



# 机器人行业研究

买入（维持评级）

行业专题研究报告

证券研究报告

机械组

分析师：满在朋（执业 S1130522030002）

manzaipeng@gjzq.com.cn

## 为什么智能机器人需要力控？

### 历史上机器人的力控有哪些方式？

■ 相比于传统机器人的位置控制、速度控制，机器人想要实现与外界交互的柔顺控制，需要将机器人引入力控。根据南京航空航天大学段晋军博士的分析，机器人的柔顺控制可以分为主动柔顺控制、被动柔顺控制，其中主动柔顺控制又可以分为间接力控、直接力控、混合位置/力控。根据我们复盘历史上各类机器人的柔顺力控方式来看，主动柔顺控制具有力控精度高、与外界交互效果好等多个优势，更有望成为未来人形机器人的可行力控方案；比如优必选机器人就采用了主动柔顺控制中的阻抗控制使得机器人具有了柔性和抗性，能够在外力作用下仍然平稳的站立。

### 力传感器的种类及应用展望？

■ 从目前主流柔顺力控方式来看，多数的力控方式需使用力传感器收集力反馈的信号，因此力/力矩传感器有望成为人形机器人力控最核心的部件。从力传感器的检测方法来看，电阻应变式传感器综合性能更优，有望成为主流应用种类。从力传感器的感知维度来看，我们判断机器人关节需使用关节扭矩传感器，末端执行器（手部、脚部）需用六维力矩传感器。人形机器人旋转、线性执行结构类似于人的关节，对于力的感知相对简单，因此采用关节扭矩传感器可解决需求；而对于人形机器人末端执行器（手部、脚部）在执行操作的过程中，力臂在几十到几百毫米之间（力臂较大）、且属于随机变化，测量需要精确处理，六维力矩传感器更符合需求。

### 如何看待多维力矩传感器的壁垒、成本、格局？

- 壁垒：多维力矩传感器对于应变片的性能要求高、安装难度大、且产品定制化研发壁垒高。1) 应变片性能：力矩传感器最主流的检测方案为电阻应变式，而应变片为这类传感器的核心元件，直接决定了多维力矩传感的性能；2) 安装难度大：力矩传感器一个维度至少需要 4 个应变片，考虑到抗温漂等需求，一般需要 30-40 个应变片，在狭小的空间内实现安装对工艺要求较高；3) 研发难度大：六维力矩传感器并非三维力和三维扭矩传感器的简单叠加，属于非线性力学，研发极其复杂，六维力矩传感器的难度远超过单维力矩传感器的研发难度。
- 成本：目前海外进口应变片的成本相对较高，且产品加工难度大，我们认为多维力矩传感器的主要成本来自于应变片成本及人工加工成本。
- 格局：海外厂商性能优异，国内尚未出现多维力矩传感器龙头。六维力矩传感器海外龙头为 ATI 厂商，根据 zoominfo 数据，22 年 ATI 收入达到 8820 万美元，而国内多数厂商尚未形成大规模收入，但宇立仪器、坤维科技等非上市公司六维力矩传感器的部分指标基本对标 ATI 的产品。

### 投资建议

我们看好人形机器人带来力矩传感器的需求量提升，建议重点关注：

- 柯力传感：应变式传感器龙头供应商，盈利能力突出。
- 汉威科技：控股苏州能斯达，拓展柔性微纳传感器。
- 瀚川智能：入股坤维科技，进军六维力矩传感器。
- 中航电测：军用智能测控龙头，力传感类产品品类丰富。

### 风险提示

- 人形机器人商业化落地不及预期、国内力矩传感器进展不及预期、人形机器人力控模式发生重大技术改变、国内应变片技术进展不及预期、国产力矩传感器规模化后降价不及预期。



## 内容目录

一、机器人的力控都有哪些方式？	5
1.1 力觉属于机器人感知系统的重要组成部分之一	5
1.3 机器人的柔顺力控有哪些方案？	6
1.4 历史上不同力控方案的机器人都有哪些案例？	8
二、机器人的力传感器的种类有哪些？	11
2.1 从检测原理来看，电阻应变式传感器综合性能更优	11
2.2 从感知维度来看，力传感器主要感知一维、三维、六维力	11
三、如何看待多维力矩传感器的壁垒、成本、格局？	13
3.1 从核心元件看壁垒：应变片性能要求高、安装工艺门槛高	13
3.2 从性能看壁垒：串扰、精度、准度要求较高，定制化研发难度大	14
3.3 六维力矩传感器的成本主要来自于应变片和人工加工成本	15
3.4 空间：22 年全球力矩传感器市场规模达 80 亿美元	15
3.5 厂商梳理：海外厂商性能优异，国内市场尚未出现龙头	16
四、投资建议	16
4.1 柯力传感：应变式传感器核心供应商，盈利能力维持高位	16
4.2 汉威科技：控股苏州能斯达，拓展柔性微纳传感器	18
4.3 瀚川智能：入股坤维科技，补强力传感器能力	19
4.4 中航电测：军用智能测控龙头，力传感产品品类丰富	20
五、重点公司估值	21

## 图表目录

图表 1： 具身智能机器人的核心在于感知层、认知层	5
图表 2： 机器人用传感器分类	5
图表 3： 海尚机器人通过 3D 坐标系实现机器人的位置控制	5
图表 4： 工业全自动打磨机械手	6
图表 5： 波士顿动力的 Atlas 在不规则雪地路面上行走	6
图表 6： 机器人的力交互控制的主要方式	6
图表 7： 被动柔顺控制在机械臂的末端添加弹性装置	7
图表 8： 导纳控制与阻抗控制	7
图表 9： 导纳关节控制框图	7
图表 10： 坤维科技应用在机器人手部的六维力矩传感器	8
图表 11： 协作机器人关节环节使用的扭矩传感器	8
图表 12： Starl ETH 机器人脚部高阻尼元件	8



图表 13:	优必选仿生机器人抵抗外力、具备抗性	9
图表 14:	优必选仿生机器人通过阻抗实现柔顺控制	9
图表 15:	HYQ 机器人	9
图表 16:	HYQ 机器人主动柔顺控制的腿部结构	9
图表 17:	ATI 力控传感器汽车座椅测试应用	9
图表 18:	ATI 力控在 3C 行业的装配应用	9
图表 19:	ABB 的双臂机器人 YuMi	10
图表 20:	宇立和金恒通过力/位置混合控制打造的智能力控打磨方案	10
图表 21:	力传感器不同检测方法优缺点对比	11
图表 22:	硅/箔电阻应变式传感器具有更强的综合性能	11
图表 23:	一维、三维、六维传感器作用示意图	12
图表 24:	人形机器人力矩传感器应用场景全景图	12
图表 25:	六轴力矩传感器定价明显高于单轴力矩传感器	13
图表 26:	电阻应变式传感器应变片的形变导致其电阻的变化	13
图表 27:	ATI 六轴力矩传感器的内部架构	14
图表 28:	ATI 六轴力矩传感器人工安装过程	14
图表 29:	HMB 的应变片产品在多项性能表现优异	14
图表 30:	六维力矩传感器的精度和准度	14
图表 31:	海外龙头厂商单个应变片的价格高达 180 元/个	15
图表 32:	某六维力矩传感器上需要 32 个应变片	15
图表 33:	ATI 不同系列六维力矩传感器的价格	15
图表 34:	2022 年全球力矩传感器市场规模将达 80 亿美元	16
图表 35:	国产厂商力矩传感器性能对比	16
图表 36:	柯力传感营收规模稳定增长	17
图表 37:	1Q23 归母净利润同比增长超 60%	17
图表 38:	柯力传感费用管控有力	17
图表 39:	柯力传感盈利能力维持高位	17
图表 40:	柯力传感应变式传感器市占率长期保持在 30%左右	17
图表 41:	柯力传感 NJ 系列扭矩传感器	18
图表 42:	近 5 年营业收入稳定增长	18
图表 43:	归母净利润近三年持续增长	18
图表 44:	下游环保投资放缓, 盈利能力短期承压	19
图表 45:	汉威科技核心技术、产品及产线情况	19
图表 46:	汉威科技柔性传感器下游应用	19
图表 47:	瀚川智能营收加速增长	20



图表 48: 近年归母净利润较为稳定 (除 1Q23 外) .....	20
图表 49: 瀚川智能持股常州坤维科技 5.04% 股权 .....	20
图表 50: 坤维科技六维力传感器示意图 .....	20
图表 51: 中航电测过去 5 年营收情况 .....	20
图表 52: 中航电测过去 5 年归母净利润情况 .....	20
图表 53: 中航电测具有传感器所需的应变片 .....	21
图表 54: 中航电测具有多款扭矩传感器 .....	21
图表 55: 重点公司估值 .....	21



## 一、机器人的力控都有哪些方式？

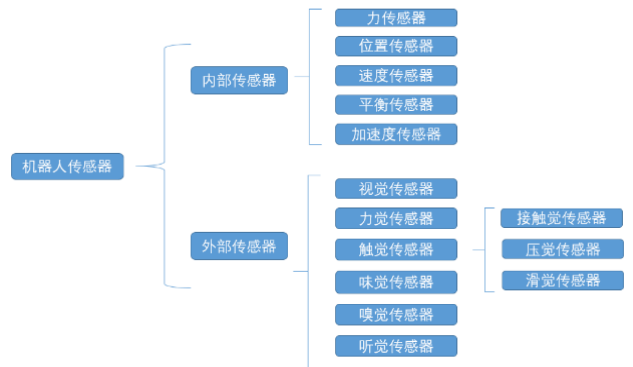
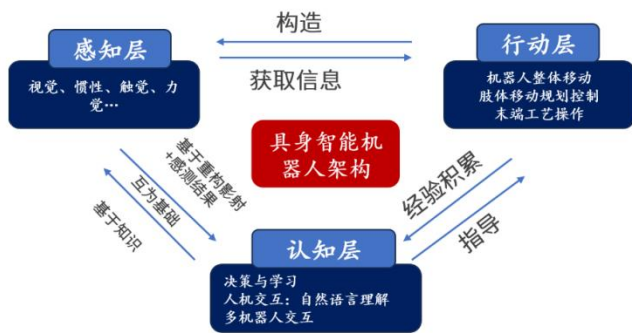
### 1.1 力觉属于机器人感知系统的重要组成部分之一

机器人感知层是凭借感知技术通过获取和分析力觉、触觉、视觉、位置等信息，实现对于外部环境和状态的理解，为人机的智能交互和柔性作业提供决策依据，是目前机器人实现智能自主操作的关键技术。在众多的感知方式中，力触觉感知系统能检测机器人末端执行器操作工件时所产生的三维力/力矩、接触信息，为机器人提供力觉感知环境，是系统完成操作作业的重要条件之一。

力觉传感器主要布置在手腕、关节等多部位。区别于垂直单方向压觉力感知，机器人力觉感知是指机器人作业过程中对来自外界大部分力的感知，是机器人主动柔顺控制必不可少的环节，它直接影响着机器人的力控制性能，分布在机器人的腕部、躯干关节、脚部、手指等部位。

图表1：具身智能机器人的核心在于感知层、认知层

图表2：机器人用传感器分类



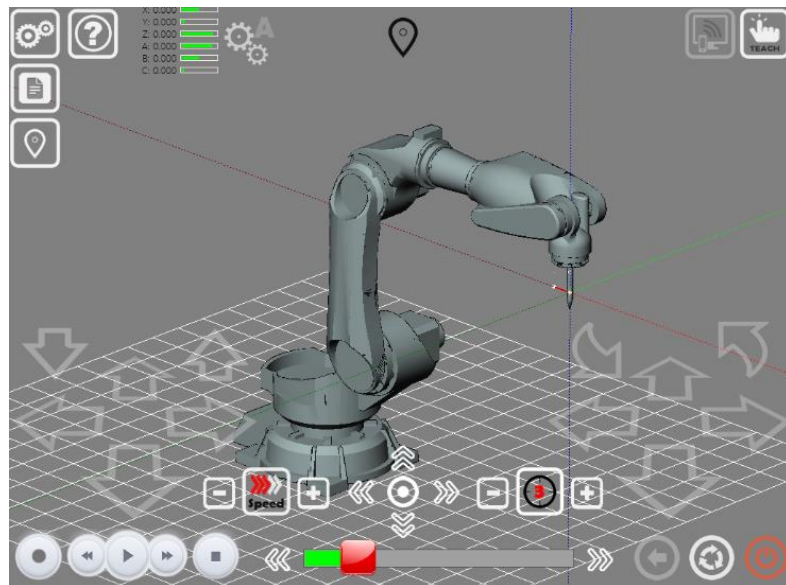
来源：具身智能机器人公众号，国金证券研究所

来源：《关于传感器在机器人中的应用分析》，国金证券研究所

### 1.2 力控是机器人实现柔顺控制的前提

机器人的运动控制可以分为位置控制、速度控制、力控。工业界传统的机器人都使用位置控制，在位置控制下，工业机器人会严格按照预先设定好的位置轨迹进行活动，但是，若机器人的运动过程中受到了障碍物的阻拦，会导致机器人位置追踪误差变大，这种情况下机器人会“出力”追踪预设的运动轨迹，导致机器人与障碍物之间产生巨大的内力，无法完成柔顺控制。

图表3：海尚机器人通过 3D 坐标系实现机器人的位置控制



来源：海尚工业机器人，国金证券研究所



相比位置控制，力控对于机器人的柔顺控制更加重要。现在常用的机器人位置控制可以使机器人在与环境无相互作用力或相互作用力可忽略不计时完成任务，如喷涂、焊接等。然而在如抛光或打磨等应用场景中，仅使用位置控制将不能满足任务需求。这时需要引入末端执行器将力/力矩作为反馈量进行控制，智能调整运动轨迹，实现机器人的柔顺控制。

比如：

- 1) 工业机器人：在工业机械臂表面抛光的场景下，表面处于不规则的状态，需要严格地控制末端抛光件与表面接触力的大小，因此需要不断获得末端执行器的力反馈，进行动态力反馈控制。
- 2) 人形机器人：波士顿动力的 Atlas 在不规则的雪地路面上行走时，路面情况无法通过提前建模预测，这种情况下，如果通过位置控制，无法规划出一条合理的位置轨迹，必须引入力控，才能实现动态控制。

图表4：工业全自动打磨机械手

图表5：波士顿动力的 Atlas 在不规则雪地路面上行走



来源：工业机器人，国金证券研究所

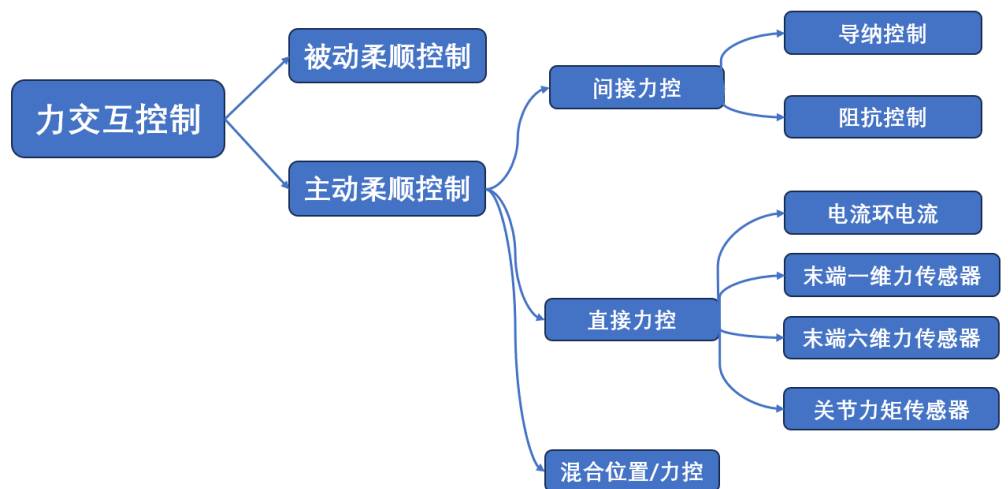
来源：波士顿动力，国金证券研究所

### 1.3 机器人的柔顺力控有哪些方案？

柔顺控制指机器人与环境进行物理交互时，通过采取一些新的柔顺元件，或者设计新的控制策略使得机器人具有柔顺性，采用相关柔性辅助元件使机器人展现柔顺特性的方式通常被称为被动柔顺，而通过设计相关柔顺控制策略作用于机器人使机器人展现柔顺特性的方式通常被称为主动柔顺。

根据南京航空航天大学段晋军博士的分析来看，机器臂柔顺控制方式分为被动柔顺控制和主动柔顺控制，主动柔顺控制又分为直接力控、间接力控、混合位置/力控。

图表6：机器人的力交互控制的主要方式

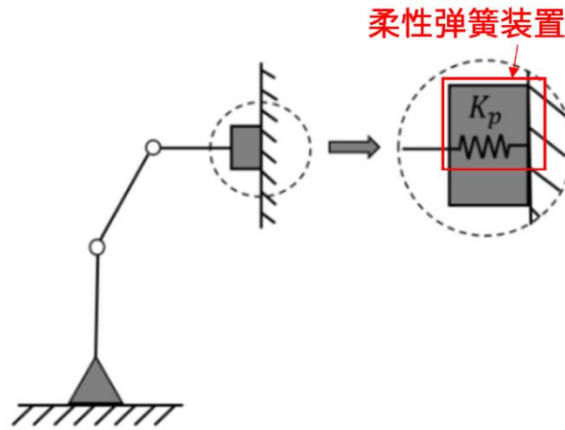


来源：南京航空航天大学段晋军，小米科技，国金证券研究所



**1.3.1 被动柔顺控制：**机械臂的被动柔顺控制是在机械臂的末端安装一个机械弹性结构（弹簧、阻尼），通过机械臂的弹性来实现力控的功能。这类力控方式工艺简单、成本低廉、对于机械臂无特殊要求，但是力控精度无法保证，机械臂拥有复杂的结构，有非线性的摩擦力、传动间隙，导致期望刚度无法精确获得，适用于对于力控精度要求较低的场景。

图表7：被动柔顺控制在机械臂的末端添加弹性装置



来源：小米科技，国金证券研究所

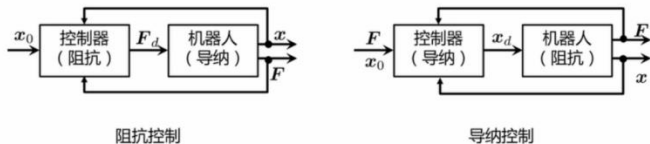
**1.3.2 主动柔顺控制：**主动柔顺控制需要机器人获取对力信息和位置信息的反馈，利用力与位置的反馈信息结合相应算法去主动控制机器人运动或者作用力，分为直接力控和间接力控、混合位置/力控。

**间接力控：**间接力控不是单纯的控制力或者控制位置，而是控制力与位置的相对关系，使得与机械臂的末端弹性结构通过软件算法来实现力控。间接力控根据控制原理的不同又分为导纳控制和阻抗控制。

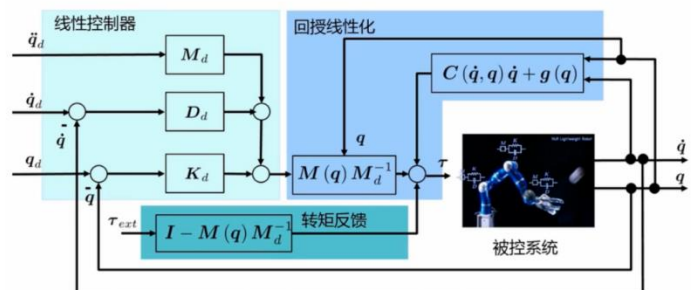
1) 导纳：导纳控制广泛应用于实现机器人的主动柔顺从而完成拖动画示教，其主要原因是导纳控制器能够建立环境与机器人之间的动态关系，利用虚拟刚度、阻尼、惯性参数创建从力到运动的映射。通过调节上述三种参数，改变机器人柔顺特性，使机器人服从人类施加的力并做出相应的运动。

2) 阻抗：阻抗控制是将控制器等效为阻抗系统，输入位置输出力。是由 Hogan 于 1985 年提出的主动柔顺控制策略，是目前柔顺控制使用较多的方法之一。阻抗控制本质为建立机器人在与环境交互过程中所受外界环境交互力与机器人姿态之间的映射关系，从而实现根据外界交互力调节机器人姿态的功能，进而实现机器人的主动柔顺。

图表8：导纳控制与阻抗控制



图表9：导纳关节控制框图



来源：《协作机器人一体化关节力矩感知与柔顺控制研究》，国金证券研究所

来源：智星崛起公众号，国金证券研究所

**直接力控：**相比于间接力控，直接力控更适合于不考虑人机交互安全性的场景，比如打磨场景，需要精确的力输出在某个表面。这种力控方式主要包括电流环、基于一维力传感器、基于六维力传感器、基于关节扭矩传感器这几种方式。

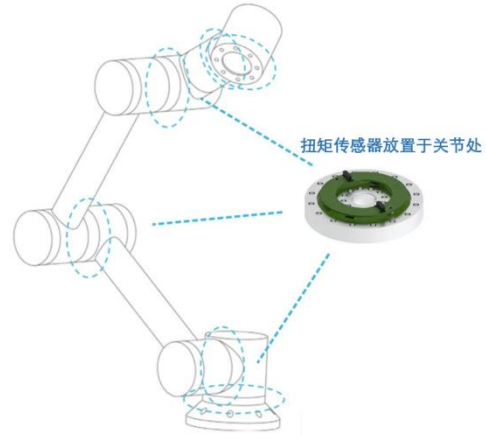
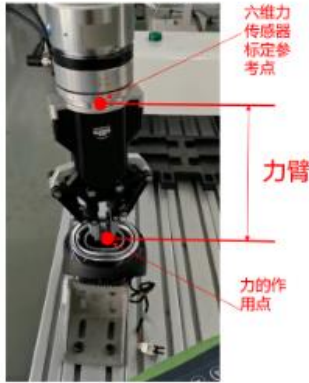
1) 电流环：电机以恒定的电流运转，以产生恒定的加速力矩，这类力控无需额外的传感器，但是力矩精度差。



- 2) 基于一维力传感器：在机械臂的末端加装一维力传感器感知外力，仅适用于的控制一个方向的力，相对更好的控制精度。
- 3) 基于六维力矩传感器：精度远大于一维力传感器。
- 4) 关节扭矩传感器：主要应用于机械臂的关节处，精度介于电流环和力传感器之间。

图表10: 坤维科技应用在机器人手部的六维力矩传感器

图表11: 协作机器人关节环节使用的扭矩传感器



来源：坤维科技，国金证券研究所

来源：泰科电子，国金证券研究所

**混合位置/力控：**通过位置反馈回路对力反馈回路进行调节进而控制末端执行器与环境的交互力，并将该算法应用于磨抛任务当中。

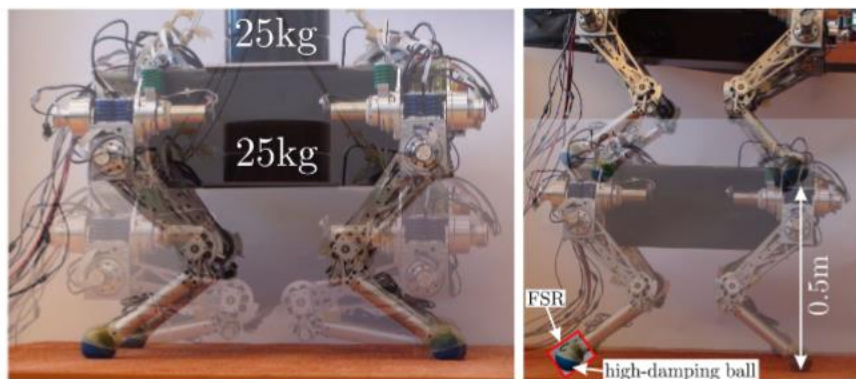
#### 1.4 历史上不同力控方案的机器人都有哪些案例？

##### ■ 被动柔顺控制案例：Starl ETH 机器人

被动柔顺控制指的是在力觉控制的末端执行器环节安装一个机械弹性结构(弹簧、阻尼)，进而实现力控，Starl ETH 机器人属于这类力控方式，根据 Starl ETH 机器人的相关论文表明，Starl ETH 内部的核心元件是高柔顺性系列弹性制动器，这种设计实现了扭矩的可控性，并且能够对接头角度、电机角度、弹簧的偏转实现精准测量。

Starl ETH 机器人的关键元件为轻质高阻尼球型脚，通过内部的力敏电阻器感受力的变化，前端的传感器还包括 IMU 感受角速度和加速度来控制运动。

图表12: Starl ETH 机器人脚部高阻尼元件



来源：《StarlETH: a Compliant Quadrupedal Robot for Fast, Efficient, and Versatile Locomotion》，国金证券研究所

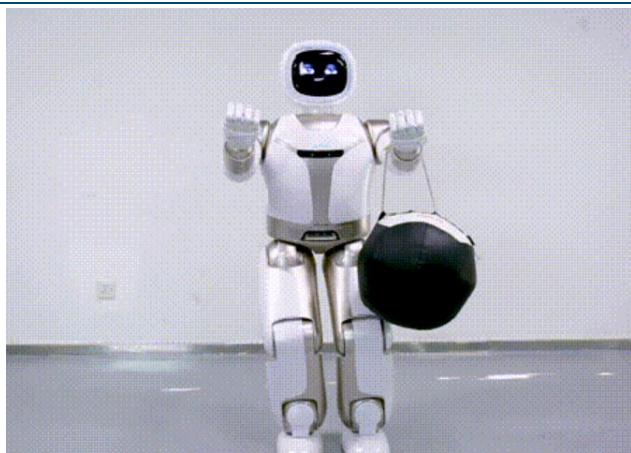
##### ■ 主动柔顺控制之阻抗案例：优必选、HYQ

1) 优必选：优必选仿生机器人通过提取关节力矩或电流计算机器人末端受到的一个六维力和力矩，通过阻抗控制即可实现机器人的柔顺效果。

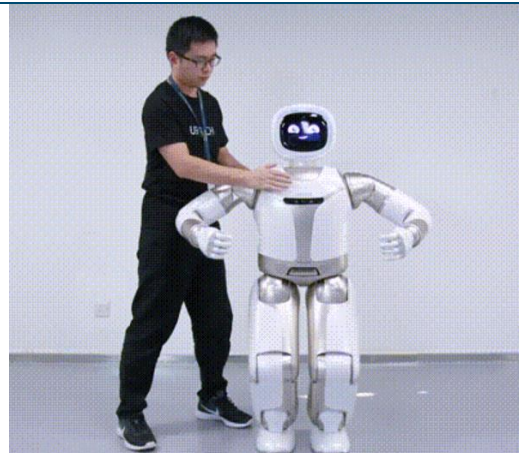




图表13: 优必选仿生机器人抵抗外力、具备抗性



图表14: 优必选仿生机器人通过阻抗实现柔顺控制



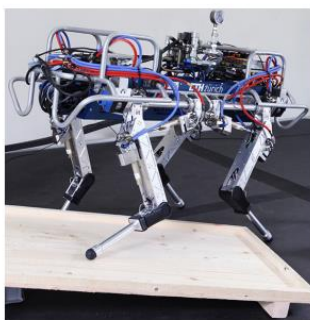
来源: 人工智能学家, 国金证券研究所

来源: 人工智能学家, 国金证券研究所

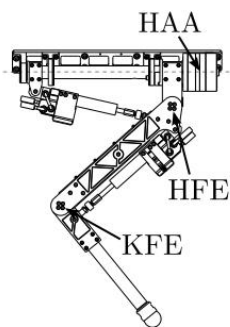
2) HYQ: 为了实现机器人与外界环境进行交互, 需要控制机器人的阻抗(接触点的运动和接触点力之间的关系), HYQ 机器人通过控制阻抗实现了对于机器人的腿部控制。

图表15: HYQ 机器人

图表16: HYQ 机器人主动柔顺控制的腿部结构



(a) HyQ robot



(b) HyQ joint names



(a)



(b)

来源: 《基于模型的动态机器人液压阻抗控制》, 国金证券研究所

来源: 《基于模型的动态机器人液压阻抗控制》, 国金证券研究所

■ 六维力矩传感器在机器人实现力控

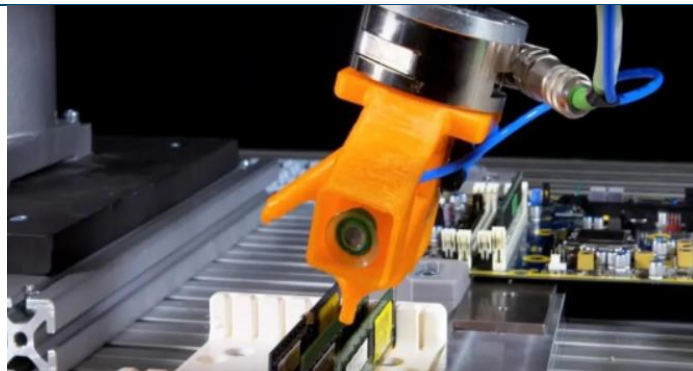
六维力矩传感器可广泛应用在科研、实验室、工业机器人领域, 机器人通过六维力和力矩传感器感受末端力反馈可实现整体控制, 这类力控是目前较为普遍实现力反馈的路径。

图表17: ATI 力控传感器汽车座椅测试应用

图表18: ATI 力控在 3C 行业的装配应用



来源: 机器人大学讲堂, 国金证券研究所



来源: 机器人大学讲堂, 国金证券研究所

■ 电流环实现力控案例: ABB 的双臂机器人 YuMi

ABB 的双臂机器人轻质合金手臂均具有 7 轴自由度, 能模拟人类肢体动作, 在大幅提升空



间利用率的同时，又能契合消费电子行业灵活敏捷的生产需求。ABB 力控方式并没有使用力传感器，而是采用电流环的方式，所用的电机、减速机相对较小，产生的摩擦力也小，因此动力学辨识相对更准一些。但是由于没有力传感器，也就无法实现精准力控。

图表19: ABB 的双臂机器人 Yumi



来源: SunyaTech, 国金证券研究所

■ 力/位置混合控制: iGrinder 智能力控打磨解决方案

20 年宇立仪器和江苏金恒联合开发出了智能力控打磨方案，该方案为典型的力/位混合控制案例，该方案集成了恒力控制和位置浮动功能，内置力传感器、位移传感器、倾角传感器和电气伺服控制系统，实时感知打磨力、浮动位置和磨头姿态等信息，能够自动补偿机器人姿态、轨迹偏差和磨料磨损，保证恒定的打磨压力，从而获得打磨效果的一致性。

图表20: 宇立和金恒通过力/位置混合控制打造的智能力控打磨方案



来源: 机器人在线, 国金证券研究所

**总结:** 根据上述各类机器人力控方式来看，主动柔顺控制已经成为未来机器人与外界交互必经之路，以优必选的仿生机器人为例，该产品通过阻抗控制实现了抗性、柔顺性，在受到外力的情况下，仍然能够完成操作。而从目前主流柔顺力控方式来看，多数的均需要使用力传感器收集力反馈的信号，力/力矩传感器为各类机器人实现柔顺控制的核心部件，因此下文我们将重点分析力/力矩传感器的各个种类、成本、格局。



## 二、机器人的力传感器的种类有哪些？

### 2.1 从检测原理来看，电阻应变式传感器综合性能更优

从检测方法来看，力传感器可分为电阻式、电容式、电感式，光电式等。电阻应变式、电容式两类检测模式优势明显，有望在人形机器人中得到应用。

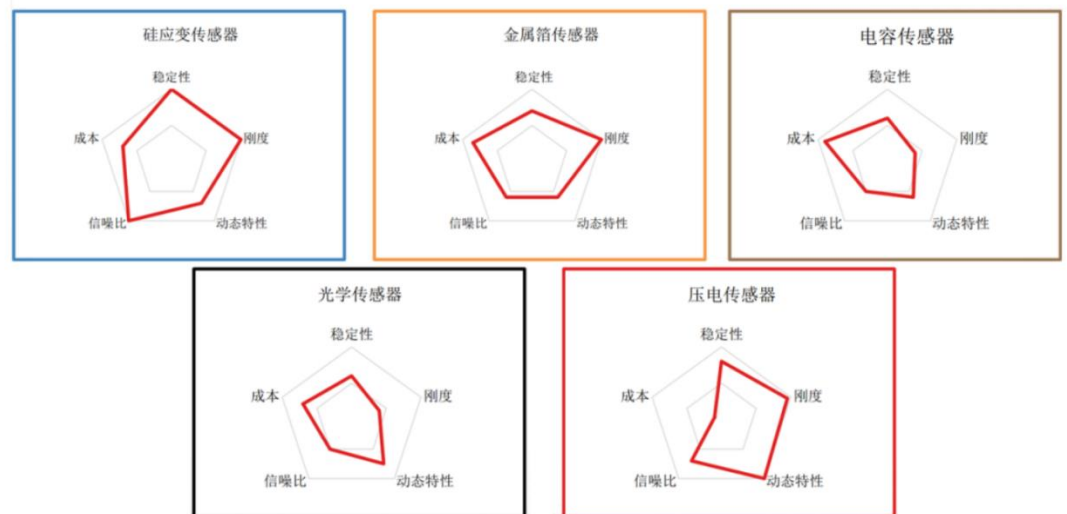
图表21：力传感器不同检测方法优缺点对比

检测方法	方法描述	优点	缺点
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	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 动态测量范围大</li> <li>• 功耗小</li> <li>• 系统简单可靠</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 非线性误差较大</li> <li>• 互换性较差</li> <li>• 分辨率不高</li> </ul>
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	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 可靠性高</li> <li>• 测量范围广</li> <li>• 动态响应好</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 价格昂贵</li> <li>• 对测试环境要求高</li> </ul>
电感式	在力/力矩作用下产生与之相应的电感量的变化	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 高灵敏度和高分辨率</li> <li>• 线性度好</li> <li>• 重复性高</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 不适用于动态测量</li> <li>• 可靠性不高</li> </ul>
电阻应变式	在力/力矩作用下，应变片形状会发生变化，电阻会随着应变片的形变而增大/减小，进而检测力的大小	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 精度高、技术成熟</li> <li>• 测量范围广、成本低</li> <li>• 频响特性好</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 存在非线性误差</li> <li>• 信号输出微弱</li> </ul>
电容式	可变电容压力传感器由两个电容板组成，压力的变化会导致两个之间间隙变窄/变宽，从而改变电容，进而识别力的变化	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 高灵敏度和高分辨率</li> <li>• 频率范围宽，结构简单</li> <li>• 环境适用性强</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 调理电路复杂</li> <li>• 寄生电容影响大</li> </ul>

来源：《机器人多维力传感器》，国金证券研究所

硅/金属箔电阻应变传感器有望应用于人形机器人。从不同类型的力矩传感器在稳定性、刚度、动态特性等维度的比较后，硅/金属箔电阻应变式传感器在稳定性、刚度、信噪比等多个方面具有优势，有望在人形机器人中得到应用。

图表22：硅/箔电阻应变式传感器具有更强的综合性能



来源：leaderobot，国金证券研究所

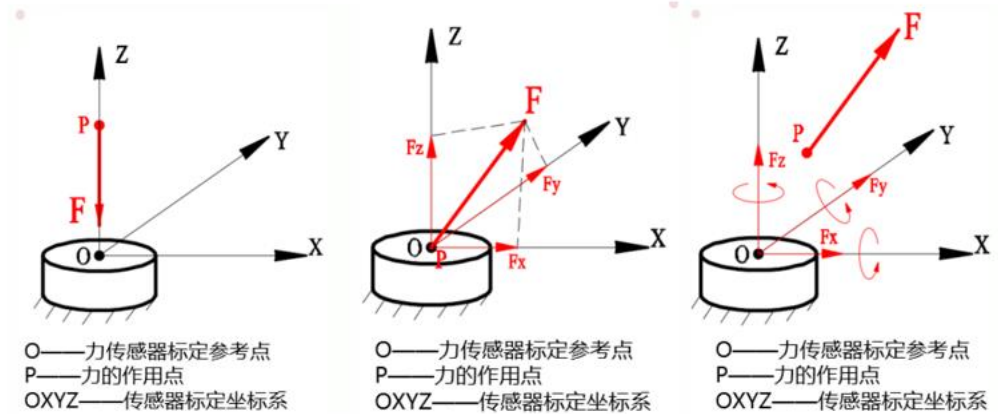
### 2.2 从感知维度来看，力传感器主要感知一维、三维、六维力

从力传感器的感知维度来看，力矩传感器可以分为一维到六维，测量维度的数量越多，产品难度越大、档次越高；从主流的传感器的测量维度来看，一、三、六维力矩为常见产品的，二、五维力矩传感器相对较少：



- 一维力传感器：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；比如称重传感器，只能测量垂直于地面的力，就属于一维力传感器。
- 三维力传感器：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。
- 六维力传感器：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。六维力传感器内部的算法，可以实现解耦各个方向的力和力矩的干扰，使得测量的力矩更为准确；这类传感器更适用于参考点的距离较远，且随机变化情景，测量精度要求较高。

图表23：一维、三维、六维传感器作用示意图



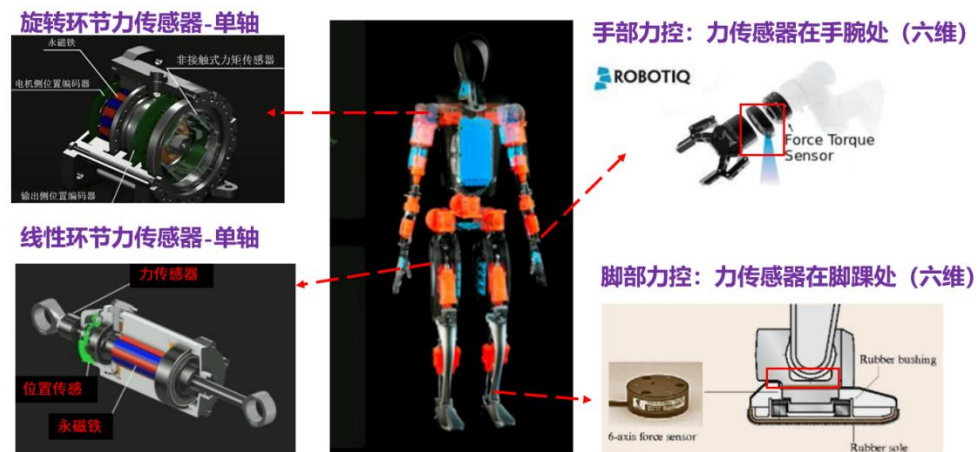
来源：坤维科技，国金证券研究所

从人形机器人的工作原理来看，我们判断未来人形机器人的手腕、脚踝环节需六维力矩传感器、其他关节可以适用关节扭矩传感器。

末端执行机构（手部、脚部）——六维力矩传感器：由于人形机器人末端执行机构主要为手部和脚部，执行的过程中力臂在几十到几百毫米之间，力臂较大且属于随机变化；而对于这两类环节的力也要求实现精确处理，因此这两类关节所受的力并非简单的一维、三维力，我们判断这个关节需要适用六维力矩传感器。

其他关节——关节扭矩传感器：特斯拉人形机器人旋转执行机构类似协作机器人关节，而线性执行机构也通过滚珠丝杠完成直线运动，整体对于力的感知相对简单，我们预计其他关节需单轴力矩传感器。

图表24：人形机器人力矩传感器应用场景全景图



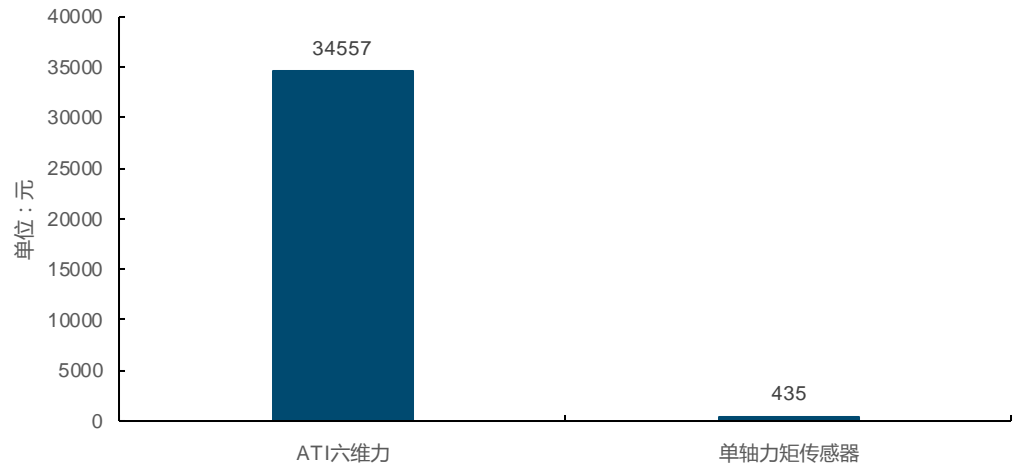
来源：《Force-Torque Sensing in Robotics》，Tesla AI Day，国金证券研究所



### 三、如何看待多维力矩传感器的壁垒、成本、格局？

根据前文的分析，机器人手部、脚部需要使用六维力矩传感器，而其他关节需要使用单轴扭矩传感器；相比单轴力矩传感器，六维力矩传感器定价较高，若人形机器人未来想要实现商业化落地，力矩传感器的降本为必不可少的一环，我们将重点分析六轴力矩传感器的技术壁垒进而对于该产品的降本进行展望。

图表25：六轴力矩传感器定价明显高于单轴力矩传感器

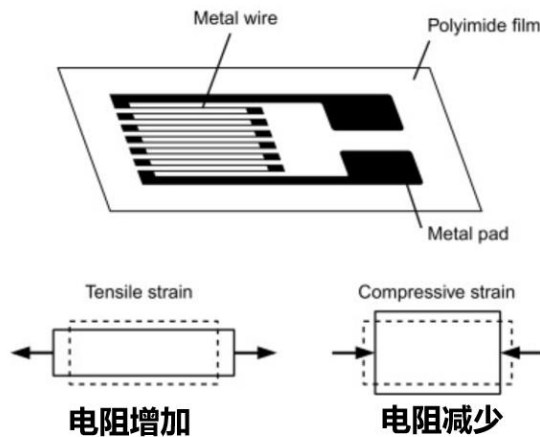


来源：e-motionsupply, 京东, 国金证券研究所

#### 3.1 从核心元件看壁垒：应变片性能要求高、安装工艺门槛高

从工作原理来看，电阻应变式力矩传感器核心部件为应变片，应变片的性能对于力矩传感器的整体性能影响至关重要。具体原理为将箔应变片安装在力矩传感器的金属体（也叫挠曲件）上，当施加到外力时，金属体充当“弹簧”轻微变形，进而带动应变片实现形变，应变计的形变会改变电阻，实现电信号的反馈。

图表26：电阻应变式传感器应变片的形变导致其电阻的变化

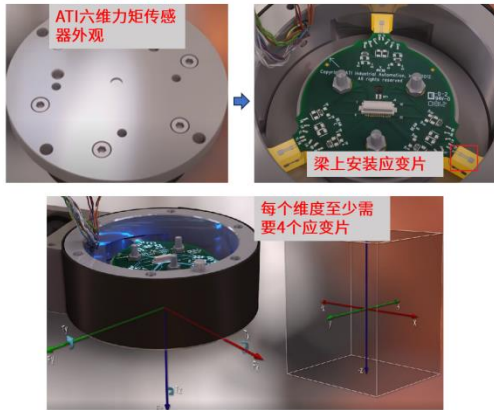


来源：Futek, 国金证券研究所

**安装难度大：**从六维力矩传感器每个维度需要至少 4 个应变片，数十个应变片的安装对工艺提出较高要求。从全球龙头六维力矩传感器公司 ATI 的产品内部构造来看，六维力矩传感器的内部为内轮毂，通过梁与外壳来连接，每个维度具有至少 4 个应变片，考虑到抗温漂等性能需求，单个六维力矩传感器的上可能需要 30-40 个应变片，而组装的关键环节贴片、组桥、配平、温度补偿均需人工在极其狭小的空间内完成，安装工艺具有较高技术壁垒。



图表27: ATI 六轴力矩传感器的内部架构



图表28: ATI 六轴力矩传感器人工安装过程



来源: ATI, 国金证券研究所

来源: ATI, 国金证券研究所

应变片性能直接影响传感器性能: 应变片是由敏感栅等构成用于测量应变的元件, 其原理是在外界力的作用下产生机械变形时, 其电阻值相应地发生变化, 因此应变片的性能直接决定了多维力传感器的灵敏度、量程、分辨率、刚性等静态性能指标。

图表29: HBM 的应变片产品在多项性能表现优异

	应变极限	疲劳寿命 (次)	使用温度范围	应变系数
HBM	2.50%	$10^7$	-200° -300°	2.2
中航电测	2%	$10^7$	-50° -150°	2

来源: HBM, 中航电测官网, 国金证券研究所

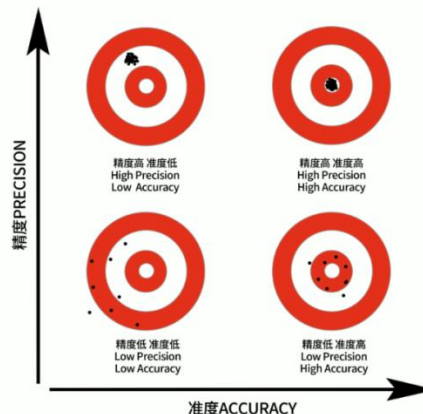
### 3.2 从性能看壁垒: 串扰、精度、准度要求较高, 定制化研发难度大

研发难度大: 六维力矩传感器的研发并非将一个三维力和三个扭矩传感器结构的简单叠加, 它的非线性力学特征明显, 要考虑多通道信号的温漂、蠕变、交叉干扰、数据处理的实时性, 再加之六维联合加载标定的复杂性, 六维力矩传感器的难度远超过单维力矩传感器的研发难度。

性能要求高: 根据坤维科技公众号, 多维力矩传感器的核心性能指标为串扰、精度和准度, 国内外该指标差距较大。

- 串扰: 该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, 是体现产品性能的关键指标之一。
- 精度: 该指标衡量了测量结果之间的重复性。
- 准度: 测量结果与理论真值的偏离程度。准度其实涵盖了滞后、线性、蠕变等误差因素, 更能体现产品的综合性能, 是多维力传感器最为核心的技术指标之一。

图表30: 六维力矩传感器的精度和准度



来源: 坤维科技, 国金证券研究所

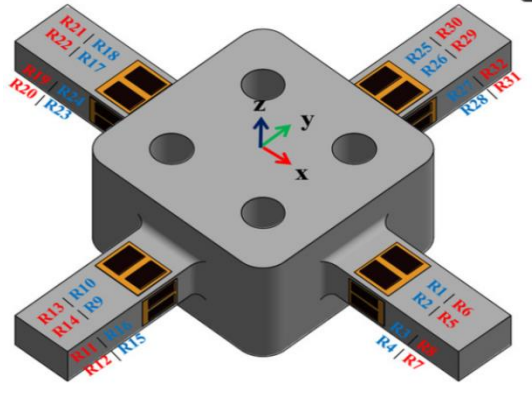
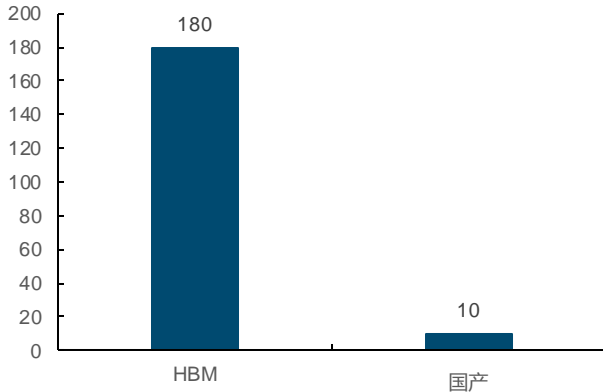


### 3.3 六维力矩传感器的成本主要来自于应变片和人工加工成本

成本端：我们判断六维力矩传感器的成本核心在于应变片、加工成本。

- 应变片：根据前文分析，单个六维力矩传感器所需要应变片的数量至少为 24 个，考虑到抗温漂、蠕变等需求，一般单个六维力矩传感器的应变片的数量约为 30-40 个；根据淘宝价格，海外应变片头部厂商 HBM 单个应变片的价格在 100-200 元，因此单个六维力矩传感器应变片的成本在 5000-6000 元。

图表31：海外龙头厂商单个应变片的价格高达 180 元/个 图表32：某六维力矩传感器上需要 32 个应变片



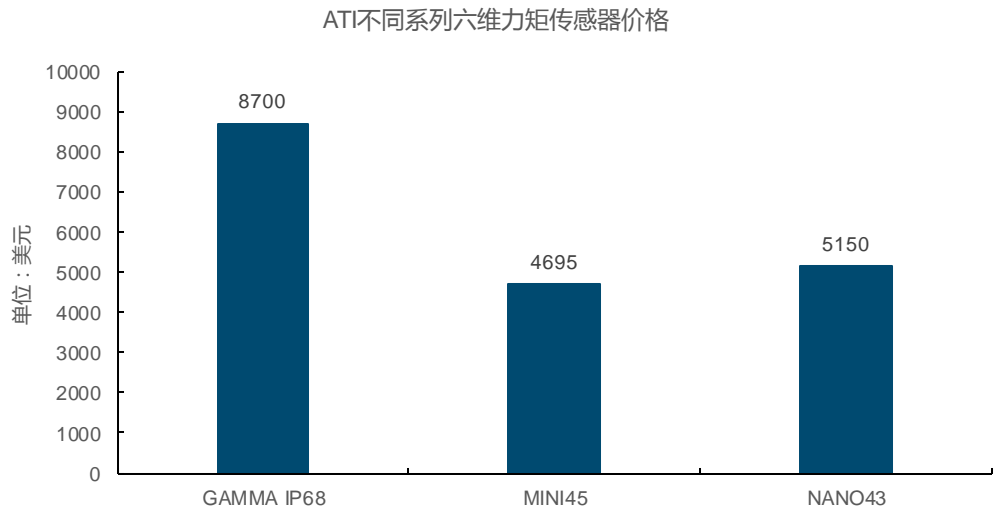
来源：HBM，华兰海电测，国金证券研究所

来源：MDPI，国金证券研究所 注：红色、蓝色为应变片安装的位置。

- 加工成本：六维力矩传感器成品对于精度、准度要求极高，因此人工加工技术壁垒较高，短期无法实现自动化生产，我们预计六维力矩传感器人工成本超过 10%。

价格端：目前海外六维力矩传感器龙头 ATI 产品价格 4000-8000 美金之间。

图表33：ATI 不同系列六维力矩传感器的价格



来源：ATI，国金证券研究所

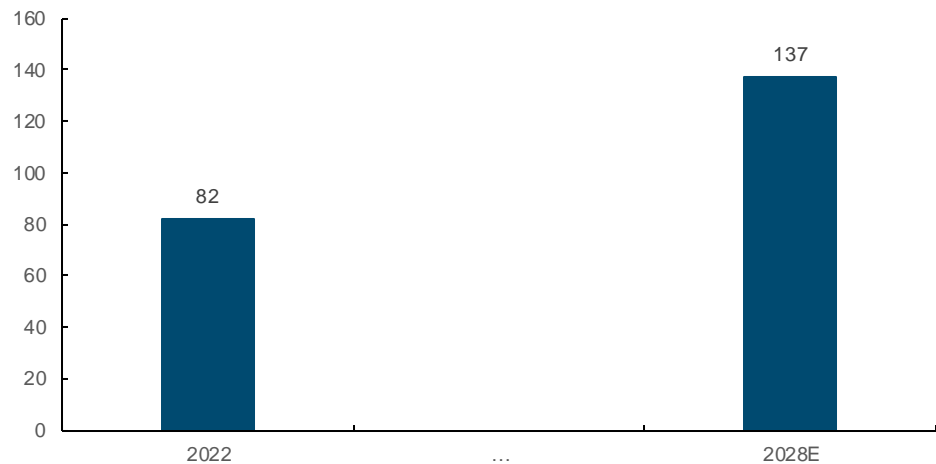
展望：根据前文分析，六维力矩传感器的超 50%的成本来自于应变片和人工费用，我们认为随着国产应变片的参数持续突破及加工能力提升，以及人形机器人需求爆发后，未来降本空间充足。

### 3.4 空间：22 年全球力矩传感器市场规模达 80 亿美元

2028 年全球力矩传感器市场规模将达 137 亿美元。根据 imarcgroup 数据，2022 年全球力矩传感器市场规模为 82 亿美元，预计 2028 年将达 137 亿美元，期间 GAGR 达 8.9%。



图表34：2022年全球力矩传感器市场规模将达80亿美元



来源：imarcgroup, 国金证券研究所

### 3.5 厂商梳理：海外厂商性能优异，国内市场尚未出现龙头

国内厂商宇立仪器、坤维等厂商部分指标对标海外产品。全球六维力矩传感器的龙头为ATI，根据zoominfo数据，22年ATI收入达到8820万美元，而国内多数厂商尚未形成大规模收入。从产品性能来看，分辨率、灵敏度、抗干扰能力强是机器人力觉传感器的主要性能要求，国内厂商已在部分指标对标海外头部厂商。

图表35：国产厂商力矩传感器性能对比

公司	产品型号	维度	准度 (%F.S)	非线性 (%F.S)	滞后 (%F.S)	重复性 (%F.S)
ATI	Axia80	六维	0.5	0.5	0.5	/
柯力传感	NK-SS100N-1000N (微型)	/	/	0.5	0.5	0.5
昊志机电	DSA-16050	六维	/	0.5	0.5	/
宇立仪器	M37XX	六维	/	0.5	0.5	/
力准传感器	LF-303M-60A	三维	/	0.5	0.3	0.3
敏芯股份	MST701 (MEMS 力传感器)	/	/	5	/	5
坤维科技	KWR36 系列	六维	0.5	0.5	0.5	0.1
常州瑞尔特	T521 六维力传感器	六维	0.1	0.03-0.35	0.1-0.3	0.1-0.2
汉迪科技	力传感器 - FN7178-2	三轴	0.5	0.5	0.5	/

来源：各公司官网, 国金证券研究所 注：准度包含了串扰、滞后、非线性等因素导致的测量误差

## 四、投资建议

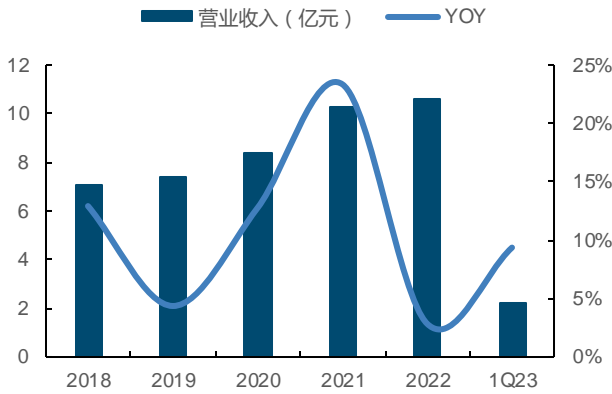
### 4.1 柯力传感：应变式传感器核心供应商，盈利能力维持高位

柯力传感近年营收规模、归母净利润稳定增长。2018-22年，柯力传感营业收入/归母净利润从7.1/1.4亿元提升至10.6/2.6亿元，期间GAGR达10.6%/16.5%。系高端产品放量，1Q23归母净利润增长至0.6亿元，同比增长60%。



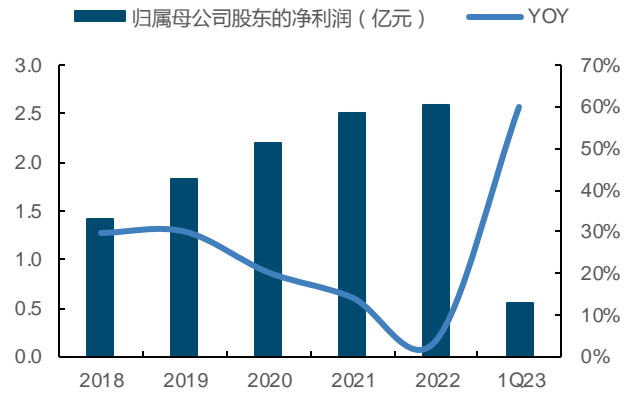


图表36: 柯力传感营收规模稳定增长



来源: iFind, 国金证券研究所

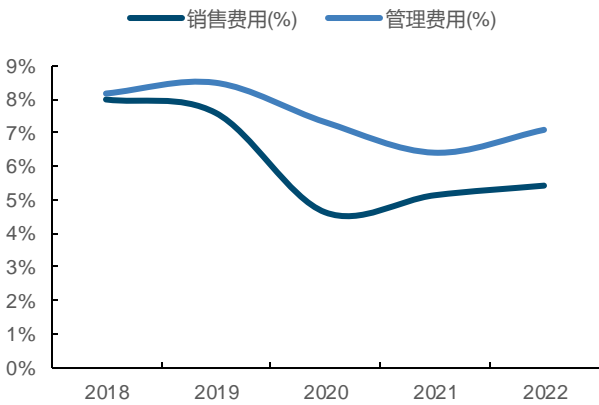
图表37: 1Q23 归母净利润同比增长超 60%



来源: iFind, 国金证券研究所

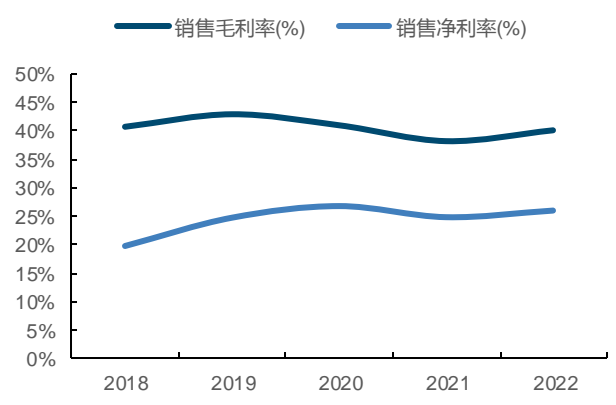
费用管控有力, 盈利能力稳定。柯力传感销售费用率/管理费用率从 2018 的 8.0%/8.1% 降至 22 年 5.4%/7.1%, 期间降幅为 2.6pct/1.0pct, 费用管控有力。盈利能力端: 近 3 年净利率、毛利率持续提升, 从 38.3%、24.8% 提升至 40.8%、26.5%。

图表38: 柯力传感费用管控有力



来源: Wind, 国金证券研究所

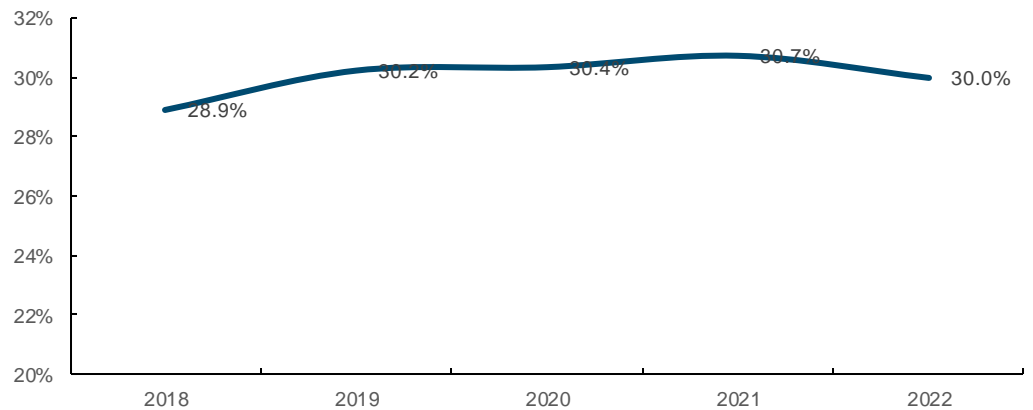
图表39: 柯力传感盈利能力维持高位



来源: Wind, 国金证券研究所

应变式力传感器龙头, 市占率达 30%。柯力传感 2022 年应变式传感器产量为 336.7 万只, 根据华经产业研究院数据, 22 年中国应变式传感器产量为 1122.6 万只, 柯力传感市占率达 30%。

图表40: 柯力传感应变式传感器市占率长期保持在 30%左右



来源: 柯力传感公告, 华经产业研究院, 国金证券研究所

柯力传感在电阻应变式传感器积累深厚, 具有拓展至机器人力矩传感器新蓝海市场的潜



力。应变式传感器精度高、技术成熟成本低、测量范围广，有望在机器人力矩传感器中使用。柯力传感作为国内电阻应变式传感器龙头，产品囊括 17 个品类，其中包括两款扭矩传感器。我们认为，柯力传感在电阻应变式传感器有较深厚积累，有进入机器人力矩传感器新蓝海市场的潜力。

图表41：柯力传感 NJ 系列扭矩传感器



来源：柯力传感官网，国金证券研究所

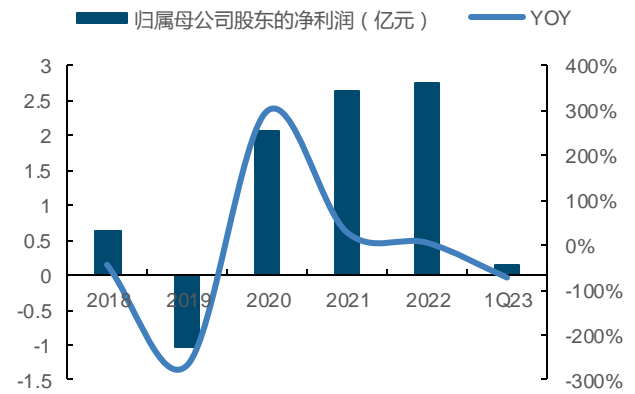
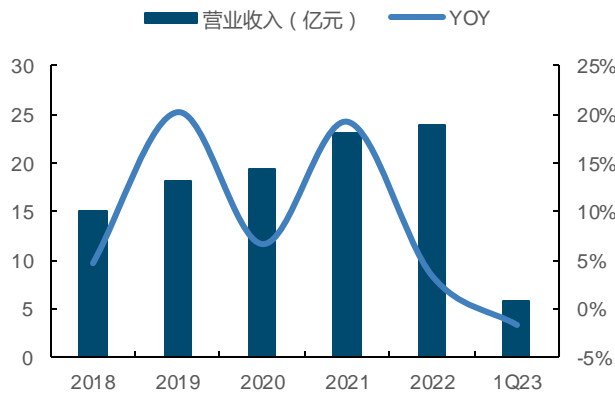
风险提示：力传感器研发不及预期、力传感器导入人形机器人不及预期。

#### 4.2 汉威科技：控股苏州能斯达，拓展柔性微纳传感器

收入稳步增长，归母净利润扭亏转盈。汉威科技近 5 年来营收稳步增长，2022 年实现收入 24.0 亿元，同比增长 3.4%。2020 年以来，汉威科技积极调整产品结构，增强管理，归母净利润实现扭亏为盈，2022 年实现归母净利润 2.8 亿元，同比增长 4.9%。

图表42：近 5 年营业收入稳定增长

图表43：归母净利润近三年持续增长



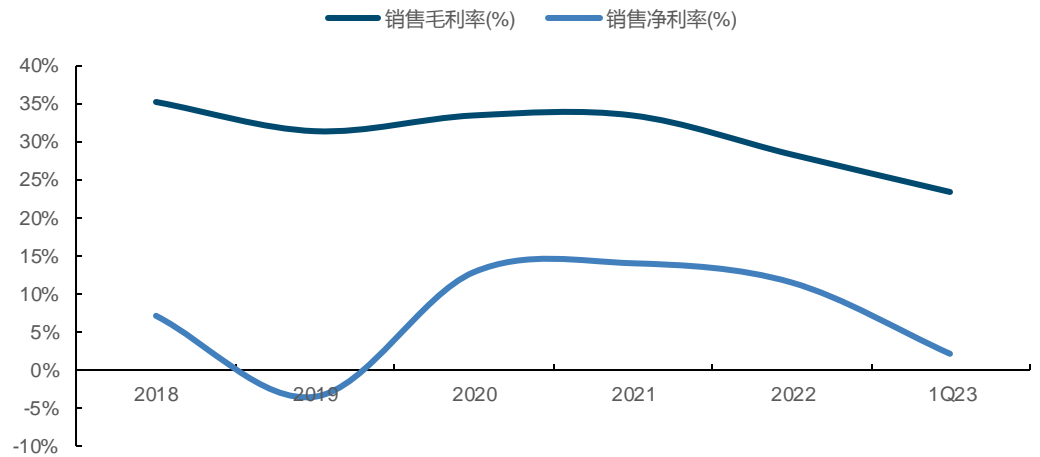
来源：Wind，国金证券研究所

来源：Wind，国金证券研究所

受下游投资放缓，盈利能力短期承压。汉威科技 2022 年受下游环保行业投资放缓，需求较差，营收增长缓慢导致盈利能力短期承压，毛利率、净利率为 28.4%、11.5%，同比下降 5.1pcts、3.5pcts。



图表44：下游环保投资放缓，盈利能力短期承压



来源：Wind，国金证券研究所

**控股苏州能斯达，拓展柔性传感器。**汉威科技战略眼光较为前瞻，2016年以来通过股权收购，累计持有苏州能斯达56.5%股权，通过股权控制，掌握了5大柔性核心技术、8大产品系列，以及一条1000万支柔性传感器的印刷线和组装线。

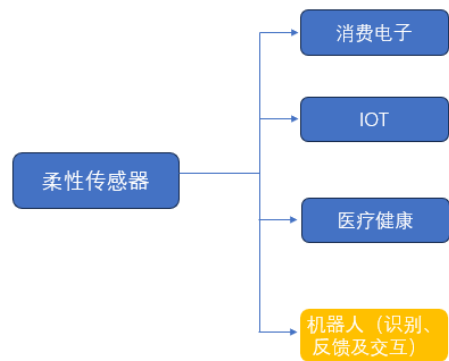
产品下游应用广泛，机器人领域导入推进中。汉威科技目前下游应用主要围绕消费电子、IOT和医疗健康领域。机器人应用方面，苏州能斯达研发的多模态柔性微纳传感器能很好的实现人与机器的识别、反馈、交互功能。

图表45：汉威科技核心技术、产品及产线情况

图表46：汉威科技柔性传感器下游应用

类别	描述
八大柔性产品系列	柔性压力传感器
	柔性压电传感器
	柔性织物
	柔性应变传感器
	柔性温湿度传感器
	柔性热敏传感器
	柔性电容传感器
	柔性汗液传感器
产线	1条年产1000万支柔性传感器的超净印刷线和组装线

来源：苏州能斯达公众号，Wind，国金证券研究所



来源：汉威科技公告，国金证券研究所

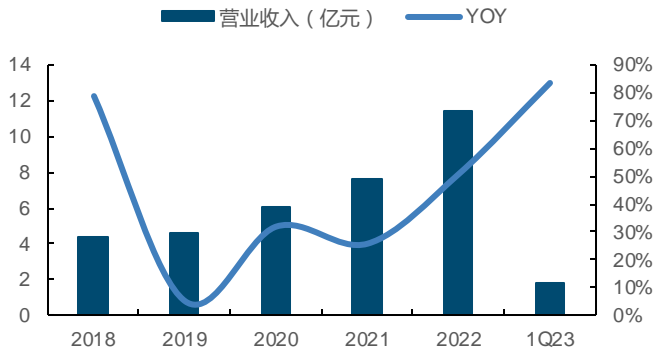
风险提示：力传感器方案与机器人传感方案不符合、下游拓展不及预期、交易相关事项尚存在重大不确定性。

### 4.3 瀚川智能：入股坤维科技，补强力传感器能力

瀚川智能营收加速增长，规模效应有望提升盈利能力。2022年开始，瀚川智能营收加速增长，截至1Q23，营业收入达1.8亿元，同比增长83.5%，同期归母净利润达-0.4亿元，系规模扩张期，费用均摊较高所致。

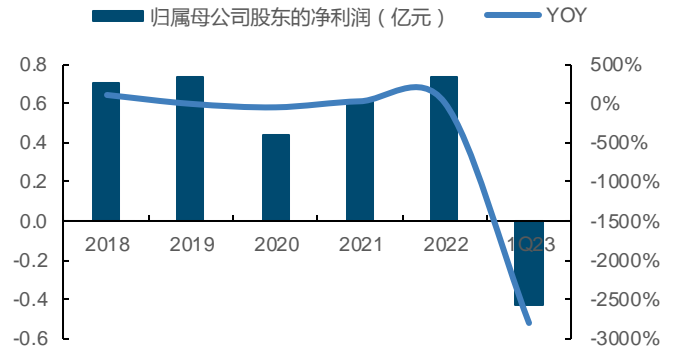


图表47: 瀚川智能营收加速增长



来源: Wind, 国金证券研究所

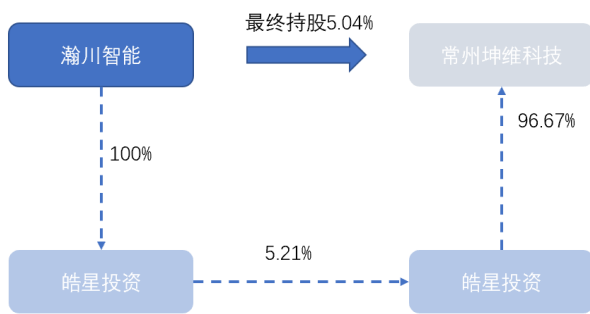
图表48: 近年汉威科技归母净利润情况



来源: Wind, 国金证券研究所

持有坤维科技 5.04% 股权, 进一步完善传感器领域的技术布局。瀚川智能于 2020 年 11 月通过全资子公司瀚川智能皓星投资入股常州坤维科技, 截至目前, 持股比例达 5.04%。坤维科技是国内六维力传感器核心供应商, 该产品在协作机器人末端附件领域市场占有率位居国内前列, 瀚川智能有望通过股权关系加深彼此合作, 进一步完善传感器领域技术布局。

图表49: 瀚川智能持股常州坤维科技 5.04% 股权



来源: 瀚川智能公告, 国金证券研究所

图表50: 坤维科技六维力传感器示意图



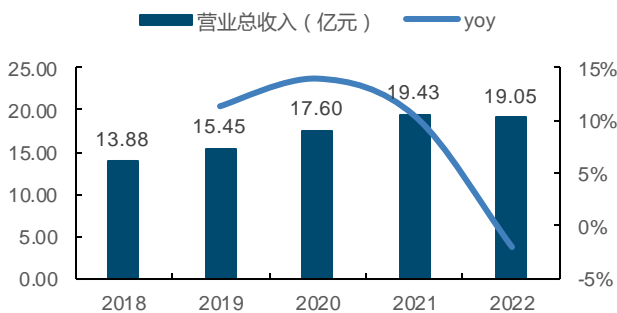
来源: 坤维科技官方公众号, 国金证券研究所

风险提示: 瀚川智能与坤维科技合作进展不及预期、换电行业竞争加剧、瀚川智能募投项目实施不及预期。

#### 4.4 中航电测: 军用智能测控龙头, 力传感产品品类丰富

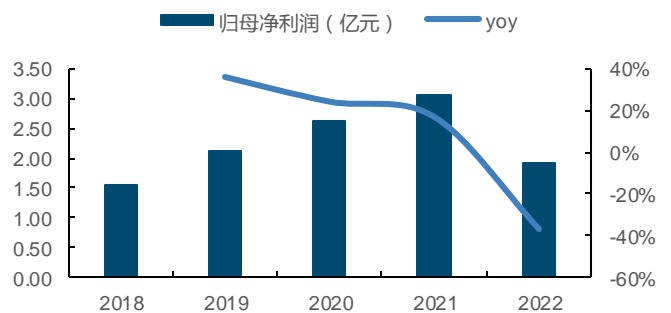
中航电测为国内智能军民用智能测控龙头。18-21 年, 中航电测营收、归母净利分别从 13.9/1.6 亿元增长至 19.4/3.1 亿元, 期间 CAGR 分别达到 11.8%/25.3%。22 年中航电测受到乘用车检测行业政策调整影响, 并加大研发投入, 营收、净利润有下滑。

图表51: 中航电测过去 5 年营收情况



来源: 中航电测公告, 国金证券研究所

图表52: 中航电测过去 5 年归母净利润情况

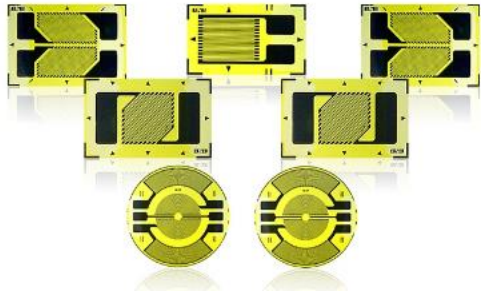


来源: 中航电测公告, 国金证券研究所



中航电测具有多款应变片、压力传感器、扭矩传感器。根据中航电测 22 年年报披露，中航电测传感控制业务开始进军机器人业务，未来有望受益人形机器人产业链对于力传感器需求放量。

图表53: 中航电测具有传感器所需的应变片



图表54: 中航电测具有多款扭矩传感器



来源：中航电测官网，国金证券研究所

来源：中航电测官网，国金证券研究所

风险提示：重组交易尚存在不确定性的风险，下游装备放量节奏不及预期的风险，产品导入机器人进展不及预期。

### 五、重点公司估值

考虑力传感器行业市场空间较大，且随着人形机器人产业发展有良好成长前景，建议重点关注柯力传感、汉威科技、瀚川智能、中航电测、昊志机电。

图表55: 重点公司估值

代码	公司	股价	EPS					PE				
			2021A	2022A	2023E	2024E	2025E	2021A	2022A	2023E	2024E	2025E
603662.SH	柯力传感	34.75	1.29	0.92	1.28	1.57	1.95	26.94	37.77	27.20	22.20	17.85
300007.SZ	汉威科技	19.24	0.87	0.85	1.15	1.12	1.49	22.11	22.64	16.66	17.14	12.95
688022.SH	瀚川智能	32.36	0.56	0.68	1.39	2.09	2.83	57.79	47.59	23.27	15.49	11.43
300114.SZ	中航电测	48.17	0.52	0.33	0.50	0.63	-	34.02	31.43	97.12	76.81	-

来源：Wind，国金证券研究所 注：PE、EPS 为 Wind 一致预期，时间截至 2023/07/07。



**行业投资评级的说明：**

- 买入：预期未来 3—6 个月内该行业上涨幅度超过大盘在 15%以上；
- 增持：预期未来 3—6 个月内该行业上涨幅度超过大盘在 5%—15%；
- 中性：预期未来 3—6 个月内该行业变动幅度相对大盘在 -5%—5%；
- 减持：预期未来 3—6 个月内该行业下跌幅度超过大盘在 5%以上。



**特别声明：**

国金证券股份有限公司经中国证券监督管理委员会批准，已具备证券投资咨询业务资格。

形式的复制、转发、转载、引用、修改、仿制、刊发，或以任何侵犯本公司版权的其他方式使用。经过书面授权的引用、刊发，需注明出处为“国金证券股份有限公司”，且不得对本报告进行任何有悖原意的删节和修改。

本报告的产生基于国金证券及其研究人员认为可信的公开资料或实地调研资料，但国金证券及其研究人员对这些信息的准确性和完整性不作任何保证。本报告反映撰写研究人员的不同设想、见解及分析方法，故本报告所载观点可能与其他类似研究报告的观点及市场实际情况不一致，国金证券不对使用本报告所包含的材料产生的任何直接或间接损失或与此有关的其他任何损失承担任何责任。且本报告中的资料、意见、预测均反映报告初次公开发布时的判断，在不作事先通知的情况下，可能会随时调整，亦可因使用不同假设和标准、采用不同观点和分析方法而与国金证券其它业务部门、单位或附属机构在制作类似的其他材料时所给出的意见不同或者相反。

本报告仅为参考之用，在任何地区均不应被视为买卖任何证券、金融工具的要约或要约邀请。本报告提及的任何证券或金融工具均可能含有重大的风险，可能不易变卖以及不适合所有投资者。本报告所提及的证券或金融工具的价格、价值及收益可能会受汇率影响而波动。过往的业绩并不能代表未来的表现。

客户应当考虑到国金证券存在可能影响本报告客观性的利益冲突，而不应视本报告为作出投资决策的唯一因素。证券研究报告是用于服务具备专业知识的投资者和投资顾问的专业产品，使用时必须经专业人士进行解读。国金证券建议获取报告人员应考虑本报告的任何意见或建议是否符合其特定状况，以及（若有必要）咨询独立投资顾问。报告本身、报告中的信息或所表达意见也不构成投资、法律、会计或税务的最终操作建议，国金证券不就报告中的内容对最终操作建议做出任何担保，在任何时候均不构成对任何人的个人推荐。

在法律允许的情况下，国金证券的关联机构可能会持有报告中涉及的公司所发行的证券并进行交易，并可能为这些公司正在提供或争取提供多种金融服务。

本报告并非意图发送、发布给在当地法律或监管规则下不允许向其发送、发布该研究报告的人员。国金证券并不因收件人收到本报告而视其为国金证券的客户。本报告对于收件人而言属高度机密，只有符合条件的收件人才能使用。根据《证券期货投资者适当性管理办法》，本报告仅供国金证券股份有限公司客户中风险评级高于C3级(含C3级)的投资者使用；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，不应被视为对特定客户关于特定证券或金融工具的建议或策略。对于本报告中提及的任何证券或金融工具，本报告的收件人须保持自身的独立判断。使用国金证券研究报告进行投资，遭受任何损失，国金证券不承担相关法律责任。

若国金证券以外的任何机构或个人发送本报告，则由该机构或个人为此发送行为承担全部责任。本报告不构成国金证券向发送本报告机构或个人的收件人提供投资建议，国金证券不为此承担任何责任。

此报告仅限于中国境内使用。国金证券版权所有，保留一切权利。

上海	北京	深圳
电话：021-60753903	电话：010-85950438	电话：0755-83831378
传真：021-61038200	邮箱：researchbj@gjzq.com.cn	传真：0755-83830558
邮箱：researchsh@gjzq.com.cn	邮编：100005	邮箱：researchsz@gjzq.com.cn
邮编：201204	地址：北京市东城区建内大街26号	邮编：518000
地址：上海浦东新区芳甸路1088号	新闻大厦8层南侧	地址：深圳市福田区金田路2028号皇岗商务中心
紫竹国际大厦7楼		18楼1806



**【小程序】**  
国金证券研究服务



**【公众号】**  
国金证券研究