

寻找人形机器人的确定性：旋转关节投资机遇拆解

报告要点

人形机器人零部件供应商有望深度受益于行业发展。在人形机器人的产业链中，主机厂具备了关节的“定义权”，具体表现为掌握了3点：1) 人形机器人自由度设计；2) 人形机器人关节方案设计；3) 关节布局位置设计。但基于规模效应和专业化分工，我们认为主机厂进行完全垂直整合的概率不大，“自主设计、外包生产”将是一种更可能的合作模式。将会有一批人形机器人的零部件供应商深度受益于行业发展，与主机厂共同成长。

旋转关节具备高价值量和高确定性，是建议优先关注的投资方向。关节模组是人形机器人成本的重要组成，具备高价值量特点。而目前主机厂的方案均使用旋转关节，从技术路线角度，旋转关节具备高度确定性。

旋转关节方案包括三类：刚性驱动器、弹性驱动器、准直驱驱动器。其中弹性关节的引入会导致控制算法复杂，并增加硬件成本，因此产业中使用的较少。刚性关节方案可以使用大减速比减速器，因此可以有更大的扭矩、更好的精度，但增加了力传感器导致成本较高，并且耐冲击性差。准直驱方案可以用电流环做力控，但只能用小减速比减速器，输出扭矩较小。早期准直驱方案主要用于四足机械狗，近几年随着扭矩增大也广泛应用于人形机器人。

人形机器人的关节要求大扭矩，目前一般采用无框力矩电机，轴向磁通电机未来或有机会。目前主流选择是无框力矩电机，其设计生产技术较为成熟，但此前市场需求不大，限制了无框力矩电机的发展。提高扭矩的另一个选择是使用轴向电机，轴向电机可以提供的扭矩密度比径向电机高30%，特别适合于高效率、高转矩密度场合。目前轴向电机在散热、制造工艺、产业链成熟度方面仍有不足，但部分厂商已经在布局轴向电机。

人形机器人的减速器以谐波和行星为主，两种方案互有优劣，预计未来将依据整机设计需求搭配使用。总体来说，强调大扭矩、高精度、小空间的关节会采用谐波减速器，强调高效率、低成本、空间大小不敏感的关节会采用行星减速器。

高精度、高成本方案倾向使用力传感器。电流环方案是利用关节电流估算力矩大小，这种方法不需要安装额外的传感器，但精度较低，大约有 $\pm 10\%$ 的误差，并且和大减速比减速器不兼容。力传感器方案的精度较高，可以和大减速比减速器兼容，缺点是增加了成本。我们认为低成本方案会更倾向使用电流环控制，而高精度、高成本的人形机器人则倾向使用传感器测量。

投资建议：人形机器人会带动整个工业自动化板块市场总需求大幅增长，行业公司有望普遍收益。建议重点关注客户合作关系。从产业链角度，建议重点关注关节模组总成、轴向电机、减速器、传感器。

风险提示：

1. 人形机器人处于产业初期，商业化进度仍然具有不确定性，相关企业的业绩释放可能不及预期。
2. 人形机器人的零部件方案仍然在快速迭代，尚未完全确定，技术路线存在变化风险。

机械设备

评级：看好

日期：2025.02.13

分析师 祁岩

登记编码：S0950523090001

☎：010-56307033

✉：qiyen1@wkzq.com.cn

联系人 周越

☎：13167229763

✉：zhouyue@wkzq.com.cn

行业表现

2025/2/12



资料来源：聚源

相关研究

- 《高端制造产业跟踪（1月）：DeepSeek爆火预示着投资方向的何种变化？》(2025/2/7)
- 《高端制造产业跟踪（12月）：OpenAI重启机器人，产业化再加速》(2025/1/3)
- 《高端制造产业跟踪（11月）：Optimus人形机器人手部有新突破，华为入局人形机器人加速其落地》(2024/12/16)
- 《碳化硅陶瓷渣浆泵：开启行业弯道超车新引擎》(2024/11/22)
- 《高端制造产业跟踪（10月）：三大机遇驱动高端制造板块迎来利好》(2024/11/11)
- 《迈向高质量发展——竞争维度提升带来工程机械竞争格局优化》(2024/11/7)
- 《政策逐步加码，重视市场拐点》(2024/10/14)
- 《何为高端制造的新质生产力？——借由三中全会把脉高端制造未来》(2024/9/12)
- 《高端制造产业跟踪（8月）：经济仍呈弱复苏态势，船舶、工程机械等行业继续受益于设备更新》(2024/9/9)
- 《关注一带一路和平台型企业》(2024/9/4)

并购家 免费行业报告网

IPOIPO.CN 每日更新 不用注册会员 无广告 永久免费

内容目录

一、人形机器人零部件供应商有望深度有益于行业发展	4
(一) 主机厂掌握人形机器人关节的“定义权”	4
(二) “自主设计、外包生产”将是人形机器人产业链合作模式	6
二、旋转关节的方案拆解	7
(一) 旋转关节具备高价值量、高确定性	7
(二) 旋转关节以刚性驱动器和准直驱驱动器为主	7
旋转关节的发展经历了刚性、柔性、准直驱的发展历程	7
当前方案以刚性和准直驱关节为主。	12
(三) 大扭矩成核心指标，无框力矩电机和轴向电机需求爆发	13
大扭矩是人形机器人电机最核心指标	13
无框力矩电机是当前主流方案	13
轴向电机或迎来爆发增长	14
(四) 减速器的选择：谐波还是行星？	16
人形机器人关节以谐波和行星减速器为主	16
行星减速器成本优势显著	17
谐波减速器在大扭矩、高精度、小空间优势明显	18
(五) 力/力矩传感器是必须吗？	19
柔顺控制需要感知力的大小	19
力信号的布局方案：末端力控和关节力控	22
力信号的感知方案：电流环和传感器	22
三、投资建议	24
风险提示	24

图表目录

图表 1: yaw、pitch、roll 的示意图	4
图表 2: ARTEMIS 设计的下肢关节参数	4
图表 3: ARTEMIS 所使用电机参数	5
图表 4: IIT 设计的能承受 10kg 负载的机器人上肢关节参数	5
图表 5: ARTEMIS 髋部放置的巨大电机	6
图表 6: 傅利叶智能 GR-1 的髋部也放置了巨大电机	6
图表 7: 特斯拉 Optimus 使用连杆传动方案	6
图表 8: ARTEMIS 运用了连杆传动方案	6
图表 9: 人形机器人驱动器的类型和历史	8
图表 10: 刚性驱动器结构示意图	8
图表 11: hill 肌肉三元素力模型	9
图表 12: SEA 弹性驱动器	9
图表 13: SEA 弹性驱动器结构简化图	9
图表 14: 回转型弹性元件	10
图表 15: 直线型弹性元件和回转型弹性元件性能对比	10
图表 16: 并联驱动器结构图	10

图表 17: 并联驱动器实物图.....	10
图表 18: 离合驱动器结构图.....	11
图表 19: D.F.B. Haeufle 设计的离合驱动器.....	11
图表 20: 多模态驱动器.....	11
图表 21: 四种弹性驱动器特性对比.....	11
图表 22: 准直驱驱动器结构示意图.....	12
图表 23: CYTEC 力矩电机结构.....	13
图表 24: 轴向磁通电机爆炸图.....	14
图表 25: 径向电机和轴向电机的比较.....	14
图表 26: 轴向磁通电机专利数量.....	15
图表 27: 盘毂动力的轴向电机拥有高扭矩和高效率.....	15
图表 28: 轴向电机可以做的更加薄.....	15
图表 29: 盘毂动力的轴向电机指标已经超过技术路线图 2035 目标.....	15
图表 30: 达闼科技推出 SCA2.0 非晶轴向电机.....	16
图表 31: RV 减速器、谐波减速器占据精密减速器的大部分市场.....	16
图表 32: 三种精密减速器参数对比.....	17
图表 33: 精密行星减速器结构示意图.....	17
图表 34: 中大力德 40ZDE(F)系列精密行星减速器不同级数参数.....	17
图表 35: 全球行星减速器市场规模（百万美元）.....	18
图表 36: 全球行星减速器市场格局.....	18
图表 37: 中国行星减速器市场格局.....	18
图表 38: 谐波减速器结构示意图.....	19
图表 39: 谐波减速器运行示意图.....	19
图表 40: 中国谐波减速器市场规模(亿元).....	19
图表 41: 2023 谐波减速器市场份额.....	19
图表 42: 机器人被动柔顺装置 RCC 示意图.....	20
图表 43: 阻抗控制策略的控制框图.....	20
图表 44: 力位控制策略的控制框图.....	20
图表 45: 增广智能的 SoftForce3.0 可以实现精准力控.....	21
图表 46: 基于 ZMP 的几种点-质量模型.....	21
图表 47: 通过点阵计算 ZMP（左）和通过六维力计算 ZMP（右）.....	21
图表 48: 基于 MPC+WBC 模型的四足机械狗控制框架图.....	22
图表 49: 末端力控和关节力控的对比.....	22
图表 50: MX-106 关节有 225: 1 的减速比, 但反驱透明度差.....	23
图表 51: ARTEMIS 关节搭配 8:1 减速比齿轮关节具有较好的反驱透明度.....	23
图表 52: 六维力传感器和关节扭矩传感器.....	23
图表 53: 六维力传感器出货量（台）.....	24
图表 54: 六维力传感器市场格局.....	24

一、人形机器人零部件供应商有望深度受益于行业发展

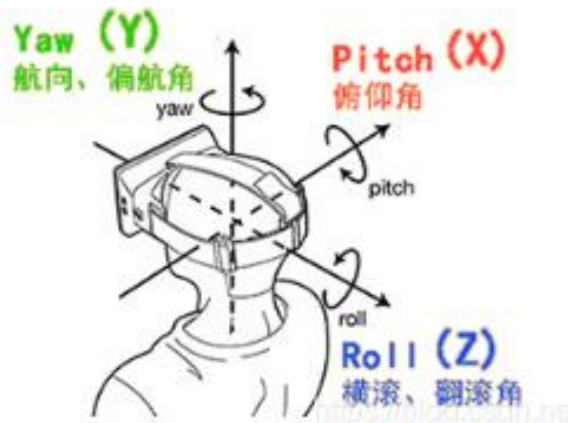
（一）主机厂掌握人形机器人关节的“定义权”

从人形机器人的设计流程来看，一般是先制定人形机器人本体的设计目标，然后再拆分到各个零部件的设计。这会导致关节设计和人形机器人本体设计相关，关节模组并不是简单的通用标准品。关节的“定义权”掌握在人形机器人厂商手中。这种“定义权”表现为设计过程中的三个环节：1) 人形机器人自由度设计；2) 人形机器人关节方案设计；3) 关节布局位置设计。

1、人形机器人的自由度设计方案

当前主流人形机器人关节自由度（不含末端）在 20~32 个不等。一种常见的关节方案是在臀部设置 3 个自由度（包括 pitch、yaw、roll），在膝盖设置 1 个自由度，脚踝处设置 1~2 个自由度，躯干和盆骨设置 0-3 个自由度。

图表 1: yaw、pitch、roll 的示意图



资料来源：CSDN，五矿证券研究所

臀部：一般以偏航关节（yaw）为第一关节，这样可以使偏航电机布置在盆骨部位；滚动关节（roll）一般为第二关节，俯仰关节（pitch）为最后一个关节。Pitch 关节需要的力量比较大，放在最后可以更容易的布置在大腿位置。

膝部：膝关节是所有关节中对力/力矩需求最大的，因为膝关节是抵抗站立时重力的关键。

脚踝：2 个关节可以给脚提供适当的自由度，帮助适应复杂凹凸的地形。1 个关节也是常见的设计。

躯干和盆骨：0~3 个自由度都是可以的。其中 pitch 的自由度可以弥补单纯依靠臀部 pitch 活动范围不足的问题；yaw 的自由度可以增加上半身的活动范围；roll 的自由度可以帮助平衡身体，同时增加腿部的离地间隙。如果躯干是 0 自由度，那么主要依靠臀部的 pitch 关节来控制躯体，但这样躯体和腿部不能独立运动。

2、人形机器人的关节参数设计

人形机器人主机厂掌控关节参数的“定义权”。开发流程中，主机厂决定了自由度之后需要根据机器人本体的设计要求，计算出对应关节所需的活动范围、峰值扭矩、转动速度，并进一步设计关节。

图表 2: ARTEMIS 设计的下肢关节参数

关节部位	活动空间 (°)	峰值扭矩 (Nm)	关节转动速度 (rad/s)
髋-yaw	-90~45	85	25
髋-roll	-45~45	85	25
髋-pitch	-133~78	250	23
膝-pitch	19~160	250	23
脚踝-pitch	-70~50	25	30

资料来源: Design of a Highly Dynamic Humanoid Robot (Taoyuanmin Zhu), 五矿证券研究所

理论上由于各个关节的情况不同, 每个关节都单独设计在性能上是最优的, 但这样会失去经济性。一个折中的办法是“模组化”, 即把全身关节分为几种类型。ARTEMIS 把全身共计 20 个自由度分为 5 类, 具体参数如图所示。可以看出臀部的 pitch 和膝关节对扭矩的需求最大, 达到了 250Nm。特斯拉在这两个位置则使用了输出力比较大的线性关节。

图表 3: ARTEMIS 所使用电机参数

	髋 roll	髋 yaw	髋和脚踝 pitch	脚踝 pitch	手臂	头
重量 (g)	850	850	3000	350	300	250
齿轮减速比	14.5	14.5	5.9	50.3	19.2	9
峰值扭矩(Nm)	85	85	250	25	32	12
连续扭矩 (Nm)	30	30	80	8	8	3
转速 (rad/s)	25	25	23	30	30	50
转动惯量 (kgm ²)	0.049	0.049	0.088	0.020	0.008	0.001

资料来源: Design of a Highly Dynamic Humanoid Robot (Taoyuanmin Zhu), 五矿证券研究所

关节电机扭矩是观察核心指标之一。对机器人性能要求越高, 往往对关节电机的扭矩要求越大。所有关节之中, 一般膝关节对的扭矩要求最高, 决定了机器人的整机负载。MIT 设计了一款可以做空翻的高性能人形机器人 MIT humanoid, 所有关节中也是膝关节的扭矩最高, 达到 136Nm。膝关节的扭矩要求和机器人整机质量相关。MIT humanoid 的重量只有 21kg, 所以膝关节扭矩也只有 136Nm。ARTEMIS 的重量达到 37kg, 所以关节最大扭矩达到了 250Nm。

上肢关节中肩部和腰部位置需要的扭矩最大, 影响机器人的单臂负载。针对上肢部分, 意大利技术研究院 IIT 设计了一款可以承受 10kg 负载的上肢, 其中肩部和腰部位置需要的扭矩最大, 对应关节最大扭矩为 147Nm, 连续扭矩 90.4Nm。肩部的旋转关节、肘部关节最大扭矩也是 147Nm, 但连续扭矩为 52.9Nm。腕部关节的扭矩需求比较小。

图表 4: IIT 设计的能承受 10kg 负载的机器人上肢关节参数

序号	关节运动	活动空间 (度)	减速比	峰值扭矩 (Nm)	持续扭矩 (Nm)	峰值功率 (W)	持续功率 (W)	质量(kg)	最大转动速度 (rad/s)
1	肩部屈曲/伸展	[-95,195]	160	147	90.4	837	480	1.32	5.7
2	肩部外展/内收	[0,200]	160	147	90.4	837	480	1.32	5.7
3	肩部旋转	[-150,150]	160	147	52.9	1286	432	1.15	8.2
4	肘部	[-20,145]	160	147	52.9	1286	432	1.15	8.2
5	前臂旋转	[-150,150]	100	55	17.8	640	189	0.87	11.6
6	前臂屈曲/伸展	[-90,90]	100	55	17.8	640	189	0.87	11.6
7	手腕旋转	[-150,150]	100	27	9.2	556	171	0.74	20.3
8	腰部旋转	[-80,80]	160	147	90.4	837	480	1.32	5.7

资料来源: Development of a Human Size and Strength Compliant Bi-Manual Platform for Realistic Heavy Manipulation Tasks (Lorenzo Baccelliere), 五矿证券研究所

3、人形机器人关节的布局设计

受限於四肢的空间有限，使机器人的关节电机远离关节位置是一种常见的方法。电机尽量往靠近质心的位置放置，这样还可以减少腿部的惯性，更有利于快速行走和能量利用。

图表 5：ARTEMIS 髋部放置的巨大电机



资料来源：Design of a Highly Dynamic Humanoid Robot (Taoyuanmin Zhu)，五矿证券研究所

图表 6：傅利叶智能 GR-1 的髋部也放置了巨大电机



资料来源：傅利叶智能，五矿证券研究所

为了实现这一目的，会用到一些传动结构，包括连杆、皮带、链条、线缆等。其中连杆传动是人形机器人中一种常见方案。但是当关节角度接近奇异点时，连杆力迅速增加往往会超过结构承载上限，所以需要对运动范围进行一定的限制。ARTEMIS 机器人的下肢就采用了 5-Dof 的设计方案，并且借助连杆传动方案把电机尽可能向臀部集中，减少了腿部末端的质量。

图表 7：特斯拉 Optimus 使用连杆传动方案



资料来源：特斯拉，bilibili，五矿证券研究所

图表 8：ARTEMIS 运用了连杆传动方案



资料来源：Design of a Highly Dynamic Humanoid Robot (Taoyuanmin Zhu)，五矿证券研究所

（二）“自主设计、外包生产”将是人形机器人产业链合作模式

在汽车产业链中，汽车零部件的定制化属性强，生产的规模化效应强，零部件制造商从产品立项就深度参与产品研发设计，双方形成了密切的合作关系。汽车零部件供应商通过切入头部 OEM、切入主力放量车型，实现收入的大幅增长。在这种合作关系中，OEM 承担了产品的“定义权”，对销量有绝对性的影响力，在合作中也占据了主导位置。零部件厂商通过精益管理、技术创新、快速响应，与 OEM 形成更稳定的合作关系，逐步提升市场份额。

我们认为未来人形机器人的产业链合作关系将会类似汽车。

首先，人形机器人主机厂占据了产品的“定义权”，在合作中处于主导地位。人形机器人的产品设计是一个“top-down”的过程。相比零部件厂商，主机厂更贴近终端需求，因此主机厂主导了应用场景、设计目标，也决定了人形机器人的设计方案和零部件的选型。

其次，我们对人形机器人的预期是一个大规模标准化的硬件产品，这也意味着遵循制造业的规模制造效应。采用外包生产可以实现更强的规模效应，也可以减少主机厂的资本开支，使主机厂专注于产品定义和 AI 研发。

基于以上两点，我们判断行业未来将形成“自主设计、外包生产”的合作模式。蓝思科技已经为智元的灵犀 X1 人形机器人批量交付相关产品，并参与了其核心部件的生产组装和测试。将会有一批人形机器人的零部件供应商深度受益于行业发展，与主机厂共同成长。

二、旋转关节的方案拆解

（一）旋转关节具备高价值量、高确定性

在人形机器人众多零部件中，建议首先关注旋转关节。

机器人关节是机器人的核心零部件，是硬件降本的核心。机器人关节也常被称为机器人驱动器、执行器（Actuator）。在工业机器人中，以减速器、伺服电机、控制器为代表的三大件占据工业机器人总成本的 35%、20%、15%，合计占比高达 70%。而人形机器人拥有十几个到几十个不等的自由度，关节模组是成本的重要组成部分。人形机器人的大规模推广，必然以成本的大幅下降为前提。只有当人形机器人的成本比人更低，人形机器人的商业价值才得以显现。正因如此，马斯克提出希望能够把成本控制在 2 万美元以内，而实现这一目标，关节降本至关重要。

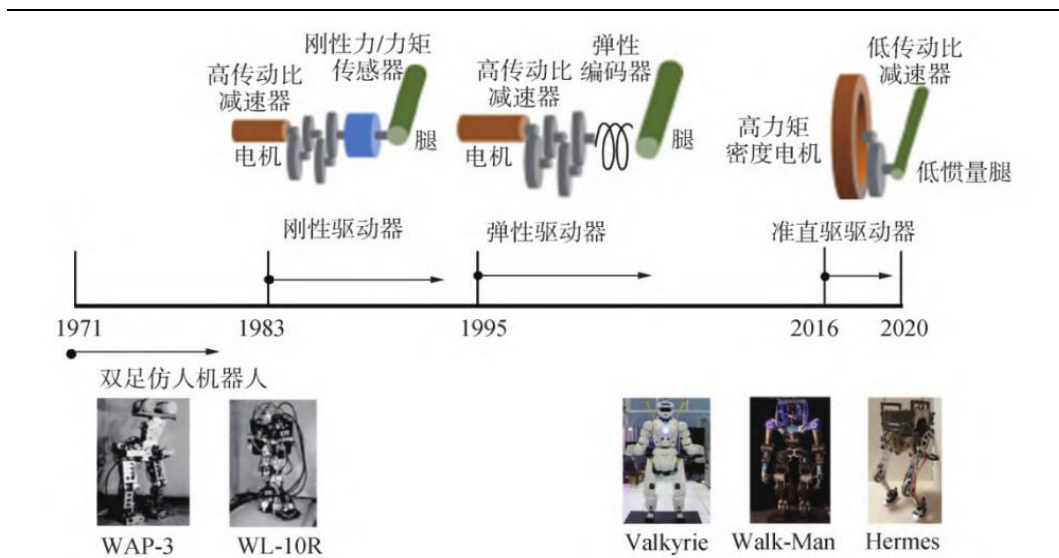
从技术方案角度来看，旋转关节具备高度的确定性。人形机器人的关节包括 2 种类型：旋转关节和线性关节。旋转关节成本低、控制算法相对简单；线性关节具备更高的精度和推力，但成本高、控制算法难度高。从主机厂的方案设计来看，所有厂商均采用旋转关节，在价值量高的同时具备最强的确定性。

（二）旋转关节以刚性驱动器和准直驱驱动器为主

旋转关节的发展经历了刚性、柔性、准直驱的发展历程

人形机器人对关节模组的功率密度、高响应性、高能量利用效率和耐冲击性有很高的要求。在学术界，人形机器人的关节模组研究热点经历了从刚性驱动器到柔性驱动器，再到准直驱驱动器的历程。

图表 9：人形机器人驱动器的类型和历史

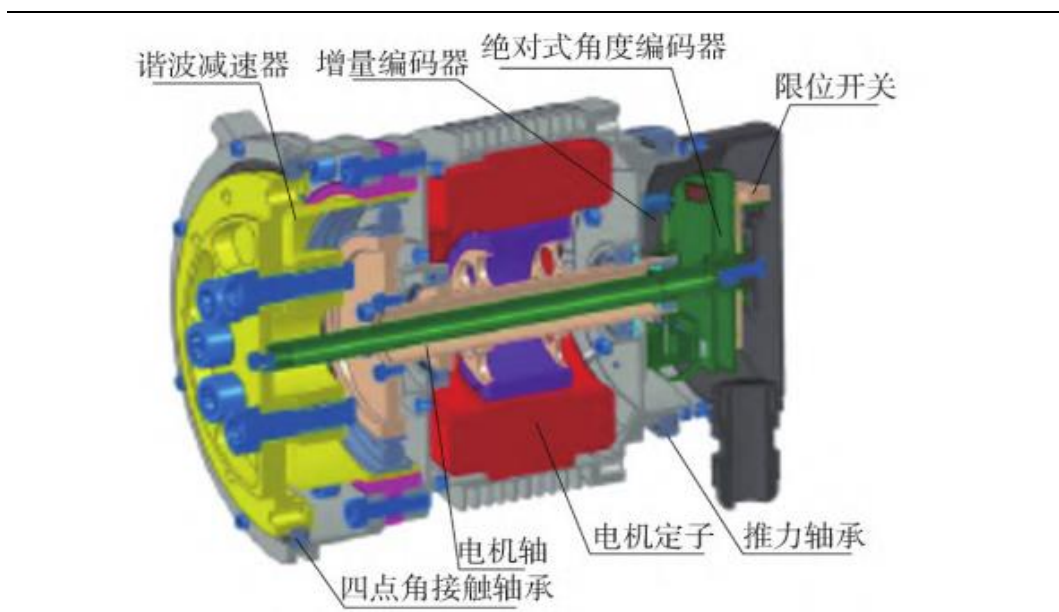


资料来源：国内外双足人形机器人驱动器研究综述（丁宏钰、石照耀、岳会军、于瀚、张攀），五矿证券研究所

刚性驱动器

刚性驱动器主要由电机、高传动比减速器、编码器、力矩传感器（可选）和控制板等组成。从 1983 年早稻田大学的 WL-10R 机器人开始，刚性驱动器就被广泛用于人形机器人。刚性驱动器的缺陷在于：1) 然而由于元器件工艺和原理上的限制，传统刚性驱动器的功率密度很难达到生物肌肉的水平 500 W/kg，2) 解决不了机器人受外部冲击时零部件强度问题。

图表 10：刚性驱动器结构示意图

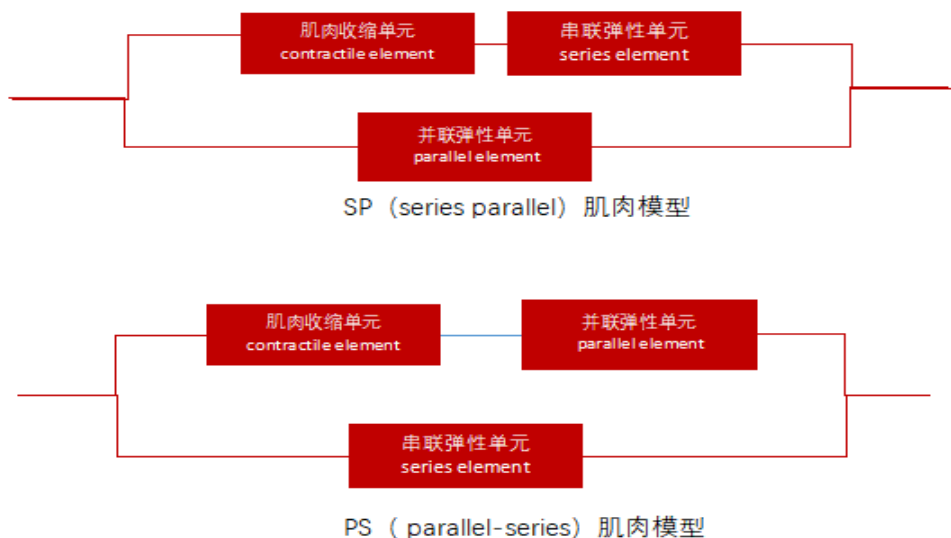


资料来源：国内外双足人形机器人驱动器研究综述（丁宏钰、石照耀、岳会军、于瀚、张攀），五矿证券研究所

弹性驱动器

1995 年，麻省理工学院的 Pratt 等提出了弹性驱动器 SEA (series elastic actuator) 的概念。弹性驱动器的原理主要借鉴 Hill 肌肉三元素力学模型，主要由肌肉收缩单元、串联弹性单元、并联弹性单元组成，并形成两种不同的肌肉模型。根据不同的模型，驱动器可以分为串联式弹性驱动器和并联式弹性驱动器，并在此基础上进一步延伸，发展出离合、多模态等弹性驱动器类型。

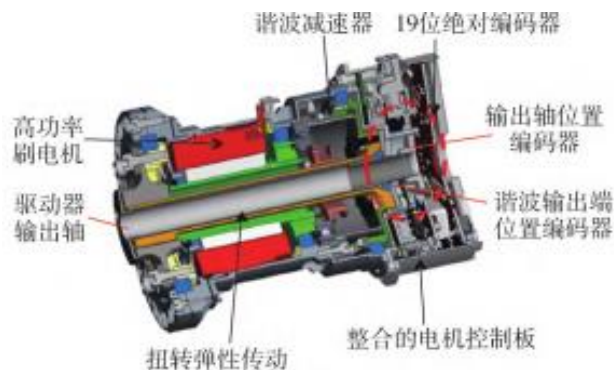
图表 11: hill 肌肉三元素力模型



资料来源：国内外双足人形机器人驱动器研究综述（丁宏钰、石照耀、岳会军、于渤、张攀），五矿证券研究所

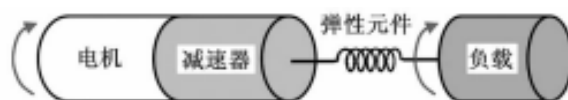
串联驱动器 (Series elastic actuator, SEA): 串联驱动器在驱动元件和负载间增加弹性单元。在跳跃过程中 SEA 可以吸收触地瞬间的冲击，储存能量并在离地时释放，在实现缓冲的同时提高关节模组的瞬时输出扭矩。但由于弹性元件引入，系统变为欠驱动系统，因此运动控制精度较低。

图表 12: SEA 弹性驱动器



资料来源：国内外双足人形机器人驱动器研究综述（丁宏钰、石照耀、岳会军、于渤、张攀），五矿证券研究所

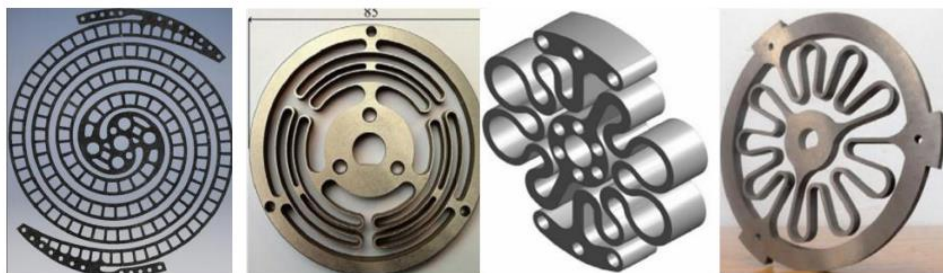
图表 13: SEA 弹性驱动器结构简化图



资料来源：基于 SEA 的机器人仿肌弹性驱动关节研究（何福本、梁延德、孙捷夫、郭超），五矿证券研究所

在弹性关节中，弹性元件起到了传递动力、吸收外部冲击、反馈驱动与负载间差值的重要作用，是最重要组成部分。弹性元件可以分为直线型弹性元件和回转型弹性元件。其中直线型弹性元件主要是各类直线弹簧，回转型弹性元件则是通过角度变形为系统提供阻抗或者能量输入。直线型弹性元件结构简单、一般无需加工、变形范围大，但空间占用多、能量密度低。回转型弹性元件需要定制，变形范围小，但空间占用少、能量密度高。

图表 14：回转型弹性元件



资料来源：基于发条弹簧的离合式弹性驱动器研究（湛旭磊），五矿证券研究所

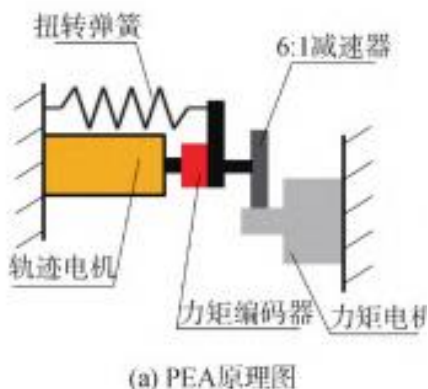
图表 15：直线型弹性元件和回转型弹性元件性能对比

	直线型弹性元件	回转型弹性元件
标准化程度	成系列、成标准	标准化程度不高
加工难度	一般无需加工	较高，一般需要定制
变形范围	较大	仅能在小范围变形
空间占用	辅助结构复杂，空间占用多	结构紧凑，空间占比小
能量密度	较低	较高

资料来源：基于发条弹簧的离合式弹性驱动器研究（湛旭磊），五矿证券研究所

并联驱动器（Parallel elastic actuator, PEA）：在驱动元件基础上增加并联的弹性元件，共同作用于被驱动对象，是通过控制驱动元件来调节并联弹性元件的能量储存和释放。并联弹性元件可以实现能量存储和释放的作用，可以显著提高输出功率，降低能量损耗。但 PEA 的能量只能在一个方向储存，储存和释放时间不可控，并且有能量存储的静止状态下存在弹性力施加在驱动单元。

图表 16：并联驱动器结构图



资料来源：国内外双足人形机器人驱动器研究综述（丁宏钰、石照耀、岳会军、于渤、张攀），五矿证券研究所

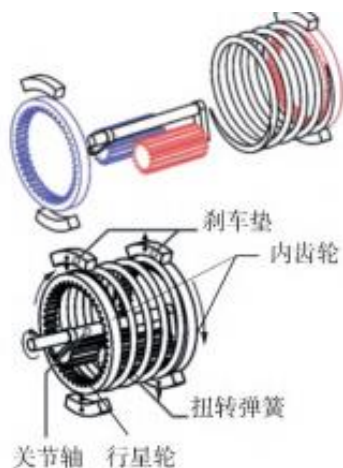
图表 17：并联驱动器实物图



资料来源：国内外双足人形机器人驱动器研究综述（丁宏钰、石照耀、岳会军、于渤、张攀），五矿证券研究所

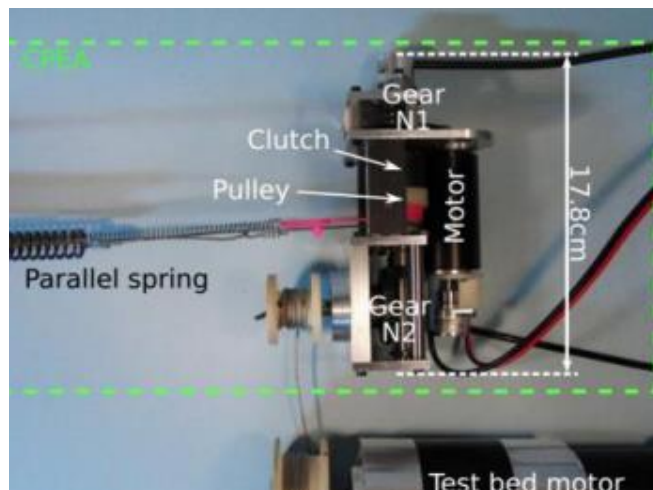
离合驱动器（Clutched elastic actuator, CEA）：离合弹性驱动器是在弹性元件位置增加离合装置，控制弹性元件开合，以控制弹性元件的能量储存和释放。由于离合装置的引入，CEA 大幅提高了能量效率。D.F.B. Haeufle 设计出一款 CEA，能量消耗降低至 20%，峰值扭矩仅需原来的 1/3。CEA 尽管在单个驱动器上取得了效率优势，但因为增加了额外质量和惯量，在机器人整机层面的优势并不明显。

图表 18：离合驱动器结构图



资料来源：国内外双足人形机器人驱动器研究综述（丁宏钰、石照耀、岳会军、于渤、张攀），五矿证券研究所

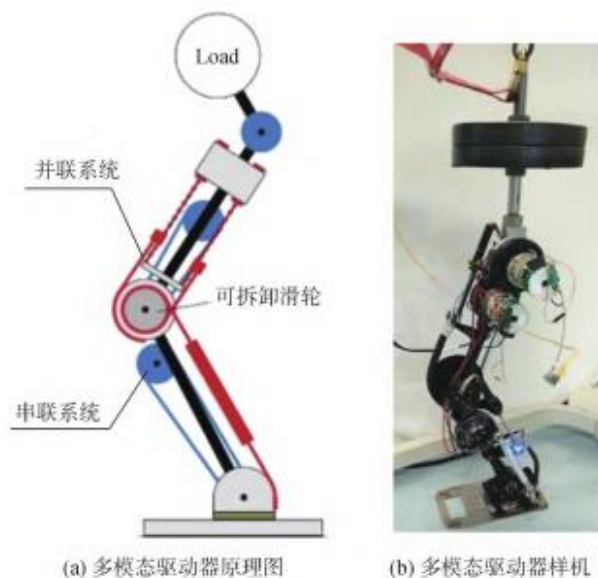
图表 19：D.F.B. Haeufle 设计的离合驱动器



资料来源：基于发条弹簧的离合式弹性驱动器研究（湛旭磊），五矿证券研究所

多模态驱动器（Multi-mode elastic actuator, MEA）针对单一驱动器不能满足机器人瞬时高输出扭矩、能量效率和抗冲击能力的问题，提出了多模态弹性驱动器的概念。多模态弹性驱动器集合了单一驱动器的优点，可以很好地实现储能和节能。但整体结构复杂，系统建模和控制难度提升。

图表 20：多模态驱动器



资料来源：国内外双足人形机器人驱动器研究综述（丁宏钰、石照耀、岳会军、于渤、张攀），五矿证券研究所

图表 21：四种弹性驱动器特性对比

	串联驱动器 (SEA)	并联驱动器 (PEA)	离合驱动器 (CEA)	多模态驱动器 (MEA)
结构复杂度	较简单	较简单	较复杂	复杂
装备难度	较难	简单	简单	难
控制难度	复杂	简单	简单	复杂
控制精度	较差	好	较好	一般
功率调制效果	较好	较好	好	好

能量利用率	低	较高	高	高
安全性能	好	差	较好	好
成本	较低	低	较低	高
增益效果	较差	较好	好	好

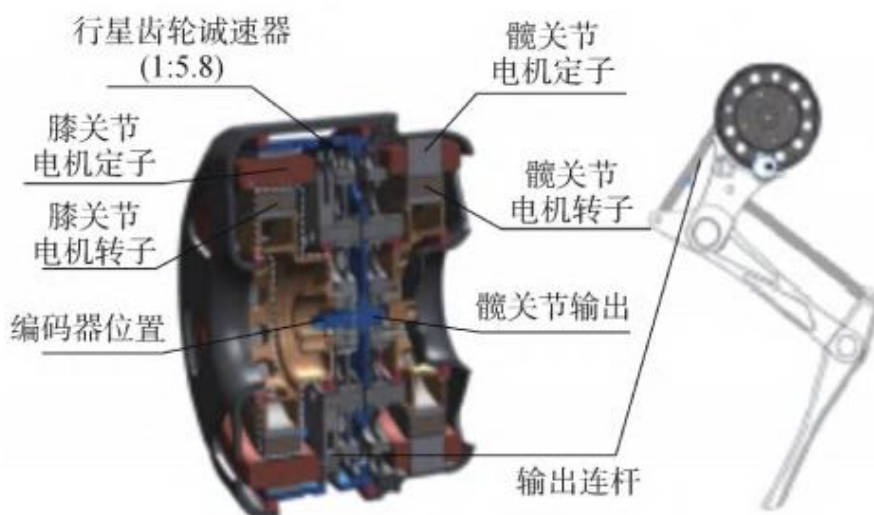
资料来源：基于发条弹簧的离合式弹性驱动器研究（湛旭磊），五矿证券研究所，五矿证券研究所

本体驱动器（proprioceptive actuator, PA）

本体驱动器由 Wensing 等人于 2016 年提出，也被称为准直驱驱动器（Quasi Direct Drive, QDD）。准直驱驱动器由高扭矩密度的电机、小减速比减速器以及绝对式编码器组成。MIT 的 cheetah 四足机器人就搭载了准直驱驱动器。

由于准直驱驱动器使用了低减速比的减速器，所以需要更大扭矩的电机。电机的最大输出扭矩与转子直径的平方成正比，因此径向上增加电机尺寸的收益要大于轴向增加尺寸，所以电机一般采用大直径、低轴径的设计。而且由于中空结构，可以将行星减速器放置于中间，进一步提升了驱动器的集成度。

图表 22：准直驱驱动器结构示意图



资料来源：国内外双足人形机器人驱动器研究综述（丁宏钰、石照耀、岳会军、于渤、张攀），五矿证券研究所

当前方案以刚性和准直驱关节为主。

关于人形机器人的关节选型，我们总结观点如下：

- **弹性关节难成主流，当前以刚性和准直驱关节为主。**尽管弹性关节相关论文在学术界很多，但产业化的机器人方案中，使用弹性关节的较少。弹性关节的核心优势是引入了弹性元件，因此有更好的柔顺控制能力。但随着软件控制技术的发展，可以通过控制算法达到主动柔顺的效果，采用弹性关节的必要性减弱。弹性关节可以放大峰值扭矩的优势，如果机器人不进行跑跳等高强度运动，实际也很难用到。但因为引入了弹性元件，控制算法会变得非常复杂，硬件成本也高。
- **刚性关节方案搭配高减速比的谐波减速器，可以提供更大的扭矩、更好的精度，是这一套方案的重要优势。**这套方案缺点在于 1) 谐波减速器和力传感器都不耐冲击；2) 相比 QDD 方案，谐波减速器和电机串联排布，关节长度更大；3) 谐波减速器的引入很难去做电流环力控，一般要加入力传感器。由于谐波减速器本身价格就比较高，还必须引入

力传感器，因此这一套方案的成本是比较高的。

- **准直驱方案**，业内常称为 **QDD 方案**，是一套集成度高、体积小、非常具有成本优势的解决方案。QDD 方案使用了低减速比方案，可以用电流环做力控，节省了力矩传感器成本。低减速比的方案有更强的抗冲击力，可以在不损坏齿轮的前提下把冲击力传递回电机。这套方案的缺点是由于采用了低减速比的减速器，输出扭矩大小、精度都比较低。早期的 QDD 方案输出扭矩很难支撑人形机器人的重量，主要用于四足机械狗。现在 QDD 方案的输出扭矩有了明显提升，也开始应用于人形机器人。

（三）大扭矩成核心指标，无框力矩电机和轴向电机需求爆发

大扭矩是人形机器人电机最核心指标

人形机器人对电机的要求有以下特点：

- 1) 人形机器人关节电机的安装空间狭小，同时又要求输出转矩较大。
- 2) 动态性能好，高带宽。带宽是指伺服机构可以追随到的最高正弦波命令频率，代表了追踪快速变化命令的能力。带宽越高，机器人的反应速度越快，可以处理的任务越复杂。
- 3) 低转动惯量。电机转动惯量的大小决定了电机在启动、停止和改变转速等方面的反应速度，同时还决定了电机对外部负载及扰动的响应性能。转动惯量越大，电机越难改变自己的转速。
- 4) 低质量。人形机器人全身关节数量众多，关节质量约占总重量的一半，因此减轻电机质量也是机器人减重的重要途径。

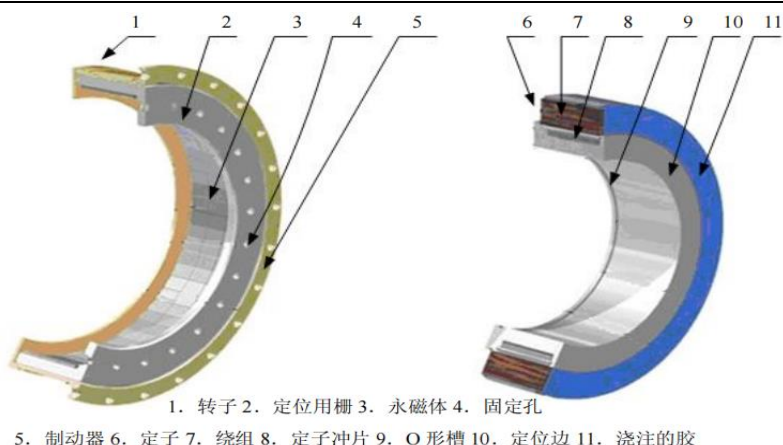
上述几点中，大扭矩是核心需求，因此力矩电机成为目前业内主流选择。

无框力矩电机是当前主流方案

力矩电机在 20 世纪 50 年代被研发出来，是一种特殊类型的永磁无刷电机，具有低速大力矩、体积小、结构紧凑、质量轻、转动惯量小、启动电压低、空载电流小的特点。一般的直流伺服电机转速都在几千转，不适合低速运行，更不能堵转。而力矩电机的转速较低，在低速甚至零速时仍能保证稳定的转矩输出，并且可以长时间堵转。

人形机器人用的无框力矩电机没有机壳，只有定子和转子 2 个部件，相较于有框电机，无框电机配置灵活，安装方便，更适合高集成度设计。

图表 23：CYTEC 力矩电机结构



资料来源：力矩电机的电磁设计及应力场分析，陈思儒，五矿证券研究所

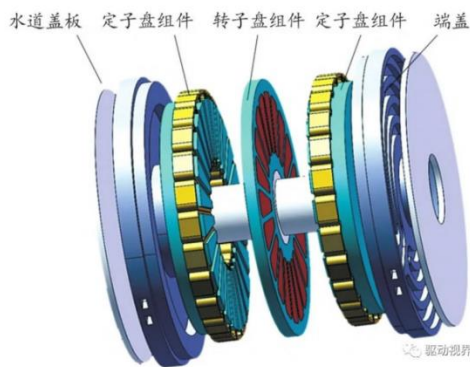
力矩电机的堵转转矩比较高，堵转电流较小，所以可以承受一定时间的堵转运行，但是所产生的发热量非常大。力矩电机使用的磁材主要是钕铁硼，钕铁硼温度每升高 1 摄氏度，钕磁铁的磁强度就会降低 0.1% 左右。当温度超过一定的值，还会发生不可逆的磁损失。因此一些力矩电机在使用时会搭配风冷/液冷。

力矩电机的设计生产已经比较成熟，没有太大难点，但因为之前市场需求不大，所以市场规模受限。国际上生产力矩电机的厂家包括奥地利 AVS Mechatronics GmbH、美国 Kollmorgen、德国 TQ Robodrive、瑞士 Maxon Motor 等公司。国内步科股份、昊志机电、伟创电气等都有相关产品。

轴向电机或迎来爆发增长

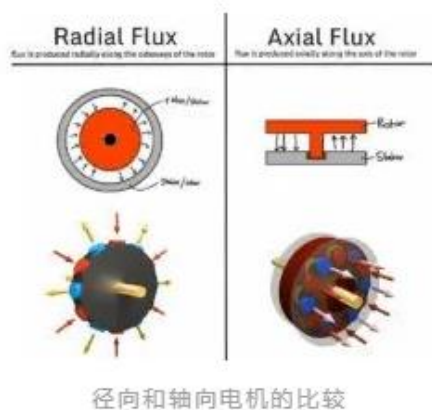
提高扭矩的另一个选择是直接使用轴向电机。我们现在的电机大部分都是径向磁通电机，磁场方向沿着电机的径向。轴向磁通电机与普通电机不同，其磁通方向为轴向，定子和转子铁心为盘式结构。

图表 24：轴向磁通电机爆炸图



资料来源：公众号 驱动视界，五矿证券研究所

图表 25：径向电机和轴向电机的比较

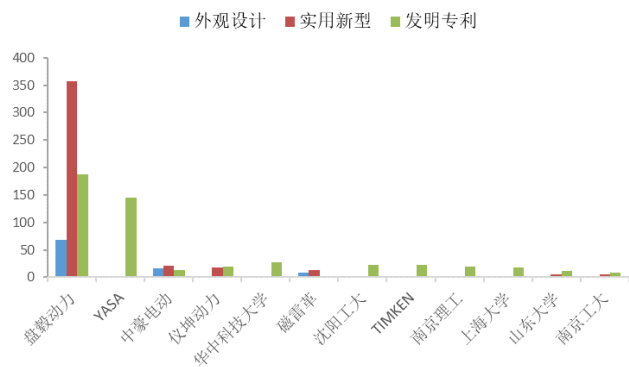


资料来源：公众号 电动车千人会，五矿证券研究所

轴向磁通电机特点包括：1) 由于轴向电机的转子、定子都是盘式结构，因此电机可以做的非常薄；2) 由于轴向磁通电机的磁通路径比径向磁通机器短得多，从而使相同功率下的电机体积更小，功率密度和效率更高，能耗降低 15%-20% 左右。3) 轴向磁通永磁电机的有效磁表面积是电机转子的表面，而不是外径，因此轴向磁通永磁电机可以提供的扭矩密度比径向电机高 30%。基于以上特点，轴向磁通电机特别适合于高效率、高功率/转矩密度以及有特殊安装要求的场合。小象电动推出的用于机器人的轴向磁通电机 SETZ120 系列，可以在 10 减速比前提下，做到 220Nm 的峰值扭矩，1.9kg 重量。

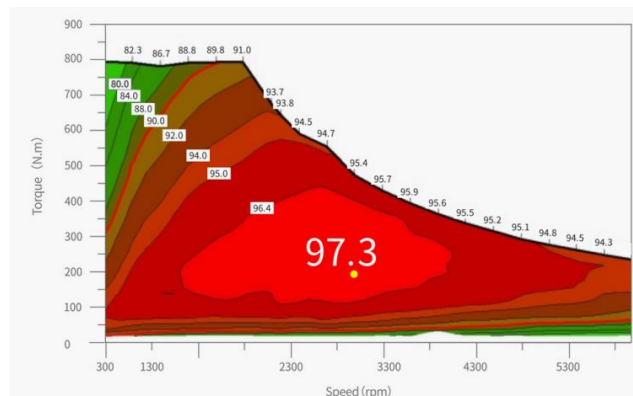
在轴向磁通电机领域，海外龙头为英国的 YASA。2021 年，YASA 被奔驰收购，成为奔驰全资子公司。未来奔驰的 AMG.EA 平台车型将搭载轴向磁通电机。国内企业中，盘毂动力相对领先。盘毂动力的轴向磁通电机比普通永磁电驱动产品重量减轻 50%，轴向尺寸减小 50% 以上，可以在 90% 以上工况下达到 90% 以上工作效率。

图表 26：轴向磁通电机专利数量



资料来源：轴向磁通电机技术综述，EDC 电驱未来，五矿证券研究所

图表 27：盘毂动力的轴向电机拥有高扭矩和效率高



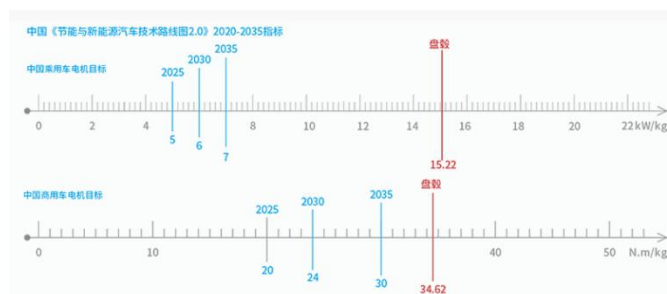
资料来源：盘毂动力，五矿证券研究所

图表 28：轴向电机可以做的更加薄



资料来源：盘毂动力，五矿证券研究所

图表 29：盘毂动力的轴向电机指标已经超过技术路线图 2035 目标



资料来源：盘毂动力，五矿证券研究所

轴向磁通电机目前还处于产业化初期，几个因素制约其产业化：1) 散热困难。轴向电机呈三明治结构，面临严重发热问题，需要采用浸泡式油冷、相变材料冷却等新型散热方法，并设计复杂的散热结构；2) 制造工艺要求高。轴向电机必须保持转子和定子之间的气隙均匀，需要精确控制公差；3) 产业界对其应用的新材料、新工艺认识不足，产业链不成熟。

在机器人领域，轴向磁通电机尚未成为主流选择，但部分企业已经前瞻布局。达闼科技 2022 年推出的 SCA 2.0 关节，采用非晶轴向电机。上海人形机器人创新中心的“青龙”人形机器人，采用深圳小象电动量身定制的关节电机。全球跑得最快的机器狗“黑豹 2.0”奔跑速度可达 10m/s，也采用了轴向磁通电机。

图表 30：达闼科技推出 SCA 2.0 非晶轴向电机



资料来源：达闼科技，五矿证券研究所

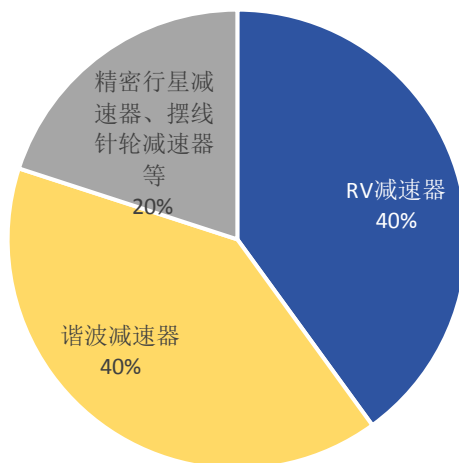
（四）减速器的选择：谐波还是行星？

机器人最理想的方案是电机直接驱动，但受限于电机工艺水平，电机直接驱动的扭矩并不能满足机器人的需求，因此一般采用电机+减速器的方案。我们认为未来人形机器人的关节将会采取谐波减速器+行星减速器搭配的形式。具体选择取决于主机厂的整机设计。总体来说，强调大扭矩、高精度、小空间的关节会采用谐波减速器，强调高效率、低成本、空间大小不敏感的关节会采用行星减速器。

人形机器人关节以谐波和行星减速器为主

机器人使用的减速器主要是精密减速器，包括 RV 减速器、谐波减速器、精密行星减速器。RV 减速器、谐波减速器大约各占 40% 市场份额，行星减速器、摆线针轮减速器等合计占比 20%。工业机器人的减速器以 RV 和谐波减速器为主，人形机器人的减速器以谐波减速器和行星减速器为主。

图表 31：RV 减速器、谐波减速器占据精密减速器的大部分市场



资料来源：GGII、中商情报网，五矿证券研究所

RV 减速器的优点在于高负载、高减速比、高精度、高输出扭矩。但由于 RV 减速器的结构复

杂，导致 RV 减速器体积大、成本高，主要用于大型多关节工业机器人，不适合于人形机器人这种对空间尺寸要求较高的应用场景。

谐波减速器由钢轮、柔轮、波发生器三部分组成，一种是结构非常精简的减速器，优点在于体积小、高精度、高减速比，缺点在于输出扭矩低、刚性略差。另外由于采用了柔性材料，传动效率低，长时间使用后谐波减速器的精度也会降低。

精密行星减速器的优点在于结构简单、价格便宜、刚性和耐磨性较好，缺点是精度低、减速比低。

图表 32：三种精密减速器参数对比

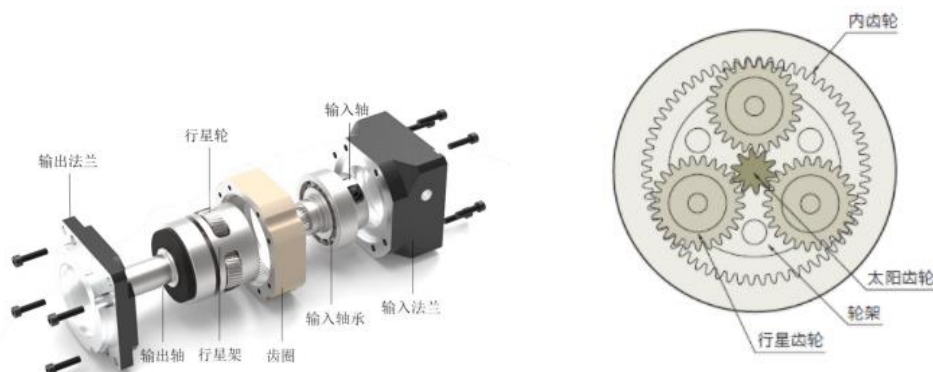
主流技术指标	RV 减速器	谐波减速器	精密行星减速器
传动精度（弧秒）	≤60	≤60	≤180
传动效率	>80%	>70%	>95%
温升（℃）	≤45	≤40	≤30
噪声(db)	≤70	≤60	≤65
减速比	30-192.4	30-160	3-512
额定转矩下使用寿命（h）	>6,000	>8,000	>20000
额定输出转矩(Nm)	101-6,135	6.6-921	40-1200
扭转刚性(Nm/arc min)	20-1176	1.34-54.09	10-370

资料来源：科峰智能招股书，五矿证券研究所

行星减速器成本优势显著

精密行星减速器结构简单、体积小巧、承载力高、寿命长，主要包括行星轮、太阳轮和内齿圈。运行时，传动轴上齿数少的齿轮，啮合输出轴上的大齿轮，以达到减速的目的。

图表 33：精密行星减速器结构示意图



资料来源：科峰智能招股书，设备维修服务号，五矿证券研究所

单级精密行星减速器的减速比一般不会超过 10，无法满足较大的传动比，有时需要 2 套或 3 套来满足用户对较大传动比的要求。级数就表示了行星齿轮的套数。由于增加了行星齿轮的数量，所以 2 级或 3 级减速器的长度会有所增加，效率会有所下降。一般行星减速器在 1~3 级的范围，但微型行星减速器可以做到 5 级。

图表 34：中大德 40ZDE(F)系列精密行星减速器不同级数参数

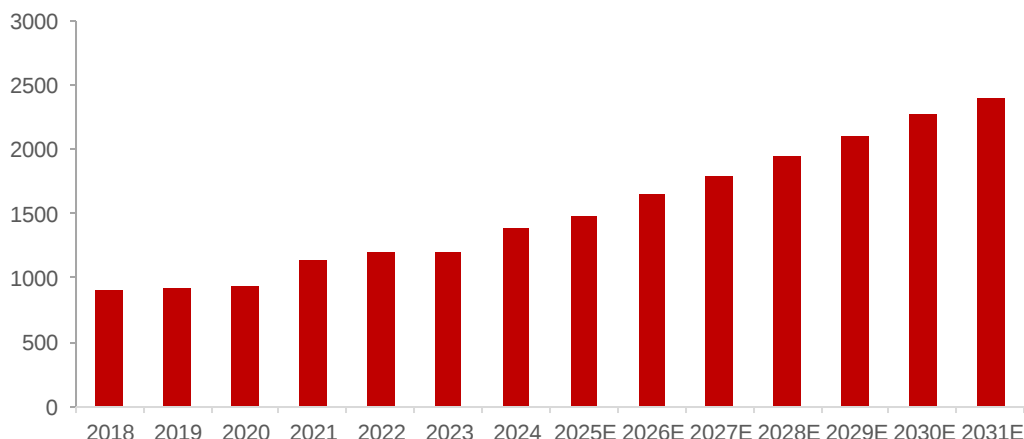
级数	1 级行星减速器	2 级行星减速器	3 级行星减速器
回程间隙(arc min)	<12	<15	<18

输出扭矩(Nm)	4~6	7.5-20	7.5-20
满载效率(%)	96	94	90
重量 (kg)	0.4	0.5	0.6
箱体长度(mm)	39	52	64.5

资料来源：中大力德官网，五矿证券研究所

根据 QY Research 数据，2024 年全球行星减速器市场规模 13.82 亿美元，预计 2024~2031 年将会保持 8.3% 的 CAGR 增长。

图表 35：全球行星减速器市场规模（百万美元）

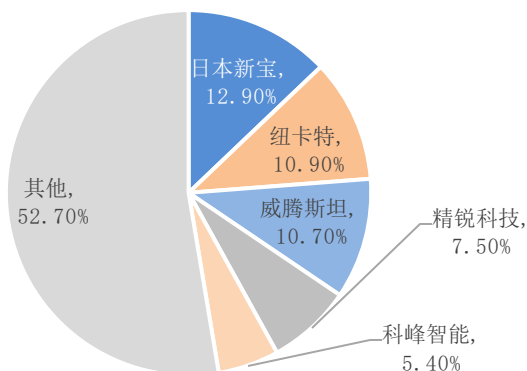


资料来源：科峰智能招股书, QY Research, 五矿证券研究所

国外精密行星减速器主要厂家为日本新宝、德国纽卡特 Neugart、德国威腾斯坦 wittenstein 等。国际领先的单级精密行星减速器精度可以在 1 arc min 以内，寿命达到 2 万小时。

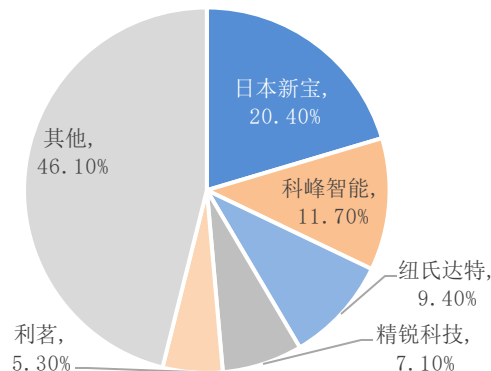
国内精密行星减速器厂家包括科峰智能、纽氏达特、精锐科技、利茗等。国内企业在精度、传动效率、噪音等指标达到国际领先水平，但在寿命和一致性略有差距。

图表 36：全球行星减速器市场格局



资料来源：科峰智能招股书, QY Research, 五矿证券研究所

图表 37：中国行星减速器市场格局



资料来源：科峰智能招股书, QY Research, 五矿证券研究所

行星减速器在成本上具备明显的优势。在人形机器人关节中，一般准直驱方案关节会搭配行星减速器。行星减速器具备明显的成本优势，具体体现在 2 点：1) 行星减速器结构简单，成本低，价格可以控制在 1000 元以内。而国产谐波减速器目前的价格在 1500 元左右，进口产品价格更高。2) 行星减速器没有柔性结构，可以采用电流环做力控，节省了力/力矩传感器成本。

谐波减速器在大扭矩、高精度、小空间优势明显

谐波减速器主要由钢轮、柔轮、波发生器三部分构成。和行星减速器、RV 减速器采用刚性结构不同，谐波减速器采用了柔性结构实现机械传动。

谐波减速器的波发生器呈椭圆形，当波发生器在柔轮内转动时，迫使柔轮产生弹性形变呈现椭圆状，长轴处与钢轮齿槽啮合，而短轴处脱开。柔轮不断与钢轮产生错齿运动，从而实现减速。钢轮内圈的齿数和柔轮的齿数不一样，比如柔轮有 100 个齿，而钢轮有 101 个齿。这样波发生器旋转一圈，钢轮只转动 1 个齿对应的角度，减速比例为 100:1。

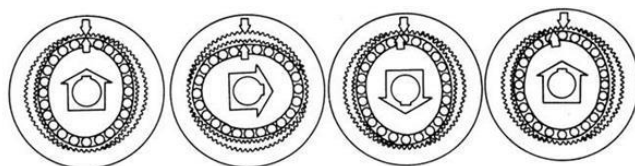
谐波减速器具有传动比大、体积小、质量小、运动精度高的优点。谐波减速器的缺点在于刚性差，承载能力有限。工作过程中柔轮不断形变，材料容易疲劳，使用寿命低。因此，谐波减速器主要用在轻负载、高精度领域，下游包括 3C、半导体等，也广泛应用于协作机器人、服务机器人。

图表 38：谐波减速器结构示意图



资料来源：绿的谐波招股书，五矿证券研究所

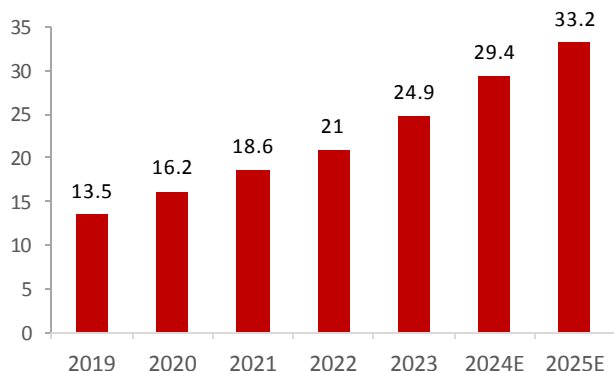
图表 39：谐波减速器运行示意图



资料来源：绿的谐波招股书，五矿证券研究所

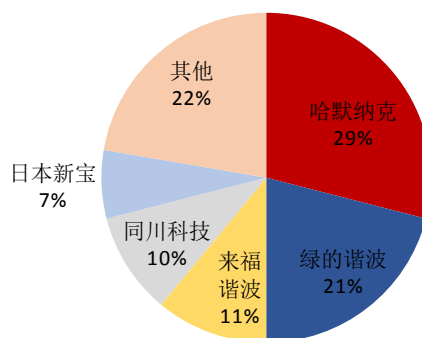
2023 年，中国谐波减速器的市场规模约 24.9 亿元。谐波减速器的主要玩家包括哈默纳克（日本）、绿的谐波（中国）、来福（中国）、新宝（日本）、中技克美（中国）。绿的谐波在 2009 年制造出第一台谐波减速器原型机，经过多年发展已经成为全球第二大谐波减速器供应商。绿的谐波的减速器在传动误差、背向间隙、空程误差、传动效率、噪声、运行温升等各项性能指标均已达到国内领先水平，在下游领域逐步替代哈默纳克。

图表 40：中国谐波减速器市场规模(亿元)



资料来源：中商情报网，五矿证券研究所

图表 41：2023 谐波减速器市场份额



资料来源：GGII，五矿证券研究所

（五）力/力矩传感器是必须吗？

柔顺控制需要感知力的大小

工业机器人大多都是使用位置控制，机器人沿着事先规划好的轨迹在空间中运动。这种完全基于位置的控制无法适应不规则环境。针对精密装配、修刮、磨削、抛光等场景，对力的控

制比对位置的控制更为重要，也就是要求机器人具备柔顺控制能力。

柔顺控制可以分为被动柔顺和主动柔顺，主动柔顺是主流。

被动柔顺就是利用一些可以使机器人在与环境作用时能够吸收或储存能量的机械器件如弹簧、阻尼等。被动柔顺的装置专用性强，并且会增加机器人控制难度，主要适用于低精度要求场景。这种装置最成功的是 Remote Center Compliance (RCC)。RCC 装置通常是一个由多根弹簧构成的能顺从空间六个自由度的柔顺机构，它可以安装在机器人手臂的腕部和末端执行器之间，其基本工作原理是通过调节弹簧的刚度，获得大小不同的柔顺性。

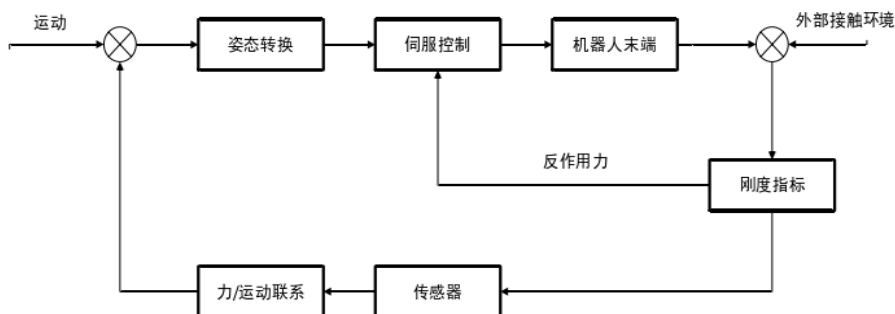
图表 42：机器人被动柔顺装置 RCC 示意图



资料来源：机器人与环境间力位置控制技术研究与应（李正义），五矿证券研究所

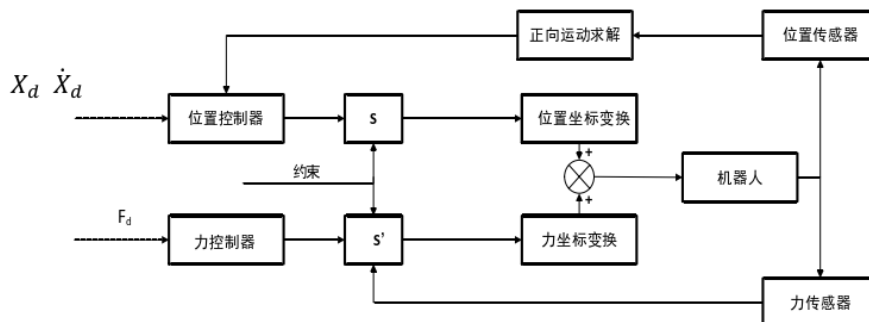
主动柔顺控制采用算法控制机器人的力，它可以很好的弥补被动柔顺控制的缺点。按照控制思路的不同可分为四种方法：阻抗控制、力/位混合控制、自适应控制和智能控制等。其中阻抗控制和力/位混合控制是研究较为广泛的控制方法。在主动控制的架构中，力/力矩信息是不可或缺的重要输入。

图表 43：阻抗控制策略的控制框图



资料来源：基于六维力传感器的机器人力控方法研究（张昱东），五矿证券研究所

图表 44：力位控制策略的控制框图



资料来源：基于六维力传感器的机器人力控方法研究（张昱东），五矿证券研究所

柔顺控制现在已经被用于协作/工业机器人，用来进行抛光、打磨等工作。增广智能的 SoftForce3.0 精密力控系统可以达到 10000Hz 的处理速度，0.01N 的力控精度，广泛应用于 3C、半导体、医疗、新能源等领域。

图表 45：增广智能的 SoftForce3.0 可以实现精准力控

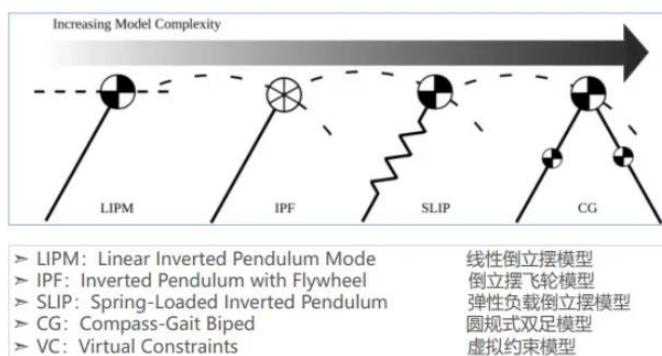


资料来源：增广智能，五矿证券研究所

足式机器人的控制算法，也离不开对力的感知。早期的 ZMP 控制算法、WBC+MPC 的控制算法，都离不开对“力”这一信息的使用。当前机器人控制的主流算法已经切换为强化学习，依然也离不开对力的感知。

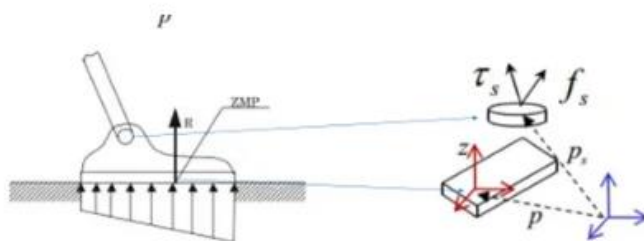
ZMP 指足-地交互的所有反作用力在水平方向上合力矩为零的点。在建模时，将机器人简化为质点，复杂的足-地交互力简化为环境作用于 ZMP 点的合力，即点-质量模型。依据点-质量的不同交互方法，衍生出各种模型，其中倒立摆模型（ZMP-LIPM）是最为常见的一种。获取 ZMP 的方法主要有两种：1) 在脚踝附近安装六维力传感器来测量 ZMP；2) 点阵方式计算一维力，进而计算 ZMP 的位置。行业一般都采用六维力的方案。

图表 46：基于 ZMP 的几种点-质量模型



资料来源：leaderobot，五矿证券研究所

图表 47：通过点阵计算 ZMP（左）和通过六维力计算 ZMP（右）



资料来源：leaderobot，五矿证券研究所

WBC 算法把力控模型和本体动力学结合，从系统的角度将足式机器人力控算法归并到统一的架构中，同时保证了对运动轨迹的实时跟踪和柔顺控制，成为现在主流的控制算法之一。一般 WBC 会搭配 MPC 算法，MPC 算法输出运动轨迹给 WBC，WBC 再输出关节的位置、力矩、速度。

图表 48：基于 MPC+WBC 模型的四足机械狗控制框架图

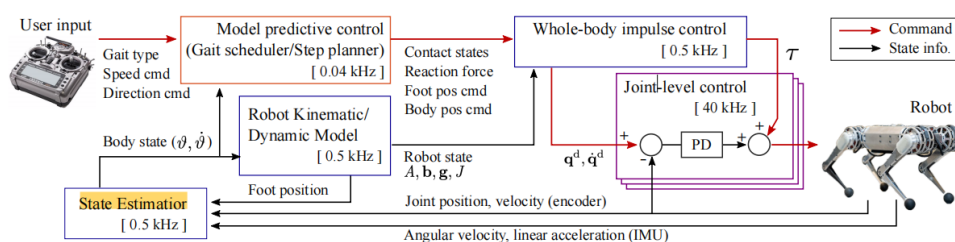


Fig. 2. Overall Control Framework. Using the user commanded gait type, speed, and direction from the RC-controller, the MPC computes desired reaction forces and foot/body position commands. From these, WBC computes joint torque, position, and velocity commands that are delivered to the each joint-level controller. Each component's update frequency is represented by the color of its box.

资料来源：Highly Dynamic Quadruped Locomotion via Whole-Body Impulse Control and Model Predictive Control (Donghyun Kim)，五矿证券研究所

力信号的布局方案：末端力控和关节力控

我们需要检测哪些地方的力？人形机器人的检测方案可以分为两种——末端力控和关节力控。

末端力控方案：在末端安装六维力传感器。

优势：1) 精度高，2) 更容易和机器人融合，工业机器人、协作机器人都可以用。

缺点：1) 检测单元（传感器）和执行单元（关节）位置不在一起，有机械臂机械惯性的误差影响；2) 机械人整机的控制带宽一般较低，动态响应慢；3) 安全性弱，机器人无法感知中间传动过程，如果在关节处出现缠绕、挤压，机器人无法感知，存在一定安全风险。

关节力控方案方案：在关节处安装关节力/力矩传感器，如果是直线关节安装一维力传感器，如果是旋转关节则安装扭矩传感器。

优势：1) 关节扭力传感器与电机相距很近，排除了机械臂机械惯性的影响，理论上可提升力控的性能；2) 可以检测整个机械臂的力，安全性好；3) 结合机械臂的动力学模型，有利于机械臂的位置控制。

缺点：1) 传感器会受到其他方向力/力矩的扰动，零位位置不固定，且无法通过算法补偿；2) 增加关节设计复杂度；3) 由于机械臂长度、重量的存在，对关节传感器的量程要求大，但机器人又对空间大小有要求；4) 多传感器测量，系统整体误差被放大。

图表 49：末端力控和关节力控的对比

	末端力控	关节力控
精度	☆☆☆	☆
匹配开发难度	☆	☆☆☆
是否适用于工业臂	是	否
控制带宽	☆	☆☆☆
安全性	仅末端可感知	全臂可感知

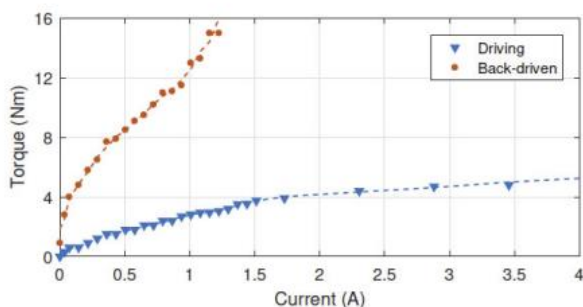
资料来源：蓝点触控，五矿证券研究所

力信号的感知方案：电流环和传感器

在关节力控中，获取关节力矩的方式有两种：

- 电流环控制，即利用关节电流估算力矩大小。由于该方案不需要安装额外的传感器，因而在成本上具有优势。这种方法的缺点是：1) 精度低，MIT cheetah 使用电流环控制，扭矩的误差大约控制在 $\pm 10\%$ 的水平，这个程度的误差并不影响行走；2) 需要高的反驱透明度，因此和大减速比的减速器不兼容，一般都和行星减速器搭配。协作机器人领域部分会采用谐波减速器+电流环力控的方案，但是由于精度太差只能做到安全防护，而不能做到柔顺控制。

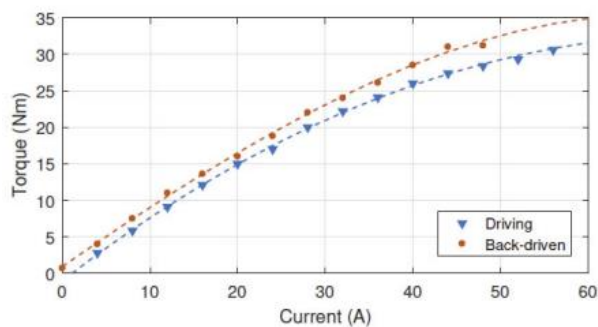
图表 50: MX-106 关节有 225: 1 的减速比，但反驱透明度差



(a) Off-the-shelf Dynamixel MX-106

资料来源: Design of a Highly Dynamic Humanoid Robot, 五矿证券研究所

图表 51: ARTEMIS 关节搭配 8:1 减速比齿轮关节具有较好的反驱透明度



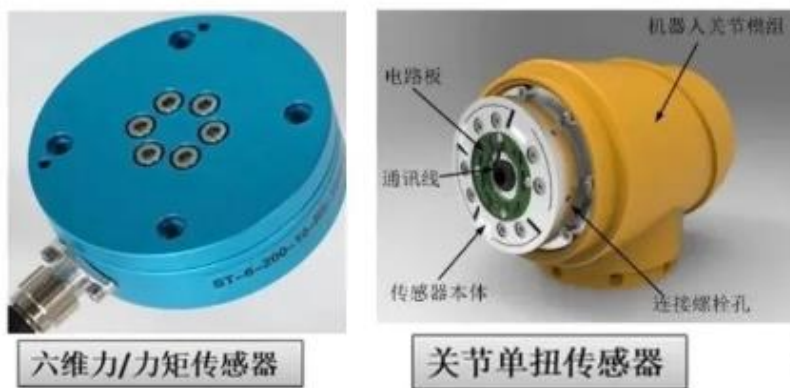
(b) Custom actuator

资料来源: Design of a Highly Dynamic Humanoid Robot, 五矿证券研究所

- 通过力传感器来感知作用力，这种方案的精度高，可以和谐波减速器兼容，缺点是增加了成本，传感器本身也比较脆弱。特斯拉采用了这种方案。

我们认为，这两种方案均有较大的发展空间。其中应用场景简单、对成本敏感的机器人会倾向采用电流环控制，而应用场景复杂、对成本部敏感的机器人会倾向采用力传感器方案。

图表 52: 六维力传感器和关节扭矩传感器



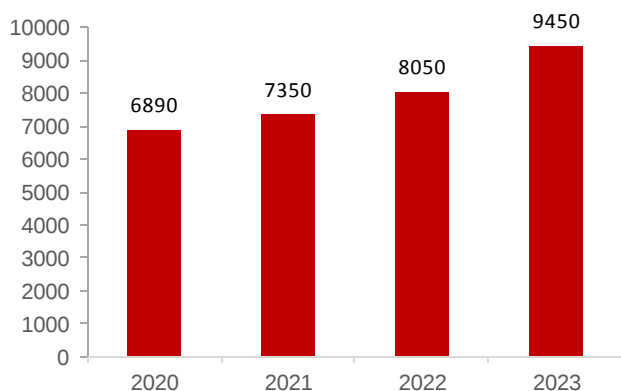
资料来源: 蓝点触控, 五矿证券研究所

六维力测量的需求最早来自航空航天飞行器研究领域，安装在飞行器内部的六维力传感器用来测量飞行器的空气动力学特性，六个维度包括飞行器的升力、阻力、侧向力、俯仰力矩、偏航力矩和滚转力矩。现在，六维力传感器主要应用于汽车行业的碰撞测试、轮毂、座椅等零部件测试，以及航空航天、生物力学、医疗领域、科研实验、机器人与自动化等领域，其中机器人领域占比超过 50%。

根据观研天下数据, 2023 年六维力传感器在中国的销量 9450 台左右, 市场规模 2.35 亿元。外资产品单个产品均价在 4 万左右, 国产均价也在 2 万元, 但其成本一般只有数千元。鑫精诚的六维力传感器价格已经可低至 2000 元/台。随着下游需求的爆发, 六维力传感器价格有较大下降空间。

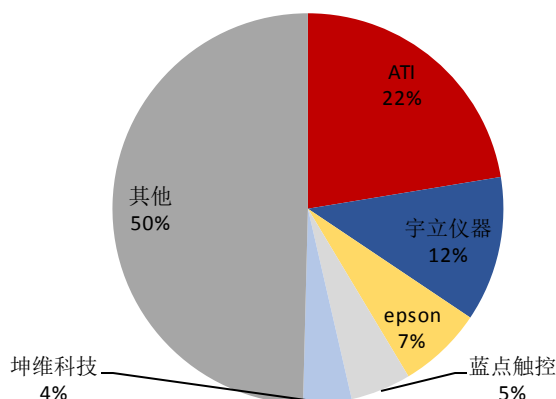
六维力传感器市场格局较为集中，美国 ATI、宇立仪器、蓝点触控、坤维科技目前属于行业第一梯队。国产头部厂商在串扰、温漂等方面的核心指标基本可以对标国外厂商。

图表 53：六维力传感器出货量（台）



资料来源：观研天下，五矿证券研究所

图表 54：六维力传感器市场格局



资料来源：华经产业研究院，五矿证券研究所

三、投资建议

- 1、从工业机器人到人形机器人，工业自动化板块市场总量大幅增长。我们认为人形机器人远期空间巨大，将会带动电机、电控、减速器等多个产品的需求，对整个工业自动化板块需求都将会有显著拉动。由于关节的“定义权”掌握在人形机器人整机厂手中，因此客户关系是产业投资的核心。
- 2、轴向电机具备高功率密度、高扭矩密度、高效率的特点，与人形机器人需求适配性强。随着技术成熟度提升，预计轴向电机应用领域将进一步增长。建议关注盘毂动力（非上市）、小象电动（非上市）、仪坤动力（非上市）。
- 3、我们认为减速器环节技术壁垒较高，龙头企业将充分受益于人形机器人需求的增长。行星减速器和谐波减速器并非“非此即彼”的关系，两者将共同搭配满足差异化需求。建议关注谐波减速器、行星减速器龙头企业。
- 4、六维力传感器本身是一个小市场产品，人形机器人爆发对六维力传感器的需求弹性显著。人形机器人对传感器的精度要求高、技术难度大，行业格局集中。建议关注宇立仪器（非上市）、蓝点触控（非上市）、坤维科技（非上市）、鑫精诚（非上市）。

风险提示

1. 人形机器人处于产业初期，商业化进度仍然具有不确定性，相关企业的业绩释放可能不及预期。
2. 人形机器人的零部件方案仍然在快速迭代，尚未完全确定，技术路线存在变化风险。

分析师声明

作者在中国证券业协会登记为证券投资咨询(分析师)，以勤勉的职业态度，独立、客观地出具本报告。作者保证：(i) 本报告所采用的数据均来自合规渠道；(ii) 本报告分析逻辑基于作者的职业理解，并清晰准确地反映了作者的研究观点；(iii) 本报告结论不受任何第三方的授意或影响；(iv) 不存在任何利益冲突；(v) 英文版翻译若与中文版有所歧义，以中文版报告为准；特此声明。

投资评级说明

投资建议的评级标准		评级	说明
报告中投资建议所涉及的评级分为股票评级和行业评级（另有说明的除外）。评级标准为报告发布日后 6 到 12 个月内的相对市场表现，也即以报告发布日后的 6 到 12 个月内的公司股价(或行业指数)相对同期相关证券市场代表性指数的涨跌幅作为基准。其中：A 股市场以沪深 300 指数为基准；香港市场以恒生指数为基准；美国市场以纳斯达克综合指数或标普 500 指数为基准。	股票评级	买入	预期个股相对同期相关证券市场代表性指数的回报在 20%及以上；
		增持	预期个股相对同期相关证券市场代表性指数的回报介于 5%~20%之间；
		持有	预期个股相对同期相关证券市场代表性指数的回报介于-10%~5%之间；
		卖出	预期个股相对同期相关证券市场代表性指数的回报在-10%及以下；
		无评级	预期对于个股未来 6 个月市场表现与基准指数相比无明确观点。
	行业评级	看好	预期行业整体回报高于基准指数整体水平 10%以上；
		中性	预期行业整体回报介于基准指数整体水平-10%~10%之间；
		看淡	预期行业整体回报低于基准指数整体水平-10%以下。

一般声明

五矿证券有限公司（以下简称“本公司”）具有中国证监会批复的证券投资咨询业务资格。本公司不会因接收人收到本报告即视其为客户，本报告仅在相关法律许可的情况下发放，并仅为提供信息而发放，概不构成任何广告。本报告的版权仅为本公司所有，未经本公司书面许可，任何机构和个人不得以任何形式对本研究报告的任何部分以任何方式制作任何形式的翻版、复制或再次分发给任何其他人。如引用须联络五矿证券研究所获得许可后，再注明出处为五矿证券研究所，且不得对本报告进行有悖原意的删节和修改。在刊载或者转发本证券研究报告或者摘要的同时，也应注明本报告的发布人和发布日期及提示使用证券研究报告的风险。若未经授权刊载或者转发本报告的，本公司将保留向其追究法律责任的权利。若本公司以外的其他机构（以下简称“该机构”）发送本报告，则由该机构独自为此发送行为负责。

本报告所载的资料、意见及推测仅反映本公司于发布本报告当日的判断，本报告所指的证券或投资标的的价格、价值及投资收入或将产生波动；在不同时期，本公司可发出与本报告所载资料、意见及推测不一致的报告；本公司不保证本报告所含信息保持在最新状态。同时，本公司对本报告所含信息可在不发出通知的情形下做出修改，投资者应当自行关注相应的更新或修改。

本报告的作者是基于独立、客观、公正和审慎的原则制作本研究报告。本报告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，也不保证所包含信息和建议不发生任何变更。本公司已力求报告内容的客观、公正，但文中的观点、结论和建议仅供参考，不包含作者对证券价格涨跌或市场走势的确定性判断。在任何情况下，报告中的信息或意见不构成对任何人的投资建议，投资者据此做出的任何投资决策与本公司和作者无关。在任何情况下，本公司、本公司员工或者关联机构不承诺投资者一定获利，不与投资者分享投资收益，也不对任何人因使用本报告中的任何内容所引致的任何损失负任何责任。本公司及作者在自身所知情范围内，与本报告中所评价或推荐的证券不存在法律法规要求披露或采取限制、静默措施的利益冲突。

五矿证券版权所有。保留一切权利。

特别声明

在法律许可的情况下，五矿证券可能会持有本报告中提及公司所发行的证券并进行交易，也可能为这些公司提供或争取提供投资银行、财务顾问和金融产品等各种金融服务。因此，投资者应当考虑到五矿证券及/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。

联系我们

上海	深圳	北京
地址：上海市浦东新区陆家嘴街道富城路 99 号 震旦国际大厦 30 楼 邮编：200120	地址：深圳市南山区滨海大道 3165 号五矿金融大厦 23 层 邮编：518035	地址：北京市东城区朝阳门北大街 3 号五矿广场 C 座 3F 邮编：100010

Analyst Certification

The research analyst is primarily responsible for the content of this report, in whole or in part. The analyst has the Securities Investment Advisory Certification granted by the Securities Association of China. Besides, the analyst independently and objectively issues this report holding a diligent attitude. We hereby declare that (1) all the data used herein is gathered from legitimate sources; (2) the research is based on analyst's professional understanding, and accurately reflects his/her views; (3) the analyst has not been placed under any undue influence or intervention from a third party in compiling this report; (4) there is no conflict of interest; (5) in case of ambiguity due to the translation of the report, the original version in Chinese shall prevail.

Investment Rating Definitions

The rating criteria of investment recommendations The ratings contained herein are classified into company ratings and sector ratings (unless otherwise stated). The rating criteria is the relative market performance between 6 and 12 months after the report's date of issue, i.e. based on the range of rise and fall of the company's stock price (or industry index) compared to the benchmark index. Specifically, the CSI 300 Index is the benchmark index of the A-share market. The Hang Seng Index is the benchmark index of the HK market. The NASDAQ Composite Index or the S&P 500 Index is the benchmark index of the U.S. market.	Ratings		Definitions
	Company Ratings	BUY	Stock return is expected to outperform the benchmark index by more than 20%;
		ACCUMULATE	Stock relative performance is expected to range between 5% and 20%;
		HOLD	Stock relative performance is expected to range between -10% and 5%;
		SELL	Stock return is expected to underperform the benchmark index by more than 10%;
		NOT RATED	No clear view of the stock relative performance over the next 6 months.
	Sector Ratings	POSITIVE	Overall sector return is expected to outperform the benchmark index by more than 10%;
		NEUTRAL	Overall sector expected relative performance ranges between -10% and 10%;
		CAUTIOUS	Overall sector return is expected to underperform the benchmark index by more than 10%.

General Disclaimer

Minmetals Securities Co., Ltd. (or "the company") is licensed to carry on securities investment advisory business by the China Securities Regulatory Commission. The Company will not deem any person as its client notwithstanding his/her receipt of this report. The report is issued only under permit of relevant laws and regulations, solely for the purpose of providing information. The report should not be used or considered as an offer or the solicitation of an offer to sell, buy or subscribe for securities or other financial instruments. The information presented in the report is under the copyright of the company. Without the written permission of the company, none of the institutions or individuals shall duplicate, copy, or redistribute any part of this report, in any form, to any other institutions or individuals. The party who quotes the report should contact the company directly to request permission, specify the source as Equity Research Department of Minmetals Securities, and should not make any change to the information in a manner contrary to the original intention. The party who re-publishes or forwards the research report or part of the report shall indicate the issuer, the date of issue, and the risk of using the report. Otherwise, the company will reserve its right to taking legal action. If any other institution (or "this institution") redistributes this report, this institution will be solely responsible for its redistribution. The information, opinions, and inferences herein only reflect the judgment of the company on the date of issue. Prices, values as well as the returns of securities or the underlying assets herein may fluctuate. At different periods, the company may issue reports with inconsistent information, opinions, and inferences, and does not guarantee the information contained herein is kept up to date. Meanwhile, the information contained herein is subject to change without any prior notice. Investors should pay attention to the updates or modifications. The analyst wrote the report based on principles of independence, objectivity, fairness, and prudence. Information contained herein was obtained from publicly available sources. However, the company makes no warranty of accuracy or completeness of information, and does not guarantee the information and recommendations contained do not change. The company strives to be objective and fair in the report's content. However, opinions, conclusions, and recommendations herein are only for reference, and do not contain any certain judgments about the changes in the stock price or the market. Under no circumstance shall the information contained or opinions expressed herein form investment recommendations to anyone. The company or analysts have no responsibility for any investment decision based on this report. Neither the company, nor its employees, or affiliates shall guarantee any certain return, share any profits with investors, and be liable to any investors for any losses caused by use of the content herein. The company and its analysts, to the extent of their awareness, have no conflict of interest which is required to be disclosed, or taken restrictive or silent measures by the laws with the stock evaluated or recommended in this report.

Minmetals Securities Co. Ltd. 2019. All rights reserved.

Special Disclaimer

Permitted by laws, Minmetals Securities Co., Ltd. may hold and trade the securities of companies mentioned herein, and may provide or seek to provide investment banking, financial consulting, financial products, and other financial services for these companies. Therefore, investors should be aware that Minmetals Securities Co., Ltd. or other related parties may have potential conflicts of interest which may affect the objectivity of the report. Investors should not make investment decisions solely based on this report.

Contact us

Shanghai

Address: 30/F, Zhendan International Building, No.99 Fucheng Road, Lujiazui Street, Pudong New District, Shanghai
Postcode: 200120

Shenzhen

Address: 23F, Minmetals Financial Center, 3165 Binhai Avenue, Nanshan District, Shenzhen
Postcode: 518035

Beijing

Address: 3/F, Tower C, Minmetals Plaza, No.3 Chaoyangmen North Street, Dongcheng District, Beijing
Postcode: 100010