维力传感器作用示意及产品图.....	10
图表 9: 力传感器按测量原理分类.....	10
图表 10: 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.....	11
图表 11: 力传感器产业链情况.....	12
图表 12: 2017-2027E 我国六维力传感器销量及同比.....	12
图表 13: 2017-2027E 我国六维力传感器行业规模及同比.....	12
图表 14: 全球六维力/力矩传感器主流厂商.....	13
图表 15: 国内市场厂家竞争格局情况.....	13
图表 16: 2023 年中国市场六维力传感器厂商营收占比.....	14
图表 17: 2020-2023 国内市场内外资出货占比.....	14
图表 18: 对六维力矩传感器产品的串扰指标测定情况.....	15
图表 19: 精度和准度的统计意义.....	17
图表 20: 一维、六维力传感器标定的样本空间示意图.....	17
图表 21: 六维力传感器的样本空间（紫色-检测样本点；黄色-标定样本点）.....	18
图表 22: 美国（左）、德国（中）、以色列（右）的六维力传感器标定及检测设备.....	19

1 人形机器人的触觉实现

1.1 力传感器助力人形机器人实现触觉感知及精准操作

去年年底，特斯拉发布了关于其人形机器人 Optimus 最新的迭代升级，着重凸显了 Gen2 在操作技能上的显著提升。到今年 5 月，特斯拉又发布了 Optimus 在其工厂“打工”的演示视频，工作中 Optimus 仅依靠 FSD、2D 摄像头、手部的触觉和力传感器，就能够执行较为复杂、精细的操作任务，其先进的力感应技术大大增强了它在实际应用场景中的灵活性和稳定性。视频中有几处亮点同力传感器息息相关：

精准抓握： Optimus Gen2 能够轻柔而精确地抓取和放下鸡蛋，这展示了它在精细操作方面的卓越能力。力传感器的应用使得机器人能够感知并调整握力，避免对易碎物品造成损害；

物体传递： 机器人能够流畅地将物品从一只手转移到另一只手，这一过程需要精确的力度控制和协调能力。力传感器帮助机器人在转移过程中感知和调整力度，确保物品的平稳过渡；

深蹲动作： Optimus Gen2 能够执行标准的 90 度深蹲动作，这要求机器人的多个关节协同工作，保持身体的平衡。力传感器在此过程中协助机器人感知身体各部位的受力情况，以维持姿势的稳定；

步态调整： 机器人能够根据需要调整其行走速度，这表明它具备适应不同环境的能力。力传感器在此过程中监测足部与地面的接触力度，并帮助机器人调整步伐，以适应不同的行走条件；

足部与腿部设计： Optimus Gen2 的足部和腿部设计模仿了人类的结构，这使得它能够在多变的地形上自如行走。力传感器在此帮助机器人感知地面的质地和凹凸不平，从而调整步伐和保持平衡。

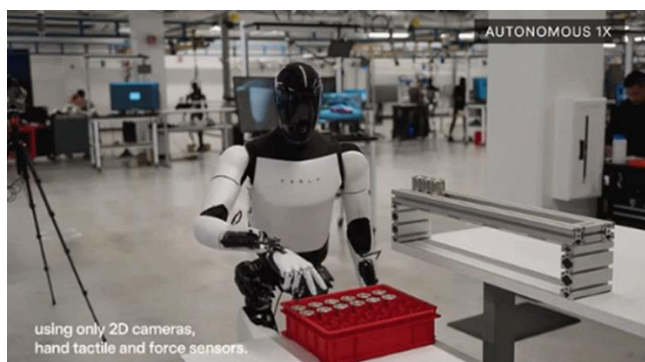
通过这些展示，Optimus Gen2 证明了其在力控制和感知方面的先进技术，预示着未来机器人在各种工作环境中的应用潜力。

图表1: Optimus 处理传递鸡蛋等精细物体



资料来源：澎湃新闻，中邮证券研究所

图表2: Optimus 在特斯拉工厂娴熟分装电池

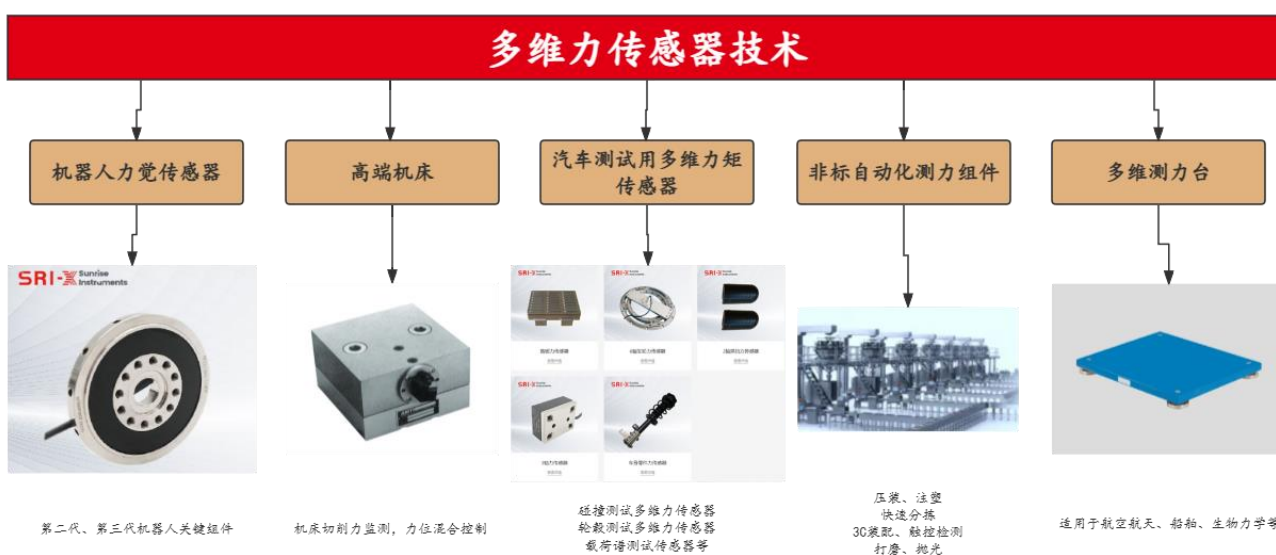


资料来源：澎湃新闻，中邮证券研究所

1.2 力传感器在人形机器人中的具体应用

多维力测量技术属于一种多功能平台技术，它能够根据不同的应用环境、负载需求、安装条件、通信方式、计算能力以及动力学属性等因素进行调整，以适应各种不同的应用场景。在各个领域中，力传感器的形态和特性都表现出明显的差异。当前六维力传感器被广泛应用于汽车行业的碰撞测试、轮毂、座椅等零部件测试，以及航空航天、生物力学、医疗康复、科研实验、机器人和自动化技术等领域。

图表3：多维力传感器技术应用



资料来源：宇立仪器，赢富仪器，测恒电子，GGII，中邮证券研究所

力传感器可以按照测量维度分为一至六维力传感器，能测几个维度就是几维力传感器。一维、三维和六维力传感器最常见，二维和五维的力传感器较少见。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，因此六维力传感器的技术难度和使用难度都相对较大。人形机器人领域，六维力传感器已成为高性能人形机器人的标配，通常安装在手腕、脚腕、足底或手部，在运控规划、姿态调整、力度感知等中起到重要作用，以提升手部操作的灵活性以及脚部行走的稳定性，提升人形机器人在复杂环境中的自主性和适应性，可以在碎石、地砖、厚地、草坪等不平整地面上稳定快速行走，通过全新的脚掌姿态控制算法以及柔性自适应多种地面。目前特斯拉 Optimus、优必选 Walker X、达闼科技的小紫 XR-4、美国宇航局的 Valkyrie 等，都已采用六维力传感器来提升机器人的性能。

六维力传感器在人形机器人领域中主要作用有三方面：

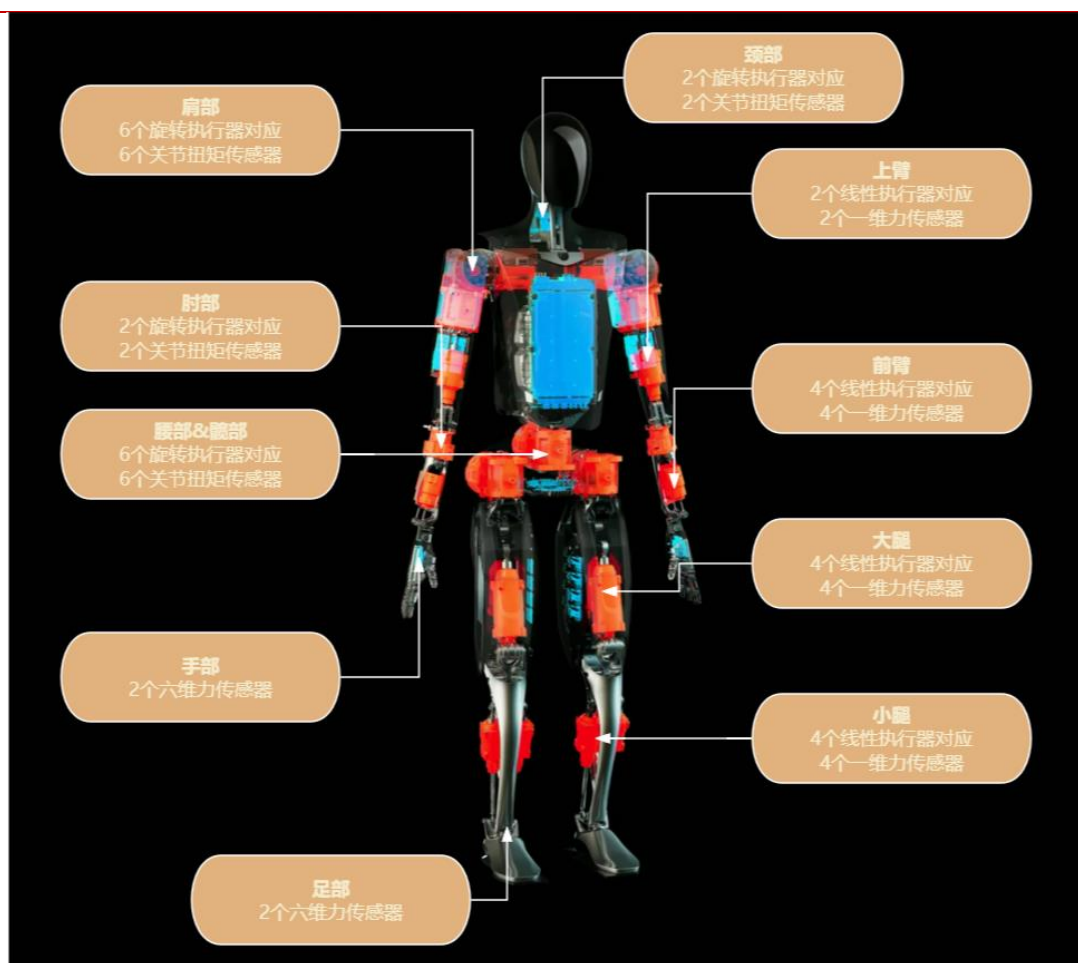
力控制——要求机器人的手臂能够精准地完成如抓取、组装和轻触等细致繁琐的力控制任务。六维力传感器能够检测并反馈手臂对物体施加的力和扭力并传给机器人控制系统，确保“大脑”能够进行准确的调整。

平衡稳定控制——在人形机器人行走时，为了维持稳定性，六维力传感器同样发挥着关键作用。它能够测量机器人脚部受到的地面反作用力，使控制系统能够相应地调整机器人的手臂和身体姿态，以保持平衡。

安全防护控制——六维力传感器在安全防护系统中也扮演着重要角色，能够在机器人执行潜在危险操作或人类靠近时自动触发停止机制，以防止对人员造成伤害。

此外，人形机器人还可能使用三维力传感器、关节扭矩传感器或一维拉力传感器，同时有些也会用到触觉传感器、电子皮肤等。多维力传感器的组合使用是指，人形机器人应用上同时使用三维力传感器、关节扭矩传感器或一维拉力传感器，以满足不同的控制需求。如特斯拉 Optimus 目前在各类执行器中均有应用一维或关节扭矩传感器，未来可能还会在脚趾部位增加一维力传感器，获取更多点信息，以便适应更加复杂的地面场景。除了力传感器，人形机器人还可能集成触觉传感器和电子皮肤，以提供更全面的环境感知能力。

图表4：多维力传感器适用于人形机器人的关节、手腕、脚踝、灵巧手等部位



资料来源：Tesla，中邮证券研究所

上图是各类力传感器在人形机器人各部位上的应用情况，其中少部分位置已经开始使用六维力传感器，目前的比例是一台人形机器人对应 4 个六维力传感器的需求量。六维力传感器在人形机器人中扮演着至关重要的角色，它们在不同部位的安装可以显著提升机器人的操作性能和稳定性。例如，安装在手腕部位的传感器能够辅助机器人进行精细的手部操作，如抓握、搬运和装配等任务，极大地增强了手部的灵活性和精确度。增强了机器人在需要柔顺控制场景中的适应性，使得机器人能够更加灵活地与环境互动。同时，在脚腕或足底安装的六维力传感器，让机器人在行走和平衡控制时能感知地面的反作用力，进而调整手臂和身体姿态，从而提高行走的稳定性。

六维力传感器所提供的数据，对于机器人的运动控制规划同样至关重要，它们帮助机器人更有效地规划动作，避免碰撞和损伤。在机器人进行姿态调整时，这些传感器能够提供关键的反馈信息，确保机器人能够保持平衡和稳定。不仅如此，六维力传感器赋予了机器人对力度的感知能力，在需要精确控制力度的应用中发挥着重要作用，使得人形机器人在与外界物体交互时能够更加精准和安全。通过这些传感器的集成应用，人形机器人的整体性能得到了显著提升，无论是在工业自动化还是服务领域，都能展现出更高的效率和可靠性。

图表5：人形机器人领域带来的力传感器增量市场情况测算

	2024E	2025E	2026E	2027E	2028E	2029E	2030E
全球人形机器人总需求（万台）	0.30	1.19	4.55	20.27	37.16	64.66	122.36
六维力矩传感器单价（元/支）	25000	17500	12250	9800	7840	6272	5018
单台机器人用量（支）	4	4	4	4	4	6	6
单台机器人价值量（元/台）	100000	70000	49000	39200	31360	37632	30106
（关节）一维力/力矩传感器单价（元/支）	2000	1600	1280	1024	819	655	524
单台机器人用量（支）	30	30	30	30	30	30	30
单台机器人价值量（元/台）	60000	48000	38400	30720	24576	19661	15729
人形领域带来力传感器增量市场规模（亿元）	4.80	14.08	39.78	141.70	207.88	370.45	560.81

资料来源：中邮证券研究所预测

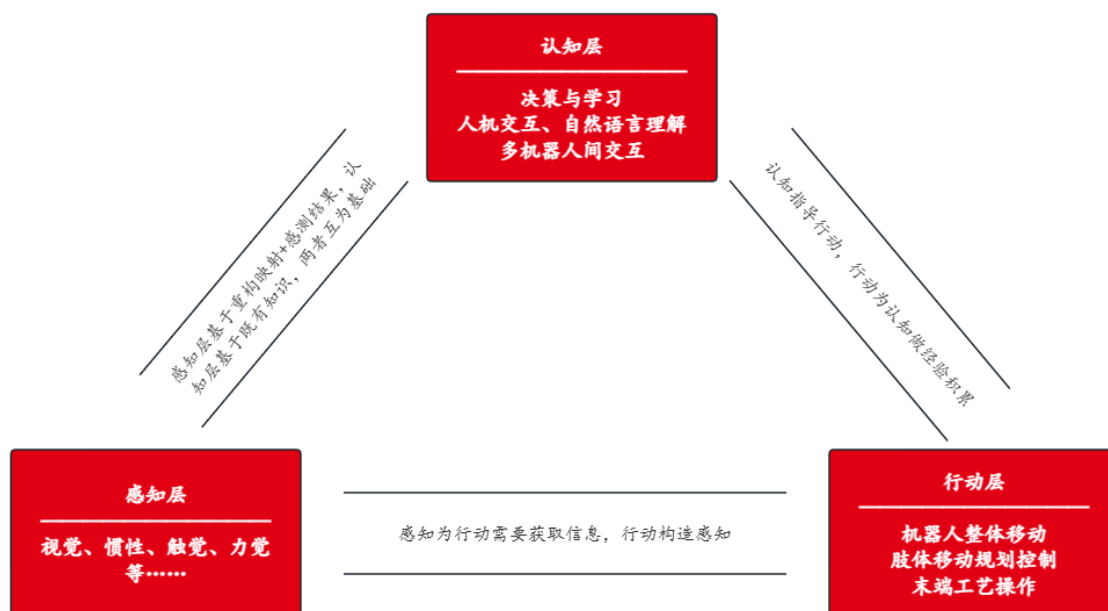
我们大致估计单台人形机器人可能应用 4 支六维力矩传感器以及 30 支（关节）一维力/力矩传感器，后续随着人形机器人规模上量，单价较贵的六维力矩传感器有望实现快速降本。结合系列报告中对于人形机器人总需求的预测数据，可得人形机器人量产后有望带给多维力传感器以巨大增量空间，2027E/2030E 人形机器人产量突破 20.27/122.36 万台时，人形机器人领域带来力传感器的增量市场规模为 141.70/560.81 亿元。

2 解析力传感器行业

2.1 什么是力传感器

力/力矩/力觉传感器是一种检测和度量力/力矩的装置，它能够将作用在其上的力转换为电信号或其他形式的信号，以便于信息的收集、传输、处理、分析和显示。这里我们将力、力矩、力觉传感器统称为力传感器，力传感器在工业自动化、机器人技术、医疗设备、交通运输等多个领域都有广泛应用。

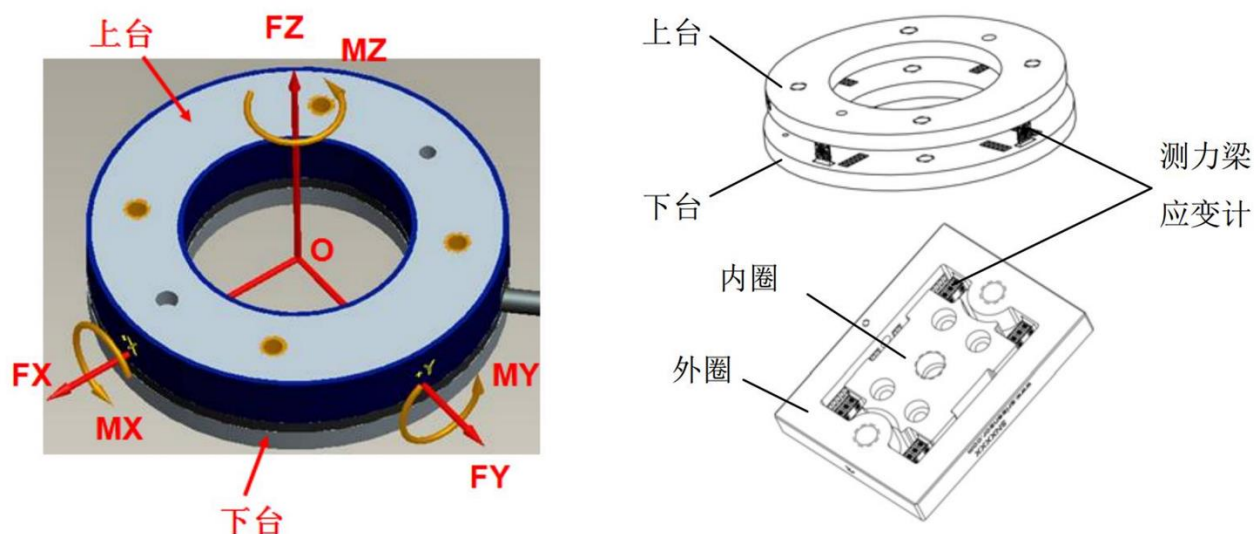
图表6：人形机器人具身智能架构



资料来源：中邮证券研究所

力传感器主要包括本体单元和应变/形变检测系统两大部分，由力敏元件、转换元件和信号处理单元等具体元件组成，能将检测感受到的信息，按一定规律变换成为电信号输出，以满足信息的传输、处理、存储、显示、记录和控制等要求。当有力作用时，力施加于传感器本体单元上，并引起本体单元的应变或形变，检测系统（应变片或光学系统）可感知本体的应变或形变，通过电路将其转化为相应电压，继而通过测量电压值来表征力的大小，并转换成可用输出信号，最终实现力的测量。

在组成元件中，力敏元件指力传感器中直接感受或相应被测量的部分，转换元件指力传感器中能将力敏元件感受或相应的被测量转换成适于传输或测量的电信号部分。例如应变式力传感器的力敏元件是弹性敏感元件（弹性体），常见的弹性体材料有铝合金、合金钢和不锈钢，转换元件为贴在弹性体上的应变片（计），如电阻应变片，信号处理单元一般为电路，包括漆包线、PCB板等，应变片在电路中充当电阻。

图表7：六维力矩传感器结构示意图


资料来源：俊德科技，中邮证券研究所

2.2 力传感器的具体分类

按照测量维度的不同，可以分为一维至六维力传感器，每种类型的传感器根据其测量的力的方向和作用点的不同，适用于不同的应用场景：

一维力传感器：这种传感器只能测量沿一个特定方向的力。适用于力的方向和作用点固定不变的情况，例如简单的称重或压力测量。代表产品有称重传感器、压力传感器等。

三维力传感器：能够测量三个正交方向上的力，通常是X、Y和Z轴方向。适用于需要测量空间中任意方向力的场景，例如机器人的力控制。

六维力传感器：是一种特殊的力传感器，能够同时测量三个正交力和三个正交扭矩。这种传感器是维度最高的力觉传感器，能够提供最全面精准的力觉信息。六维力传感器适用于需要精确控制和感知复杂交互力的应用，如机器人手术、精密装配、拖动示教等。

最常见的一维、三维和六维力传感器，二维（测量两个正交方向上的力，通常是水平和垂直方向）、四维（在三维力传感器的基础上增加了对某一方向力矩的测量）和五维（测量三个正交力和两个正交力矩）的力传感器较少。

图表8：一维、三维、六维力传感器作用示意及产品图

分类	一维力传感器	三维力传感器	六维力传感器
力的方向及作用点	力的方向和作用点固定	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	力的方向和作用点都在三维空间内随机变化
示意图	 <p>O——力传感器标定参考点 P——力的作用点 OXYZ——传感器标定坐标系</p>	 <p>O——力传感器标定参考点 P——力的作用点 OXYZ——传感器标定坐标系</p>	 <p>O——力传感器标定参考点 P——力的作用点 OXYZ——传感器标定坐标系</p>
产品图			

资料来源：坤维科技，瑞思特，中邮证券研究所

根据其测量原理不同，力传感器可以分为光电式、应变式、电容式、压电式等类型。每种类型的力传感器都有其特定的优势和局限性，选择哪种类型的传感器通常取决于应用的具体需求，包括测量范围、精度、响应时间、成本和环境条件等。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。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。随着相关研究的不断深入，不同测量机理的传感器将会发挥自身优势被应用到各种场合，进而推动六维力传感器向多元化方向发展。

图表9：力传感器按测量原理分类

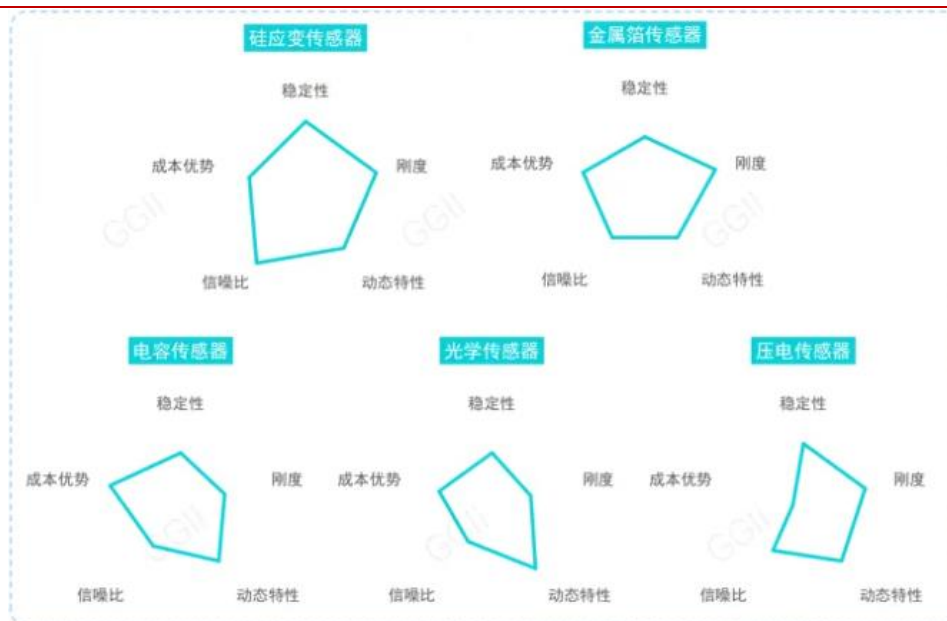
分类	应变式	压电式	电容式	光学式
原理及特点	通常采用的是硅应变片或金属箔，本质是材料本身发生形变进而转化为阻值变化	电容是通过极距的变化导致电压变化，压电则是通过形变改变电荷		通过光纤、光栅反映形变，再转化成为力
优点	精度高、技术成熟 测量范围广、成本低 频响特性好	动态响应好 精确性好、分辨率高 结构紧凑、尺寸小、刚度强	高灵敏度和高分辨率、频率范围宽 结构简单、环境适用性强	可靠性高 测量范围广 抗电磁干扰能力强
缺点	生产工艺复杂 金属箔式应变计输出微弱	存在电荷泄露 静态力测量困难	调理电路复杂 寄生电容影响大	对测试环境要求高 刚性偏弱
代表厂商	ATI、宇立仪器、坤维科技、鑫精诚、蓝点触控、海伯森、神源生智能、Sintokogio、Bota Systems AG、SCHUNK、埃力智能、ME-MeBsysteme GmbH等	Robotiq、Robotous、WACOH-TECH、Kistler等		OnRobot、松果体、华力创等

资料来源：GGII，中邮证券研究所

应变式力检测器是依靠材料在受压时产生的形变来测量力量的装置。一般而言，应变片（一种敏感元件）被固定在基底材料表面，当基底因受力而发生形变时，应变片的电阻值会相应改变，通过监测这一电阻变化，可以确定施加的力量大小。这种传感器因其出色的稳定性、高刚性、高信噪比、精确度、经济性和操作便利性，在工业自动化、机器人技术以及多种测试设备中被广泛采用。

应变式力传感器根据应变片的类型，可以划分为金属电阻型应变片（如工具钢、不锈钢、铝合金或铍铜等材料）或硅（半导体）应变片力传感器，后者在性能上往往更优越。半导体应变片因其高灵敏度和迅速的响应速度，在需要精细测量微小力量的场合中极为有用，如精密仪器、微电子设备和生物学工程等领域。而金属应变片则因其稳定性和耐用性，在工业环境中的力量测量中更为合适。在挑选力传感器时，应根据具体的应用需求和环境条件来决定选用哪种类型的应变片。例如，如果应用场景需要在高温或恶劣条件下工作，金属应变片可能是更佳的选择；若需要测量微小力量或实现高精度控制，则硅基应变片可能更符合需求。

图表10：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



资料来源：GGII，中邮证券研究所

2.3 力传感器产业链解析

力传感器的设计和制造涉及力学、材料科学、电子工程等多个技术领域。以应变式传感器为例，力传感器产业链上游主要为材料类、元器件及组件类、生产或检测设备等行业，中游主要为力传感器的加工制造和封装检测，下游应用领域广泛，可应用于工业、消费电子、汽车电子、机器人、医疗、航空航天等领域。

图表11：力传感器产业链情况

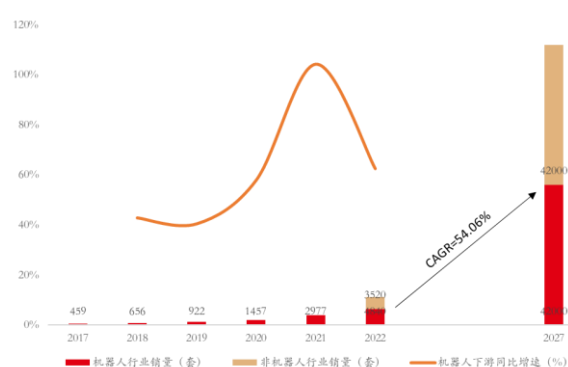
上游		中游	下游
材料类			工业
钢材	铝材		
箔材	半导体材料	加工制造	汽车/消费电子
...			
元器件及组件			机器人
弹性体	应变片	封装检测	医疗
芯片	底座/板		
导线	...		航空航天
生产及检测设备		

资料来源：柯力传感招股书，中邮证券研究所

2.4 六维力传感器市场格局

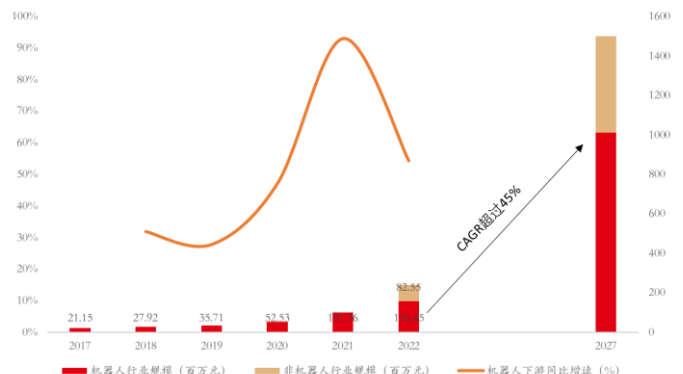
六维力/力矩传感器市场基数依然偏小，尚未形成明显规模效应。根据 GGII 数据显示，2022 年中国市场六维力/力矩传感器销量 8360 套，同比增长 57.97%，其中机器人行业销量 4840 套，同比增长 62.58%。GGII 预计，到 2027 年中国市场六维力/力矩传感器销量有望突破 84000 套，其中机器人行业销量有望突破 42000 套，复合增长率超过 54%；2022 年中国六维力/力矩传感器市场规模 2.39 亿元，同比增长 52.04%，其中机器人行业六维力/力矩传感器市场规模 1.56 亿元，同比增长 54.35%。GGII 预计，2027 年中国六维力/力矩传感器市场规模将超过 15 亿元，复合增长率超过 45%。随着入局者的持续增加，叠加下游细分市场认知的逐年提升以及应用领域的拓展，六维力/力矩传感器有望进入高速增长期，期间将伴随多技术路线产品矩阵的完善、产品价格的下降以及国产化率的提升。

图表12：2017-2027E 我国六维力传感器销量及同比



资料来源：GGII，中邮证券研究所

图表13：2017-2027E 我国六维力传感器行业规模及同比



资料来源：GGII，中邮证券研究所

从价值量较高的六维力矩传感器市场来看，国外老牌厂商众多，但受益于机器人市场需求催化，中国市场近年来入局者也在逐年增加。从代表企业的分布来看，全球六维力传感器主要分为日韩地区、欧美地区和国产地区三大阵营，各阵营企业呈现不同的配套特点：

日韩地区：六维力传感器的制造商主要配套当地机器人本体厂商，如韩国企业 Robotous、Aidin Robotics 的主要合作厂商包括 Doosan Robotics、Neuromeka 和 RainbowRobotics；日本企业 SINTOKOGIO 和 WACOH-TECH 的主要合作厂商包括发那科、电装、三菱、那智不二越、安川等，EPSON 的六维力传感器则主要配套其自己的工业机器人使用。

欧美地区：六维力传感器的制造商主要分为两大类：一类是传统的传感器制造商，另一类是专注于机器人末端执行器的厂商。在传统传感器领域，知名的品牌包括 ATI、BotaSystems AG、ME-Meßsysteme GmbH、AMTI 和 Kistler 等。而在机器人末端工具领域，全球领先的制造商有 SCHUNK、OnRobot 和 Robotiq 等。欧美的六维力传感器制造商通常与协作机器人的生产商进行合作，其中一些知名的合作客户包括优傲机器人 (Universal Robots)、达明机器人 (Daewoo Robotics) 和欧姆龙 (Omron) 等。

中国地区：宇立仪器、坤维科技、鑫精诚等位于第一梯队，各家厂商下游应用的侧重有所差异。宇立在工业机器人磨抛行业和汽车碰撞测试行业应用更多；坤维科技在协作、医疗手术/检测和康复机器人领域具备明显优势，同时其产品在航空航天领域具备行业核心竞争力；鑫精诚凭借苹果供应商的身份已将其产品推入到 3C 行业，同时在机器人行业和医疗行业也有布局。其他国产六维力传感器厂商也在逐渐成长，如海伯森、蓝点触控、神源生智能、瑞尔特等，均已有相关产品落地并进入产业化应用。其他厂商如重庆鲁班机器人技术研究院、埃力智能等，通过自主研发力传感器技术，已经具备六维力/力矩传感器的生产能力，部分产品型号开始进入下游用户的验证测试阶段。

图表14：全球六维力/力矩传感器主流厂商



资料来源：GGII，中邮证券研究所

图表15：国内市场厂家竞争格局情况

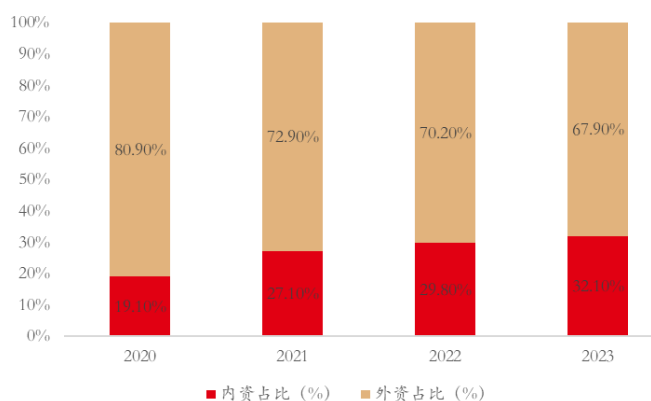
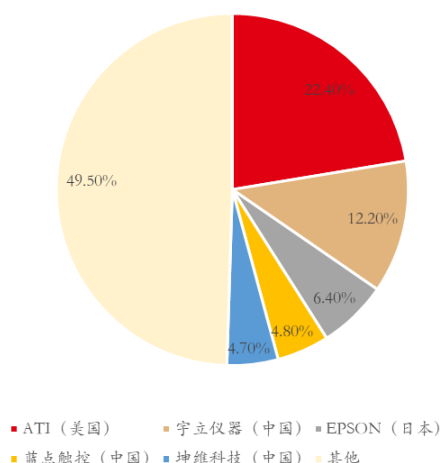
第一梯队	
ATI	宇立仪器
鑫精诚	坤维科技
第二梯队	
蓝点触控	海伯森
第三梯队	
神源生	瑞尔特
鲁班机器人	昊志机电
埃力智能	航天四院44所
...	

资料来源：GGII，中邮证券研究所

外资六维力矩传感器厂商在国内市场占据主导，国产厂商逐步追赶。根据共研产业咨询数据来看，国内市场六维力传感器市场集中度较高，CR5 占比超过 50%。其中 ATI（美国）占据绝对龙头地位，份额占比为 22.4%，其次是宇立仪器（中国）占比 12.2%、Epson（日本）占比 6.4%、蓝点触控（中国）占比 4.8%、坤维科技（中国）占比 4.7%。

目前，国产六维力传感器与外资主流产品在精准度方面已基本对齐，但在灵敏度、串扰、抗过载能力及维间耦合误差等方面仍存在差距，且真正具备批量化产品供应能力的厂商依然偏少。近几年国内品牌凭借供应链优势进一步降低成本，在保证性能的同时提供价格更低的产品以及优质的服务，国产化率逐步提升。但目前国产厂商市场份额仅仅略高于 30%，国内六维力传感器市场仍以外资品牌为主，外资品牌在产品和应用上占有较大先发优势。

图表16：2023 年中国市场六维力传感器厂商营收占比 图表17：2020-2023 国内市场内外资出货占比



资料来源：共研产业咨询，中邮证券研究所

资料来源：共研产业咨询，中邮证券研究所

2.5 六维力传感器的核心参数及技术问题

六维力传感器不光形态多，研发难度也非常大。它并非三个一维力传感器和三个扭矩传感器结构的简单叠加，其非线性力学特征明显，需要考虑多通道信号的温漂、蠕变、交叉干扰、数据处理的实时性，再叠加六维联合加载标定的复杂性，六维力传感器的技术难度可谓是一维力传感器难度的六次方，其能给出的全面力觉信息以及传感精度的提升，并非多个低维的力传感器可替代的。

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。测量范围(量程)是指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；过载能力用来表明传感器在不会导致传感器损坏或性能下降的前提下，能够承受的最大力量和力矩超过其额定量程的程度。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**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。**体现六维力/力矩传感器综合性能的关键指标是串扰、精度和准度。**

一) **串扰**：衡量多维力传感器各测量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。六维力传感器能够同时测量三个空间方向上的力 (F_x 、 F_y 、 F_z) 和绕这三个方向的力矩 (M_x 、 M_y 、 M_z)，提供了一个完整的力和力矩的矢量描述。由于力是矢量量，具有大小和方向，六维力传感器能够准确测量力的方向，而不受力作用点变化的影响。对于各个测量维度上传感器之间存在的耦合误差，由作为六维力传感器核心指标之一的串扰来计量，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。

比较优秀的串扰指标在 1%FS 左右，2 到 5%FS 比较常见。以六维力传感器为例。分别对六维力传感器的六个测量方向精确加载至各自的额定载荷，记录六个方向的测量结果，能够形成一个表格。

图表18：对六维力矩传感器产品的串扰指标测定情况

载荷组	标定载荷 (理论真值)						测试结果					
	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
1	100%FS	0%FS	0%FS	0%FS	0%FS	0%FS	99.8%FS	1.2%FS	2.3%FS	1.7%FS	2.6%FS	2.9%FS
2	0%FS	100%FS	0%FS	0%FS	0%FS	0%FS	0.3%FS	100.1%FS	2.7%FS	1.1%FS	2.7%FS	1.4%FS
3	0%FS	0%FS	100%FS	0%FS	0%FS	0%FS	1.8%FS	1.2%FS	99.7%FS	1.9%FS	2.6%FS	2.7%FS
4	0%FS	0%FS	0%FS	100%FS	0%FS	0%FS	2.1%FS	1.6%FS	2.1%FS	100.5%FS	2.6%FS	1.2%FS
5	0%FS	0%FS	0%FS	0%FS	100%FS	0%FS	1.2%FS	2.1%FS	1.6%FS	1.7%FS	100.6%FS	2.5%FS
6	0%FS	0%FS	0%FS	0%FS	0%FS	100%FS	1.3%FS	1.3%FS	2.5%FS	2.3%FS	2.6%FS	99.9%FS

备注： FS——Full scale；FS表示六维力传感器各方向的额定量程。

资料来源：坤维科技公众号，中邮证券研究所

载荷组 1 中，仅仅对 F_x 方向加载到额定载荷，并且假设加载方向和载荷值是非常准确的，所以 F_x 是 100%FS，其它方向是 0%FS。表格右侧 F_y 、 F_z 、 M_x 、 M_y 、 M_z 的测量结果就是在 F_x 作用下的串扰。因为此时 F_y 、 F_z 、 M_x 、 M_y 、 M_z 的理论真值都是 0。 F_y 、 F_z 、 M_x 、 M_y 、 M_z 测量结果就体现了 F_x 对其它五个测量方向的耦合干扰情况。同理，载荷组 2-6 中的测量结果，分别体现了在单独加载 F_y 、 F_z 、 M_x 、 M_y 、 M_z 时，各自对其它测量方向造成的耦合干扰情况。多维力传感器的厂商往往选择表格中的最大串扰值作为其 datasheet 中的串扰指标。

降低多维力传感器耦合误差的策略大体上可分为两种，**结构性解耦**和**算法性解耦**。结构性解耦涉及对传感器的构造和材料进行调整，以及提升制造工艺，从

基本上着手解决耦合问题，如采用并联型传感器设计。理论上结构性解耦能够实现完全的解耦效果，但在实践操作中，无论传感器的物理结构如何经过优化，都难以达到对所有负载的完美解耦。因此，为了彻底分离力和力矩在三个方向上的耦合，必须借助数学模型的辅助，也就是算法性解耦。算法性解耦亦称为软件解耦，通过应用恰当的算法来确定六维力传感器的输入与输出之间的关联。实现软件解耦的途径主要有两种：首先是线性解耦，其中最小二乘法是最普遍采用的方法；其次是非线性解耦，适用于那些线性解耦方法无法应对的复杂情况，常用的技术包括机器学习算法，如 BP 神经网络、随机森林和极限学习机等。通过将传感器的八通道输出信号输入到这些机器学习模型中，可以准确计算出各个方向的力和力矩。由于传感器结构和电桥电路的非线性特性，最小二乘法得到的解可能存在较大误差，因此在工业应用中，更倾向于使用非线性解耦算法来提高解耦的准确性。

多维力传感器的串扰指标，只能大概表明产品的耦合干扰情况。为了准确描述六维力传感器的测量误差水平，一般建议使用精度和准度两个指标。

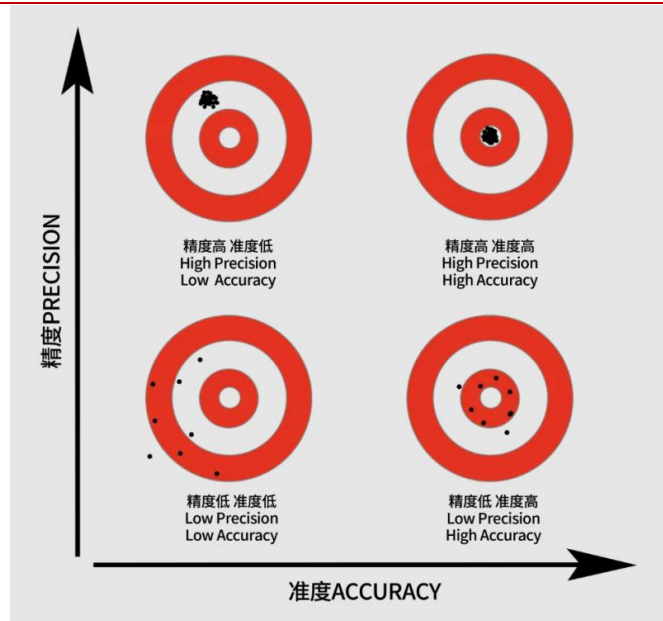
二) 精度：这个参数反映了传感器在多次测量同一值时的一致性。高重复精度意味着传感器在连续测量中提供的结果更加稳定和可靠；

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。

精度的测定过程需要在一致的环境条件下，对传感器在额定负载范围内反复施加同样一组负载，然后计算这些测量值的标准偏差，并将其除以传感器的量程。而准度的测定则是通过施加多组不同方向的联合负载给传感器，随后计算传感器的测量值与理论真实值之间的标准偏差，并同样除以量程。

精度和准度的检定过程中，都需要对多维力传感器以其最高测量维度进行联合加载。例如，对于六维力传感器，每组检验载荷都必须是 F_x 、 F_y 、 F_z 、 M_x 、 M_y 及 M_z 的随机组合。这样获得的精度和准度，可以很清晰的评价传感器各测量方向在量程范围内的测量误差水平，比串扰指标更为实用。举个例子，如果说六维力传感器产品的准度优于 $0.5\%FS$ ，对于 F_x 的测量结果，在测量过程中不论 F_y 、 F_z 、 M_x 、 M_y 及 M_z 以什么样比例和绝对值对 F_x 进行干扰， F_x 的测量结果与理论真值的偏差在 $0.5\%FS$ 以内。对于其它五分方向来说也是如此。准度其实涵盖了滞后、线性、蠕变等误差因素，更能体现产品的综合性能，是多维力传感器最为核心的技术指标之一。

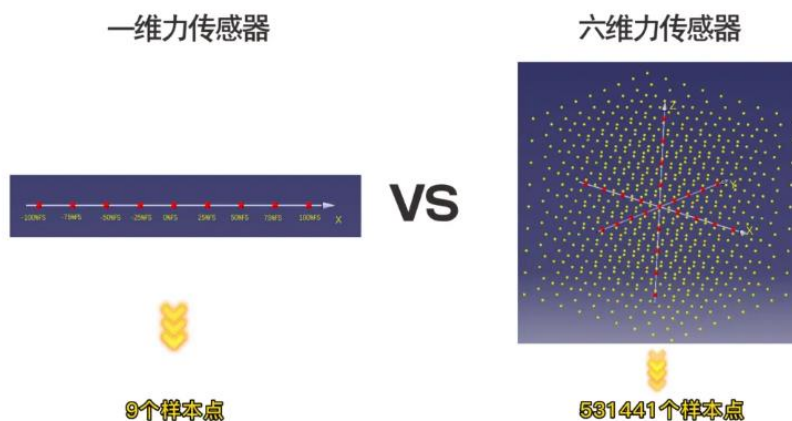
图表19：精度和准度的统计意义



资料来源：坤维科技公众号，中邮证券研究所

六维力传感器生产制造过程中需要经过标定和检测两个环节，以实现高性能的精度和准度。标定是指通过加载理论值的载荷并同时记录传感器输出的对应原始信号的方式，获得六维力传感器内部算法的各个参数。也就是建立传感器原始信号和受力之间的映射关系；检测是指通过加载已知理论真值的载荷并同时记录传感器测量结果的方式，统计、比较测量结果和理论真值的差异，获得传感器的精度和准度，也就是测试传感器准不准。综上所述，标定环节是获得传感器固件参数，检测环节是获得传感器的精准度。

图表20：一维、六维力传感器标定的样本空间示意图



资料来源：坤维科技公众号，中邮证券研究所

为了能够达到更高的精度和准度，需要在传感器标定和检测过程中采用六维联合加载的方式。对于六维力传感器的标定需要同时考虑六个维度，采用三个方

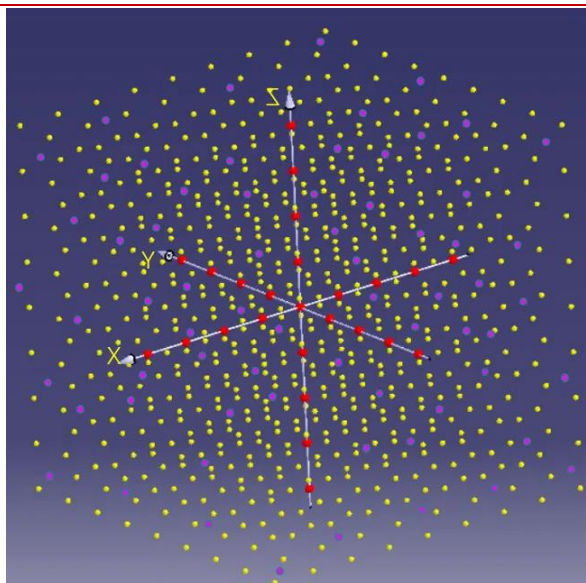
向的力和三个方向的力矩，同时对坐标轴以外的样本点进行加载的方式，就叫做六维联合加载标定。只有在传感器标定和检测过程中采用这种六维联合加载的方式，才能实现 0.5%FS 准度。换言之，六维联合加载设备是高精度六维力传感器研发和生产的必要条件。

六维联合加载标定的样本空间非常复杂，一维力传感器仅需 9 个样本点，同样每个维度取 9 个样本点，六维力传感器的样本空间就包含 531441 个样本点。使用如此多样本点进行六维联合加载标定会带来三点优势：

- (1) 交叉样本点可以使传感器的受力情况模拟得非常接近真实的使用情况；
- (2) 便于考察传感器在多维载荷同时作用下的非线性力学特性，可以有效改善传感器结构的设计；
- (3) 基于传感器的非线性力学特性做的标定，可以大幅优化解耦算法的数学模型。

总结来说，只有通过六维力的联合标定方法，才能确保传感器达到更高的精度和更低的交叉干扰。当六维力传感器同时受到多维度力的影响时，其非线性特性尤为突出，简单地将六个维度的线性模型相加，并不能准确捕捉这种非线性现象。

图表21：六维力传感器的样本空间（紫色-检测样本点；黄色-标定样本点）



资料来源：坤维科技公众号，中邮证券研究所

检测也要采用六维联合加载的方式，所用到的设备与标定设备一样，但检测样本点必须与标定样本点都不相同。标定样本点实际上就是拟合点，所以标定出来的数学模型和参数必然会很适应标定样本点。在标定样本点上，测量结果的精准度自然会很高。但它不能评价在非标定样本点上的测量精准度。检测样本点和标定样本点不重合，就可以通过在检测样本点上的测量结果来评价标定结果的优劣。

图表22：美国（左）、德国（中）、以色列（右）的六维力传感器标定及检测设备



资料来源：坤维科技公众号，中邮证券研究所

六维联合加载设备需自行研制，技术门槛较高。六维联合加载设备的研发涉及到空间光学定位、载荷位移补偿、机电一体化等多项综合技术，有上百个 Know How，非常依赖工程经验。一旦某个细节考虑不周全，加载效果就会不理想，加载设备自己产生的耦合误差可能超过 1%FS，这势必无法标定出高准度的六维力传感器。六维联合加载设备目前还没有标准产品可以直接采购，一般都是由六维力传感器的厂商自行研制的，所以图中以色列、美国和德国的六维联合加载设备的形态差别非常大。如果没有六维联合加载设备的话，一般只能使用液压或电动的一维加载设备，通过工装来调整传感器方向和加载点的位置，实现某一个或两个方向载荷的施加。这种加载方式的优势是设备成本低，但标定出来的传感器准度性能较差，串扰较大。

在技术实现、性能优化、应用集成等方面，六维力传感器综合技术难度较高，除了上述降低耦合干扰的解耦途径、提升精准度的六维联合加载实现，六维力传感器还存在其他技术壁垒。其他的关键技术问题还包括：

全方位机械过载保护——为避免传感器在受到超量程力作用时损坏，需要设计有效的过载保护结构，这在技术上具有挑战性；

温度漂移和稳定性控制——传感器必须具备良好的温度补偿机制，以减少温度变化对测量结果的影响，并保持长期稳定性；

多通道信号及实时数据处理——六维力传感器需要同时处理多个方向的力和力矩信号，这要求高度精确的信号采集和处理技术，同时还需要开发高效的数据处理算法，以实现实时或近实时的数据处理和反馈；

传感器融合——在某些应用中，需要将力传感器与其他类型的传感器（如位置、速度、加速度传感器）相结合，解决不同传感器之间数据融合的技术难题。

2.6 六维力传感器成本分析

六维力传感器成本构成主要包括材料的 BOM 成本、贴片及研发的人力成本和其他成本，其中 BOM 成本中的应变片占比最大。

首先，作为六维力传感器的核心组成部分，高质量的应变片成本较高。根据焉知机器人的数据，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，单个六维力矩传感器总的应变片成本大约在 5000-6000 元。

其次，六维力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。尤其贴片与标定阶段，需要大量的技术工人进行精细操作，且短期无法实现自动化生产。未来，MEMS 工艺可能是实现六维力传感器高效生产的主要方向，叠加生产自动化率提升将有助降本。

六维力开发的难度和壁垒高，在市场基数较小的当下价格昂贵，远高于低维力传感器。以前文中的行业数据计算，六维力传感器产品的平均单价大约在 3.23 万元，其利润率较高，存在较大的降价空间。在六维力传感器下游应用中，工业自动化（包含传统机器人）领域应用规模占比最大，但人形机器人行业应用规模增速最快。在人形机器人量产加速、降价迫切的预期下，六维力传感器或将迎来降价潮。预期下游应用需求释放以及厂商之间的价格成本竞争有望带来一轮快速降价，降价潮可能会吸引更多的应用和市场参与者，推动行业的快速发展和新一轮的洗牌。

3 产业链相关标的

（一）坤维科技：航天级技术赋能民用级产品

坤维科技是一家致力于提供高精度力觉传感器（六轴力传感器）及力控解决方案的企业，其主营核心优势在于，产品技术来源于航天军工领域。公司创始团队核心成员均来自中国航天科技集团第 11 研究院，坤维科技六维力传感器技术最开始应用在火箭、导弹等高速飞行器的空气动力学性能参数测试，相比于海外 ATI、Onrobot 等厂商在国内销售的民用级竞品，坤维科技的六维力传感器技术具有明显优势。

从市场布局来看，未来坤维科技六维力传感器将主攻协作机器人、服务机器人及人形机器人市场，同时拓展医疗市场和运动健康市场。

（二）宇立仪器：从汽车碰撞假人到机器人打磨

宇立仪器是集研发、生产为一体的技术密集型企业，其扎根力矩传感器领域，主营产品覆盖从一维力传感器到六维力传感器，共计 9 大系列，300 多个型号。

从应用领域来看，最开始，宇立仪器是靠汽车碰撞假人领域起家。由于国产高端传感器性能的欠缺，汽车碰撞假人领域一直被国外品牌垄断。2007 年，宇立仪器成为我国为数不多具有汽车碰撞假人多轴力传感器生产能力的企业，与上汽、大众等车企合作，让汽车假人碰撞行业脱离了美国 Humanetics 品牌的垄断格局，拥有其他选择。

目前，宇立仪器六维力传感器已拓展到机器人打磨领域，其与 ABB 公司合作研发了十大系列的六轴力传感器和智能浮动磨头，同时，宇立仪器与 KUKA 公司合作推出了力控打磨集成应用包 KUKAready2_grinding，该应用包集成了力传感器、位移传感器和倾角传感器，能实时感知打磨力、浮动位置和磨头姿态等参数，能自动补偿机器人打磨姿态。

（三）鑫精诚传感器：3C 起家，成本可控

鑫精诚传感器专注于微型压力、称重、多轴力、扭力等多样化智能传感器及控制仪表的工业级产品研发和创新。公司早年从 3C 行业起家，已获得苹果、富士康、华为等大型客户订单。目前，鑫精诚传感器产品涉及 3C 自动化设备、精密医疗、农业、新能源锂电、机器人、半导体、航空铁路等多个领域。

2022 年，鑫精诚传感器六维力传感器客户仍集中在手机等 3C 行业，其优势主要是成本可控，目前一套传感器+数据采集卡+软件，均价仅 1.3-1.5W/套，当年公司营收超 1 亿元。

（四）柯力传感：投资并购打造传感器“森林”

2023 年，柯力传感对外完成 11 家企业的投资并购，使用自有资金超过 5 亿元。传感器行业数字化、融合化、一体化趋势明显，多物理量融合势在必行。柯力传感作为单一物理量传感器企业龙头，正向产业深度融合阶段迈进。目前，公司通过自研和外延式投资并购的方式，布局力学、电量、光纤测温、气体、流量、光幕等 10 多种传感器，已初步具备传感器森林的基础。

在人形机器人领域，公司已进行多维力传感器研发试制，目前多维力传感器处于小批量试制阶段。

（五）昊志机电：产品矩阵丰富

昊志机电作为从事中高端数控机床、机器人、新能源汽车核心功能部件的研发设计、生产制造、销售与维修服务的科技企业，其机器人零部件（电机、伺服系统、减速器、控制器、六维力传感器、高精度编码器等）产品齐全且品质卓越。

昊志机电六维力传感器采用结构解耦的技术，力控精度 $\leq 0.1\text{Nm}$ 、非线性度小于 0.5%FS、迟滞误差小于 0.5%FS、过载能力高于 300%；同时搭载 2.24 位 ADC 数模转换芯片，采样率高达 1KHz；另外，该产品有 EtherCAT、以太网、CAN、RS485 等多种通信协议可供选择。

（六）安培龙：“自主 MEMS 芯片设计+玻璃微熔工艺”有效研发力传感器

安培龙组建了专门的力传感器研发团队，还与天机智能携手合作，重磅推出了机器人用基于 MEMS 硅基应变片+玻璃微熔工艺的高性能力矩传感器，以满足工业机器人、协作机器人等机器人对力测量的精确需求，并计划在人形机器人上开展实际应用。

4 风险提示

人形机器人规模化不及预期风险；
六维力传感器技术路径变化风险；
产品降价程度不达预期风险。

中邮证券投资评级说明

投资评级标准	类型	评级	说明
报告中投资建议的评级标准： 报告发布日后的 6 个月内的相对市场表现，即报告发布日后的 6 个月内的公司股价（或行业指数、可转债价格）的涨跌幅相对同期相关证券市场基准指数的涨跌幅。 市场基准指数的选取：A 股市场以沪深 300 指数为基准；新三板市场以三板成指为基准；可转债市场以中信标普可转债指数为基准；香港市场以恒生指数为基准；美国市场以标普 500 或纳斯达克综合指数为基准。	股票评级	买入	预期个股相对同期基准指数涨幅在 20%以上
		增持	预期个股相对同期基准指数涨幅在 10%与 20%之间
		中性	预期个股相对同期基准指数涨幅在-10%与 10%之间
		回避	预期个股相对同期基准指数涨幅在-10%以下
	行业评级	强于大市	预期行业相对同期基准指数涨幅在 10%以上
		中性	预期行业相对同期基准指数涨幅在-10%与 10%之间
		弱于大市	预期行业相对同期基准指数涨幅在-10%以下
	可转债评级	推荐	预期可转债相对同期基准指数涨幅在 10%以上
		谨慎推荐	预期可转债相对同期基准指数涨幅在 5%与 10%之间
		中性	预期可转债相对同期基准指数涨幅在-5%与 5%之间
回避		预期可转债相对同期基准指数涨幅在-5%以下	

分析师声明

撰写此报告的分析师（一人或多人）承诺本机构、本人以及财产利害关系人与所评价或推荐的证券无利害关系。

本报告所采用的数据均来自我们认为可靠的目前已公开的信息，并通过独立判断并得出结论，力求独立、客观、公平，报告结论不受本公司其他部门和人员以及证券发行人、上市公司、基金公司、证券资产管理公司、特定客户等利益相关方的干涉和影响，特此声明。

免责声明

中邮证券有限责任公司（以下简称“中邮证券”）具备经中国证监会批准的开展证券投资咨询业务的资格。

本报告信息均来源于公开资料或者我们认为可靠的资料，我们力求但不保证这些信息的准确性和完整性。报告内容仅供参考，报告中的信息或所表达观点不构成所涉证券买卖的出价或询价，中邮证券不对因使用本报告的内容而导致的损失承担任何责任。客户不应以本报告取代其独立判断或仅根据本报告做出决策。

中邮证券可发出其它与本报告所载信息不一致或有不同结论的报告。报告所载资料、意见及推测仅反映研究人员于发出本报告当日的判断，可随时更改且不予通告。

中邮证券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头寸并进行交易，也可能为这些公司提供或者计划提供投资银行、财务顾问或者其他金融产品等相关服务。

《证券期货投资者适当性管理办法》于 2017 年 7 月 1 日起正式实施，本报告仅供中邮证券客户中的专业投资者使用，若您非中邮证券客户中的专业投资者，为控制投资风险，请取消接收、订阅或使用本报告中的任何信息。本公司不会因接收人收到、阅读或关注本报告中的内容而视其为专业投资者。

本报告版权归中邮证券所有，未经书面许可，任何机构或个人不得存在对本报告以任何形式进行翻版、修改、节选、复制、发布，或对本报告进行改编、汇编等侵犯知识产权的行为，亦不得存在其他有损中邮证券商业性权益的任何情形。如经中邮证券授权后引用发布，需注明出处为中邮证券研究所，且不得对本报告进行有悖原意的引用、删节或修改。

中邮证券对于本申明具有最终解释权。

公司简介

中邮证券有限责任公司，2002年9月经中国证券监督管理委员会批准设立，注册资本50.6亿元人民币。中邮证券是中国邮政集团有限公司绝对控股的证券类金融子公司。

公司经营范围包括：证券经纪；证券自营；证券投资咨询；证券资产管理；融资融券；证券投资基金销售；证券承销与保荐；代理销售金融产品；与证券交易、证券投资活动有关的财务顾问。此外，公司还具有：证券经纪人业务资格；企业债券主承销资格；沪港通；深港通；利率互换；投资管理人受托管理保险资金；全国银行间同业拆借；作为主办券商在全国中小企业股份转让系统从事经纪、做市、推荐业务资格等业务资格。

公司目前已经在北京、陕西、深圳、山东、江苏、四川、江西、湖北、湖南、福建、辽宁、吉林、黑龙江、广东、浙江、贵州、新疆、河南、山西、上海、云南、内蒙古、重庆、天津、河北等地设有分支机构，全国多家分支机构正在建设中。

中邮证券紧紧依托中国邮政集团有限公司雄厚的实力，坚持诚信经营，践行普惠服务，为社会大众提供全方位专业化的证券投、融资服务，帮助客户实现价值增长，努力成为客户认同、社会尊重、股东满意、员工自豪的优秀企业。

中邮证券研究所

北京

邮箱：yanjiusuo@cnpsec.com

地址：北京市东城区前门街道珠市口东大街17号

邮编：100050

上海

邮箱：yanjiusuo@cnpsec.com

地址：上海市虹口区东大名路1080号邮储银行大厦3楼

邮编：200000

深圳

邮箱：yanjiusuo@cnpsec.com

地址：深圳市福田区滨河大道9023号国通大厦二楼

邮编：518048