

人形机器人带来广阔市场，国内企业有望充分受益

——人形机器人行业深度报告（一）：六维力传感器

■ 核心观点

六维力传感器主要是利用应变计和电荷放大器将机械力矩转化为电信号，通常包含一个弹性体和多个应变计。其原理是当传感器受到力或力矩时，弹性体的形状会发生微小变化，导致应变计电阻值的微小变化。六维力/力矩传感器的核心单元是弹性体，弹性体的结构设计影响着传感器的灵敏度、动态性能、维间耦合等关键性能参数。

对于六维力传感器而言，标定需要同时考虑六个维度。一般来说，校准和标定的方法和内容基本相同、设备一致，都需要采用六维联合加载的方式，即三方向的力和三方向的力矩同时加载。六维联合加载标定的样本空间过于复杂，一维力传感器只需9个样本点来标定，六维力传感器的样本空间则包含531441个样本点。

硬件解耦和软件解耦是主要解耦方式。理想的六维力传感器每个通道的输出只与本通道的加载力/力矩相关，与其他通道无关。但实际上由于弹性体的机械机构、传感器的机械加工精度、应变片粘贴技术、测量方法等原因，使得每个施加在传感器的力/力矩都会对其它输出信号产生影响，即维间耦合。只有解决维间耦合问题，才能实现六维力/力矩的精确衡量。在平衡静/动态性能同时，消除维间耦合的解耦方法常见有两种，即硬件解耦和软件解耦。

六维力传感器应用领域广泛，国内销量保持较高增速。目前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基于力触觉的人机交互、类人机器人、生物医学研究、医疗机械、航空航天等领域。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8360套，同比增长57.97%，其中机器人行业销售4840套，同比增长62.58%。

传感器作为机器人感知外界环境的关键部位，在人形机器人系统中处于重要地位。六维力/力矩传感器通常安装于机器人末端执行器与机械臂之间，用于检测作业中的机器人与环境之间的多维交互力/力矩，并将交互力/力矩反馈给机器人力控制系统。根据中国电子报，相较于工业机器人，人形机器人手部的受力方向更复杂，因此有业界人士认为，手部的力量感知应该用六维力传感器实现。

■ 投资建议

我们认为六维力传感器是人形机器人的重要零部件，特斯拉 Optimus 为代表的人形机器人将为六维力传感器行业带来较大增量，国内多家厂商现已开始布局，并有相关产品进入产业化应用，相关厂商有望长期受益。相关标的：柯力传感、东华测试、高华科技、万讯自控、四方光电。

■ 风险提示

人形机器人研发进展不及预期、六维力传感器需求不及预期、人形机器人需求不及预期的风险等。

增持(维持)

行业： 机械设备

日期： 2024年05月10日

分析师： 刘荆

E-mail: liujing@yongxingsec.com

SAC 编号: S1760524020002

近一年行业与沪深300比较



资料来源: Wind, 甬兴证券研究所

相关报告:

正文目录

1. 六维力传感器：高性能、高壁垒的力传感器4

 1.1. 什么是六维力传感器？4

 1.2. 电阻式应用最广，核心为弹性体结构设计5

 1.3. 参数较多，其中串扰、精度和准度为核心参数7

 1.4. 技术壁垒：硬软件解耦与六维联合加载9

2. 六维力传感器下游应用广泛，行业保持较高增速11

 2.1. 六维力传感器应用场景广泛，下游产业多11

 2.2. 力传感器市场规模持续扩大，行业保持较高增速13

3. 人形机器人核心零部件，有望迎来广阔市场空间14

 3.1. 力传感器：人形机器人精确感知环境信息的关键技术14

 3.2. 六维力传感器助力人形机器人“行稳致远”15

4. 投资建议17

 4.1. 柯力传感：深耕行业多年，力传感器龙头17

 4.2. 东华测试：结构力学性能测试龙头企业，具备传感器完整生产能力18

 4.3. 高华科技：深耕传感器行业，聚焦高可靠传感器18

 4.4. 万讯自控：积极布局高端传感器、工业机器人3D视觉等新兴领域19

 4.5. 四方光电：巩固气体传感器领先地位，打造传感器关联产业链19

5. 风险提示20

图目录

图 1: 六维力和力矩传感器内部结构图4

图 2: 六维力和力矩传感器二维图4

图 3: 一维力传感器示意图4

图 4: 三维力传感器示意图4

图 5: 六维力传感器示意图4

图 6: 电阻应变式六维力传感器力/力矩信息检测原理5

图 7: 三垂直筋形式的六维力传感器5

图 8: 双环形复合梁结构的六维力传感器5

图 9: 筒式六维力传感器6

图 10: 非径向三梁结构六维力传感器6

图 11: 六维力传感器加载至额定载荷后六个方向的测量结果8

图 12: 六维联合加载的样本空间示意图9

图 13: 一维标定和六维联合加载标定设备比较图10

图 14: 六维力传感器弹性体结构示意图10

图 15: 用于解耦的 BP 神经网络模型的结构10

图 16: 六维力传感器应用场景11

图 17: 六维力传感器用于机器人力控曲面打磨12

图 18: 六维力传感器用于机器人柔性精密装配12

图 19: 六维力传感器用于机器人拖动示教12

图 20: 六维力传感器用于航空航天风洞测试12

图 21: 六维力传感器用于空间机械臂12

图 22: 六维力传感器用于核酸采样检测机器人13

图 23: 六维力传感器用于康复训练机器人13

图 24: 全球力传感器市场规模13

图 25: 中国机器人行业六维力传感器销量14

图 26: 中国机器人行业六维力传感器市场规模14

图 27: 因时机器人中的力传感器.....	15
图 28: 因时机器人的灵巧手.....	15
图 29: Optimus Gen2 手拿鸡蛋演示.....	15
图 30: Optimus Gen2 下蹲.....	16
图 31: Walker 二代人形机器人.....	16
图 32: Walker X 人形机器人.....	16
图 33: 熊猫机器人悠悠.....	17
图 34: 柯力传感应变式传感器 ZSNF.....	18
图 35: 柯力传感应变式传感器 ZSNF 二维图.....	18
图 36: 东华测试结构力学性能研究产品.....	18
图 37: 东华测试传感器产品.....	18
图 38: 高华科技压力传感器产品.....	19
图 39: 高华科技加速度传感器产品.....	19
图 40: 万讯自控新兴产业产品分类.....	19
图 41: 四方光电气体传感器产品矩阵 (部分).....	20
图 42: 四方光电产品.....	20

表目录

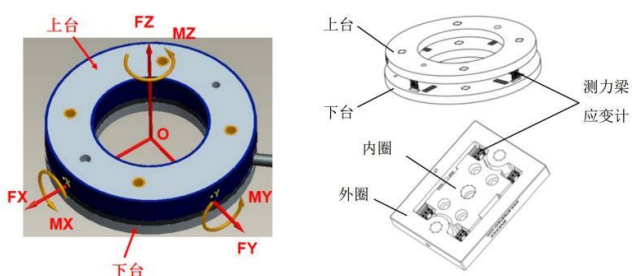
表 1: 力/力矩传感器的历史演变及不同弹性体结构的特性比较.....	7
表 2: 六维力/力矩传感器的主要参数.....	7

1. 六维力传感器：高性能、高壁垒的力传感器

1.1. 什么是六维力传感器？

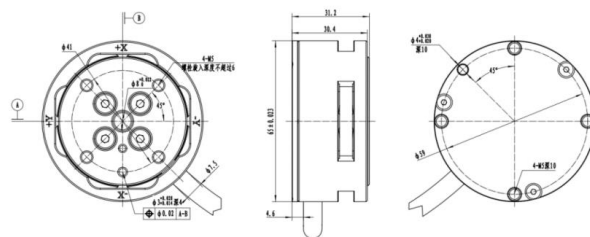
根据海伯森技术有限公司官方账号，六维力传感器主要是利用应变计和电荷放大器将机械力矩转化为电信号。通常包含一个弹性体和多个应变计。当传感器受到力或力矩时，弹性体的形状会发生微小变化，导致应变计电阻值的微小变化。这些变化被电荷放大器放大并转化为数字信号，以便在计算机上处理和记录。

图1:六维力和力矩传感器内部结构图



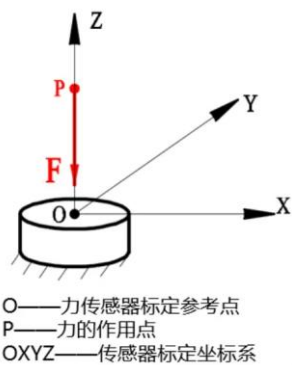
资料来源：俊德科技，甬兴证券研究所

图2:六维力和力矩传感器二维图



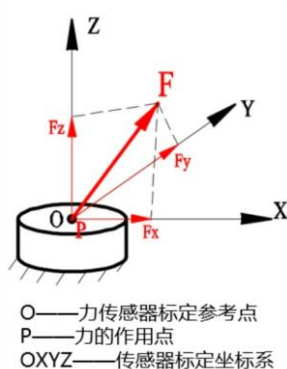
资料来源：《六维力传感器标定技术研究》陈昌俊 2022，甬兴证券研究所

图3:一维力传感器示意图



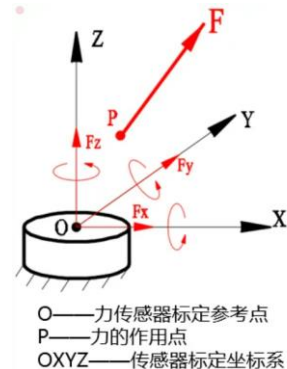
资料来源：坤维科技，甬兴证券研究所

图4:三维力传感器示意图



资料来源：坤维科技，甬兴证券研究所

图5:六维力传感器示意图

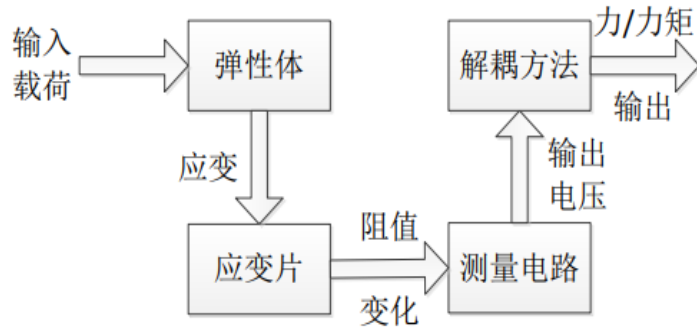


资料来源：坤维科技，甬兴证券研究所

六维力传感器包含感应结构和数据处理结构两部分，工作原理为应变效应。其中感应结构具体分为上台（内圈）、下台（外圈）、测力梁（弹性体）、应变片、应变电桥、信号调理电路，数据处理结构包括数据采集及 A/D 转换和数据处理模块等。工作原理为应变效应，即：（1）载荷→弹性应变。在载荷作用下，弹性体发生与所受载荷成一定关系的微小应变；（2）弹性应变→应变片电阻值变化。粘贴于弹性体上的应变片发生与弹性体相同的弹性应变，因此应变片电阻值发生改变；（3）应变片电阻值变化→电压输出。一般采用电位计式电路和惠斯通电桥电路这两种测量电路将电阻变化转变为电压输出，一般应用惠斯通电桥电路；（4）电压输出→力/力矩信息输出。

六维力/力矩传感器的载荷包含三维力和三维力矩，且传感器的输出电压也包含六个通道的电压分量。通过数据采集及 A/D 转换，对传感器的输出电压进行采集及数据处理。由于弹性体的机械结构、传感器的机械加工精度、应变片粘贴技术以及测量方法等原因，使得几乎每个施加在传感器上的力/力矩都会对所有的输出信号产生影响，即存在维间耦合，因此并不能得到本通道载荷的准确值，需要经过特定的解耦算法得到准确的力/力矩信息。最终实现从最初的载荷到力/力矩信号的变换过程。

图6:电阻应变式六维力传感器力/力矩信息检测原理

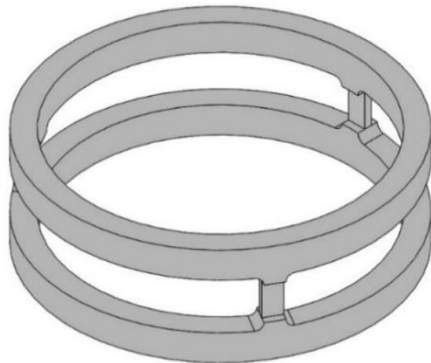


资料来源：《多维力传感器的静态性能研究》付立悦 2021，甬兴证券研究所

1.2. 电阻式应用最广，核心为弹性体结构设计

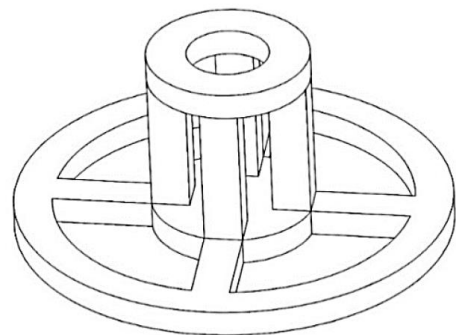
多维力传感器按照工作原理可以分为电阻式、压电式、光电式、电容式、霍尔式等。电阻式多维力传感器以金属箔式电阻应变片或半导体应变片作为敏感元件，利用金属的应变效应或半导体的压阻效应实现应变测量的一类传感器。电阻式在多维力传感器应用广泛。它具有灵敏度高、测量范围大、可靠性高、技术成熟等优点。但同时也存在动态响应差、外界因素对应变电桥影响大等缺点。设计该类传感器的关键是设计合理的弹性体结构。

图7:三垂直筋形式的六维力传感器



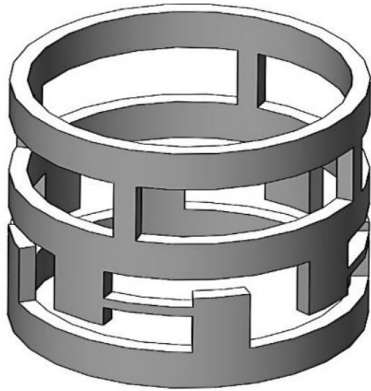
资料来源：《多维力传感器的静态性能研究》付立悦 2021，甬兴证券研究所

图8:双环形复合梁结构的六维力传感器



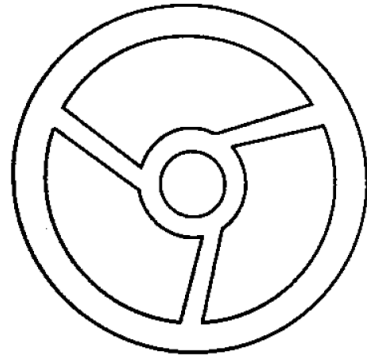
资料来源：《多维力传感器的静态性能研究》付立悦 2021，甬兴证券研究所

图9:筒式六维力传感器



资料来源:《多维力传感器的静态性能研究》付立悦 2021, 甬兴证券研究所

图10:非径向三梁结构六维力传感器


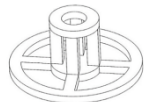





资料来源:《多维力传感器的静态性能研究》付立悦 2021, 甬兴证券研究所

六维力/力矩传感器的核心单元是弹性体，弹性体的结构设计影响着传感器的灵敏度、动态性能、维间耦合等关键性能参数。¹根据现有国内外研究成果，六维力/力矩传感器弹性体的结构主要集中在一体化结构和 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、圆筒式等，其中十字型弹性体对称性好，兼顾了横向和竖向的应变效果十字梁与轮缘之间为柔性连接，从而简化了力学模型，该结构实际使用效果较好，被广泛使用。

¹ 《六维力/力矩传感器研究发展综述》曹会彬等 2020

表1:力/力矩传感器的历史演变及不同弹性体结构的特性比较

结构	名称	介绍	图片
一体化结构	三垂直筋形式六维力传感器	1975年美国麻省理工学院的 Watson 等设计的一种竖梁结构的六维力传感器。该传感器具有承载能力强、结构简单、横向效应和抗冲击性能好等优点，但竖直方向灵敏度低、维间耦合严重。	
	双环形复合梁结构六维力传感器	由 1982 德国 Schott 等提出，该六维力传感器的复合梁结构可以减小或消除维间耦合，但刚度与灵敏度的矛盾难以调和。	
	圆筒式六维力传感器	20 世纪 80 年代初，美国 Stanford 研究所 (SRI) 设计的一款圆筒式六维力传感器，由一只直径为 75mm 的铝管铣削而成，共有八个窄长的弹性梁，横向竖向各四根，虽然耦合较小，但刚度差。	
	非径向三梁中心对称结构的六维力传感器	由卡耐基-梅隆大学提出，该传感器由内缘、外缘和连接内、外缘，且与内缘相切的三根梁构成。每根梁的左右两侧各贴一对应变片，构成六个半桥，对测得电桥电压信号解耦得六维力/力矩值得。该结构刚性较好，但输出具有强非线性。国内对此进行改进，研制出 HUST FS6 型腕力传感器。	
	十字梁型腕力传感器	日本林纯一设计得十字梁型腕力传感器成为十字型弹性体结构的典范。十字型弹性体对称性好，兼顾了横向和竖向的应变效果十字梁与轮缘之间为柔性连接，从而简化了力学模型。该结构实际使用效果较好，被广泛使用。其国内研制的 SAFMS 型六维力传感器就是采用十字梁型弹性体结构，并将其成功应用于机器人研究中。	
	Stewart 并联结构	六自由度并联结构六维力传感器	上下平台的六个球铰分布在同一个圆周上。由于是半对称，球铰 135 和球铰 246 分别以 120° 间隔分布，当六个分力作用于平台时，上下平台之间的六根弹性梁发生应变。因此六自由度的力/力矩可以通过粘贴再弹性梁圆环上的应变片组成的电桥的输出得到。由于 Stewart 结构是一种球面连杆机构，固有频率较低，因此基于 Stewart 并联结构的多维力传感器仅适用于静态力/力矩的测量。

资料来源：《多维力传感器的静动态性能研究》付立悦 2021，《六维力/力矩传感器研究发展综述》曹会彬等 2020，甬兴证券研究所

1.3. 参数较多，其中串扰、精度和准度为核心参数

根据俊德科技官网，六维力/力矩传感器的主要参数包括：满量程、满量程输出、灵敏度、解耦矩阵、非线性、迟滞、串扰、零点、精度、分辨率、过载能力、温漂、准度。

表2:六维力/力矩传感器的主要参数

主要参数	介绍
满量程	传感器能有效测量的最大加载力/力矩
满量程输出	在受到最大规定加载的力/力矩时，传感器各通道输出的电信号值即为满量程输出
灵敏度	传感器灵敏度等于满量程输出除以传感器的满量程力（力矩）值
解耦矩阵	解耦矩阵是矩阵解耦型传感器的专用术语，用于将相互耦合的输出计算成力和力矩的值
非线性	传感器输出量与参考直线（连接零点和满量程输出点的直线）的最大偏差除以满量程的百分比
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

串扰	衡量多维力传感器各测量方向间的耦合影响，可以反映测量误差水平
零点	在“零状态”时传感器的输出。由客户定义，如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
精度（重复性）	精度是多个重复测量值之间一致程度的评价指标，即传感器多次测量某一相同载荷组（三方向力和三方向力矩的组合）时，所得的输出结果的一致性程度。重复性精度是输出误差的标准差与额定载荷的百分比（%FS）。
分辨率	传感器能分辨的最小信号。该指标只表征传感器能敏感多小的信号，但是能敏感并不代表能精确测量。分辨率主要受传感器自身性能和测量系统噪声影响，噪声又和采样率密切相关。
过载能力	传感器抵抗过载的能力，一般是传感器额定量程的 1.5 倍至 10 倍
温漂	传感器在外界温度变化情况下输出量发生的变化
准度（偏差）	准度是测量值与真实值偏差程度的评价指标。准度是输出量与理论真值之间偏差量的标准差与额定载荷的百分比（%FS）

资料来源：俊德科技、坤维科技，甬兴证券研究所

根据坤维科技官方公众号，体现六维力/力矩传感器综合性能的关键指标有串扰、精度和准度。串扰指标用来衡量多维力传感器各测量方向间的耦合影响，可以反映测量误差水平。比较优秀的串扰指标在 1%FS 左右，2-5%FS 比较常见。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。如载荷组 1 中，仅仅对 Fx 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 Fx 是 100%FS，其它方向是 0%FS。表格右侧 Fy、Fz、Mx、My、Mz 的测量结果就是在 Fx 作用下的串扰。因为此时 Fy、Fz、Mx、My、Mz 的理论真值都是 0。Fy、Fz、Mx、My、Mz 测量结果就体现了 Fx 对其它五个测量方向的耦合干扰情况。多维力传感器的厂商往往选择表格中最大串扰值作为其 datasheet 中的串扰指标。但是对于六维力传感器，如果对 Fx 方向不加载，对另五个方向加载到 100%FS，此时 Fx 的输出结果并不是其他五个方向串扰结果的叠加，此时 Fx 的输出结果往往大于产品 datasheet 中的串扰指标。

图11:六维力传感器加载至额定载荷后六个方向的测量结果

载荷组	标定载荷 (理论真值)						测试结果					
	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
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，甬兴证券研究所

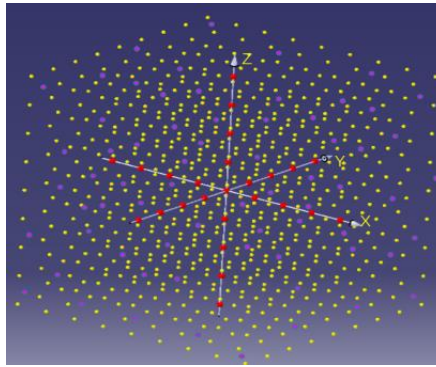
根据坤维科技官方公众号，常用精度和准度这两个指标描述六维力传感器具体的测量误差水平。多维力传感器精度衡量的是测量结果之间的重

复性，其检定方法是，在相同环境条件下，在额定载荷范围内，进行多次重复联合加载相同一组载荷后，计算得到的传感器测量值的标准差，并除以量程。多维力传感器准度衡量的是测量结果与理论真值的偏离程度。其获得的方法是，对传感器进行多组多维联合加载，计算得到的传感器测量值与所加载荷理论真值之间的标准偏差，并除以量程。其中，准度涵盖了滞后、线性、蠕变等误差因素，更能体现产品的综合性能，是多维力传感器最为核心的技术指标之一。

1.4. 技术壁垒：硬软件解耦与六维联合加载

根据坤维科技官方公众号，对于六维力传感器而言，标定需要同时考虑六个维度。一般来说，校准和标定的方法和内容基本相同、设备一致，都需要采用六维联合加载的方式，即三方向的力和三方向的力矩同时加载。六维联合加载标定的样本空间过于复杂，一维力传感器只需 9 个样本点来标定，六维力传感器的样本空间则包含 531441 个样本点。

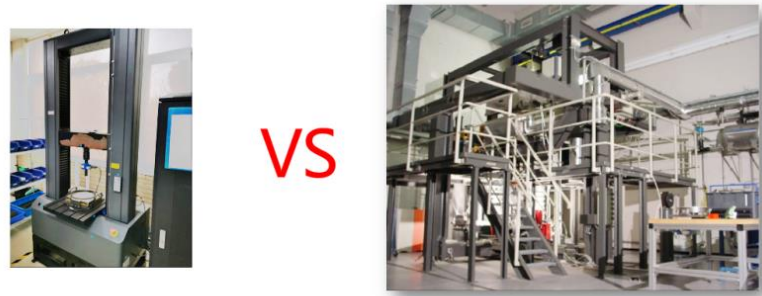
图12:六维联合加载的样本空间示意图



资料来源：坤维科技公众号，甬兴证券研究所

根据坤维科技官方公众号，采用六维力联合加载标定/检测能使传感器准度更好、串扰更低。六维力传感器在承受多个维度力的同时作用时，非线性特征显著，而六个维度的线性模型单纯叠加无法精确描述，因此多样本的六维联合加载具有三点优势：(1) 交叉样本点可以使传感器的受力情况模拟更接近真实的使用情况；(2) 有利于考察传感器在多维载荷同时作用下的非线性力学特性，进而有效改善传感器结构的设计；(3) 基于传感器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。

图13:一维标定和六维联合加载标定设备比较图



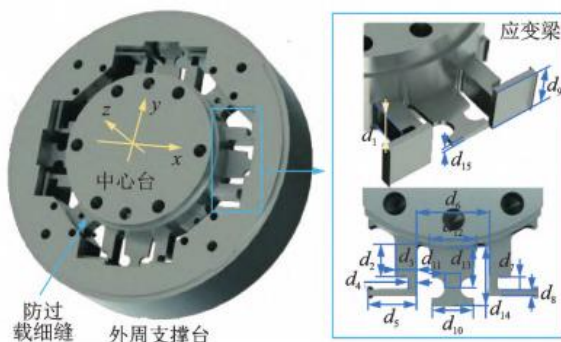
资料来源：坤维科技公众号，甬兴证券研究所

六维力/力矩传感器提升性能、降低误差的关键是消除维间耦合。理想的六维力传感器每个通道的输出只与本通道的加载力/力矩相关，与其他通道无关。但实际上由于弹性体的机械机构、传感器的机械加工精度、应变片粘贴技术、测量方法等原因，使得每个施加在传感器的力/力矩都会对其它输出信号产生影响，即维间耦合。只有解决维间耦合问题，才能实现六维力/力矩的精确衡量。在平衡静/动态性能同时，消除维间耦合的解耦方法常见有两种：

(1) 硬件解耦：六维力/力矩传感器的结构受到其应用场合的限制，而弹性体的形式和布置将直接影响到传感器的灵敏度、刚度、线性度、动态性能、维间耦合等，传感器性能的优劣很大程度上由此决定。其中，浮动梁结构和滑移结构就是典型的机械解耦形式。

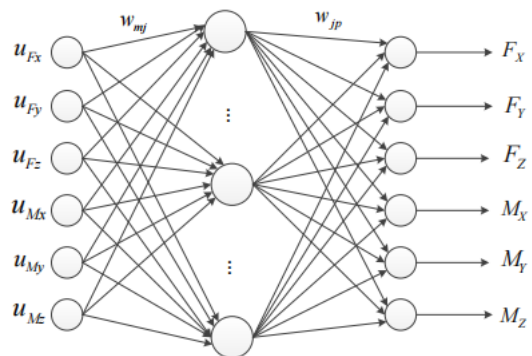
(2) 软件解耦：利用软件算法实现解耦。由于不同通道的输入、输出数据之间并不总是线性的，因此人工神经网络算法逐渐取代前者被广泛应用于多维力传感器的静态解耦中，其中基于BP神经网络的非线性解耦算法最为常见。

图14:六维力传感器弹性体结构示意图



资料来源：《一种低耦合高精度六维力传感器设计及应用》宋逸等2022，甬兴证券研究所

图15:用于解耦的BP神经网络模型的结构



资料来源：《多维力传感器的静态性能研究》付立悦2021，甬兴证券研究所

根据坤维科技官方公众号，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。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，这将无法标定出高准度的六维力传感器。

2. 六维力传感器下游应用广泛，行业保持较高增速

2.1. 六维力传感器应用场景广泛，下游产业多

六维力/力矩传感器以其能够感知外力和外力矩的全部信息而成为最重要的一类力传感器，根据海伯森技术，目前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基于力触觉的人机交互、类人机器人、生物医学研究、医疗器械、航空航天等领域。具体应用如下：

工业制造：(1) 机器人控制。六维力传感器可以通过测量机器人末端的力和力矩，帮助机器人实现高精度的控制与操作；(2) 质量检测。在制造商进行质量检测时，六维力传感器可以用于测试产品的强度、耐久性和固定性等指标；(3) 加工过程监控。六维力传感器可以用于检测切削力、刀具磨损情况并及时反馈数据给操作者；(4) 设备测试。六维力传感器可以被嵌入到各类设备用来测试这些设备对压力和扭矩的响应和稳定性；(5) 汽车工业。在汽车制造中，六维力传感器可以用于测试引擎、变速器、转向装置等各种零部件的性能，协助汽车制造商开发更节能、更安全、更可靠的车辆。

图16:六维力传感器应用场景



资料来源：海伯森技术公司，甬兴证券研究所

科研实验：(1) 材料性能测试。六维力传感器可以用于测量材料在受力作用下的强度、刚度、塑性变形等性能参数，以便科研工作者进行材料性能评估与优化；(2) 生物医学研究。六维力传感器可以用于测量生物组织或细胞在不同力作用下的变形、应力分布等参数，探索生物系统的机制和性质；

(3) 机器人技术研究。六维力传感器被嵌入到机器人的末端执行器，实现高精度机器人控制与操作；(4) 航空航天工程研究。六维力传感器可以用于测试航空航天器在不同状态下的受力情况，以检测其设计是否合理，并提供数据支持以便优化；(5) 物理实验。六维力传感器可以用于测量物体位置、方向、速度、加速度等参数。

图17:六维力传感器用于机器人力控曲面打磨



资料来源:海伯森技术官网,甬兴证券研究所

图18:六维力传感器用于机器人柔性精密装配



资料来源:海伯森技术官网,甬兴证券研究所

图19:六维力传感器用于机器人拖动示教



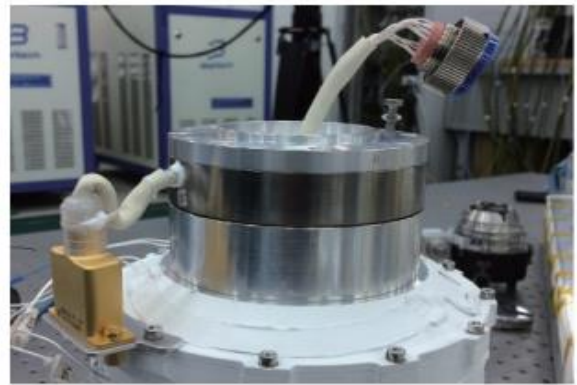
资料来源:海伯森技术官网,甬兴证券研究所

图20:六维力传感器用于航空航天风洞测试



资料来源:海伯森技术官网,甬兴证券研究所

图21:六维力传感器用于空间机械臂



资料来源:《六维力/力矩传感器研究发展综述》曹会彬等2020,甬兴证券研究所

医疗领域:(1)手术辅助系统。可以用于手术机器人帮助医生更加准确、安全的手术操作;(2)运动康复、功能性评估。六维力传感器可以用于测量运动康复患者的肌肉力量、关节稳定性等参数来评估其康复情况,并根据测试结果制定治疗方案;(3)步态分析、姿势评估。六维力传感器可以被用于步态分析系统和姿势评估系统,来帮助医生诊断和治疗运动障碍、神经损伤以及脊柱侧弯、平衡障碍等问题。

图22:六维力传感器用于核酸采样检测机器人



资料来源:海伯森技术官网,甬兴证券研究所

图23:六维力传感器用于康复训练机器人

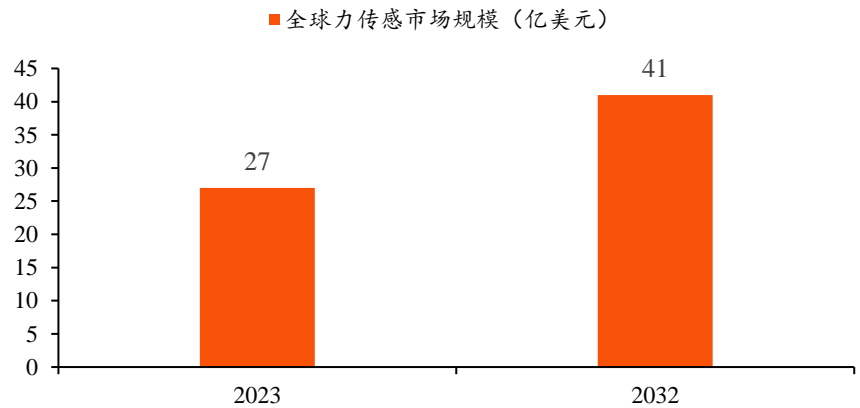


资料来源:《六维力/力矩传感器研究发展综述》曹会彬等2020,甬兴证券研究所

2.2. 力传感器市场规模持续扩大, 行业保持较高增速

根据 Global Information, 2023 年全球力传感器市场规模达到 27 亿美元。IMARC Group 预计到 2032 年市场规模将达到 41 亿美元, 2024-2032 年复合年增长率 (CAGR) 为 4.54%。由于电动车 (EV) 销量的成长、各种制造流程的自动化程度不断提高以提高效率和生产力, 以及消费性电子产品和穿戴式装置的日益普及, 该市场正在经历稳定成长。

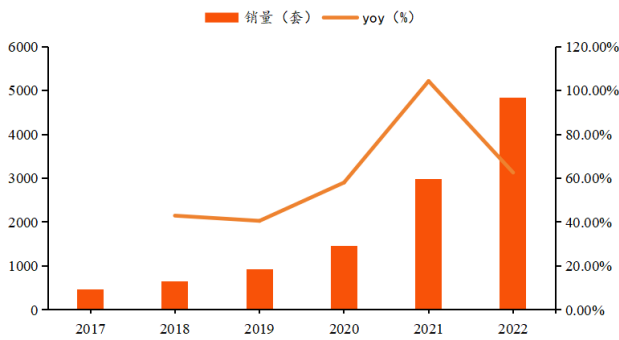
图24:全球力传感器市场规模



资料来源: Global Information, IMARC Group, 甬兴证券研究所

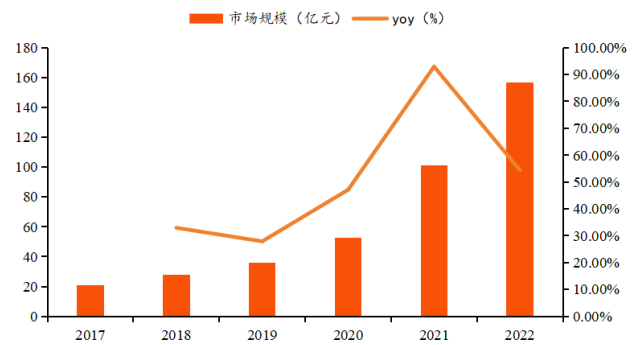
高工机器人产业研究所 (GGII) 数据显示, 2022 年中国市场六维力/力矩传感器销量 8360 套, 同比增长 57.97%, 其中机器人行业销售 4840 套, 同比增长 62.58%。其预测到 2027 年中国市场六维力/力传感器销量有望突破 84000 套, 复合增长率超过 60%, 其中机器人行业销售有望突破 42000 套; 市场规模方面: GGII 数据显示, 2022 年中国六维力/力矩传感器市场规模 2.39 亿元, 同比增长 52.04%, 其中机器人行业六维力/力矩传感器市场规模 1.56 亿, 同比增长 54.35%。GGII 预计, 2027 年中国六维力/力矩传感器市场规模将超过 15 亿元, CAGR 超过 45%。

图25:中国机器人行业六维力传感器销量



资料来源: GGII, 甬兴证券研究所

图26:中国机器人行业六维力传感器市场规模



资料来源: GGII, 甬兴证券研究所

根据优必选招股书,在其披露生产智能服务机器人的主要原材料中,一些简单的环境光传感器平均价格仅为0.4元人民币,而更高端的传感器如六维力传感器的价格可超过15000元人民币。

3. 人形机器人核心零部件,有望迎来广阔市场空间

3.1. 力传感器:人形机器人精确感知环境信息的关键技术

传感器作为机器人感知外界环境的关键部位,在人形机器人系统中处于重要地位。在众多可感知的外界信息中,如视觉、听觉、嗅觉、力觉等,力觉感知能获取机器人与外界环境之间的相互作用力,是机器人最为基础和关键的环境信息获取方法之一。力觉信息的准确获取,是机器人对环境状态的认知和顺利完成后续的力反馈与力控制的基础和前提。

六维力/力矩传感器通常安装于机器人末端执行器与机械臂之间,用于检测作业中的机器人与环境之间的多维交互力/力矩,并将交互力/力矩反馈给机器人力控制系统。比如打磨作业中机器人完成的抓取、测量、移动和放置等动作,需要通过多维力传感器检测机械手与环境的接触力并反馈作用于机器人控制器。²

² 《多维力传感器的静动态性能研究》付立悦 2021

图27:因时机器人中的力传感器



资料来源: 因时机器人官网, 甬兴证券研究所

图28:因时机器人的灵巧手



资料来源: 因时机器人官网, 甬兴证券研究所

3.2. 六维力传感器助力人形机器人“行稳致远”

根据特斯拉官方账号, 2023年12月特斯拉发布了第二代人形机器人擎天柱 Optimus Gen2 演示视频, 视频中机器人用左手的拇指和食指把鸡蛋从纸浆蛋托里拿起来, 再用右手的食指和拇指捏住, 将鸡蛋稳稳地放到锅里。

图29:Optimus Gen2 手拿鸡蛋演示



资料来源: Tesla, 甬兴证券研究所

根据中国电子报, 相较于工业机器人, 人形机器人手部的受力方向更复杂, 因此有业界人士认为, 手部的力量感知应该用六维力传感器实现。坤维科技 CTO 袁明论介绍称: “如果力的方向是固定的, 可以采用一维力传感器; 如果力作用点与传感器标定参考点重合, 但力的方向随机变化, 可以用三维力传感器; 而如果力的方向和作用点都在三维空间里随机变化, 就应该选用六维力传感器进行测量。”

图30:Optimus Gen2 下蹲

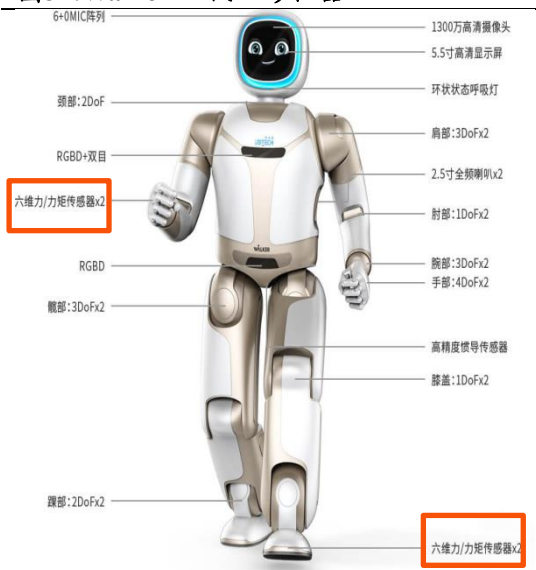


资料来源: Tesla, 甬兴证券研究所

根据优必选官网，优必选是人形机器人的领航企业，是全球极少数具备人形机器人全栈式技术能力的公司。目前拥有 Walker、Walker X 和熊猫机器人悠悠三个系列的人形机器人产品，并且旗下的人形机器人均在手腕和脚踝处配置了 4 个六维力/力矩传感器。

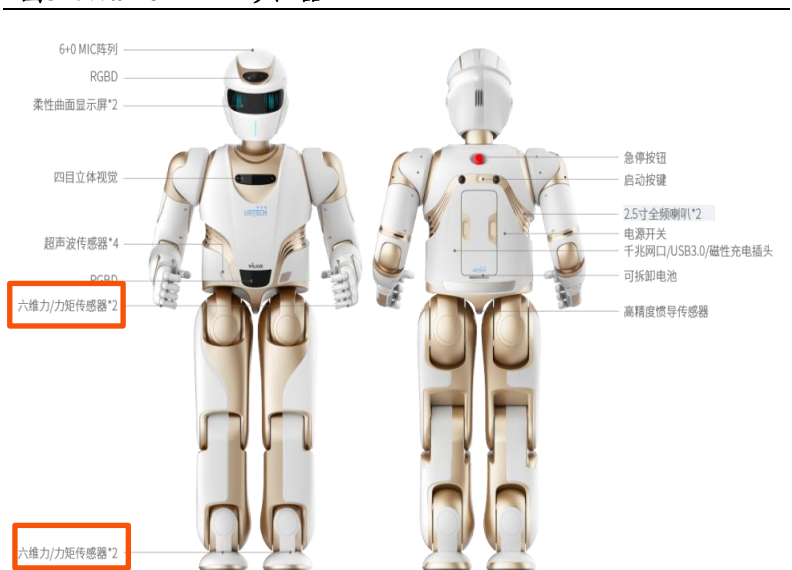
优必选人形机器人从 2016 年开始研发至今历经四次大迭代。Walker 二代人形机器人具备 36 个高性能伺服关节以及力觉、视觉、听觉、空间知觉等全方位的感知系统，可以实现平稳快速的行走和精准的操作，并具备了在常用家庭环境和办公场景的自由活动和服侍的能力。而 Walker X 相比前几代人形机器人在运动能力和智能化方面有明显升级。Walker X 搭载高性能伺服关节以及多维力觉、多目立体视觉、全向听觉和惯性、测距等全方位的感知系统，全面升级视觉定位导航和手眼协调操作技术，自主运动及决策能力大幅提高，实现平稳快速的行走和精准安全的交互，能在多种场景下提供智能化、有温度的服务。

图31:Walker 二代人形机器人



资料来源: 优必选官网, 甬兴证券研究所

图32:Walker X 人形机器人

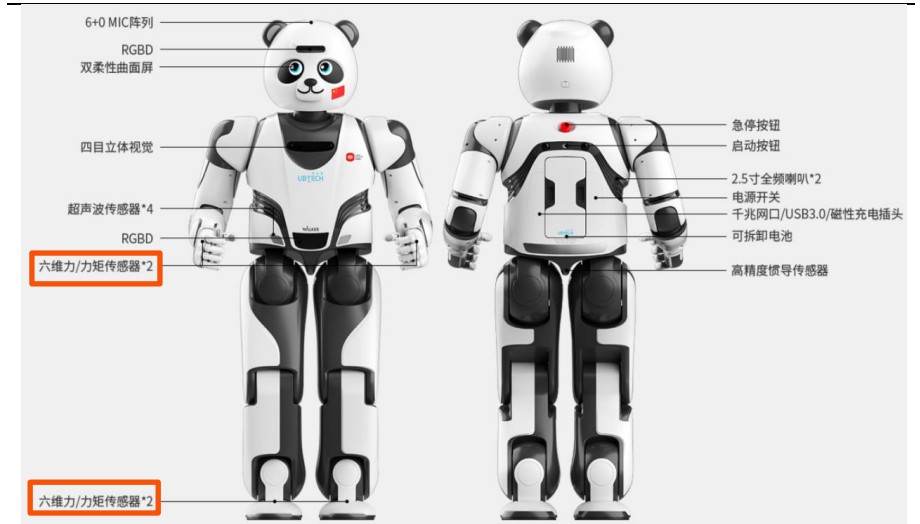


资料来源: 优必选官网, 甬兴证券研究所

根据优必选官网，熊猫机器人悠悠是以大熊猫形象作为设计原型，在请务必阅读报告正文后各项声明

大型人形机器人 Walker 的基础上为迪拜世博会中国馆专门定制。拥有 41 个高性能伺服驱动关节全方位感知系统、视听触多通道感知、可运用多模态情感交互方式进行人机互动，能完成导览讲解、太极拳、书写绘画等交互动作。

图33:熊猫机器人悠悠



资料来源：优必选官网，甬兴证券研究所

4. 投资建议

我们认为六维力传感器是人形机器人的重要零部件，特斯拉 Optimus 为代表的人形机器人将为六维力传感器行业带来较大增量，国内多家厂商现已开始布局，并有相关产品进入产业化应用，我们认为相关厂商有望长期受益。

4.1. 柯力传感：深耕行业多年，力传感器龙头

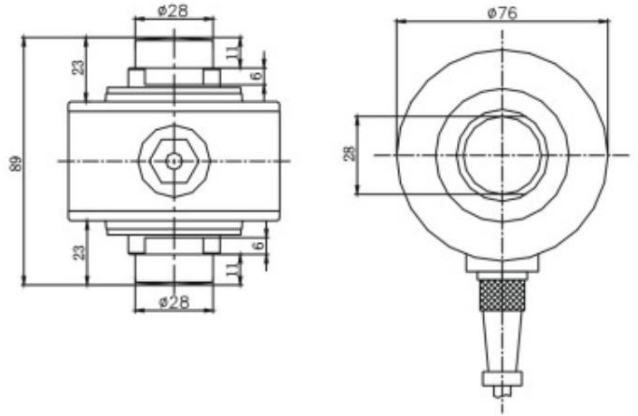
公司是智能传感器领军企业，主要研制和生产各类型物理量传感器，以及不同工业物联网系统及多场景应用解决方案。目前公司已是全球大型钢制传感器制造企业和工业物联网应用拓展引领者之一。面对人形机器人带来的传感器行业发展机遇，公司在 2024 年集团规划大会上明确投资核心需求是“机器人与多物理量传感器”，重点推进数字、高端、非衡、机器人、多物理量、扭矩传感器产品及市场。根据公司在互动平台的回复，公司开发的六维力产品，可用于机器手臂运动与工作载荷监测、曲面研磨抛光、加工中心精雕加工、医疗设备精密测控等，目前六维力系列产品仍处于小批量开发试制阶段。

图34:柯力传感应变式传感器 ZSNF



资料来源:柯力传感官网,甬兴证券研究所

图35:柯力传感应变式传感器 ZSNF 二维图



资料来源:柯力传感官网,甬兴证券研究所

4.2. 东华测试: 结构力学性能测试龙头企业, 具备传感器完整生产能力

东华测试是国内领先的结构力学性能研究和电化学工作站整体解决方案提供商。公司建立了仪器结构金加工、数控 PCB 焊接系统、电装联、调试及校准检测等产品实现平台, 具备传感器及仪器产品的完整生产能力, 传感器包括加速度传感器、速度传感器、位移传感器、应变传感器、转速传感器、压力传感器、光纤传感器、轴功率传感器等。

图36:东华测试结构力学性能研究产品



资料来源:东华测试官网,甬兴证券研究所

图37:东华测试传感器产品



资料来源:东华测试官网,甬兴证券研究所

4.3. 高华科技: 深耕传感器行业, 聚焦高可靠传感器

南京高华科技股份有限公司是以研发、设计、生产及销售高可靠性传感器和传感器网络系统的高新技术企业, 主要产品为各类压力、加速度、温湿度、位移等传感器, 以及通过软件算法将上述传感器集成为传感器网络系统。公司深耕于高端装备配套传感器行业, 承担了国家科技部、工信部等各部委和各级部门的多项传感器研制项目。

图38:高华科技压力传感器产品



资料来源:高华科技官网,甬兴证券研究所

图39:高华科技加速度传感器产品



资料来源:高华科技官网,甬兴证券研究所

4.4. 万讯自控:积极布局高端传感器、工业机器人3D视觉等新兴领域

万讯自控专注于自动化产业,主营业务涵盖自动化仪表、物联网智慧服务、MEMS 传感器、机器人 3D 视觉、高端数控系统等工业自动化领域产品,并提供相关解决方案。随着信息技术、人形机器人的发展,公司也积极布局高端传感器、工业机器人3D视觉等新兴领域,并已取得一定进展。

图40:万讯自控新兴产业产品分类



资料来源:万讯自控官网,甬兴证券研究所

4.5. 四方光电:巩固气体传感器领先地位,打造传感器关联产业生态链

四方光电是中国气体传感器主要厂商和代表性企业,已经形成了包括光学(红外、紫外、光散射、激光拉曼)、超声波、MEMS 金属氧化物半导体(MOX)、电化学、陶瓷厚膜工艺高温固体电解质等原理的气体传感技术平台,拥有100余项国内外专利,产品广泛应用于空气品质、环境监测、工业过程、安全监测、健康医疗、智慧计量等领域。

图41:四方光电气体传感器产品矩阵（部分）



资料来源：四方光电官网，甬兴证券研究所

图42:四方光电产品



产品

- | | |
|-------------------|-----------------|
| 红外二氧化碳传感器 | 二氧化碳变送器 |
| 室内粉尘传感器 | 甲醛&VOC传感器 |
| 集成空品传感器模组 | 空气质量检测仪 |
| 新风控制器 | 香氛发生器 |
| 尘埃粒子计数器 | 污浊度传感器 |
| 扬尘颗粒物传感器 | 油烟颗粒物传感器 |
| 温室气体传感器 | 呼气末二氧化碳模块 |
| 超声波氧气传感器 | 快速激光氧气传感器 |
| 弥散氧气传感器 | 微型红外二氧化碳传感器 |
| 可燃气体安全监测传感器 | 电化学CO传感器 |
| 激光甲烷传感器 | SF6泄漏监测传感器及报警系统 |
| 冷媒泄漏监测传感器&检测仪 | 汽车空气质量传感器总成 |
| 汽车空气质量改善装置 | 电池热失控监测传感器 |
| 发动机氧气/氮氧传感器 | 超声波燃气表&模块 |
| 家用可燃气体探测器/一氧化碳报警器 | |

资料来源：四方光电官网，甬兴证券研究所

5. 风险提示

- 1、人形机器人研发进展不及预期：当前人形机器人仍处于初期研发阶段，尚未实现量产，因此存在研发进展不及预期的风险。
- 2、六维力传感器需求不及预期：当前人形机器人厂商众多，力传感器在类型和数量上存在多种方案，因此六维力传感器存在需求不及预期的风险。
- 3、人形机器人需求不及预期：人形机器人属于新兴产品，市场需求尚不明确，量产后存在需求不及预期的风险。

分析师声明

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注册为证券分析师，以勤勉尽责的职业态度，专业审慎的研究方法，独立、客观地出具本报告，保证报告采用的信息均来自合规渠道，并对本报告的内容和观点负责。负责准备以及撰写本报告的所有研究人员在此保证，本报告所发表的任何观点均清晰、准确、如实地反映了研究人员的观点和结论，并不受任何第三方的授意或影响。此外，所有研究人员薪酬的任何部分不曾、不与、也将不会与本报告中的具体推荐意见或观点直接或间接相关。

公司业务资格说明

甬兴证券有限公司经中国证券监督管理委员会核准，取得证券投资咨询业务许可，具备证券投资咨询业务资格。

投资评级体系与评级定义

股票投资评级：	分析师给出下列评级中的其中一项代表其根据公司基本面及（或）估值预期以报告日起 6 个月内公司股价相对于同期市场基准指数表现的看法。
买入	股价表现将强于基准指数 20%以上
增持	股价表现将强于基准指数 5-20%
中性	股价表现将介于基准指数±5%之间
减持	股价表现将弱于基准指数 5%以上
行业投资评级：	分析师给出下列评级中的其中一项代表其根据行业历史基本面及（或）估值对所研究行业以报告日起 12 个月内的基本面和行业指数相对于同期市场基准指数表现的看法。
增持	行业基本面看好，相对表现优于同期基准指数
中性	行业基本面稳定，相对表现与同期基准指数持平
减持	行业基本面看淡，相对表现弱于同期基准指数

相关证券市场基准指数说明：A 股市场以沪深 300 指数为基准；港股市场以恒生指数为基准；新三板市场以三板成指（针对协议转让标的）或三板做市指数（针对做市转让标的）为基准指数。

投资评级说明：

不同证券研究机构采用不同的评级术语及评级标准，投资者应区分不同机构在相同评级名称下的定义差异。本评级体系采用的是相对评级体系。投资者买卖证券的决定取决于个人的实际情况。投资者应阅读整篇报告，以获取比较完整的观点与信息，投资者不应以分析师的投资评级取代个人的分析与判断。

特别声明

在法律许可的情况下，甬兴证券有限公司（以下简称“本公司”）或其关联机构可能会持有报告中涉及的公司所发行的证券或期权并进行交易，也可能为这些公司提供或争取提供投资银行、财务顾问以及金融产品等各种服务。因此，投资者应当考虑到本公司或其相关人员可能存在影响本报告观点客观性的潜在利益冲突，投资者请勿将本报告视为投资或其他决定的唯一参考依据。也不应当认为本报告可以取代自己的判断。

版权声明

本报告版权属于本公司所有，属于非公开资料。本公司对本报告保留一切权利。未经本公司事先书面许可，任何机构或个人不得以任何形式翻版、复制、转载、刊登和引用本报告中的任何内容。否则由此造成的一切不良后果及法律责任由私自翻版、复制、转载、刊登和引用者承担。

重要声明

本报告由本公司发布，仅供本公司的客户使用，且对于接收人而言具有保密义务。本公司并不因相关人员通过其他途径收到或阅读本报告而视其为本公司的客户。客户应当认识到有关本报告的短信提示、电话推荐及其他交流方式等只是研究观点的简要沟通，需以本公司发布的完整报告为准，本公司接受客户的后续问询。本报告首页列示的联系人，除非另有说明，仅作为本公司就本报告与客户的联络人，承担联络工作，不从事任何证券投资咨询服务业务。

本报告中的信息均来源于我们认为可靠的已公开资料，本公司对这些信息的真实性、准确性及完整性不作任何保证。本报告中的信息、意见等均仅供客户参考，该等信息、意见并未考虑到获取本报告人员的具体投资目的、财务状况以及特定需求，在任何时候均不构成对任何人的个人推荐。客户应当对本报告中的信息和意见进行独立评估，并应同时思量各自的投资目的、财务状况以及特定需求，必要时就法律、商业、财务、税收等方面咨询专家的意见。客户应自主作出投资决策并自行承担投资风险。本公司特别提示，本公司不会与任何客户以任何形式分享证券投资收益或分担证券投资损失，任何形式的分享证券投资收益或者分担证券投资损失的书面或口头承诺均为无效。市场有风险，投资须谨慎。对依据或者使用本报告所造成的一切后果，本公司和关联人员均不承担任何法律责任。

本报告所载的意见、评估及预测仅反映本公司于发布本报告当日的判断。该等意见、评估及预测无需通知即可随时更改。过往的表现亦不应作为日后表现的预示和担保。在不同时期，本公司可发出与本报告所载意见、评估及预测不一致的研究报告。本公司不保证本报告所含信息保持在最新状态。同时，本公司的销售人员、交易人员以及其他专业人士可能会依据不同假设和标准、采用不同的分析方法而口头或书面发表与本报告意见及建议不一致的市场评论或交易观点。本公司没有将此意见及建议向报告所有接收者进行更新的义务。投资者应当自行关注相应的更新或修改。