

产业研究深度 | 高端装备制造

机器人需求驱动下， 新技术落地加速

为企业客户提供全方位的“产业+金融”研究服务！

核心要点

人形机器人电机高温高扭需求迫切，高转矩密度+低转矩波动+强过载能力+散热属性是电机的核心能力指标。在各种复杂环境中完成搬运、抓取、行走等任务，机器人需要较大的力矩来驱动，如智元远征 A2 Max 机器人关节峰值扭矩达 450Nm。而受限于机器人尺寸较小，关节电机则需要拥有单位密度下较高的转矩输出能力。在工业机械臂、手术机器人等需要完成精密操作的机器人系统中，关节电机对低齿槽转矩的要求很高。在诸如腿足关节等与环境频繁交互的关节中，电机常处于周期性的短时过载工况，峰值扭矩需求高达额定转矩需求的 5-10 倍。同时当电机处于过载工况时，绕组具有极高的损耗密度，短时内会产生巨大的热量。因此，高性能机器人关节电机需要拥有良好耐高温和散热属性。

当前人形机器人电机主要分为无框力矩电机和空心杯电机。无框力矩电机具有低转速、高扭矩、性能稳定等优点，可用于模仿关节的活动和模拟肌肉的拉伸，能够为人形机器人提供强劲的肢体力量，支撑其整体运动与负载能力；空心杯电机的尺寸小、更轻巧，因此具有更高的功率密度和能量转化效率，适用于灵巧手等高精度场景，使得人形机器人的操作性更灵敏。

谐波磁场电机打破传统电机磁路设计桎梏，高功密下体积减小且扭矩提升。其磁路设计源自“磁场调制效应”，打破传统电机励磁和电枢单元的极对数必须相等的限制。基于该效应下，磁场调制电机在外特性上与机械减速齿轮箱类似，转矩新增放大系数“极比”，从而可在相同材料和散热条件下大幅提升电机转矩密度。目前谐波磁场技术产学研结合不断加速，工业及机器人场景实现落地。未来的发展会是一个从概念验证、工业应用到高端突破的渐进过程。

当前人形机器人电机多种方案并行，长期看核心竞争要素在于成本和量产能力。电机作为人形机器人中价值量大、技术壁垒高的重要环节，未来将围绕更优的性能、更低的成本不断迭代。重点关注电驱新技术发展，如磁场调制技术、电机一体化技术等。相关公司短期内将聚焦于通过技术创新实现性能突破，长期竞争力取决于性能达标后的规模化量产与成本控制能力。

风险提示

技术路线迭代不及预期风险，稀土及其制品出口限制风险，机器人发展不及预期风险。

分析师及联系人

苏晨

SAC: S1130522010001
suchen@gjzq.com.cn

陈传红

SAC: S1130522030001
chenchuanhong@gjzq.com.cn

内容目录

一、电机：人形机器人动力之源	4
执行器是关节运动核心	4
电机是执行器核心部件	5
常见电机分类与应用	6
二、无框力矩电机：人形机器人关节的力量基石	10
大扭矩+紧凑散热+中空走线，商业化成熟	10
技术壁垒较高，国内市场呈集中趋势	13
三、空心杯电机：灵巧手的核心驱动技术	14
需求驱动明确，成本成为关键	14
海外主导，国产替代加速进行	18
四、谐波磁场电机：未来人形机器人电机技术方向	19
谐波磁场电机或打破传统电机磁路设计	19
核心优势：平均转矩大，转矩脉动小，功率密度跃升	20
应用领域：工业场景已有应用，机器人关节、灵巧手具备潜力.....	21
第四代永磁材料：高温性能优异+成本优势显著	22
永磁与谐波磁场驱动产业化加速	26
风险提示	28

图表目录

图表 1: 不同关节执行器对电机的需求产生差异	5
图表 2: 机器人关节电机需要强爆发性、可靠性及自适应性	6
图表 3: 径向磁通电机和和轴向磁通电机拓扑结构	7
图表 4: 空心杯电机结构	8
图表 5: 机器人用电机拓扑结构对比	9
图表 6: 常见机器人类型与电机拓扑结构的特征型谱	10
图表 7: 无框力矩电机结构组成	11
图表 8: 特斯拉 Optimus 执行器包括旋转执行器和线性执行器	12
图表 9: 国内外无框力矩电机产品对比	13
图表 10: 上市公司在无框力矩电机领域业务情况	14
图表 11: 空心杯电机属于无齿槽电机	15
图表 12: 线圈绕组方式包含斜绕、叠绕、直绕、马鞍绕和同心绕等	16
图表 13: 空心杯电机属于无齿槽电机	17
图表 14: 电机未来的趋势是缩小体积和提升功率密度	18
图表 15: 空心杯电机生产厂商典型产品对比	18
图表 16: 上市公司空心杯电机产品与技术	19
图表 17: 谐波磁场电机打破励磁和电枢单元的极对数相等限制	20
图表 18: 谐波磁场电机的主要两项性能指标为平均转矩和转矩波动	21
图表 19: 谐波磁场工业应用: 直驱式锻压伺服电机	22
图表 20: 电机主要性能对比	22
图表 21: 钕铁氮在永磁材料中的竞争优势	24

图表 22: 永磁材料分类对比	25
图表 23: 中端钕铁氮和钐铁硼低端最大磁能积范围有重合	26
图表 24: 上市公司在钕铁氮和调制磁场电机领域	27

一、电机：人形机器人动力之源

执行器是关节运动核心

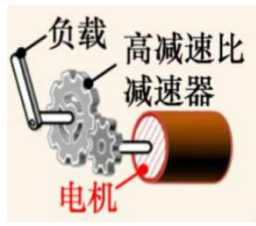


执行器是驱动机器人关节运动的核心部件，按驱动形式可分为旋转驱动和直线驱动（其驱动源本质仍为旋转电机）。由于传动部件（如减速器、弹簧等）与驱动电机在功能和结构上紧密耦合，电机设计必须综合考虑传动特性与机械架构。根据传动部件类型及其与电机的组合方式，机器人执行器可分为三类：

- 1) 柔性执行器 (Flexible Actuator, FA)，由电机结合高减速比减速器组成，其核心特征体现在三个方面：①高转矩密度：通过高减速比减速器设计显著提升输出转矩，实现较高的转矩密度。②具有机械谐振：由于谐波减速器中柔轮、齿隙及摩擦等弹性连接因素，系统存在多阶振动频率的机械谐振现象。③低力透明度和弱反驱性能：高减速比结构会增大反射惯量和反射摩擦等机械阻抗，从而导致力透明度降低和反驱性能减弱。
- 2) 弹性执行器 (Elastic Actuator, EA) 在柔性执行器基础上集成弹性元件，主要包括串联弹性、可变刚度和可变阻抗等类执行器型，主要特征表现为：①强抗冲击性能：弹性元件作为缓冲介质有效隔离冲击载荷，显著增强抗冲击能力。②高效率、高峰值转矩：通过被动储能机制实现高效率能量转换和高峰值转矩输出。③低力控制带宽：由于弹性元件刚度通常小于 10000Nm/rad ，系统呈现较低输出阻抗，力控制带宽相对受限。
- 3) 准直驱执行器 (Quasi Direct Drive, QDD) 采用高转矩密度电机配合低减速比减速器的结构配置，其典型特征包括：①高力透明度和强反驱性能：通过降低减速比有效减小非线性误差和静摩擦力，从而获得优异的力透明度和反驱

性能。②强抗冲击性能：减速器减速比的降低同时减少了机械阻抗，使系统具备良好的抗冲击能力。③低转矩密度：由于减速比对转矩的放大作用较弱，导致整体转矩密度提升幅度有限。

不同传动部件使关节执行器呈现差异化特性，导致对关节电机的需求也产生差异。柔性执行器虽降低了对电机的转矩需求，但需解决机械谐振问题；弹性执行器减小了峰值转矩要求，却需要提升力控制的动态响应能力；准直驱执行器仅通过电流环就能实现高精度转矩控制，但面临着提高转矩密度的挑战。

图表1：不同关节执行器对电机的需求产生差异

名称	示意图	构成	执行器特点	存在问题
柔性执行器 (Flexible Actuator, FA)		电机+高减速比减速器	高转矩密度； 具有机械谐振； 低力透明度和弱反驱性能	电机转矩需求较低，但机械谐振的难题需要解决
弹性执行器 (Elastic Actuator, EA)		在FA的基础上增加弹性元件	强抗冲击性能； 高效率、高峰值扭矩； 低力控制带宽	电机峰值扭矩需求较低，但力控制的动态响应性能需要改善
准直驱执行器 (Quasi Direct Drive, QDD)		高转矩密度电机+低减速比减速器	高力透明度和强反驱性能； 强抗冲击性能； 低转矩密度	电机仅基于电流环即可实现较高精度的转矩控制，但转矩密度需要提升

来源：《机器人关节用伺服电机关键技术与展望》，国金证券研究所

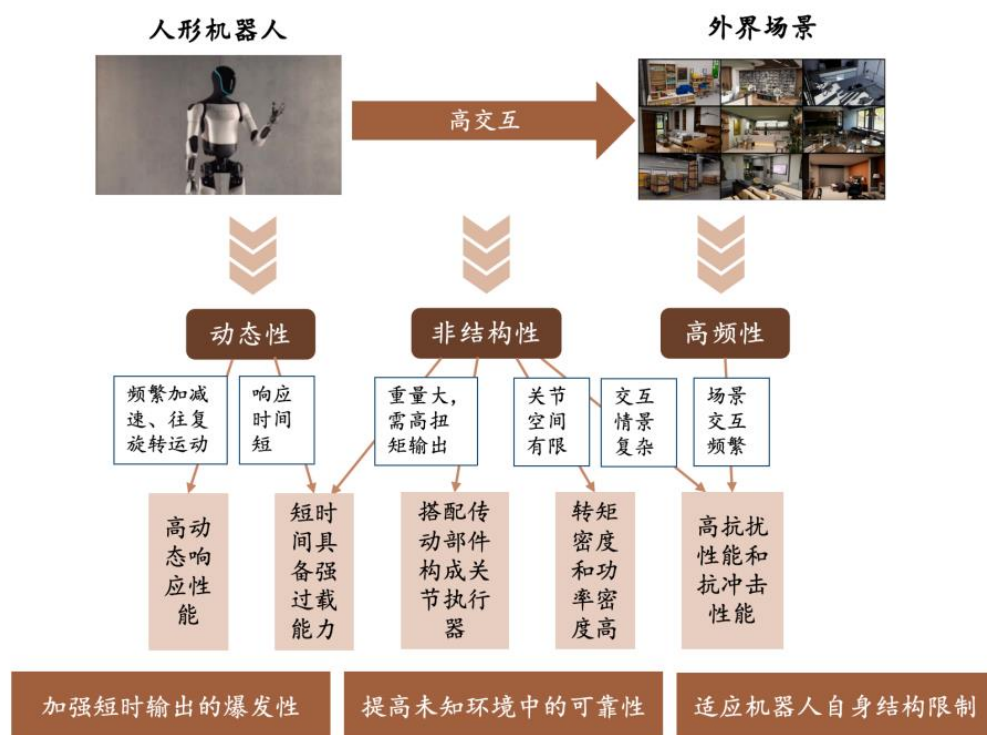
电机是是执行器核心部件

机器人通过与外界场景进行交互来完成各项任务，而外界场景具有动态性和非结构性，交互具有频繁性，这对机器人执行器提出了严格要求。从机器人的需求角

度分析，电机具有如下特征：（1）模块化设计：通过电机与传动部件集成，实现低速大转矩输出，以应对重载交互需求；（2）强过载能力：在动态场景中快速响应时效性任务，需支持短时高力矩爆发输出；（3）优异动态响应：适应频繁加减速及往复运动，确保复杂动作执行的精准性；（4）高可靠性能：抵御频繁交互带来的冲击扰动，保障系统运行可靠性；（5）高功率/转矩密度：在有限关节空间内实现高转矩/功率密度，可满足机器人轻量化需求。

相较于传统工业应用中的伺服电机，机器人电机更需加强短时输出的爆发性、提高未知环境中的可靠性，并适应机器人自身结构所带来的限制。

图表2：机器人关节电机需要强爆发性、可靠性及自适应性



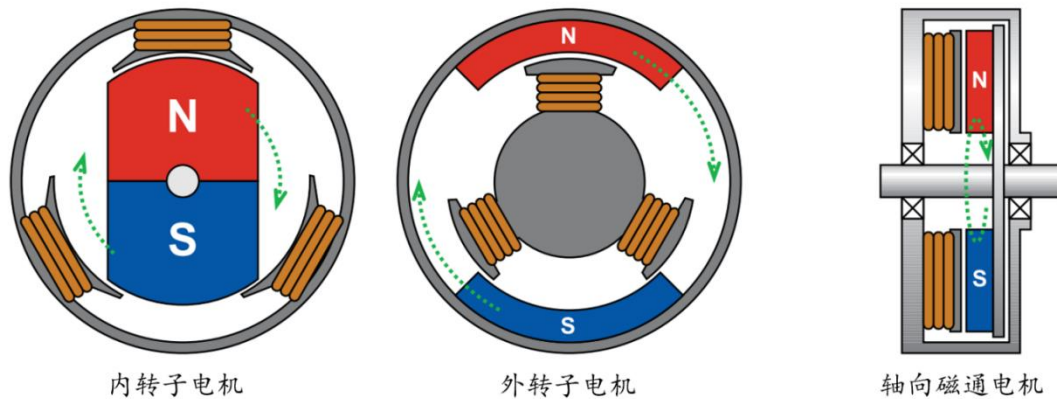
来源：机械之心公众号、智元机器人官网、《机器人关节用伺服电机关键技术与展望》，国金证券研究所

常见电机分类与应用

目前，常见的机器人电机按拓扑分类包括内转子径向磁通永磁电机、外转子径向

磁通永磁电机和轴向磁通永磁电机。此外，空心杯电机作为一种特殊的永磁电机也常用于机器人灵巧手的微小型关节。

图表3: 径向磁通电机和轴向磁通电机拓扑结构



来源:《Development of In-Wheel Motor Systems for Formula SAE Electric Vehicles》, 国金证券研究所

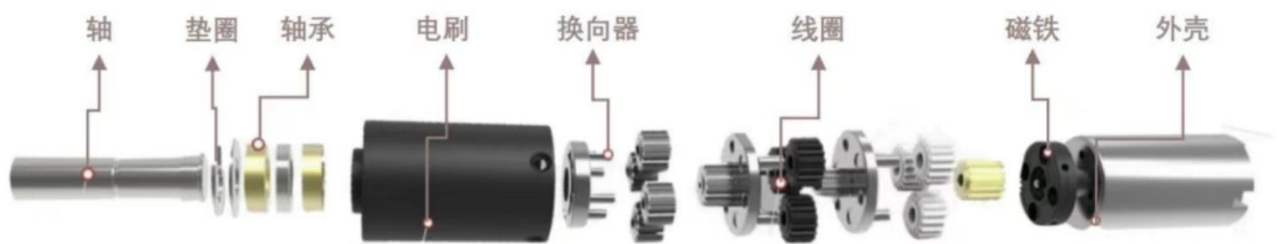
内转子径向磁通永磁电机是主流永磁电机,根据永磁体安装方式可分为表贴式和内嵌式两种。由于表贴式结构简单、成本低廉,加之关节电机转速要求不高,使得表贴式结构成为机器人关节的首选方案。随着机器人负载能力和动态性能的持续提升,对关节电机的转矩输出要求也相应提高,内转子逐渐被其他电机类型替代。

外转子电机凭借其结构优势,在特定应用场景中逐步替代内转子电机。该类型电机在同等外径条件下能提供更大输出转矩,兼具扁平内转子电机的特性优势,同时实现了更高的峰值转矩密度和速比性能。另外,外转子电机增大的气隙直径有利于采用更多极对数设计,有效抑制转矩脉动,这种特性使其在低减速比关节执行器中更为适配。基于上述优势,外转子电机主要应用于直接驱动机器人,或构成 QDD 用于准直驱机器人。

轴向磁通电机与传统径向磁通电机相比,具有轴向尺寸紧凑、转矩/功率密度高、

空间利用率高的优点。其结构特点使其能够在相同外径条件下，具有更大永磁体空间和更多磁极数量，从而更易实现低速大转矩输出。然而该类型电机在实际应用中仍面临两大技术瓶颈：第一，该电机在持续高扭矩工况下会出现严重发热；第二，该电机工艺复杂性和材料利用率偏低，不利于批量化生产。

图表4：空心杯电机结构



来源：头豹研究院，国金证券研究所

空心杯电机作为一种特殊永磁伺服电机，采用无铁芯圆筒形绕组转子结构，具有转子惯量小、无铁耗和齿槽转矩的特点。该设计使其具备转矩波动小、运行平稳、效率高和动态响应快的优势，适合应用于对体积、精度和灵活性要求高的机器人灵巧手领域。但由于空心杯电机输出转矩有限，实际应用中需要配合高减速比减速器及滚珠丝杠、蜗轮蜗杆或腱绳等传动机构组成级联式柔性执行器系统。

图表5: 机器人用电机拓扑结构对比

拓扑分类	内转子电机		
执行器组成	电机+齿轮箱(+弹性元件)	电机+高减速比减速器(+弹性元件)	电机+低减速比减速器
结构图			
径-长比	低	中	中
转矩密度	较低	高	中
成本	低	较高	中
集成度	低	中	较高
可靠性	中	低 (装弹性元件时高)	较高
固有缺点	多关节集成受限	抗冲击性能差	爆发性能弱
适用场景	微/小型机器人的高动态关节	高精度、大负载机器人的上肢关节	高动态机器人的下肢关节
典型应用	DelFly, Hummingbird	TORO, Walk-MAN, CENTAURO	MIT Cheetah II, MIT Cheetah III
拓扑分类	外转子电机	轴向磁通电机	空心杯电机
执行器组成	电机+低减速比减速器	电机+减速器	电机+齿轮箱+蜗轮蜗杆/丝杠
结构图			
径-长比	高	较高	低
转矩密度	较高	高	低
成本	中	高	高
集成度	高	较高	低
可靠性	高	较低	中
固有缺点	一体化振动存在	发热问题严重	制造难度高
适用场景	高动态、高爆发机器人的下肢关节	大负载机器人关节	小型、高精度关节
典型应用	Mini Cheetah, ARTERMIS	“青龙”机器人 “电动牦牛”	Pisa/IIT SoftHand, iLimb, ILDA

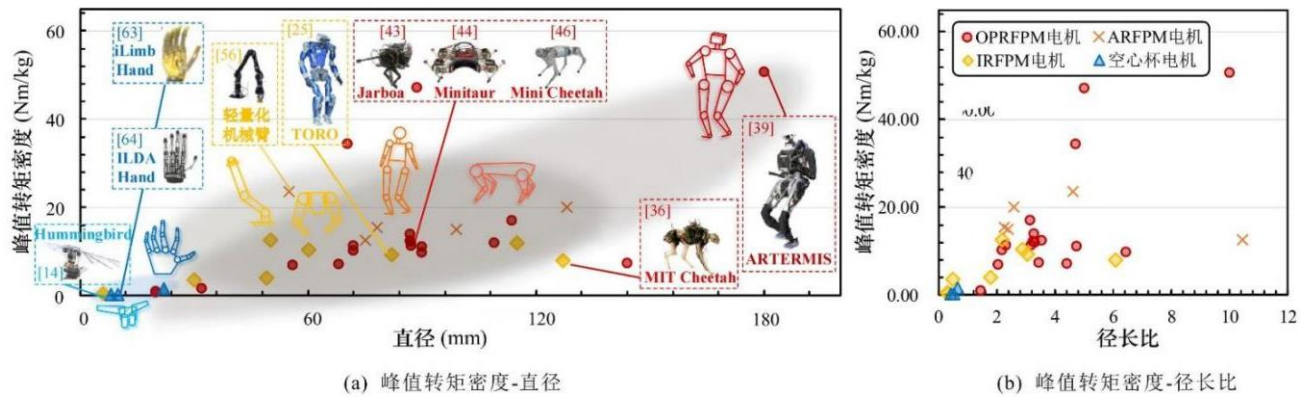
来源:《机器人关节用伺服电机关键技术与展望》, 国金证券研究所

注:可靠性的衡量标准主要为冲击载荷作用下发生故障和极端工况下升温烧毁的可能性

通过分析机器人电机的峰值转矩密度与尺寸参数关系,可建立典型应用型谱:空心杯电机适用于 8-20mm 直径的低径长比微型关节,主要应用于灵巧手等精密部件;内转子电机主导 30-80mm 直径的中径长比关节,主要应用于机械臂等上肢系统;外转子电机则适配 100-180mm 直径的高径长比关节,适合腿足式机器人等高

动态下肢需求。轴向磁通电机具有高转矩密度特性，但由于其存在散热问题，当前实际应用有限。

图表6：常见机器人类型与电机拓扑结构的特征型谱



来源：《机器人关节用伺服电机关键技术与展望》，国金证券研究所

二、无框力矩电机：人形机器人关节的力量基石

大扭矩+紧凑散热+中空走线，商业化成熟

无框力矩电机是一种无框架结构的无刷永磁同步电机。其摒弃了传统伺服电机的壳体，仅由定子和转子两大核心部件构成。其中，转子作为内部旋转部件，由带永磁体的钢制圆环组件构成，可直接安装在设备转轴上；定子作为外部固定部件，通常由环绕齿槽的叠压钢片及铜绕组组成，负责产生电磁力，并直接固定在机器壳体内。

无框力矩电机作为一种动力源，与普通伺服电机用途相似，但在以下方面具备突出优势：

(1) 性能提升：采用直接耦合方式（无背隙）、实现更高系统带宽，可直接集成至机械结构中，降低空载与摩擦损耗，从而提升整机运行效率；

(2) 结构紧凑：节省安装空间，具有更高的单位体积扭矩密度；

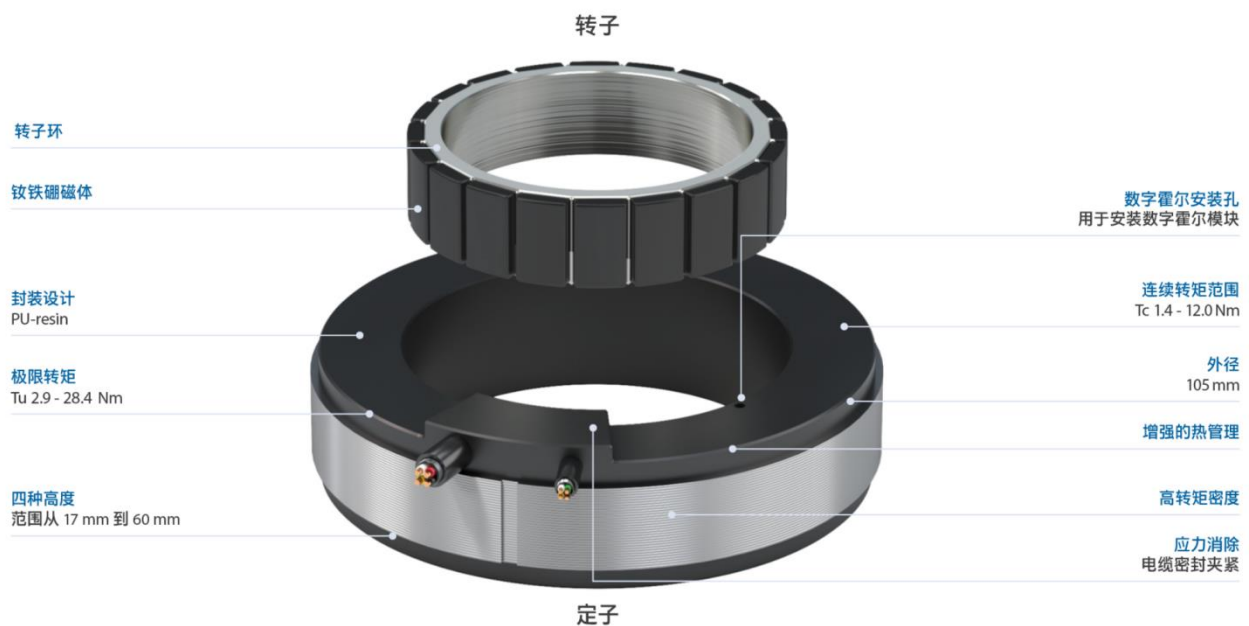
(3) 刚性增强：可作为直驱动力源，无需借助皮带轮、丝杠或齿轮箱等传动机构，直接驱动负载，系统刚度更高；

(4) 运行静音：由于直接集成在机械结构内部，传动方式简化，显著降低了运行噪音；

(5) 维护简便：机械部件数量减少，不含易磨损或需定期维护的组件，降低了长期维护需求。

综合来看，无框力矩电机的核心优势是输出力矩大、结构紧凑且散热性好，通常采用此类电机的效率更高、重量更轻。同时，无框力矩电机的中空结构便于走线，因此适用于集成度较高的人形机器人。

图表7：无框力矩电机结构组成

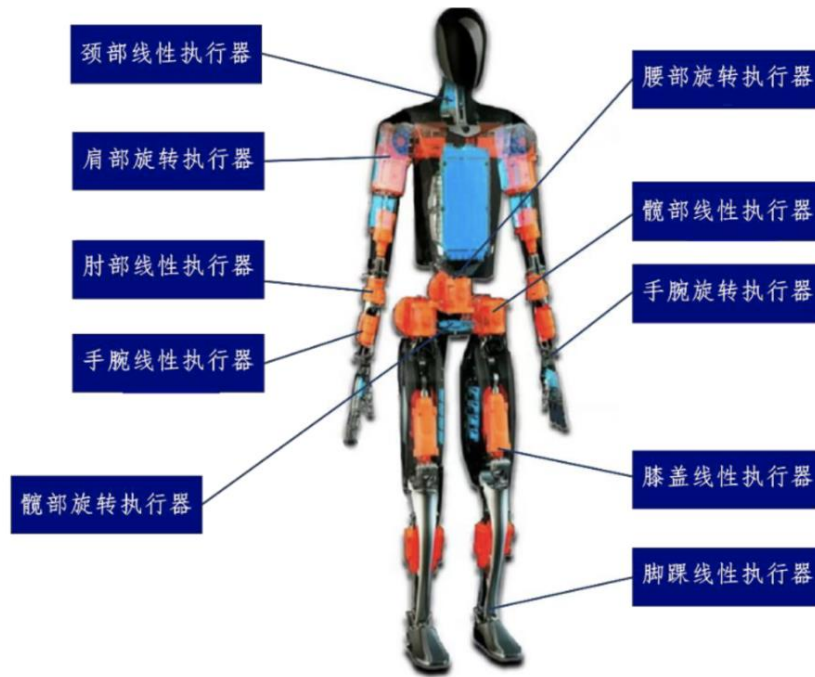


来源：Tecnotion，国金证券研究所

以特斯拉人形机器人 Optimus 为例，其执行器可分为旋转执行器和线性执行器 2 大类型 6 种规格。目前 Optimus 全身关节总共有 28 个执行器，均搭载无框力矩电机，其中 14 个旋转性执行器包括无框力矩电机+谐波减速器，从而实现类似人

体关节的旋转运动；14 个线性执行器包含无框力矩电机+行星滚柱丝杠，用来实现类似人体的肌肉拉伸运动。

图表8：特斯拉 Optimus 执行器包括旋转执行器和线性执行器



来源：乐晴智库，国金证券研究所

人形机器人产业的发展推动了无框力矩电机的市场。根据海外市场研究公司 Technavio 的统计数据,2023 年全球无框力矩电机市场规模增长了 6.95%,为 6.57 亿美元。随着人形机器人逐渐实现商业化,将进一步带动无框力矩电机行业市场规模增长。若以 2030 年人形机器人出货量达 100 万台,同时无框力矩电机产品单价下降一半到 500 元/台来估算,预计人形机器人领域无框力矩电机市场空间将达到 23.97 亿美元。叠加传统领域市场空间的平稳增长,总市场规模将达到 33 亿美元。

国际厂商在该领域具有先发优势,主要企业均已推出面向机器人关节的系列化产品。相比之下,国内产业起步相对较晚,在关键制造工艺如充磁、灌封和绕线技

术，以及过载能力和轻量化设计等方面仍存在提升空间。

图表9：国内外无框力矩电机产品对比

厂商	系列	特点	D (mm)	L (mm)	Tn (Nm)	Tp(Nm)
Kollmorgen	KBM/TBM/ TBM2G	分数槽绕组 少极多槽 一体式磁钢	TBM: 60-129	13-55	0.413-10.3	1.37-39.4
AEROTECH	S	无槽定子 多极对数	50-240	39-149	0.2-28.2	0.82-116.4
Allied Motion	HT/Megaflux	正弦反电动 势 小尺寸 高转矩-惯 量比	HT:19.3-127	18.1-80.9	0.008-9	0.033-28.2
TQ	ILM	集中式绕组 多极少槽 模块化定子	25-115	10.8-68.4	0.032-9.51	0.105-31.4
Tecnotion	QTL/QTR	封闭的冷却 环 大尺寸	QTL: 210-485	65-105	65-907	140-1789
昊志机电	HDRM	低转矩波动 3.5倍过载	52-132	13	0.29-3.2	0.58-6.1
步科股份	FMC	多槽分瓣 无框灌封工 艺 轻量化	52-132	7-30	0.4-6.37	1.2-19.11
雷赛智能	FM1	高密度 小尺寸 适配性强	25-115	5-50	0.03-9.32	0.09-27.96
伟创电气	FT1	低噪音 高温稳定性 小齿槽效应	55-120	15-47	0.32-7.16	0.96-21.49

来源：各公司官网、《机器人关节用伺服电机关键技术与展望》，国金证券研究所

技术壁垒较高，国内市场呈集中趋势

在国内市场，无框力矩电机领域目前仍存在较高的技术壁垒，仅有少数厂商具备相关产品供应能力，市场呈现头部集中格局。整体而言，国产产品在性能和质量上仍落后于海外高端品牌，该细分市场对进口产品依赖度较高。

目前，国内布局无框电机的主要企业包括步科股份、大族电机、富兴机电、伟创电气、昊志机电、杭州三相、易尔泰、常州运控、合泰电机、三瑞智能等。与此同时，来福谐波、绿的谐波、同川精密等减速器厂商也已开始自主研发无框电机，旨在推出集成化的关节模组产品，进一步拓展市场。

图表10：上市公司在无框力矩电机领域业务情况

公司	业务情况
步科股份	公司无框力矩电机有 52-132mm 的 10 种框架尺寸，满足 3-25kg 负载需求，同转矩下尺寸更小、温升更低，性能优异。步科股份还是特斯拉中国人形机器人供应商，凭借技术与产品质量，在全球顶尖机器人项目中占有一席之地。
林泉电机	航天电器的子公司，研制微特电机、特种电机、伺服驱动控制和电动机构产品等。
昊志机电	提供无框力矩电机产品，转矩力 < 1%，有利于机器人力矩控制，3.5 倍过载能力，加强机器人负载能力。
大族机电	大族激光的子公司，提供 DDR 系列力矩电机，能够提供直接驱动、高动态响应、高精度等性能。
卧龙电驱	公司无框力矩电机及关节模组产品已形成完整解决方案，包含无框力矩电机、减速器、控制器等核心组件，可为仿生机器人提供动力系统支持。
雷赛智能	2024 年 1 月，FM1 无框力矩电机小批量试产成功，包含 4 种规格，10 个型号，产品具有高密度、高适配、低波动、低温升的特性，公司可根据客户需求中国求进行电机尺寸和电气参数的优化定制。
微光股份	2024 年公司已开发了 3 款空心杯电机、4 款无框力矩电机。其中无框力矩

电机已实现量产。

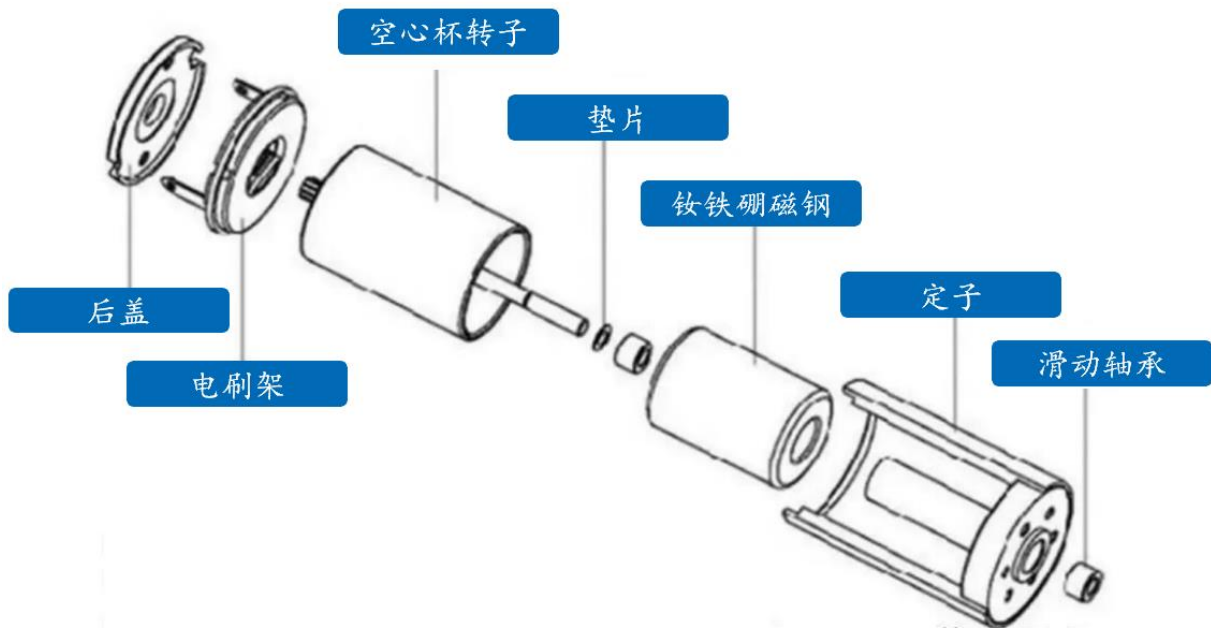
来源：智研产业研究院，国金证券研究所

三、空心杯电机：灵巧手的核心驱动技术

需求驱动明确，成本成为关键

空心杯电机方案能效高，适合电池供电且长时间运行的灵巧手。空心杯电动机采用无铁芯转子，消除了由于铁芯形成涡流而造成的电能损耗，因此效率更高，转动惯量小，易于控制。根据《空心杯微型电机及线圈的研究进展》，空心杯电机主要具备以下特点：（1）节能特性：能量转换效率很高，其最大效率一般在 65% 以上，部分产品可达到 90% 以上（铁芯电动机一般不超过 75%）。（2）控制特性：起动、制动迅速，响应极快，根据《空心杯微型电机及线圈的研究进展》，机械时间常数小于 28 毫秒，部分产品可以达到 10 毫秒以内（铁芯电动机一般在 100 毫秒以上）。（3）波动特性：运行稳定性十分可靠，转速的波动很小。作为微型电动机，空心杯电机的转速波动能够容易的控制 在 2% 以内。因此空心杯电机特别适合电池供电同时又要求长时间运行的应用场合，例如仿生手、人形机器人和手持电动工具等。

图表11：空心杯电机采用无齿槽结构



来源：万泰电机官方微信公众号，国金证券研究所

空心杯电机主要难点在于绕组设计、动平衡设计及资金投入。因此新进入者的技术积累较浅，难以达到机器人领域的高效率等要求。

(1) 绕组设计：绕组需要保证线圈的高密度以及排列的一致性，从而使得产品具备高功率和扭矩密度。绕组的形态具备多样性，不同形态的绕组会直接影响生产的良率，但多数技术都被外资企业申请专利，进一步加大国内企业突破的难度。

(2) 动平衡的设计：转子动平衡是电机生产制造过程中极其重要的一个工序，直接关系到电机的噪声、振动指标性能是否达标。转子动平衡差异的原因是不同企业使用了不同的磁性材料，导致转子的质量分布不均一。

(3) 资金投入：电机的自动化生产线中设备价格较高，绕组设备单台价格百万以上，且需要设备厂商定制化开发，对空心杯电机厂商的资金要求较高。

图表12: 线圈绕组方式包含斜绕、叠绕、直绕、马鞍绕和同心绕等

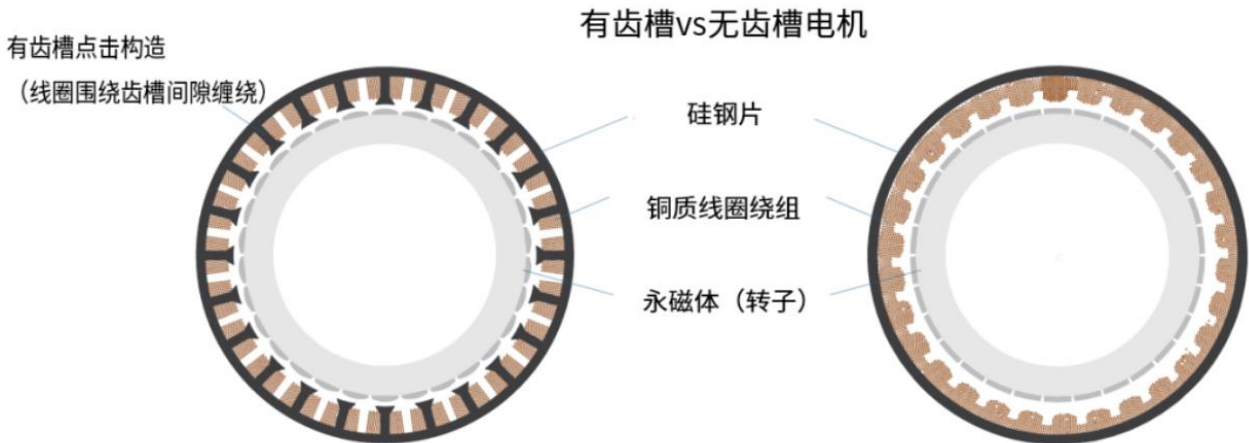


来源: 电机设计工艺工程, 国金证券研究所

无刷有齿槽电机方案是降本的一种可行方式。手指部位可使用的电机可按有无齿槽区分为无刷有齿槽电机和无刷无齿槽电机:

- 1) 有齿槽: 无刷直流电机大多采用有齿槽设计, 即线圈绕制在定子上的齿槽中;
- 2) 无齿槽: 空心杯属于无齿槽电机; 在无齿槽电机中, 定子上没有齿槽结构线圈单独绕制成型, 直接固定在定子表面或内部。

图表13: 空心杯电机属于无齿槽电机



来源: 科尔摩根官方公众号, 国金证券研究所

由于空心杯电机具备小直径、扭矩波动小等特点，机器人当前仍以空心杯电机为主导。无刷有齿槽电机功率较空心杯电机更大，同时大直径导致其短期仅能安装在大拇指（空间容忍度更高）。相比于空心杯电机，无刷有齿槽电机有齿槽力矩，导致速度和扭矩都有更大的波动，有铁芯之后无法做高速运转；空心杯电机可以做到高速、小直径，主要通过手掌结构来起承载重量，从这个角度看，无刷直流电机的功率更大，可以放在大拇指上，但是短期不会放在其他手指上，因为手指要更小更轻巧。

电机未来发展方向是围绕降本增效，主要通过缩小体积、减轻重量的方式实现，如调制磁场电机、一体化技术。1) 调制磁场：通过改变电机内部设计结构，实现缩小体积、增大功率密度；2) 一体化技术：通过集成减速器等产品，实现缩小体积、增大功率密度。

图表14：电机未来的趋势是缩小体积和提升功率密度

	调制磁场	一体化技术
优势	体积小、重量轻、功率密度高、工艺简化、可大幅降低电机轴电流	体积小、NVH 表现效果好，传动效率高
劣势	精度要求高、对基础磁性材料有要求	价格略贵、不适合长时间运作、维修麻烦
进展	国内已有成品	国内外众多车企均有不同程度布局
难点	磁性材料问题难以解决	汽车电机热管理难度较大
应用	物流系统滚筒电机	汽车电机、小型伺服/步进电机等

来源：华域麦格纳、红旗、奔驰公告，国金证券研究所

目前机器人关节应用的空心杯电机以 10mm 左右的小微型产品为主流。该领域国外厂商如瑞士 Maxon、德国 Faulhaber 和瑞士 Portescap 等凭借先发优势占据市场主导地位，而国内产业起步较晚，在 8mm 及以下小尺寸产品的技术水平上与国际领先企业仍存在差距。

图表15：空心杯电机生产厂商典型产品对比

	海外			中国
企业	Maxon	Faulhaber	Portescap	鸣志电器
产品	ECX SPEED13L	Series 1218 B	12ECP48 8B 21	ECU13026H06
额定转矩/最大连续转矩 (mNm)	5.16	/	8.1	2.77
额定电流/最大连续电流 (A)	1.42	/	3.3	1.34
零售价格 (元)	2198	/	2321	996

来源：头豹研究院，国金证券研究所

海外主导，国产替代加速进行

空心杯电机凭借“小体积、高动态响应、高精度控制”等综合性能优势，恰好满足了人形机器人的严苛要求——需在微小空间内实现快速、精准、安静的运行。正是此赛道的爆发，将空心杯电机推向了主流，使其成为核心解决方案。空心杯电机相关企业，有鸣志电器、兆威机电、伟创电气等。

图表16：上市公司空心杯电机产品与技术

公司	产品特点与技术水平	合作的人形机器人厂商/产品
鸣志电器	产品覆盖 13-30mm 全型号;自主研发空心杯绕组技术,技术水平位居全球前列	特斯拉 Optimus
兆威机电	率先突破 4mm 直径无刷空心杯电机技术;产品直径覆盖 4-22mm	特斯拉 Optimus、华为、Figure 机器人
拓邦股份	专注于无刷电机、空心杯电机及控制器;形成“核心部件+系统集成”能力	特斯拉、优必选、小米等
鼎智科技	空心杯电机最小直径可达 8mm;产品直	特斯拉 Optimus

(江苏雷利控股)	径覆盖 6-22mm	
大族电机	8-30mm 空心杯电机	未明确披露
伟创电气	自主研发 6-22mm 系列无刷空心杯电机	试产阶段
雷赛智能	无刷空心杯电机直径覆盖 6-40mm	已应用机器人中，未明确披露
禾川科技	推出 Hu-ECU 系列空心杯电机，直径覆盖 8-16mm	未明确披露

来源：鸣志电器等厂商官方披露，Big-Bit 产研室整理，国金证券研究所

四、未来人形机器人电机技术方向

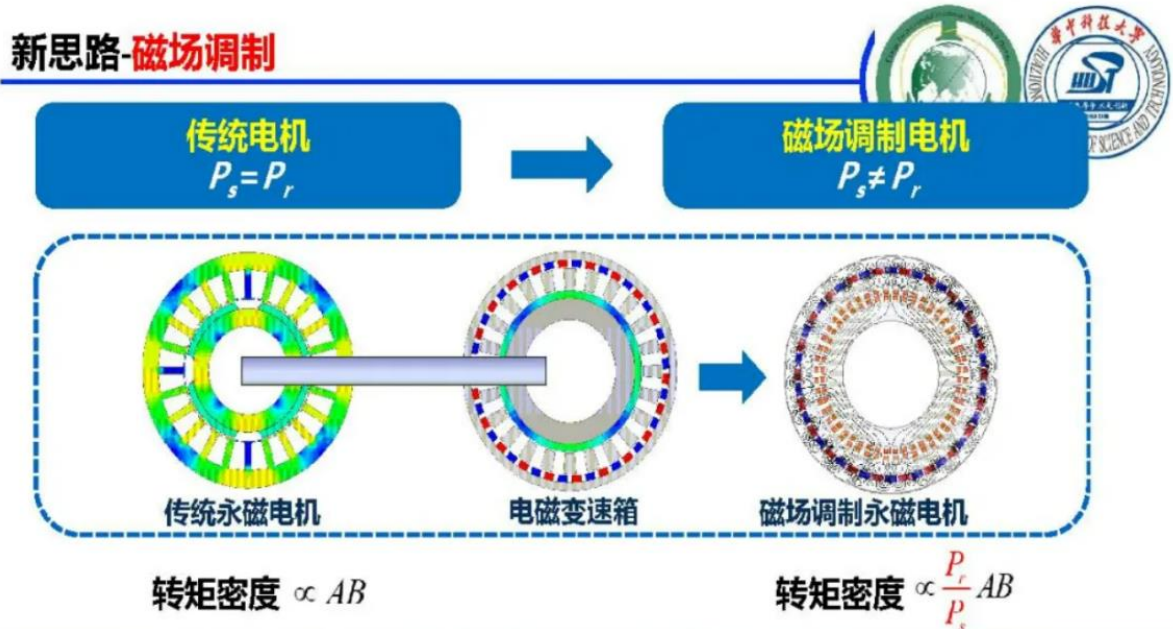
谐波磁场电机或打破传统电机磁路设计

以直流电机、永磁同步电机等为代表的传统电机得到快速发展。该类电机普遍具有励磁和电枢 2 个功能单元，且 2 个功能单元的极对数相同。随着研究深入，相关学者发现该电机除电枢和励磁 2 个功能单元包含的初始磁密谐波外，还由于凸极转子、定子开槽等不均匀气隙结构，引入了气隙磁导谐波。在气隙磁导谐波作用下，电机产生了与电枢和励磁初始磁密谐波极对数、幅值、频率、相位不同的磁密谐波。这种特殊的电磁现象与调制过程类似，称为电机领域的“磁场调制”现象。

谐波磁场电机就是基于这样新结构和新原理工作的磁场调制电机。其励磁和电枢单元的极对数不等，需新增调制单元进行磁场极对数转换，这种特殊的电磁现象称为“磁场调制效应”。在该效应下，谐波磁场电机在外特性上与机械减速齿轮箱类似，转矩新增放大系数“极比”（电机旋转部分极对数和电枢绕组极对数之

比)，从而可在相同材料选型和散热条件下大幅提升电机转矩密度，具有广阔应用前景。

图表17：谐波磁场电机打破励磁和电枢单元的极对数相等限制

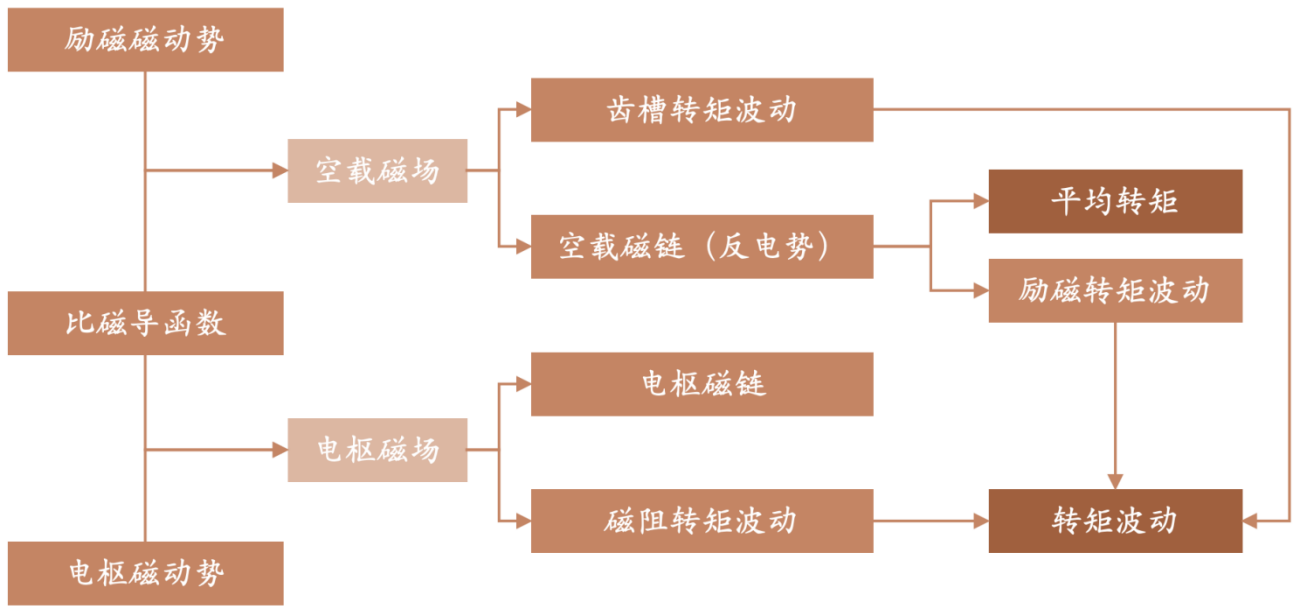


来源：《磁场调制——高转矩密度电机的创新与发展》，国金证券研究所

核心优势：平均转矩大，转矩脉动小，功率密度跃升

电机作为机电能量转换装置，其性能体现在“电”与“机械”两个方面。机械端口的主要指标是平均转矩与转矩波动，而电端口的主要指标为电压、电流、功率因数、电压畸变程度等。根据电机学理论，电机的电压与电流可以通过线匝数调节，因此其内在的性能仅为功率因数与电压畸变程度两项。由于电压畸变程度主要在转矩波动中体现，所以谐波磁场电机的主要两项性能指标为平均转矩和转矩波动。

图表18：谐波磁场电机的主要两项性能指标为平均转矩和转矩波动



来源：《磁场调制电机》，国金证券研究所

应用领域：工业场景已有应用，机器人关节、灵巧手具备潜力

新型的磁场调制电机具有独特的调制单元，永磁体和电枢磁场经过调制在气隙中产生大量谐波磁场，导致电机的损耗进一步增加。因此，如何合理利用谐波能量，并将谐波能量转化为与基波能量类似的电机有效输出能，是谐波磁场研究的关键，相关研究已逐渐拥有产业化落地趋势。

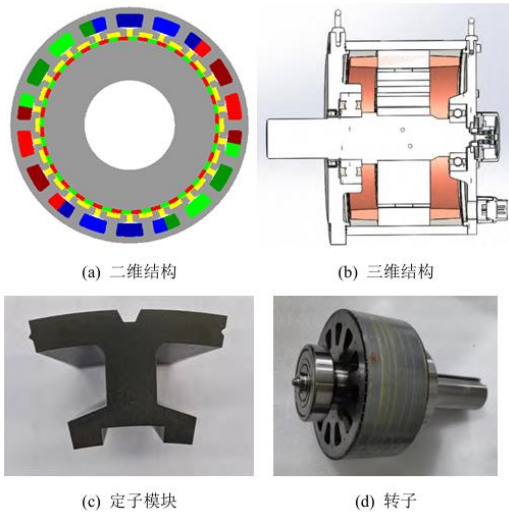
东南大学程明老师团队与南京某公司在伺服电机领域开展产学研合作，利用磁场调制电机高转矩密度的特点适合于低速大转矩应用，开发了直驱式锻压伺服电机。该应用场合需要电机具有高转矩密度、低转矩脉动，从而保证锻压装置连续稳定恒速运行，保障锻压质量。

该方案采用定子 18 槽、转子 56 极 ($P_s=8$ 、 $P_r=28$) 磁场调制永磁电机，定子采用裂齿结构。在电机最大转矩、永磁体用量相同的条件下，与该公司原有设计方案的传统永磁电机关键指标对比，不含机壳的电机有效体积减小 25%，以有效体

积计算的电机转矩密度提高了 34%，转矩脉动仅为 0.35%，还不会降低效率，验证了设计方法的有效性。

图表19: 谐波磁场工业应用: 直驱式锻压伺服电机 图表20: 电机主要性能对比

压伺服电机



参数	原设计方案	磁场调制电机	相对变化
最大转矩 (N·m)	350	350	—
有效体积 /L	7.9	5.9	-25%
转矩脉动率/%	≤1.00	≤0.35	-65%
效率/%	92.88	93.40	—

来源:《电机气隙磁场调制统一理论研究进展与展望》，国金证券研究所

来源:《电机气隙磁场调制统一理论研究进展与展望》，国金证券研究所

谐波磁场电机高功率密度优异性能有望广泛应用在人形机器人关节及灵巧手部件。谐波磁场电机实现在输出功率相同的条件下，调制磁场电机体积减少了一倍以上，即调制磁场电机重量也减少一倍以上。目前人形机器人电机问题集中在功率密度达不到要求，谐波磁场电机的磁路设计方案有望解决该痛点。同时，高功密带来的另一优势便是体积和重量的减小，完美适应人形机器人轻量化发展趋势，未来谐波磁场电机渗透率有望持续提升。

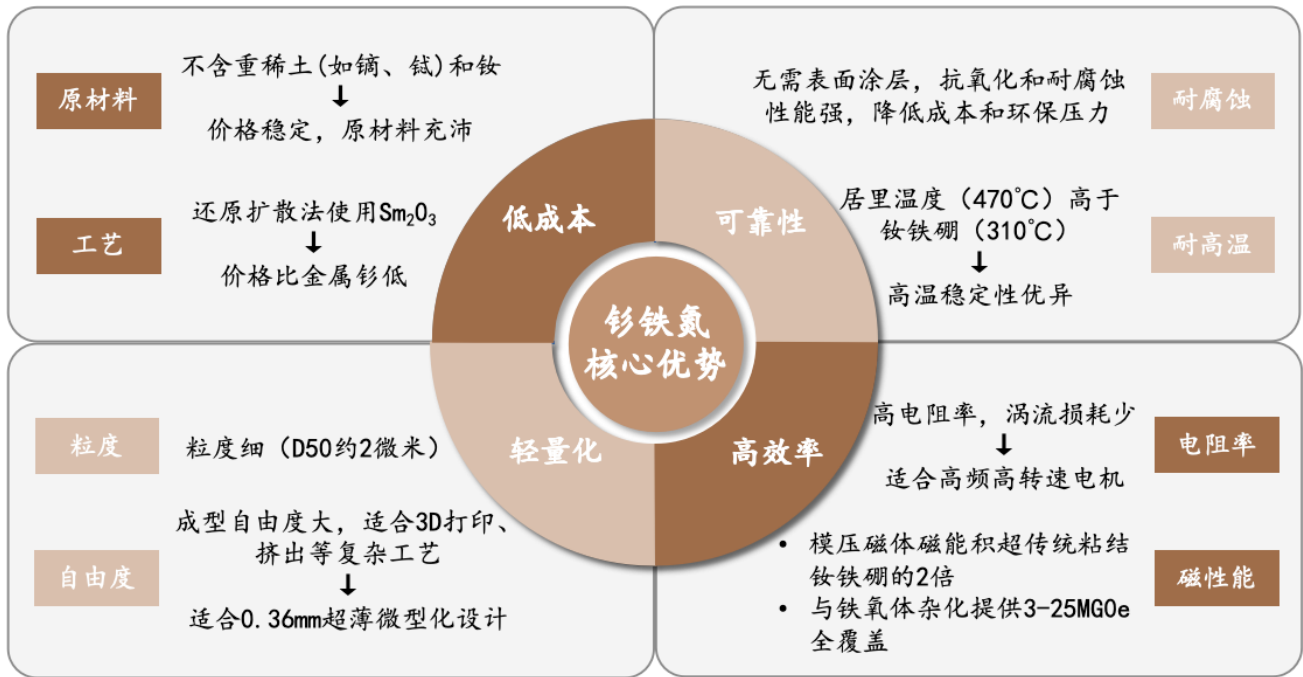
第四代永磁材料: 高温性能优异+成本优势显著

伺服电机的磁体通常采用永磁材料，永磁材料具有较高的磁场强度和磁能积，使得电机可以产生强大的磁场。稀土永磁材料是继金属系和铁氧体系后问世的第三

类永磁材料。稀土永磁材料经过了三次迭代，第四代稀土永磁材料——钐铁氮永磁材料，主要以钐（Sm）、铁（Fe）和氮（N）为关键成分，在组成结构上形成了独特的化合物体系，进而展现出一系列优异性能，其核心优势主要体现在低成本、可靠性、轻量化和高效率四个方面。

- 低成本：从原材料看，钐铁氮永磁材料完全不含镝、铽等重稀土和钕，避免了钕价波动和重稀土短缺的问题。从工艺来看，钐铁氮还原扩散法使用 Sm2O₃，其价格较金属钐低一个数量级。
- 可靠性：在潮湿、酸碱等恶劣环境中，钕铁硼材料容易受到腐蚀，而钐铁氮材料则能有效抵御外界侵蚀，在恶劣环境下展现出广阔的应用前景。另外，与钕铁硼材料相比，钐铁氮具有更高的居里温度，使其能够在更为宽泛的高温环境中保持稳定的工作状态。
- 高效率：虽然钐铁氮永磁材料的磁能积略低于钕铁硼，但其卓越的高温稳定性和耐用性在实际应用中弥补了这一不足。例如在电机应用中，钐铁氮能够在高温条件下保持稳定的磁性，避免出现退磁现象，从而保障电机的高效运转。同时钐铁氮具有较高电阻率，能够减少涡流损耗，更适合高频高转速电机。
- 轻量化：钐铁氮粒度较细，D50 仅为 2 微米，同时成型自由度大，适用于 3D 打印、挤出等复杂工艺，可制造 0.36mm 超薄磁体，适用于微型电机。

图表21：钕铁氮在永磁材料中的竞争优势



来源：稀土信息公众号、新莱福公告、《用热压法制备钕铁氮块体及性能优化方法》、《各向异性钕铁氮永磁材料制备技术进展》，国金证券研究所

与其他永磁稀土材料相比，钕铁氮永磁材料在各方面表现优异。钕铁氮永磁材料磁性能较强，磁能积最高可达 310 KJ/m^3 ，剩磁可达到 $0.65-1.5\text{T}$ ，略低于钕铁硼，但远高于铁氧体。钕铁氮原材料中不含钴，材料储备充裕，每千克成本在 $100-300$ 元，与钕铁硼相比具有显著的成本优势。另外，钕铁氮居里温度可达 $350-500^\circ \text{C}$ ，与钕铁硼相比具有更好的热稳定性，适用于高温电机、军工、航天等多应用场景。

图表22：永磁材料分类对比

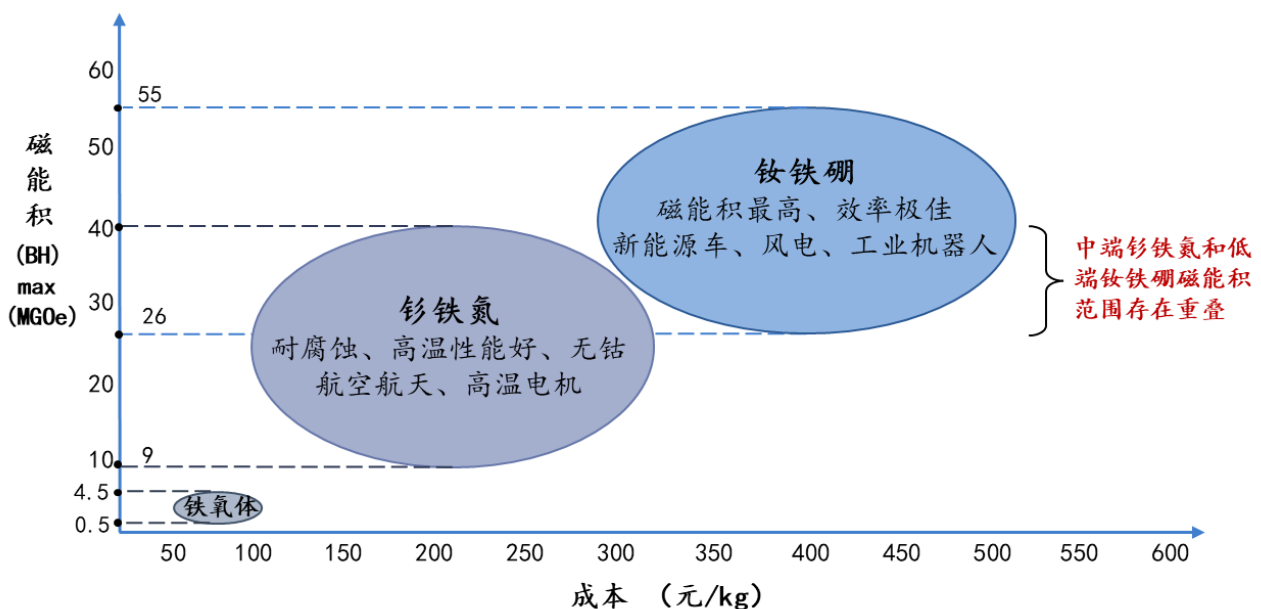
材料类型	最大磁能积 (KJ/m ³)	矫顽力 (KA/m)	剩磁 (T)	居里温度 (°C)	优势	劣势	下游应用
钕铁硼	207-438	800-2400	0.6-1.4	310 左右	磁能积高, 相较钕钴性价比高	需要钕稀土资源, 居里温度较低	数字产品、各类电机及磁传感器产品、民用吸附件用途、办公设备
铁氧体	3.0-36	125-350	0.1-0.44	450-460	凭借卓越的成本优势、良好的化学稳定性、高性价比及最高250°C的工作温度, 在中低端产品中占据重要地位。	磁能积仅为烧结钕铁硼的十分之一	广告展示、家居装饰、办公教育、各类电机、音响等应用场景
钕钴	120-255	500-1800	0.8-1.2	750-850	高居里温度, 优异的耐腐蚀性, 高磁能积	生产工艺复杂、磁性能相对较低以及成本高	高速电机、航天加速度计、精密陀螺仪、医疗设备微电机, 以及卫星通信、空间探测、电子对抗行波管等高温高稳定性场景
钕铁氮	72-310	478-1035	0.65-1.5	470 左右	耐腐蚀、高温性能好、不依赖稀土资源	量产工艺不成熟、稳定性待提升	包括风力发电、新能源汽车、工业机器人和航空航天

来源：中华人民共和国国家标准、新莱福公告、胜德官网，国金证券研究所

磁性能和成本价格是制约稀土材料产业化的两大关键因素。从磁能积和成本价格

综合来看，钕铁硼虽然磁能积最高，达到 26-55MG0e，但其成本较高，为每千克 300-500 元，并且对稀土高度依赖，导致其应用场景受限。铁氧体虽价格便宜，成本仅每千克 50-100 元，但其磁性能最弱，磁能积仅为 0.5-4.5MG0e，难以满足高效电机性能需求，目前大多应用于家电、电动工具和低端电机。而钐铁氮最具性价比，其磁能积为 9-40MG0e，中端材料性能可与低端钕铁硼比肩，并且价格仅为每千克 100-300 元，与钕铁硼相比具有明显的降本优势。

图表23：中端钐铁氮和钕铁硼低端最大磁能积范围有重合



来源：中华人民共和国国家标准、中国有色网、新莱福公告、卡瑞奇官网、宁波力优官网、新莱福公告，国金证券研究所

永磁与谐波磁场驱动产业化加速

随着人形机器人对电机要求持续提升，永磁电机与谐波磁场电机技术的应用价值日益凸显。新型电机技术将持续创新，产业化落地将不断加速。在钐铁氮磁材领域及调制磁场电机技术上有布局优势的相关企业，如美的集团、卧龙电驱、德马科技等。

图表24：上市公司在钕铁氮和磁场调制电机领域布局

领域	公司	布局
钕铁氮磁材	有研新材	开发创新项目钕铁氮 (SmFeN) 快淬磁粉
	中科三环	公司在重稀土减量化技术、含钕钐铁硼磁体、钕铁氮磁体等领域均已有多年的研究
	英思特	在钕铁氮永磁材料应用领域已拥有一定技术储备，钕铁氮粒料以外购为主，目前含有钕铁氮的混合产品已有小批量交付，主要应用于鼠标滚轮当中
	新莱福	公司高性能钕铁氮永磁粉体项目实现性能突破，正进行量产准备
	北矿科技	公司高剩磁 BMXF-4DB 产品、高塑化粒料、挤出成型用柔性钕铁氮粒料等一批新产品进入产业化阶段
	大地熊	各向同性钕铁氮橡胶磁项目在研，目标为实现柔性磁材在微特电机中的应用
	万朗磁塑	钕铁氮稀土永磁材料已完成实验室小试进入中试
调制磁场电机	美的集团	通过“高适配性静音变频压缩机关键技术研究及产业化”项目，研发出谐波磁场调制技术，解决压缩机系统振动大、噪音高的问题
	卧龙电驱	“高品质多谐波磁场调制电机关键技术及应用”获湖北省科学技术发明奖一等奖，“高品质磁场调制电机拓扑及应用”获中国电工技术学会科技进步奖二等奖
	厦门钨业	拥有“盘式永磁磁场调制电机”发明专利

香农芯创	拥有“一种磁场调制型永磁传动装置及洗衣机变速器与洗衣机”实用新型专利
德马科技	工业输送用直驱电动滚筒应用了磁场调制技术，处于小批量生产阶段
华中数控	公司参与的科研项目“高品质多谐波磁场调制电机关键技术及应用”获得湖北省科学技术进步奖一等奖

来源：各公司公告，国金证券研究所

人形机器人产业的爆发是驱动高端电机技术发展的核心动力。当前人形机器人电机多种方案并行，长期看核心竞争要素在于成本和量产能力。为满足机器人对高爆发力、高精度、高可靠性及轻量化的严苛要求，电机技术正处于快速演进与路线分化的关键阶段，形成了针对不同应用场景的明确技术路径。电机作为人形机器人中价值量大、技术壁垒高的重要环节，未来将围绕更优的性能、更低的成本不断迭代。重点关注电驱新技术发展，如磁场调制技术、电机一体化技术等。相关公司短期内将聚焦于通过技术创新实现性能突破，长期竞争力取决于性能达标后的规模化量产与成本控制能力。

风险提示

技术路线迭代不及预期风险。谐波磁场电机及钕铁氮永磁材料作为新兴技术方案，仍存在磁路设计优化、关键工艺不成熟等挑战，若技术研发与产业化进度不及预期，将影响其性能表现与成本效益，延缓对传统方案的替代进程。

稀土及其制品出口限制风险。高性能电机依赖稀土永磁材料，而我国已对重稀土及相关物项实施出口管制。若国际贸易环境持续紧张或出口政策进一步收紧，可

能导致关键原材料供应受限、成本上升，影响产业链稳定性与海外市场拓展。

机器人发展不及预期风险。人形机器人是电机与永磁材料的重要增量市场，但其商业化放量节奏仍存不确定性。若机器人整体行业发展不及预期，将直接影响高性能电机及相关材料的市场需求规模，制约相关企业的成长空间。

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。

本报告版权归“国金证券股份有限公司”（以下简称“国金证券”）所有，未经事先书面授权，任何机构和个人均不得以任何方式对本报告的任何部分制作任何形式的复制、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。