

力传感器——机器人高精度力控方案核心部件

2023 年 08 月 06 日

► **力传感器是机器人感知环境，提供反馈信息，从事精细化作业，人机交互，真正“拟人化”的关键。**多维力传感器技术壁垒高，是机械设计、算法、计量、电子融合的交叉学科，要实现高精度的数据采集和多轴同步校准。多维传感器通常安装于机器人末端执行器和机械臂之间，用于检测机器人与环境之间的多维交互力/力矩，是机械臂实现力控制的关键部件。六轴力/六维力传感器是精度最高、抗干扰能力最强的传感器类型，该工具可以沿 6 个轴（3 个平移+3 个旋转）进行控制，可应用于医疗（涉及人机交互的手术机器人、康复机器人和智能假肢等）、汽车（被动安全测试碰撞假人、零部件耐久测试、主动安全测试）、人形机器人、工业机器人领域。

► **六维力传感器价值量高，国内厂商六维力传感器相比于海外更具性价比，部分厂商产品已经进入头部客户供应链。**国外厂商例如美国 ATI、德国 HBM 等公司力传感器产品价格较高，美国 ATI 型号为 MINI45 六维力/力矩传感器价格约 7.5 万元/套，国内海伯森等厂家六维力传感器的价格具备一定的价格优势。国内厂商部分技术指标已达海外领先水平，例如宇立的产品已经进入 KUKA、ABB 等龙头客户供应链。根据智研瞻产业研究院，2022 年我国应变式传感器市场规模为 30.57 亿元，较上年同比增长 15.8%。六维力传感器在整体市场占比依然较小，主要应用于协作机器人领域，但潜力巨大，市场高速增长，根据高工机器人产业研究所（GGII）数据显示，2022 年中国市场六维力/力矩传感器销量 4840 套，同比增长 62.58%。GGII 预计，2023 年中国市场六维力/力矩传感器销量有望突破 6700 套，同比增速 40%左右。

► **多维力传感器应变片依赖于进口，成本较高，应变片国产化和自动化产线是降本两大方向。**当前六维力传感器的加工依然以小批量、人工贴片焊接为主，自动化水平较低。力传感器的核心部件是弹性体和应变片，弹性体机加工成本和应变片在六维力传感器成本中占比较高。目前六维力传感器使用的应变片依赖于进口，且价格显著高于国内应变片，主要系进口应变片的灵敏度、使用寿命优于国内应变片，而六维力传感器根据设计结构的不同可能需要 20 个以上的应变片，使得六维力传感器的成本较高，因此，应变片单价下降（国产化方案或者量采降价）是六维传感器降本的潜在路径之一。

► **重点关注：**柯力传感（国内应变式传感器龙头，在传统称重系统集成市场中具备优势，多维力传感器在研，量产经验丰富）；中航电测（国内应变片龙头，称重传感器领域龙头之一）；汉宇集团（投资同川科技及海伯森，海伯森是国内具备六维力传感器生产能力的公司之一）；瀚川智能（投资参股坤维科技）。

► **风险提示：**成本下降不及预期的风险；技术无法突破的风险。

重点公司盈利预测、估值与评级

代码	简称	股价 (元)	EPS (元)			PE (倍)		
			2022A	2023E	2024E	2022A	2023E	2024E
603662.SH	柯力传感	28.39	0.92	1.22	1.50	31	23	19
300114.SZ	中航电测	49.23	0.33	0.50	0.63	86	57	45
300403.SZ	汉宇集团	8.17	0.34	0.40	0.44	84	71	65
688022.SH	瀚川智能	33.34	0.68	1.39	2.09	42	20	14

资料来源：Wind，民生证券研究院；

(注：股价为 2023 年 8 月 4 日收盘价；表中个股为未覆盖标的，盈利预测采用 wind 一致预期)

推荐

维持评级



分析师 李哲

执业证书：S0100521110006

电话：13681805643

邮箱：lizhe_yj@mszq.com

分析师 罗松

执业证书：S0100521110010

电话：18502129343

邮箱：luosong@mszq.com

相关研究

- 1.一周解一惑系列：矿山机械需求强劲，国内厂商积极拓展海外市场-2023/07/31
- 2.一周解一惑系列：苹果荣耀入局 3D 打印，有望启动产业新引擎-2023/07/23
- 3.一周解一惑系列：人形机器人——视觉与 IMU 传感器的再讨论-2023/07/16
- 4.一周解一惑系列：核电阀门需求空间几何？-2023/07/09
- 5.一周解一惑系列：半导体封装测试设备及市场空间梳理-2023/07/02

目录

1 多维力传感器设计涉及多学科交叉，技术壁垒高	3
1.1 力传感器可分为一维传感器和多维传感器	3
1.2 弹性体和应变片是力传感器的核心零部件	7
1.3 多维力传感器的技术壁垒更高，高精度、抗干扰能力强	12
2 力传感器市场空间巨大，新兴应用开拓市场	19
2.1 力传感器需求不断增长，以称重传感器需求为主	19
2.2 力传感器相比于电流环传感方案精度更高	21
2.3 人形机器人等新技术有望带来六维力传感器需求提升	23
3 竞争格局：国内产品更具性价比，替代潜力巨大	27
3.1 多维力传感器单价高，国内产品更具性价比	27
3.2 国内外主要力传感器供应商	28
4 相关上市标的	31
4.1 柯力传感：国内应变式力传感器龙头，多维传感器在研	31
4.2 中航电测：国内应变片龙头，自动化产线升级	31
4.3 汉宇集团：投资同川科技及海伯森，布局人形机器人	32
4.4 瀚川智能：投资坤维科技，完善传感器布局	33
5 风险提示	34
插图目录	35
表格目录	35

1 多维力传感器设计涉及多学科交叉，技术壁垒高

1.1 力传感器可分为一维传感器和多维传感器

1.1.1 传感器的分类

根据感力原件的不同，传感器主要分为三类：应变式力传感器、光学式传感器以及压电式力传感器。

表1：不同类型六维力/力矩传感器原理、特点及代表企业

传感元件类型	原理及特点	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	ATI、宇立仪器、坤维科技、鑫精诚传感器、海伯森、神源生智能、Sintokogio、Bota Systems AG、SCHUNK、ME-Meßsysteme GmbH、埃力智能
光学式	通过光纤、光栅反映形变，再转化成为力	OnRobot
压电/电容式	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。	Robotiq、Robotous、WACOH-TECH、Kistler

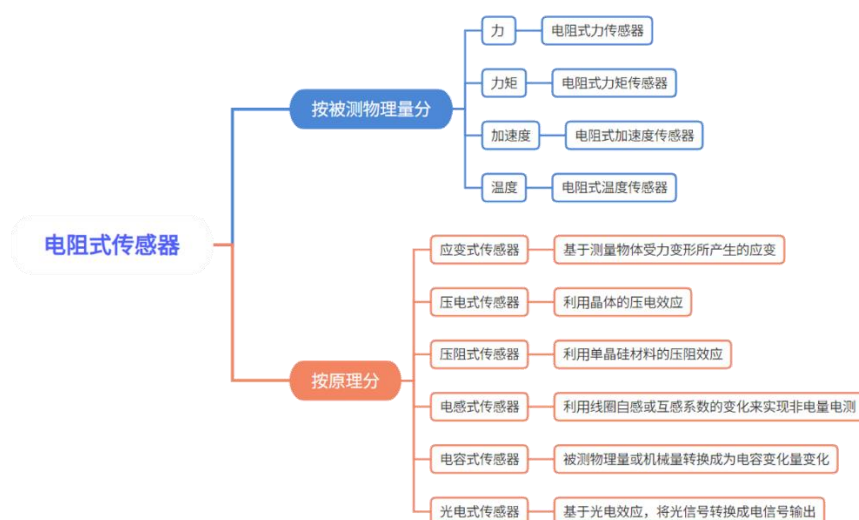
资料来源：高工机器人产业研究所（GGII），民生证券研究院

应变式力传感器，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；

光学式传感器则是通过光栅反映形变，再转化成为力；

压电式传感器是将被测物理量变化转换成压电材料因受机械力产生静电电荷或电压变化的传感器，可分为电容和压电两种，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。

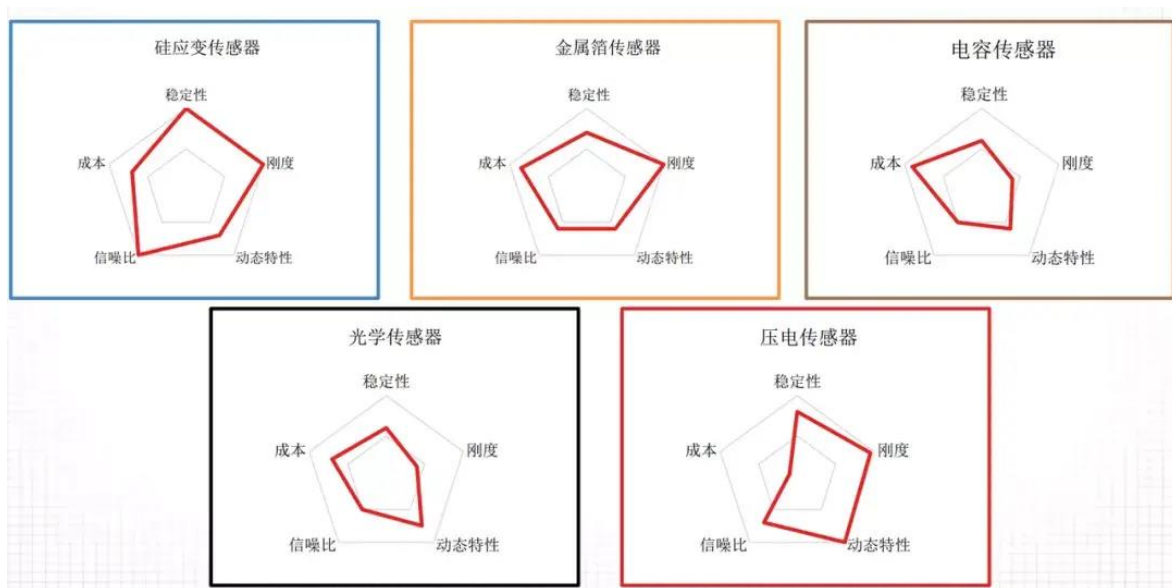
图1：传感器分类



资料来源：《电阻应变式力传感器》，民生证券研究院

经过稳定性、刚度、动态特性、成本与信噪比五个维度的比较可知，硅应变传感器和金属箔传感器之间，硅应变片在稳定性、信噪比以及动态特性方面要更优，两者刚度上相差不多，但成本上金属箔要优于硅应变片；电容传感器和压电传感器之间，电容传感器成本最优，其他几项弱于压电传感器；光学传感器在动态特性方便明显具有优势。

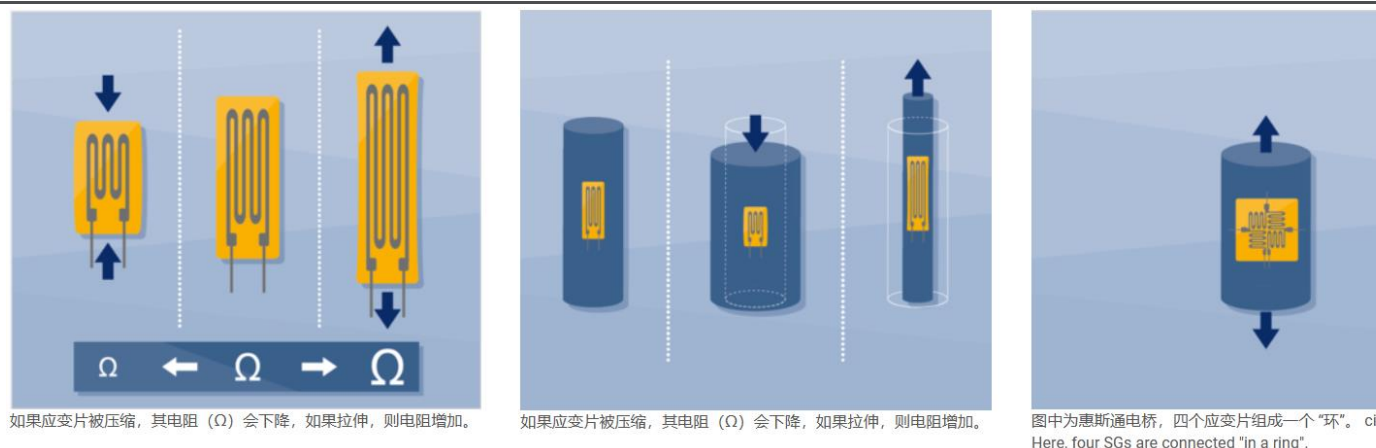
图2：不同传感器性能对比



资料来源：《电阻应变式力传感器》，民生证券研究院

应变力传感器：电阻应变式传感器的灵敏元件主要是应变片，它是一种用来测量物体应变的测试工具。大多数通用力传感器内部都有应变片。应变片作为电导体牢固地附着在基片上。当基底被拉伸时，应变片将会变长。反之被压缩时，应变片将会缩短。结果是导致应变片电阻产生变化。这就是应变测量原理，通过应变电阻产生变换来确定应变大小。为了生产力传感器，除了应变片外还需要一个弹性体-例如采用不锈钢等。应变片将牢固地黏贴在弹性体上，二者一起发生形变，因此应变片将产生和弹性体一样的变形，这将导致电阻产生变化。惠斯通电桥输出信号将提供这些变形信息。这样就可以计算出作用在应变片上的力的大小。这就是力传感器的工作原理。

图3：力传感器工作原理示意图



资料来源：HBK 官网，民生证券研究院

力传感器是机械、电子、算法、计量融合的复杂交叉学科，技术壁垒较高。

多维力传感器能够实现更精细的工作需求，在机械加工，如磨削，去毛刺，打磨和抛光中，让机器人来完成这些工作曾经是非常复杂的，需要根据空间体积进行大量的编程，而且也需要花费大量时间来进行纠错。但是集成了多维力觉传感器后，利用传感器的路径记录功能，操作员可以简单地抓住臂端装置并进行预期的移动。传感器记录操作员施加的力和方向，然后机器人就可以重复操作员的动作。这将极大地提高工作效率，同时将有助于保障操作工人的安全。

图4：多维力传感器的技术壁垒

解耦算法

高精度
低耦合
低温度敏感性
高效

高精度数据采集

高信噪比采集系统
(ATI采用硅应变片，2%的满量程精度)
温度补偿
实时解耦 (1KHz)
低发热量



多重技术壁垒

结构解耦设计

高过载 (ATI的最大单轴
过载量可达到额定量程的
5-12.5倍)
高敏感性

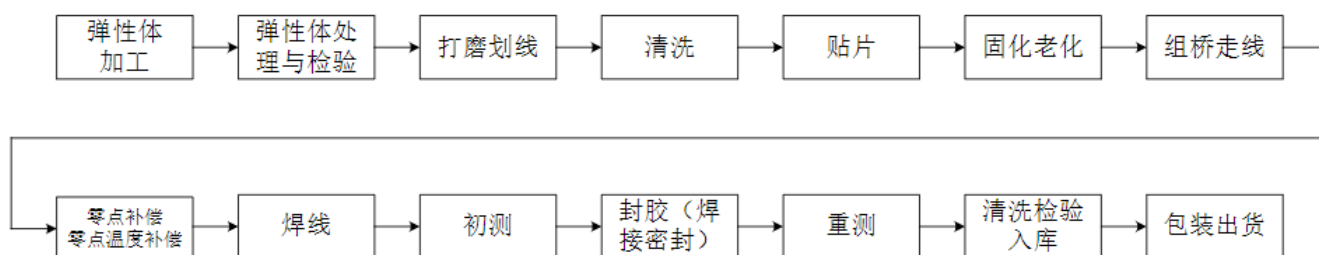
多轴同步校准

高精度光学定位
六维力系同步加载
载荷补偿

资料来源：蓝点触控、民生证券研究院绘制

1.1.2 力传感器的生产工艺

力传感器的重要部件包含弹性体和应变片，弹性体制造质量直接影响到传感器的测试性能指标，因此，弹性体的制造是力传感器生产的重要环节。力传感器的生产流程主要包含弹性体加工及后处理工艺。

图5：力传感器生产流程示意图


资料来源：柯力传感招股说明书，民生证券研究院

弹性体设计与制造：指弹性体钢杯的结构设计与机械加工，去应力热处理。此环节将确定弹性体膜片基本参数，基本决定了溅射薄膜式压力传感器的输入—输出关系。弹性体建模与计算过程非常重要，将在下一节重点阐述。

研磨与抛光：对合格的弹性体钢杯进行研磨、抛光，使表面达到光洁度要求，然后再作进一步的减薄处理。

打磨、划线：打掉弹性体上加工产生纹路及电镀层，活化金属表面，改善贴片区表面的微观凸凹不平。划线目的为对应变计的粘贴位置进行定位，作为贴片时的基准线。

贴片：将敏感元件粘贴在弹性元件上，通过金属机械变形改变阻值，获得电信号的改变（ $\Delta R \rightarrow \Delta U$ ）从而得到一个应变变量。

固化、老化：将贴片后的弹性体放入一定的温度环境中，将贴片胶烘干，使应变计与弹性体紧密粘合。老化是通过人为升温降温来消除应变计、胶水的残余应力，以达稳定的目的。

组桥走线：连接敏感元件（应变计），组成惠斯通电桥，将电信号有效地输入输出。

零点补偿、零点温度补偿：平衡桥臂电阻温度系数，使其输出满足特定要求。

焊线：通过导线连接，介入外部的输入、输出。

初测：测出传感器满量程的灵敏度，并进行补偿达到一个统一的标准值，以满足多个产品互换灵敏度的一致性 & 便于组秤使用时角度调整。

密封胶、焊封：通过传感器贴片孔、补偿孔的密封，隔离外界，形成独立的内部气候环境。

重测：检测产品各项特性或指示是否符合或满足国际的要求或企业的内部控制指标（非线性、重复误差、滞后误差、蠕变、灵敏度、零点等）。

在应变式传感器工作过程中，一般由弹性体首先把被测定的重量变换成易于转换成电量的应变变量，然后配合应变计及测量电路，把应变变量转换成电量，即把输

入的重量转换成输出的电量，所以弹性体在称重传感器中起着重要的作用，其制造质量好坏直接影响到传感器的测试性能指标。

弹性体在加工中会产出各种加工应力，其加工应力的积蓄与大小会影响到传感器的测试性能指标。因此在加工中应注意采用少应力加工工艺方法，尽量避免加工应力积蓄或减少加工应力。

在贴片、组桥、补偿、调试、封胶这几个环节上要控制环境温度、湿度、洁净度和流程节拍。可靠性、稳定性是本产品最重要的性能，一个极小的缺陷就可能致产品的失效，因此要对每一个环节加强检验，才能提供给用户优质的产品。

一般而言，力传感器厂商外购加工好的弹性体及应变片，因此，主要需要完成焊接加工这一环节的工艺，目前六维力传感器等多维传感器依然以人工显微镜下的手动贴片为主，低端的一维传感器等，部分企业积极探索自动化生产。

1.2 弹性体和应变片是力传感器的核心零部件

应变片和弹性体是力传感器的主要结构组成和成本组成部分。

电阻应变片主要分为以下几类，箔式电阻片是最主要的应变片：

1)丝绕式：用电阻丝盘绕电阻片称为丝绕式电阻片，目前广泛使用的有半圆弯头平绕式，这种电阻片多用纸底和纸盖，价格低廉，适于实验室广泛使用，缺点是精度较差，横向效应系数较大。

2)短接式：这种电阻片的制作比较容易，在一排拉直的电阻丝之间，在预定的标距上用较粗的导线相间地造成短路。短路接式电阻片的优点是几何形状比易于保证而横向效应系数近于零。

3)箔式电阻片

它是在合金箔(康铜箔或镍铬箔)的一面涂胶形成胶底，然后在箔面上用照相腐蚀成形法制成的，所以几何形状和尺寸非常精密，而且由于电阻丝部分是平而薄的矩形截面，所以粘贴牢固，丝的散热性能好，横向效应系数也较低。该类应变片的敏感栅是通过光刻、腐蚀等工艺制成。箔栅厚度一般在 0.003-0.01mm 之间。箔式应变片与丝式应变片比较其面积大，散热性好，允许通过较大的电流。由于它的厚度薄，因此具有较好的可挠性，灵敏度系数较高。箔式应变片还可以根据需要制成任意形状，适合批量生产。

应变片的核心性能指标是灵敏系数和疲劳寿命，国内外生产的应变片主要技术差异体现于此。一般而言，国内的应变片价格，根据中航电测招股说明书披露的数据计算，大约在几元左右，而海外进口应变片的价格可达百元以上。

应变片的灵敏系数是指：当应变计粘贴在处于单向应力状态的试件表面上，且其纵向(敏感栅纵线方向)与应力方向平行时，应变计的电阻变化率与试件表面贴片

处沿应力方向的应变(即沿应变计纵向的应变)的比值

应变片的疲劳寿命是指:在恒定幅值的交变应力作用下应变计连续工作,直至产生疲劳损坏时的循环次数。

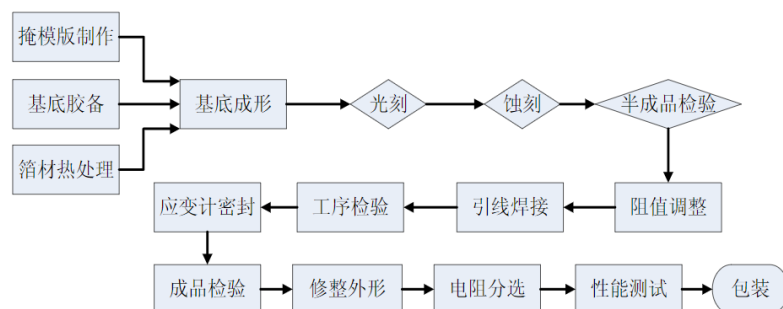
图6: 中航电测应变片产品参数

应变计技术指标			
典型技术数据	BF 系列	ZF 系列	BA 系列
基底材料	改性酚醛	改性酚醛	聚酰亚胺
敏感栅材料	康铜	卡玛	康铜(卡玛)
典型电阻值(Ω)	350、650、1000	350、1000、2000	350、1000
对平均电阻值公差	$\leq \pm 0.1\%$		
典型灵敏系数	2.00 ~ 2.20	1.80 ~ 2.20	1.86 ~ 2.20
灵敏系数分散	$\leq \pm 1\%$		
应变极限	2.0%		
疲劳寿命	$\geq 10^7(\pm 1000)$		
使用温度范围($^{\circ}\text{C}$)	$-30 \sim +80$		$-50 \sim +150$
温度自补偿系数	9、11、16、23、27	9、11、16、23、27、M23	9、11、16、23、27

资料来源: 中航电测官网, 民生证券研究院

应变片的加工工序涉及到光刻及刻蚀工艺, 生产工序会影响成品最终的性能。

图7: 应变片的加工工序



资料来源: 中航电测招股说明书, 民生证券研究院

(1) 掩模板制作: 利用高精度制版设备, 制作所设计的应变计图形掩膜版(底版)。掩模板制作质量的高低直接影晌应变计生产的成品率和可靠性。

(2) 基底胶备: 通过化学反应, 将高分子化工原材料合成为应变计胶粘剂。

(3) 箔材热处理: 通过热处理炉, 使敏感栅材料的内部晶体结构重新组合, 调整应变计敏感栅材料的合金成分配比以及金属的冷轧率和电阻温度系数, 从而满足应变计的性能要求, 减小应变测量误差。

(4) 基底成形: 将基底胶粘剂涂覆在敏感栅材料上, 通过热固化使之成为应变计基底。

(5) 光刻：利用光刻胶的感光特性，在金属箔材表面上涂覆光刻胶，通过紫外线感光，将掩膜版的图形转移到光刻胶中，对光刻胶进行显定影，形成所需要的应变计图形。

(6) 蚀刻：用蚀刻液将转印到金属箔材上的应变计图形刻出来。

(7) 半成品检验：对蚀刻后应变计敏感栅的质量状况进行检验。

(8) 阻值调整：通过机械抛光和化学腐蚀的方式，按应变计标称电阻的要求对应变计电阻进行调整。

表2：各类应变片图示

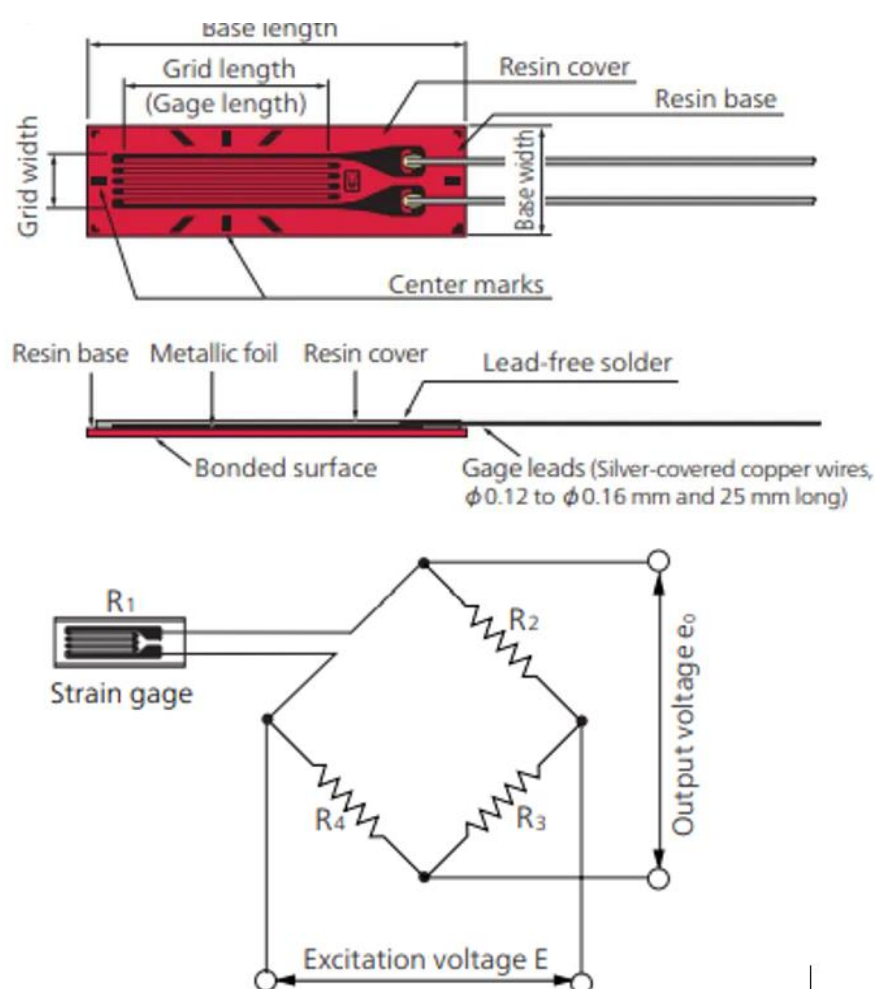
图例	说明
	变直片 (如 LY4) 带有一个测量栅丝，测量一个方向的应变。
	T 型应变花 (如 XY3) 带有两个测量栅丝，彼此呈 90° 排列。此类应变片应用包括已知主应力方向的双轴应力测量，以及拉压双向应力测量。
	V 型应变片 (如 XY4) 带有两个测量栅丝，彼此呈 90° 排列。典型应用包括扭转应变测量和剪切梁的剪切应力测试。
	双桥应变片 (例如 DY4) 带有两个测量栅丝，彼此平行排列。典型的应用为弯曲梁测量。
	三栅应变花 (例如 RY8) 测量栅丝呈 0°/45°/90° 或 0°/60°/120° 排列。主要用于未知主方向双轴应力测量和分析。
	链式片 (如 KY8) 带有 10 或 15 个很小的测量栅丝，等距离分布，并包括一个补偿片。主要应用为应变梯度测量。
	全桥片 (如 VY4) 带有四个测量栅丝，彼此呈 90° 排列。典型应用包括拉压双向应力，扭转应力和剪切梁的剪切应力测试。

资料来源：HBM，民生证券研究院

应变片用专用粘合剂粘接到测量对象上。测量位置上发生的应变通过粘合剂和树脂基转移到应变传感元件。为了准确测量，应变片和粘合剂应与测量材料和操作条件（如温度等）兼容。

应变引起的电阻变化非常小。因此，对于应变测量，形成惠斯通电桥以将电阻变化转换为电压变化。

图8：应变片原理及惠斯通桥电路图



资料来源：HBM，民生证券研究院

表3：日本 TML 应变片参数

类型	型号		基底尺寸 (mm)		敏感栅尺寸 (mm)		阻值(Ω)
			L	W	L	W	
单轴	FLA-2-350-	C2/C4/C6/C8	2	2.9	6.8	4.6	350
	QFLA-2-350-						
	FLA-3-350-	C2/C4/C6/C8	3	3.2	8.5	5	350
	QFLA-3-350-						
扭矩 / 剪切应变测量	FLA-3-1000-	C2/C4/C6/C8	3	4.2	8.4	5.8	1000
	QFLA-3-1000-						
	FCT-2-350-	C2/C4/C6/C8	2	1.5	7.6	5.3	350
	QFCT-2-350-						
单轴双栅	FLA-2-350-	C2/C4/C6/C8-	2	2.9	6.8	9.2	350
	QFLA-2-350-	2H					
	FLA-3-350-	C2/C4/C6/C8-	3	3.2	8.5	10	350
	QFLA-3-350-	2H					
0°/90° 双栅			X 轴	Y 轴			
	FCB-2		2	1.5	8.2	8	120
	QFCB-2						
	FCB-3-350		3	3.2	10.5	9.1	350
	QFCB-3-350						
	FCB-6-350		6	2	10	12	350
	QFCB-6-350						
	FCB-2.8-350		2.8	2.8	12	8.5	350
	QFCB-2.8-350						
	FCM-2.8-350		2.8	2.8	3	12	350
	EFCM-2-350-11		2.8、1.9	1.4、3.3	3	12	350
	EFCMX-3-350-11		3	1.6	8	7.5	350
	EFCMY-3-350-11		3	1.6	10	6.5	350

资料来源：欧美大地代理官网，民生证券研究院

此外，在传感器的内部有一种元器件叫做弹性体，弹敏元件是传感器的核心部分，要求弹性元件具有较高的弹性储能般用弹性材料存储变形功而不产生永久变形。一般优质的弹性体制作的传感器会具有优良的机械加工、热处理、抗压强度等特性。由于受温度影响较小等特点，适当选择单性敏感原件和应变计是提高应变传感器性能的重要途径。

图9：应变片贴合至弹性体工艺



资料来源：HBM，民生证券研究院

1.3 多维力传感器的技术壁垒更高，高精度、抗干扰能力强

力传感器是将力的量值转换为相关电信号的器件。根据所测力的维数不同，力传感器可分为单轴力传感器和多轴力传感器。

从后端信号输出的方式来看，可分为模拟量输出的传感器和数字量输出的传感器，数字量输出的传感器是在模拟传感器输出的信号基础上增加放大器和后端算法进行进一步的优化。

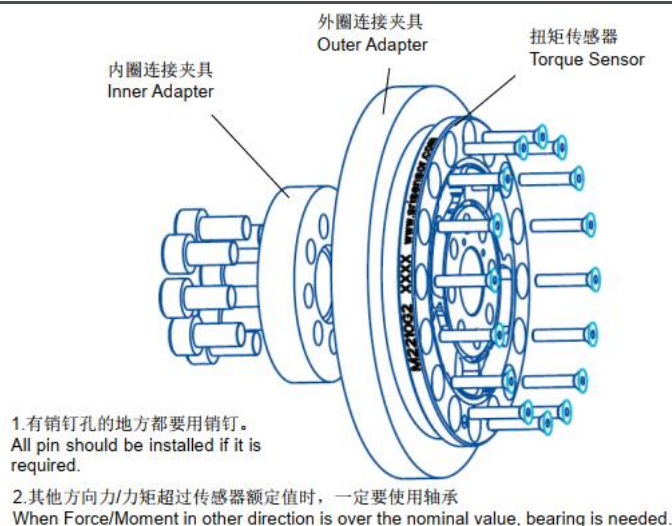
模拟传感器工作原理：各系列称重传感器以贴有应变片的弹性体为敏感原件，在外接激励电源后，输出与外加负荷（力）成正比例的信号。如果外部载荷作用在传感器上，测量体将产生变形，应变计的电阻也随之改变。这样，通过电阻的变化可测量出载荷大小。这不仅适用于扭矩传感器，也适用于称重传感器、力传感器和其他类型的传感器。然而，扭矩传感器有一些特殊功能。

一维力传感器又称为拉压力传感器，指测量单一维数方向上的力或力矩，同理多轴力传感器就是可以检测多个维数方向上的力或力矩。常见的一维力传感器主要是称重传感器，可广泛用于汽车衡、配料衡、包装秤等各种电子衡器和自动称重系统。此外，还可以选用不同形式的配套仪器，以满足计量、检测、调节及控制等其它应用要求。

此外，用于机器人关节内部的扭矩传感器区别于一般的扭矩传感器，相当于一个简化版的六维力传感器，扭矩传感器一般分成采用内外圈结构，内外圈相对受扭

力时，传感器发生弹性变形，传感器内部的应变计电阻发生变化，进而转换成电压信号输出。

图10：扭矩传感器示意图



资料来源：宇立官网，民生证券研究院

力传感器的性能指标：

1) 串扰：当在传感器其它方向的加载力（扭矩）至某个值（轴向力、径向力、弯矩）时，扭矩传感器的输出除以扭矩满量程的百分比。

机器人传感器抗扰能力最重要，如几个维度之间的最大串扰是多少，国内厂商普遍能够达到 1%~2%，这一指标越小越好。

2) 模拟量输/数字量输出：能够采用模拟量直接输出表明六维力传感器的机械设计水平高，不需要后续的算法对原始信号进行处理，当然也有方便客户使用而增加数字量输出的情况。

3) 过载能力：传感器抵抗过载的能力。宇立的产品一般是传感器额定量程的 1.5 倍至 3 倍。过载指标越大越好，安全过载一般能做到 150%~200%，达到 200% 以上说明技术水平较优。机器人高处摔下，传感器为最主要承力部件。在安全过载量程之内，传感器不会发生损坏，但零点会出现漂移，需重新标定。

4) 迟滞：在同一个负载下，加载和卸载时的信号输出在相等加载点上的最大偏差除以满量程的百分比，这一指标越小越好。

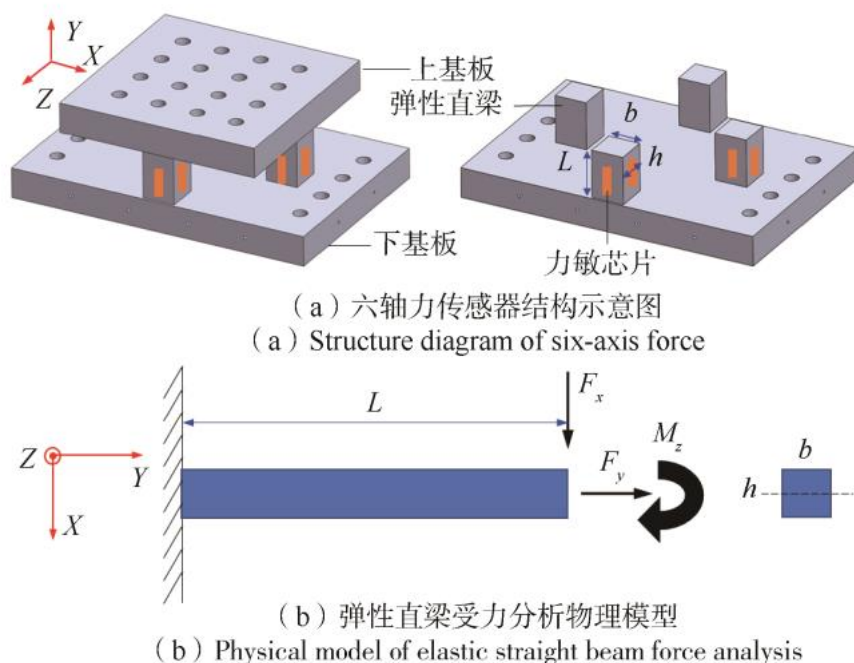
5) 零点：在“零状态”时传感器的输出。零状态由客户定义，如可定义为传感器水平放置时为零状态，也可定义为传感器竖直放置时为零状态。

6) 精度：传感器输出值的准确程度，通常用非线性、迟滞和串扰指标衡量。

多维力矩传感器相比于单轴力矩传感器技术壁垒更高，因为多维力传感器除了要解决对所测力分量敏感的单调性和一致性问题外，还要解决因结构加工和工

工艺误差引起的维间（轴间）干扰问题、动静态标定问题以及矢量运算中的解耦算法和电路实现等问题。六维力/力矩传感器指的是一种能够在笛卡尔坐标系中同时测量力和力矩并且可以各三个分量的转换成为电信号的器件，用于精密装配、运动医疗、智能制造等领域，能够实现检测、预防、测量、过程控制、示教、保护等功能。在工业自动化的趋势下，越来越需要使用机器人机械手来执行安装、焊接、研磨、去毛刺、物体抓取/移动等工作。对操作灵活性和有效控制的需求使得必须检测机器人机械手与其环境的相互作用力。测量的力信号不断输入机器人系统的控制单元，并由相关执行器采取必要的措施来优化性能。多维力传感器能够进一步提升机器人的灵敏度，从而提升执行任务的准确性，并且拓展更加精细的工作内容。

图11：六轴力传感器与弹性直梁结构示意图



资料来源：《压阻式大扭矩动态六轴力传感器设计》，赵友，民生证券研究院

六维力传感器的工作原理：六维力传感器的每一个力对应一个矢量，它们既有大小又有方向，它的标定都是假设传感器系统是一个线性系统，即传感器静态数学模型满足 $F=CV$ 。V 是它的 6 路原始输出信息(列信息，单位是 V)，F 是经过计算的 6 路力信息(列信息，力的单位是 KN，力矩的单位是 KNm)。

利用施加在六维力传感器上的广义力矢量组 F 和通过数据采集上采样得到的传感器 6 个输出信号矢量组 V 求出标定矩阵 C，传感器的输出信号是一个 6 路电压信号组成的矢量。在不考虑传感器的非线性因素影响下，只要给传感器施加 6 个线性无关的力矢量，并测得对应 6 个力矢量的传感器的输出电压信号矢量 V，就可以得到一个唯一解 C。

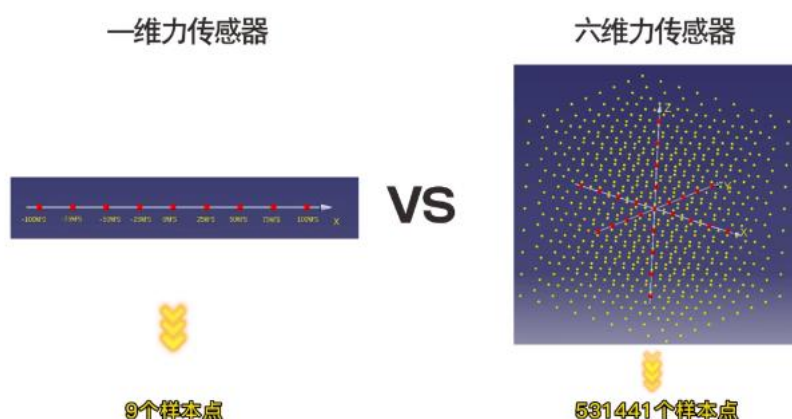
六维传感器的标定和检测：

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。辨识与标定方法可分为静态标定与动态标定。静态标定中，让机器人运动到几个姿态并停止，根据稳定时力矩传感器的数值与最小二乘法来标定负载参数及传感器自身参数。这种方式忽略了运动惯性的影响。

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，也就是测试传感器的准确性。简单来说，标定是获得传感器固件参数，检测是获得传感器的精准度。

图12：一维力传感器 VS 六维力传感器



资料来源：坤维科技——六维联合加载标定及检测（标定篇），民生证券研究院

对于六维力传感器而言，标定需要同时考虑六个维度，复杂度高，非线性效应显著。在六维力传感器标定过程中，采用三个方向的力和三个方向的力矩同时加载的方式，就叫做六维联合加载标定。标定解耦是六维力传感器提高精度的主要方法，一维力传感器，比如拉压力传感器，仅仅只需要 9 个样本点来标定。同样是每个维度取 9 个样本点，六维力传感器的样本空间就包含 531441 个样本点。

使用这么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更加接近于真实的使用情况。
- 2、这样标定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、这是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。

例如“串扰”这个指标，他能反应六维力测量误差水平，市场上比较常见的品牌标准值基本居于 2~5%FS，达到 1%FS 已然为优秀水准，而海伯森 HPS-CF025 的轴间串扰可做到<1%FS，可应用于精度要求高、量程要求低的场合，比如医疗领域的手术机器人或触觉腹腔镜仪器等。除此之外，海伯森六维力产品系列均通过

算法和结构的双重优化实现了低温漂、高精度和高静态过载保护，在 2000Hz 测量频率下迟滞仅为 0.1%FS，有效提升了机器人作业的精度和稳定性，除了医疗辅助、运动力检测和风洞测试等一些特殊的服务和应用，还可用于工业精密装配、柔性打磨抛光等。

总之，采用六维力联合加载标定，才能使传感器的准度更好、串扰更低。六维力传感器在承受多个维度的力的同时作用时，非线性特性非常显著，六个维度的线性模型叠加是无法精准描述这种非线性效应的。

动态标定：即考虑负载运动速度等对力矩传感器的影响。这种处理方式与机器人的动力学参数辨识类似，让机器人多个轴连续地运动，采集力矩传感器的数值与关节角度，完成对负载及零漂的辨识。

图13：机器人底座倾角及传感器零点计算

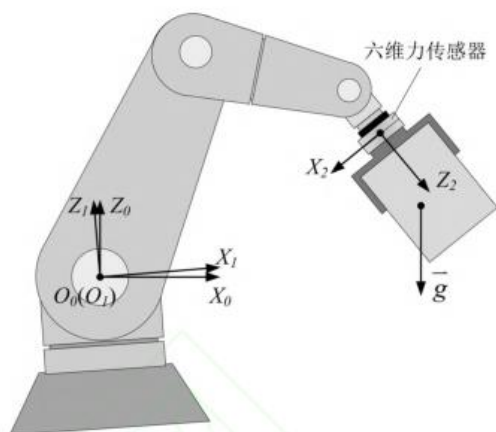


图2 坐标系定义示意图

资料来源：《基于六维力传感器的工业机器人末端负载受力感知研究》，民生证券研究院

六维力传感器能够增强机器人捕捉快速时变信号的能力，而动态性能较差的传感器跟踪测量这些信号难度较大。主要使用优化自身结构、形状等方法提高动态性能，通过动态补偿滤波器、遗传算法、神经网络算法等智能算法也能够提高传感器的动态性能。

多维力传感器的性能更优但成本高昂，因此在实现产业化应用的过程中要平衡传感器的成本和性能需求。

在力传感器的使用选择上：

1) 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。通过安装定位，使力的方向和作用点都与一维力传感器的标定坐标轴一致，这样就可以对力进行精确测量。举个例子，如图所示（图 1），一维力传感器的标定坐标轴为 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。

图14：六维力传感器坐标系中负载重力作用示意

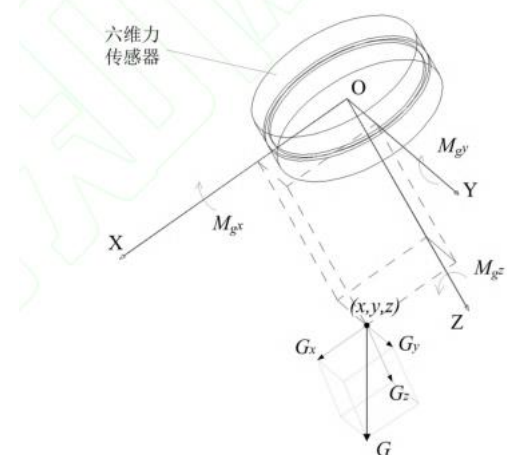


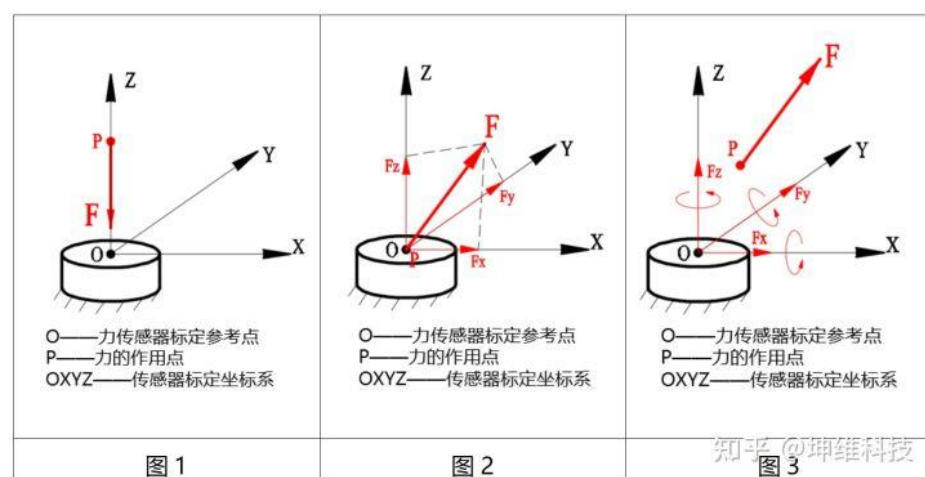
图1 六维力传感器坐标系中负载重力作用示意

资料来源：《基于六维力传感器的工业机器人末端负载受力感知研究》，民生证券研究院

2) 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, 那么我们就应该用三维力传感器。因为被测量的力可以分解为三维力传感器标定坐标系下的三个正交分量, 三维力传感器的三个测量单元可以分别对其进行测量。用图举例说明 (图 2), 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器就能完成测量任务, 它可以同时测量 F_x 、 F_y 、 F_z 这三个 F 的分力。

3) 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。因为空间中任意作用点上的力可以在六维力传感器的标定坐标系内, 分解为沿标定坐标轴的三方向分力和绕标定坐标轴的三方向力矩。还是看图说话 (图 3), 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 F_x 、 F_y 、 F_z 、 M_x 、 M_y 、 M_z 六个分量。

图15: 不同维度数的力传感器示意图



资料来源: 坤维科技, 民生证券研究院

在六维传感器中, 其中的弹性力传感部件起着关键作用。应变片作为一个整体牢固地粘合到该杆件的适当位置, 形成至少六个桥式电路, 从电压输出中, 通过矩阵计算确定三个力和三个力矩的大小和方向。就各种桥式电路的输出与六个力分量的应用之间的关系而言, 六维力传感器可以是耦合或解耦的。对于前者, 任何力分量的存在通常会在多个桥中产生输出。因此, 这种传感器中存在交叉灵敏度, 因此校准矩阵相对复杂。至于后者, 对应于特定力分量的电桥的输出不受任何其他力分量的影响。如果是这种情况, 则用于计算六个力分量的校准矩阵是对角线, 其对角线中只有非零元素。当然, 由于力传感部件通常是单片的, 因此在现实中无法获得完全解耦的传感器。每个传感器都在某种程度上是耦合的。然而, 在交叉灵敏度不显著 (例如, 低于 2%) 并且全部被忽略的情况下, 可以将传感器视为具有可接受精度的解耦传感器。

六维力传感器的内部算法, 会解耦各方向力和力矩间的干扰, 使力的测量更为

精准。高精度度的军用六维力器，可以确保在六维度联合承载的情况下，测量值偏差在量程的 0.3%FS 以内。所以，需要精准测量的情况下，六维力传感器的效果更佳。

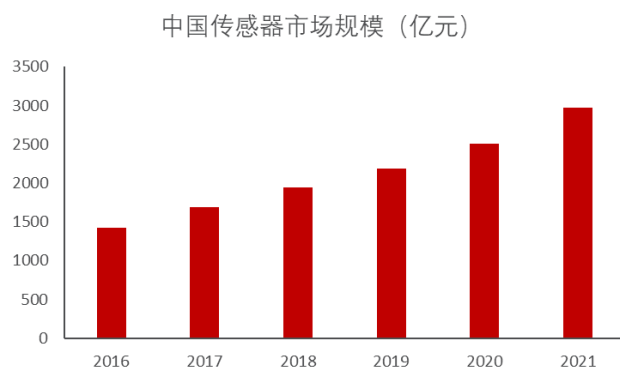
2 力传感器市场空间巨大，新兴应用开拓市场

2.1 力传感器需求不断增长，以称重传感器需求为主

从传感器整体市场现状来看，据华经产业研究院统计，2016 年以来我国传感器整体规模表现为快速扩张远高于全球增速，占比全球市场份额持续提升，2021 年我国传感器市场规模达 2975.1 亿元。市场结构占比方面，以中低端传感器为主，压力传感器和图像传感器占比稳步提升，2021 年分别占比 17.9% 和 10.3%，是目前国内占比最高的两种传感器。

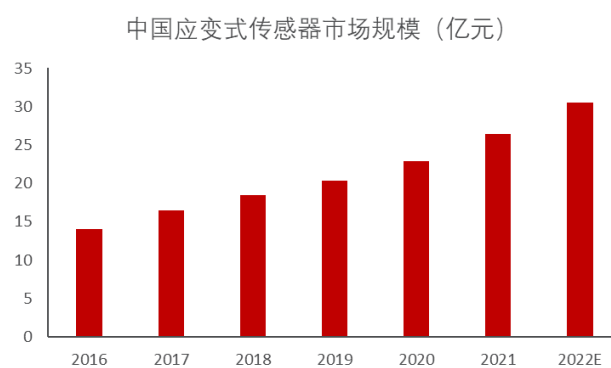
从市场规模来看，国内应变式传感器市场规模稳健增长。据华经产业研究院统计，2021 年中国应变式传感器市场规模为 26.4 亿元，同比增长 15.2%，预计 2022 年中国应变式传感器市场规模将达到 30.57 亿元，2016-2022 年间 CAGR 为 14%。

图16：中国传感器市场规模



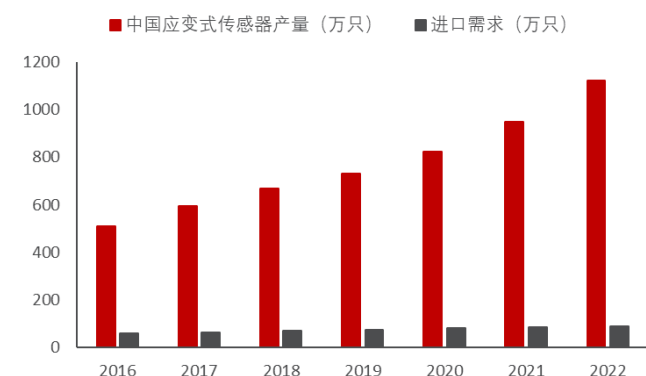
资料来源：华经情报网，民生证券研究院

图17：中国应变式传感器市场规模

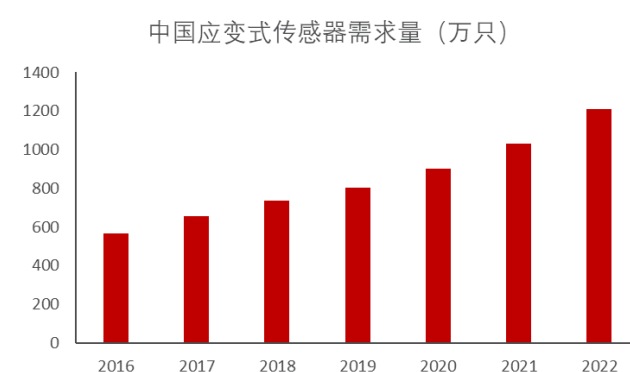


资料来源：华经情报网，民生证券研究院

供需方面，我国应变式传感器需求量大于产量。据华经产业研究院统计，2021 年我国应变式传感器行业产量为 948.9 万只，需求量为 1032.1 万只；据华经产业研究院预计，2022 年产量及需求量分别达到 1122.6/1211.2 万只。

图18：中国应变式传感器国内产量（万只）


资料来源：华经产业研究院《中国应变式传感器市场运营现状研究与投资战略调研报告（2023-2030年）》，民生证券研究院

图19：中国应变式传感器需求量（万只）


资料来源：华经产业研究院《中国应变式传感器市场运营现状研究与投资战略调研报告（2023-2030年）》，民生证券研究院

从市场需求组成来看，由于医疗机器人、人形机器人、工业领域运用的协作机器人发展时间还相对较短，市场需求量相比于传统的称重传感器小的多。以国内的常规传感器供应商柯力传感为例，公司在称重传感器产品基础上拓展称重物联网市场，称重物联网指的是其感知层的传感器主要测量物体或过程的重力信息的物联网，主要由数字电子衡器（轨道衡、汽车衡、电子皮带秤等）、红外摄像仪、数据/视频通讯模块、GPRS 模块、数据服务器和计算机应用软件组成。其产品根据弹性体材料分类包括钢质传感器和铝质传感器两大类。合金钢为钢质传感器的主要应用材质，钢质传感器广泛适用于环境较为恶劣的各类工业生产及室外场合，如冶金、化工、矿山、煤矿、公路交通超限检测、汽车安全检测等；铝质传感器适用于环境较好、腐蚀性小的场合，广泛用于各类商用衡器、天平、医疗设备、汽车保养、工业及实验室计量。

根据高工机器人产业研究所（GGII）数据显示，2022 年中国市场六维力/力矩传感器销量 4840 套，同比增长 62.58%。GGII 预计，2023 年中国市场六维力/力矩传感器销量有望突破 6700 套，同比增速 40%左右。

从当前出货量来看，目前六维力/力矩传感器市场在整体传感器市场中占比依然较低，尚未形成明显规模效应。随着国内参与研发厂商的持续增加，叠加下游应用场景不断扩张，对六维力/力矩传感器的市场需求有望进入高速成长期，将伴随着多技术路线、产品矩阵的完善、产品成本的下降以及国产化率的提升。

图20：中航电测力传感器相关产品



资料来源：中航电测官网，民生证券研究院

从国内市场看，目前国内企业在衡器等领域应用的中低端占据绝大部分市场份额，其中宁波柯力传感科技股份有限公司、中航电测仪器股份有限公司为我国应变式传感器龙头企业，2016 年分别占据我国应变式传感器市场 20.21%、16.22% 的份额。

从力传感器的核心零部件市场来看，据 GIR(GlobalInfoResearch)调研，2021 年全球电阻应变片收入大约 133.8 百万美元，预计 2028 年达到 150.8 百万美元。全球市场主要电阻应变片生产商包括 Vishay、HBM、NMB、KYOWA 和 TML 等。国内中航电测是重要的电阻应变片供应商。

2.2 力传感器相比于电流环传感方案精度更高

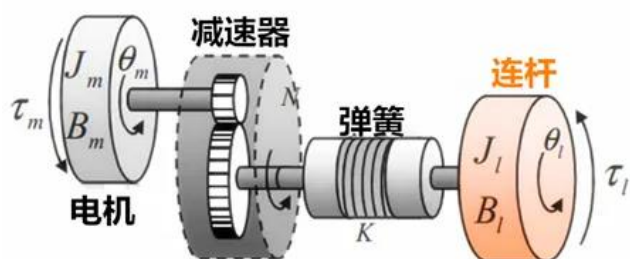
力传感器是机器人力感知的关键部件。ABB、安川、KUKA 等企业的机器人，能够广泛应用于仿生、医疗、打磨、装配、抓取及人机共融等领域中，持续开发拖动示教、人机交互等功能，除开本身具备高柔性、高自动化等优点，力传感器的作用不可忽视。

从仿生视角来看，想要让机器人实现人的肢体操作，例如机器手，在进行抓取等动作时，可以拆分为两个步骤，皮肤感知到物体，随后手执行抓取，而对应于机器人的关节构成，是由布置在末端执行器与机器人之间的力传感器感知到物体，将其反馈到机器人监控中，随后末端执行器执行抓取的动作。通过电流环、关节扭矩、六维力传感器或电子皮肤等方式可以实现对机器人的自适应柔性控制，提高机器人运动的安全性。

多维力矩/力传感器力控是当前力控的最佳方案，电流环传感方案难以满足人形机器人等精细工作场景需求。目前机器人力控方案大致有 3 类，分别为电流环

力控、多维力矩/力传感器力控、被动力控（弹性体），其中多维力矩/力传感器力控是当前力控的最佳方案，其硬件包括关节部位的单轴力矩传感器和机器人执行器末端的 6 轴力传感器。关节力矩传感器感知能力相比于电流环感知能力更优。

图21：机器人关节模型（简化版）



资料来源：《电流环与关节力矩传感器感知能力比较》，作者：桂凯，民生证券研究院

电流环力控是一种不增加力反馈的传感器，而用伺服电机的电流环的电流反算每个关节的反作用力，弊端是机械臂的减速比要比较小，轻负载，精度差（低精度要求场景下的协作机器人可能运用）。

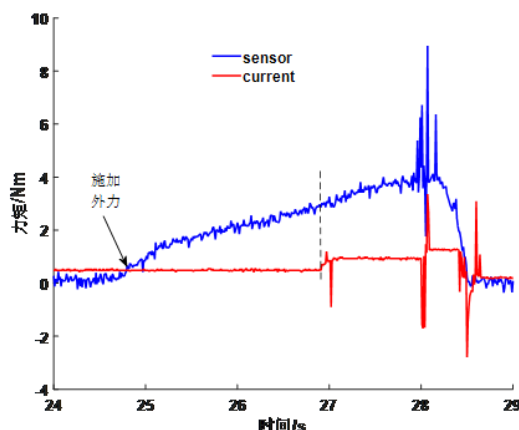
被动力控的方案是末端执行器加弹性体，原理是位移控制，加上弹性体可以用恒定的力之后，能够实现抓取目标物体，避免损坏；主要适用于低成本环境。

力矩传感器、六维传感器-ATI/Robotiq 机器人采用的模式。基于力和力矩，控制精度好，感知精度高，完全独立，控制的电流波动都能感觉到。

对比电流环和力矩传感器对外部施加力的反馈精度，如图，是一个简化的机器人关节模型，其中的弹簧相当于力矩传感器。初始时关节处于静止状态。通过力矩传感器，施加在连杆上的外力能够很快的传导到传感器上，而电流环则是通过 K 传感器后持续向后传递到减速器端，当外力矩增大到超过减速器的最大静摩擦力时，减速器转动再向电机传导信号，在这之后，电流环才能够感知到外力矩。

从力矩传感器和电流环信号对外部推力增加的信号变化来看，从由于减速器的静摩擦力，需要较大的外力，才能使电流环检测到，而力矩传感器能够较快的检测到外力的变化，在对于性能追求大于成本控制追求的情形下，力矩传感器是更优的传感方案。

图22：力矩传感器和电流环信号的变化



资料来源：《电流环与关节力矩传感器感知能力比较》，作者：桂凯，民生证券研究院

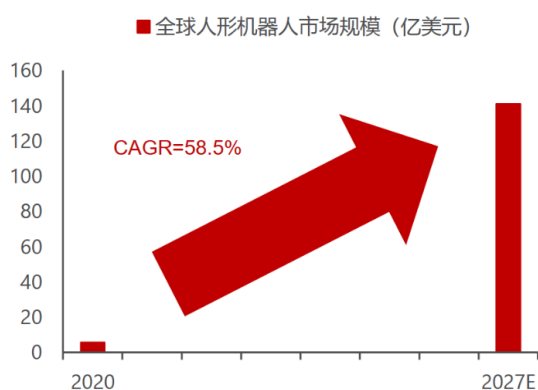
2.3 人形机器人等新技术有望带来六维力传感器需求提升

2.3.1 人形/医疗机器人市场需求有望快速增长

六维力传感器及关节扭矩传感器主要应用于高端领域的机器人，人形机器人市场空间大，增速迅猛。人形机器人下游应用领域按最终用户可以划分为涵盖了教育、医疗、酒店、公共设施、住宅、零售和其他。

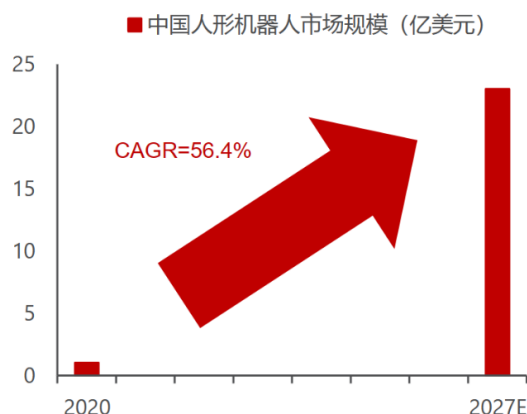
根据 StatisticsMarketResearchConsulting 的数据，2020 年全球人形机器人市场估计为 5.6 亿美元，而到 2027 年预计市场规模将达到 141 亿美元，CAGR 达 58.5%。其中，2027 年中国人形机器人市场有望达到 23 亿美元，CAGR 达 56.4%。

图23：全球人形机器人市场规模



资料来源：StatisticsMarketResearchConsulting，民生证券研究院

图24：中国人形机器人市场规模



资料来源：StatisticsMarketResearchConsulting，民生证券研究院

力矩传感器也在协作机器人场景中广泛运用，例如国内广东省深圳市大族机器人有限公司推出的 MAiRA 系列协作机器人助手，配有 3D 视觉传感器，利用六维力控制技术提高机器人的智能性。珞石(北京)科技有限公司的柔性协作机器人 xMateCR 系列，每个关节内置力矩传感器，具有超高的安全性能和运动控制能力，采用图形化编程技术简化操作，可实现汽车零部件、3C 等不同工业场景的人机协作生产。

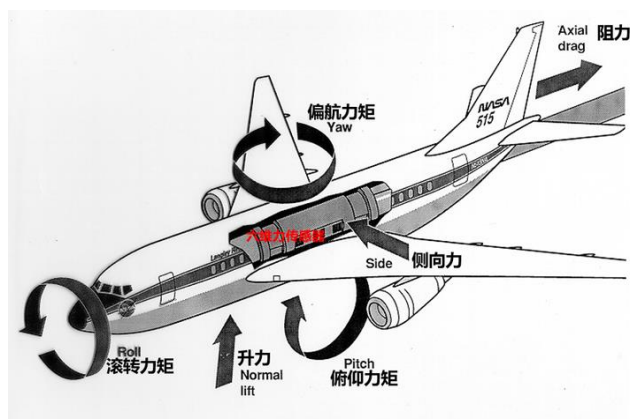
医疗领域的机器人市场需求同样可观。目前，协作机器人+六维力传感器的组合已广泛应用于手术机器人、康复机器人、按摩理疗机器人、医疗检测机器人（如核酸检测机器人、远程 B 超机器人等）等形式的医疗康养行业智能化解决方案。

手术机器人的力感知可作为力反馈的依据以提升手术的安全性。当手术机器人拥有力反馈功能，医生就可以精确感知机器人末端工具（或末端执行器）和人体的相互作用力，区分健康组织和病变组织，并进行精准力输出控制，从而避免因用力过大造成缝合处的二次损伤。因此，六维力传感器产品已成为类似应用场景中的刚需。

根据 Frost&Sullivan 的预测,全球手术机器人市场 2020-2026 年预估复合增长率为 26.2%。中国手术机器人行业处于早期发展阶段,增长潜力较大。2020 年国内手术机器人市场基数为 4 亿美元,2015-2020 年复合增速 35.7%,至 2026 年预期年复合增速 44.3%,达到 38 亿美元。

根据宇立 SRI 的公开数据,公司在医疗机器人领域的应用已经取得大额订单。2014 年 Medtronic 开始研发 HugoRAS 手术机器人,2015 年 SRI 开始为 HugoRAS 提供关节扭矩传感器,2021 年美敦力获欧洲临床手术证书并成功进行了第一例临床手术。仅 2022 年前 7 个月, SRI 已从 Medtronic 获得订单 1100 多台。

图25: 航空航天领域的六维力传感器应用



资料来源: 坤维科技《初识六维力传感器》, 民生证券研究院

图26: 医疗手术机器人六维传感器应用案例

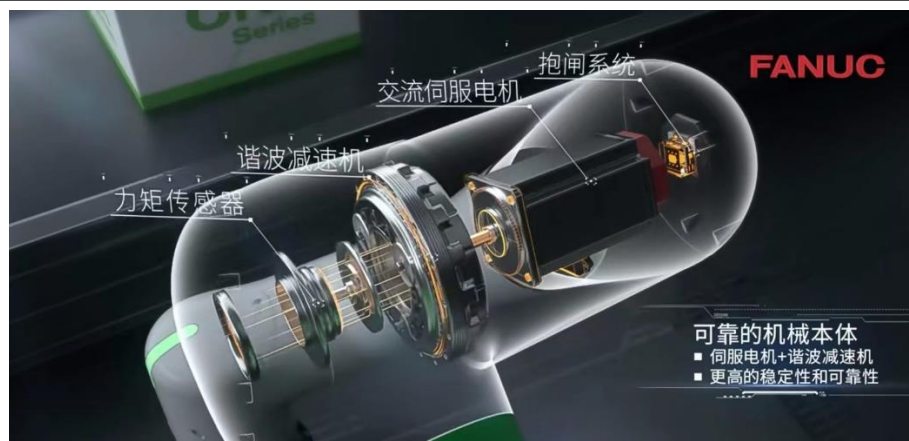


资料来源: 美敦力, 民生证券研究院

2.3.2 从特斯拉机器人看力传感器运用

2023 年 5 月特斯拉展示了 TeslaBot 人形机器人“擎天柱”(Optimus) 的全新型号。特斯拉 Optimus 人形机器人工程机在会场展示行走能力,并在播放视频中完成提起水壶行走浇花,工厂内搬运物品等动作,这些动作都是通过 Optimus 自身集成的软硬件执行完成,没有外部控制与外接线束,说明样机已具备一定的运动规划任务执行能力。而随着人形机器人对关节的灵活度和运动精度的控制能力进一步提升,对力矩传感器的需求进一步提升。在特斯拉人形机器人中,除手指部分小执行器外,特斯拉机器人本体共包含多种不同的力矩/推力大小的执行器,一大类是直线执行器,另一大类是旋转执行器。

图27：机械臂构成



资料来源：FANUC 官网视频截图，民生证券研究院

TeslaOptimus 旋转执行器方案为：永磁无刷电机+谐波减速器+抱闸+双编码器+力矩传感器+轴承，旋转关节的优势在于小体积，大速比，扭矩密度比较高。直线执行器方案为：永磁无刷电机+行星滚柱丝杠+位置编码器+力传感器+轴承，采用线性执行器驱动器关节的优势：高精度、低能耗、高负载、高空间利用率、具备自锁能力。

人形机器人运用力传感器的主要场景包括三大类：

一、主体的力控方案根据实际需求的不同有多种解决方案，一般而言，在平路面上工作的人形机器人可不采用六维力传感器，但在面对复杂路况的情况下，人形机器人需要采用六维力传感器。

方案一：主体放置六维力传感器，成本高但检测精度、信息数据量都更好。

方案二：去除六维力传感器，通过腿部关节力矩，拉压力传感器反推主体受力情况，也可以实现力控。

方案三：主体放气囊，放气压传感器。

方案四：直接在主体内放拉压力传感器也可以做主体力控。

几种方案没有绝对的优劣，主要取决于使用场景的需求和成本的需求。

二、关节（运用于机器人的旋转关节和直线关节内部）

1) 旋转关节，在减速机外部放置一个力控传感器。

2) 直线关节，视电机情况，如果是旋转电机，放扭矩力控传感器，也可以在传动轴上放一个扭矩传感器。如果用直线电机，可以在推杆上放拉压力传感器，做直线关节的力控。

三、手部力控，主要是两种技术路线，手有直线电机，一可以在直线电机推杆上放拉压力传感器测试力，二可以在手部内放置触觉传感器，目前来看，触觉传感器方案更优。

就手腕部分而言，机器人一般具有六个自由度才能使手部达到目标位置和处于期望的姿态，腕部的自由度主要是实现所期望的姿态，并扩大臂部运动范围。腕部实际所需要的自由度数目应根据机器人的工作性能要求来确定。手腕处通常会放置六维力传感器来满足精度的要求。

例如，机器人在执行抓取动作时，首先是视觉传感器的作用，测绘目标的三维形状以及所有视觉内的环境，位置控制环计算得出最优的路径达到目标位置，在接近的时候再进行补充矫正，补充矫正有多种方案。后续的手掌还会有补充的传感器，可以放激光雷达、也可以放置另外一个视觉传感器（手掌上），便于二次定位，再进行抓取动作，发生碰触后，力控的信号发生变化就说明已经抓到目标对象，再重新调整位控。遵循位控接近——力控感知——力控信号出现后重新位控的流程。

3 竞争格局：国内产品更具性价比，替代潜力巨大

3.1 多维传感器单价高，国内产品更具性价比

多维传感器主要应用于高端需求场景，下游机器人领域客户进入壁垒较高。

目前，全球的力传感器厂商主要包括日韩、欧美、中国地区的供应商。日韩地区六维力/力矩传感器厂商主要配套当地机器人本体厂商，其中，韩国企业 Robotous、Aidin Robotics 主要合作厂商包括 Doosan Robotics、Neuromeka 和 Rainbow Robotics；日本企业 Sintokogio 和 WACOH-TECH 主要合作厂商包括发那科、电装、三菱、那智不二越、安川等。欧美地区六维力/力矩传感器厂商主要包括传统的传感器生产商，包括 ATI、AMTI、Kistler 等，以及全球知名的机器人末端工具生产商，主要有 SCHUNK、OnRobot、Robotiq 等，欧美地区厂商合作企业以协作机器人本体厂商为主，主要包括优傲机器人、达明机器人和欧姆龙等。

目前，国产六维力/力矩传感器与海外厂商传感器在灵敏度、串扰、抗过载能力及维间耦合误差等方面仍存在差距。但国内参与公司不断取得技术进展，宇立仪器（SRI）、坤维科技、鑫精诚、海伯森、蓝点触控、神源生智能、瑞尔特测控等，均已有相关的产品落地并进入产业化应用。

多维传感器单价相比于一维力传感器有大幅的提升，国内品牌产品单价显著低于海外品牌。力传感器的单价随着产品技术难度的提升而显著提升，国内一维力传感器的单价大约在几十-几百元，六维力传感器在 1-4 万元，国外品牌的一维力传感器的单价就在两千元左右，在六维力传感器单价在 5-10 万元。

图28：国外拉压力传感器单价 1890 元

资料来源：采购网，民生证券研究院

图29：国外 ATI 六维力传感器单价为 7 万元。

资料来源：采购网，民生证券研究院

3.2 国内外主要力传感器供应商

3.2.1 海外力传感器龙头厂商

海外龙头企业：ATI

ATI 工业自动化是世界领先的机器人附属产品的工程研发公司，早在上个世纪 80 年代，ATI 公司就创造性地发明了六维力和力矩传感器，它可以测量 XYZ 三个方向和反方向的力和力矩，被广泛应用于各个工业领域，如产品测试，机器人装配，打磨和抛光等；在研究领域被用于外科手术机器人，仿生机器人，康复机器人，以及神经学等。

表4：ATI 产品系列

ATI 产品系列					
系列名称	Axia 系列	Nano 系列	Mini 系列	Gamma 系列	Delta 系列
产品图					
特性简介	高性能、低成本的六轴力/力矩传感器 拥有极高的分辨率、精度和刚度 支持 Ethernet、EtherCAT 或 RS-485 通讯 标配双量程 新增 IP64，防尘防水等级	最小的六轴力/力矩传感器 适用于研究应用领域 支持 IP65（防水溅）、IP68（水下工作）防护等级	小型、紧凑低剖面的六轴传感器 可应用于机器人相关研究（遥控、外科辅助、仿真、康复），手指压力的相关研究 同样支持 IP65、IP68 防护等级	采用高精度加工的高强度航空铝型材 可应用于：实时力控制、机器人装配、触觉反馈、汽车零部件测试、假体装置测试 支持 IP60、IP65、IP68 防护等级	采用高精度加工的高强度航空铝型材 含有过载定位销 可应用于：力的实时监控、机器人的装配、触觉反馈研究、康复学研究 支持 IP60、IP65、IP68 防护等级

资料来源：ATI，民生证券研究院

海外龙头企业：HBM

HBM 公司成立于 1950 年，总部位于德国达姆斯达特市，是全球称重、测量和测试方面的技术领导者，产品分为传感器、数据采集系统、测量软件三大类。HBM 公司拥有 3 个生产基地以及遍布全世界范围内 30 多个销售代理机构，主要客户遍布全球，世界上很多著名的衡器及测量方面的公司都与 HBM 公司有密切的合作关系。1997 年，HBM 公司在中国苏州投资设立全资子公司霍丁格包尔文（苏州）电子测量技术有限公司，注册资金 300 万美元，主要生产电阻应变计和应变式称重传感器，同时还全权负责亚洲地区的销售，代理 HBM 公司德国和美国公司的全部产品，包括应变计、各种高精度钢质传感器、称重仪表、传感器附件，以及运用于工业测量领域的压力、扭矩、位移、加速度传感器和相关数据采集系统等。

海外龙头企业：美国威世测量集团

美国威世 (Vishay) 测量集团成立于 1962 年，总部位于美国宾夕法尼亚州，是世界最大的无源半导体器件、应变片及称重传感器的最大制造商之一，目前集团已经有 69 个制造基地，遍布全球 17 个国家，其中中国大陆有 7 家制造工厂分别坐落于天津、北京、上海、惠州等地。其产品被广泛地应用于工业、计算机、汽车、消费品、电信、军事、航空和医药等领域的各种电子仪器设备上。威世 (Vishay) 测量集团多年来通过兼并和整合等资本运作，先后将世界称重传感器制造领域内多个知名品牌囊括至其集团传感器事业部旗下，威世 (Vishay) 测量集团目前拥有的品牌包括：STS、TEDEA-HUNTLEIGH、CELTRON、BLH、NOBEL、REVERE 等。

3.2.2 国内力传感器龙头厂商

宇立 SRI (非上市)：六维力传感器龙头企业，产品进入海外核心客户供应链

宇立仪器 (SunriseInstruments, 简称 SRI) 由原美国 FTSS 总工黄约博士创立，是 ABB 全球战略供应商，世界各地的机器人都在使用宇立的产品。宇立在打磨、装配和协作机器人的力控产品方面都有一定的国际影响力。美敦力生产的腹部手术机器人使用了宇立生产的传感器，这也标志了宇立的产品已经升级到足以满足医疗设备生产的高要求。在产品上，宇立作为全球领先的六轴力传感器供应商，产品应用于机器人及自动化、汽车碰撞测试、汽车耐久测试、生物力学和通用试验设备等多个领域。自 2007 年以来，宇立仪器设计生产了 9 大系列，200 多个型号的多轴力传感器，从一轴至六轴，都有相应的产品。

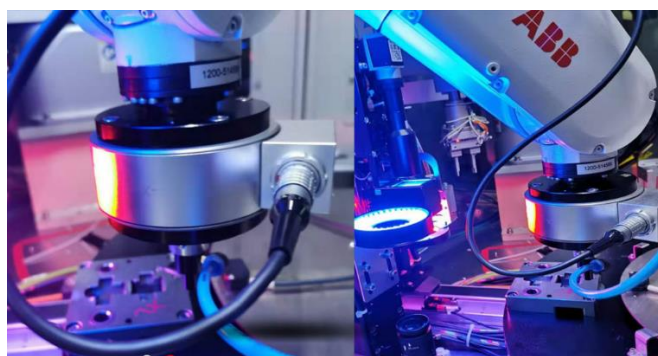
2021 年宇立上海总部开始运营，同时与库卡机器人和上汽技术中心成立了“宇立-库卡智能打磨实验室”和“宇立-itest 联合创新实验室”，致力于力控、视觉和智能控制软件等技术的融合，推进工业机器人智能打磨应用和汽车测试行业的智能化。目前宇立已拥有 4500 平米的生产车间，包括机械加工、洁净传感器生产车间、组装车间和测试车间等完善的生产体系。

图30：宇立的合作伙伴



资料来源：宇立 SRI，民生证券研究院

图31：宇立六维力传感器应用于 ABB 机器人



资料来源：宇立 SRI，民生证券研究院

坤维科技（非上市）：航空航天领域力传感器技术出身，技术实力强

坤维科技成立于 2018 年，坤维科技的创始团队均来自航天科研机构，从事智能型多轴力传感器研发、生产及应用近 20 年，掌握力觉测量核心技术，具备自主知识产权。公司的核心产品——六维力传感器，以其先进的力敏元件及其固化技术、标定检测技术、核心算法、智能化硬件，赋予机器人、精密制造、测试与测量、航空航天、大健康等领域革命性的机器力觉产品及解决方案。坤维科技六维力传感器产品源于航天测试技术，技术积累已有 50 余年，品控严格，产品性能稳定，准度（含串扰 crosstalk）可优于 0.5%FS。

海伯森（非上市）：

公司专注于工业级传感器的技术创新，并具备将光、机、电、算技术综合应用于传感器产品的研发能力和规模化生产能力，主营产品包括 3D 线光谱共焦传感器、点光谱共焦位移传感器、超高速工业相机、六维力传感器、面阵固态激光雷达、激光对针传感器、单点 ToF 测距传感器和激光三角位移传感器等。公司全面布局海内外市场，旨在为 3C 电子、工业自动化、精密工件检测、医疗、科研等行业领域提供精密智能传感技术，助力实现智慧工业和万物互联，让精密智能传感产品能够在工业 4.0 时代更好地服务于全球用户。

4 相关上市标的

4.1 柯力传感：国内应变式力传感器龙头，多维传感器在研

公司连续 14 年在国内称重传感器市占率保持第一，现已开发可应用于机器人的微型、测重测力、静态扭矩、多维力传感器。公司以称重传感器业务起家，是目前全球称重领域物联网研发与推广应用的主要引领者之一，也是中国重要的称重元件制造及销售企业之一和工业物联网产业开拓者之一，应变式传感器是公司的核心产品。根据公司公告，公司开发了三维力、六维力等多维力传感器，可用于机器人手臂运动与工作载荷监测、曲面研磨抛光、加工中心精雕加工、医疗设备精密测控等，具有高精度、高灵敏度、抗偏载能力强、维间耦合小等特点。目前多维力系列产品仍处于小批量试制阶段。

公司 2022 年实现营业收入 10.61 亿元，同比增长 2.85%；2022 年实现归属于母公司所有者的净利润 2.6 亿元，同比增长 3.58%。公司具备智能化产线，在后续传感器的产业化生产方面具有较强的优势，能够助力传感器环节的降本。截至 2022 年年报披露时点，公司的“机械手工作检测多维力传感器研发”、“SQB 系列称重传感器自动贴片装置研发项目”均已经处于研发状态，将赋能未来公司在多维传感器领域的生产能力。

公司产能逐步释放，自动化产线建设加速。公司加快“自动化、信息化、智能化”三化融合，推进宁波慈城新工厂、郑州工厂、安徽工厂三大制造基地建设。2022 年，公司实现了产能提升，并朝着“无人工厂”方向前进。根据公司公众号报道，截至 2023 年 5 月 26 日，宁波慈城新工厂总面积 73000 平方，主体工程已于 2023 年 4 月 6 日全部完成，整个项目预计于 2023 年 12 月 30 日投入使用。郑州工厂总面积 84500 平方，定位于面向北方市场的传感器及物联网系统集成制造基地，主体预计于 2023 年 8 月完成，整个项目预计于 2024 年 1 月投入使用。

4.2 中航电测：国内应变片龙头，自动化产线升级

中航电测，成立于 2002 年 12 月 25 日，是中国航空工业集团公司控股企业。中航电测是国内军民用智能测控龙头，业务分为航空军品、传感控制、智能交通及其它四大类。航空军品主要分机载电测产品与配电控制系统、测量控制设备两大类，传感控制主要包括感知器件、仪表软件、智能装备、控制器件、物联网装备，智能交通主要包括机动车检测、驾培驾考业务、基于测量控制技术车载终端系统业务以及车联网业务、移动源环保业务、信息化系统业务。

公司的传感器平台已经进入航空发动机、航天空间站、雷达车、船舶等多个领域，接近传感器实现快速增长，水量测量传感器获得配套机会；非航防务市场实现战车、高能武器的应用配套；智能配电实现多个无人机型站位。

公司具备产线自动化能力，有利于对传感器进行大规模量产。公司持续加快推进数智战略，推进智能排产（APS）开发和试点应用，传感器产线排产效率和准确

度大幅提升，开启智能决策的新起点；大力推动自动化改造，报告期内推动 11 项自动化产线、自动化测试建设项目，有效提升了自动化水平，改善了生产效率和产品品质。

表5：中航电测力传感器相关在研项目

主要研发项目名称	项目目的	项目进展	拟达到的目标	预计对公司未来发展的影响
应变计系列技术研究	基础技术研究，提升应变计温度性能，提高产品稳定性，提高技术水平和能力	技术实现	形成系统的应变胶粘剂技术，箔材热处理技术，半成品技术，调阻技术，应变计性能和稳定性研究技术平台，支撑应变计产品发展。	进一步提升公司应变计技术水平，巩固公司在行业内的领先地位。
传感器系列技术研究	基础技术研究，提高传感器精度	技术实现	提升全温度 C3 批量合格率；实现动态传感器批量生产；初步掌握 C5、C6 核心技术，BM24R-C6 通过认证。	进一步提升公司传感器技术水平，巩固公司在行业内的领先地位。
高精度动态称	突破国内在动态称重技术上的瓶颈	产品实现	研制出一款高精度动态称，实现可批量生产	对标国际同类产品，进一步提高公司产品在国内动态称重领域的品牌影响力和产品竞争优势

资料来源：中航电测 2022 年年报，民生证券研究院

4.3 汉宇集团：投资同川科技及海伯森，布局人形机器人

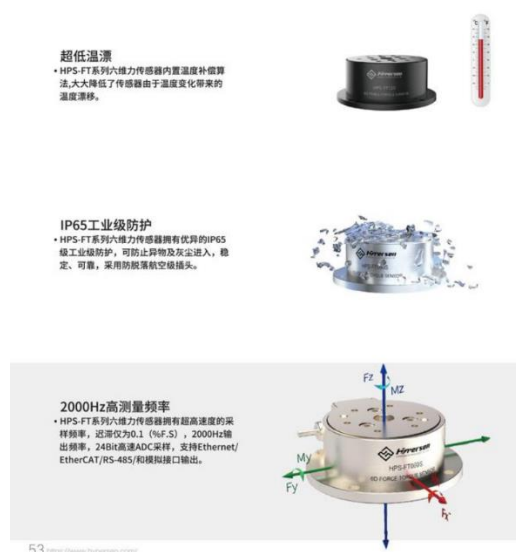
公司主营业务为高效节能家用电器排水泵的研发、生产和销售，2022 年排水泵业务营收 8.77 亿元，占比达 83%。凭借在电机核心技术方面多年的经验积累，公司积极布局电机应用领域，截至 2021 年，已开拓终端电器、工业机器人、新能源汽车配件等多个新业务板块。汉宇集团控股子公司同川科技参股投资了海伯森，海伯森产品可广泛应用于先进制造、精密测量、工业自动化等领域。

同川科技系汉宇集团控股 60% 的子公司，于 2012 年成立，2015 年开始逐步投入研发谐波减速器。公司谐波减速器产品性能位列国内第一梯队，主要应用于工业机器人，具备年产十万台级的量产能力。目前公司在积极拓展海内外机器人本体客户。根据公司公告，同川科技已实现谐波减速器产品的批量生产和销售。“同川精密 TCDrive”主要经营：精密谐波减速机，伺服电机，机电一体化模块等产品。

海伯森已入选为国家级高新技术企业和深圳市专精特新企业，公司在光学精密测量、工业 2D/3D 检测、机器人智能应用等领域形成了成熟的产品

矩阵，主营产品包括 3D 闪测传感器、3D 线光谱共焦传感器、点光谱共焦位移传感器、超高速工业相机和六维力传感器等。根据汉宇集团公告，海伯森生产的六维力传感器可以应用在人形机器人上。2021 年，海伯森 HPS-FT 系列六维力传感器获得全球协作机器人大厂丹麦优傲（universal-robots）独家认证，成为国内首家获得“UR+”官方认证的高端智能化传感器研发生产企业。

图32：海伯森六维力传感器



资料来源：海伯森官网，民生证券研究院

4.4 瀚川智能：投资坤维科技，完善传感器布局

公司的主营业务聚焦汽车的电动化和智能化，主要产品为汽车智能制造装备、电池智能制造装备和充换电智能制造装备。公司于 2021 年公司进入换电行业，2022 年公司业务聚焦汽车智能化、电动化等主航道业务。公司在拓宽汽车智能制造业务产品应用范围的同时，也积极进行电池设备智能制造及充换电业务的产品研发和下游市场开拓，共同助力公司发展。

2020 年 11 月，瀚海皓星与坤维科技及其他股东签订了《股权转让协议》，受让坤维科技 4.239%股权，对应注册资本 11.905 万元。2021 年 1 月，瀚海皓星与坤维科技及其他各方股东签订了《增资协议》，向坤维科技增资 4.481 万元注册资本，增资完成后瀚海皓星持有坤维科技 5.485%股权。坤维科技主要产品六维力传感器是力觉控制系统的核心部件，公司在六维力传感器领域具有较强的竞争力。坤维科技的产品可以作为核心零部件应用于瀚川的智能化产线中。

5 风险提示

1) 成本下降不及预期的风险。机器人能否实现产业化应用一方面取决于成本能否下降到经济范围, 以及能否实现大规模量产。若公司不能及时开发出适应市场需求的新产品, 或者机器人公司未能开发出量产方案, 将使得市场需求规模无法进一步增长。

2) 技术无法突破的风险。国内众多公司尚处于六维力传感器的技术开发过程中, 若公司的研发进展不及预期, 无法实现技术突破, 也就无法开拓相应市场, 或者失去先发优势。

插图目录

图 1: 传感器分类	3
图 2: 不同传感器性能对比	4
图 3: 力传感器工作原理示意图	5
图 4: 多维力传感器的技术壁垒	5
图 5: 力传感器生产流程示意图	6
图 6: 中航电测应变片产品参数	8
图 7: 应变片的加工工序	8
图 8: 应变片原理及惠斯通桥电路图	10
图 9: 应变片贴合至弹性体工艺	12
图 10: 扭矩传感器示意图	13
图 11: 六轴力传感器与弹性直梁结构示意图	14
图 12: 一维力传感器 VS 六维力传感器	15
图 13: 机器人底座倾角及传感器零点计算	16
图 14: 六维力传感器坐标系中负载重力作用示意	16
图 15: 不同维度数的力传感器示意图	17
图 16: 中国传感器市场规模	19
图 17: 中国应变式传感器市场规模	19
图 18: 中国应变式传感器国内产量 (万只)	20
图 19: 中国应变式传感器需求量 (万只)	20
图 20: 中航电测力传感器相关产品	21
图 21: 机器人关节模型 (简化版)	22
图 22: 力矩传感器和电流环信号的变化	22
图 23: 全球人形机器人市场规模	23
图 24: 中国人形机器人市场规模	23
图 25: 航空航天领域的六维力传感器应用	24
图 26: 医疗手术机器人六维传感器应用案例	24
图 27: 机械臂构成	25
图 28: 国外拉压力传感器单价 1890 元	27
图 29: 国外 ATI 六维力传感器单价为 7 万元	27
图 30: 宇立的合作伙伴	29
图 31: 宇立六维力传感器应用于 ABB 机器人	29
图 32: 海伯森六维力传感器	33

表格目录

重点公司盈利预测、估值与评级	1
表 1: 不同类型六维力/力矩传感器原理、特点及代表企业	3
表 2: 各类应变片图示	9
表 3: 日本 TML 应变片参数	11
表 4: ATI 产品系列	28
表 5: 中航电测力传感器相关在研项目	32

分析师承诺

本报告署名分析师具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格并登记为注册分析师，基于认真审慎的工作态度、专业严谨的研究方法与分析逻辑得出研究结论，独立、客观地出具本报告，并对本报告的内容和观点负责。本报告清晰准确地反映了研究人员的研究观点，结论不受任何第三方的授意、影响，研究人员不曾因、不因、也将不会因本报告中的具体推荐意见或观点而直接或间接收到任何形式的补偿。

评级说明

投资建议评级标准		评级	说明
以报告发布日后的 12 个月内公司股价（或行业指数）相对同期基准指数的涨跌幅为基准。其中：A 股以沪深 300 指数为基准；新三板以三板成指或三板做市指数为基准；港股以恒生指数为基准；美股以纳斯达克综合指数或标普 500 指数为基准。	公司评级	推荐	相对基准指数涨幅 15%以上
		谨慎推荐	相对基准指数涨幅 5% ~ 15%之间
		中性	相对基准指数涨幅-5% ~ 5%之间
		回避	相对基准指数跌幅 5%以上
	行业评级	推荐	相对基准指数涨幅 5%以上
		中性	相对基准指数涨幅-5% ~ 5%之间
		回避	相对基准指数跌幅 5%以上

免责声明

民生证券股份有限公司（以下简称“本公司”）具有中国证监会许可的证券投资咨询业务资格。

本报告仅供本公司境内客户使用。本公司不会因接收人收到本报告而视其为客户。本报告仅为参考之用，并不构成对客户的投资建议，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，客户应当充分考虑自身特定状况，不应单纯依靠本报告所载的内容而取代个人的独立判断。在任何情况下，本公司不对任何人因使用本报告中的任何内容而导致的任何可能的损失负任何责任。

本报告是基于已公开信息撰写，但本公司不保证该等信息的准确性或完整性。本报告所载的资料、意见及预测仅反映本公司于发布本报告当日的判断，且预测方法及结果存在一定程度局限性。在不同时期，本公司可发出与本报告所刊载的意见、预测不一致的报告，但本公司没有义务和责任及时更新本报告所涉及的内容并通知客户。

在法律允许的情况下，本公司及其附属机构可能持有报告中提及的公司所发行证券的头寸并进行交易，也可能为这些公司提供或正在争取提供投资银行、财务顾问、咨询服务等相关服务，本公司的员工可能担任本报告所提及的公司的董事。客户应充分考虑可能存在的利益冲突，勿将本报告作为投资决策的唯一参考依据。

若本公司以外的金融机构发送本报告，则由该金融机构独自为此发送行为负责。该机构的客户应联系该机构以交易本报告提及的证券或要求获悉更详细的信息。本报告不构成本公司向发送本报告金融机构之客户提供的投资建议。本公司不会因任何机构或个人从其他机构获得本报告而将其视为本公司客户。

本报告的版权仅归本公司所有，未经书面许可，任何机构或个人不得以任何形式、任何目的进行翻版、转载、发表、篡改或引用。所有在本报告中使用的商标、服务标识及标记，除非另有说明，均为本公司的商标、服务标识及标记。本公司版权所有并保留一切权利。

民生证券研究院：

上海：上海市浦东新区浦明路 8 号财富金融广场 1 幢 5F；200120

北京：北京市东城区建国门内大街 28 号民生金融中心 A 座 18 层；100005

深圳：广东省深圳市福田区益田路 6001 号太平金融大厦 32 层 05 单元；518026