

人形机器人零部件系列（一）

优于大势

上次评级:优于大势

为什么强调力控？

报告摘要：

为什么需要力控？位置和速度控制可以认为是“硬约束”，即机器人只能在设定区间中运行，而转矩控制是“软约束”或“柔性控制”，机器人可以根据场景需求而不断调整作用力的大小，因此随着机器人应用场景的多样化，转矩控制的重要性愈发明显。目前针对机器人硬件层面的力反馈测量主要有三种方式，应变片式力矩传感器、电磁式力矩传感器和弹性体。三种方案的选择和执行器方案有着密不可分的关系，常规方案使用基于应变片原理的力矩传感器测量力反馈，SEA 带有刚度更低的弹性体，因此一般使用电磁式或应变片式测量，而本体驱动器则使用电环流的方案并取消了传感器的配置。

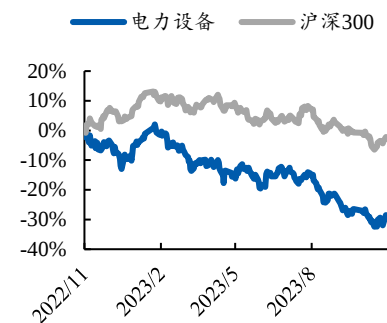
我们需要怎样的力传感器？拆解传感器的内部结构，应变片和弹性体在转换信息过程中起到重要作用。相较于其他传感器，应变片式传感器因其精度高、宽量程以及快速响应等特点而被广泛采用，目前主要应用于各种工业和实验应用，例如桥梁和建筑物的结构监测，和机器部件的力学测试。相较于一维/三维，六维传感器具备测量精度高、结构紧凑、响应迅速等特点。衡量传感器性能的指标有很多，包括灵敏度、精度、非线性误差、解耦误差等等。其中，以灵敏度、精度、工作频带和测量范围为核心指标度量。从上述的传感器核心指标可以看出，精度是力传感器最为重要的衡量指标，它决定着机器人在运动控制过程中对作用力的感知和反馈能力。而影响精度的因素很多，较为重要且解决技术难度较高的主要是维间耦合和无效负载两个因素。现有的解耦方法主要包括结构解耦和软件解耦。前者从硬件入手，通过弹性体等核心部件的设计和制造优化，设法从根源上消除维间耦合，后者则是从软件入手，通过合适的解耦算法降低或消除耦合误差。对于工具重力负载，目前一般可通过算法解耦。而对于零点漂移而言，可通过温度补偿（用另外一个元器件的温漂来抵消电路的漂移）、差动式放大电路等方法抑制零漂问题。

力传感器的产业链剖析。从传感器的生产工艺流程可以看出，弹性体的制造加工和应变片的生产组装是两个较为重要的步骤。国外应变片生产技术较为领先，其中以美国 Vishay、德国 HBM、日本的 NMB 为代表性企业。六维力矩传感器从应变片生产、弹性体设计、参数标定等一系列环节都需要较高的技术工艺，国外比如 ATI、OnRobot 等在该行业已经深耕多年，能够实现大量程、高精度、高准度等性能优势，而我国在该领域起步较晚，当前正积极入局的包括宇立、柯力等国内优秀企业。

千亿市场规模，有望受益人形机器人爆发。考虑到成本、需求以及容错率等因素，我们认为，人形机器人将率先在工业场景落地，随后经过技术优化和成本下降，场景将逐步渗透到家庭和商用。对应到市场空间，根据我们的测算，到 2030 年工业场景的需求量将达到 328.4 万台，家庭&商用场景的需求量达到 43.5 万台，整体市场规模接近 400 亿美元。随着人形机器人产业的 0-1 爆发放量，我们认为，六维传感器作为机器人人的重要零部件，将充分受益。

风险提示：硬件优化不及预期、成本下降不及预期、产业政策不及预期

历史收益率曲线



涨跌幅(%)	1M	3M	12M
绝对收益	-3%	-16%	-30%
相对收益	-1%	-7%	-26%

行业数据

成分股数量(只)	283
总市值(亿)	55,174.13
流通市值(亿)	30,114.04
市盈率(倍)	21.20
市净率(倍)	3.07
成分股总营收(亿)	26,648.87
成分股总净利润(亿)	2,064.53
成分股资产负债率(%)	57.33

相关报告

《人形机器人专题(上篇): 历史、变化与未来》

--20230725

证券分析师：韩金呈

执业证书编号：S0550521120001
18021008991 hanjc@nesc.cn

证券分析师：林绍康

执业证书编号：S0550523100003
18507146953 Linsk@nesc.cn

目 录

1.	为什么需要力控？	4
1.1.	力控是机器人运动控制的核心	4
1.2.	传感器和电流环是力控的主要方式	5
2.	我们需要怎样的力传感器？	8
2.1.	什么是力传感器？	8
2.1.1.	基本概念	8
2.1.2.	工作原理	8
2.1.3.	产品种类	12
2.2.	如何判别力传感器的好坏？	15
2.3.	力传感器的技术壁垒有哪些？	15
3.	力传感器的产业链剖析	19
3.1.	传感器产业链	19
3.2.	应变片生产环节	21
3.3.	传感器制造环节	24
4.	千亿市场规模，有望受益人形机器人爆发	28
4.1.	市场规模	28
4.2.	人形机器人 0-1 爆发，带来未来巨大新增需求	28
5.	风险提示	30

图表目录

图 1:	三环控制系统	4
图 2:	Atlas 在不平坦的雪地上行走时需要实时且精确的力反馈	5
图 3:	三种主流执行器方案	6
图 4:	应变片式和电磁式在 SEA 驱动器中的性能对比（绿色底纹表示性能更优）	7
图 5:	电流环和传感器的信号变化对比	7
图 6:	力矩传感器的基本结构	8
图 7:	传感器系统构成	9
图 8:	应变片组成（左）和实物（右）	9
图 9:	惠斯通电桥	10
图 10:	从左往右依次是四分之一桥、半桥、全桥	11
图 11:	应变片型号及主要规格	11
图 12:	横梁结构	12
图 13:	平行结构	12
图 14:	HBM 的应变片产品系列	13
图 15:	六维力矩传感器	14
图 16:	应变片的生产流程	16
图 17:	中航电测的应变片参数	17
图 18:	应变片贴片图	17
图 19:	六维传感器的标定工作量远大于一维	19
图 20:	六维联合加载设备的要求远大于一维	19
图 21:	应变片式传感器的生产工艺流程	20
图 22:	传感器产业链	21
图 23:	Vishay 应变片产品种类	22
图 24:	Vishay 部分产品销售情况	22
图 25:	HBM 应变片产品种类	22

图 26: NMB 的应变片产品参数	23
图 27: 中航电测的应变片产品参数	24
图 28: ATI 产品矩阵及参数	25
图 29: 公司传感器产品	26
图 30: 公司的应变式传感器	27
图 31: 公司的产品矩阵	28
图 32: 公司合作伙伴	28
图 33: 中国智能传感器市场	28
图 34: 特斯拉 Optimus 在工厂展示分拣工作	29
图 35: 波士顿动力 Atlas 根据指令在工厂中灵活执行任务	29
表 1: 三种力反馈测量方式对比	5
表 2: 主流驱动器方案	8
表 3: 传感器对比	14
表 4: 工业领域的人形机器人需求预测	30

1. 为什么需要力控？

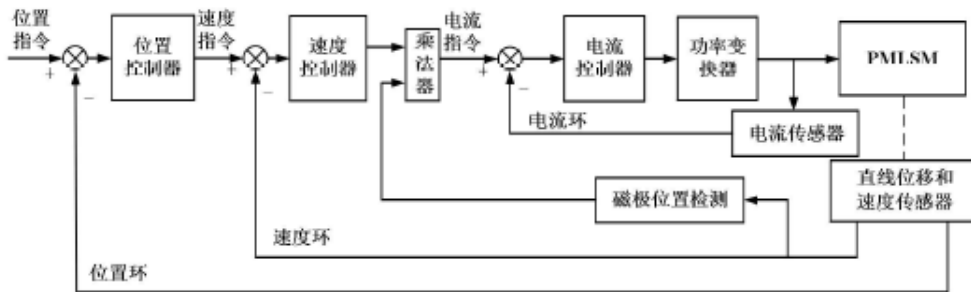
1.1. 力控是机器人运动控制的核心

机器人运动控制的目的是使机器人能够按照人类的指令，完成复杂的动作任务和自主决策。我们设计并生产机器人的主要目的就是使机器人能代替人类从事特定任务，因此可以说，运动控制是机器人研究中的核心所在。

机器人运动控制的本质是对伺服电机进行控制，而伺服系统一般有三种控制方式，分别是转矩控制、位置控制和速度控制。

- **转矩控制：**是指伺服驱动器仅对电机的转矩进行控制，原理是通过电流环控制电机转矩。电流环处于最内侧，此环完全在伺服驱动器内部进行，通过霍尔装置，检测驱动器给电机的各相的输出电流，负反馈给电流的设定进行PID调节，从而达到输出电流尽量接近等于设定电流。
- **速度控制：**是指驱动器仅对电机的转速和转矩进行控制，原理是通过电流环和速度环控制位置。通过检测的伺服电机编码器的信号来进行负反馈PID调节，环内PID输出直接就是电流环的设定，所以速度环控制包括速度环和电流环。
- **位置控制：**是指驱动器对电机的转速、转角和转矩进行控制，原理是通过电流环、速度环和位置环控制位置。位置环是最外环，可在驱动器和伺服电机编码器间构建也可以在外部控制器和电机编码器或最终负载间构建，要根据实际情况来定。由于位置控制环内部输出就是速度环的设定，位置控制模式下系统进行了所有3个环的运算，此时的系统运算量最大，动态响应速度也最慢。

图 1：三环控制系统



数据来源：机电帮，东北证券

转矩控制在机器人运动控制中的地位愈发重要。在三种控制方式中，传统机器人一般会使用位置控制，比如机械臂会沿着事先规划好的轨迹在封闭、确认的空间中运动。但是随着机器人应用场景的多样化，转矩控制的重要性愈发明显。

柔性控制能帮助机器人适应更多场景需求。一般而言，位置和速度控制可以认为是“硬约束”，即机器人只能在设定区间中运行，而转矩控制是“软约束”或“柔性控制”，机器人可以根据场景需求而不断调整作用力的大小。举个例子，机器人行走在不规则且未知的路面上，由于路面情况未知无法做事先的建模预测或者由于不规则路面状态太多而无法做精确的建模，这时如果使用纯位置控制的话，就无法规划出一条合适的位置轨迹，此时我们必须引入力控，做到实时的动态控制。

图 2: Atlas 在不平坦的雪地上行走时需要实时且精确的力反馈



数据来源：波士顿动力官网，东北证券

1.2. 传感器和电流环是力控的主要方式

目前针对机器人硬件层面的力反馈测量主要有三种方式，应变片式力矩传感器、电磁式力矩传感器和弹性体，而应变片式和电磁式都可以归属于力传感器。

- **力矩传感器**：将力矩传感器安装在脚掌和踝关节、机械手和腕关节之间，用于测量末端执行器与外界环境交互的受力情况。
- **电流环**：通过电机的电流闭环做力闭环反馈控制，适用于直驱电机或减速比较小的执行器。

表 1：三种力反馈测量方式对比

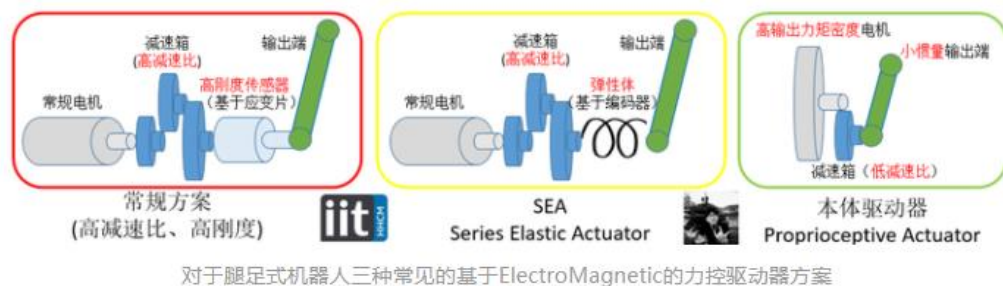
	应变片式力矩传感器	电磁式力矩传感器	电流环
实现成本	高	高	低
测量原理	基于材料受力后的微小形变，通过悬臂梁上应变片阻值的改变，带来电压信号的改变，再通过电压-扭矩系数等计算关节扭矩	基于材料受力后的微小形变，通过磁编码器或霍尔等原理测量该扭转值，再通过材料的抗扭截面系数计算关节扭矩	基于电机中的电流，通过电流-扭矩系数、减速比与摩擦补偿系数等极端关节扭矩
性能优势	1) 力测量精度高，双通道可解扭矩和弯矩的耦合； 2) 本体高度高，测量力通频带宽。	1) 力测量精度高，无温漂、零漂等问题； 2) 生产效率高。	1) 关节结构简洁，硬件可靠性高； 2) 本体高度高，测量通频带宽； 3) 实现成本低。
性能缺陷	1) 存在温漂、零漂，实际使用中需频繁标定； 2) 关节结构复杂，硬件可靠性低，生产工艺复杂； 3) 实现成本高。	在本体高刚度、测量高精度和实现低成本这三个维度很难取得平衡	力测量精度低，串联复杂减速箱传动环节，静摩擦力建模难度高，在高减速比关节中测量微小扭矩不灵敏
代表案例	Tesla Optimus	Rethink Baxter	Universal Robot

数据来源：《关于机械臂的阻抗/导纳控制、混合力位控制与力传感器》，东北证券

那么，这三种测量方式具体适用在哪些场景中呢？我们认为，这与整个执行器方案的设计具有密切关系。

目前针对机器人行业的常用执行器方案有三种，包括高刚度的常规方案、SEA、本体驱动器。三种方案的核心区别其实在于对力矩的测量上，常规方案使用基于应变片原理的力矩传感器测量力反馈，SEA 带有刚度更低的弹性体，因此一般使用电磁式或应变片式测量，而本体驱动器则使用电环流的方案并取消了传感器的配置。

图 3：三种主流执行器方案



数据来源：知乎《对于机器人关节 VSA 和 SEA 驱动器的一些新的讨论和认知更正》，东北证券

常规方案：使用力矩传感器测量执行器中的力反馈是目前主流方案，也是技术最为成熟的路线。除了成本昂贵、安装复杂以及部分性能问题外，应变片式传感器在机器人实际应用中的表现显著优于其他两者。这一方案我们会在接下来第二章重点介绍。

SEA 方案：通过弹性体测量扭矩，一般会使用电磁传感器或应变片式测量扭矩。至于使用哪种方案，会综合考虑到成本，刚度、分辨率等因素。比如在国外学者的研究中（见下图），两种方式在 SEA 驱动器的实际应用中表现出各自的优劣势。对于电磁式而言，虽然其可以克服应变片式存在的线性误差、零漂、温漂以及成本昂贵等的缺点，但他在刚度和分辨率等方面存在较大问题。

因为在要求高刚度水平的系统中，电磁式编码的分辨率会被迫降低，而应变片式则能通过调整仪器放大器的增益来补偿这一缺点。因此在下表中可以发现，虽然两者的分辨率大相径庭，但应变式的刚度是电磁式的 10 倍。换句话说，在保持一定分辨率的情况下，电磁式的刚度过低会导致扭矩能力降低以及过低的过载安全系数，最终或使得机器人执行器在实际运作过程容易受损。值得一提的是，部分应用 SEA 方案的四足机器狗，为了同时保持高刚度和高分辨率，一般会使用 3 个编码器，且为价格较昂贵的 19 位磁编。

简而言之，弹性体刚度是区分两种方案的标尺。在低刚度偏柔性的机器人关节中，可以使用电磁式，在中刚度且对分辨率要求并不高的情况下也可以使用电磁式，而在高刚度要求下主要使用应变片式。

图 4：应变片式和电磁式在 SEA 驱动器中的性能对比（绿色底纹表示性能更优）

对比项	Strain Gauge	Angle Deflection
重量	230 g	170 g
花费	390 Euro	430 Euro
平均装配时长	5.5 h	1.2 h
带宽（Bandwidth）	28.05 Hz	14.24 Hz
线性度误差（Linearity Error）	0.48 Nm	0.3 Nm
时间漂移（Time Drift）	0.3 Nm	0 Nm
温度漂移（Thermal Drift）	0.7 Nm	0.1 Nm
分辨率（Resolution）	10.9 bit	11.4 bit
噪声（Noise）	±0.26 Nm	±0.46 Nm
力矩延展性（Scalability）	High	Low
过载安全系数（Overload Safety Factor）	2.1	1.1
弹性体刚度	43450 Nm/rad	4507 Nm/rad

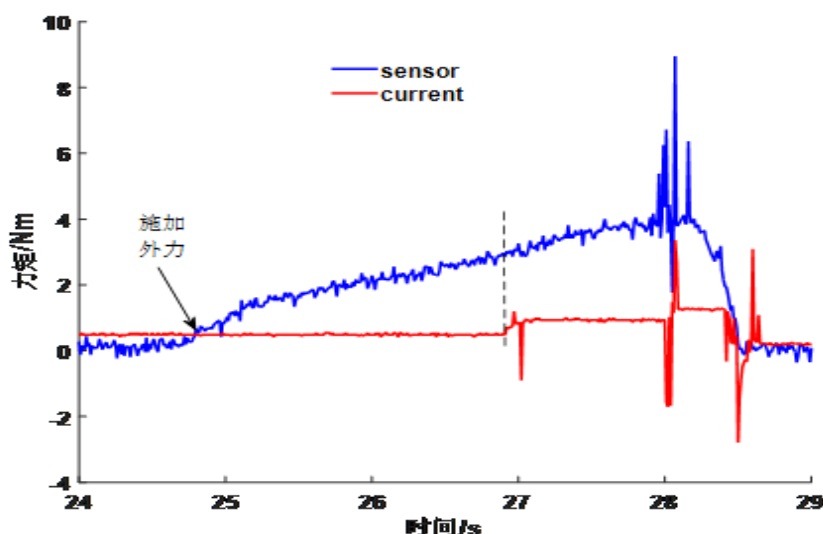
数据来源：On the Sensor Design of Torque Controlled Actuators: A Comparison Study of Strain Gauge and Encoder Based Principles，东北证券

本体驱动方案：用电流环替代昂贵的传感器是机器人节省成本的一个重要途径，因此在这里大家最大的疑问应该是，为什么电流环不适用于上面两种驱动器方案？

理论上讲，电流环可以用在常规方案和 SEA 方案中，但前提条件是减速器的减速比不能太高。在减速比较高的配备谐波减速器的执行器中，使用电流环测量力反馈最大的问题在于无法克服启动扭矩精确识别的难点。具体来说，减速比越大，意味着反驱力的透明度越低，增速启动扭矩就越高，输出端就越难转动，从机器人的表现上来看就是启动时拖拽比较费劲，而电流环对启动扭矩的观测弱于传感器，最终导致前者无法精确反馈力矩信息，进而使得控制器无法输出准确扭矩。简单来说，由于减速器静摩擦力，需要较大的外力，才能使电流环检测到，而力传感器在这一点上显著优于电流环。

换句话说，要保持较好的力控性能和成本相对可控，电流环在常规方案和 SEA 方案中，更多适用于小负载的机器人关节。

图 5：电流环和传感器的信号变化对比



数据来源：《电流环与关节力矩传感器感知能力比较》，东北证券

表 2：主流驱动器方案

	常规方案	SEA 方案	本体驱动器
方案特征	常规电机+高减速比减速箱+高刚度力矩传感器+输出端	常规电机+高减速比减速箱+柔性弹性体+输出端	大力矩输出密度电机+低减速比减速箱+小惯量输出端
力矩测量	基于应变片原理	基于编码器原理	电流环
主要优点	高频响应、技术成熟、输出能力强	柔性抗外界冲击性能强且能够储能，输出能力强	高频响应，抗冲击能力强，力矩反馈精准
主要缺陷	高刚度，动态物理交互性能较差，大冲击下容易损坏减速箱	刚度较小，高频力矩响应性能较弱，通频带较窄	小减速比减速箱，能力输出密度不足
技术水平	相对完善成熟	主流研究中	正发展崛起
应用场景	传统双足人形机器人	双足人形机器人	四足机器狗及双足小人形机器人
应用机器人	Tesla Optimus	NASA Valkyrie	国内大部分人形机器人

数据来源：Design of a Highly Dynamic Humanoid Robot 等，东北证券

2. 我们需要怎样的力传感器？

2.1. 什么是力传感器？

2.1.1. 基本概念

力矩传感器是对各种旋转或非旋转机械部件上对扭转力矩感知的检测，通过将扭力的物理变化转换成精确的电信号，从而进行测量和监测。

一个完整的传感器结构需要由上法兰、下法兰、弹性体、支撑台、和密封盖组成。上法兰外接机械手臂末端内接弹性体，下法兰和支撑台采用一体式设计可以增强传感器的刚度，支撑台内留有空间和单线孔方便敏感元件布置和走线。

图 6：力矩传感器的基本结构



数据来源：《新型六维力传感器设计及模拟研究》，东北证券

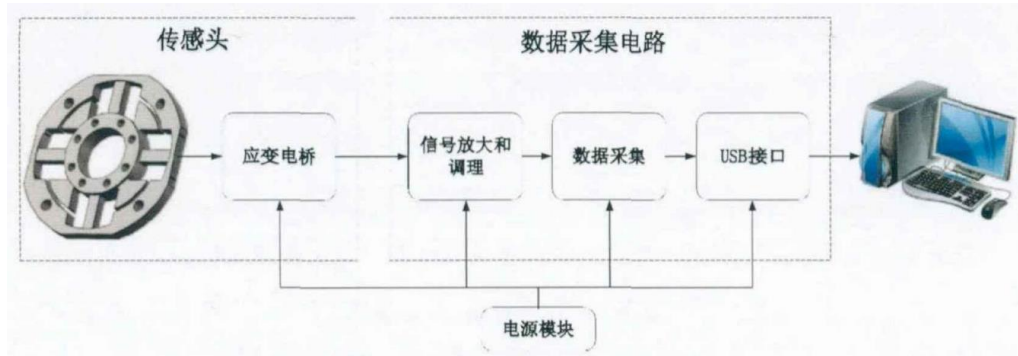
2.1.2. 工作原理

以电阻应变片式传感器为例，传感器的工作方式大致路径是：外界加载的力/力矩使弹性体产生形变，粘贴在内梁的应变片组成的桥路将弯曲位移信息转化为可以被测量的模拟信号，随后进入数据采集模块，先对来自传感头模块的模拟信号预处理，

即将电阻应变片采集的信号进行放大和滤波以适应转换器的转换量程，随后通过 ADC 将模拟电压信号转换成数字信号，转换后的信号通过 USB 接口至上位机，最后通过计算机对采集数据分析处理。

因此，一个完整的六维力传感器的传感器系统不只是机械结构框架，而是基于结构感知平台设计的一套完整的系统，包括传感器模块和数据采集电路模块。传感模块部分由六维力传感器弹性体和电阻应变电桥组成。数据采集模块由放大滤波模块、数据采集模块和 USB 接口模块组成。

图 7：传感器系统构成



数据来源：《新型六维力传感器设计及模拟研究》，东北证券

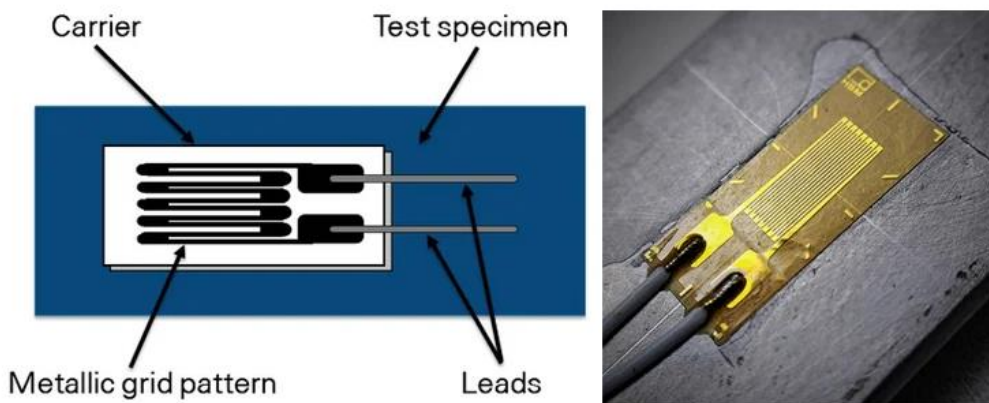
拆解传感器的内部结构，应变片和弹性体在转换信息过程中起到重要作用。

1) 应变片

应变片的工作原理基于机械应变引起的电阻变化的概念。应变片通常由细线或箔组成，通常由铜等高导电材料制成，附着在柔性背衬材料上。当机械应变施加到应变片上时，线或金箔会发生变形，导致其长度和横截面积发生变化，而这种尺寸的改变导致线或箔的电阻发生相应的变化。

具体而言，每个应变片均由柔性基板绝缘的金属箔组成，如下图所示，两根引线使电流通过压力表，当被测物体的表面拉伸或收缩时，电阻的变化就会被测量到。电阻的变化与被测物体表面的长度变化成正比，通过等式（电阻变化量/原有电阻=应变片系数*拉伸长度）测量出电阻的变化。

图 8：应变片组成（左）和实物（右）



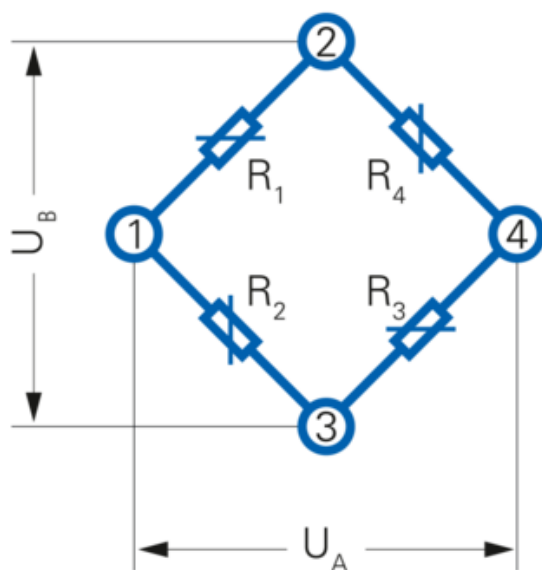
数据来源：HBM 官网，东北证券

进一步而言，惠斯通电桥对于应变片形成的电阻变化进行放大并输出电信号。惠斯通电桥是一种可以精确测量电阻的仪器。惠斯通电桥由四个电阻器（R1、R2、R3 和 R4）组成，它们以菱形连接，直流电源连接在电路的顶部和底部点（电路中的 C 和 D）之间。该电桥用于通过将未知电阻与已知电阻值进行比较来非常精确地找到未知电阻。当应变片因形变而导致电阻发生变化时，惠斯通电桥电路就不平衡，这种不平衡会产生一个小的电输出信号，该信号与施加的应变成正比。

按照应变片在惠斯通电桥使用的数量划分，一般可以将惠斯通电桥分为四分之一桥、半桥和全桥。

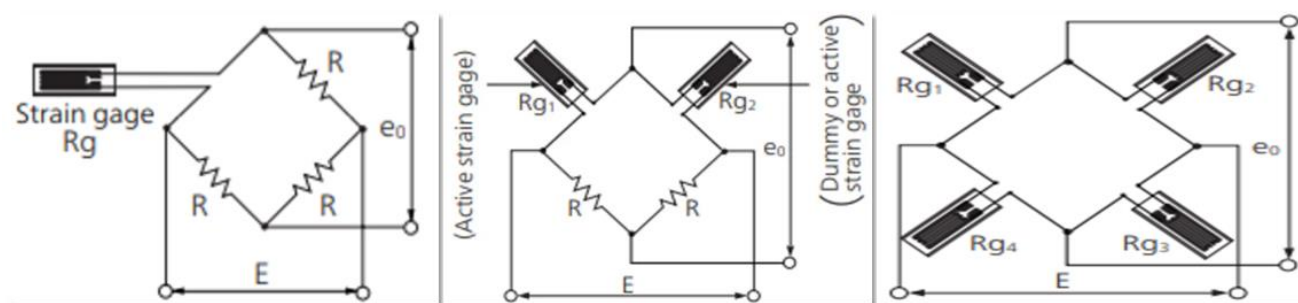
- **四分之一桥：**四分之一桥是由一个应变片和三个固定电阻构成，主要用于测量单轴。该系统易于配置，因此广泛用于一般应力或应变测量。
- **半桥：**对于半桥系统，将 2 个应变片连接到电桥上，每个应变片连接到相邻或相对的电桥上，其他为固定电阻。其中一个应变片用作温度补偿的虚拟应变片，其中两个应变片都用作主动应变片。半桥系统用于消除目标应变以外的应变分量。
- **全桥：**全桥系统有 4 个应变片。该电路确保了应变片传感器的大输出，改善了温度补偿，消除了目标应变以外的应变分量。全桥电路提供更高的灵敏度和最小的温度变化误差。

图 9：惠斯通电桥



数据来源：HBM 官网，东北证券

图 10：从左往右依次是四分之一桥、半桥、全桥



数据来源：HBM 官网，东北证券

应变片可分为金属式和半导体式两大类：1) 金属式：丝式、箔式、薄膜式；2) 半导体式：薄膜式、扩散式。根据基底材料不同又可分为纸基、胶基和金属片基等。

- **丝式应变片**：将直径 0.015~0.05mm、长度 0.2~200mm 范围的金属丝，按图示形状弯曲后，用粘合剂粘贴在基底上而成。电阻丝两端焊有引出线，使用时只要将应变片贴于被测弹性体上，就可构成应变式传感器。
- **箔式应变片**：它的敏感栅是通过光刻、腐蚀等工艺制成。箔栅厚度一般在 $3\mu\text{m}$ 至 $10\mu\text{m}$ 之间。与丝式应变片相比，箔式应变片表面积大，散热性好，允许通过较大的电流。由于箔式应变片很薄，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。
- **金属薄膜应变片**：采用真空蒸镀或溅射等方法，在薄的基底材料上制成一层金属电阻材料薄膜，然后用蚀刻技术制成各种形状的栅，以形成应变片。薄膜厚度比箔栅还要薄，一般在 $0.1\mu\text{m}$ 以下，其灵敏系数比箔式还要高，允许电流密度大，工作温度范围较广。

图 11：应变片型号及主要规格

I		II		III	IV	V	VI	VII
应变片类别		基底材料种类		标准电阻值	应变片栅长(mm)	敏感栅的结构形状	极限工作温度	适用材料的线膨胀系数
名称	符号	名称	符号	(Ω)			($^{\circ}\text{C}$)	($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
丝绕式	S	纸	Z	60	0.2 10	(略)	例	钛合金 9
短接式	D	环氧类	H	(90)	0.5 12	单轴	150	低碳钢 11
箔式	B	酚醛类	F	120	1 15	AA	200	合金钢 14
特殊用途	T	聚酯类	J	(150)	2 20		250	不锈钢 16
		缩醛类	X	200	3 30	二轴 90°	350	铝合金 23
		聚酰西胺类	A	(250)	4 50	BA	400	镁合金 27
		玻璃布滑胶	B	350	5 100	三轴 45°	550	
		金属薄片	P	500	6 150	CA	700	
		临时基底	L	(650)	8 200	圆膜栅	800	
				1000		KA	900	

数据来源：《传感器与现代检测技术》，东北证券

2) 弹性体

按照弹性体的形状，可分为横梁结构和平行结构。

横梁结构：该结构的特点是一个形状像横杆的弹性元件，应变片放置在横梁和柔性支撑横梁上。外圈通常通过施加在内圈上的外力保持固定，从而导致变形。

横梁结构紧凑，由于其整体结构提供了高刚度，但受到耦合效应的影响，制造起来具有挑战性。而且横梁结构的弹性体设计同样具备挑战性。这种结构传感器重复性较差，刚度和灵敏度达不到最优。另外该结构不具备过载保护能力，不适合重载工况和瞬间冲载荷高的工作环境。

平行结构：该结构是由一个上部平台和一个下部固定底座组成，由六个或多个带有球形接头的四肢连接。

与横梁结构相比，并联结构基于运动学和几何学解析找到柔度矩阵。

图 12：横梁结构

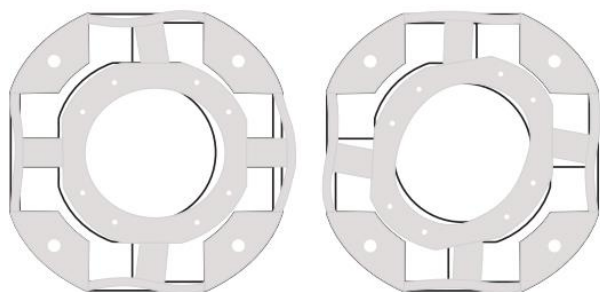
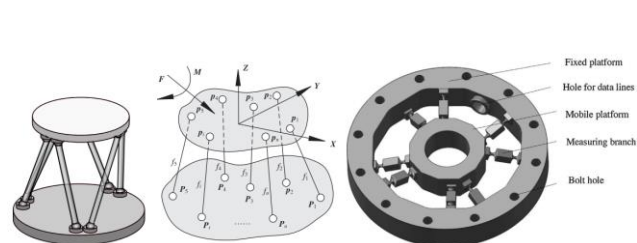


图 13：平行结构



数据来源：Six-Axis Force/Torque Sensors for Robotics Applications: A Review, 东北证券

数据来源：Six-Axis Force/Torque Sensors for Robotics Applications: A Review, 东北证券

2.1.3. 产品种类

力传感器的分类通常基于其工作原理、测量类型、输出信号、测力维数类型等因素。

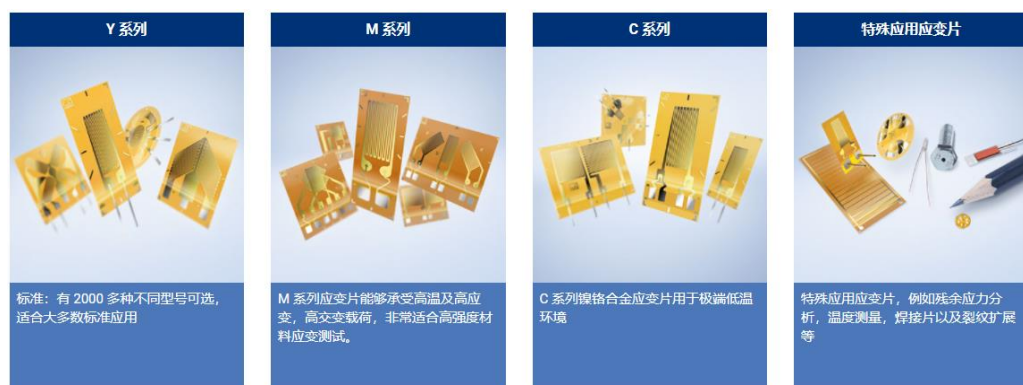
- **工作原理：**根据工作应用的物理原理的不同，分为应变式、压电式、电磁式、光纤式、容量式等。
- **测量类型：**可以分为压力传感器、拉力传感器、扭矩传感器等。
- **输出信号：**可以分为模拟输出力传感器和数字输出力传感器。
- **测力维数：**可以分为一至六维传感器，其中一维、三维和六维力传感器较为常用。

我们在这里重点介绍常用的应变式传感器和六维力传感器。

1) 应变式传感器

定义：核心零件是应变片，应变片通常由一薄薄的金属片或金属膜组成，能够精确地测量弹性体的微小变形。它通常被粘贴在弹性体的表面上，当弹性体发生变形时，应变片的电阻值会发生变化。

图 14：HBM 的应变片产品系列



数据来源：HBM 官网，东北证券

相较于其他传感器，应变片式因其精度高、宽量程以及快速响应等特点而被广泛采用，目前主要应用于各种工业和实验应用，例如桥梁和建筑物的结构监测，和机器部件的力学测试。

- **高精度：**应变片式压力传感器具有高度灵敏的测量能力，能够提供精确的压力测量结果。其可靠性和稳定性使其成为需要高精度测量的应用的理想选择。
- **宽量程：**应变片式压力传感器可根据具体应用的需要进行定制，具备较宽的压力量程范围。它可以适应从微小压力到高压力的广泛测量范围，满足不同应用的需求。
- **耐用性：**应变片式压力传感器通常采用高强度和耐腐蚀的材料制成，具备较高的耐久性和可靠性。它们能够在恶劣的工作环境下长时间稳定运行，并具有较长的使用寿命。
- **快速响应：**由于其结构简单、质量轻巧，应变片式压力传感器能够实现快速响应。它对于快速变化的压力信号具有良好的捕捉能力，适用于需要实时响应和控制的应用。
- **良好的线性性能：**应变片式压力传感器在一定范围内表现出较好的线性响应特性，使得其输出信号与输入压力之间存在良好的线性关系。这对于进行精确的压力测量和数据分析非常重要。

表 3：传感器对比

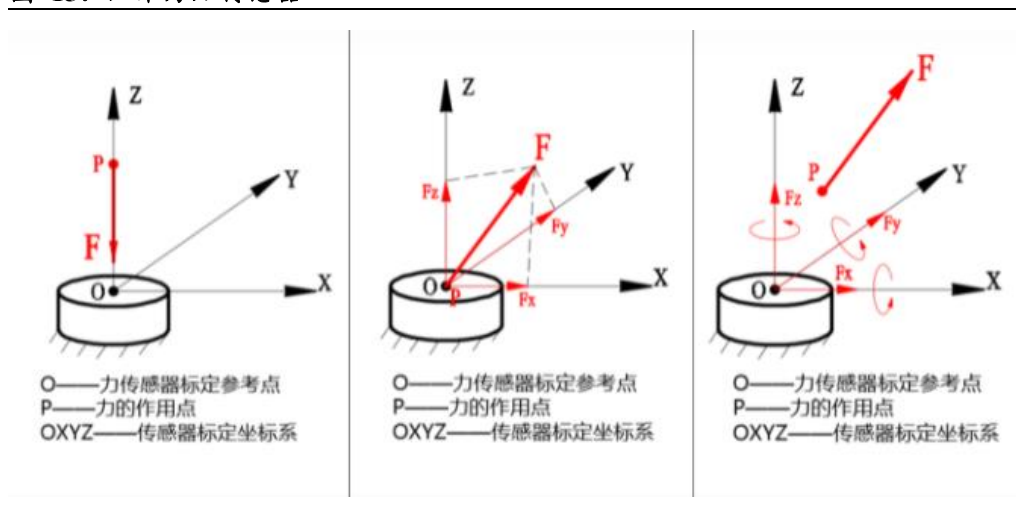
检测方式	基本原理	优点	缺点
应变式	在力/力矩作用下产生与之相应的电阻量的变化	精度高、技术成熟 测量范围广 频响特性好	存在非线性误差 信号输出微弱
电磁式	基于霍尔效应在力/力矩作用下产生与之相应的磁通量的变化	动态测量范围大 功耗小 系统简单可靠	非线性误差较大 互换性较差 分辨率不高
光电式	基于光电效应在力/力矩作用下产生与之相应的光学量的变化	可靠性高 测量范围广 动态响应好	价格昂贵 对测试环境要求高
电容式	在力/力矩作用下产生与之相应的电容变化量	高灵敏度和高分辨率 频率范围宽，结构简单 环境适用性强	调理电路复杂 寄生电容影响大
压电式	基于正压电效应在力/力矩作用下产生与之相应的电荷量的变化	动态响应好 精确性好和分辨率高 结构紧凑、尺寸小 刚度高	存在电荷泄露，静态力测量困难 分辨率不高

数据来源：众鑫自动化官网，东北证券

2) 六维力矩传感器

定义：能够同时测量三个正交方向上的力 (F_x, F_y, F_z) 和三个绕这些轴的力矩 (M_x, M_y, M_z)，可以理解为测量物体在三维空间中的三个平移度量 ($X、Y、Z$ 轴上的移动) 和三个旋转度量 (绕 $X、Y、Z$ 轴的旋转) 的传感器。它可以测量一个物体在空间中的所有可能运动，包括平移和旋转，因此也被称为六自由度 (6-DOF) 传感器。六维力传感器采用了先进的解耦算法，能够有效且精确地修正三个方向上的力和弯矩之间的耦合误差。由于能够消除弯矩对力测量的干扰，这使得六维力传感器在力的测量准确性方面，远超三维力传感器。

图 15：六维力矩传感器



数据来源：坤维科技，东北证券

相较于一维/三维，六维传感器具备测量精度高、结构紧凑、响应迅速等特点。

- **安装方便：**集成度高，将六个传感器合并为一个，简化了安装过程，仅需 4-8 颗螺丝钉即可固定，节省了安装时间。
- **同步性优越：**能够实时并且同步地测量六个方向的力和力矩，避免了由于时间差导致的测量误差，提高了测量的可靠性和准确性。

- **节省空间：**占用空间小，为在空间有限的场合进行高精度的多维度测量提供了可能。耦合误差低：高精度产品的耦合误差可以控制在 1%以内，即使是常规产品，耦合误差也能维持在 2%-5%之间，大大优于多个一维力传感器组合的方案。
- **多维度测量：**提供了全方位的力和力矩信息，对于需要综合分析物体在多个方向上的受力情况的应用场景具有重要价值。六维力传感器以其安装简便、高度同步、小空间占用、低耦合误差和多维度测量的能力，成为多个领域中理想的力和力矩测量工具。

2.2. 如何判别力传感器的好坏？

衡量传感器性能的指标有很多，包括灵敏度、精度、非线性误差、解耦误差等等。其中，以灵敏度、精度、工作频带和测量范围为核心指标度量。

灵敏度：灵敏度是指传感器在稳态工作情况下，输出量的变化量和输入量的变化量的比值。提高灵敏度，则与被测量变化相对应的输出信号才会更大，从而有利于后续信号处理。但灵敏度并非越高越好，因为随着灵敏度的提高，测量值中更多的引入了与测量值无关的周边量，相应的测量稳定性变差。

精度：传感器的精度性能指标指的是传感器的测量精度，理想的传感器应具有较好的精度性能。此外，因六维加速度传感器能够同时测量三维线加速度和三维角加速度，为了确定各通道间测量精度能力的差异性，需测量六维加速度传感器的精度各向同性指标。

工作频带：传感器的工作频带代表了传感器可测量信号的频率范围，理想的传感器应该具有足够宽的工作频带。其中，工作频带的下限受限于电荷放大器的下限截止频率，上限受限于传感器的固有频率，而且为了远离共振区的影响，一般传感器的上限频率取传感器固有频率的 1/3-1/5。

测量范围：传感器的测量范围主要受制于弹性球铰链的强度，即在测量范围内，要保证弹性球铰链不会因受交变的应力的作用而发生疲劳破坏。

2.3. 力传感器的技术壁垒有哪些？

从上述的传感器核心指标可以看出，精度是力传感器最为重要的衡量指标，它决定着机器人在运动控制过程中对作用力的感知和反馈能力。而影响精度的因素很多，较为重要且解决技术难度较高的主要是维间耦合和无效负载两个因素。

1) 维间耦合

问题：六维力传感器在加工装配完成后，理想情况下在只受到来自该维度力 / 力矩加载时，其余维度不会产生输出信号。然而，由于传感器自身结构以及加工误差等因素的影响，导致某一方的作用力都会对其余五个方向的输出信号产生影响，这就是维间耦合。由于耦合误差的存在，大大降低了传感器的测量精度，难以消除的维间耦合是影响传统力觉感知系统精度提高的主要因素，甚至引起机器人控制系统的误动作。

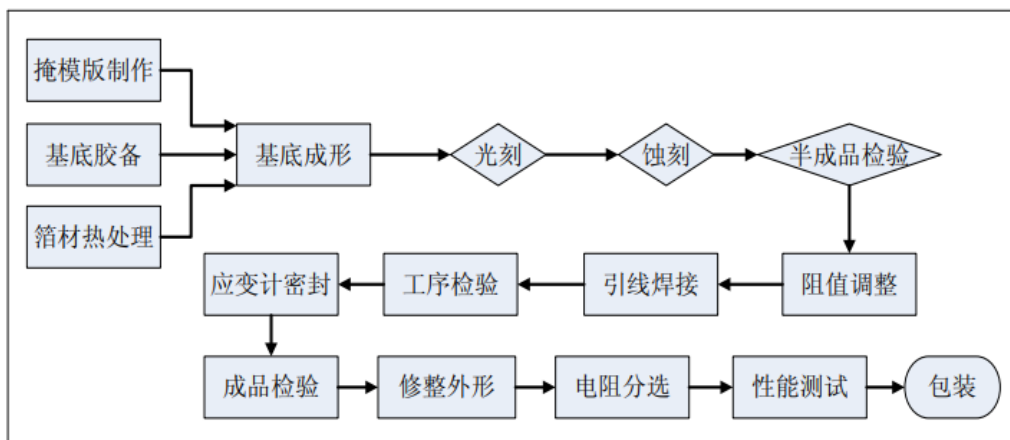
进一步而言，几乎所有传统机器人多维力传感器都存在不可消除的维间耦合，而且部分耦合还有非线性的特征。非线性的维间耦合，不仅表现为各力/力矩通道的输出电压-加载力/力矩呈现出非线性关系，而且各通道的维间耦合也不完全是线性的。可以说，在维间耦合中，非线性的维间耦合要比线性的更难处理，因此非线性的解耦也是目前力传感器的重要技术难点。

解决方案：现有的解耦方法主要包括结构解耦和软件解耦。前者从硬件入手，通过弹性体等核心部件的设计和制造优化，设法从根源上消除维间耦合，后者则是从软件入手，通过合适的解耦算法降低或消除耦合误差。简单来说，前者实现难度较大且制造成本高，后者则成本低且灵活性高。

- **结构解耦：**非线性耦合产生的主要原因之一就是机械加工存在误差和应变片的精确贴片位置难以保证。因此在生产制造过程中，优化应变片和弹性体的生产是从硬件端解耦的一大途径。

应变片的生产流程包括基底制作、涂胶光刻、阻值调整、引线焊接等、灵敏系数测定以及最终的贴片工序。其中较为重要的工序主要是开头和结尾，即开头的结构设计和刻图制版和结尾的灵敏系数测定以及贴片。

图 16：应变片的生产流程



数据来源：中航电测招股说明书，东北证券

生产：传统制造工艺中刻图制片、涂胶光刻、基底制作、粗细腐蚀、阻值调整、引线焊接、涂复盖层、质量检查等工序多为手工操作和控制，人为的因素对产品质量影响很大，而且应变计成功率低，均一性差。

而美国 VMM 公司和德国 HBM 公司的应变计生产工艺，自动化程度都很高，几乎每道工序都采用计算机自动控制和处理。关键工序如基底制作、光刻腐蚀、精细调阻，引线焊接、质量检测等都在自动化程度很高的专用设备上进行，制造工艺的可重复性好，工艺兑现率高。因此应变计的各项技术指标优良，一致性和稳定性好，批次产品质量几乎无差别。

灵敏系数：灵敏系数是电阻应变计的重要参数，许多生产厂家都采用等应力悬臂梁进行测试，其结果是灵敏系数分散大，准确度低。因此灵敏系数对厂商的自动加载测量装置有着较高的要求。

贴片：对于一般的传感器，比如一维力传感器等基本可以实现自动化贴片，但是由于六维力传感器的应变片数量较多且体积较小，当前的自动贴片机无法完成这一任务，因此大部分依然是通过人工手动贴片。贴片工艺的差异，会导致同一批次产品性能和质量也有差异，厂商只能通过后期的校准进行弥补。因此，从这个角度来看，贴片工艺这一难点不会成为厂商竞争的“硬约束”。

总结以上三个核心步骤，可以发现，目前在应变片的生产 and 组装流程中，造成厂商之间产品差异的主要在于应变片的前道生产工序。

图 17：中航电测的应变片参数

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（℃）	-30 ~ +80		-50 ~ +150
温度自补偿系数	9、11、16、23、27	9、11、16、23、27、M23	9、11、16、23、27

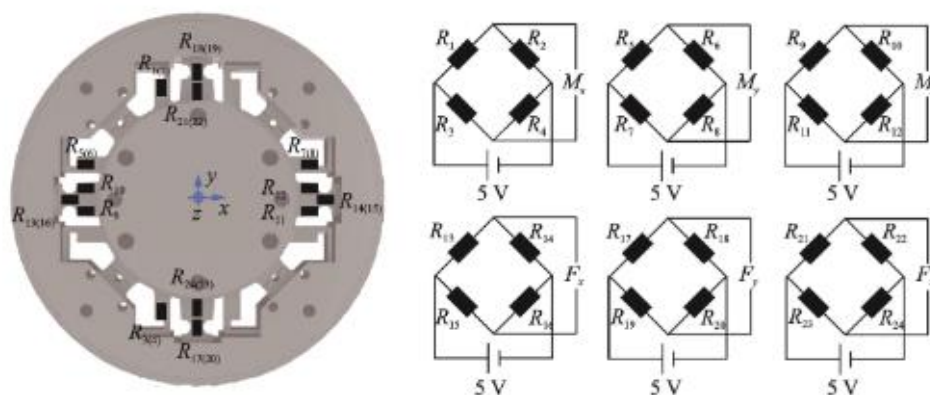
数据来源：中航电测官网，东北证券

弹性体：对于电阻应变片式测力传感器来说，弹性体结构形状与相关尺寸对测力传感器性能影响极大。可以说，测力传感器性能主要取决于其弹性体形状及相关尺寸。测力传感器弹性体设计不合理，弹性体加工精度多高、粘贴电阻应变片品质多好，测力传感器都难以达到较高测力性能。测力传感器设计过程中，对弹性体进行合理设计至关重要。

一般说来，普通机械零件和构件只须满足足够大安全系数下强度和刚度即可，对受力条件下零件或构件上应力分布情况不必严格要求。而对于弹性体来说，需要满足机械强度和刚度要求以外，必须保证弹性体上粘贴电阻应变片部位应力与弹性体承受载荷保持严格对应关系；同时，提高测力传感器测力灵敏度，还应使贴片部位达到较高应力水平。

由此可见，弹性体设计过程中必须满足以下两项要求：1）贴片部位应力（应变）应与被测力保持严格对应关系；2）贴片部位应具有较高应力（应变）水平。

图 18：应变片贴片图



数据来源：《一种低耦合高精度六维力传感器设计及应用》，东北证券

- **软件解耦：**软件解耦会用到解耦算法，所谓的解耦算法，实质上是求取广义力向量和传感器输出信号之间精确的函数关系，以实现对各维力的准确测量。由

于六维力矩传感器内部的弹性体结构较为复杂，存在众多因素影响传感器的实际静态特性和理论值之间存在一定的误差，因此通过采用静态标定实验的方法来获得传感器真实的静态特性。

进一步而言，静态解耦算法包括线性解耦和非线性解耦（区别在于认定传感器系统是线性还是非线性），前者应用已经较为广泛，但精度不高。而实际上传感器输出的波形较为复杂，并呈现非线性，因此非线性算法解耦是当前的一大难点。

- a) **线性解耦**：目前针对线性耦合误差的算法较为成熟，一般会使用克拉默法则或最小二乘法。当传感器标定数据线性度较好时，一般会采用这两种方法进行解耦，其解耦效率高，且结果较为准确。
- b) **非线性解耦**：目前学界研究出多种非线性解耦算法，包括 BP (Back Propagation) 神经网络、RBF(Radial Basis Function, 径向基函数) 神经网络、支持向量机、遗传算法等。

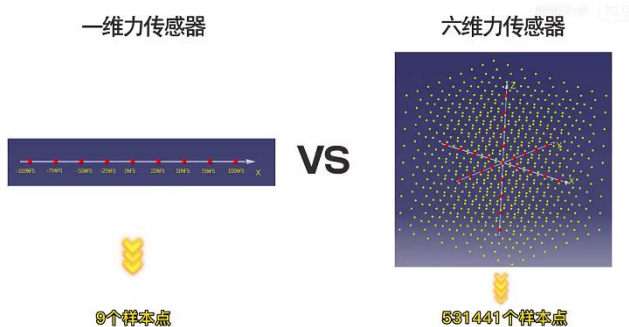
而无论是进行线性解耦还是非线性解耦，在解耦前都需要利用标定装置进行标定和检测，并利用标定数据求解标定矩阵。因此，标定装置的性能决定了标定数据的准确性，为后续高精度解耦奠定了基础。

- **标定**：通过对六维样本空间中的样本点进行精确加载，建立传感器信号与力和力矩的映射关系，获得解耦算法的数学模型和参数。标定是获得传感器的固定参数。
- **检测**：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。检测是衡量标定的效果。

标定和检测都需要用到标定装置进行，在现有的标定装置中，六维联合加载设备是十分重要且稀缺的标定装置之一。六维联合加载设备可以对力传感器实现正交三方向力和力矩的同时精准加载，只有在传感器的标定和检测过程中，用这种六维联合加载的方式才能实现 0.5%FS 以内的准度。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备条件

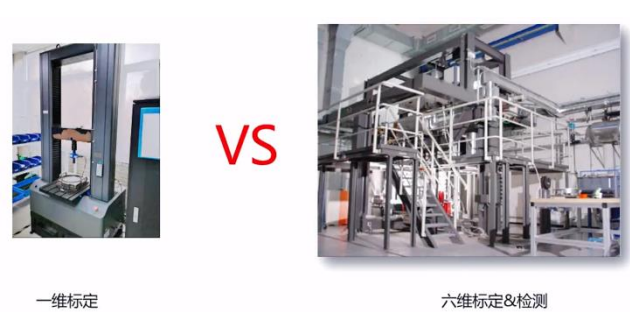
六维联合加载设备的研发涉及到空间光学定位、载荷位移补偿、机电一体化等多项综合技术，有上百个 Know How，非常依赖工程经验。一旦某个细节考虑不周全，加载效果就会不理想，加载设备自己产生的耦合误差可能超过 1%FS，这势必无法标定出高准度的六维力传感器。值得一提的是，由于目前还没有标准产品可以直接采购，所以该设备一般由六维力传感器的厂商自行研制。因此，六维联合加载设备是目前构成市场上六维力传感器差异的核心原因之一，也是设计和生产六维力传感器的重要技术门槛。

图 19：六维传感器的标定工作量远大于一维



数据来源：坤维科技，东北证券

图 20：六维联合加载设备的要求远高于二维



数据来源：坤维科技，东北证券

2) 无效负载

问题：影响传感器精度的第二个因素是无效负载。无效负载是指在传感器读数中，除了真实施加的有效负载力外存在的额外负载，无效负载会导致传感器的实际读数和真实读数发生偏离。一般而言，造成无效负载的因素有二：

- 一是传感器以及整个机器人关节自身的重力会对读数产生影响；
- 二是在没有任何外力作用下，环境（比如温度、振动、压力和湿度等）造成的传感器输出值的基准值（即零点）发生漂移，也就是所谓的零漂。

在实际的测量应用中，传感器的初始读数为机器人通电时的零点和工具的重力之和构成，因此初始读数的准确性是非常重要的，毕竟误差会导致最终结果的不准确，最终影响机器人对作用力的信息反馈。因此重力实时补偿与传感器零点处理是较为重要的处理步骤。

解决方案：对于工具重力负载，目前一般可通过算法解耦。而对于零点漂移而言，产生零点漂移的原因很多，任何元件参数的变化(包括电压源电压的波动)，都将造成输出电压漂移。实践证明，温度变化是产生零点漂移的主要原因，也是最难克服的因素。这是由于半导体元器件的导电性对温度非常敏感，而温度又很难维持恒定。对于一般的传感器而言，可通过温度补偿（用另外一个元器件的温漂来抵消电路的漂移）、差动式放大电路等方法抑制零漂问题。

但六维力传感器零点温度漂移与一般传感器不同，其关键是六维力传感器是一种复杂结构，任一部分温度分布不均或温度梯度不对称，均会产生热应力使某些桥路输出变化。加工引起的不对称性对温度漂移影响很大，因此需要从弹性体等核心部件的设计和生产过程入手，通过硬件端的优化抑制零漂。对于六维力矩传感器而言，抑制零漂对弹性体的制造工艺同样有着较高要求。

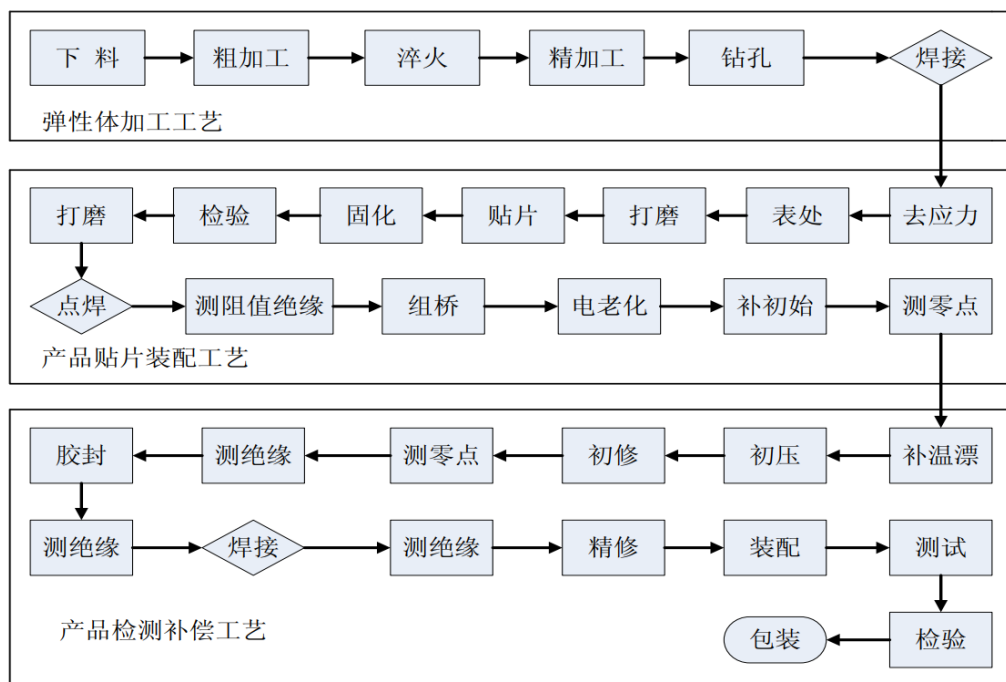
3. 力传感器的产业链剖析

3.1. 传感器产业链

从传感器的生产工艺流程可以看出，弹性体的制造加工和应变片的生产组装是两个较为重要的步骤。

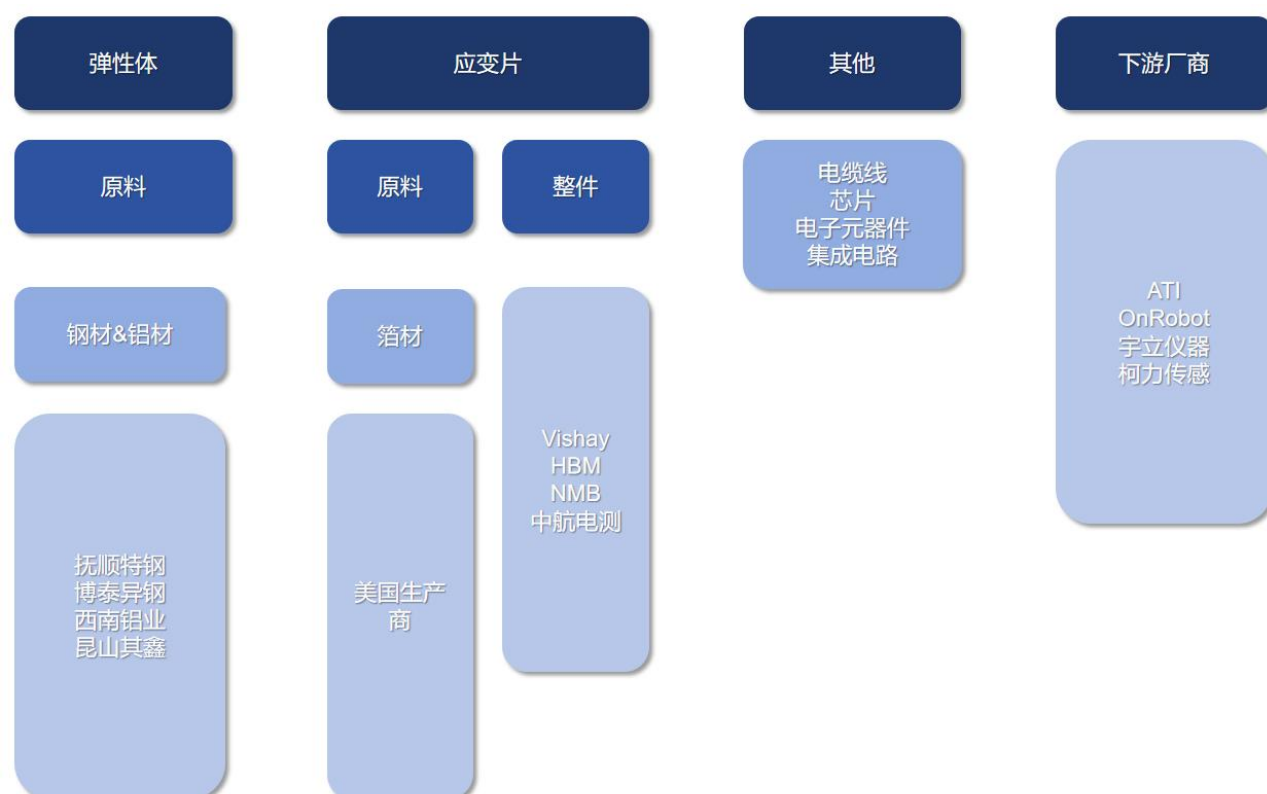
- 首先是应变片的生产。应变片涉及到的原材料包括钢材、铝材、箔材、电线电缆等，其中钢材、铝材以及电线电缆基本能实现国内采购，但是箔材基于材料的特殊性，现在仍然以进口为主。
- 其次是弹性体的制造。一般由传感器厂商采购上游钢材或铝材，按照传感器设计，将材料进行机械加工，成为满足应变测试用的弹性元件。因此，弹性体的供应商一般是传感器厂商。

图 21：应变片式传感器的生产工艺流程



数据来源：中航电测招股说明书，东北证券

图 22：传感器产业链



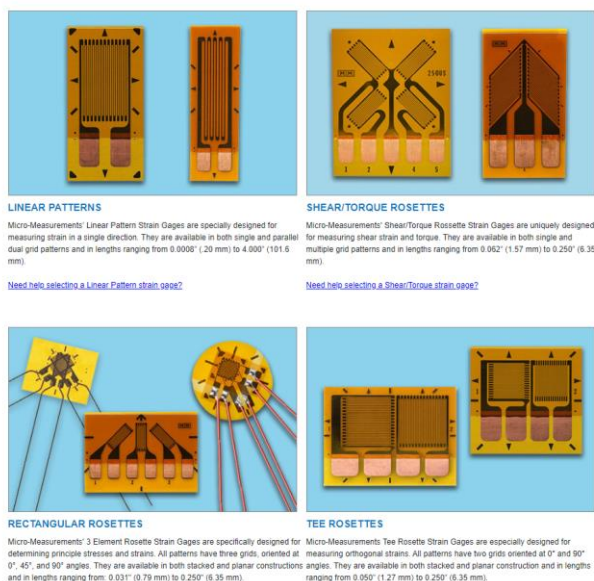
数据来源：中航电磁招股书，柯力传感招股书，东北证券

3.2. 应变片生产环节

国外应变片生产技术较为领先，其中以美国 Vishay、德国 HBM、日本的 NMB 为代表性企业。国内厂商方面，中航电测是我国综合实力、产品品类相对较强的应变片生产厂商，但在产品精度等性能方面与国际水平仍然有一定差异。

Vishay: 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。是国际公认的电阻箔技术、传感器和基于传感器的适用于特定工业应用系统方案的制造商。作为其四大运营事业部之一，Micro-Measurements (MM) 致力于开发、生产和销售高精度应变测量产品，提供 Advanced Sensors(AS 应变片)、应力分析应变片和应变式传感器、应变片安装附件等。

图 23: Vishay 应变片产品种类



数据来源：Vishay MM 官网，东北证券

图 24: Vishay 部分产品销售情况

[illegible]

数据来源：立创商城，东北证券

HBM: 公司成立于 1950 年，公司总部位于德国达姆斯达特市，公司的创办人霍丁格先生是世界上应变测量的先驱之一。当前有 3 个生产基地以及遍布全世界范围内 30 多个销售代理机构的跨国公司。公司的主要客户遍布全球，世界上很多著名的衡器及测量方面的公司都与公司有密切的合作关系。HBM 产品范围涵盖传感器、应变片、放大器、数据采集系统以及用于结构耐久性测试和分析的软件。

作为全球领先的应变片制造商，HBM 的应变片种类繁多，适合多种不同的应力测试测量应用，有超过 6000 种应变片可供选择。HBM 有超过 65 年的应变片设计和制造经验。

图 25: HBM 应变片产品种类



数据来源：HBM 官网，东北证券

NMB: 成立于 1951 年，总部位于日本东京，多年来美蓓亚已经形成了模具、轴承、电脑配件、精密电机、应变计、应变式传感器等多类产品系列。于 1994 年在中国投资设立了第一个独资生产基地--上海美蓓亚精密机电有限公司，截止至 2023 年 3 月，美蓓亚三美已在上海、苏州、珠海、青岛等地拥有了 16 家工厂和 2 个技术中心，销

售分支机构遍布 17 个城市。2022 财年中国地区营业额 2259 亿日元，占集团总营业额 17.5%。

图 26：NMB 的应变片产品参数

型号	电阻值 [Ω]	标距 [mm]	底座尺寸 (Y) [mm]	底座尺寸 (φ) [mm]	图案尺寸 (X) [mm]	图案尺寸 [mm]
J-02-12C0T**	120	0.2	2	0	1.3	1
J-05-12D0T**	120	0.5	2.5	0	1.4	1.6
J-1-12F0T**	120	1	2.5	0	2.2	1.6
J-2-12D0T**	120	2	3.6	0	3.8	2
J-3-12D5T**	120	3	4.7	0	5.2	3
J-4-12D0T**	120	4	3.5	0	5.6	2
J-5-12D0T**	120	5	3	0	7.5	1.8
J-8-12D0T**	120	8	6	0	11	3.3
J-1-35F0T**	350	0.8	2.5	0	2.1	1.6
J-2B35D0T**	350	2	3.5	0	3.6	2.6
J-5-35F0T**	350	5	3.5	0	6.9	2.4

数据来源：NMB 官网，东北证券

中航电测：公司在国内起步早、起点高，从事电测产品已有三十多年的历史，具有国际水平的设计能力、接近国际水平的工艺装备及工艺制造技术，常温电阻应变计技术指标已达到世界水平。公司具有应变计、传感器、系统结构、数据采集、信号处理、产品加工、特种工艺等一系列研发、设计及生产技术。

- **箔材热处理技术：**公司的箔材热处理技术为自主研发，通过对热处理炉的结构改造，提高了炉腔内温度场均匀性和箔材性能的一致性，降低了应变计热输出的分散。加强处理炉的密封性，保证高温下处理箔材不受影响；采用了进口的温度控制仪，保温温度精度在±0.1℃。
- **不锈钢传感器制造技术及负滞后应变计制作技术：**除美国 Vishay 测量集团及德国 HBM 公司外，公司为国内本土唯一可以批量生产高性能不锈钢传感器（采用沉淀硬化型不锈钢为原料）的企业。
- **ZTC（温度零点）、STC（温度灵敏度）补偿技术：**ZTC、STC 是传感器温度性能的主要指标，该性能的检测、补偿需要较高的温度基准、力值基准、以及稳定的检测作保证，公司的这些基准在同行业中属于领先水平。
- **贴片技术：**目前公司所掌握的贴片技术主要的工艺参数，已经固化到批量生产工艺中，批量生产的传感器已完全具备 OIMLC3 级的能力，小批量可以达到 C4 级的能力。

图 27：中航电测的应变片产品参数**BYM 系列**

- 采用康铜箔和特种聚酰亚胺薄膜层压而成，全密封结构，具有温度自补偿和蠕变自补偿功能；
- 剥离强度高，基底刚性强，收缩率低，具有良好的蠕变一致性、重复性；回零、滞后性能优异；
- 耐候性、耐湿性能力强，有良好的阻值稳定性和可靠性；
- 动态响应性能好；
- 基底具有一定的韧性；
- 适用于 C3 及以上级别高精度传感器。

BKM 系列

- 采用康铜箔和特种 PEEK 薄膜层压而成，全密封结构，具有温度自补偿和蠕变自补偿功能；
- 具有极低的吸湿率和较好的抗湿热能力；
- 蠕变、回零性能优良；
- 基底具有一定的韧性；
- 适用于 C3 及以上级别高精度传感器。

ZYM 系列

- 采用伊文箔和特种聚酰亚胺薄膜层压而成，全密封结构，具有温度自补偿和蠕变自补偿功能；
- 特性与 BYM 系列产品相似，可实现大阻值、小尺寸应变计制造，也可实现高阻、低功耗产品制作；
- 可提供焊盘镀铜产品，提升焊接可靠性和稳定性；
- 适用于 C3 及以上级别高精度传感器

数据来源：中航电测官网，东北证券

3.3. 传感器制造环节

六维力矩传感器从应变片生产、弹性体设计、参数标定等一系列环节都需要较高的技术工艺，国外比如 ATI、OnRobot 等在该行业已经深耕多年，能够实现大量程、高精度、高准度等性能优势，而我国在该领域起步较晚，当前正积极入局的包括宇立、柯力等国内优秀企业。

ATI：美国 ATI Industrial Automation 是全球范围内优质机器人零部件供应商，专门从事制造用于工业自动化和机器人的高性能产品。ATI 公司在全球范围内为工业自动化、机器人以及相关领域提供了一系列的解决方案。它们为不同类型的制造和自动化应用设计并生产多种传感器和附件。ATI 专注于机器人零部件的开发与制造，核心产品涵盖：多维力传感器、顺从性介质连接器、伺服驱动设备、材料去除工具以及机器人防碰撞传感器等。这些产品广泛应用于机器人、航空航天、生物医药、自动化、电子产业、学术研究和核工程等多个领域。特别是在力/力矩传感器方面，ATI 的产品被认为处于业界领先，用于测量和分析机器人和其他工业自动化设备的力和力矩，帮助提高制造过程的精度、效率和安全性。在 2021 年 ATI 被 Novanta 公司以 2.24 亿美元的价格收购。

ATI 在全球六维力传感器市场中以其广泛的产品系列和高性能保持领先地位。在 2022 年，公司的营业收入达到约 5280 万美元。ATI 目前提供的六维力传感器产品有：Axia 系列、Nano 系列、Mini 系列、Gamma 系列、Delta 系列和 Omega 系列等，同时提供根据客户需求的定制服务。这些产品的量程从 32N 到 40000N，3Nm 到 6000Nm，能够满足大部分六维力传感器的应用需求。

图 28：ATI 产品矩阵及参数

Model	最大值 Fx, Fy	最大值 Fz	最大值 Tx, Ty	重量	直径	高度
Axia80-M8	150 N	470 N	8 Nm	0.28 kg	82 mm	25.4 mm
Axia80-M20	500 N	900 N	20 Nm	0.3 kg	82 mm	25.4 mm
Axia90-M50	1000 N	2000 N	50 Nm	0.78 kg	89.9 mm	26.9 mm
Axia80-M50	1200 N	2000 N	50 Nm	0.68 kg	82 mm	25.4 mm
Axia130-M125	2000 N	4000 N	125 Nm	0.86 kg	130 mm	39.2 mm
Axia130-M300	4000 N	6000 N	300 Nm	1.88 kg	130 mm	39.2 mm
Nano17 Titanium	32 N	56.4 N	200 Nmm	0.0101 kg	17 mm	14.5 mm
Nano17	50 N	70 N	500 Nmm	0.00907 kg	17 mm	14.5 mm
Nano17 IP65/IP68	50 N	70 N	500 Nmm	0.0408 kg	20.1 mm	22.2 mm
Nano25	250 N	1000 N	6 Nm	0.0634 kg	25 mm	21.6 mm
Nano25 IP65/IP68	250 N	1000 N	6 Nm	0.136 kg	28 mm	27.5 mm
Nano43	36 N	36 N	500 Nmm	0.0387 kg	43 mm	11.5 mm
Mini27 Titanium	80 N	160 N	4 Nm	0.0334 kg	27 mm	18.2 mm
Mini40	80 N	240 N	4 Nm	0.0499 kg	40 mm	12.2 mm
Mini40 IP65/IP68	80 N	240 N	4 Nm	0.272 kg	53.3 mm	21.1 mm
Mini43LP	250 N	250 N	3 Nm	0.0512 kg	43 mm	7.9 mm
Mini45 Titanium	240 N	480 N	12 Nm	0.0998 kg	45 mm	17.5 mm
Mini45	580 N	1160 N	20 Nm	0.0917 kg	45 mm	15.7 mm
Mini45 IP65/IP68	580 N	1160 N	20 Nm	0.391 kg	57.9 mm	25.1 mm
Mini58	2800 N	6800 N	120 Nm	0.345 kg	58 mm	30 mm
Mini58 IP60	2800 N	6800 N	120 Nm	0.522 kg	82 mm	36.2 mm
Mini58 IP65/IP68	2800 N	6800 N	120 Nm	0.804 kg	65.4 mm	37.6 mm
Mini85	1900 N	3800 N	80 Nm	0.635 kg	85.1 mm	29.8 mm
Gamma	130 N	400 N	10 Nm	0.255 kg	75.4 mm	33.3 mm
Gamma IP60	130 N	400 N	10 Nm	0.467 kg	99.1 mm	39.6 mm
Gamma IP65	130 N	400 N	10 Nm	1.09 kg	111 mm	52.3 mm
Gamma IP68	130 N	400 N	10 Nm	1.98 kg	111 mm	52.3 mm
Delta	660 N	1980 N	60 Nm	0.913 kg	94.5 mm	33.3 mm
Delta IP60	660 N	1980 N	60 Nm	1.81 kg	117 mm	47.1 mm
Delta IP65	660 N	1980 N	60 Nm	1.77 kg	126 mm	52.2 mm
Delta IP68	660 N	1980 N	60 Nm	2.63 kg	102 mm	52.2 mm
Omega85	1900 N	3800 N	80 Nm	0.658 kg	85.1 mm	33.4 mm
Omega85 IP65/IP68	1900 N	3800 N	80 Nm	1.91 kg	92.7 mm	38.7 mm
Omega160	2500 N	6250 N	400 Nm	2.72 kg	157 mm	55.9 mm
Omega160 IP60	2500 N	6250 N	400 Nm	7.67 kg	194 mm	57.7 mm
Omega160 IP65/IP68	2500 N	6250 N	400 Nm	7.26 kg	165 mm	65.9 mm
Omega191	7200 N	18000 N	1400 Nm	9.41 kg	190 mm	64 mm
Omega191 IP60	7200 N	18000 N	1400 Nm	14.1 kg	238 mm	73.7 mm
Omega191 IP65/IP68	7200 N	18000 N	1400 Nm	13.2 kg	204 mm	74.8 mm
Omega250 IP60	16000 N	32000 N	2000 Nm	31.8 kg	295 mm	94.9 mm
Omega250 IP65/IP68	16000 N	32000 N	2000 Nm	31.8 kg	295 mm	94.9 mm
Omega331	40 kN	88 kN	6 kNm	47 kg	330 mm	107 mm

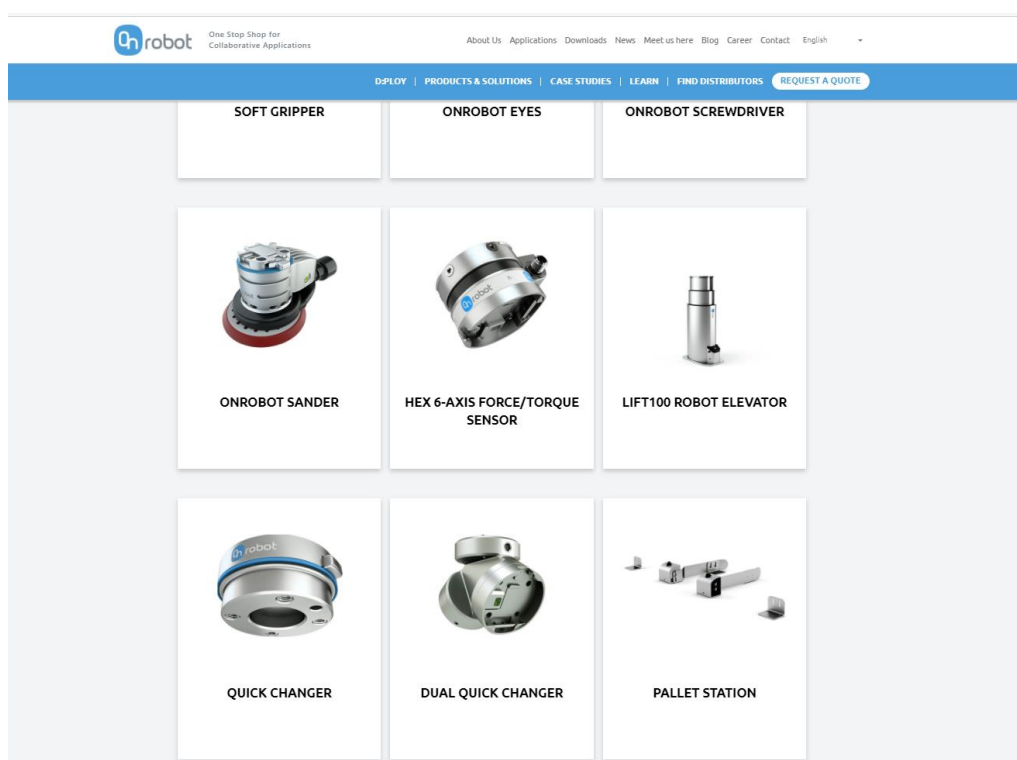
数据来源：ATI 官网，东北证券

OnRobot: 丹麦 OnRobot 是机器人末端执行器和协作机器人配件行业中国际龙头企业, 主要专注于开发和制造先进的机器人末端执行器(End-of-Arm Tooling, EOAT), 为工业自动化领域提供解决方案。由四家专业的机器人技术公司合并而成, 这四家公司分别是 Perception Robotics (专门生产机器夹爪), OptoForce (专门生产机器人力/扭矩传感器), On Robot (专门生产电动夹持器) 和 Purple Robotics (专门生产双真空夹持器)。OnRobot 致力于推动协作机器人技术的发展, 其产品设计旨在使机器人更加智能、灵活, 并易于使用。OnRobot 提供的产品主要包括各种类型的机器人夹具、传感器和软件等。这些产品应用于多个领域, 如包装、装配、材料搬运和机器上下料等。OnRobot 还提供软件解决方案, 以使用户更加直观和便捷地进行机器人编程和控制。

OnRobot 提供一系列完整的产品, 为工业机器人提供多样化的工具和软件解决方案, 满足了机器人在不同应用场景中的需求。公司的产品谱系极为丰富, 包括: 电动夹爪、真空夹爪、磁性夹爪、Gecko 夹持技术、力/扭矩传感器、2.5D 视觉系统、电动螺丝刀、砂光机和工具更换器等。这些产品被广泛应用于各种工业环境和场合, 如机床管理、材料搬运、材料去除、质量检测 and 机械装配等领域, 展现了其多样性和

实用性。通过提供这些先进的工具和软件，OnRobot 强化了工业机器人的功能性和灵活性，使之能更好地适应和满足各种工业应用的需求。

图 29：公司传感器产品



数据来源：OnRobot 官网，东北证券

柯力传感：柯力传感自 1995 年成立以来，一直致力于应变式传感器、仪表和物联网系统等领域的研发、制造和销售，是一家国家级重点高新技术企业，是国内最重要的称重元件制造和销售企业之一。作为国内应变式传感器的领军企业，公司的主营业务涵盖了应变式传感器、仪表的研制、生产和销售，以及系统集成和各种先进系统和服务的提供，如不停车检测系统、无人值守一卡通智能称重系统、制造业人工智能系统、企业数字化建设软件开发服务、移动资产管理系统和物流分拣系统等。

柯力传感在应变式传感器领域的深耕让其市场份额达到 25%。柯力传感连续 14 年保持国内称重传感器市场的第一的地位。作为国内应变式传感器的龙头企业，以其强大的研发实力、先进的技术水平和庞大的生产规模，在国内市场中占有约 25% 的市场份额。公司目前多维力系列产品仍处于研发和小批量试制阶段。柯力传感在深圳成立了专门的机器人传感器事业部，专注于开发多维力传感器，如三维和六维力传感器。这些传感器可以应用于多个领域，包括机器手臂的运动和工作载荷监测、曲面研磨抛光、加工中心精雕加工和医疗设备精密测控，且具备高精度、高灵敏度、强抗偏载能力和小维间耦合等优势。尽管这些多维力系列产品目前还处于小批量试制阶段，但公司正基于现有的高端力学传感器，如微型、扭矩和多维力传感器，加快研发速度，并积极寻找与各大机器人制造商的合作机会。

图 30：公司的应变式传感器

 你的当前位置：网站首页 -> 产品展示 -> 应变式传感器

	钢制传感器	· 汽车衡传感器 专业的汽车衡称重方案，适合国内外各种规格的高精度汽车衡，种类齐全，可靠稳定，性价比比高。 · 平台秤传感器 结构优良、安装方便，精度高、互换性好。 · 轨道传感器 适用于高精度动静轨道检测，形式包括整车式、断轨式、垫轨式、塞入式等。 · 料罐传感器 多样化的料仓方案，具有精度高、量程范围广、高度低等优点。 · 实验机系列 用于各类实验测力设备，安装形式多样 · 天车传感器 安装于在天车起重设备上的一种传感器，种类齐全，符合各项国家标准。 · 安全限制传感器 用于各类超载安全保护的传感器，抗冲击力好，种类齐全，安全可靠。 · 车载传感器 用于车辆改装，过程的控制和监控重量 · 叉车传感器 用于叉车改装，过程的控制和监控重量 · 拉式传感器 配套市场上的各种拉式测力设备，具有线性精度高，重复性好，长期稳定。 · 公路计重传感器 对车辆轴重进行测量，广泛用于公路过往车辆进行超限检测、粗略计重等 · 轮轴识别器传感器 用于公路场合，对车辆的轴型、胎型进行识别 · 纺织张力传感器 用于纺织厂设备，检测织布张力等 · 扭矩传感器 检测设备工作的扭矩，尺寸、量程定制 · 非标传感器 各类非标钢制应变式传感器，支持定制
	铝制传感器	· 平台秤传感器 适用于各种台面尺寸的电子台秤以及各种工业称重系统等 · 非标定制传感器 各类非标铝制应变式传感器，支持定制

数据来源：柯力传感官网，东北证券

宇立仪器：由原美国 FTSS 的总工程师黄约博士创建的公司，是全球知名企业 ABB 的战略供应商，其产品被世界各地的机器人广泛使用。宇立在机器人打磨、组装以及力控产品方面享有国际声誉。美敦力 (Medtronic) 所生产的腹部手术机器人采用了宇立的传感器，意味着宇立的产品已经符合医疗设备生产的高标准。作为全球领先的六轴力传感器供应商，宇立的产品广泛应用于多个领域，包括机器人与自动化、汽车碰撞测试、汽车耐久测试、生物力学和通用试验设备。

目前宇立已建设了 4500 平米的生产基地，拥有完善的生产体系，包括机械加工、洁净传感器生产、组装和测试车间。宇立仪器起初主要从事汽车碰撞假人领域的研发与生产，打破了国外品牌的垄断，逐渐发展成为一个集研发、生产为一体的高科技企业。与 ABB、库卡、安川、富士康等国际顶级机器人企业建立了合作关系，客户涵盖了汽车安全、汽车耐久、机器人自动化和医疗等多个领域。其主要产品包括多轴力传感器，例如六维力传感器、三维力传感器、一维力传感器和关节扭矩传感器，力控打磨设备如 iGrinder 智能浮动力控和一套完整的机器人智能打磨设备，以及汽车测试设备，如汽车耐久测试力传感器、汽车碰撞假人力传感器、碰撞力墙和辅助驾驶测试系统 ADAS。

图 31：公司的产品矩阵



数据来源：宇立官网，东北证券

图 32：公司合作伙伴



数据来源：宇立官网，东北证券

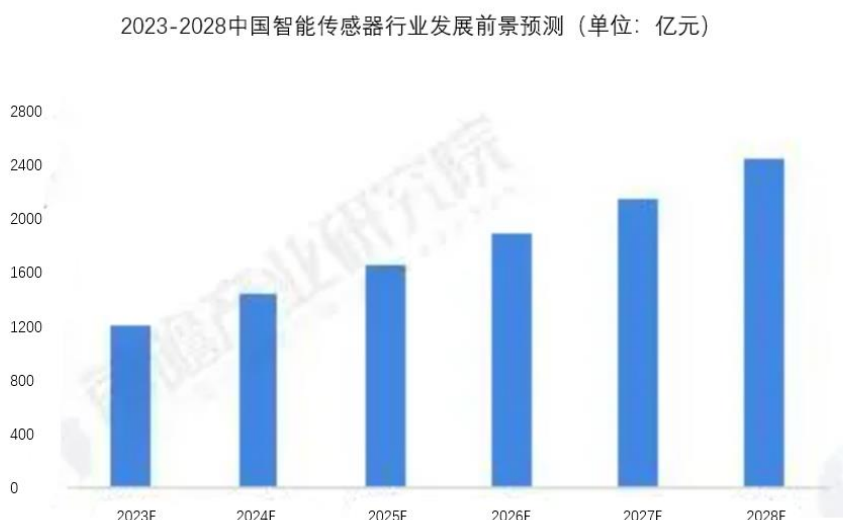
4. 千亿市场规模，有望受益人形机器人爆发

4.1. 市场规模

当前六维力传感器市场规模尚小，但未来有极大的成长潜力。2019 年全球力传感器市场价值为 18 亿美元，预计到 2025 年将达到 25.3 亿美元，在 2020-2025 年的预测期内复合年增长率为 5.9%。根据高工机器人产业研究所（GGII）的数据，2022 年中国市场六维力/力矩传感器销量达到 8360 套。假设六维力传感器销售均价为 2 万元，则 2022 年中国六维力传感器市场规模约为 1.7 亿元。

从总体出货量观察，目前六维力/力矩传感器市场的基数仍然较小，还未形成显著的规模效应。但随着更多的参与者加入以及下游细分市场的认知不断提高，六维力/力矩传感器市场有望经历快速的发展期。在此期间预计会出现多个技术路线的发展，产品矩阵的完善，产品成本的减少，以及国产化率的提升。

图 33：中国智能传感器市场



数据来源：中商情报网，东北证券

4.2. 人形机器人 0-1 爆发，带来未来巨大新增需求

如我们在《人形机器人专题（上篇）》所提到，机器人以其卓越的性能优势，正在逐渐替代某些传统工业机器人的角色。尽管传统工业机器人已能满足工业制造中的大多数需求，但人形机器人能够填补其无法触及的领域，主要是那些需要更高灵活性的工种。例如，在搬运、焊接、组装、检测等多个应用场景中，传统机器人的应用受到其可移动性差和安装条件高的限制，特别是在需要高度灵活性和特定长尾需求的场合，其表现尤为不足。这些传统形态的工业机器人，尽管可进行功能开发来满足特定需求，但需经过专业人员的编程、测试和开发，整个流程缺乏灵活性。与此同时，尽管协助机器人易于操作和编程，却只适用于简单任务，并且由于属于轻量级，其负载能力有限。综上所述，传统机器人在灵活性和易用性方面存在明显短板，难以满足一些特定和灵活性要求较高的工业需求。

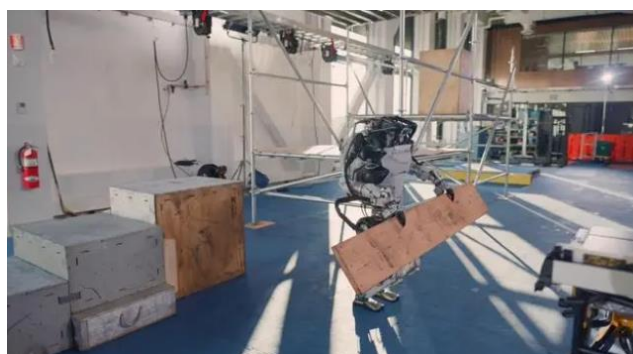
人形机器人将成为传统工业机器人不可或缺的补充，他们的主要优势体现在出类拔萃的灵活性和移动能力。与人类一样，他们可以迅速并灵活地在各种工厂场景中移动，能够在任务执行中通过大模型训练迭代，实现自主决策，以针对各种工作和场景做出实时反馈。借助更高级别的自主决策能力和超越的移动性，人形机器人能够有效地弥补传统工业机器人的缺陷，并可以替代一些原本由人执行的任务，展现在工业环境中的应用潜力巨大。

图 34：特斯拉 Optimus 在工厂展示分拣工作



数据来源：特斯拉官网，东北证券

图 35：波士顿动力 Atlas 根据指令在工厂中灵活执行任务



数据来源：波士顿动力官网，东北证券

由于成本优势，机器人有潜力部分取代人力。尤其在劳动力成本高昂的海外市场，机器人代替人工的经济效益变得更加明显。以美国为例，除了基本薪酬外，劳动成本还包括税费、福利、保险、培训费用和由于法律法规风险可能产生的潜在成本。基于简单的成本对比，即使在机器人的价格和运行成本都计入考虑，其运行成本仍然远远低于人力成本。因此，尽管不可能完全取代人力，机器人的经济性和效率仍将推动它在某些领域替代传统劳动力，尤其是在那些价值不高的职位上。这反映了机器人在未来工业场景中替代传统劳动力的巨大潜力和价值。

因此，随着人形机器人产业的 0-1 爆发放量，我们认为，六维传感器作为机器人的重要零部件，将充分受益。

表 4：工业领域的人形机器人需求预测

	2022E	2023E	2024E	2025E	2026E	2027E	2028E	2029E	2030E
替代传统工业机器人									
工业机器人保有量（万台）	382.5	420.7	462.8	509.1	560.0	616.0	677.6	745.4	819.9
yoy	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%
渗透率			0.3%	1.0%	5.0%	10.0%	20.0%	25.0%	30.0%
人形机器人需求量（万台）			1.2	5.1	28.0	61.6	135.5	186.3	246.0
yoy			340%	450%	120%	120%	38%	32%	
替代人类劳动力									
劳动力数量（亿人）	34.6	35.0	35.3	35.7	36.0	36.4	36.8	40.8	41.2
yoy	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	11%	1%
替代比例			2.0	2.0	3.0	3.0	5.0	5.0	5.0
渗透率			0.0003%	0.0010%	0.0050%	0.0100%	0.0500%	0.0750%	0.1000%
人形机器人需求量（万台）			0.4	1.8	6.0	12.1	36.8	61.2	82.4
yoy			304%	237%	102%	203%	67%	35%	
工业领域人形机器人总需求量（万台）			1.6	6.9	34.0	73.7	172.3	247.5	328.4
yoy				330%	395%	117%	134%	44%	33%
售价（万美元）			2.0	2.0	2.0	1.8	1.8	1.5	1.5
市场规模（亿美元）			3.2	13.7	68.0	132.7	310.1	371.3	492.6

数据来源：Wind，东北证券

5. 风险提示

硬件优化不及预期。对于人形机器人而言，目前最大的瓶颈或许在硬件端，特别是执行器的设计上，比如特斯拉也提到，目前执行器只能由公司自己设计，外部供应商无法独立提供完整的可用于机器人上的执行器，这反映出零部件供应商对于人形机器人的执行器技术工艺的理解和认知有待进一步提高，这也与其他人形机器人的产业进展有重要关联。

成本下降不及预期。除了产品本身性能外，限制机器人商业化的核心原因仍然是成本问题，包括特斯拉、波士顿动力以及小米等厂商的较为成熟的产品成本基本维持在较高区间，高昂的成本使得人形机器人初期只能应用在特定场景，难以规模化生产。

产业政策不及预期。对于处于商业化初期的人形机器人产业，政策的扶持起到了重要的作用，特别是在产业链的建设上，在经济性凸显之前，政策的推动能带动更多的零部件厂商入局，从而推动产业以及零部件的进一步优化。

研究团队简介:

韩金呈：复旦大学应用统计硕士，四川大学金融学学士。现任东北证券电新组证券分析师，主要研究方向为风电、光伏和储能等。曾任东方证券股票质押/融资融券岗位。

林绍康：上海财经大学投资学硕士，中南财经政法大学管理学学士。现任东北证券电新组分析师，主要覆盖机器人、光伏辅材等领域。2022 年加入东北证券。

分析师声明

作者具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格，并在中国证券业协会注册登记为证券分析师。本报告遵循合规、客观、专业、审慎的制作原则，所采用数据、资料的来源合法合规，文字阐述反映了作者的真实观点，报告结论未受任何第三方的授意或影响，特此声明。

投资评级说明

股票 投资 评级 说明	买入	未来 6 个月内，股价涨幅超越市场基准 15%以上。	投资评级中所涉及的市场基准： A 股市场以沪深 300 指数为市场基准，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）为市场基准；香港市场以摩根士丹利中国指数为市场基准；美国市场以纳斯达克综合指数或标普 500 指数为市场基准。
	增持	未来 6 个月内，股价涨幅超越市场基准 5%至 15%之间。	
	中性	未来 6 个月内，股价涨幅介于市场基准-5%至 5%之间。	
	减持	未来 6 个月内，股价涨幅落后市场基准 5%至 15%之间。	
	卖出	未来 6 个月内，股价涨幅落后市场基准 15%以上。	
行业 投资 评级 说明	优于大势	未来 6 个月内，行业指数的收益超越市场基准。	
	同步大势	未来 6 个月内，行业指数的收益与市场基准持平。	
	落后大势	未来 6 个月内，行业指数的收益落后于市场基准。	

重要声明

本报告由东北证券股份有限公司（以下称“本公司”）制作并仅向本公司客户发布，本公司不会因任何机构或个人接收到本报告而视其为本公司的当然客户。

本公司具有中国证监会核准的证券投资咨询业务资格。

本报告中的信息均来源于公开资料，本公司对这些信息的准确性和完整性不作任何保证。报告中的内容和意见仅反映本公司于发布本报告当日的判断，不保证所包含的内容和意见不发生变化。

本报告仅供参考，并不构成对所述证券买卖的出价或征价。在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见均不构成对任何人的证券买卖建议。本公司及其雇员不承诺投资者一定获利，不与投资者分享投资收益，在任何情况下，我公司及其雇员对任何人使用本报告及其内容所引发的任何直接或间接损失概不负责。

本公司或其关联机构可能会持有本报告中涉及到的公司所发行的证券头寸并进行交易，并在法律许可的情况下不进行披露；可能为这些公司提供或争取提供投资银行业务、财务顾问等相关服务。

本报告版权归本公司所有。未经本公司书面许可，任何机构和个人不得以任何形式翻版、复制、发表或引用。如征得本公司同意进行引用、刊发的，须在本公司允许的范围内使用，并注明本报告的发布人和发布日期，提示使用本报告的风险。

若本公司客户（以下称“该客户”）向第三方发送本报告，则由该客户独自为此发送行为负责。提醒通过此途径获得本报告的投资者注意，本公司不对通过此种途径获得本报告所引起的任何损失承担任何责任。

东北证券股份有限公司

网址：<http://www.nesc.cn> 电话：95360,400-600-0686 研究所公众号：dbzqyanjiusuo

地址	邮编
中国吉林省长春市生态大街 6666 号	130119
中国北京市西城区锦什坊街 28 号恒奥中心 D 座	100033
中国上海市浦东新区杨高南路 799 号	200127
中国深圳市福田区福中三路 1006 号诺德中心 34D	518038
中国广东省广州市天河区冼村街道黄埔大道西 122 号之二星辉中心 15 楼	510630

