

行业研究

电机：人形机器人的动力核心

——人形机器人行业系列报告（三）

要点

空心杯电机与灵巧手关节高度适配。

(1) 空心杯电机为转子无铁芯结构，表现为无涡流损耗和磁滞损耗，具有低摩擦和良好的散热性，实现了电机的高效率；采用无刷结构可以进一步提升寿命、减少噪音，是人形机器人电池供电型设备的理想选择。

(2) 空心杯电机全球市场规模在 2022 年超 50 亿元人民币，22-28 年 CAGR 约为 8%；如果考虑人形机器人放量，增速将显著提升。国外空心杯电机龙头公司包括 Maxon Motor、Faulhaber、Portescap，其产品横向、纵向布局均较为完善，并且具有较强的较小尺寸电机和无刷电机设计能力。国内空心杯电机龙头公司为鸣志电器；相比之下，拓邦股份、鼎智科技、伟创电气等研发及生产则是以点带面。随着国内公司的能力不断深化，空心杯电机未来存在广阔的国产替代空间。

(3) 绕组设计与设备、产品矩阵及背书是空心杯电机的核心壁垒。Maxon 马鞍形线圈、Faulhaber 斜绕式线圈，具有专利优势，产品品质高。海外绕组设备 Merteor、田中精机等研发能力、自动化水平也均较高。海外空心杯电机厂商在航空航天、医疗、机器人等领域深耕多年，有着很强的客户背书和客户粘性。

无框力矩电机与机器人关节高度适配。

(1) 无框力矩电机无边框设计，具有体积小、质量轻、惯量低、结构紧凑、功率高、适配性强等特点，在机器人关节等领域具有广泛的应用前景。

(2) 2022 年力矩电机、无框电机全球市场规模均超 40 亿元人民币，其中力矩电机全球市场规模 22-27 年 CAGR 和无框电机全球市场规模 22-29 年 CAGR 均约为 8%。如果考虑人形机器人放量，增速有望进一步提升。从竞争格局来看，海外企业仍处于领先地位。海外龙头制造商包括科尔摩根、威腾斯坦、尼得科、派克汉尼汾等；国内企业中，步科股份、昊志机电也有较强的产品力。

(3) 正向研发能力、匹配下游设计是核心壁垒。无框力矩电机的壁垒体现在磁路和工艺设计，海外厂商具有悠久的发展历史和较强的正向研发能力，能够通过产品和经验积累、模拟仿真软件快速实现产品设计，以满足客户需求。无框力矩电机要比传统的伺服电机定制化程度要高；很多机器人厂商都在自研线性执行器和旋转执行器。从未来的竞争格局来看，无框力矩电机或将比空心杯电机更加分散，一体化程度更高。

投资建议：空心杯电机、无框力矩电机可与人形机器人灵巧手、关节高度适配，随着人形机器人放量，行业均有更广阔的发展空间。目前海外电机公司技术水平、产品能力均较强，国产公司正不断深化自身能力，提升产品水平，为未来国产替代打下坚实基础。建议关注：空心杯电机公司，鸣志电器、伟创电气、拓邦股份；无框力矩电机公司，步科股份、昊志机电、禾川科技。

风险分析：人形机器人相关技术进步不及预期风险；人形机器人降本不及预期风险；竞争加剧带来的盈利不及预期风险。

电力设备新能源
买入（维持）

作者

分析师：殷中枢

执业证书编号：S0930518040004

010-58452063

yinzs@ebsecn.com

分析师：黄帅斌

执业证书编号：S0930520080005

0755-23915357

huangshuaibin@ebsecn.com

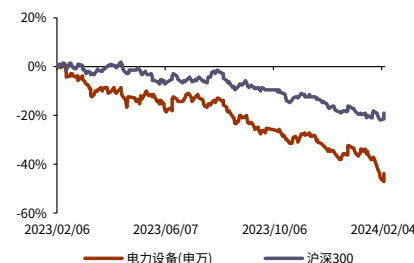
分析师：和霖

执业证书编号：S0930523070006

021-52523853

helin@ebsecn.com

行业与沪深 300 指数对比图



资料来源：

相关研报

动力、传动、传感：灵巧手分析框架与零部件选型——人形机器人行业系列报告（二）

（2024-01-15）

人形机器人：加速发展，全面进击——人形机器人行业系列报告（一）（2024-01-15）

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

投资聚焦

我们的创新之处

我们将空心杯电机、无框力矩电机的技术原理、市场空间及格局、行业、壁垒进行了全面梳理,同时创新性地分析了海外龙头空心杯电机及无框力矩电机厂商的核心能力和产品矩阵,并提出国产替代的突破口。

股价上涨的催化因素

1、技术进步超预期:

如果各大厂商发布的人形机器人原型机表现出来的决策能力、感知能力、执行能力超出市场预期,板块相关公司的股价将会有上涨的机会。

2、量产节奏超预期:

如果人形机器人厂商能够顺利的推进人形机器人量产,板块相关公司的股价将会有上涨的机会。

3、供应链新进入者产品力超预期:

如果某家公司的人形机器人电机产品研发进度、产品品质能够得到市场认可,相关公司股价将会有上涨的机会。

投资观点

空心杯电机、无框力矩电机可与人形机器人灵巧手、关节高度适配,随着人形机器人放量,行业均有更广阔的发展空间。目前海外电机公司技术水平、产品能力均较强,国产公司正不断深化自身能力,提升产品水平,为未来国产替代打下坚实基础。建议关注:空心杯电机公司,鸣志电器、伟创电气、拓邦股份;无框力矩电机公司,步科股份、昊志机电、禾川科技。

目 录

1、电机：人形机器人的动力核心.....	6
1.1、人形机器人各类驱动方式的比较.....	6
1.2、空心杯电机和无框力矩电机适配机器人不同部位.....	7
2、空心杯电机：与灵巧手高度适配.....	9
2.1、无铁芯结构，能效高、转速快、寿命长.....	9
2.2、人形机器人带来增量，国产替代空间广阔.....	14
2.3、壁垒：绕组设计与设备、产品矩阵及客户背书.....	18
3、无框力矩电机：与机器人关节高度适配.....	22
3.1、没有机壳，结构紧凑，适配性强.....	22
3.2、人形机器人推动无框力矩电机市场规模提升.....	24
3.3、壁垒：正向研发能力与匹配下游设计.....	27
4、投资建议.....	28
4.1、鸣志电器.....	28
4.2、伟创电气.....	29
4.3、步科股份.....	31
4.4、昊志机电.....	32
4.5、禾川科技.....	33
5、风险分析.....	34

图目录

图 1：电机按照控制方式和驱动方式进行分类.....	6
图 2：特斯拉 Optimus 人形机器人手部透视图.....	7
图 3：因时机器人灵巧手及微型伺服电缸.....	7
图 4：特斯拉 Optimus 人形机器人旋转执行器.....	8
图 5：特斯拉 Optimus 人形机器人线性执行器.....	8
图 6：普通含铁芯直流电机结构图.....	9
图 7：空心杯电机结构图（无铁芯）.....	9
图 8：无刷直流电机的损耗.....	9
图 9：涡流损耗：磁通量变化引起磁芯中的电流循环.....	9
图 10：磁滞损耗示意图.....	10
图 11：铁损耗对功率曲线的影响.....	10
图 12：Maxon 有刷空心杯电机结构图.....	11
图 13：Maxon 无刷空心杯电机结构图.....	11
图 14：鸣志电器有刷空心杯电机结构图.....	11
图 15：鸣志电器无刷空心杯电机结构图.....	11
图 16：不同换向方式的换向图形.....	12
图 17：永磁体功率密度发展变化.....	14
图 18：不同永磁体典型的退磁曲线.....	14
图 19：全球空心杯电机市场规模.....	15
图 20：2021 年全球市场各类空心杯电机占比（按金额）.....	15
图 21：空心杯电机三种绕组方式.....	18
图 22：Maxon 标准及马鞍式绕线方式.....	18
图 23：无框力矩电机的构造.....	22
图 24：无框力矩电机的特点.....	22
图 25：无框电机极槽配合情况.....	24
图 26：不同极槽配额下电机空载反电动势情况.....	24
图 27：全球力矩电机销售规模.....	24
图 28：全球无框电机销售规模.....	24
图 29：科尔摩根 TBM2G 系列无框力矩电机.....	26
图 30：直驱力矩电机性能曲线生成器.....	27
图 31：14 极 39 槽电机的温度分布（环境温度 25℃）.....	27
图 32：科尔摩根自动化和运动控制产品系列.....	27
图 33：科尔摩根解决方案能力.....	27
图 34：鸣志电器产品矩阵.....	29
图 35：鸣志电器 ECU30064 无刷电机.....	29
图 36：伟创电气产品矩阵.....	30
图 37：伟创电气 ECH13 系列直流无刷空心杯电机.....	30
图 38：伟创电气 FO1 系列无框电机.....	30
图 39：步科股份主要产品示意图.....	31

图 40：步科股份无框力矩电机产品参数	31
图 41：昊志机电主要产品示意图	32
图 42：昊志机电无框力矩电机产品实物图	32
图 43：禾川科技主要产品示意图	33
图 44：禾川科技 X6MN 微型伺服电机	33

表目录

表 1：机器人各类驱动方式的比较	6
表 2：步进电机和伺服电机比较	7
表 3：空心杯电机特性及应用优势	10
表 4：不同换向方式（有刷和无刷）特点描述	12
表 5：不同编码器性能比较	13
表 6：烧结钕铁硼产品磁性能	14
表 7：Maxon 电机典型的应用领域	15
表 8：人形机器人空心杯电机市场空间测算	16
表 9：空心杯电机行业领先企业	16
表 10：空心杯电机性能比较	17
表 11：绕组设备公司情况说明	19
表 12：Maxon 产品介绍	20
表 13：Faulhaber 产品介绍	21
表 14：国产人型机器人及自研力矩电机情况	23
表 15：极槽配合平均转矩和转矩脉动情况	24
表 16：无框力矩电机各企业情况	25
表 17：人形机器人无框力矩电机市场空间测算	26
表 18：电机产业链重点上市公司盈利与估值表	28

1、电机：人形机器人的动力核心

1.1、人形机器人各类驱动方式的比较

电机是人形机器人中动力的产生机构，可以类比作人的肌肉。机器人的驱动方式可以分为电动驱动、液压驱动、气压驱动；其中，电动驱动由于效率高、精确度高、成本低等优势，得以广泛应用。

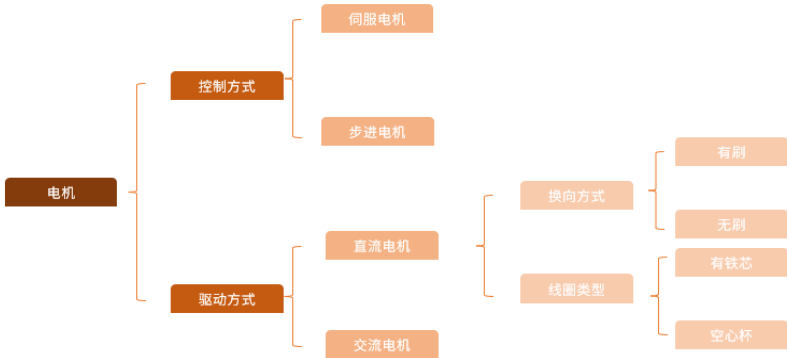
表 1：机器人各类驱动方式的比较

驱动方式		输出力	控制性能	维修使用	结构体积	使用范围	制造成本
液压驱动元件		压力高，可获得大的输出力	油液不可压缩，压力、流量，可无极调速，反应灵敏，可实现连续轨迹控制	维修方便，液体对温度变化敏感，油液泄露易着火	在输出力相同的情况下，体积比气压驱动方式小	中、小型及重型机器人	液压原件成本较高，油路比较复杂
气压驱动元件		气压压力低，输出力较小，如需要输出力大时，其结构尺寸过大	可高速，冲击较严重，精确定位困难，气体压缩性大，阻尼效果差，低速不易控制，不易与 CPU 链接	维修简单，能在高温、粉尘等恶劣环境中使用，泄露无影响	体积较大	中、小性机器人	结构简单，能源方便，成本低
电机驱动元件	普通异步电机、直流电机	输出力较大	控制性能较差，惯性大，不易精确定位	维修使用方便	需要减速装置，体积较大	速度低，持重大的机器人	成本低
	步进电机、伺服电机	输出力较小或较大	容易与 CPU 链接，控制性能好，响应快，可精确定位，但控制系统复杂	维修使用较复杂	体积较小	程序复杂、运动轨迹要求严格的机器人	成本较高

资料来源：孙巍伟《机器人伺服控制系统及应用技术》

分类方式：电机按照控制方式分类，可以分为步进电机、伺服电机；电机按照驱动方式分类，可以分为直流电机、交流电机。直流电机中，按照线圈类型分类，可以分为有铁芯的电机、空心杯电机；按照换向方式分类，可以分为有刷电机、无刷电机。

图 1：电机按照控制方式和驱动方式进行分类



资料来源：光大证券研究所绘制

步进电机是将电脉冲信号转变为角位移或线位移的开环控制元件，每个脉冲信号都会引起电动机转动一个固定的角度；步进电机广泛应用于数控机床、打印机、纺织业、医疗设备、机器人等领域。

伺服电机是利用某一部件使系统的状态到达或接近某一预定值，并能将所需状态和实际状态加以比较，依照它们的差别来调节控制部件的自动控制系统。伺服电机可分为交流和直流伺服电机：交流伺服电机适用于需要高精度、高速度、大功

率的应用场景，比如数控机床、自动化生产线等；而直流伺服电机适用于需要低功率、高速度、低精度的应用场景，比如消费电子、机器人等。

表 2：步进电机和伺服电机比较

电机	定义	特点	实例
步进电机	将电脉冲信号转变为角位移或线位移的开环控制元件。	电机转速、步距角不因电源电压、负载大小、环境条件波动而变化； 适合开环系统做执行元件，使控制系统大为简化； 可在很宽的范围内通过改变脉冲频率调速； 只有周期性误差无累计误差； 能够快速启动、反动和制动。	变电站轨道式巡检机器人 玻璃幕墙清洗机器人
直流伺服电机	伺服系统是指利用某一部件（如控制杆）的作用使系统的状态到达或接近某一预定值，并能将所需状态（所需值）和实际状态加以比较，依照它们的差别来调节控制部件的自动控制系统。	一般使用 PWM 或者模拟控制器； 具有良好的调速特性、较大的启动转矩和相对功率、易于控制及响应快等优点； 适用于低功率、高速度、低精度。	电驱动四足机器人 室内全向移动机器人 管道机器人
交流伺服电机		控制器通常使用 PLC 或者 PID 控制器； 无电刷和换向器，因此工作可靠，对维护和保养要求低； 定子绕组散热比较方便； 控制精度比较高，反应速度比较快，稳定性更好； 高精度、高速度、大功率的应用场景。	桁架式机器人 基于 ARM 的码垛机器人 果蔬大棚巡检机器人

资料来源：孙巍伟《机器人伺服控制系统及应用技术》，光大证券研究所整理

1.2、空心杯电机和无框力矩电机适配机器人不同部位

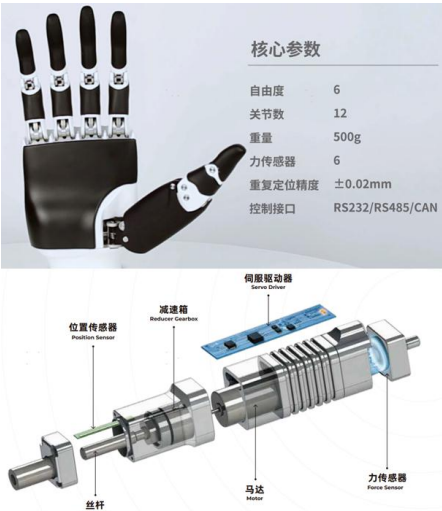
人形机器人灵巧手使用的电机是空心杯电机。特斯拉人形机器人从 2021 年 Tesla Bot 到 2022 年 AI Day Optimus 正式亮相，再到 2023 年 Optimus 二代，已经实现快速发展。Optimus 的灵巧手采用经典的 6 电机驱动方案，即由空心杯电机+驱动器+减速器+编码器组成，拇指是采用双电机驱动弯曲和侧摆，其余四指各用一个电机带动；国内领先的机器人厂商因时机器人的仿人五指灵巧手采用直线驱动设计，内部集成了 6 个力控微型伺服电机，即减速器、空心杯电机、丝杆机构、传感器以及伺服控制系统。

图 2：特斯拉 Optimus 人形机器人手部透视图



资料来源：特斯拉 AI DAY 2022，光大证券研究所整理

图 3：因时机器人灵巧手及微型伺服电机



资料来源：因时机器人公众号及官网

人形机器人关节使用的电机是无框力矩电机。特斯拉人形机器人全身共有 28 个执行器，执行器分布在肩部 6 个、肘部 2 个、腕部 6 个、躯干 2 个、髋部 6 个、膝部 2 个、踝部 4 个，其中旋转执行器和线性执行器各 14 个。

旋转执行器：主要由无框力矩电机+谐波减速器+扭矩传感器+位置传感器+轴承（角接触球轴承+交叉圆柱滚子轴承）+编码器组成；旋转执行器分布在肩部 6 个、腕部 2 个、髋部 4 个、躯干 2 个。特斯拉人形机器人包含 3 种不同扭矩的旋转减速器，扭矩分别为 20Nm/110Nm/180Nm。

图 4：特斯拉 Optimus 人形机器人旋转执行器



资料来源：特斯拉 AI DAY 2022，光大证券研究所整理

线性执行器：主要由无框力矩电机+行星滚柱丝杠+力矩传感器+位置传感器+轴承（四点接触球轴承+深沟球轴承）+编码器组成；线性执行器分布在肘部 2 个、腕部 4 个、髋部 2 个、膝部 2 个、踝部 4 个。特斯拉人形机器人包含 3 种不同力矩的线性执行器，力矩分别为 500N/3900N/8000N。

图 5：特斯拉 Optimus 人形机器人线性执行器



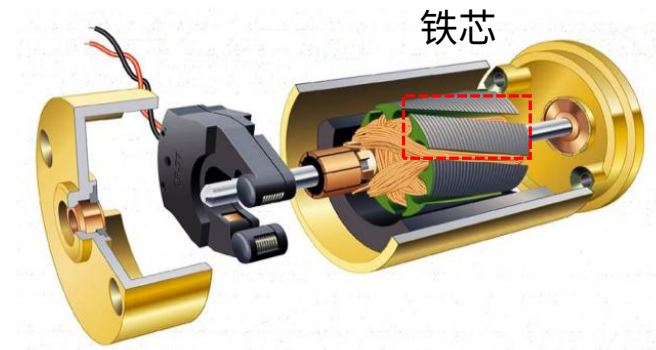
资料来源：特斯拉 AI DAY 2022，光大证券研究所整理

2、空心杯电机：与灵巧手高度适配

2.1、无铁芯结构，能效高、转速快、寿命长

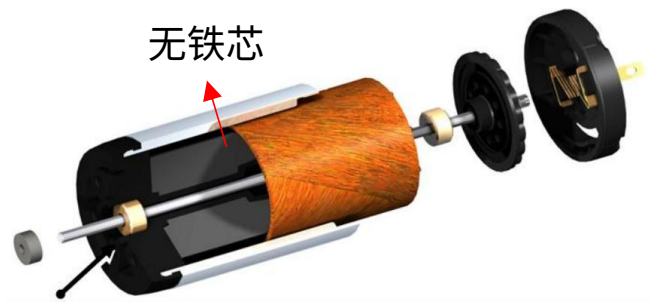
空心杯电机是一种微型伺服电动机，与灵巧手关节高度适配。它利用永磁铁产生磁场，从而实现直流供电。与传统电机的不同之处在于，空心杯电机结构为转子无铁芯，表现为无铁心损耗、低摩擦和良好的散热性等特性，实现了电机的高效率，是电池供电型设备的理想选择。空心杯电机通常应用于便携式空气采样泵、仿人机器人、仿生手、手持电动工具等场景。

图 6：普通含铁芯直流电机结构图



资料来源：Maxon, 《Permanent magnet dc motor with corless winding》，光大证券研究所整理

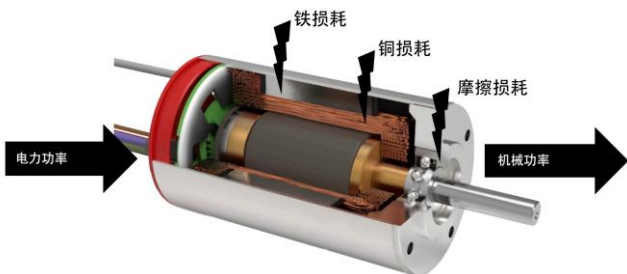
图 7：空心杯电机结构图（无铁芯）



资料来源：陈安《空心杯电机定制化管理的应用研究》

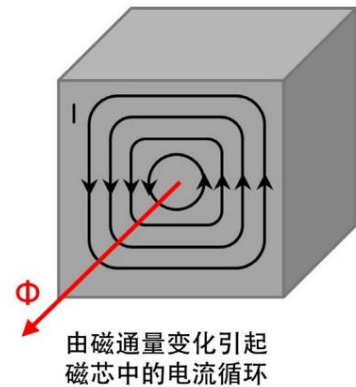
空心杯电机无铁芯设计表现为无涡流损耗和磁滞损耗。铁芯损耗一般由涡流损耗和磁滞损耗组成，铁芯在电机运转中会产生感应电动势，进而产生感应电流，感应电流成涡流状，涡流损耗是电机损耗最大部分；磁滞损耗表现为磁化过程中有一部分电磁能量不可逆转地转换为热能，铁磁体等在反复磁化过程中因磁滞现象而消耗能量。

图 8：无刷直流电机的损耗



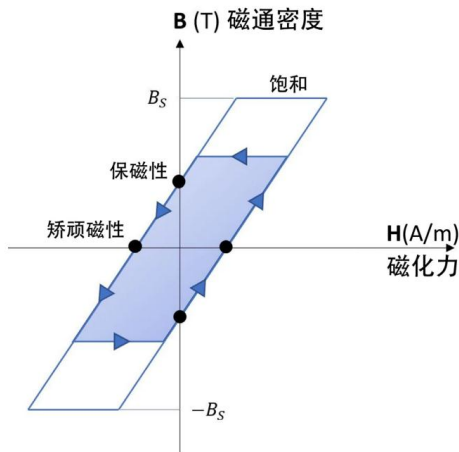
资料来源：Portescap《铁损耗对无刷直流电机选择的直接影响》

图 9：涡流损耗：磁通量变化引起磁芯中的电流循环



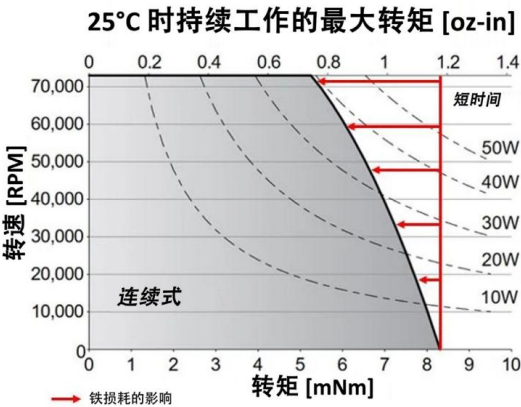
资料来源：Portescap《铁损耗对无刷直流电机选择的直接影响》

图 10：磁滞损耗示意图



资料来源：Portescap《铁损耗对无刷直流电机选择的直接影响》

图 11：铁损耗对功率曲线的影响



资料来源：Portescap《铁损耗对无刷直流电机选择的直接影响》

空心杯电机转子是杯状的自支撑线圈，可降低转子转动惯量，具有以下特点：不存在齿槽，没有齿槽转矩，因此噪声和振动小；换向片数量多，换向时的电流波动更小；物理气隙较大，电感较小，换向火花小，因此电磁兼容性能好。

表 3：空心杯电机特性及应用优势

空心杯电机	电机特性	具体描述
无铁芯转子	能效高	无涡流损耗和磁滞损耗，最高效率可达 80%以上
	转速高	连续力矩不会快速下降，通常设计在 10000rpm 以上
	响应快	转动惯量小、线圈电感小
	运行平稳	无齿槽、换向片多
	寿命长	预期寿命大约在 1000-3000h，如果无刷方案会更长

资料来源：陈安《空心杯电机定制化应用研究》

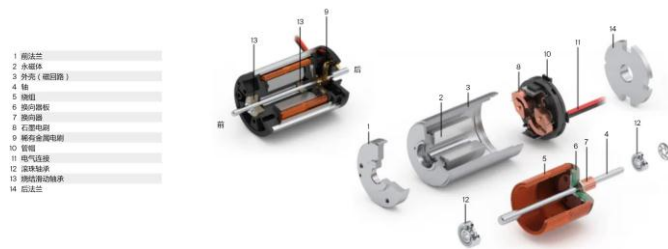
空心杯电机分为有刷电机和无刷电机：有无电刷是有刷电机和无刷电机最直观的区别。电刷可将电能转换成机械能或将机械能转换成电能，无刷电机则是由电机主体和驱动器组成的机电一体化产品。

Maxon 和鸣志电器的有刷空心杯电机和无刷空心杯电机组成结构如下：

Maxon 的有刷空心杯电机组成结构：前法兰、永磁体、外壳、轴、换向器板、换向器、石墨电刷、稀有金属电刷、管帽、电气连接、滚柱轴承、烧结滑动轴承、后法兰。

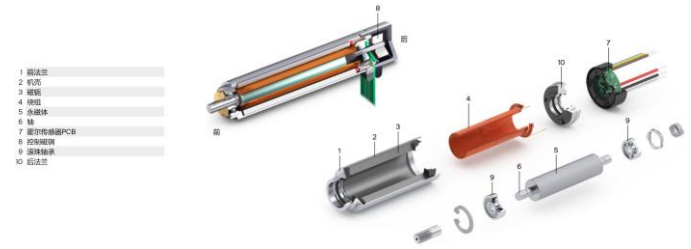
Maxon 的无刷空心杯电机组成结构：前法兰、机壳、磁轨、绕组、永磁体、轴、霍尔传感器 PCB、控制磁钢、滚柱轴承、后法兰。

图 12: Maxon 有刷空心杯电机结构图



资料来源: Maxon 官网

图 13: Maxon 无刷空心杯电机结构图

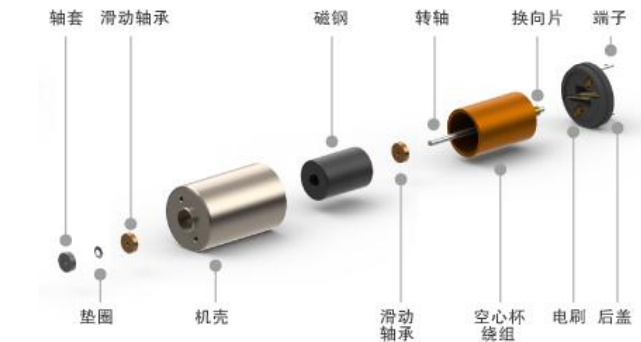


资料来源: Maxon 官网

鸣志电器的有刷空心杯电机组成结构: 轴套、垫圈、滑动轴承、机壳、磁钢、滑动轴承、转轴、空心杯绕组、换向片、电刷、后盖、端子。

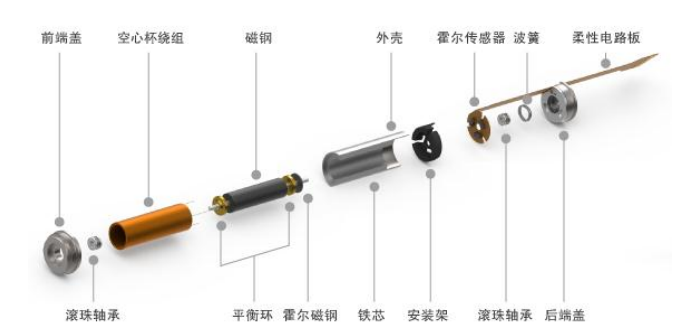
鸣志电器的无刷空心杯电机组成结构: 前端盖、空心杯绕组、平衡环、磁钢、霍尔磁钢、铁芯、外壳、安装架、霍尔传感器、滚珠轴承、波簧、后端盖、柔性电路板。

图 14: 鸣志电器有刷空心杯电机结构图



资料来源: 鸣志电器官网

图 15: 鸣志电器无刷空心杯电机结构图



资料来源: 鸣志电器官网

有刷直流电机: 石墨电刷材料采用石墨, 稀有金属电刷通常采用一些稀有金属材料, 如钨、铜、钴、银等, 适用于较小电机中低电流连续运行; 石墨碳刷适用于较大电机中, 大电流连续运行。

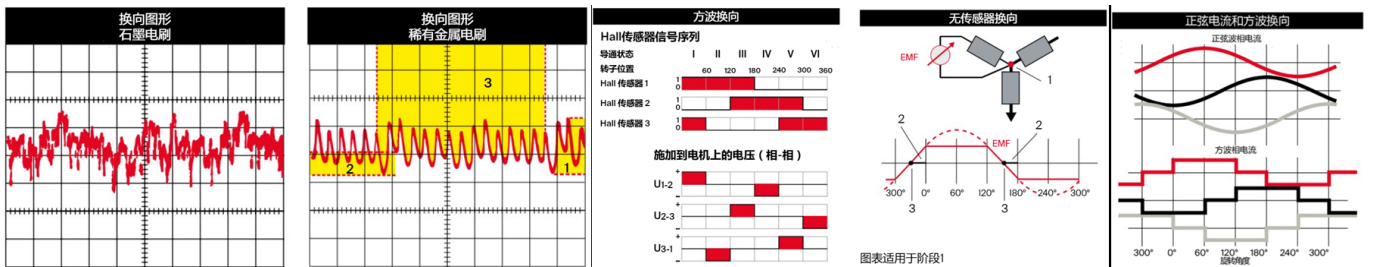
无刷直流电机: 位置传感按转子位置的变化, 沿着一定次序对定子绕组的电流进行换流。**具体方式:** 检测转子磁极相对定子绕组的位置, 并在确定的位置处产生位置传感信号, 经信号转换电路处理后去控制功率开关电路, 按一定的逻辑关系进行绕组电流切换。定子绕组的工作电压由位置传感器输出控制的电子开关电路提供。在人形机器人领域中, 无刷电机带编码器可用于轨迹规划、动作控制、位置检测等多种应用, 可以现高精度的运动和动作控制, 从而提高人形机器人的操作精度和效果。

表 4：不同换向方式（有刷和无刷）特点描述

换向方式	电刷或换向器	性能与应用	特点描述
机械换向	石墨电刷	1) 大尺寸电机 2) 高电流负荷 3) 频繁启动/停止的运行工况 4) 需要反向运行 5) 输出级采用 PWM 控制	与铜制换向片配合使用可以适合于各种苛刻的应用场合 1000 万次工作循环寿命 可能引起尖峰信号，尖峰信号会产生高频干扰，但仍可以应用于采用电子控制装置的场合 石墨电刷 接触电阻随负载不同而变化
	稀有金属电刷和换向器	1) 小尺寸电机 2) 连续运行 3) 低电流负载 4) 电池供电 5) 直流测速计	维持高稳定性和低接触电阻，即使在长期停机后 电机的启动电压和电磁干扰都很小 换向图形均匀且无尖峰信号
电子换向	方波换向	相对简单，驱动装置价格合理 转矩波动 14% 电机启动可控 可提供高启动转矩和加速度 伺服驱动，启动/停止的运行工况 定位系统 可测得电机的性能参数	由三个内置霍尔传感器反馈转子位置 相差 120°布置每转提供六种不同的导通状态 电流和电压的波形为方波 每个电子换向器的切换位置与相应的最大转矩位置相差 30°
	无传感器方波换向	转矩波动 14% 启动过程不能确切定义 不适合低速运行和动态应用 可高速连续运行（风扇、铣切机、钻孔机）	电机转子的位置是通过检测感应电压来确定的，估算感应电压的过零点，经过一个有电机转速决定的延时后进行电流的换向 在堵转和低速时，电压信号过小且无法推测检测到过零点；因此，在启动时需要采用特殊的算法
	正弦波换向	驱动装置价格较高 磁场定位控制 没有转矩波动 运行非常平顺，在低速也如此 与方波换向相比连续转矩增加了 5% 高动态性能的伺服驱动系统 定位系统	来自编码器或解析器的高分辨率信号在电子装置内形成正弦波电机电流，三个电机绕组的电流取决于转子位置，并且彼此之间相差 120°，使得电机运行非常平顺、精确、可以实现非常高的精度和高质量的控制

资料来源：Maxon 官网

图 16：不同换向方式的换向图形



资料来源：Maxon 官网

无刷电机通常具有以下特点：（1）使用寿命更长，通常为 7-10 年；（2）能耗少，通常为有刷电机的 1/3；（3）运行安静，运营平稳，噪音小；（4）价格较贵，有刷电机价格低廉。

编码器则是一种用来测量电机转动角度和位置的器件：主要分为磁性编码器、光学编码器、电容编码器。磁性和光学编码器目前应用较为广泛，而 CUI Device 的电容编码器则可以应用在工业、自动化、机器人和可再生能源领域，未来高精度、环保型控制场景有望推动电容式编码器的提升。

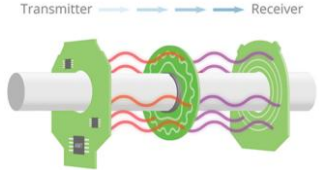
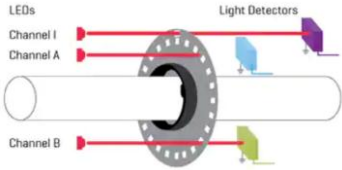
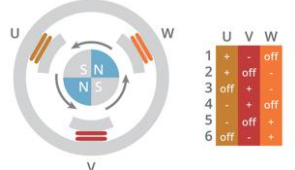
磁性编码器：使用磁性码盘，磁性码盘上带有间隔排列的磁极，并在一系列霍尔效应传感器或磁阻传感器上旋转，任何转动都会检测永磁体、转子旋转时产生的磁场变化。通常采用：霍尔元件、磁敏二极管、磁敏电阻器或专用集成电路等；价

格相对便宜、优势在于更耐用、抗振和抗冲击、适合恶劣环境应用，但会受到电磁干扰，分辨率和精度相对较低。

光学编码器：转子上装有遮光板，LED 光源（通常是红外光源）和光电探测器组成，转子旋转时，由于遮光板的作用，定子上的光敏元器件将会按一定频率间歇产生脉冲信号。分辨率更高，价格相对磁性编码器较贵，在工业应用等多尘且肮脏的环境中，污染物会堆积在码盘上，从而阻碍 LED 光透射到光学传感器、导致方波不连续或完全丢失。

电容式编码器：使用条状或线状纹路，一极位于固定元件上，另一极位于活动元件上，以构成可变电容器，并配置成一对接收器/发射器；转子上蚀刻了正弦波纹路，随着电机轴的转动，这种纹路可产生特殊但可预测的信号，由板载 ASIC 转换，以计算轴的位置和旋转方向。可提供更高的精度和分辨率，耐受各种环境污染物、承受振动和极端温度、坚固耐用有更长的使用寿命、更小的占地面积和更低的电流消耗，不受磁干扰和电噪声的影响。

表 5：不同编码器性能比较

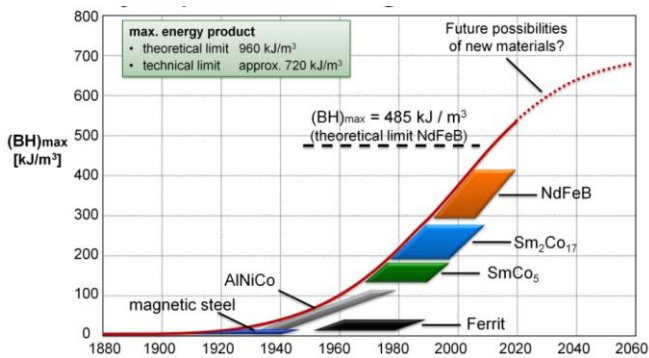
指标	电容编码器	光学编码器	磁性编码器
编码器示意图			
编码器原理			
耐污垢、灰尘、油污	高	低	高
准确性	高	高	低
温度范围	宽	中	窄
电流消耗	低	高	中
可编程性	可	不	不
包装尺寸	小	中	中
电磁兼容抗扰度	高	高	高
抗磁能力	高	高	低
分辨率范围	宽	宽	窄

资料来源：CUI Device 官网

目前，高端磁性编码器中的芯片、码盘、磁头等依赖进口；码盘加工精度也较高；光学编码器光敏器件参数控制也较高。这些都是国产编码器厂商的挑战和机遇。

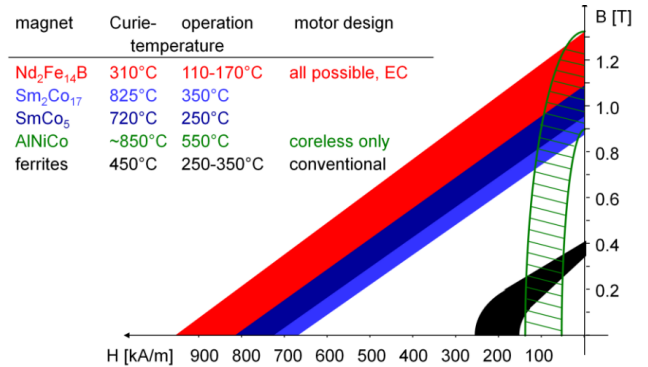
空心杯电机以稀土钕铁硼磁铁为永磁体性能更强。20 世纪 30-50 年代，铝镍钴磁体与铁氧体一起构成了小型永磁直流电机开发的基础，铝镍钴的能量密度更高，这也体现在电机的功率密度上；60 年代，出现了基于钐和钴的稀土磁体，比铝镍钴坚固得多；80 年代，出现了更强的钕铁硼磁铁，此时无铁芯设计才能充分利用其优势，从而实现空心杯直流电机的极高功率密度。铝镍钴和钕铁硼可以具有非常高的剩磁，超过 1.2T，稀土磁体具有非常高的矫顽场，很难消磁。

图 17：永磁体功率密度发展变化



资料来源：Maxon 《Permanent magnet dc motor with corless winding》

图 18：不同永磁体典型的退磁曲线



资料来源：Maxon 《Permanent magnet dc motor with corless winding》

国内厂商如中科三环、宁波韵升、金力永磁、正海磁材、大地熊、英洛华等均有烧结钕铁硼产品。各公司的烧结钕铁硼产品磁性能和服役特性主要指标情况如下表：

表 6：烧结钕铁硼产品磁性能

项目	国标	中科三环	宁波韵升	金力永磁	正海磁材	大地熊	英洛华	信越化学	日立金属
单类产品中最高剩磁 (kGs)	≥14.5	14.5-15.0	14.6-15.2	14.5-15.0	≥14.7	14.5-15.0	≥14.4	14.1-14.7	14.2-14.8
单类产品中最高内禀矫顽力 (kOe)	≥35	≥40	≥34	≥39	≥40	≥40	≥35	≥35	≥28
单类产品中最高最大磁能积 (MGoe)	51-55	51-55	52-56	51-55	≥52	51-54	51-55	47-53	48-53
最高的内禀矫顽力与最大磁能积数值之和	72	79	78	78	80	79.5	76	77	74
最高工作温度 (°C)	-	-	240	250	250	250	220		

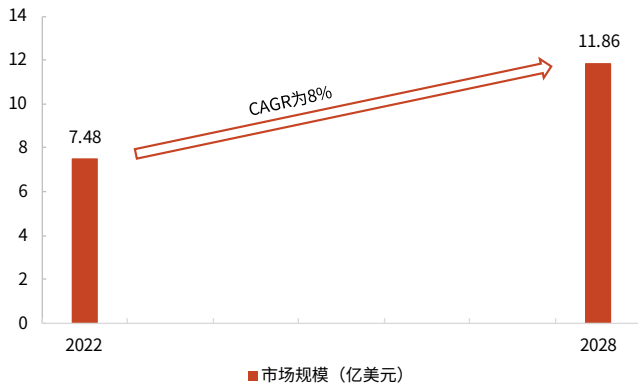
资料来源：大地熊招股说明书

2.2、人形机器人带来增量，国产替代空间广阔

2022 年空心杯电机全球市场规模超 50 亿元人民币。根据 QY Research 数据：全球空心杯电机市场规模在 2022 年约为 7.48 亿美元，折合人民币约 53.56 亿元（以美元/人民币=7.16 的汇率进行折算），预计到 2028 年将达到 11.86 亿美元，2022-2028 年复合年增长率为 7.98%；若进一步区分有刷和无刷，2021 年全球有刷空心杯电机市场规模占全球空心杯电机市场规模比例（按金额）为 67.33%，并预计到 2028 年有刷空心杯电机全球市场规模将达到 6.86 亿美元，2022-2028 年复合增长率为 5.68%。

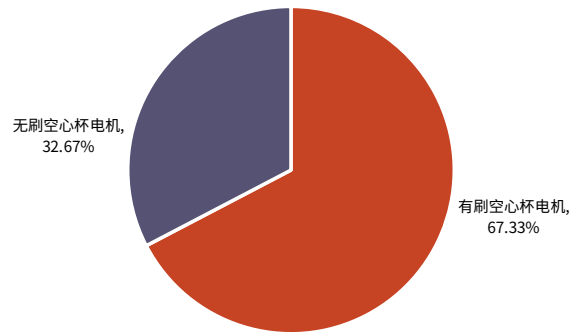
根据 QY Research 数据：分地区来看，2021 年中国、欧洲空心杯电机市场规模分别约为 2.36 亿美元、1.75 亿美元，占全球空心杯电机市场规模比例（按金额）分别为 34.80%、25.85%。

图 19：全球空心杯电机市场规模



资料来源：QY Research

图 20：2021 年全球市场各类空心杯电机占比（按金额）



资料来源：QY Research

以全球空心杯电机龙头 Maxon 为例，其电机被广泛应用于医疗、航空航天和工业自动化领域。在医疗领域，Maxon 电机在有源植入物、外科手术机器人、仿生假肢等高精度设备中运行；在航空航天领域，可具体应用于飞机控制系统、科研航天器和机器人探测器等；在工业自动化领域，能够应用于实验室自动化、原油和天然气等行业。

表 7：Maxon 电机典型的应用领域

领域	细分	具体应用
医疗领域	有源植入物	心脏支持系统、主动阀、定位系统、泵系统
	外科系统	手术机器人、电动工具、牙科仪器、呼吸机、呼吸器
	泵和给药系统	胰岛素泵/镇痛泵、血液透析泵
	康复设备和假肢	仿生手、仿生脚、外骨骼、治疗系统
航空航天	航空领域	飞机控制系统：用于小型舵面、各种类型的空气和液体阀门、电传飞行控制系统、阀门、空调系统等执行器 机上通讯和机舱设施：各种用于天线装置、窗户遮光板控制、电动座椅调节、卫生间、行李架关闭辅助装置的执行器
	航天领域	用于火箭发动机阀门、光伏阵列驱动装置以及伸展机构的驱动装置。用于对接分离系统的执行器 应用于科研航天器和机器人探测器的任务执行机构，尤其是在月球和火星的探测任务
	无人航空	基础设施：用于对接、维护、发射和降落系统的执行器，用于执行维护作业的机器人系统 有效载荷机构：舵面执行器、电子光学元器件、云台和负载驱动装置、绞盘和负载锁定装置 由电机、控制器和螺旋桨组成的优化驱动系统，可用于多轴飞行器、固定翼飞行器和无人垂直起降飞行器
工业自动化	实验室自动化	液体处理（移液机器人），即时检测诊断(POC)，DNA 测序，PCR 分析
	电动工具	捆扎工具、电池堆垛机，修枝剪、植物捆扎机、锯子、摇动采收机，电动螺丝刀、射钉枪、压紧工具
	原油和天然气行业	随钻测量(MWD)，测量和检测系统，阀门控制系统，液压泵系统
	半导体行业	圆晶生产，半导体抛光，拾取与放置应用，用于产品检测的分析和测试系统
	测量/检验技术	3D 测量机，光学雷达系统，表面检测设备，扫描仪，全站仪，精密天平
	安全系统	防盗门，锁定装置，移动检测系统，监控摄像头

资料来源：Maxon 产品手册

我们对人形机器人空心杯电机市场空间进行了简单测算，核心假设如下：

- (1) 以特斯拉人形机器人 Optimus 为例，其手部共有 12 个执行器（双手），所用电机为空心杯电机，因此假设单台人形机器人空心杯电机用量为 12 个；
- (2) 随着人形机器人大规模量产，降本要求提高，空心杯电机平均价格逐渐下降；

(3) 根据 Market Research, 全球领先的空心杯电机企业基本均位于海外, 2021 年全球空心杯电机前三大企业的市场份额 (按收入) 为 55.43%。基于此, 假设当人形机器人年产量为 5 万台时, 中国企业市占率为 30%, 并且该市占率随着人形机器人年产量的增加而上升。

当人形机器人年产量分别为 5/10/50/100 万台时, 假设空心杯电机平均价格分别为 1000/800/600/500 元/个, 则对应市场空间分别为 6/9.6/36/60 亿元; 若进一步假设中国企业市占率分别为 30%/40%/50%/60%, 则中国企业可获得市场空间分别为 1.8/3.8/18/36 亿元。

表 8: 人形机器人空心杯电机市场空间测算

人形机器人年产量假设 (万台)	5	10	50	100
单台人形机器人空心杯电机用量 (个)	12	12	12	12
空心杯电机平均价格假设 (元/个)	1000	800	600	500
市场空间预测 (亿元)	6	9.6	36	60
中国企业市占率假设	30%	40%	50%	60%
中国企业可获得市场空间 (亿元)	1.8	3.8	18	36

资料来源: 人形机器人联盟微信公众号, 鸣志电器官网, 光大证券研究所测算

外国公司占据大部分份额, 国产替代空间广阔。国外空心杯电机排名前列的公司分别是 Maxon Motor、Faulhaber、Portescap、Allied Motion Technologies、及 Nidec Copal Corporation; 国内空心杯电机龙头公司是鸣志电器, 拓邦股份、鼎智科技、伟创电气、昊升电机也是重要的空心杯电机公司。

可以发现, 海外公司成立年份较早, 产品横向、纵向布局均较为完善, 具备大量的驱动配置方案, 且均为全球化企业。国外龙头企业小尺寸电机设计能力强, 直径最小尺寸可至 6mm, 而国内企业少有 12mm 以下尺寸的空心杯电机产品, 直径上限也比较高。国内成立较晚, 研发及生产则是以点带面, 逐步丰富能力, 随着能力不断深化, 未来有广阔的国产替代的空间。

表 9: 空心杯电机行业领先企业

企业	成立年份	国家	产品布局	区域布局	有刷空心杯电机直径 (mm)	无刷空心杯电机直径 (mm)	介绍
Maxon Motor	1961	瑞士	无刷和有刷 DC 电机、行星齿轮箱、正齿轮箱、特殊齿轮箱、传感器、编码器、伺服放大器、位置控制器、CIM 和 MIM 组件	总部位于瑞士 Sachseln; 销售网络分布于全球 40 个国家; 全球约有 3300 名员工, 其中超过 1300 名在瑞士萨克瑟恩	6-65	4-90	精密驱动系统的领先制造商, 包括空心杯直流电机。他们以其用于医疗设备、航空航天和机器人等关键应用的高质量和高性能电机而闻名, 2022 年营业收入 7.08 亿瑞士法郎。
FAULHABER Group	1947	德国	直流电机、直流无刷电机、内置驱动器电机、直线电机、步进电机、减速箱、线性致动器、编码器、电子控制、配件	总部德国舍奈希; 瑞士、美国、罗马尼亚和匈牙利也建有研发和生产中心, 并在全球 30 多个国家与地区设有销售代表和分公司。拥有超过 2300 名专业员工	6-38	3-44	主要业务是精密微型和微型驱动系统的设计、开发和制造。主要客户包括医疗设备制造商、机器人公司和自动化系统集成商。
Portescap	1931	瑞士	无刷直流电机、有刷直流电机、步进电机、齿轮箱、编码器、驱动器	在北美、欧洲和亚洲的低成本制造设施确保经济、持续、及时的供货	8-35	16-35	一家微型电机产品和精密运动控制系统的制造商, 在各个行业都有应用。
Allied Motion	1962	美国	直流无刷电机、直流有刷电机、驱动器、编码器、力矩电机、伺服电机、变速驱动桥	在 10 个国家拥有 22 个站点, 技术单位分布在美国、加拿大、墨西哥、欧洲和亚洲。	未披露	未披露	一家全球精密操作和控制巨头。重点关注车辆、医疗、航空航天和国防、电子和工业市场。2022 年营业收入 5.03 亿美元。
Nidec Corporation	1973	日本	马达/电机、风扇 & 鼓风机、电机控制器、减速机、搬运装置、光学设备、传感器、电子设备	网点遍布全球 40 余个国家, 尼得科已成为一家在全球拥有 300 家以上分支机构	未披露	未披露	生产包括空心杯电机在内的各种电机。客户主要在汽车、工业和消费电子行业。
鸣志电器	1994	中国	无齿槽 & 空心杯电机、运动控制器、步进驱动器与	总部位于中国上海, 在北京、广州、深圳等十大城市	8-24	13-30	一家运动控制领域综合制造商, 覆盖从工厂自动化专业部件到

			电机、步进伺服驱动器与电机、伺服驱动器与电机、集成式电机、全能型智能电机驱动器、直线运动产品、直流无刷驱动器与电机、智能照明系统等	设有办事处。分公司遍及北美、欧洲、日本和东南亚，已形成全球销售网络。并通过跨国并购在海外拥有了多处研发中心和制造基地，全球员工总数已达 3,000 多人			智能 LED 照明驱动器，从大型工厂设备的智能管理系统到汽车通信设备的控制执行机构。2022 年营业收入 29.60 亿元。
拓邦股份	1996	中国	智能控制器、锂电池、高效电机、工控产品	总部位于深圳，在全球各地布局了十余个生产/研发基地，遍布中国、越南、印度、罗马尼亚、墨西哥等国家	16-40	12-40	智能控制系统解决方案的研发、生产和销售，即以电控、电机、电池、电源、物联网平台的“四电一网”技术为核心，面向家电、工具、新能源、工业和智能解决方案等行业提供各种定制化解决方案。2022 年营业收入 88.75 亿元。
鼎智科技	2008	中国	线性执行器、步进电机、直流无刷电机、空心杯电机、简易模组、微型夹爪、音圈电机、运动控制器	总部位于江苏常州，在中国和美国设有生产基地；在中国深圳、美国加州和韩国设有销售分部；客户遍布 50 多个国家	未披露	10-42	专注于直线丝杆步进电机，成为市场领域内精密直线运动系统专家。2022 年营业收入 3.18 亿元。
伟创电气	2005	中国	变频器、伺服系统、控制系统、行业专机、智能物联网	总部位于深圳，在印度设立了全资子公司，目前业务遍及多个国家和地区，为全球客户提供有竞争力、安全可靠的产品和服务	已研发，13		专注于电气传动和工业控制领域，是一家从事工业自动化产品研发、生产、销售于一体的高新技术企业。2022 年营业收入 9.06 亿元。
昊升电机	2000	中国	热管理系统电机、BOSCH 割草机、医用直流无刷电机、30 无刷定转子、压缩机电机	总部位于江苏常州，现有员工 320 人，德国斯图加特、日本大阪有办事处，面向欧洲和日本客户	13-30		专业制造直流有刷电机、无刷电机、齿轮减速电机、无齿槽电机。

资料来源：各公司官网

我们另以 8mm 有刷空心杯电机、16mm 无刷空心杯电机相似口径，将国内外空心杯电机产品性能作比较。需要指出的是，无刷小尺寸直径空心杯电机国内尚无可比产品。对于 8mm 直径有刷空心杯电机：海外公司的产品效率更优，最大连续转矩也更优，而在转速方面差异不大，价格方面国内产品则更低；对于 16mm 无刷空心杯电机，国内产品效率、转速、连续最大转矩更优，价格也便宜，说明国内产品的部分产品策略、产品性能是较为成功的。

表 10：空心杯电机性能比较

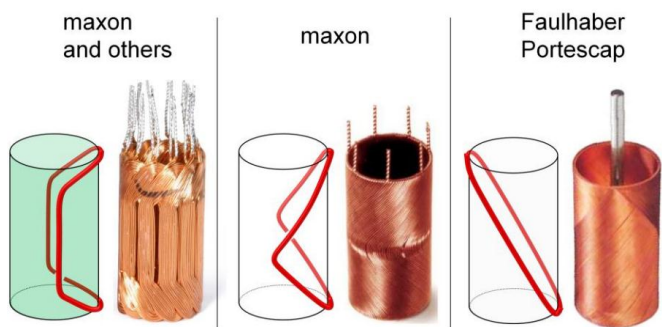
	鸣志电器	Maxon	Faulhaber	Portescap	Maxon	鸣志电器
产品型号	DCU08017P06	DCX8M08 mm 01EBKL633	0816K006SR	08GS61-105C.3	EC-max 16 Ø16 mm 283828	ECU16024H12-S101
换向器	稀有金属电刷				霍尔传感器	
直径 (mm)	8	8	8	8	16	16
最大效率 (%)	55	71	69	72	54	66
额定电压 (V)	6	6	6	6	12	12
质量 (g)	4.5	4	4.5	4	36	30
空载转速 (rpm)	13500	11000	13500	11000	13500	15250
最大连续转矩 (mNm)	0.6	0.637	0.69	0.66	3.23	3.5
堵转转矩 (mNm)	0.85	1.05	1.15	0.64	5.95	8.86
价格 (元)	1443 (电机+减速器)	1028 (1-4 件) 898 (5-19 件) 765 (20-49 件)	-	-	1897 (1-4 件) 1466 (5-19 件) 1091 (20-49 件)	921

资料来源：各公司官网

2.3、 壁垒：绕组设计与设备、产品矩阵及客户背书

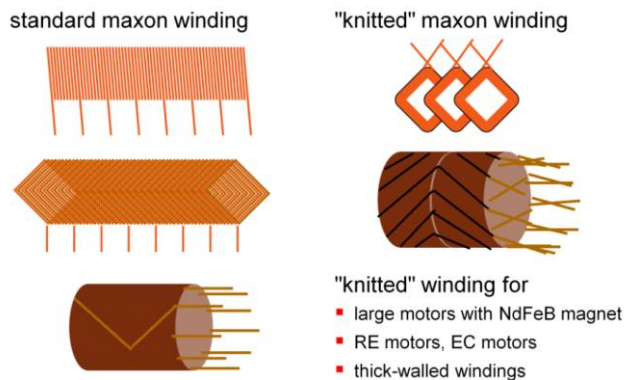
(1) **绕组设计**：生产空心杯电机的关键在于空心杯线圈的绕制，目前绕法主要分为直绕式、马鞍式、斜绕式三种。马鞍式和斜绕式是目前海外先进空心杯电机厂商最常采用的两种方式。

图 21：空心杯电机三种绕组方式



资料来源：Maxon 《Permanent magnet dc motor with corless winding》

图 22：Maxon 标准及马鞍式绕线方式



资料来源：Maxon 《Permanent magnet dc motor with corless winding》

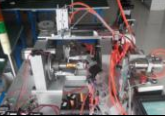
Maxon 空心杯绕组拥有全球专利，每种电机型号都有多种线径和匝数的绕组规格。从绕组方式上看：

- 1) **标准型绕组**：通过绕卷的方法完成，先将绕组线绕制成为线圈筒状，以规则的间隔进行连接，再将筒状线圈压制成线圈板。
- 2) **组合型绕组**：由多个独立的单个线圈绕组串联成为线圈板，再将其“编织”成为空心杯状线圈。

FAULHABER 于 1958 年发明了空心杯电机斜绕组线圈，并于 1965 年获得斜绕组线圈的专利，斜绕组线圈主要通过在绕线机的绕线芯轴上一次性绕制完成，实现线圈的全自动化制造。

(2) **绕组设备**：瑞士的 Meteor、日本的田中精机、日本的日特电机工程是全球空心杯电机绕组设备的重要公司，综合国内的空心杯技术以及绕制设备的研究现状可知，设备国产化程度较低，设备研发也较为落后。国内绕线设备自动化程度相对较低，采用的绕制方式卷绕式和一次成型的方式。卷绕式线圈生产设备虽然能够绕制斜形以及马鞍形等多重线圈，但绕制线圈的质量一般；一次成型设备对马鞍形等空心杯线圈没有较好的解决方案。

表 11：绕组设备公司情况说明

公司	设备图例	设备说明
Meteor		M26 系列单锭绕线机，专为中小批量生产而设计，凭借可在 3 轴上进行数字编程的导丝器，可以实现线圈的自动生产
		MBL420 自动绕线机适用于中小型生产，有两轴和四轴两种。骨架的安装和线圈的卸载，需要是手动完成。MBL420 几乎可以处理所有类型的线圈
		PRA1000 绕线机是一种塔式绕线机，是一台综合性很强的绕线机，它拥有高速线圈更换系统以及经过检验的最佳性能的绕线技术。这种塔式技术减少了更换骨架的时间，6-10 轴的 PRA 1000 绕线机几乎能加工所有几何形状线圈
田中精机		BX 系列空心线圈绕线机、CX 系列全自动绕线机、MX 系列全自动多轴绕线机升级版
日特电机工程		BAS、BHS、BIF 系列空心线圈绕线机。应用于大量生产的多轴，全自动系统到单轴（少数轴）的台式绕线机的生产，因单轴（少数轴）自动方式的确立，实现了全自动流水线生产
中特科技		我国从事电机设备研究与制造较早的企业，在无刷电机生产设备领域，该公司生产的多款自动以及半自动绕线设备是国内该行业专用设备中的佼佼者。全自动双轴空心杯绕线机是一款中特公司研发的自动空心杯电机线圈绕制设备，适用于 $\Phi 4\sim\Phi 18$ 空心杯电机线圈绕线
东莞市台立电子		公司研发 XRD-810 型多功能绕线机。该设备绕制线圈的范围相对较广，不但可以用于空心杯电机线圈生产，还可以绕制大变压器以及较小的线圈，并且能够定制所需线圈的规格。在空心杯电机方面，绕制效果一般，绕制的线圈形式较为局限
勤联科技		是国产空心杯绕线机中较少掌握采用一次性绕制成型生产技术的设备，自动化程度较高，省掉了对线圈进行压扁、卷圆、校圆等工序，直接将线圈绕制成蜂巢式形状。但该绕线机只能绕制尺寸较小、线径较细的线圈而且线圈形状单一的线圈
昆山库克		昆山库克自动化研制的斜绕形绕线机，是同哈尔滨工程大学合作研发的设备，可以绕制一定线径的空心杯线圈，实现较高的绕线效率。对于斜绕形的线圈有着较好的绕制效果，并且线圈一次成型，避免了后续的压扁、卷圆等繁琐的工序，但是绕线的形式较为单一，只能绕制斜绕形线圈的绕线设备

资料来源：Meteor、田中精机、日特电机工程来自公司官网，其余来自谢春辉《马鞍形空心杯电机线圈绕制设备研究》

（3）产品矩阵及客户背书

产品矩阵和客户背书是空心杯电机的重要壁垒。我们以 Maxon 和 Faulhaber 两家公司为例进行分析，两者均具有完善的产品矩阵和优秀的客户背书，这也是其能够成为全球领先的空心杯电机制造商的重要影响因素。

1) Maxon:

拥有完善的纵向一体化电机产品矩阵：公司产品包括有刷和无刷直流电机、无刷盘式电机；行星齿轮箱、正齿轮箱、特殊齿轮箱；传感器；运动控制器、电机控制器、位置控制器；客户定制驱动方案等。

多年来为高精尖领域提供创新解决方案，具有优秀的客户背书：公司产品应用于工业自动化、医疗技术、安全技术、仪器仪表、通讯技术、日用消费等领域。美国国家航空航天局火星探测车的驱动力来源就是 Maxon 电机；医疗、机器人、精密工业设备等领域也有 Maxon 电机的应用。以上领域均为高精尖领域，Maxon 具有优秀的客户背书以及较强的客户粘性。

表 12：Maxon 产品介绍

产品名称	产品介绍	产品系列	产品参数	产品图示
MAXON EC 电机	电子换向的 maxon EC 电机具有转矩特性良好、功率高、转速范围大和使用寿命长等优点。它调节性能出色，因此可实现精确定位。	ECX SPEED 系列、EC 系列、EC-max 系列、EC-4pole 系列、EC-i 系列、EC flat 系列、EC frameless flat、Parvalux BLDC 电机	直径：4-90mm 标准功率：0.5-900W 额定电压：3-60V 最大连续转矩：0.229-3750mNm	
MAXON DC 电机	maxon DC 电机是质量优异的直流电机，采用高性能永磁体。电机的“心脏”是享有全球专利的空芯杯转子。这项最先进的技术带给驱动器的优势是紧凑的结构、高性能和低惯性。由于惯量较小，DC 电机可达到很高的加速度。	DCX 系列、DC-max 系列、A-max 系列、RE-max 系列、RE 系列、Parvalux PMDC 电机	直径：6-65mm 标准功率：0.3-250W 额定电压：0.6-70V 最大连续转矩：0.194-839mNm	
紧凑型驱动装置	集成 EPOS4 位置控制器的无刷紧凑型驱动系统 IDX 提供标准的自动调试功能、拥有更强的动力、供货时间短并且符合 IP 65 防护等级。	IDX 系列、ECX FLAT 系列	规格 56/70mm 额定转速:2424-6000rpm 最大转矩:775-8602mNm 额定转矩:393-3167mNm 额定电压:24/48/60VDC +VCC:12-60VDC	
机电驱动系统	maxon 除了开发和生产 DC 和 BLDC 电机、齿轮箱、传感器与控制器之外，还能根据客户的特殊需求，将驱动元件作为机电单元整合到外壳中。其优势在于紧凑型设计，为客户定制化配置的元件，保证能够让驱动系统发挥最大性能。	-	一站式供给，所有元件出自同一制造商：电机、齿轮箱、传感器等 使用寿命长、耗能低 结构坚固：耐震动、耐冲击，且可承受极端温度 设计结构紧凑：体积性能比极佳	
齿轮箱	精密正齿轮箱和行星齿轮箱会专门针对 maxon 电机进行调校，齿轮箱在出厂前便完成与目标电机的直接匹配。电机主动轮作为第一个减速级的输入齿轮，并与电机轴固定连接	GPX 行星齿轮箱、行星齿轮箱 (GP)、正齿轮齿轮箱 (GS)、丝杠轴齿轮箱 (GP)、Parvalux 齿轮箱	直径：4-81mm 减速比：1:1-6285:1 转矩：0-92.3Nm	
传感器	坚固耐用的编码器，可提供高精度和高分辨率信号的直流测速机和旋转变压器。由于共振原因，这些组件主要安装在带通轴的电机上。组件的安装专门针对电机进行适配，且必须在供应车间内完成。	ENX、编码器、旋转变压器、直流测速发电机	每旋转一周的脉冲数：0-32768 转 通道数量：2-3	
控制器	所有电流、转速和位置控制器均专门针对 1000 W 以下的 DC 和 EC 电机设计。通过 CANopen 或 EtherCAT 可迅速实现联网。	运动控制、电机控制、位置控制器		

资料来源：MAXON 官网，光大证券研究所整理

2) Faulhaber:

产品矩阵完善：公司产品包括直流电机、直流无刷电机、线性电机、步进电机等，以及减速箱、线性致动器、编码器、电子控件等，每种驱动系统都致力于在实现最小尺寸和最轻质量设计的同时达到最大性能。

产品应用于高精尖领域，产品背书优秀：公司为医疗设备、航天航空、高精精密光学仪器、机器人和自动化等高标准应用领域提供定制产品以及技术方案。

表 13: Faulhaber 产品介绍

产品名称	产品介绍	产品系列	产品参数	产品图示
直流电机	在 FAULHABER 直流电机中, 永磁铁定子为圆柱形, 位于内部, 而转子在外部围绕它旋转。转子由一个无铁芯、自承式、带斜绕组的铜线圈组成。得益于无铁芯自承式铜线圈, 电机的总重量非常轻。此外, 这种结构确保最小惯性矩和无齿槽、高精度运行。由于这些特点, FAULHABER 直流电机具有特别高的动力和高功率密度。	S/G、SR、CXR、CR、SR-Flat	直径: 6-100mm 负载转矩: 0.01-18000mNm 负载速度: 1-24000min ⁻¹	
直流无刷电机	FAULHABER 无刷电机在最小安装空间内提供最佳性能。拥有最高的速度、转矩和使用寿命。产生的噪音和振动都很低。它们甚至可以处理过载和持续运转。型号从最小的微电机到高效扁平电机和采用外部转子技术的超强力电机。	B-Micro、B、BHx、BX4、BP4、B-Flat、BXT	直径: 3-100mm 负载转矩: 0.01-18000mNm 负载速度: 1-100000min ⁻¹	
驱动单元	FAULHABER 提供一系列的带内置驱动电路的电机产品, 其外形小巧, 适用于众多应用场景。调速控制系统适用于带调速控制功能的驱动系统, 运动控制系统则是执行精准转速控制或定位任务的理想选择。	BRC、BX4 SC、BXT SC、B-Flat SC、MCS	-	
步进电机	步进电机具有极高精度, 能够胜任要求苛刻的定位任务。这种电机加速迅速, 几乎可立即达到最大功率。此外, 它们在断电时也能保持稳定的位置, 并且无需使用编码器就可实现精确控制。FAULHABER 提供了一系列独特且种类繁多的不同尺寸的步进电机。	-	直径: 6-66mm 长度: 9.5-42mm 步进角 (整步): 1.8-18° 保持转矩: 0.25-307mNm	
直线电机	直线电机产生直线运动, 即其力量沿直线施加。FAULHABER 直线电机以高速、高效和灵活的方式产生直线运动, 具有极高的重复精度。它们适用于组件在直轴上连续高速移动或施加指定压力的任务。	-	长度: 33-85.5mm 宽度: 8-20mm 最大行程: 15-220mm 最高速度: 1.8-3.4m/s 连续推力: 1.03-9.2N	
减速箱	FAULHABER 提供直齿减速箱和行星减速箱两种选择, 每种都具有其独特的优势。减速箱的部件由多种材料制成, 以满足各种应用需求。润滑剂选择丰富, 还包括为极端应用 (如航空航天) 而特制的润滑剂。FAULHABER 的所有小型减速箱均采用终身润滑技术, 从而无需再次润滑	行星减速箱、直齿减速箱	直径: 3-44mm 减速比: 3:1-983447:1	
线性致动器	线性致动器可将直流电机的旋转运动转换为线性运动。它的目的是沿着直线轴向前后移动物体。FAULHABER 线性致动器以其紧凑的设计见长。根据型号的不同, 它们在推力和精度方面可以达到峰值水平。它们适用于需要在受限空间内产生强劲线性输出力或实现极高定位精度的场合。	齿轮线性致动器、直接驱动的线性致动器	-	
编码器	编码器能够检测旋转动作, 并基于此生成测量信号。这类设备主要应用于调速控制和位置检测。FAULHABER 提供采用光学或磁性测量原理的增量式编码器。它们不仅精确、坚固, 而且设计紧凑。	增量式编码器、绝对式编码器	-	
电子控制	在众多应用场景中, 为了高效驱动微型电机, 采用电子控制器是至关重要的。这些控制器能够根据具体应用的需求, 精确地调节所需的驱动功率。FAULHABER 的直流电机控制器在运行效率和精度上表现出色, 能够准确地实现设定的目标, 如速度和位置等。其产品线包括调速驱动器、运动控制器以及步进电机控制器等, 这些都是为了与 FAULHABER 电机实现最佳匹配而专门设计的。	转速控制器、运动控制器、步进电机驱动器	-	

资料来源: Faulhaber 官网, 光大证券研究所整理

3、无框力矩电机：与机器人关节高度适配

3.1、没有机壳，结构紧凑，适配性强

无框力矩电机，是一种以输出扭矩为衡量指标的无框架式永磁电机。无框力矩电机的基本操作与传统永磁电机一样：由驱动器供电，驱动器控制 U/V/W 三相电形成电磁场，永磁体的转子在此磁场的作用下转动。无框力矩电机不同于传统的永磁电机，其没有机壳，只有转子和定子 2 个部件。

科尔摩根无框力矩电机典型构造：(1) 内圈采用 SS400 系列（抗拉强度为 400MPa 的普通结构钢）；(2) 环形磁铁采用 NdFeB，涂层采用环氧树脂；(3) 集成电路 PCB 板；(4) 线圈材料铜、涂层是清漆；(5) 绝缘材料是合成树脂；(6) 电源线；(7) 叠片选用电工钢；(8) 可选过热保护装置（PT1000 铂热电阻、PTC 热敏电阻）；(9) 可选霍尔传感器。

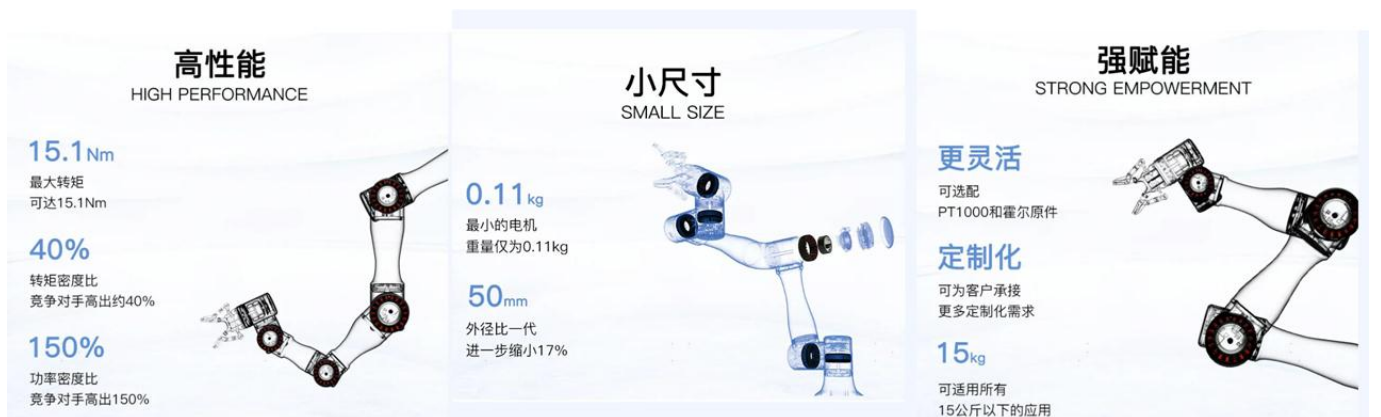
图 23：无框力矩电机的构造



资料来源：科尔摩根官网

无框力矩电机非常适配于机器人关节。无框力矩电机的出现，让机器结构设计不再受制于电机壳体的束缚；可以利用机器的自身轴承支撑转子，将电机无缝内置于机器设计中。无框力矩电机具有体积小、质量轻、惯量低、结构紧凑、功率高、适配性强等特点，在机器人关节、医疗机器人、传感器万向轴、无人机推进和制导系统以及其他应用领域具有广泛的应用前景。

图 24：无框力矩电机的特点



资料来源：科尔摩根官网

Tesla 人形机器人旋转执行器和线性执行器各 14 个，共 28 个，无框力矩电机也共 28 个。国产人形机器人如宇树 H1、远征 A1、小米 Cyber one、优必选 X1、傅里叶 GR-1，关节单元也都使用无框力矩电机，最大扭矩为 360Nm。宇树、智元、小米机器人均自研关节电机，能够更好适配各自厂商的机器人产品。

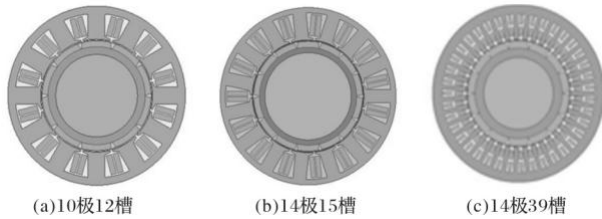
表 14：国产人型机器人及自研力矩电机情况

项目	宇树 H1	远征 A1	小米 Cyber one	优必选 X1	傅里叶 GR-1
机器人					
身高	180cm	175cm	177cm	130cm	165cm
体重	47kg	55kg	52kg	63kg	55kg
自由度	单腿自由度髋关节 × 3 + 膝关节 × 1 + 踝关节 × 1 = 5 单手臂自由度 4	全身有超 49 个自由度	21 个关节自由度	腿 6×2；臂 7×2；手 6×2；颈×3	44 个自由度，32 个 FSA 关节
负载	-	单臂 5kg	单臂 1.5kg	单臂 1.5kg	-
关节单元极限扭矩	膝关节约 360Nm，髋关节约 220Nm，踝关节约 45Nm，手臂关节约 75Nm	关节的峰值扭矩可以达到 350Nm	最大模组峰值扭矩 300Nm	4.5Nm-200Nm	230Nm
速度	大于 1.5m/s（潜在运动能力 >5m/s）	7km/h	3.6km/h	3km/h	5km/h
关节电机				无自制	无自制
产品	M107	PowerFlow	Cybergear（电机+减速器+编码器）	-	-
最大扭矩 or 拉力 or 扭矩密度	360Nm, 10000N	350Nm	12Nm, 37.85Nm/kg	4.5Nm-200Nm	-
重量	1.9kg	1.6kg	317g±3g	-	-
尺寸 mm	107 × 74	-	80.5 × 36.5	-	-

资料来源：各公司官网

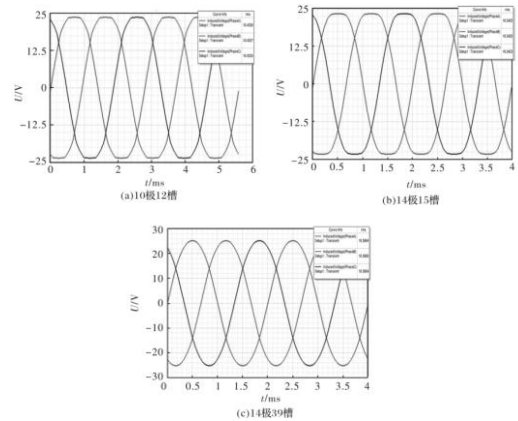
从无框电机极槽配合的角度来看，根据陈靓《机器人关节无框电机转矩脉动抑制》论文所述，通过降低电机齿槽转矩与谐波转矩，即可降低电机的转矩脉动。不同的极槽配合也会对无框电机的性能造成影响，无框电机的产品标杆科尔摩根电机大多采取用 12 极 39 槽的极槽配合方案。

图 25：无框电机极槽配合情况



资料来源：陈靓《机器人关节无框电机转矩脉动抑制》

图 26：不同极槽配额下电机空载反电动势情况



资料来源：陈靓《机器人关节无框电机转矩脉动抑制》

虽然 14 极 39 槽电机的反电动势波形畸变率较低，转矩脉动很小，具有一定的性能优势，但电机在 14 极 39 槽下的平均转矩不及 10 极 12 槽与 12 极 39 槽电机大。综合考虑电机的平均转矩与转矩脉动，12 极 39 槽的极槽配合方案更优。

表 15：极槽配合平均转矩和转矩脉动情况

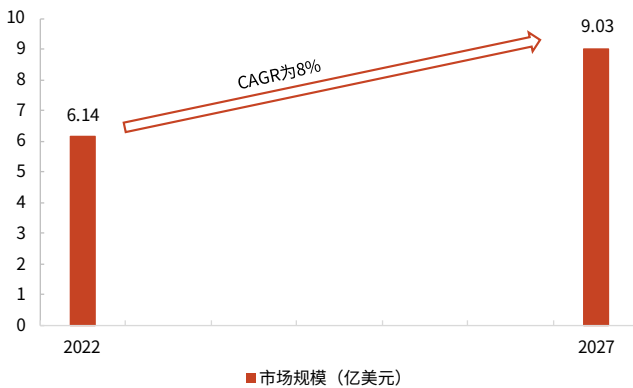
极槽配合	线反电势有效值/V	平均转矩/mNm	转矩脉动/%
10 极 12 槽	31.7	563	2.86
12 极 39 槽	31.3	562	2.60
14 极 15 槽	31.6	556	2.37
14 极 39 槽	31.8	561	1.09

资料来源：陈靓《机器人关节无框电机转矩脉动抑制》

3.2、人形机器人推动无框力矩电机市场规模提升

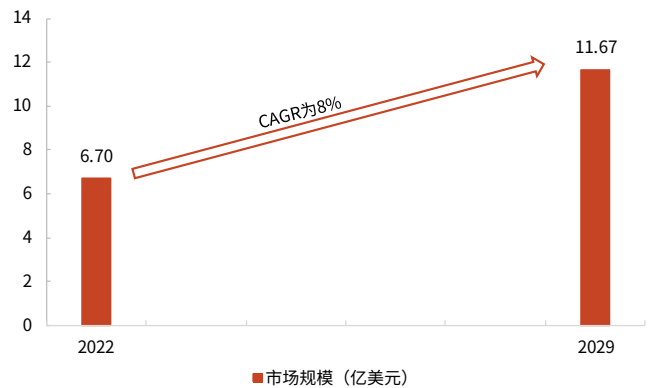
2022 年力矩电机、无框电机全球市场规模均超 40 亿元人民币。根据 technavio 的数据，2022 年全球力矩电机销售规模为 6.14 亿美元，折合人民币约 43.98 亿元（以美元/人民币=7.16 的汇率进行折算，下同）。根据 technavio 预测，2027 年全球力矩电机销售规模达 9.03 亿美元，2022-2027 年 CAGR 为 8%。根据 QY Research 的数据，2022 年，全球无框电机销售规模为 6.70 亿美元，根据 QY Research 预测，2029 年全球无框电机销售规模达 11.67 亿美元，2022-2029 年 CAGR 为 8%。如果考虑人形机器人放量，以上增速均有望进一步提升。

图 27：全球力矩电机销售规模



资料来源：technavio

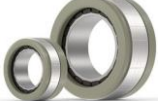
图 28：全球无框电机销售规模



资料来源：QY Research

从竞争格局来看，海外企业仍处于领先地位。从事无框力矩电机行业的主要制造商包括科尔摩根（美国）、威腾斯坦（德国）、尼得科（日本）、派克汉尼汾（美国）等。国内企业中，步科股份、昊志机电等也推出了相关产品，具有一定的产品力。

表 16：无框力矩电机各企业情况

公司	国家	公司简介	无框力矩电机情况	产品图例
科尔摩根 Kollmorgen (1916 年成立)	美国	科尔摩根有超过七十年的运动控制设计和研发领域的经验，产品覆盖：运动控制器、电机（伺服、步进、直驱等）及驱动器、线性定位器/执行器（电缸为主）、减速器（行星为主）、AGV 控制系统解决方案等。拥有逾百万款标准和定制产品。	TBM 2G 无框力矩电机：全系列机器人电机的最新产品。这款高级电机专为医疗、机器人等行业的苛刻应用条件而设计。工作电压 48V。	
			低压 TBM 无框电机：24V、48V、100V，连续转矩范围：0.41Nm 到 10.3Nm，峰值扭矩范围：1.37Nm 到 39.4Nm，外直径范围：60.35mm 到 128.93mm，孔径范围：28.70mm 到 55.88mm。	
			KBM 无框伺服/力矩电机：0.49Nm 到 3445Nm，峰值扭矩范围：1.17Nm 到 12812Nm，外径范围：59.96mm 到 850mm，通孔直径范围：16.01mm 到 557.85mm。	
威腾斯坦 Wittenstein (1949 年成立)	德国	掌握着与机电一体化传动装置相关的所有技术；开发、生产和销售多种产品，如高精度行星齿轮箱、完整的机电一体化传动系统、交流伺服系统和电机等；应用领域包括机器人、机床、医疗技术和航空航天领域。	cyber® kit line small：尺寸为 50 和 85mm；工作电压，48/560V，最大扭矩：0.66-31.5Nm。	
			cyber® kit line large：尺寸 290、260、420 和 530mm；工作电压 560V，最大扭矩：580-9191Nm。	
尼得科 Nidec (1973 年成立)	日本	为各类“转动体、移动体”提供精密小型到超大型电机产品，涵盖通讯设备及办公自动化设备、家电、汽车、商业、工业设备、环境能源领域。	峰值扭矩 0.38-10Nm；用于 AC 伺服电机。	
派克汉尼汾 Park (1917 年成立)	美国	派克在运动和控制技术的九大领域居于全球领先地位：航空航天、环境控制、电动机械、过滤、流体和气体处理、液压、气动、过程控制、密封和屏蔽，以此为依托推出的产品。	TK 系列有 664 款产品：低转速高扭矩，400VAC 绕组时扭矩可达 21,700Nm，额定功率可达 207kW，速度可达 2500 rpm/min。	
			NK 系列有 639 款产品：提供 230/400VAC 绕组，额定功率为 34kW，速度可达到 15000rpm/min。	
			K 系列有 90 款产品：可用绕组达到 100V，额定功率为 2kW，速度为 10000 min ⁻¹ 。	
步科股份 (1996 年成立)	中国	公司是中国为数不多的机器自动化与工厂智能化解决方案供应商。自动化设备控制核心部件主要包括工业人机界面、伺服系统、步进系统、可编程逻辑控制器、变频器等，且广泛应用于物流设备、机器人、包装设备、食品设备、流产品的用户，成本优势明显，助力国产协作机器人成本控制。工业物联网/互联网软硬件产品主要包括现场智能终端、网关、数据采集器、SaaS 软件、数据中心等，主要应用于食品与餐饮等行业的数字化工厂建设与产销协同制造领域。	FMC 无框力矩电机：自主研发设计，性能优于同业产品，额定扭矩 0.45Nm-3.5Nm，与国际接轨的产品尺寸：原使用国外主流产品的用户，成本优势明显，助力国产协作机器人成本控制。尺寸：52mm/57mm/60mm/76mm/77mm/85mm/91mm/104mm/132mm；48V。	
昊志机电 (2006 年成立)	中国	公司是一家专业从事中高端数控机床、机器人、新能源汽车核心功能部件等的研发设计、生产制造、销售与维修服务的国家高新技术企业。	DD 直驱电机。	

资料来源：各公司官网

科尔摩根 TBM2G 系列可提供七种框架尺寸，每个框架具有三个叠片长度，即 21 种标准电机，可直接集成到机器人关节和类似的嵌入式设备中。其代表性应用包括 3-15kg 负载范围内的协作机器人，供电电压为 48V 及以下。该系列电机专为高速运行而设计，其最高温度通常不超过 80°C；能够提供热传感器选项，以满足协作式机器人市场中使用的驱动器和控制系统的要求。

图 29：科尔摩根 TBM2G 系列无框力矩电机

参数	Sym	单位	TBM2G-050xx			TBM2G-060xx			TBM2G-068xx			TBM2G-076xx			TBM2G-085xx			TBM2G-094xx			TBM2G-115xx		
			08	13	26	08	13	26	08	13	26	08	13	26	08	13	25	08	13	26	08	13	26
失速连续 转矩	T _c	Nm	0.27	0.38	0.64	0.45	0.6	0.96	0.63	0.86	1.54	0.89	1.23	2.06	1.21	1.65	2.69	1.58	2.05	3.67	1.9	3.04	6.03
		lb-in	2.39	3.33	5.62	3.97	5.3	8.54	5.6	7.64	13.6	7.85	10.9	18.2	10.7	14.6	23.8	14	18.1	32.5	16.8	26.9	53.3
额定转速	N _{rd}	rpm	8000	8000	6600	8000	8000	4400	8000	6900	3400	8000	5600	2800	7500	5300	2600	8000	5900	2700	5800	4900	3100
电机常数	K _m	Nm/√W	0.061	0.082	0.128	0.087	0.114	0.176	0.119	0.157	0.251	0.156	0.201	0.324	0.203	0.271	0.419	0.263	0.331	0.528	0.31	0.464	0.802
		lb-in/√W	0.54	0.73	1.13	0.77	1.01	1.56	1.05	1.39	2.22	1.38	1.78	2.87	1.79	2.4	3.7	2.33	2.93	4.67	2.74	4.1	7.09
额定功率	P _{rd}	kW	0.205	0.271	0.363	0.329	0.415	0.38	0.468	0.561	0.521	0.586	0.601	0.544	0.717	0.734	0.65	0.86	0.874	0.897	0.711	0.969	1.43
		Hp	0.274	0.364	0.487	0.442	0.556	0.51	0.627	0.753	0.699	0.786	0.806	0.729	0.962	0.985	0.871	1.153	1.172	1.203	0.954	1.3	1.922

资料来源：科尔摩根官网

我们对人形机器人无框力矩电机市场空间进行了简单测算，核心假设如下：

(1) 以特斯拉人形机器人 Optimus 为例，其主体部分共有 28 个执行器，线性及旋转各 14 个，所用电机为无框力矩电机，因此假设单台人形机器人无框力矩电机用量为 28 个；

(2) 随着人形机器人大规模量产，降本要求提高，无框力矩电机平均价格逐渐下降。

当人形机器人年产量分别为 5/10/50/100 万台时，无框力矩电机平均价格分别为 800/500/300/200 元/个，则对应市场空间分别为 11.2/14/42/56 亿元；参考上文中我们对空心杯电机中国企业市占率的假设，在此处进一步假设无框力矩电机的中国企业市占率分别为 30%/40%/50%/60%，则中国企业可获得市场空间分别为 3.4/5.6/21/33.6 亿元。

表 17：人形机器人无框力矩电机市场空间测算

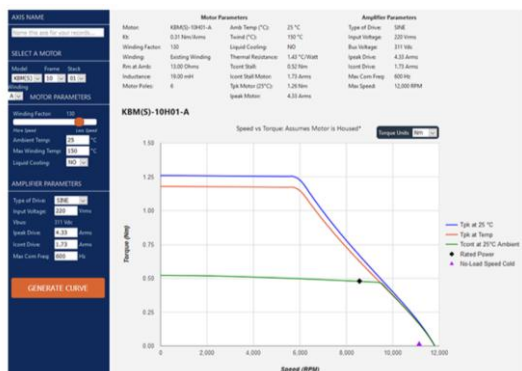
人形机器人年产量假设（万台）	5	10	50	100
单台人形机器人无框力矩电机用量（个）	28	28	28	28
无框力矩电机平均价格假设（元/个）	800	500	300	200
市场空间预测（亿元）	11.2	14	42	56
中国企业市占率假设	30%	40%	50%	60%
中国企业可获得市场空间（亿元）	3.4	5.6	21	33.6

资料来源：人形机器人联盟微信公众号，阿里巴巴，光大证券研究所测算

3.3、 壁垒：正向研发能力与匹配下游设计

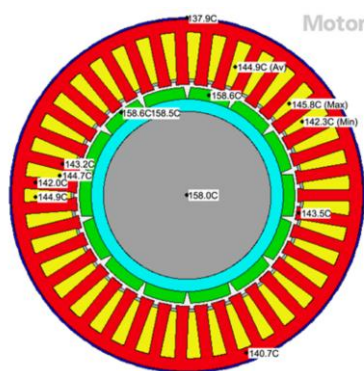
（1）正向研发能力：无框力矩电机的壁垒体现在磁路和工艺设计。转矩密度、功率密度是影响机器人性能的重要指标，能够通过调整电流、电压、环境温度和绕组等因素，在低压供电的环境下输出较大的功率，以快速优化电机，实现卓越性能，提高转矩能力。海外厂商具有悠久的发展历史和正向研发能力，能够通过产品和经验积累、模拟仿真软件快速实现产品设计，以满足客户需求。在以上方面，国内企业尚有一定差距。

图 30: 直驱力矩电机性能曲线生成器



资料来源：科尔摩根官网

图 31: 14 极 39 槽电机的温度分布 (环境温度 25℃)



资料来源：郭喜彬《机器人用无框电机技术研究》

（2）匹配下游设计：无框力矩电机比传统的伺服电机定制化程度要高。无框力矩电机已在传统的工业机器人关节批量使用，体现了一定的定制化；而在未来的协作机器人和人形机器人中，由于产品样式及用途多样性，或将导致无框力矩电机的定制化要求越来越高。当前大部分机器人厂商自研线性执行器和旋转执行器，并开发无框力矩电机，亦能体现以上趋势。

因此，从无框力矩电机未来的竞争格局来看，我们认为或将比空心杯电机更加分散，且一体化程度更高。

图 32: 科尔摩根自动化和运动控制产品系列



资料来源：科尔摩根官网

图 33: 科尔摩根解决方案能力



资料来源：科尔摩根官网

4、投资建议

空心杯电机、无框力矩电机可与人形机器人灵巧手、关节高度适配，随着人形机器人放量，行业均有更广阔的发展空间。目前海外电机公司技术水平、产品能力均较强，国产公司正不断深化自身能力，提升产品水平，为未来国产替代打下坚实基础。

建议关注：空心杯电机公司，鸣志电器、伟创电气、拓邦股份；无框力矩电机公司，步科股份、昊志机电、禾川科技。

表 18：电机产业链重点上市公司盈利与估值表

领域	证券代码	公司名称	收盘价 (元)	市值 (亿元)	归母净利润(亿元)				PE(X)			
					2022A	2023E	2024E	2025E	2022A	2023E	2024E	2025E
空心杯电机	603728.SH	鸣志电器	34.71	145.80	2.47	2.24	3.55	5.22	59	65	41	28
	300660.SZ	江苏雷利	20.57	65.21	2.59	3.40	4.36	5.32	25	19	15	12
	002139.SZ	拓邦股份	7.12	90.25	5.83	6.26	8.24	10.59	15	14	11	9
	873593.BJ	鼎智科技	30.30	29.10	1.01	1.17	1.47	1.87	29	25	20	16
无框力矩电机	688160.SH	步科股份	32.01	26.89	0.91	0.90	1.14	1.45	30	30	24	19
	300503.SZ	昊志机电	11.35	34.74	0.22	-	-	-	156	-	-	-
空心杯电机+无框力矩电机	688698.SH	伟创电气	26.17	55.02	1.40	2.08	2.89	3.81	39	26	19	14
	002979.SZ	雷赛智能	13.13	40.61	2.20	1.61	2.26	2.89	18	25	18	14
	688320.SH	禾川科技	24.09	36.38	0.90	1.00	1.44	1.92	40	36	25	19
其他电机企业	002176.SZ	江特电机	8.50	145.04	23.26	-	-	-	6	-	-	-
	600580.SH	卧龙电驱	9.54	125.09	8.00	12.46	15.46	18.71	16	10	8	7
	002892.SZ	科力尔	10.00	44.41	0.73	0.85	1.14	1.48	61	52	39	30
	002249.SZ	大洋电机	4.20	100.69	4.27	5.56	6.94	8.29	24	18	15	12
	002025.SZ	航天电器	36.19	165.34	5.55	7.84	10.54	13.85	30	21	16	12
磁材	300748.SZ	金力永磁	15.08	185.32	7.03	7.49	10.34	13.29	26	25	18	14
	000970.SZ	中科三环	7.96	96.77	8.48	4.27	6.20	6.43	11	23	16	15
	688077.SH	大地熊	13.20	14.93	1.50	0.28	1.25	2.06	10	53	12	7
	000795.SZ	英洛华	4.36	49.43	2.59	-	-	-	19	-	-	-
	300224.SZ	正海磁材	9.17	75.22	4.04	5.18	6.77	8.68	19	15	11	9
绕线机	300461.SZ	田中精机	12.95	20.17	-0.63	-	-	-	-	-	-	-
编码器	002338.SZ	奥普光电	20.49	49.18	0.82	1.57	2.25	3.16	60	31	22	16

资料来源：，光大证券研究所整理，股价时间为 2024-02-06；盈利预测数据均来源于一致预期

4.1、鸣志电器

鸣志电器专注于运动控制领域和智能电源领域，核心业务包括控制电机、通用自动化驱动控制系统及 LED 智能照明控制驱动系统等。公司深耕运动控制领域，具备在多种电机驱动控制系统中植入现场总线技术和自产产品系统集成技术的能力。公司的主要产品包括步进电机、直流无刷电机、空心杯电机、电机+丝杠模组、电机+减速机模组等，被国内外客户广泛使用，主要应用于医疗器械和生化分析仪器、移动服务机器人（AMR+AGV）、通信设备、智能汽车电子等应用领域。

图 34：鸣志电器产品矩阵

▶ 混合式步进电机 	▶ 永磁式步进电机 	▶ 步进驱动器 	▶ 集成式步进电机 	▶ 直线步进电机 	▶ LED电源 	▶ 电子元器件 
▶ 无刷无齿槽电机 	▶ 有刷空心杯电机 	▶ 步进伺服驱动器与电机 (闭环步进) 	▶ 集成式步进伺服电机 (闭环步进) 	▶ 直线模组 	▶ 智能照明控制器 	▶ 微型电机 
▶ 直流无刷电机 	▶ 直流无刷驱动器与电机 	▶ 伺服驱动器与电机 	▶ 集成式伺服电机 	▶ 微型电缸 	▶ 状态监测设备 	▶ 真空电机 

资料来源：鸣志电器官网

公司的空心杯无齿槽电机能够应用于机器人等新兴高附加值领域，2023 年上半年该业务营收同比保持快速成长。公司专注于精密控制电机技术研究，拥有空心杯无齿槽电机产品，在工控自动化、移动机器人、高端医疗仪器等新兴高附加值应用领域布局。2023 年上半年公司空心杯无齿槽电机产品业务营收同比增长 67%，主要因为产能的稳步释放以及相关产品在移动机器人、医疗器械及生化分析仪器应用领域的业务增长。此外，公司具备编码器、空心杯电机、精密直线传动等器件整体配套生产能力，产品应用方案较为灵活。

图 35：鸣志电器 ECU30064 无刷电机

- Ø30mm
- 10000rpm
- 80mNm
- 可匹配编码器、齿轮箱



资料来源：鸣志电器官网

4.2、伟创电气

伟创电气专注于电气传动和工业控制领域，主要产品包括变频器、伺服及控制系统等。公司的产品种类丰富，包括 0.4-5600kW 的变频器、50-200kW 的伺服系统、控制系统（包含运动控制器）及 PLC 等，产品广泛应用于数控机床、矿用设备、轨道交通、智能装备、电液伺服等行业。

图 36：伟创电气产品矩阵



资料来源：伟创电气公司公告

2022 年公司成立机器人行业部，切入机器人产业链。公司主要以机器人配套为主，主要面向移动类、协作类、服务类的机器人领域，提供低压伺服、空心杯电机、特种无框力矩电机等核心部件。

公司自主研发设计空心杯电机，主要应用于机器人和医疗领域。公司的空心杯电机具有高转速、高扭矩、低噪音振动的特点，有利于电机运行平稳、控制精确；结构紧凑使其拥有更高的效率和功率密度。公司首款产品面向医疗领域，可达 13 毫米 8 万转的功率密度，后续公司将推进研发更高功率密度的产品。

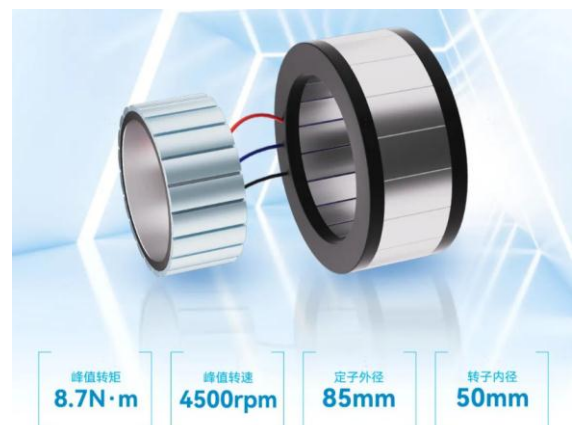
公司机器人系列产品包括空心杯电机和无框电机，均已实现小批量交付。基于多年的电力电子和自动控制技术领域的经验积累，公司重点进行机器人领域的产品开发，未来具有较大的发展空间。截至 2023 年 11 月 24 日，公司已发布 ECH13 系列直流无刷空心杯电机、FO1 系列无框电机、RB100 系列伺服一体轮、RB200 系列轴关节模组产品。其中 RB200 系列轴关节模组产品正处于验证测试阶段，其他产品已实现小批量交付。

图 37：伟创电气 ECH13 系列直流无刷空心杯电机



资料来源：伟创电气微信公众号

图 38：伟创电气 FO1 系列无框电机



资料来源：伟创电气微信公众号

4.3、步科股份

步科股份专注于工业自动化设备控制核心部件与工业物联网/互联网软硬件领域。公司的自动化设备控制核心部件主要包括工业人机界面、伺服系统、步进系统、可编程逻辑控制器、变频器等，广泛应用于物流设备、机器人、医疗设备、轨道交通设备等自动化设备行业。工业物联网/互联网软硬件产品主要包括现场智能终端、网关、数据采集器、SaaS 软件、数据中心等，主要应用于食品、服装等行业的数字化工厂建设与产销协同制造领域。

图 39：步科股份主要产品示意图



资料来源：步科股份官网，光大证券研究所整理

公司重点布局机器人行业，主要为客户提供机器人动力相关产品。公司以机器人行业为核心战略行业，重点布局移动机器人、协作机器人、服务机器人、工业机器人、仿生机器人等领域，同时向应用机器人的相关行业拓展。基于在低压伺服领域的技术优势，公司主要为机器人提供专用伺服电机（包括无框力矩电机）、专用伺服驱动以及一体化模组动力解决方案。

公司的无框力矩电机产品具有市场领先优势：（1）性能能够和国际品牌媲美，得到了国内和海外客户的认可；（2）与国外产品相比，在同等性能条件下具备很好的价格优势；（3）已实现工业平台化的生产和销售，2023 年前三季度出货约 1 万套，在机器人产业链上能够很好地适配客户需求；（4）与伺服电机产品共用产能，公司在常州建设的智能制造生产基地为低压伺服规划了全自动生产线，预计于 2024 年年底竣工投产，产能进一步扩张。

图 40：步科股份无框力矩电机产品参数

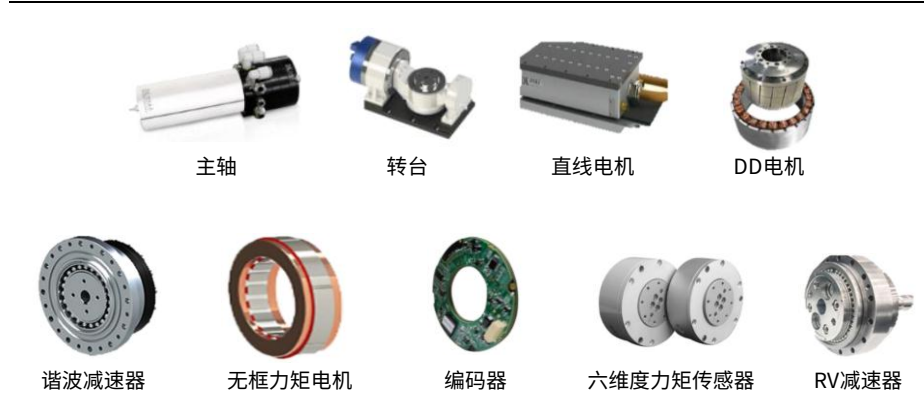
规格	FMC057		FMC077		FMC085	FMC091		FMC104	
额定功率 Pn(W)	100	200	314	750	565	1257	630	600	1050
额定扭矩/N.m	0.32	0.64	1	2.39	1.8	4	2	2.3	4
额定转速/rpm	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	2500	2500
额定电流/A	2.55	5.1	7.65	18.6	19	27	16.2	16.5	22.5
最大电流/A	11	15.6	24	61	62	72	43.5	49.5	74.1
电气时间常数/ms	0.93	1.18	2.5	2.37	1.55	2.83	1.83	2.09	3.28
机械时间常数/ms	1.83	1.47	1.45	1.21	1.38	0.93	1.39	1.22	1.09
定子外径(mm)	57.8	57.8	77	77	85	91.5	91.5	104	104
定子铁芯内径(mm)	39.4	39.4	51.5	51.5	58	61.7	61.7	70.5	70.5
定子铁芯厚度(mm)	7	14	12	30	18	30	14	14	29
定子总高度(mm)	17	25	26	44	32.3	45	28.5	28	44.1
转子内径(mm)	27	27	33	35	25	46.7	46.7	55	43

资料来源：步科股份官网

4.4、 昊志机电

昊志机电成立于 2006 年，专注于中高端数控机床、机器人、新能源汽车核心功能部件等领域。公司在电主轴领域的全球市场占有率排名第一，同时稳步向数控机床和工业机器人等高端装备的核心功能部件领域横向扩张。公司产品涵盖 PCB 钻孔机/成型机/划片机等各类电主轴、数控转台、直线电机、谐波减速器、伺服电机、驱动器、传感器等上百种产品。

图 41：昊志机电主要产品示意图



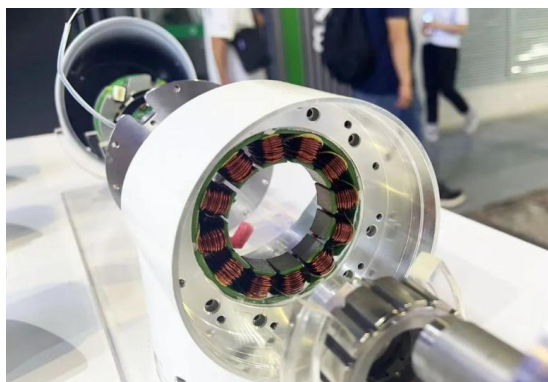
资料来源：昊志机电公司公告，光大证券研究所整理

昊志机电拥有多系列机器人核心功能部件产品，旨在为客户提供机器人整体解决方案。相关产品主要包括机器人关节模组、谐波减速器、无框力矩电机、刹车机构、编码器、大中空低压驱动器、六维度力矩传感器、机器人末端执行机构。

公司产品具有性能卓越、轻量化、长寿命的优势。（1）性能卓越：采用高性能无框力矩电机、配置高精度双绝对值编码器，多圈双绝对值编码器+无框力矩电机+高刚性的谐波减速器使虚拟力控成为现实；（2）轻量化：结构紧凑，最大化减小机器人关节模组的重量；（3）模组采用高精度、长寿命、高刚性、低噪音的谐波减速器，弥补模组寿命的短板，同时配置双智能传感器，有效监控模组及电机的发热情况，确保关节模组寿命。

其中无框力矩电机：（1）转矩波动 $\leq 1\%$ ，更利于机器人力矩控制；（2）3.5倍过载能力，运行平稳，电流波动小，力控更精准、更安全。

图 42：昊志机电无框力矩电机产品实物图



资料来源：昊志机电微信公众号

4.5、 禾川科技

禾川科技成立于 2011 年，专注于工业自动化产品的研发、制造、销售及应用集成。公司具备完整的自动化产品线，包括伺服系统、 控制器（PLC）、视觉系统、编码器、变频器、触摸屏等，产品广泛应用于光伏、3C、锂电、机器人、包装、纺织、物流、激光等领域。公司多年来深耕 OEM 市场，服务广大 OEM 客户厂商，获得了极佳的产品方案性能口碑，在光伏、3C、锂电与机器人等行业处于领先地位。

图 43：禾川科技主要产品示意图



资料来源：禾川科技官网，禾川科技公司公告，光大证券研究所整理

在机器人行业中，禾川科技有一定的产品和技术积累。在人形机器人涉及的运动控制技术方面，公司在伺服驱动器软件、总线通信技术、集成控制芯片、电机减速机一体集成传动等方面有较深的前沿技术储备；在核心运动控制部件方面，公司有较成熟的伺服电机、步进电机、空心杯电机、无框电机等各类电机及相关传感器产品，并且均有实现量产。此外，公司还有一定的滚珠丝杆产品研发技术积累。

公司的 X6MN 微型伺服电机可用于机器人、仿人机器人自适应的手指关节。该产品采用创新独特的空心杯绕组专利设计，并且具有超低齿槽效应、高功率及转矩密度、优秀的动态响应、轻量化等优点。

图 44：禾川科技 X6MN 微型伺服电机



资料来源：禾川科技微信公众号

5、风险分析

（1）人形机器人相关技术进步不及预期风险：

如果人形机器人相关的关键技术进步不及预期，会影响到人形机器人行业整体的发展；

（2）人形机器人降本不及预期风险：

如果人形机器人成本持续居高不下，会影响到人形机器人的整体需求；

（3）竞争加剧带来的盈利不及预期风险：

大量新进入者涌入人形机器人行业，如果行业竞争加剧，会影响到整体的盈利水平。

行业及公司评级体系

评级	说明
买入	未来 6-12 个月的投资收益率领先市场基准指数 15%以上
增持	未来 6-12 个月的投资收益率领先市场基准指数 5%至 15%；
中性	未来 6-12 个月的投资收益率与市场基准指数的变动幅度相差-5%至 5%；
减持	未来 6-12 个月的投资收益率落后市场基准指数 5%至 15%；
卖出	未来 6-12 个月的投资收益率落后市场基准指数 15%以上；
无评级	因无法获取必要的资料，或者公司面临无法预见结果的重大不确定性事件，或者其他原因，致使无法给出明确的投资评级。
基准指数说明：A 股市场基准为沪深 300 指数；香港市场基准为恒生指数；美国市场基准为纳斯达克综合指数或标普 500 指数。	

分析、估值方法的局限性说明

本报告所包含的分析基于各种假设，不同假设可能导致分析结果出现重大不同。本报告采用的各种估值方法及模型均有其局限性，估值结果不保证所涉及证券能够在该价格交易。

分析师声明

本报告署名分析师具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格并注册为证券分析师，以勤勉的职业态度、专业审慎的研究方法，使用合法合规的信息，独立、客观地出具本报告，并对本报告的内容和观点负责。负责准备以及撰写本报告的所有研究人员在此保证，本研究报告中任何关于发行商或证券所发表的观点均如实反映研究人员的个人观点。研究人员获取报酬的评判因素包括研究的质量和准确性、客户反馈、竞争性因素以及光大证券股份有限公司的整体收益。所有研究人员保证他们报酬的任何一部分都不与，不与，也将不会与本报告中的具体的推荐意见或观点有直接或间接的联系。

法律主体声明

本报告由光大证券股份有限公司制作，光大证券股份有限公司具有中国证监会许可的证券投资咨询业务资格，负责本报告在中华人民共和国境内（仅为本报告目的，不包括港澳台）的分销。本报告署名分析师所持中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格编号已披露在报告首页。

中国光大证券国际有限公司和 Everbright Securities(UK) Company Limited 是光大证券股份有限公司的关联机构。

特别声明

光大证券股份有限公司（以下简称“本公司”）成立于 1996 年，是中国证监会批准的首批三家创新试点证券公司之一，也是世界 500 强企业——中国光大集团股份公司的核心金融服务平台之一。根据中国证监会核发的经营证券期货业务许可，本公司的经营范围包括证券投资咨询业务。

本公司经营范围：证券经纪；证券投资咨询；与证券交易、证券投资活动有关的财务顾问；证券承销与保荐；证券自营；为期货公司提供中间介绍业务；证券投资基金代销；融资融券业务；中国证监会批准的其他业务。此外，本公司还通过全资或控股子公司开展资产管理、直接投资、期货、基金管理以及香港证券业务。

本报告由光大证券股份有限公司研究所（以下简称“光大证券研究所”）编写，以合法获得的我们相信为可靠、准确、完整的信息为基础，但不保证我们所获得的原始信息以及报告所载信息之准确性和完整性。光大证券研究所可能将不时补充、修订或更新有关信息，但不保证及时发布该等更新。

本报告中的资料、意见、预测均反映报告初次发布时光大证券研究所的判断，可能需随时进行调整且不予通知。在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见并不构成对任何人的投资建议。客户应自主作出投资决策并自行承担投资风险。本报告中的信息或所表述的意见并未考虑到个别投资者的具体投资目的、财务状况以及特定需求。投资者应当充分考虑自身特定状况，并完整理解和使用本报告内容，不应视本报告为做出投资决策的唯一因素。对依据或者使用本报告所造成的一切后果，本公司及作者均不承担任何法律责任。

不同时期，本公司可能会撰写并发布与本报告所载信息、建议及预测不一致的报告。本公司的销售人员、交易人员和其他专业人员可能会向客户提供与本报告中所载观点不同的口头或书面评论或交易策略。本公司的资产管理子公司、自营部门以及其他投资业务板块可能会独立做出与本报告的意见或建议不相一致的投资决策。本公司提醒投资者注意并理解投资证券及投资产品存在的风险，在做出投资决策前，建议投资者务必向专业人士咨询并谨慎抉择。

在法律允许的情况下，本公司及其附属机构可能持有报告中提及的公司所发行证券的头寸并进行交易，也可能为这些公司提供或正在争取提供投资银行、财务顾问或金融产品等相关服务。投资者应当充分考虑本公司及本公司附属机构就报告内容可能存在的利益冲突，勿将本报告作为投资决策的唯一信赖依据。

本报告根据中华人民共和国法律在中华人民共和国境内分发，仅向特定客户传送。本报告的版权仅归本公司所有，未经书面许可，任何机构和个人不得以任何形式、任何目的进行翻版、复制、转载、刊登、发表、篡改或引用。如因侵权行为给本公司造成任何直接或间接的损失，本公司保留追究一切法律责任的权利。所有本报告中使用的商标、服务标记及标记均为本公司的商标、服务标记及标记。

光大证券股份有限公司版权所有。保留一切权利。

光大证券研究所

上海

静安区新闻路 1508 号
静安国际广场 3 楼

北京

西城区武定侯街 2 号
泰康国际大厦 7 层

深圳

福田区深南大道 6011 号
NEO 绿景纪元大厦 A 座 17 楼

光大证券股份有限公司关联机构

香港

中国光大证券国际有限公司
香港铜锣湾希慎道 33 号利园一期 28 楼

英国

Everbright Securities(UK) Company Limited
6th Floor, 9 Appold Street, London, United Kingdom, EC2A 2AP