

## 机械设备行业深度报告

### 传感器系列报告 1：力传感器在机器人中的应用

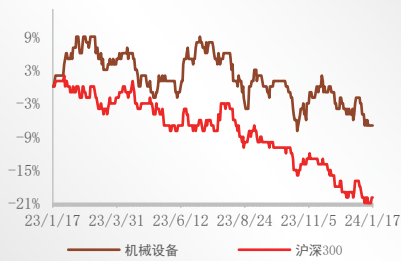
方正证券研究所证券研究报告

行业评级：推荐

行业信息

|          |           |
|----------|-----------|
| 上市公司总家数  | 596       |
| 总股本(亿股)  | 4,153.78  |
| 销售收入(亿元) | 26,616.52 |
| 利润总额(亿元) | 1,935.14  |
| 行业平均 PE  | 87.85     |
| 平均股价(元)  | 19.50     |

行业相对指数表现



数据：wind 方正证券研究所

相关研究

《制造业复苏+需求结构升级+自主可控，机床行业或迎新一轮上行周期》2023.11.07

《数控机床核心装置百亿市场空间，进行时》2023.11.07

《基于区域分析看工程机械出海的现状与未来》2023.10.13

当地时间 2023 年 12 月 12 日晚，特斯拉 CEO 马斯克发布了特斯拉人形机器人 Optimus（擎天柱）二代机的最新视频。机器人的手部灵活性、抓取鸡蛋、深蹲、行走速度的变化，均需要对触觉传感器、力/力矩传感器等做出较大改进，后续传感器有望成为行业关注重点。

**什么情况下要使用多维力传感器？**力传感器是一种用于测量物体所受的力量量的装置。它们广泛应用于各个领域，包括工业、医疗、体育等。按照感力元件，可以将力传感器大体分为应变式/压阻式、压电式/压容式、光电式等三类。目前，市场应用的六维力/力矩传感器多基于应变式测量。常规的一维力传感器用于力的方向和作用点都固定的情况下，三维力传感器则用于方向随机变化、力作用点不变的情况下。若力的方向、作用点都在变化，则需要使用六维力传感器。此外，如果力的作用点离传感器标定参考点的距离较远，且随机变化，测量精度要求较高，一般需要采用六维力传感器。

**力矩传感器市场规模超 400 亿元，六维力矩传感器尚处于发展初期。**据 Markets and Markets Research 数据，2021 年全球力矩传感器市场规模约为 68 亿美元（约合人民币 439 亿元），预计到 2026 年达到 90 亿美元，CAGR 约为 5.7%。力矩传感器目前主要用于汽车测试、测量检测、工业、航空航天与国防等领域。六维力矩传感器方面，据高工机器人数据，2022 年中国六维力/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%。市场规模方面，2022 年国内六维力/力矩传感器市场规模 2.39 亿元，其中机器人六维力/力矩传感器市场规模 1.56 亿元。当前，六维力/力矩传感器市场规模较小，尚未形成规模效应。根据我们的计算，机器人用六维力/力矩传感器均价从 2017 年的 4.6 万元/套下降至 2022 年的 3.2 万元/套。当前仍处于较高水平。

**六维力矩传感器：**目前，六维力/力矩传感器主要应用于汽车行业碰撞测试、轮毂测试、零部件测试等，以及航空航天、生物力学、医疗康复、科研实验、机器人与自动化领域。

在机器人领域，六维力矩传感器对手腕、脚踝等关节是优选，但并非**是必选项**。根据袁俊杰等在《关节力矩反馈型协作机器人的阻抗控制研究》实验结论，六维力矩传感器安装简单，在不考虑成本的情况下，是阻抗实验的首要选择；关节力矩传感器的使用需要改变机器人结构，安装比较复杂，但通过关节力矩传感器也可以计算出末端接触力，并进行较精确的控制。

**人形机器人：手腕及脚踝可能使用六维力矩传感器。**特斯拉机器人脚掌后方可能使用六维力传感器，因为机器人的行走过程中需要保持平衡，若此时用到六维力传感器可以感测机器人脚下地面反作用力。此外，前部可能增加脚趾部位传感器，从而获得更多点信息，适应更加复杂的地面场景，可能为一维力传感器。从优必选官网展示人形机器人 WalkerX、Walker、熊猫机器人悠优配置可以看出，也主要是在脚踝、手腕等 4 处末端执行器采用了六维力矩传感器，可以实现在碎石、地砖、草坪、厚地、草坪等不平整地面上稳定快速行走。关节处可能使用使用电流环控制或一维力/力矩传感器。根据我们的测算，在手腕、脚踝处使用六维力矩传感器、关节处使用一维力/力矩传感器的假设下，我们测算人形机器人销量达到 10 万台、100 万台时，对应六维力、力矩传感器市场空间有望分别达到 48 亿元、260 亿元。

力传感器企业布局：全球六维力/力矩传感器主要品牌可以分为日韩品牌、欧美品牌、国产品牌三类。据 GGII，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，如韩国 Robotous、日本 Sintokogio 等，欧美品牌可以分为传统传感器厂商（ATI、Bota Systems AG）、机器人末端工具厂商（SCHUNK）等 2 类。国产六维力/力矩传感器厂商逐渐成长，如**宇立仪器（SRI）、坤维科技、鑫精诚、海伯森、蓝点触控、瑞尔特**等，均已有相关产品落地并进入产业化应用。总体上看，受益于机器人市场需求催化，近年来进入六维力矩传感器的厂商诸多，但真正具备量产能力的厂商仍然较少，但随着机器人等下游需求逐渐释放，各家企业已经开启加速布局。

**投资建议：**建议关注**柯力传感、中航电测、八方股份、东华测试、康斯特**等。

**风险提示：**下游需求不及预期，降本不及预期，测算误差风险，技术研发不及预期风险

## 正文目录

|   |    |
|---|----|
| 1 特斯拉发布二代机视频，传感器变化引关注 .....                 | 5  |
| 2 力传感器的市场规模及分类 .....                        | 6  |
| 2.1 力传感器的分类 .....                           | 6  |
| 2.2 什么情况下要使用多维力传感器？ .....                   | 7  |
| 2.3 力矩传感器：分为静态、动态扭矩传感器，全球市场规模超 400 亿元 ..... | 8  |
| 2.4 六维力矩传感器：尚处于发展初期，国内市场规模约为 2.39 亿元 .....  | 9  |
| 3 六维力矩传感器的应用 .....                          | 11 |
| 3.1 六维力传感器的应用：汽车碰撞测试、打磨机器人、手术机器人等领域 .....   | 11 |
| 3.2 机器人中，六维力矩传感器是必选项吗？ .....                | 12 |
| 4 人形机器人中力传感器的解决方案分析 .....                   | 14 |
| 4.1 手腕及脚踝可能使用六维力矩传感器 .....                  | 14 |
| 4.2 关节：或使用电流环控制或一维力/力矩传感器 .....             | 15 |
| 4.3 人形机器人力传感器市场空间测算 .....                   | 16 |
| 5 力传感器企业布局情况介绍 .....                        | 18 |
| 5.1 六维力矩传感器竞争格局 .....                       | 18 |
| 5.2 六维力矩传感器的难点 .....                        | 19 |
| 6 重点标的 .....                                | 21 |
| 6.1 柯力传感：称重传感器龙头企业，向多物理量传感器平台型企业转型 .....    | 21 |
| 6.2 中航电测：智能测控领军企业，军民业务多点开花 .....            | 21 |
| 6.3 八方股份：电踏车电机龙头企业，掌握力矩传感器核心技术 .....        | 21 |
| 6.4 东华测试：结构力学测试领军企业，推进力矩传感器产品研发 .....       | 22 |
| 6.5 康斯特：校准测试龙头企业，MEMS 传感器绘制第二成长曲线 .....     | 23 |
| 7 风险提示 .....                                | 24 |

## 图表目录

|  |    |
|--|----|
| 图表 1: Optimus-Gen2 更灵活、11 个自由度的全新手部..... | 5  |
| 图表 2: Optimus-Gen2 可以抓取鸡蛋.....           | 5  |
| 图表 3: Optimus-Gen2 可以做 90 度深蹲.....       | 5  |
| 图表 4: Optimus-Gen2 行走速度提升 30%.....       | 5  |
| 图表 5: 力传感器的分类.....                       | 6  |
| 图表 6: 不同原理力传感器的比较.....                   | 7  |
| 图表 7: 不同维度力传感器应用场景.....                  | 8  |
| 图表 8: 2020 年力矩传感器下游应用（百万美元）.....         | 9  |
| 图表 9: 机器人用六维力/力矩传感器销量及市场规模.....          | 9  |
| 图表 10: 机器人用六维力/力矩传感器均价（万元/套）.....        | 9  |
| 图表 11: 六维力传感器技术及其应用场景.....               | 11 |
| 图表 12: 六维力传感器在机器人领域的应用.....              | 11 |
| 图表 13: 手术器械受力.....                       | 12 |
| 图表 14: 手术器械传感器位置布置.....                  | 12 |
| 图表 15: 安装关节力矩传感器的协作机器人.....              | 13 |
| 图表 16: 安装六维力传感器的实验平台.....                | 13 |
| 图表 17: 支撑状态下足底主要受力点.....                 | 14 |
| 图表 18: 步态事件划分.....                       | 14 |
| 图表 19: 特斯拉二代机足端变化.....                   | 14 |
| 图表 20: 优必选 Walker X 机器人.....             | 14 |
| 图表 21: 优必选 WalkerX 机器人可以实现不平整地面稳定行走..... | 15 |
| 图表 22: 特斯拉机器人关节方案.....                   | 15 |
| 图表 23: 机器人关节传感器数量计算.....                 | 16 |
| 图表 24: 机器人关节力传感器数量计算.....                | 17 |
| 图表 25: 2022 年中国六维力/力矩传感器竞争格局.....        | 18 |
| 图表 26: 协作机器人领域销量占比.....                  | 18 |
| 图表 27: 六维力传感器布局企业介绍.....                 | 19 |
| 图表 28: 六维力矩传感器参数对比.....                  | 19 |
| 图表 29: 六维力矩传感器串扰测量结果.....                | 20 |
| 图表 30: 多维力传感器精准度图示.....                  | 20 |
| 图表 31: 电踏车电气系统主要部件.....                  | 22 |

## 1 特斯拉发布二代机视频，传感器变化引关注

当地时间 2023 年 12 月 12 日晚，特斯拉 CEO 马斯克发布了特斯拉人形机器人 Optimus（擎天柱）的最新视频。视频称，相较于上一代人形机器人，第二代人形机器人 Optimus-Gen 2（第二代擎天柱）的步行速度提升 30%，平衡能力和身体控制能力均有所改善，整体重量也从 73kg 减少到了 63kg。

根据视频介绍，第二代擎天柱搭载了由特斯拉设计的执行器和传感器、2 个自由度驱动颈部、响应更快的 11 个自由度手部、**触觉传感器**、执行器集成电子和线束、**足部力/扭矩传感器**、**铰接式脚趾**等。

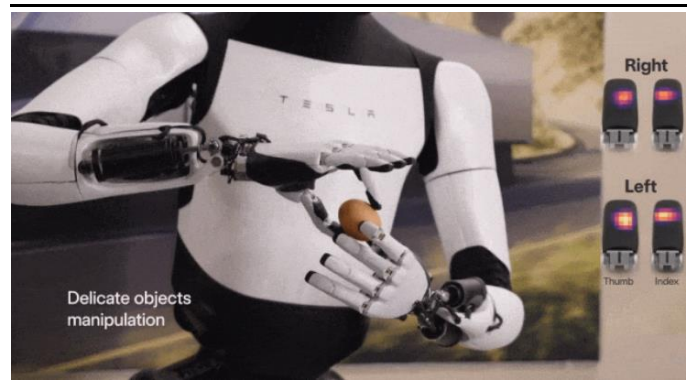
值得注意的是，Optimus Gen2 的手部有 11 个自由度，动起来非常灵巧。在视频中，机器人已经可以轻松准确地抓取和放下鸡蛋，整个过程比较连贯平稳，左手转右手的整个过程也较为连贯，展示出其双手的操控能力。

图表1:Optimus-Gen2 更灵活、11 个自由度的全新手部



资料：澎湃新闻、方正证券研究所

图表2:Optimus-Gen2 可以抓取鸡蛋



资料：澎湃新闻、方正证券研究所

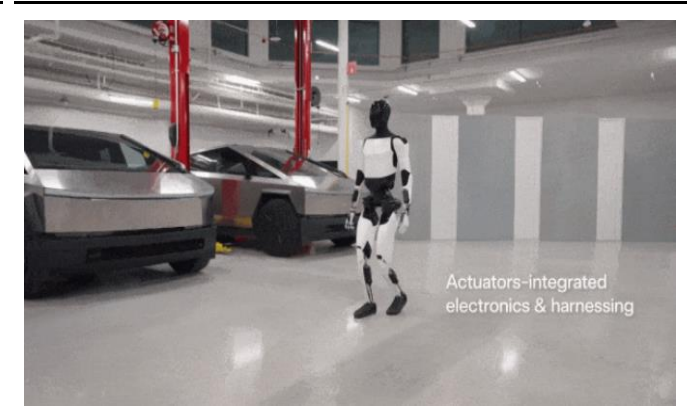
此外，擎天柱还可以做一个均匀的 90 度深蹲，这个动作需要全身多处关节配合来保持平衡。从其行走过程来看，足部和腿部的形态，以及走路方式都与人类相似。

图表3:Optimus-Gen2 可以做 90 度深蹲



资料：澎湃新闻、方正证券研究所

图表4:Optimus-Gen2 行走速度提升 30%



资料：澎湃新闻、方正证券研究所

此次手部灵活性、抓取鸡蛋、深蹲、行走速度的变化，均需要对触觉传感器、力/力矩传感器等做出较大改进，后续传感器有望成为行业关注重点。



## 2 力传感器的市场规模及分类

力传感器是一种用于测量物体所受的力量的装置。它们广泛应用于各个领域，包括工业、医疗、体育等。

### 2.1 力传感器的分类

力传感器是各种工业设备的核心元件，它通过检测物体和设备之间的力来确定被测物体的位置和运动情况。按照感力元件，可以将力传感器大体分为应变式/压阻式、压电式/压容式、光电式等三类。

图表5:力传感器的分类

| 图片  | 原理   | 优势   | 劣势   | 应用领域   |
|---|--|--|--|--|
|    | 用弹性体材料应变时，其尺寸、形状和受力状态发生变化，从而引起电阻值变化的一种传感器。主要由 <b>弹性体、电阻体、连接电路组成</b> 。应变片通常由 <b>金属箔、导电材料</b> 制成。常见的应变效应包括金属电阻应变计和半导体应变计                                       | 结构简单、制造容易、价格便宜、便于与各种传感器集成  | 受环境温度的影响较大，不适宜在高温、高湿环境中使用  | 广泛应用于各种工业自动化设备中。通常用于测量 <b>动态或高速变化的力或应变</b> ，如机械振动、航空航天领域的结构应变。 |
|    | 当受力物体产生压力时，传感器内部的压阻体会发生变形，从而改变电路中的电阻值，实现测量。其特点是 <b>力直接作用于感应元件上</b> ，通常由 <b>薄膜材料</b> 制成，具有良好的弹性和变形特性，施加压力时，薄膜材料发生微小弯曲变形。典型代表有碳敏电阻和柔性电阻。用作压阻式的基片（膜片）材料主要为硅片、锗片 | 体积小、灵敏度高、精度高于金属应变计、无活动部件（可靠性高、耐用），可工作于振动、冲击、腐蚀、 <b>强干扰等恶劣环境</b>              | 压阻式传感器是半导体材料制作，受温度影响较大，在温度变化较大的环境中需要进行温度补偿   | 通常用于测量 <b>静态或者缓慢变化的压力</b> ，如测量重物重量，或物体的压缩变形等。                  |
|  | 主要由 <b>压电晶体、引线</b> 组成。当受到力的作用时，压电晶体发生形变，在晶体的两侧产生异性电荷，电荷经过放大，且高输出阻抗转换成低输出阻抗后，可以被二次仪表接收。压电材料有许多种，如 <b>石英、陶瓷、钛酸钡</b> 等。   | 原理简单、重量轻、精度高、响应速度快，在很宽的温度范围内灵敏度恒定  | <b>对湿度敏感</b> ，某些压电材料需要防潮措施，且 <b>输出的直流响应差</b> ，需采用高输入阻抗电路，或电荷放大器来克服这一缺陷                                       | 广泛用于各种测量领域，如压力、力、加速度、位移、振动等。 <b>不能用于静态测量（静压力），一般用于脉动压力。</b>    |
|  | 利用电容值随外载荷及极距的变化而变化的特性实现力检测   | 很强的抗干扰能力，而且线性好、测量范围广、动态响应好   | <b>对环境要求比较严格</b> ，需要对被测物进行测量之前需要进行标定和校准。   | 常用于检测大负荷，测量范围一般为几个微法拉，其中最常用的是1/10个法拉电容式力传感器                    |
|  | 先把被测量的变化转换成光信号的变化，再将光信号的变化转换成电信号的变化。通过光栅反映形变。  | 在 <b>动态性</b> 上具有明显优势   | 成本较高，刚度、稳定性及信噪比较差  | 光电式转速表、计数器、测距等   |
|  | 利用力的传递原理，采用数字信号处理技术将被测物体的重力、加速度、力矩等信号转换成电信号。分为 <b>电磁型、电感型</b> 数字式力传感器，前者通过电感的磁通量变化检测力，后者通过电子元器件将外界电磁场变化转换为电信号  | 电磁型：体积较小、功耗低，精度和灵敏度高，可实现 <b>非接触式测量</b> ，抗干扰能力强；<br>电感式：结构简单，灵敏度高，测量精度高，输出功率大 | 电磁式： <b>设计和制造复杂</b> ，对环境温湿度比较敏感，有一定测量范围限制；<br>电感式： <b>频率响应不高，不适合快速动态测量</b> ，对激励电源的频率和幅度稳定性要求高，此外，测量范围大时分辨率较低 | 电磁式传感器广泛应用于各种 <b>现场检测</b> 。它常、汽车零部件、医疗诊断、航空航天等                 |

资料来源：FUTEK 广州欧迈志传感、力准传感、与非网、品慧电子、必优传感网、芯云纳米、Ofweek 传感网、HBM、电子开发网、宁波立德明阳智能机器人科技有限公司、传感器专家网、方正证券研究所

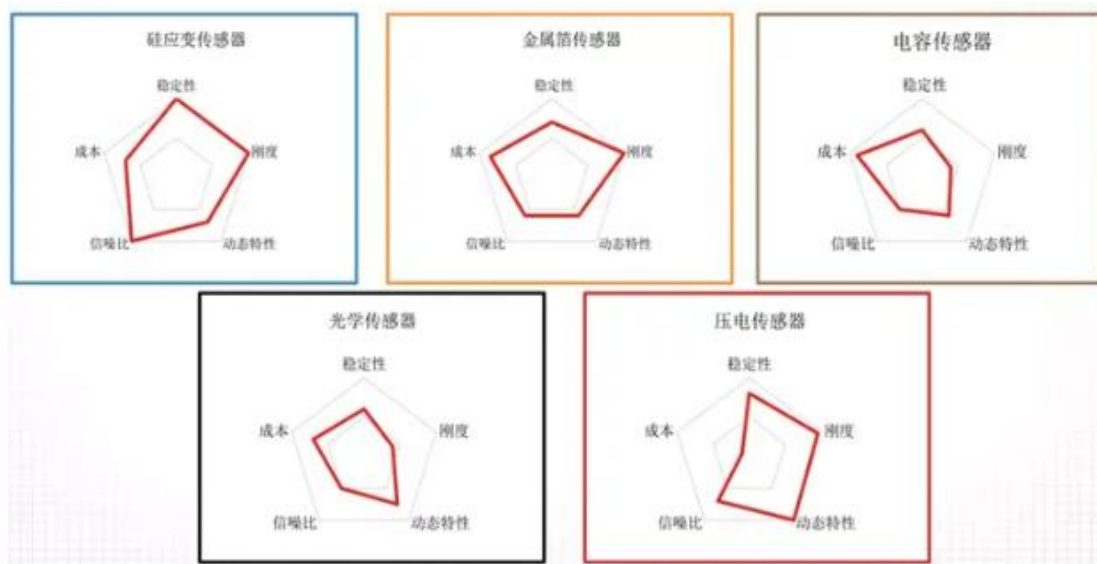
从原理上看，应变式力传感器，采用的是**硅应变片**或**金属箔**，本质是弹性体材料发生形变进而转化为阻值变化；压阻式传感器，其原理是力直接作用于感应元件上，使电阻发生变化，用作压阻式的基片（膜片）材料主要有**硅片、锗片**。光学

式传感器则是通过光栅反映形变，将力的变化转换为光信号，再转换为电信号；**压电/电容式传感器**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，压电式是通过形变改变电荷，电容式则是通过极距的变化导致电压变化。

通过多维度的对比，1) 应变式：硅应变、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，成本上金属箔更优，但近年硅应变片工艺有了提升和改进，综合成本也在大幅降低；2) 光学式：在动态特性方面明显具有优势，但成本较高，且稳定性和刚度较差，在力传感器中应用较少。3) 压电/电容式：电容传感器成本最优，其他几项弱于压电传感器；此外，电容及压电式传感器对环境要求较高，尤其**压电式对湿度较为敏感，输出的直流响应较差，但压电式动态特性及刚度较好**，过去压电式较少用于六维力传感器，更多用于三维等少于六维的传感器，未来有望在六维力传感器中得到应用。

目前，市场应用的六维力/力矩传感器多基于应变式测量，压电/电容式、光学式等有一定理论研究和实验，尚未得到广泛应用。随着研究不断深入，不同原理传感器将匹配到合适场景，推动六维力/力矩传感器的多元化发展。

图表6: 不同原理力传感器的比较



资料 : leaderobot、宁波立德明阳智能机器人科技有限公司、方正证券研究所

## 2.2 什么情况下要使用多维力传感器？

一般情况下，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**，如天平、体重秤。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**。而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。

图表7:不同维度力传感器应用场景

| 分类     | 图片  | 使用场景                               | 原理  |
|--------|---|------------------------------------|---|
| 一维力传感器 | <p>O——力传感器标定参考点<br/>P——力的作用点<br/>OXYZ——传感器标定坐标系</p> | 力的方向和作用点是固定的                       | 我们可以通过安装定位,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,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。                                 |
| 三维力传感器 | <p>O——力传感器标定参考点<br/>P——力的作用点<br/>OXYZ——传感器标定坐标系</p> | 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 | 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某一——测量。例如,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Fx、Fy、Fz这三个F的分力。 |
| 六维力传感器 | <p>O——力传感器标定参考点<br/>P——力的作用点<br/>OXYZ——传感器标定坐标系</p> | 力的方向和作用点都在三维空间内随机变化                | 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。空间中任意方向的力F,其作用点P不与传感器标定参考点重合且随机变化,这种情况下就需要选用六维力传感器来完成测量任务,同时测量Fx、Fy、Fz、Mx、My、Mz六个分量。   |

资料 : 坤维科技、方正证券研究所

如果力的作用点离传感器标定参考点的距离很近,且不变化,测量精度不高,可以用三维力传感器。如果力的作用点离传感器标定参考点的距离较远,且随机变化,测量精度要求较高,一定需要采用六维力传感器。

我们经常提及的“给我一个支点,我可以翘起地球”,其实就表明,力矩对传感器产生的力学影响往往比力要大很多。如果力的作用点与传感器标定参考点不重合,力矩的力学作用势必影响了传感器的数学模型,使其偏离标定状态,从而导致对力的测量误差较大。

相同方向和大小的力,但作用点不同,如果采用三维力传感器对其进行测量,测量结果一般会不同,这显然是产生了较大的测量误差。一个极端的例子是,如果力的作用点距离传感器参考点足够远,也就是力臂足够大,即使是在传感器量程范围内的力,也会导致传感器结构的材料屈服,甚至是断裂,而精准测量就更加难以保证。

### 2.3 力矩传感器:分为静态、动态扭矩传感器,全球市场规模超400亿元

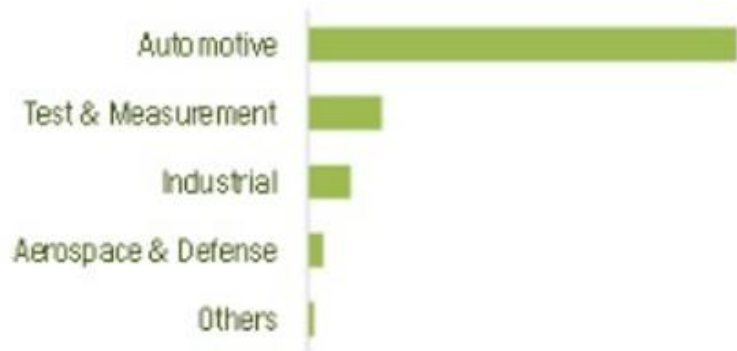
力矩传感器,又称为扭矩传感器,又可以分为静态、动态扭矩传感器两种。二者都可以测量旋转动力源的扭矩,但区别在于,静态扭矩传感器,即在静止状态下测量扭矩,通常情况下是测量电机(旋转体)的堵转,但测量的旋转角度不能超过360°,因而不能测量转速;而动态扭矩传感器测量的旋转角度则没有限制随动力源旋转。此外,动态扭矩传感器由于结构上的差异,动态扭矩传感器往往体积比静态扭矩传感器要大。



据 Markets and Markets Research 数据，2021 年全球力矩传感器市场规模约为 68 亿美元（约合人民币 439 亿元），预计到 2026 年达到 90 亿美元，CAGR 约为 5.7%。

力矩传感器应用范围广泛，例如旋转扭矩传感器广泛用于汽车发动机测试、传动系统测试、测功机测试、电动机测试、变速箱测试等。应变片式扭矩传感器产生的信号与各种仪器兼容，可用于数字显示器、数字放大器等，而且可以达到更高精度。总体上看，力矩传感器目前主要用于汽车测试、测量检测、工业、航空航天与国防等领域。

图表8:2020 年力矩传感器下游应用（百万美元）

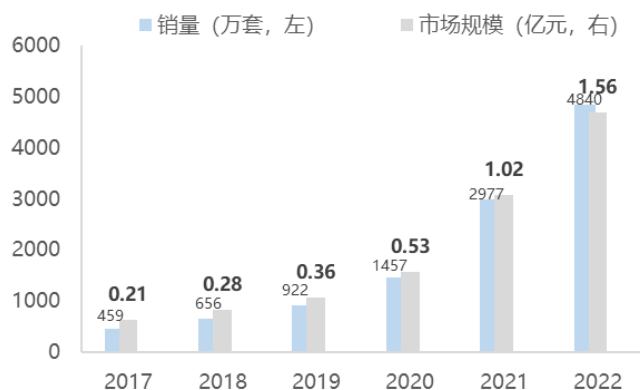


资料：Markets and Markets Research、方正证券研究所

#### 2.4 六维力矩传感器：尚处于发展初期，国内市场规模约为 2.39 亿元

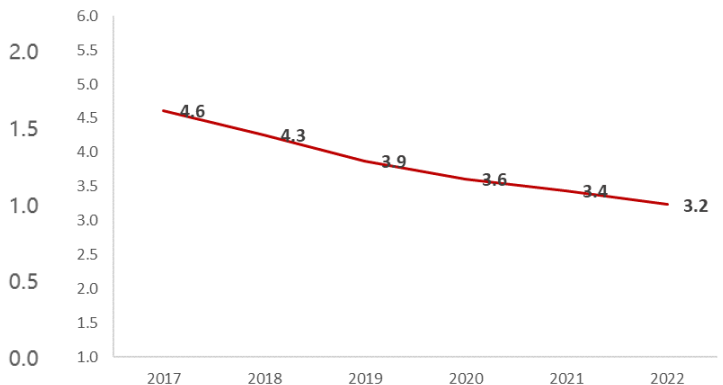
六维力矩传感器方面，据高工机器人数据，2022 年中国六维力/力矩传感器销量 8360 套，同比增长 57.97%，其中，机器人行业销量 4840 套，同比增长 62.58%。市场规模方面，2022 年国内六维力/力矩传感器市场规模 2.39 亿元，其中机器人六维力/力矩传感器市场规模 1.56 亿元。预计到 2027 年，中国六维力/力矩传感器市场规模有望超过 15 亿元，复合增长率 45%。当前，六维力/力矩传感器市场规模较小，尚未形成规模效应。

图表9: 机器人用六维力/力矩传感器销量及市场规模



资料：高工机器人、方正证券研究所

图表10: 机器人用六维力/力矩传感器均价（万元/套）



资料：高工机器人、方正证券研究所

从价格来看，根据高工机器人市场规模及销量数据，我们可以大致测算出机器人用六维力/力矩传感器均价从 2017 年的 4.6 万元/套下降至 2022 年的 3.2 万元/套。当前仍处于较高水平，应用于人形机器人仍然有一定成本压力。但随着下游






细分行业对传感器要求的提升，以及更多参与者进入，六维力/力矩传感器有望进入高速成长期，成本有望逐渐下降。

### 3 六维力矩传感器的应用

#### 3.1 六维力传感器的应用：汽车碰撞测试、打磨机器人、手术机器人等领域

六维力测量技术属于平台型技术，在不同应用场景和环境、载荷、安装、通讯、算力、动力学特需求下，其形态和技术特点也有一定区别。目前，六维力/力矩传感器主要应用于汽车行业碰撞测试、轮毂测试、零部件测试等，以及航空航天、生物力学、医疗康复、科研实验、机器人与自动化领域。

图表11:六维力传感器技术及其应用场景

| 机器人力觉传感器  | 高端机床  | 汽车测试  | 非标自动化测力组件  | 六维力台  |
|---|---|---|--|---|
|  |  |  |  |  |
| 第二代、第三代机器人关键组件  | 机床切削力监测，力位混合控制  | 碰撞测试多维力传感器<br>轮毂测试多维力传感器<br>载荷谱测试传感器等   | 压装、注塑、快速分拣<br>3c装配、触控监测<br>打磨、抛光   | 适用于航空航天、船舶、生物力学等  |

资料：高工机器人GGII、方正证券研究所

在机器人领域，传统的机器人任务，如果只对平面进行工作，一般需要进行位置控制即可。而近年来，随着机器人技术的不断发展，人们对机器人的任务要求也更加广泛，仅具备位置控制，已经无法满足部分任务的要求。能够同时精确控制力的任务，如切削、打磨、装配等，在众多工业领域有着广泛的需求。以打磨曲面为例，对整个施加力的过程进行监控，而非像传统的动作比如拧螺丝，只需要对力矩的结果进行检测，是否达到标准即可。打磨过程中，需要了解各位置力的矢量大小，从而调整机械臂的位置和施加力的程度。

图表12:六维力传感器在机器人领域的应用



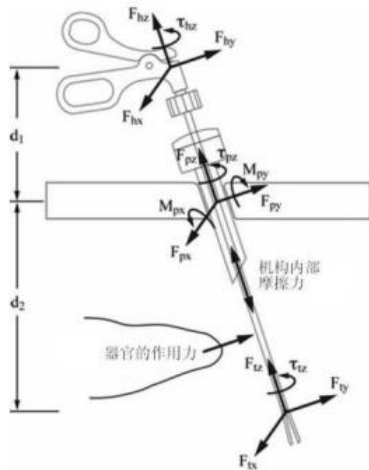
资料：高工机器人GGII、方正证券研究所

此外，在腔镜手术机器人领域，医生将微创手术器械通过鞘套插入患者体内开展手术，但由于手术器械缺少力检测功能以及自身自由度的限制，医生无法准确感知器械末端与患者组织的交互作用力，力反馈受到影响。为实现力检测与力反馈，六维微型力/力矩传感器的应用成为解决问题的关键。

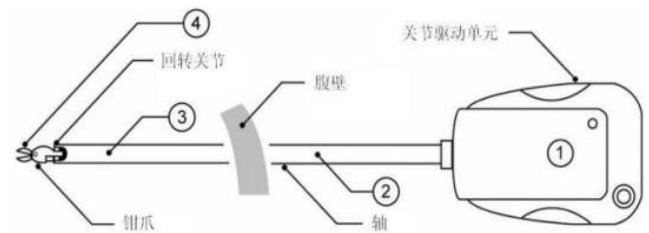
根据《腔镜手术机器人六维力/力矩传感器设计方法研究》，常规的腔镜手术器械包含一个可旋转的末端和符合人体工程学设计的手柄，相对于手术器械末端的交互作用力，医生在进行手术时只能感受到自己手柄的力，医生感受到手柄处的力大约是器械末端的 2-6 倍。目前所有手术器械都会受到自身摩擦力或其他作用力的影响，使得手柄处感受到的力与仪器末端的交互作用力不一致或者是非线性的。

例如，在进入人体的插口处，鞘套和手术器械的摩擦力大约是 0.25-3 N；转动手术器械时，也会产生力矩，大约是 0.7 N·m；还有一些在进行手术时，进入人体的手术器械与人体组织之间的交互作用力。为了防止这些力对手术器械力检测的影响，六维微型力/力矩传感器应放置在进入人体内的靠近器械末端的位置。

图表13: 手术器械受力



图表14: 手术器械传感器位置布置



资料：《腔镜手术机器人六维力/力矩传感器设计方法研究》，李磊、方正证券研究所

资料：《腔镜手术机器人六维力/力矩传感器设计方法研究》，李磊、方正证券研究所

一般来说，手术器械传感器可以布置的为主要有 4 个位置：1) **驱动单元**：放在此处可直接检测电机驱动力，但器械是组装而成，需要钢丝传动，末端远离驱动装置，易受器械自身重力、惯性力等影响。2) **腹壁外轴**：在人体外部，尺寸不受空间限制，但仍然距离末端较远；3) **腹腔内部轴**：避免了鞘套与手术器械间的相互作用力影响，但尺寸有很大限制，直径必须在 10mm 以内。此位置也会受到钢丝驱动力影响，存在惯性力，但相对其他三个位置而言，是布置微型传感器最理想位置。4) **夹钳上**：该位置消除了前三出所有外力干扰，但前爪体积有限，此位置检测元件受体积影响更大，仅非常小的检测元件可以布置在此。

### 3.2 机器人中，六维力矩传感器是必选项吗？

据袁俊杰等在《关节力矩反馈型协作机器人的阻抗控制研究》进行实验：

要实现末端力、位置的控制，一种方法是**直接安装六维力传感器**在机械臂末端，它可以直接获得末端接触力，利用测量值直接作为力反馈信号。



以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/655013120112011043>