



机器人研究

买入（维持评级）

行业深度研究

证券研究报告

具身智能组

分析师：陈传红（执业 S1130522030001） 分析师：冉婷（执业 S1130524100001）

chenchuanhong@gjzq.com.cn

ranting@gjzq.com.cn

机器人前瞻技术专题（一）

电机：高扭高温需求驱动，谐波磁场电机迎曙光

投资逻辑

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。机器人在各种复杂环境中完成搬运、抓取、行走等任务，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高过载工况，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。

1、谐波磁场电机迎曙光：

打破传统电机磁路设计桎梏，高功密下体积减小+扭矩提升。谐波磁场磁路设计源自“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”，从而可在相同材料选型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。**东南大学团队与南京某公司共同开发了基于谐波磁场原理的直驱式锻压伺服电机。与传统设计方案相比，新电机转矩密度提高了 34%，转矩脉动仅为 0.35%。国内某龙头电机公司已发布一系列谐波磁场专利，谐波磁场相关技术实现产业化落地。在保持功率密度不变的情况下，谐波磁场磁路设计将电机体积缩小一半，实现功率密度的跃迁，有望持续打开工业及人形机器人应用空间。

2、第四代磁材钕铁氮商业化开启：

（1）高温性能是钕铁氮最核心优势之一。钕铁氮作为第四代稀土永磁材料，拥有比钕铁硼材料更高的耐温性，居里温度约达 470° C，更为宽泛的高温环境中保持稳定的工作状态。

（2）谐波磁场电机对磁材磁性需求下降。磁能积最高可达 40MG0e，剩磁可达到 650-1500mT，略低于钕铁硼，但远高于铁氧体。谐波磁场电机能够大幅度提升功率密度，对磁材磁性需求边际下降。

（3）钕铁氮成型工艺迭代迅速，有效磁性提升快速。钕铁氮磁体此前受困于制备及成型工艺难点，多用于中低端应用场景。主要有两种成型技术路线：粘结磁体和烧结磁体。目前衍生出低温成型工艺和低熔点金属粘接剂辅助成型两类改进成型方法。两类改进成型方法有效解决了氮高温易分解，磁性能低等问题，为钕铁氮量产提供了技术支持。

（4）钕铁氮应用空间打开。随着机器人等对电机扭力和耐温要求的提升以及谐波磁场电机的商业化，钕铁氮有望大规模普及。从市场空间来看，当前钕铁硼仍是最主要的稀土永磁材料，烧结钕铁硼和粘结钕铁硼生产总量占每年稀土永磁材料的 98% 以上。分下游看，稀土永磁材料主要应用于新能源汽车（19.8%）、风力发电（15%）、节能电梯（14.6%）和工业机器人（8.72%）等领域，其中大部分场景磁能积需求低于 40MG0e，当前钕铁氮永磁材料已可满足其性能要求。我们测算，2030 年钕铁氮磁体替代空间有望达到 122 亿元。以人形机器人 100 万台产量计算，单台伺服电机数量为 40 个，假设全部采用钕铁氮电机方案，远期将给谐波磁场电机带来 80 亿元以上市场空间。

投资建议

机器人对高扭高温电机需求驱动下，谐波磁场电机商业化有望加速，同时第四代磁材钕铁氮应用空间打开，关注重点谐波磁场电机和钕铁氮产业链。

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。



内容目录

一、机器人电机：高扭高温需求迫切.....	5
1.1 机器人高性能需求，电机选型设计标准明确.....	5
1.1.1 传动部件类型：柔性执行器、弹性执行器和准直驱执行器.....	5
1.1.2 传动架构类型：并轴级联式、同轴串联式、同轴内嵌式.....	6
1.2 电机按拓扑结构分为径向磁通、轴向磁通和空心杯电机.....	7
1.3 高性能机器人电机需求：高转矩密度+低转矩波动+强过载能力+散热属性.....	9
二、高功密需求牵引，谐波磁场电机迎来曙光.....	10
2.1 机器人电机新技术：谐波磁场打破传统电机磁路设计桎梏.....	10
2.2 谐波磁场核心优势：平均转矩大，转矩脉动小，功率密度跃升.....	12
2.3 谐波磁场电机应用领域：工业场景已有应用，机器人关节和灵巧手具备潜力.....	16
三、谐波磁场电机放量叠加工艺进步，钕铁氮供需边际加速.....	18
3.1 高温性能优异+成本优势显著，钕铁氮应用广阔.....	18
3.2 供给边际：制备、成形工艺进步拓宽钕铁氮应用边界.....	22
3.3 需求边际：谐波磁场电机进一步打开钕铁氮渗透率空间.....	24
四、投资建议.....	26
五、风险提示.....	30

图表目录

图表 1： 机器人关节电机需要强爆发性、可靠性及自适应性.....	5
图表 2： 不同关节执行器对电机的需求产生差异.....	6
图表 3： 机器人关节执行器按传动部件组合架构分类.....	6
图表 4： 径向磁通电机和和轴向磁通电机拓扑结构.....	7
图表 5： 空心杯电机结构.....	7
图表 6： 机器人用电机拓扑结构对比.....	7
图表 7： 常见机器人类型与电机拓扑结构的特征型谱.....	8
图表 8： 国内外无框力矩电机产品对比.....	8
图表 9： 典型外转子电机生产厂商.....	9
图表 10： 空心杯电机生产厂商典型产品对比.....	9
图表 11： 机器人电机受复杂多物理因素影响工况复杂.....	10
图表 12： 液体相变散热示意图.....	10
图表 13： 谐波磁场电机打破励磁和电枢单元的极对数相等限制.....	11
图表 14： 径向充磁表贴式磁齿轮.....	11



图表 15: 定子开槽型永磁游标电机	11
图表 16: 无刷磁场调制电机的分类	12
图表 17: 引入调制单元前后气隙磁场的变化	12
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	13
图表 19: 各类无刷磁场调制电机性能对比	14
图表 20: 不同极比的游标永磁电机转矩波动指标 (TRI) 对比	15
图表 21: 优化前后电机结构与齿槽转矩对比	16
图表 22: 谐波磁场工业应用: 直驱式锻压伺服电机	16
图表 23: 电机主要性能对比	16
图表 24: 磁场调制过程示意图	17
图表 25: 调制磁场电机和传统电机在相同定子槽数条件下的波动周期数对比	17
图表 26: 稀土永磁材料发展历史	18
图表 27: 钕铁氮在永磁材料中的竞争优势	19
图表 28: 永磁材料分类对比	19
图表 29: 中端钕铁氮和钕铁硼低端最大磁能积范围有重合	20
图表 30: 钕铁氮下游场景包括风力发电、新能源汽车、工业机器人和航空航天等	21
图表 31: 钕铁氮永磁材料的产业化进展	21
图表 32: 制备钕铁氮永磁材料的方法有合金熔炼法、机械合金化法、HDDR 和还原扩散法	22
图表 33: 各界针对制备钕铁氮永磁材料过程中的问题提出改进措施	23
图表 34: 两类改进成型方法有效突破了钕铁氮生产技术瓶颈	23
图表 35: 预计五年内国内钕铁氮永磁稀土市场空间可达百亿	24
图表 36: 机器人技术演进对材料的硬性要求	25
图表 37: 人形机器人量产有望带来 82 亿元谐波磁场电机市场	26
图表 38: 上市公司在钕铁氮和磁场调制电机领域布局	26
图表 39: 公司营收稳健增长	27
图表 40: 受原材料等影响公司 2025Q1 归母净利润下跌	27
图表 41: 公司新型稀土永磁材料产线建设项目进度	27
图表 42: 公司营业收入持续增长	28
图表 43: 公司归母净利润相对平稳	28
图表 44: 近两年来公司营业收入出现一定幅度下降	28
图表 45: 受订单和价格影响公司归母净利润波动明显	28
图表 46: 公司营业收入相对稳健	29
图表 47: 公司归母净利润保持增长态势	29
图表 48: 2025Q1 实现营收 1,284.28 亿 (+20.61%)	29
图表 49: 2025Q1 实现归母净利润 124.22 亿 (+38.02%)	29



图表 50: 美芝获中国轻工业联合会科学技术奖一等奖	30
图表 51: 静音变频压缩机采用谐波磁场调制技术	30

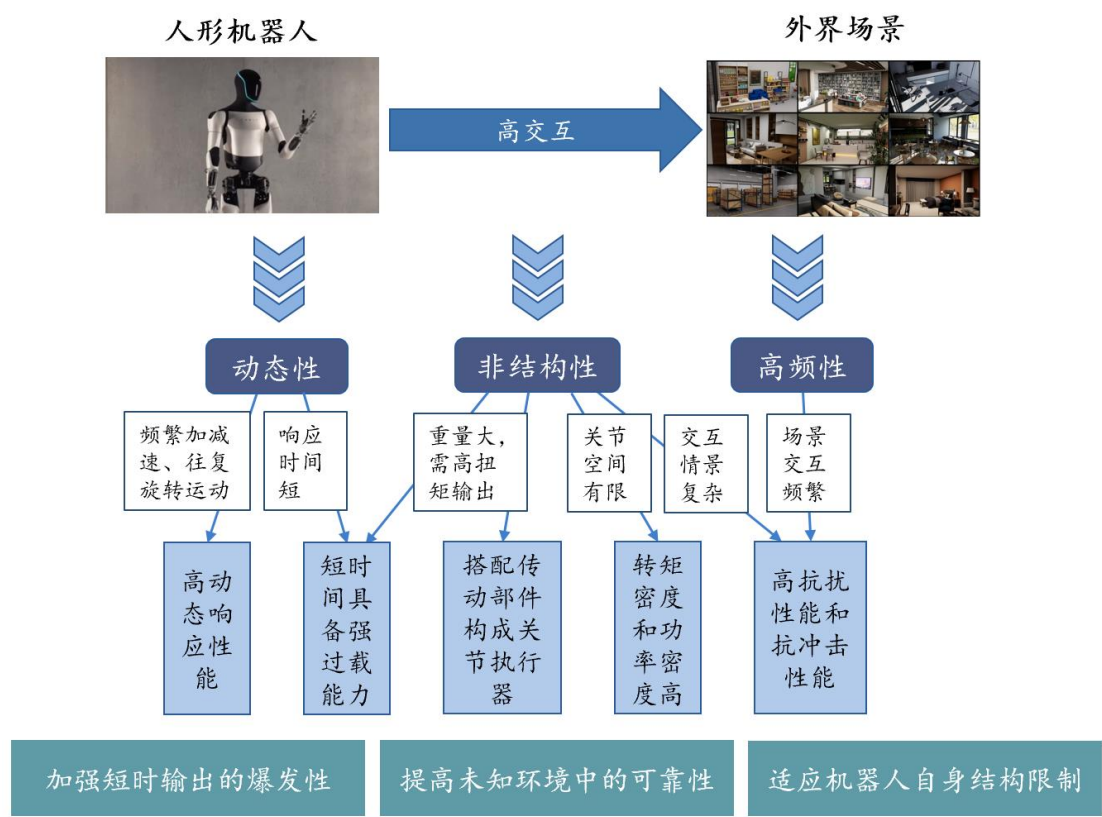
一、机器人电机：高扭高温需求迫切

1.1 机器人高性能需求，电机选型设计标准明确

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。

我们认为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1：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

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，执行器可进行如下分类：

1.1.1 传动部件类型：柔性执行器、弹性执行器和准直驱执行器

机器人执行器按传动部件类型可分为三类：

- (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2: 不同关节执行器对电机的需求产生差异

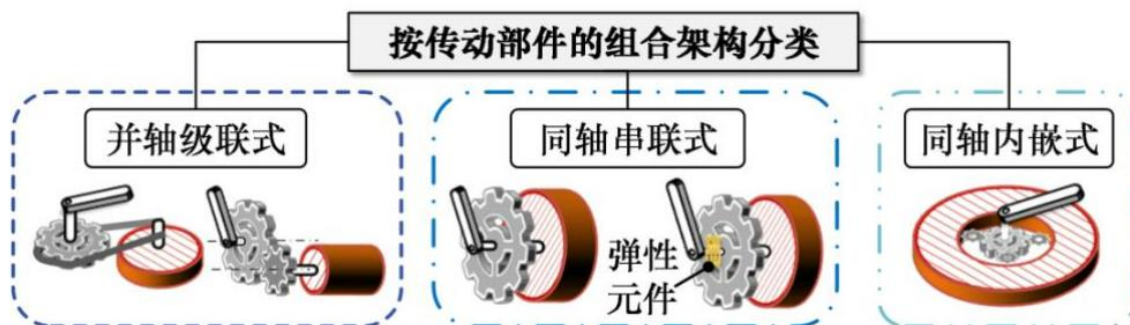
名称	示意图	构成	执行器特点	存在问题
柔性执行器 (flexible actuator, FA)		电机+高减速比减速器	高转矩密度; 具有机械谐振; 低力透明度和弱反驱性能	电机转矩需求较低,但机械谐振的难题需要解决
弹性执行器 (elastic actuator, EA)		在FA的基础上增加弹性元件	强抗冲击性能; 高效率、高峰值转矩; 低力控制带宽	电机峰值转矩需求较低,但力控制的动态响应性能需要改善
准直驱执行器 (quasidirect drive, QDD)		高转矩密度电机+低减速比减速器	高力透明度和强反驱性能; 强抗冲击性能; 低转矩密度	电机仅基于电流环即可实现较高精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

1.1.2 传动架构类型: 并轴级联式、同轴串联式、同轴内嵌式

机器人执行器的传动架构主要分为三类:(1)并轴级联式采用电机与减速器径向排列但输出轴非同轴布置,(2)同轴串联式实现电机与减速器沿同轴排列,(3)同轴内嵌式将减速器集成于电机内部形成同轴排列。这些架构直接影响电机尺寸约束和系统输出特性。

图表3: 机器人关节执行器按传动部件组合架构分类



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

传动部件的差异直接影响电机的电磁特性、传感器要求和控制策略;传动部件的组合架构则约束着电机的尺寸和外形。基于这两种分类维度,可系统分析特定机器人关节对伺服电机的性能需求,为关节电机的选型设计提供明确依据。

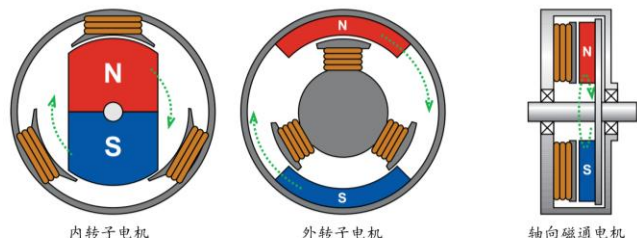


1.2 电机按拓扑结构分为径向磁通、轴向磁通和空心杯电机

目前，常见的机器人电机拓扑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4：径向磁通电机和和轴向磁通电机拓扑结构

图表5：空心杯电机结构



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

来源：头豹研究院，国金证券研究所

Vehicles》，国金证券研究所

内转子径向磁通永磁电机，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。

空心杯电机作为一种特殊永磁伺服电机，采用无铁心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6：机器人用电机拓扑结构对比

拓扑分类	内转子电机			外转子电机	轴向磁通电机	空心杯电机
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	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	低	中	中	高	较高	低
转矩密度	较低	高	中	较高	高	低
成本	低	较高	中	中	高	高
集成度	低	中	较高	高	较高	低
可靠性	中	低(装弹性元件时高)	较高	高	较低	中
固有缺点	多关节集成受限	抗冲击性能差	爆发性能弱	一体化振动存在	发热问题严重	制造难度高

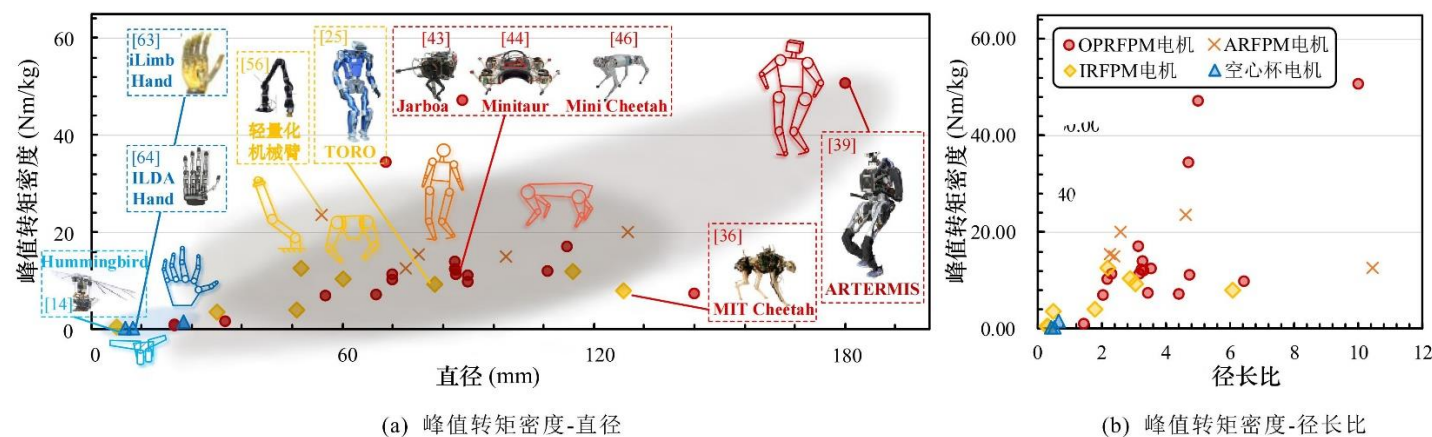


拓扑分类	内转子电机			外转子电机	轴向磁通电机	空心杯电机
适用场景	微/小型机器人的高动态关节	高精度、大负载机器人的上肢关节	高动态机器人的下肢关节	高动态、高爆发机器人的下肢关节	大负载机器人的关节	小型、高精度关节
典型应用	DelFly, Hummingbird	TORO, Walk-MAN, CENTAURO	MIT Cheetah II, MIT Cheetah III	Mini Cheetah, ARTERMIS	“青龙”机器人 “电动牦牛”	Pisa/IIT SoftHand, iLimb, ILDA

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7：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

机器人产业的发展推动了内转子无框力矩电机、外转子电机、空心杯电机这三种主流电机的市场快速成长。

Valuates Reports 数据显示，2022 年全球无框力矩电机市场规模已达 6.7 亿美元，预计 2029 年将增长至 11.7 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8：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/TB M2G	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



厂商	系列	特点	D (mm)	L (mm)	Tn (Nm)	TP(Nm)
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

近年来外转子电机及其 QDD 模组发展迅猛。国际代表厂商包括 Maxon 和 Westwood Robotics 等，国内主要有 CM、SW、宇树科技、银弗科技、本末科技和灵足时代等企业。当前市场格局呈现明显差异化特征：在大尺寸外转子电机及集成 QDD 模组领域，国内产品占据主导地位；而在小尺寸高精度外转子电机方面，则以国外厂商的技术优势更为突出。

图表9：典型外转子电机生产厂商

产品类型	典型生产厂商	
外转子电机	国外	Maxon、Nanotec、Portescap
	国内	T-Motor、CubeMars (CM)、iPowe、SteadyWin (SW)、迈得机电
集成外转子电机的 QDD 模组	国外	Westwood Robotics
	国内	CM、SW、宇树科技、银弗科技、本末科技、灵足时代

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

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10：空心杯电机生产厂商典型产品对比

	国际			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

1.3 高性能机器人电机需求：高转矩密度+低转矩波动+强过载能力+散热属性

相比传统电机，机器人电机具有材料利用率高、工况复杂、环境多变的特点，其内部多物理因素交互作用形成的耦合



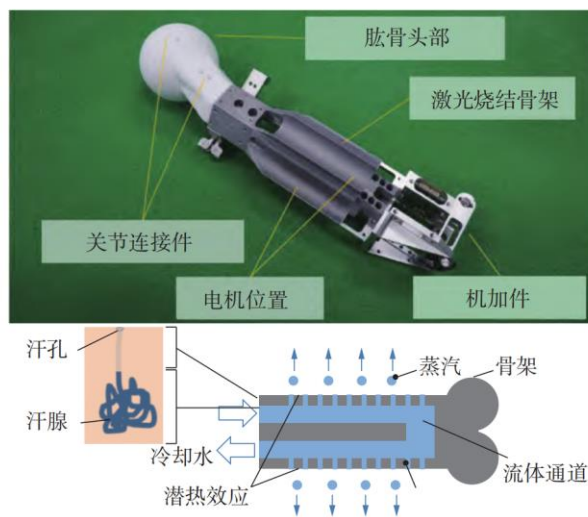
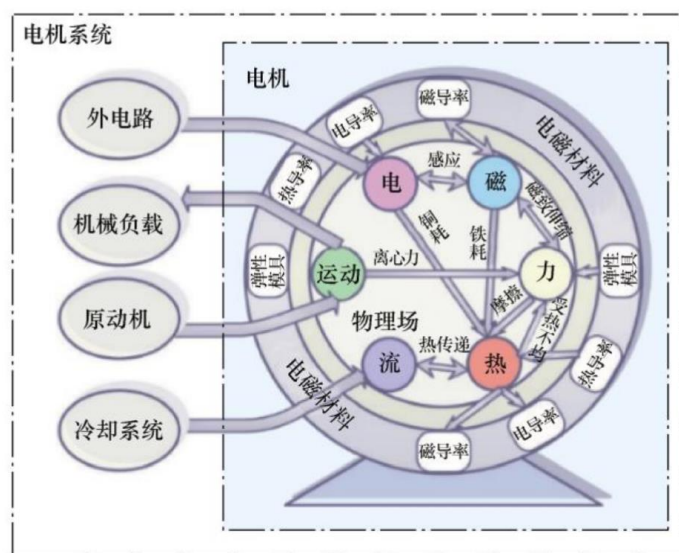
效应，导致电磁兼容、散热、机械强度等问题突出，传统电机结构难以适用。机器人高性能关节电机需具备四大核心性能特征：高转矩密度、低转矩波动、强过载能力和优异散热性能，这是实现复杂作业任务的关键技术保障。

- 高转矩密度是机器人电机的核心性能指标。机器人需在复杂工况下执行搬运、抓取和行走等任务，这些动作通常依赖较大驱动力矩。同时机器人结构尺寸紧凑，要求关节电机在单位体积内实现更高转矩输出，从而满足小型化设计与高功率输出的双重需求。
- 低转矩波动是影响运动精度的关键因素。电机转矩波动主要由齿槽效应、磁路不对称、电流谐波、电枢反应及控制延时等因素导致，需通过优化槽极配合、调整永磁体参数、采用斜极斜槽设计或增设辅助槽等措施来抑制转矩波动，提高机器人运行精准性。
- 强过载能力是应对突发负载的核心保障。永磁电机的过载转矩主要由电枢反应和定子铁心饱和引起，可通过优化极槽配合、齿宽、定子裂比及永磁体厚度等参数来降低磁饱和并减小交直流电感，从而提升过载转矩输出。此外，大电流导致的绕组温升也会制约过载能力，需结合铜损耗系数定量分析极限热负荷下的持续工作时间。
- 高效散热设计是确保可靠运行的基础。机器人关节伺服电机在过载工况下，绕组因高损耗密度会迅速积聚大量热量。而由于机器人电机通常采用全封闭式结构以适应复杂工作环境，其内部散热能力受限，导致短时间内出现急剧温升，严重影响电机的输出性能和运行可靠性。

当前，机器人电机主流方案仍无法满足机器人关节对高转矩密度、低转矩波动、强过载能力和散热属性的需求，导致机器人运动性能难以提升，动作精准度较低，甚至在长时间高强度运行过程中会因热量过高导致电机损害，严重影响了机器人整体工作的可靠性，机器人关节电机方案仍有待改进。

图表11：机器人电机受复杂多物理因素影响工况复杂

图表12：液体相变散热示意图



来源：《关于电学学科前沿技术发展的若干思考》，国金证券研究所

来源：《机器人热控技术研究现状综述》，国金证券研究所

二、高功率需求牵引，谐波磁场电机迎来曙光

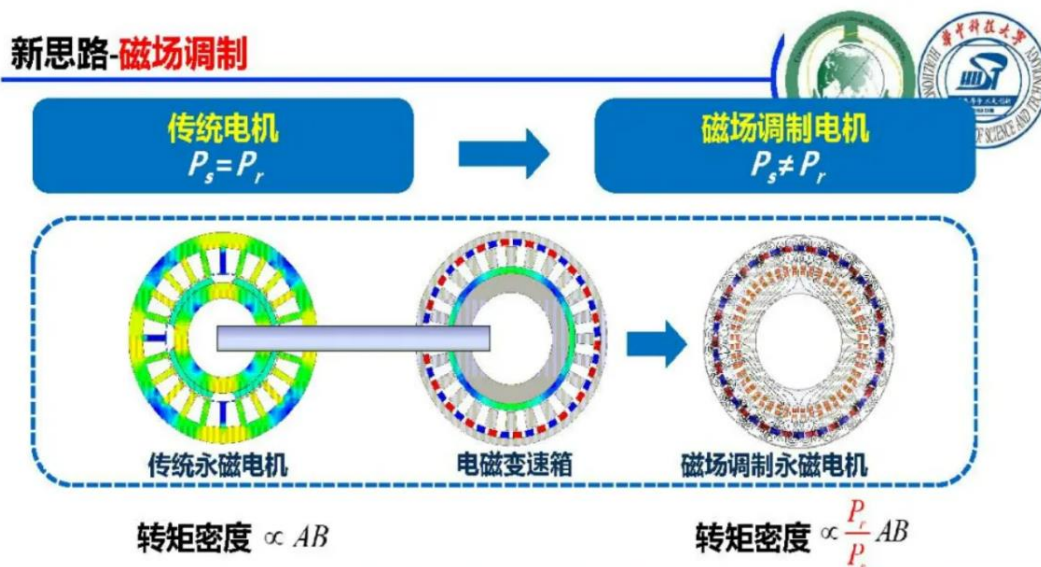
2.1 机器人电机新技术：谐波磁场打破传统电机磁路设计桎梏

电机作为一种机电能量转换的核心装置，自 19 世纪初诞生以来便得到了广泛关注。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13：谐波磁场电机打破励磁和电枢单元的极对数相等限制



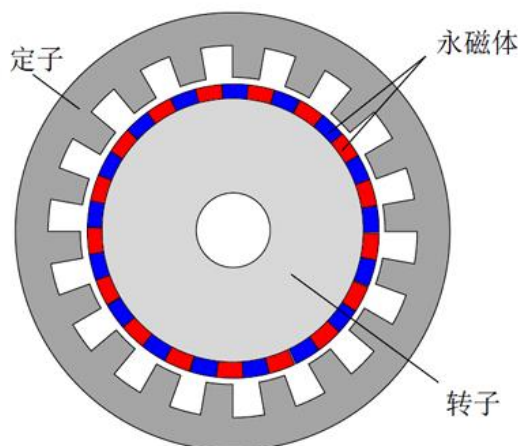
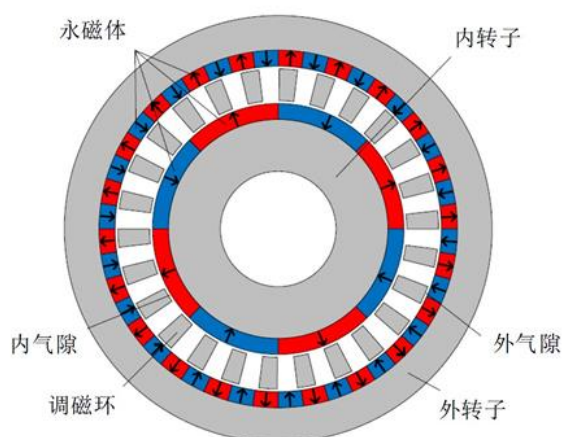
来源：《磁场调制——高转矩密度电机的创新与发展》，国金证券研究所

磁场调制电机的基本原理源自磁力传动的齿轮。D. Howe 教授在 2001 年提出了一种径向充磁型磁齿轮，该磁齿轮主要包含三部分：低速转动的外转子、保持静止的调磁环和高速转动的内转子，通过调磁环的调制作用实现动力传递。研究表明，该磁齿轮具有转矩传递能力，转矩密度高达 $100\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$ ，并具有自我过载保护能力。该磁齿轮的提出让众多学者展开了对磁场调制原理和磁齿轮复合电机研究，一系列磁齿轮样机被制造出来。

1999 年，一种新型的永磁游标电机（Permanent Magnet Vernier Machine, PMVM）被提出。该电机采用了定子开槽以及转子表贴永磁体的设计方案，将电枢绕组安装在定子槽内，当转子旋转时，永磁体产生的旋转磁场经过定子齿对磁场进行调制，并与定子电枢磁场形成耦合，从而传递转矩。学者通过对磁导函数的推导分析，证明了永磁游标电机具有较高的转矩密度。该电机通过磁场调制原理，实现了转子永磁体的极数多于定子绕组极数和槽数，相较于传统的永磁同步电机，该电机具有低速高转矩的特点。

图表14：径向充磁表贴式磁齿轮

图表15：定子开槽型永磁游标电机



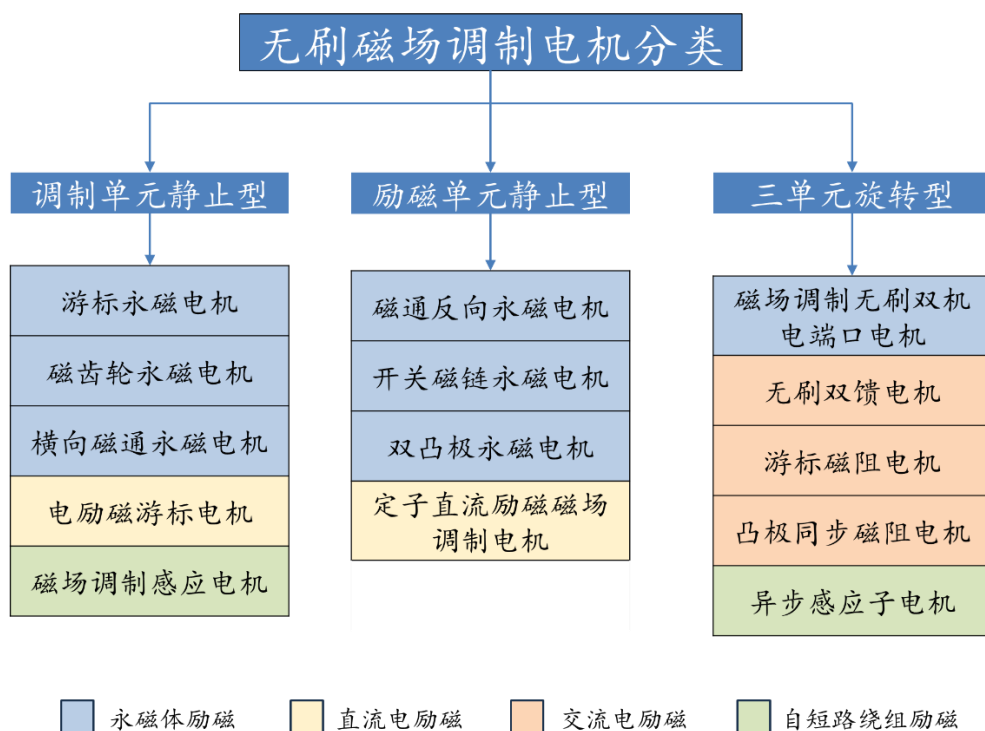
来源：《基于谐波分析的聚磁式磁场调制电机最小损耗控制研究》，国金证券研究所

来源：《基于谐波分析的聚磁式磁场调制电机最小损耗控制研究》，国金证券研究所

磁场调制电机具备“励磁-调制-电枢”3 个功能单元，在拓扑结构上具有更高的设计自由度，从而形成丰富的磁场调制电机族。根据各功能单元运动关系，可将无刷磁场调制电机分为 3 大类，即调制单元静止型、励磁单元静止型和三元旋转型。在此基础上，可根据各功能单元的励磁方式划分出具体拓扑。



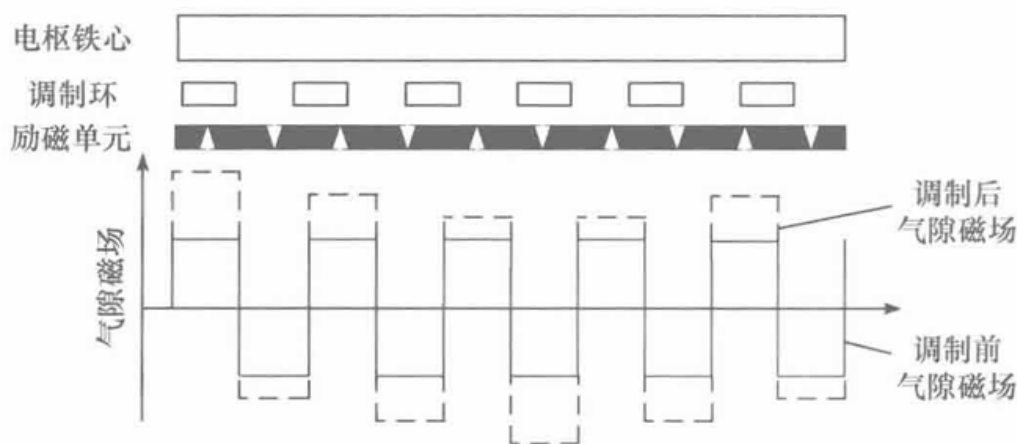
图表16：无刷磁场调制电机的分类



来源：《磁场调制电机的由来、发展与挑战》，国金证券研究所

磁场调制电机与传统电机的工作原理不同在于其电枢与励磁磁场要经过磁场调制单元的调制后才能相互作用产生转矩。当气隙内加入调制单元后，在永磁体和某一个导磁块中心线对齐时，由于铁磁材料导磁性远大于空气，所以磁场都穿过导磁块，导致该导磁块对应气隙内的磁密提升；而当永磁体中心线逐渐偏离导磁块中心线时，这种导磁效果会逐渐削弱，直到永磁体中心线开始靠近下一块导磁块的中心线，并在两者重合时，该导磁块对应的气隙磁场重新达到峰值。因此当气隙中加入导磁块后，气隙磁场会由于其导磁作用变得不规则，从空间谐波的角度分析，可以预测新的磁场谐波分量被引入。

图表17：引入调制单元前后气隙磁场的变化



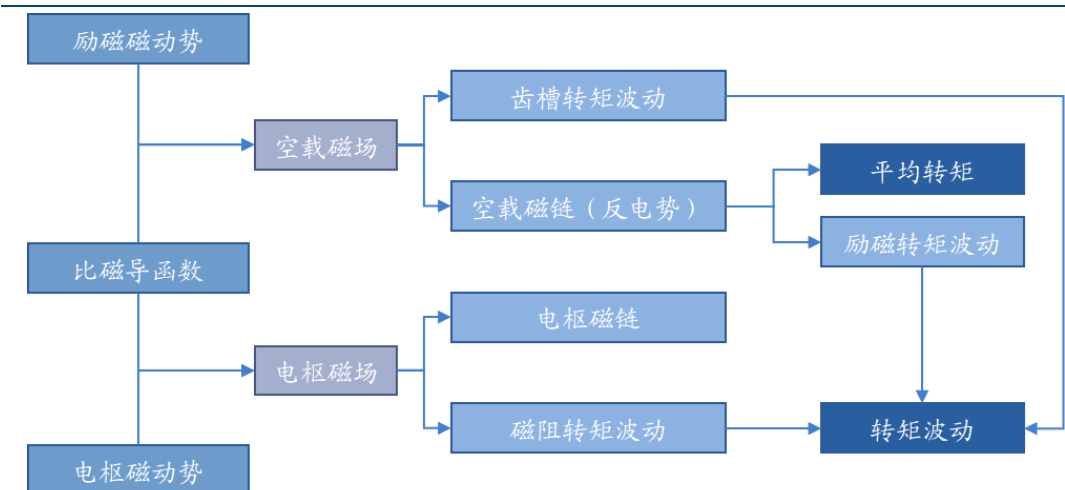
来源：《磁场调制电机》，国金证券研究所

2.2 谐波磁场核心优势：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

各类磁场调制电机的工作原理可统一表述为：励磁单元对应的励磁磁动势谐波经调制单元对应的气隙磁导谐波调制，产生与电枢单元对应的电枢磁动势谐波极转速和旋转方向均相同的励磁磁密谐波，即励磁磁密工作谐波，该励磁磁密工作谐波与电枢绕组交链，进而贡献平均转矩。在各类无刷磁场调制电机中，游标永磁电机及轴向磁通永磁电机拥有最大的平均转矩，达到 2pu 以上。



图表19：各类无刷磁场调制电机性能对比

电机类型	数量	励磁磁密工作谐波 B_{e_j/p_e}					参考值	
		励磁磁动势 系数 F_{ei}	气隙磁导 系数 λ_{mk}	极对数转换关系	机械转速 Ω_{a_j/p_e}	转矩放大系数 (极比 k_T)	平均 转矩/pu	槽极配合 $p_a/p_{ms}/p_{mr}/p_e$
传统永磁同步电机	1	$4B_r h_m / \pi / \mu_0 / \mu_r$	$\lambda_{s0} \lambda_{r0}$	$p_e \pm 0 = p_a$	Ω_e	1	1.0	10/0/0/10
传统游标永磁电机	2	$4B_r h_m / \pi / \mu_0 / \mu_r$	$\lambda_{s0} \lambda_{r0}$	$p_e \pm 0 = jp_a, j \neq 1$	Ω_e	1	2.0	1/12/0/11
多磁导谐波游标永磁电机	≥ 2	$4B_r h_m / \pi / \mu_0 / \mu_r$	$\lambda_{s0} \lambda_{r0}$	$p_e \pm 0 = jp_a, j \neq 1$	Ω_e	1	≥ 2.0	2/j/6/k/0/10
调制单元 静止型								
磁齿轮永磁电机	2	$4B_r h_m / \pi / \mu_0 / \mu_r$	$\lambda_{s0} \lambda_{r0}$	$p_e \pm 0 = jp_a, j \neq 1$	Ω_e	1	1.8	1/12/0/11
横向磁通永磁电机	1	$4B_r h_m / \pi / \mu_0 / \mu_r$	$0.5 \lambda_{s1} \lambda_{r0}$	$p_e - p_{ms} = 0$	—	p_e	2.5	0/18/0/18
电励磁游标电机	2	$2N_e I_{e1} k_{e_p} / \pi / p_e$	$\lambda_{s0} \lambda_{r0}$	$p_e \pm 0 = jp_a, j \neq 1$	Ω_e	1	1.6	1/12/0/11
磁场调制感应电机	1	$3N_e I_{e1} k_{e_p} \cos \gamma / \pi / p_e$	$0.5 \lambda_{s1} \lambda_{r0}$	$ p_e \pm p_{ms} = p_a$	$p_e \Omega_e / p_a$	p_e / p_a	1.4	1/12/0/11
传统磁通反向永磁电机	1	$4B_r h_m / \pi / \mu_0 / \mu_r$	$0.5 \lambda_{s0} \lambda_{r1}$	$ p_e \pm p_{ms} = p_a$	$p_{mr} \Omega_e / p_a$	p_{mr} / p_a	1.3	1/0/11/12
传统双凸极永磁电机	1	$4B_r h_m / \pi / \mu_0 / \mu_r$	$0.25 \lambda_{s1} \lambda_{r1}$	$ p_e \pm p_{ms} \pm p_{mr} = p_a$	$p_{mr} \Omega_e / p_a$	p_{mr} / p_a	0.6	2/6/4/2
励磁单元 静止型								
开关磁链永磁电机	≥ 1	$4B_r h_m / \pi / \mu_0 / \mu_r$	$0.5 \lambda_{s0} \lambda_{r1}$	$ ip_e \pm p_{mr} = jp_a$	$p_{mr} \Omega_e / jp_a$	p_{mr} / jp_a	1.6	5/j/12/k/11/6/i
定子直流励磁磁场调制 电机	≥ 1	$2N_e I_{e1} k_{e_p} i_p / \pi / p_e$	$0.5 \lambda_{s0} \lambda_{r1}$	$ ip_e \pm p_{mr} = jp_a$	$p_{mr} \Omega_e / jp_a$	p_{mr} / jp_a	1.3	5/j/12/k/11/6/i
半闭口槽无刷双馈电机	≥ 1	$3N_e I_{e1} k_{e_p} / \pi / p_e$	$0.5 \lambda_{s0} \lambda_{r1}$	$ ip_e \pm p_{mr} = jp_a$	$p_{mr} \Omega_e / jp_a$	p_{mr} / jp_a	0.7	1/0/4/3
开口槽无刷双馈电机	≥ 1	$3N_e I_{e1} k_{e_p} / \pi / p_e$	$0.25 \lambda_{sk} \lambda_{r1}$	$ ip_e \pm kp_{ms} \pm p_{mr} = jp_a$	$p_{mr} \Omega_e / jp_a$	p_{mr} / jp_a	0.7	1/18/22/3
三元 旋转型								
游标磁阻电机	1	$3N_e I_{e1} k_{e_p} / \pi / p_e$	$0.25 \lambda_{s1} \lambda_{r1}$	$ p_e \pm p_{ms} \pm p_{mr} = p_a = p_e$	$p_{mr} \Omega_e / p_a$	p_{mr} / p_a	2.0	1/36/34/1
凸极同步磁阻电机	1	$3N_e I_{e1} k_{e_p} / \pi / p_e$	$0.5 \lambda_{s0} \lambda_{r1}$	$p_{mr} - p_e = p_a = p_e$	$p_{mr} \Omega_e / p_a$	2	0.8	2/0/4/2
异步感应子电机	1	$3N_e I_{e1} k_{e_p} \cos \gamma / \pi / p_e$	$0.5 \lambda_{s0} \lambda_{r1}$	$ p_e \pm p_{mr} = p_a \neq p_e$	$p_{mr} \Omega_e / p_a$	p_{mr} / p_a	1.4	1/0/12/11
磁场调制无刷双机电端口 电机	2	$4B_r h_m / \pi / \mu_0 / \mu_r$	$\lambda_{s0} \lambda_{r0}$	$p_e \pm 0 = p_{a1}$	Ω_e	1	1.7	11/0/0/11
		$4B_r h_m / \pi / \mu_0 / \mu_r$	$0.5 \lambda_{s0} \lambda_{r1}$	$ p_e \pm p_{mr} = p_{a2}$	$ p_{mr} \Omega_m \pm p_e \Omega_e / p_{a2}$	$p_{mr} \omega_m \pm p_e \omega_e / p_{a2}$		2/0/9/11

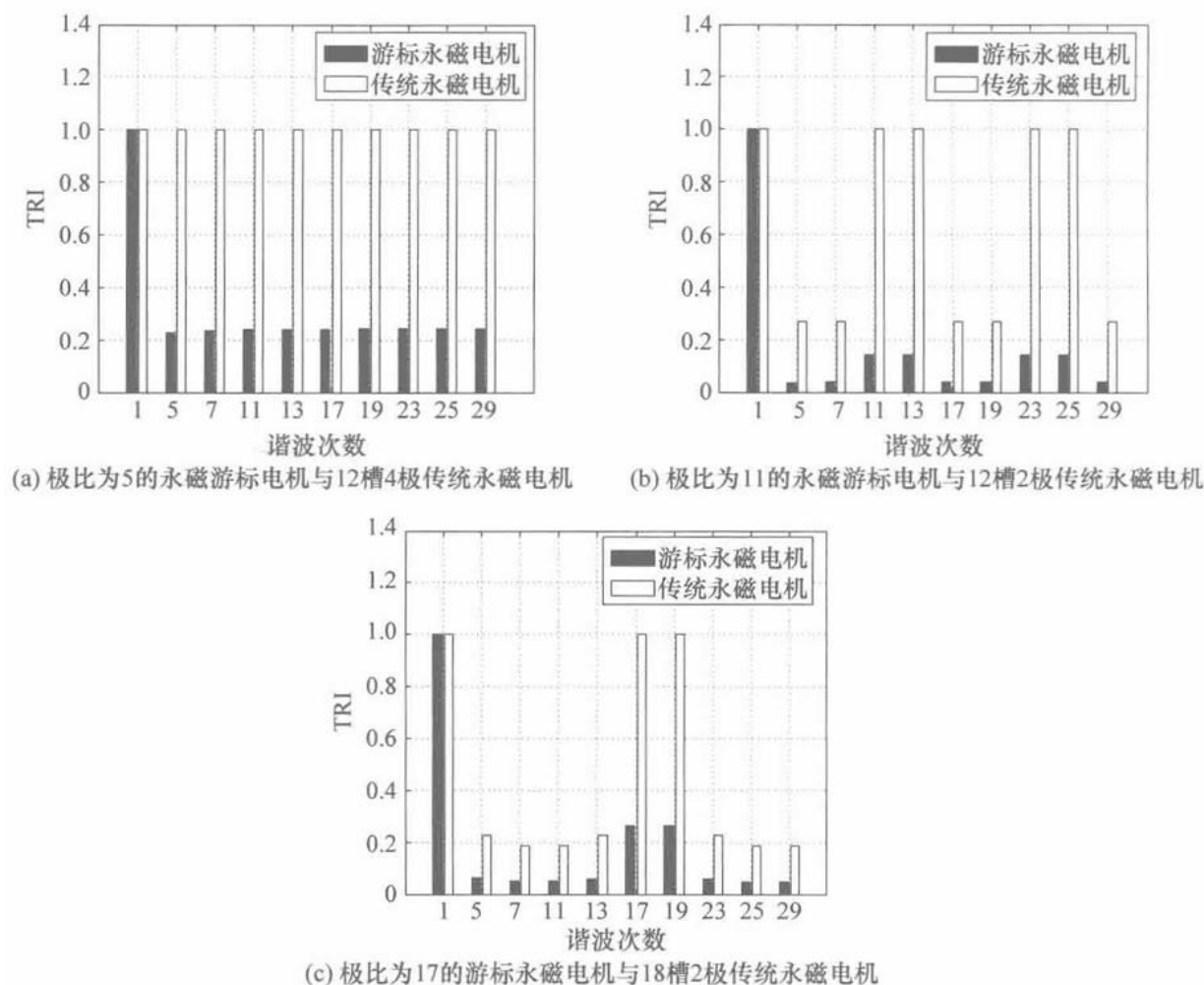
来源：《磁场调制电机的由来、发展与挑战》，国金证券研究所

转矩波动是电机的关键指标之一，关乎电机转速稳定性、定位精度、动态控制性能等。转矩波动主要由励磁转矩波动、齿槽转矩波动和磁阻转矩波动构成。

励磁转矩波动可直接借助空载反电势计算，转矩波动指标（torque ripple index, TRI）可用于快速比较不同极比游标永磁电机的转矩波动，其物理意义为反电势谐波与基波的比值，TRI 越小转矩波动越小。以游标永磁电机为例，其同时空载反电势基波中包含两个主要成分，但谐波反电势只有一个主要成分，因此其 TRI 值必然显著低于常规永磁电机。随着极比增加，基波反电势中的调制分量占比提升，使得 TRI 值随极比升高而下降，励磁转矩波动减小。



图表20：不同极比的游标永磁电机转矩波动指标（TRI）对比



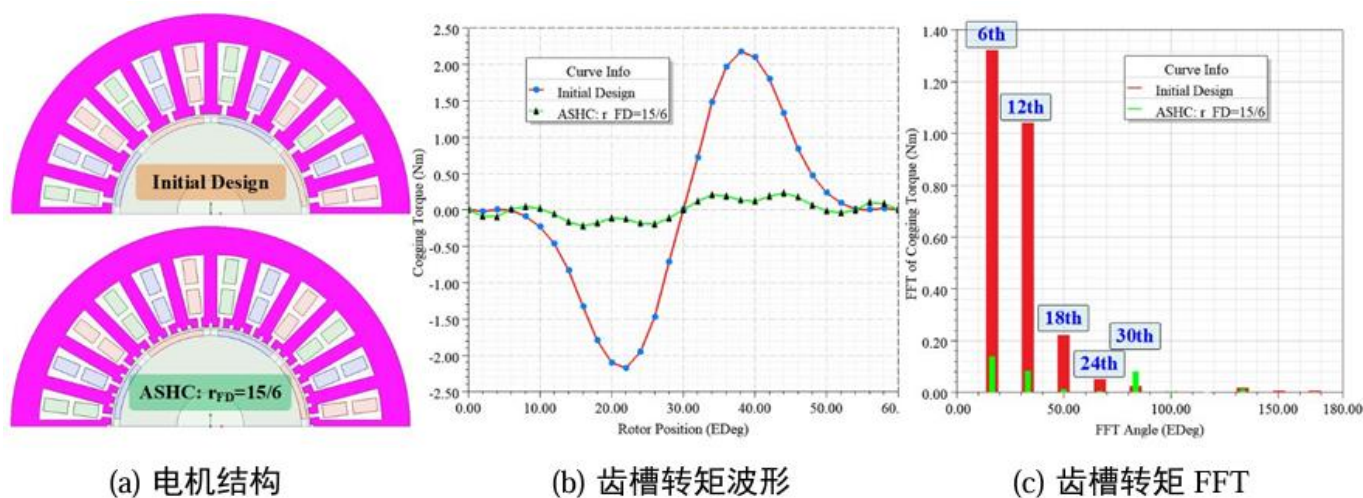
来源：《磁场调制电机》，国金证券研究所

电机的齿槽转矩可以视为空载时内部磁场储能的变化所引起。根据《电工术语-旋转电机》定义：齿槽转矩（Cogging Torque）是无供电的永磁电动机由于其转子和定子有自行调整至磁阻最小位置的趋势而产生的周期性转矩。齿槽转矩是永磁电机固然存在的非理想转矩，它是转矩脉动的一部分，并会引起电机的非必要振动、噪声等问题。齿槽转矩在一个自身转矩周期内正负对称分布，故净合成值为零，因此它难以被利用，在工程与研究上总是想办法将其削弱。

谐波磁场的磁路设计可以大幅改善传统永磁电机齿槽转矩脉动过大的问题。以8极24槽的永磁电机为例，由于其整数槽集中绕组结构，转子磁动势的5次和7次谐波参与齿槽转矩产生，因此有较大的齿槽转矩，初始设计方案的齿槽转矩达到最大值2.17Nm。通过谐波磁场磁路优化设计，仿真结果显示其齿槽转矩可有效减少约89.5%。



图表21：优化前后电机结构与齿槽转矩对比



来源：《永磁同步电机的谐波作用模型与转矩优化研究》，国金证券研究所

磁场调制电机的转子有三种，即表贴式永磁转子、内置式永磁转子和凸极磁阻转子。谐波磁场电机采用表贴式结构时磁阻转矩恒为零，采用内置式结构时高极比下磁阻转矩波动亦较小；永磁磁通反向电机由于等效气隙大磁阻转矩波动同样可忽略；仅永磁开关磁链电机在特定极槽配合下可能产生较大的磁阻转矩波动。

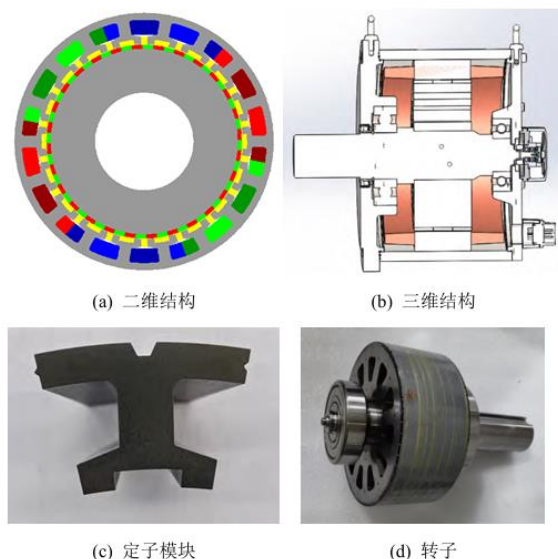
2.3 谐波磁场电机应用领域：工业场景已有应用，机器人关节和灵巧手具备潜力

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22：谐波磁场工业应用：直驱式锻压伺服电机



图表23：电机主要性能对比

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

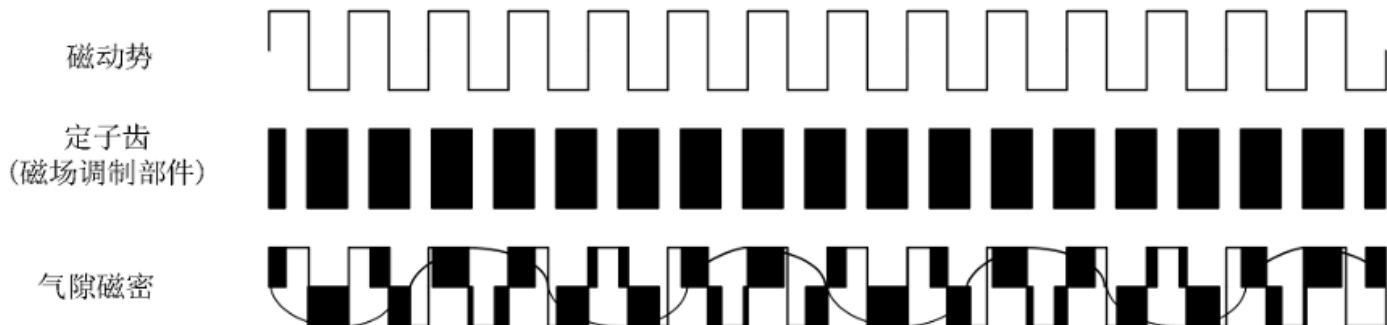
来源：《电机气隙磁场调制统一理论研究进展与展望》，国金证券研究所

同时，国内龙头电机公司已拥有一系列基于调制磁场电机原理的谐波磁场设计专利，通过磁路设计实现功率密度跃迁。



其调制磁场电机的原理为：A. 无论作为 BLDC 控制或 PMSM 控制，电机转子转动的必要条件是定子绕组在电机气隙中产生的磁场极对数与转子磁体极对数相等；B. 定子绕组通电后，在电机气隙中产生基波磁动势，在定子齿槽磁导的作用下，沿气隙空间分布一系列的调制磁场；C. 当特定的气隙谐波磁场的极对数等于转子磁体极对数 P_r 时，则会输出稳定的电磁力矩。

图表24：磁场调制过程示意图

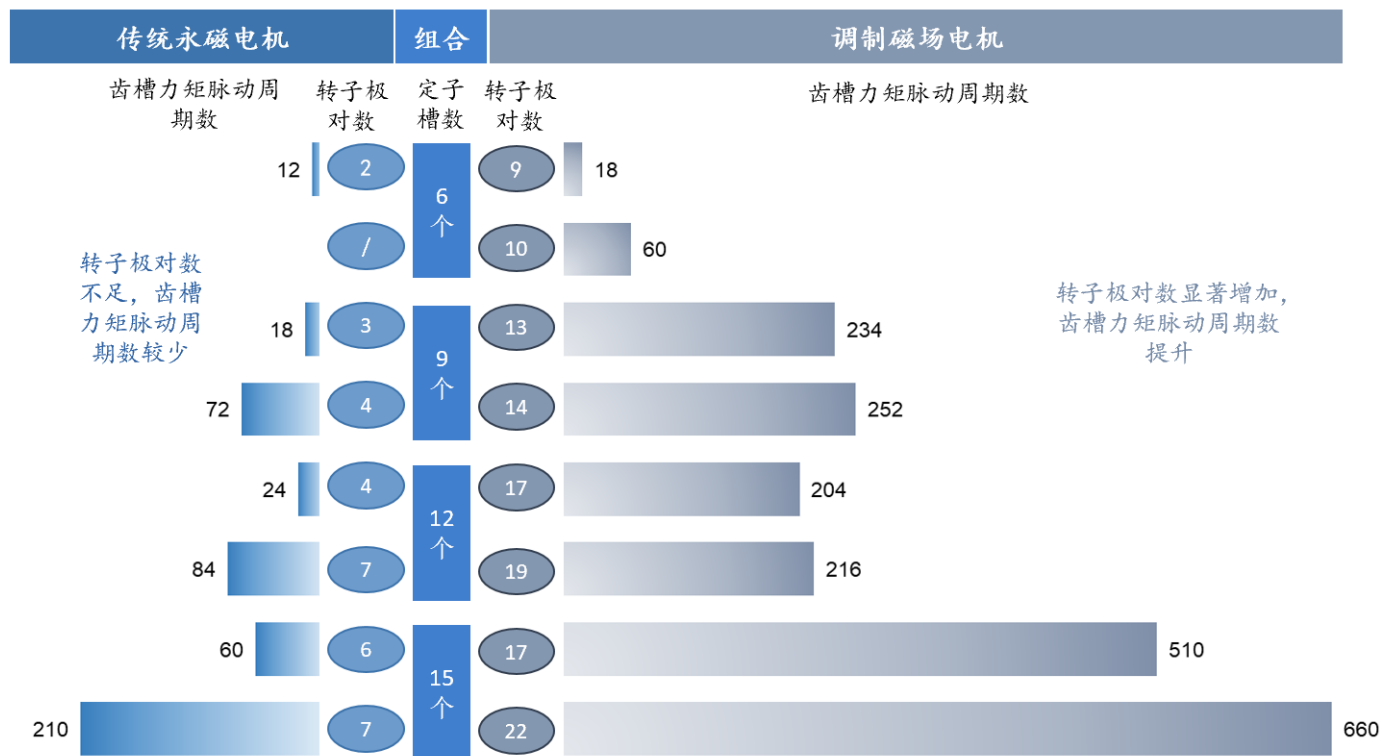


来源：《FCFMPM 调磁电机的优化设计及其控制策略的研究》，国金证券研究所

基本上气隙磁场幅值与气隙值成反比，故减少电机定子和转子间的气隙值对功率体积密度提升效果明显。但由于齿槽力矩幅值与气隙磁场幅值的平方成正比，故缩小电机气隙值会使得电机齿槽力矩脉动显著增加，导致电机振动噪音也显著增加在维持固定的电机气隙值条件下，理论研究表明，降低电机齿槽力矩脉动的有效方法是增大电机齿槽力矩波动周期数，其中，波动周期数等于定子槽数和转子磁体极数的最小公倍数。

基于谐波磁场设计的调制磁场电机在定子槽数相同的情况下，调制磁场电机与传统永磁电机相比，调制磁场电机的齿槽力矩波动周期数增加趋势明显，因此，其能大大降低电机齿槽力矩脉动幅值，从而提升永磁电机功率体积密度。

图表25：调制磁场电机和传统电机在相同定子槽数条件下的波动周期数对比



来源：《一种调制磁场电机发明专利》，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了一倍以上。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。

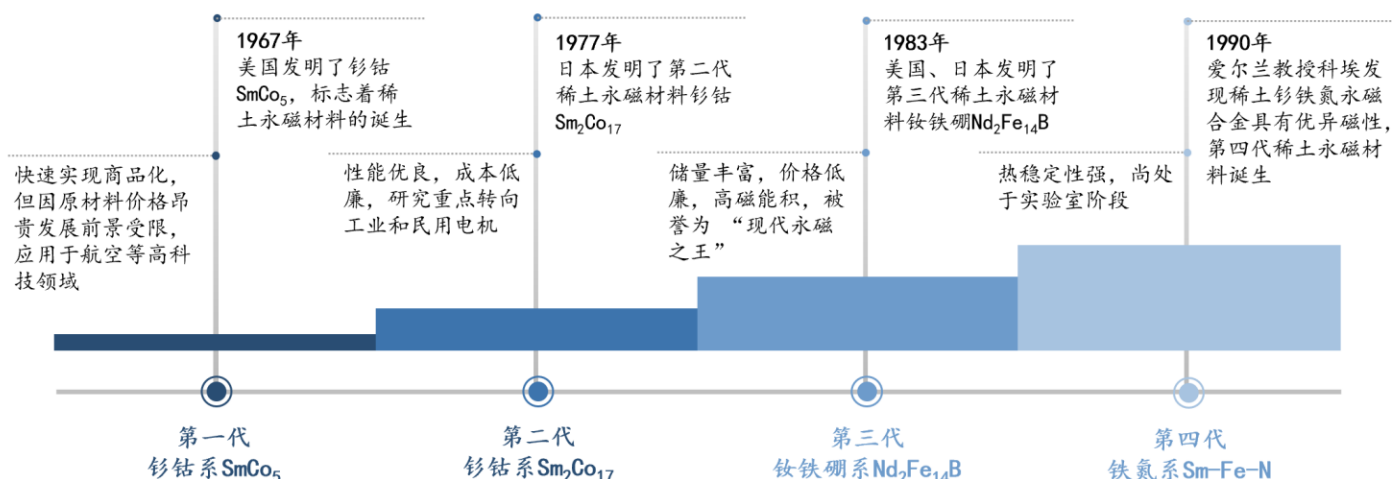
三、谐波磁场电机放量叠加工艺进步，钕铁氮供需边际加速

3.1 高温性能优异+成本优势显著，钕铁氮应用广阔

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。自 20 世纪 60 年代以来，稀土永磁材料经过了三次迭代。

- 第一代钕钴永磁（ SmCo_5 ）系材料，于 1967 年在美国发明，标志着稀土永磁材料的诞生。该产品虽然快速实现了商品化，但由于含较多战略金属钴和储量较少的稀土金属钕，原材料价格过于昂贵，导致发展前景受限，主要应用于航空航天等高科技领域。
- 第二代钕钴永磁（ $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ ）系磁体于 1977 年在日本发明。相比于第一代钕钴永磁，第二代具有优良的磁稳定性、高温磁性能、高抗氧化及抗腐蚀性，推动稀土永磁的研究向工业、民用领域转移。
- 第三代钕铁硼系（ $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ）材料，开发与 1983 年。钕铁硼永磁被誉为“现代永磁之王”，该材料具有卓越性能与超高磁能积，同时以储量丰富、成本低廉的铁和钕，替代了昂贵的钴资源与稀缺的钕元素，推动永磁材料快速实现商业化。
- 第四代稀土铁氮系（ Sm-Fe-N ）材料，该材料由爱尔兰教授科埃于 1990 年发现。钕铁氮是第四代稀土永磁的典型代表，热稳定性强且价格低廉，但目前仍在实验室阶段，距离量产仍有一定距离。

图表26：稀土永磁材料发展历史



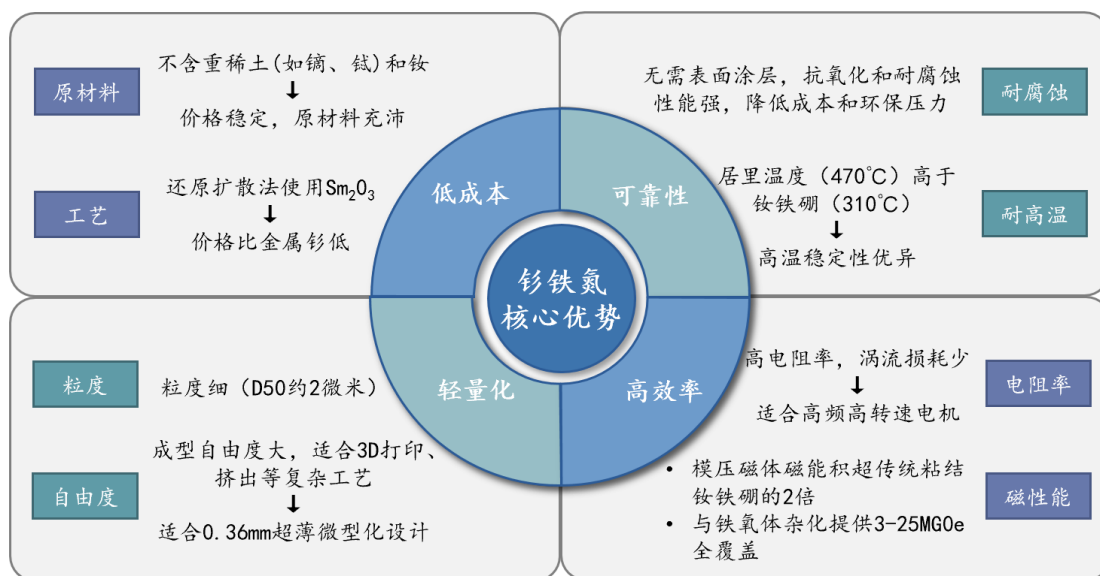
来源：《稀土永磁材料在电机中的应用及永磁电机的发展趋势》、磁性材料与应用产业链公众号、天和磁材公告、正海磁材公告、沈阳弗仕德官网、宁夏君磁官网、材料工程公众号、国金证券研究所

第四代稀土永磁材料——钕铁氮永磁材料，主要以钕（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，钕铁氮永磁材料完全不含镨、铈等重稀土和钕，避免了钕价波动和重稀土短缺的问题。从工艺来看，钕铁氮还原扩散法使用 Sm_2O_3 ，其价格较金属钕低一个数量级
- 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，而钕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，钕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：虽然钕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，钕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。同时钕铁氮具有较高电阻率，能够减少涡流损耗，更适合高频高速电机。
- 轻量化：钕铁氮粒度较细，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27：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 $0.65\text{--}1.5\text{T}$ ，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 $100\text{--}300$ 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 $350\text{--}500^\circ\text{C}$ ，与钕铁硼相比具有更好的热稳定性，适用于军工、航天、高温电机等多应用场景。

图表28：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 ($^\circ\text{C}$)	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	品、各类电机及器产品、民用吸附用途、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

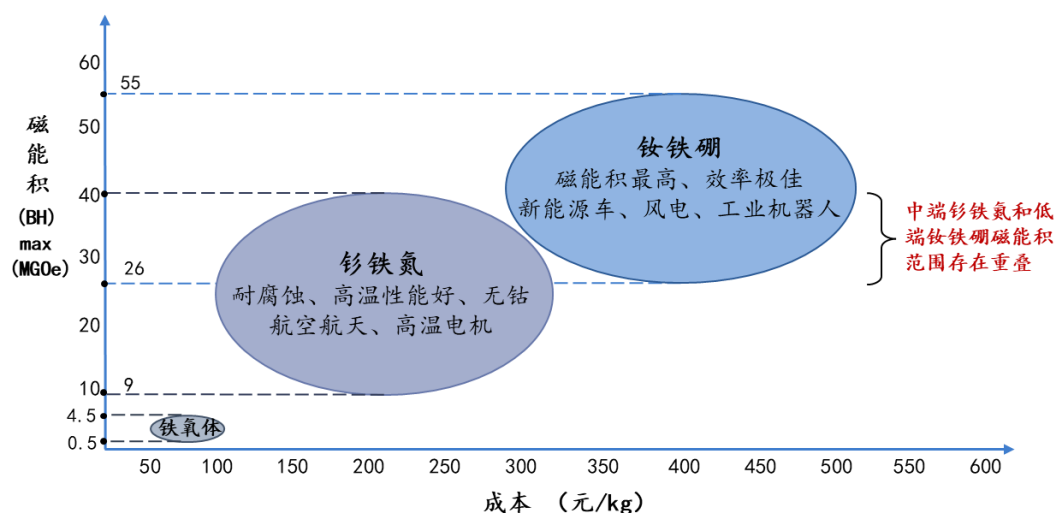


材料类型	最大磁能积 (KJ/m³)	矫顽力 (KA/m)	剩磁 (T)	居里温度 (°C)	优势	劣势	下游应用
钕铁硼	26-55	478-1035	0.65-1.5	470 左右	耐腐蚀、高温性能好、不依赖稀土资源	量产工艺不成熟、稳定性待提升	包括风力发电、新能源汽车、工业机器人和航空航天

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29：中端钐铁氮和钕铁硼低端最大磁能积范围有重合



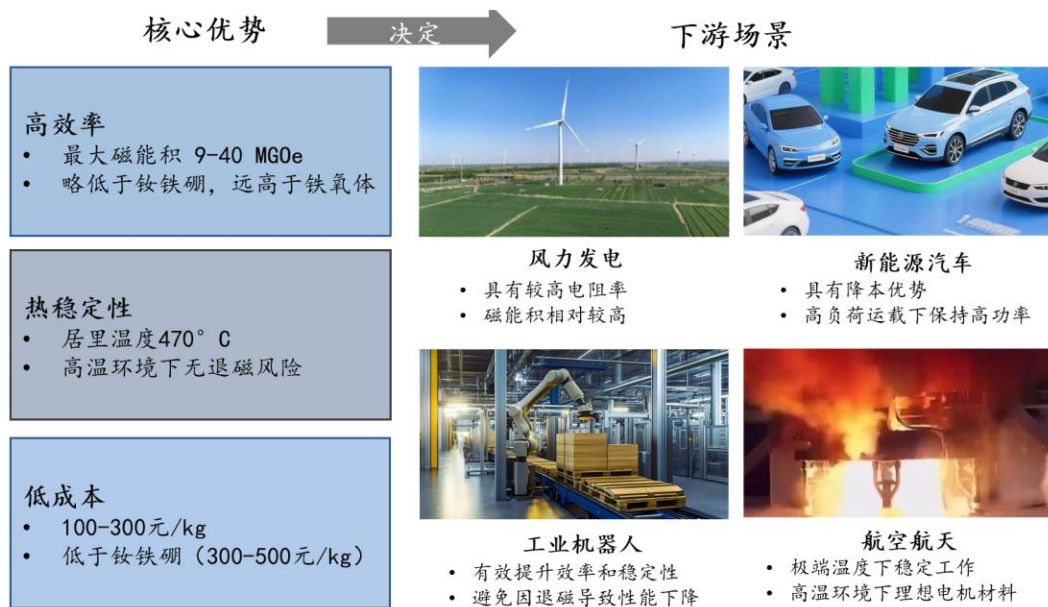
来源：中华人民共和国国家标准、中国有色网、新莱福公告、卡瑞奇官网、宁波力优官网、新莱福公告，国金证券研究所

钐铁氮永磁材料在电机领域展现出广阔的应用潜力，符合当前新能源汽车、工业机器人和风力发电等领域对电机性能要求愈发严苛的趋势。

- **风力发电：**风能虽然储量大、分布广，但其能量密度低（只有水能的 1/800），并且不稳定，因此需要高效电机，将其转化为机械能、电能和热能等。钐铁氮永磁材料具有较高的磁能积和电阻率，在风力发电电机领域的应用展现出了广泛的潜力。
- **新能源汽车：**电动汽车对电机性能的要求日益提高。钐铁氮永磁材料凭借优异的高温磁稳定性，能够提升新能源汽车电机性能。其高温下保持强磁性的特性，使电机在持续高负载运行时仍能维持高功率输出，从而增强续航能力与运行效率。
- **工业机器人：**为满足高精度、高速度操作要求，工业机器人用驱动电机需具备高效、高稳定性的特点。相比传统钕铁硼材料，钐铁氮永磁材料在高温环境下仍能保持优异磁稳定性，确保电机高效、精准运行，从而增强机器人作业的可靠性和稳定性。
- **航空航天：**在航空航天、国防和高温工业等特殊领域，电机需具有极端温度下工作的特性。钐铁氮永磁材料凭借卓越的高温磁稳定性，成为极端温度环境下电机应用的理想选择。相比钕铁硼材料，它在高温工况中表现出更优异的抗退磁能力，为航空航天、国防及高温工业等特殊领域提供了更可靠的永磁解决方案。



图表30：钕铁氮下游场景包括风力发电、新能源汽车、工业机器人和航空航天等

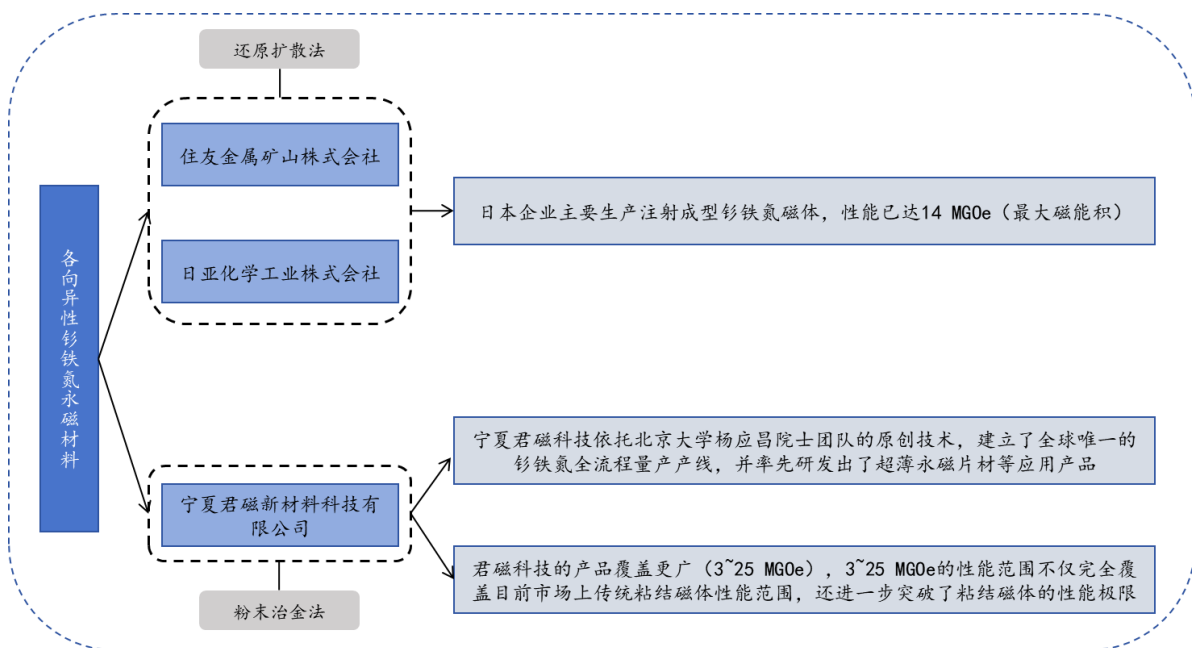


来源：磁性材料与应用产业链公众号、国家能源局、中国汽车报公众号、制造前沿公众号、央视新闻、中华人民共和国国家标准、新莱福公告、电知网公众号、国金证券研究所

尽管钕铁氮具有低成本、原材料资源充足、热稳定性高等优势，但目前产业化开发和应用尚处于初始阶段，制约其产业化发展的主要原因包括：（1）钕铁氮理论磁性能潜力尚未被完全挖掘。钕铁氮的各向异性场是 21T（钕铁硼是 9T），理论上最大磁能积在 60MGOe 以上，而目前其粘结磁粉最高性能仅在 40MGOe 左右，且稀土铁氮烧结磁体尚处于开发过程中。（2）钕铁氮生产效率有待提升。钕铁氮成型技术和生产装备制约了其规模化量产。（3）钕铁氮产业化应用开发尚处于初期，缺乏对下游应用场景的探索和实践检验。

近年来，钕铁氮永磁材料在技术研发和产业化方面取得了显著进展，但仍处于商业化应用的早期阶段。全球仅三家企业实现规模化量产，包括日本住友金属矿山、日亚化学（采用还原扩散法）和中国宁夏君磁科技（采用粉末冶金法）。新莱福等企业已成功开发出高性能钕铁氮磁粉，其矫顽力和磁性能达到较高水平，能够满足电机等高温应用场景的需求。这突破了早期钕铁氮磁粉在注塑后矫顽力下降，导致使用温度局限在 80℃ 以下的限制，使其可覆盖更广泛的应用领域。

图表31：钕铁氮永磁材料的产业化进展



来源：《重塑“粘结磁”的概念各向异性稀土铁氮(钕铁氮 钕铁氮)永磁材料产业化新进展》、中华人民共和国国家标准、华兴时报公众号、国金证券研究所

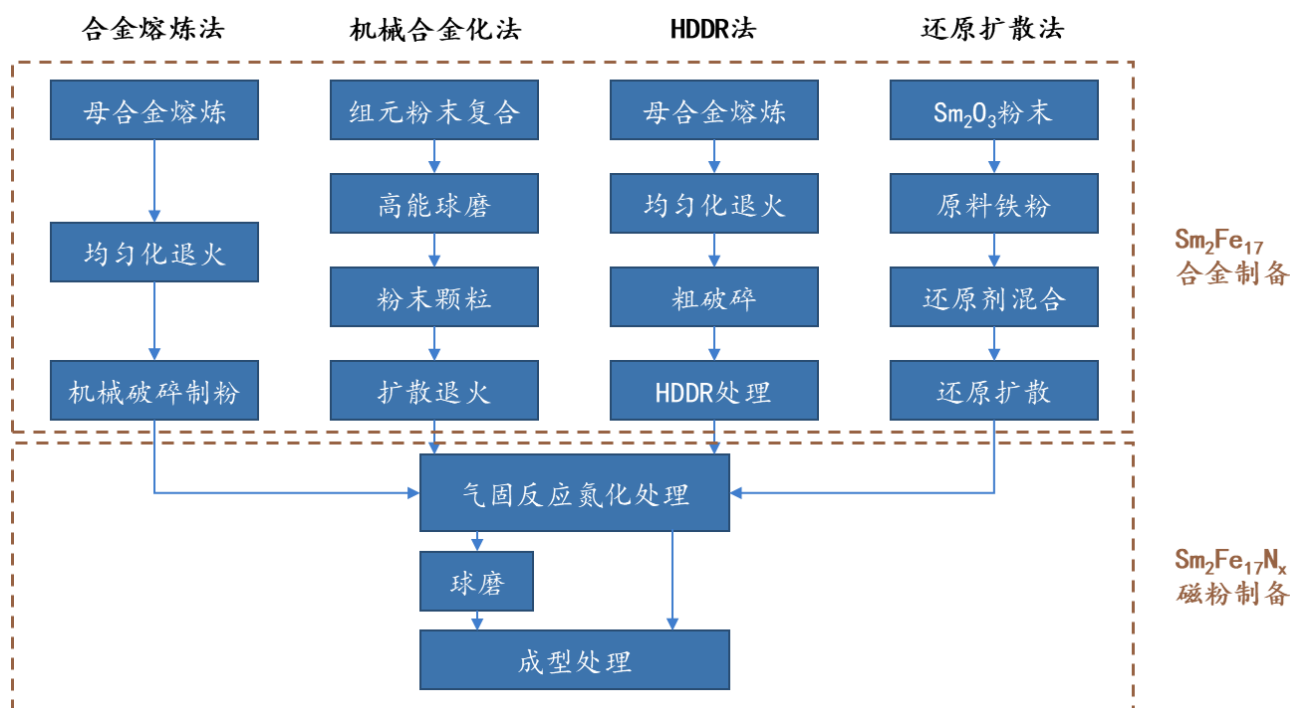


3.2 供给边际：制备、成形工艺进步拓宽钕铁氮应用边界

当前，制备钕铁氮永磁材料主要有四种方法：合金熔炼法、机械合金化法、HDDR 和还原扩散法。

- 合金熔炼法：合金熔炼法是制备钕铁氮磁粉的常规方法，其主要流程包括熔炼、热处理、破碎制粉和氮化处理。由于 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$ 相是通过固相 Fe 与富含 Sm 的液相发生包晶反应而获得的，因此易出现富钕相 SmFe_2 和 SmFe_3 ，以及 α -Fe 等杂质相。
- 机械合金化法：机械合金化的流程包括合金配比、机械磨粉、热处理和氮化处理。该方法设备需求少、工艺简单，但生产效率较低，且合金粉末在转移过程中易氧化。
- HDDR（氢化-歧化-脱氢-再化合）法：HDDR 法制备钕铁氮磁粉的工艺过程为：首先熔炼钕铁母合金，经热处理获得单一 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$ 相，破碎后在氢气中歧化处理，随后抽真空脱氢并通入氮气进行氮化。该方法设备简单，生产材料均匀性好、含氧量低、收得率高，但反应机理复杂，氮化效率较低。
- 还原扩散法：还原扩散法以 Sm_2O_3 、Fe 和 Ca 粉末为原料，通过机械混合后热处理，利用 Ca 还原 Sm_2O_3 ，并使 Sm 扩散至 Fe 中形成 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$ 。该方法原料成本低，是目前商业生产的主要方法。但在该工艺中，需要对烧结长大的 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$ 进行破碎处理，增加了工艺复杂度且易发生氧化。

图表32：制备钕铁氮永磁材料的方法有合金熔炼法、机械合金化法、HDDR 和还原扩散法

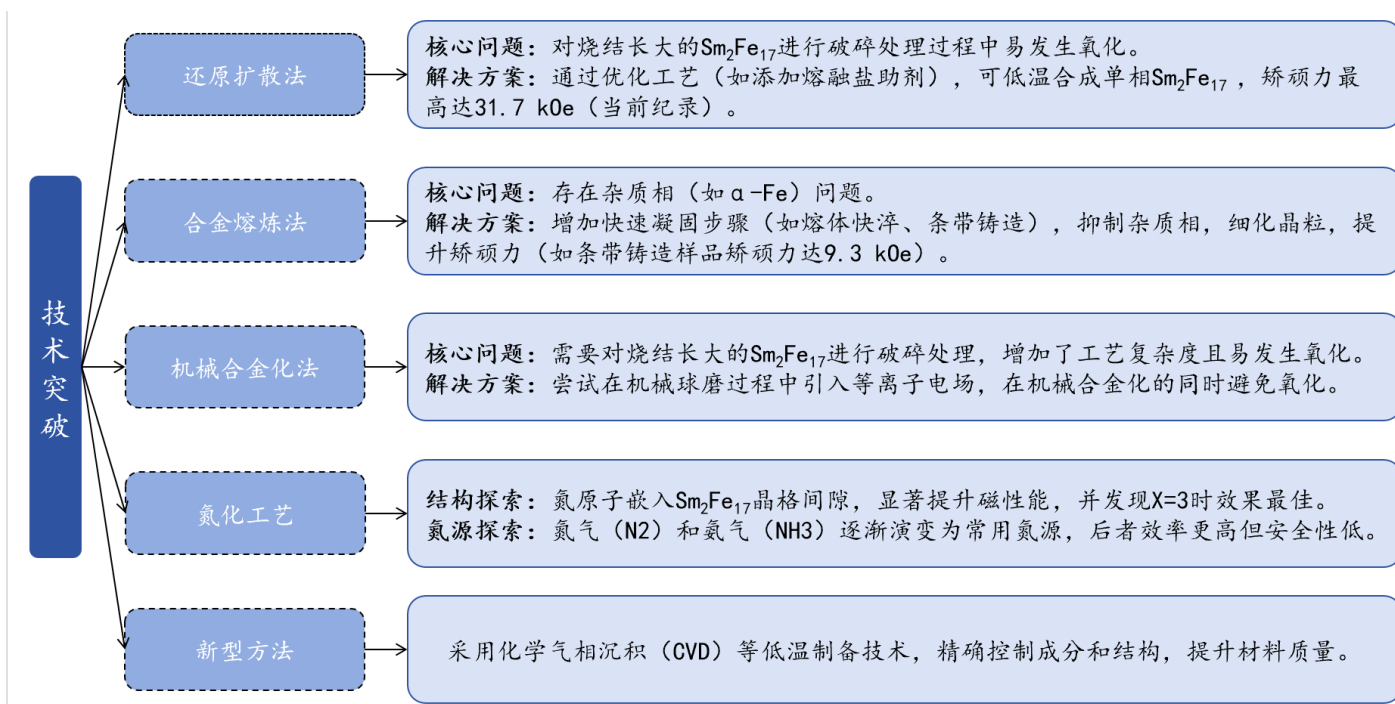


来源：《各向异性钕铁氮永磁材料制备技术进展》、《用热压法制备钕铁氮块体及性能优化方法》，国金证券研究所

针对以上方法出现的问题，近年来学界和业界提出了相应改进措施。针对还原扩散方法易导致 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$ 氧化的问题，研究者们尝试添加 CaCl_2 、 LiCl 、 Li-Ca 合金等熔融盐作为反应助剂，发现添加适当的熔融盐使得在低工艺温度下通过还原扩散反应合成 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$ 成为可能。针对合金熔炼法杂质相较多问题，研究者通过利用熔体快淬和条带铸造技术进行快速凝固，有效抑制 α -Fe 相的生成，且有利于细化晶粒。针对机械合金化方法在转移合金粉末过程中易氧化的问题，学者在机械球磨过程中引入等离子电场，虽导致氮化后矫顽力相对较低，但给解决易氧化问题提供了新思路。另外，在氮化工艺领域，研究者对氮含量和氮源进行了分析，发现氮含量为 3 时磁性能最优，并逐步筛选氮气和氨气为主要氮源。在新工艺方法领域，研究者发明了化学气相沉积（CVD）等低温制备技术，能够精确控制成分和结构，提升材料质量。



图表33：各界针对制备钕铁氮永磁材料过程中的问题提出改进措施



来源：《用热压法制备钕铁氮块体及性能优化方法》、《稀土永磁纳米材料的制备及其研究进展》，国金证券研究所

成型工艺是钕铁氮加工的另一难点所在。钕铁氮（ SmFeN ）磁体目前主要有两种成型技术路线：烧结磁体和烧结磁体。

- 烧结型钕铁氮磁体：烧结工艺的难点在于，致密度是制约磁体性能进一步提升的主要因素，为提高磁体密度需要较高的成型压力或烧结温度，常导致磁体的矫顽力剧烈下降。而且，钕铁氮在 600°C 左右会分解为 SmN 、 $\alpha\text{-Fe}$ 和 N_2 ，导致永磁性能消失。所以目前烧结技术还在研发阶段。
- 粘结型钕铁氮磁体：局限在于粘结型磁体性能较差。粘结型钕铁氮磁体虽已商业化，但磁性能较低，矫顽力下降较多，长期使用温度被局限在 80°C 以内，且力学性能较弱，在高应力或高温环境下易失效。

基于以上成型工艺劣势，当前已衍生出低温成型工艺和低熔点金属粘接剂辅助成型方法。其中低温成型工艺包括爆炸固结法、压缩剪切法、热等静压法（HIP）和放电等离子体烧结（SPS），低熔点金属粘接剂辅助成型工艺包括 Zn 粘接和 Sm 基合金粘接。两类改进成型方法有效解决了氮高温易分解，磁性能低等问题，为钕铁氮量产提供了技术支持。

图表34：两类改进成型方法有效突破了钕铁氮生产技术瓶颈

类别	方法	原理	优势	劣势
低温成型工艺	爆炸固结法	利用炸药爆炸产生的冲击力使粉体颗粒瞬间结合，实现高致密度	（1）密度高：压力可达28GPa，实现密度>95%。 （2）固结快：微秒级固结时间避免高温长时间暴露。 （3）适用广：适用于亚稳态材料，可制备密度 $7.47\text{g}/\text{cm}^3$ 的大块磁体。	（1）矫顽力低：高压冲击导致 $\alpha\text{-Fe}$ 相生成，矫顽力显著下降。 （2）质量低：压力分布不均匀，磁体易出现裂纹或密度梯度。 （3）设备复杂：安全性要求高，生产难度大。 （4）形状限制：仅适合简单几何形状。
	压缩剪切法	通过剪切应力填充颗粒间隙，提高密度	（1）室温操作，完全避免热分解风险。 （2）矫顽力高：剪切应力细化颗粒至纳米级，矫顽力可达875.6 kA/m。 （3）磁能积高：磁能积可达226.86 kJ/m ³ ，密度可达 $7.44\text{g}/\text{cm}^3$ 。	（1）厚度受限：仅能制备薄片状磁体，无法满足三维器件需求。 （2）生产难度大：剪切应力控制难度大，磁体均匀性依赖工艺精度。
	热等静压法	惰性气体均匀传递压	（1）自由度高：各向同性压力，适合复杂异形件致密化。	（1）易分解：长周期热暴露加剧材料分解。



类别	方法	原理	优势	劣势
	(HIP)	力，低温致密化。	(2) 密度高：结合 Zn 等金属粘接剂可实现 90% 相对密度。	(2) 剩磁低：Zn 粘接剂导致剩磁下降。 (3) 成本高：包套工艺复杂，真空度要求高，成本高昂。
	放电等离子体烧结 (SPS)	脉冲电流活化颗粒表面，低温快速烧结	(1) 升温快：分钟级升温速度，局部等离子体活化颗粒表面。 (2) 剩磁高：可结合磁场辅助技术提升取向度，剩磁可提高至 0.98T。 (3) 密度高：动态压力进一步优化密度，理论密度>90%。	(1) 矫顽力低：矫顽力易受界面氧化还原反应影响。 (2) 成本高：低氧环境要求苛刻，粉体预处理复杂。 设备成本高，大尺寸磁体制备困难。
低熔点金属粘接剂辅助成型	Zn 粘接	采用低熔点金属 Zn 作粘接剂并结合低温成型工艺	(1) 矫顽力高：Zn 包覆消除表面缺陷，抑制反向磁畴形核，可提高矫顽力至 2646.7 kA/m。 (2) 不易分解：400 - 450℃ 低温成型减少主相分解。	(1) 剩磁低：Zn 稀释磁性相，剩磁下降。 (2) Zn 氧化 (ZnO) 抑制 Zn-Fe 相生成，削弱矫顽力提升效果。
	Sm 基合金粘接	采用 Sm 基合金作粘接剂并结合低温成型工艺	(1) 不易氧化：Sm 活性高，还原表面氧化物，抑制 α -Fe 生成。 (2) 矫顽力高：润湿性优于 Zn，减少界面缺陷，矫顽力>819 kA/m。	(1) 温度高：Sm-Fe-Cu-Al/Sm-Cu 合金熔点约 495℃，仍需较高烧结温度。 (2) 成本高：成本高昂，工艺开发不成熟。

来源：《各向异性钕铁硼永磁材料制备技术进展》、《浅析钕铁硼稀土永磁材料的制备方法》、《钕铁硼磁体制备及性能》、《高密度块状钕铁硼磁体制备的研究进展》，

国金证券研究所

3.3 需求边际：谐波磁场电机进一步打开钕铁氮渗透率空间

钕铁硼仍是当前应用最多的稀土永磁材料。烧结钕铁硼和粘结钕铁硼生产总量占每年稀土永磁材料的 98% 以上。在下游场景方面，国内稀土永磁材料主要应用于新能源汽车 (19.8%)、风力发电 (15%)、节能电梯 (14.6%) 和工业机器人 (8.72%) 等领域，其中大部分场景磁能积需求低于 40MGOe，理论上当前钕铁氮永磁材料已可满足其性能要求。谐波磁场电机的磁路设计使得电机能量利用效率和功率密度提升，故而对磁体的磁能积要求边际降低，钕铁氮替代钕铁硼永磁材料的空间将进一步打开。

- 新能源汽车：新能源汽车用永磁材料磁能积要求为 33-41MGOe，钕铁氮理论可替代率有望达到 80%。根据 IEA 预测，2030 年国内新能源车销量将超 2100 万辆，2024-2030 年销量 CAGR 约 10%，预计新能源汽车对永磁材料需求将同频增长。由于钕铁氮量产预期尚不明确，假设 2030 年钕铁氮材料渗透率达到 30%，则 2030 年新能源汽车用钕铁氮材料需求量约 2.05 吨，2025-2030 年复合增长率 CAGR 为 57.41%。
- 风力发电：风力发电对永磁材料磁能积要求在 37MGOe 以上。由于要求较高，预计钕铁氮在未发生技术突破的情况可替代率较低。假设钕铁氮需求增长率与近五年我国风电行业新增装机量增速 (约 10%) 相当，则 2030 年风电用钕铁氮材料需求量约 0.52 吨，2025-2030 年复合增长率 CAGR 为 74.34%。
- 节能电梯：节能电梯对永磁材料磁能积要求相对较低，钕铁氮理论可替代率有望达到 90%。假设未来节能电梯稀土永磁材料需求量增长率与我国电梯产量增长率相当 (约 3%)，2030 年渗透率达到 40%，则 2030 年节能电梯用钕铁氮材料需求量约 1.36 吨，2025-2030 年复合增长率 CAGR 为 87.52%。
- 工业机器人：由于工业机器人电机对功率密度要求低于新能源汽车，钕铁氮替代率有望达到 90%。参考近五年工业机器人产量年复合增速 25%，假设工业机器人用稀土材料增速同频变化，2030 年渗透率达到 40%，则 2030 年工业机器人用钕铁氮材料需求量约 2.59 吨，2025-2030 年复合增长率 CAGR 为 127.57%。

根据上述假设，预计 2025 和 2030 年钕铁氮总需求量分别为 0.53 万吨和 9.42 万吨，按照每吨价格计算，则市场空间分别为 6.83 亿元和 122.44 亿元。

图表35：预计五年内国内钕铁氮永磁稀土市场空间可达百亿

领域	指标	2025 年	2030 年
新能源汽车	稀土永磁材料使用量 (万吨)	4.25	6.84
	渗透率	5%	30%
	钕铁氮需求量 (万吨)	0.25	2.05
风力发电	稀土永磁材料使用量 (万吨)	3.22	5.18
	渗透率	1%	10%
	钕铁氮需求量 (万吨)	0.03	0.52



领域	指标	2025 年	2030 年
节能电梯	稀土永磁材料使用量（万吨）	2.93	3.40
	渗透率	2%	40%
	钕铁氮需求量（万吨）	0.06	1.36
工业机器人	稀土永磁材料使用量（万吨）	2.13	6.49
	渗透率	2%	40%
	钕铁氮需求量（万吨）	0.04	2.59
其他领域	稀土永磁材料使用量（万吨）	8.98	14.47
	渗透率	2%	20%
	钕铁氮需求量（万吨）	0.18	2.89
总计	钕铁氮需求量（万吨）	0.53	9.42
	钕铁氮渗透率	2%	26%
	钕铁氮市场空间（亿元）	6.83	122.44

来源：英思特公告、天和磁材公告、新莱福公告、中商情报网公众号、中商产业研究院、观研天下、北检检验技术研究院、中华人民共和国国家标准、浙江省科技创新云服务平台、国家统计局、iFinD、澎湃新闻、安泰科、工业机器人公众号、中国汽研海外事业部公众号、IEA，国金证券研究所

除传统稀土永磁材料下游应用领域外，随着机器人技术向更高性能、更紧凑设计、更广泛应用场景发展，对电机的高温性能和功率密度要求持续攀升。钕铁氮凭借其性能及成本优势，有望在未来 5-10 年内，实现对机器人电机（尤其是对高温、高功率密度、成本敏感的中高端应用）大规模替代。其普及程度将取决于其产业化速度、成本下降幅度以及与不断进步的钕铁硼（如晶界扩散技术减少重稀土用量）的竞争态势。

图表36：机器人技术演进对材料的硬性要求

机器人电机需求	机器人需求表现	市场常用材料表现	钕铁氮表现
高温稳定性	工业机器人在堵转工况下关节电机工作温度可能超 150℃（如汽车制造场景）	钕铁硼居里温度仅为 310℃，在 >120℃ 时矫顽力骤降 50% 左右，需添加重稀土（镨/钕）增稳	钕铁氮居里温度 470℃，在 150℃ 以上高温环境仍保持高磁性能，在 500℃ 热压条件下仍保持较高矫顽力（800kA/m）
高扭矩密度	协作机器人需高扭矩/体积比（如远征 A2 Max 关节峰值扭矩达 450Nm）	钕铁硼磁能积高，扭矩大，但超过最高工作温度（一般为 80-220℃）时，会出现退磁	当前各向异性钕铁氮磁粉的最大磁能积已是主流稀土粘结磁粉各向同性钕铁硼的 2 倍以上，使同等体积电机扭矩提升
高频高速运行	在高强度运动中，人形机器人电机频率须达到上千赫兹	钕铁硼电阻率 $1.4 \mu\Omega \cdot m$ ，因其低电阻率产生涡流发热	钕铁氮电阻率 $17 \mu\Omega \cdot m$ ，电阻率高，涡流损耗降低，适合高速电机
轻量化与小型化	针对人形机器人应用的空心杯电机直径通常在 13mm 及以下	钕铁硼粒度略大，D50 在 3~3.5 μm 区间	粒度细（D50 $\approx 2 \mu m$ ），可制备 0.36mm 超薄磁体，适配微型关节电机

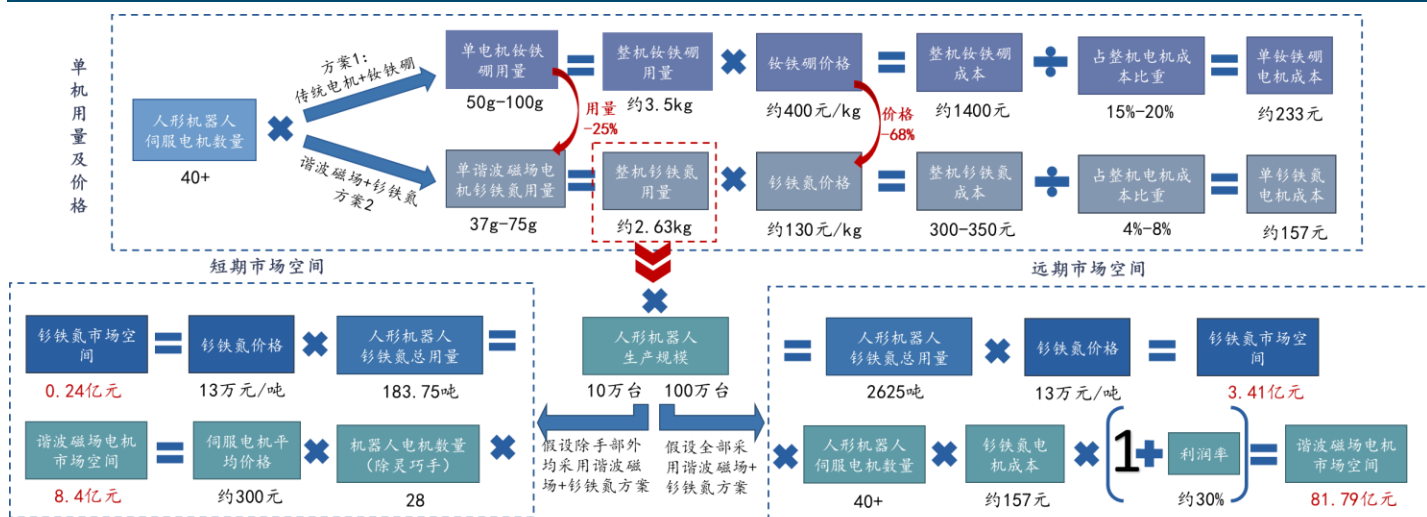
来源：香磁磁业公众号、《高性能钕铁硼磁性材料服役性能研究》、新莱福公告、智元机器人官网、《钕铁氮磁体制备及性能》、《重塑“粘结磁”的概念各向异性稀土铁氮（钕铁氮 钕铁氮）永磁材料产业化新进展》、北京人民政府官网、《烧结钕铁硼永磁材料国家标准》等，国金证券研究所

人形机器人有望为钕铁氮材料和电机带来广阔的市场空间。人形机器人全身伺服电机数量普遍在 40 以上，参考当前钕铁硼材料的用量，每个电机大约需要永磁稀土材料 50-100g，即整机需要永磁稀土材料约 3.5kg。当前钕铁硼价格为每公斤 300-600 元，若使用钕铁硼生产伺服电机，则单台成本约 1400 元，单电机成本约为 233 元。钕铁氮价格为每公斤 100-300 元，若采用钕铁氮代替钕铁硼作为伺服电机磁芯材料，则单台成本约为 340 元，单电机成本约为 157 元，具有较大的成本优势。



在材料市场方面，倘若人形机器人远期产量为 100 万台，则共需要 3500 吨永磁稀土，若全部采用钕铁氮方案，稀土用量可降低至 2625 吨。按照钕铁氮价格每吨 13 万元计算，可带来 3.41 亿市场增量。在电机市场方面，假设人形机器人生产规模为 100 万台，单台伺服电机数量为 40 个，假设全部采用钕铁氮电机方案，按照 157 元的成本和 30% 的利润率计算，预计远期人形机器人将给钕铁氮电机市场带来 82 亿元的空间。

图表37：人形机器人量产有望带来 82 亿元谐波磁场电机市场



来源：中国科技网、中国有色网、新莱福公告、NE 时代新能源公众号、iFinD、《电机气隙磁场调制统一理论研究进展与展望》、电动星球公众号、Tesla 2022 AI Day、国金证券研究所

四、投资建议

随着人形机器人对电机要求持续提升，钕铁氮永磁材料与谐波磁场电机技术的应用价值日益凸显。我们认为，新型电机技术将持续创新，产业化落地将不断加速。建议关注在钕铁氮磁材领域及磁场调制电机技术上有布局优势的相关标的，如中科三环、新莱福、万朗磁塑、美的集团、德马科技等。

图表38：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
磁场调制电机	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“谐波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

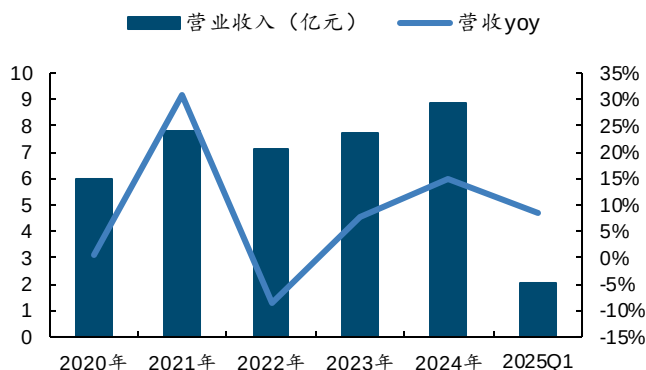
来源：各公司公告，国金证券研究所



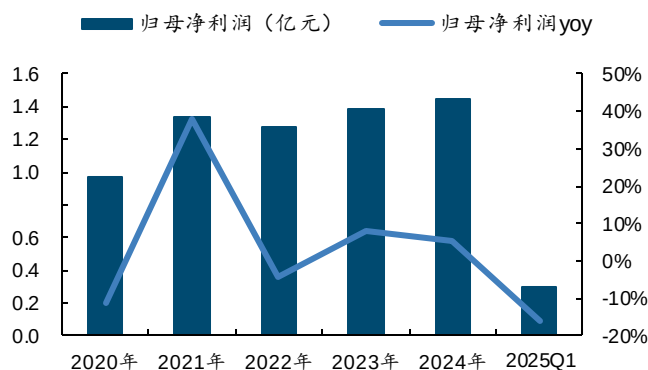
■ 新莱福

公司营业收入和归母净利润增长稳健。2024 年和 2025Q1 分别实现营收 8.86 亿元和 2.07 亿元，同比增长 14.94%和 8.59%。2024 年和 2025Q1 分别实现归母净利润 1.45 亿元和 0.30 亿元，同比增长 5.17%和下降 16.05%。公司 2022 年业绩出现较大幅度下跌，营收同比下降 8.66%，归母净利润同比下降 4.11%，主要系俄乌战争和国内消费电子需求低迷影响。2025 年 Q1 公司归母净利润同比大幅下降，主要受两方面因素影响：一是原材料价格大幅上涨、碧克工厂搬迁及 MIM 项目量产爬坡投入增加导致毛利率下滑；二是研发费用、股份支付及碧克工厂搬迁费用合计同比 2024 年第一季度增加超过 500 万元。随着原材料价格稳定，公司成本压力将逐渐缓解，有望实现业绩反弹。

图表39：公司营收稳健增长



图表40：受原材料等影响公司 2025Q1 归母净利润下跌



来源：iFinD，国金证券研究所

来源：iFinD，国金证券研究所

公司自 2014 年开展钕铁硼磁粉研究，累计研发投入超 3000 万元，已掌握关键生产技术并建成中试生产线，具备小批量产能。2023 年上市后，公司启动 1.3 亿元新型稀土永磁材料产线建设项目，计划 2028 年 10 月达成预计可使用状态。截至 2024 年底，该项目已完成投资 4728.3 万元，进度达 36.37%。

研发初期，公司产品主要应用于高吸力展览展示领域（如户外广告、车贴等）。随着钕铁硼在电机领域的应用缺陷显现，公司正转向新能源汽车电机、水泵及服务器散热系统电机等领域的研发。2025 年公司将重点突破适用于电机的高性能钕铁硼磁粉批量生产，并计划收购金南磁材，通过整合其注塑工艺体系，实现低成本铁氧体基磁材到高性能钕铁硼/钕铁硼复合材料的全谱系覆盖。

图表41：公司新型稀土永磁材料产线建设项目进度

时间	募集资金承诺 投资总额 (万元)	截至期末累计投入金额 (万元)	截至期末投资进度	项目达到预定可使用 状态日期
2023 年 12 月 31 日	13000	885.71	6.81%	2028 年 10 月
2024 年 6 月 31 日		4364.17	33.57%	
2024 年 12 月 31 日		4728.30	36.37%	

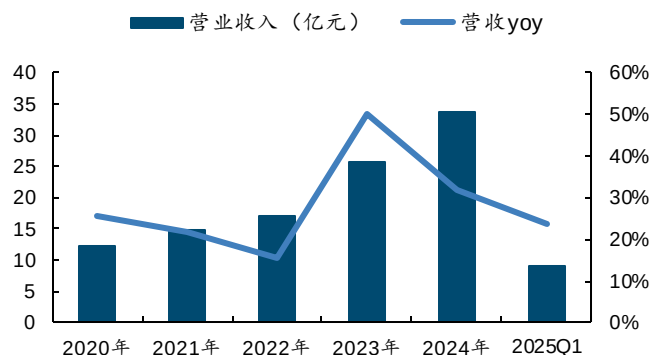
来源：新莱福公告，国金证券研究所

■ 万朗磁塑

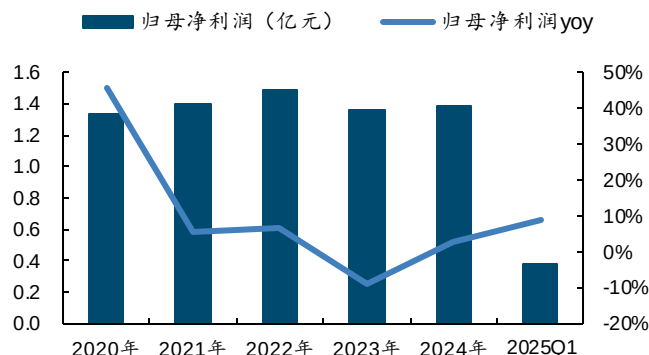
从营收端看，公司营业收入持续增长，2020-2024 年公司营业收入 CAGR 为 29.17%，2024 年和 2025Q1 分别实现营业收入 33.83 亿元和 9.09 亿元，同比提升 31.95%和 23.54%。从盈利端看，公司归母净利润保持相对平稳，2024 年和 2025Q1 公司分别实现归母净利润 1.39 亿元和 0.38 亿元，同比增长 2.62%和 8.89%。2023 年公司归母净利润出现较大幅度下降，但扣非归母净利润同比提升 1.01%，该差异主要系政府补助减少所致。



图表42：公司营业收入持续增长



图表43：公司归母净利润相对平稳



来源：iFind，国金证券研究所

来源：iFind，国金证券研究所

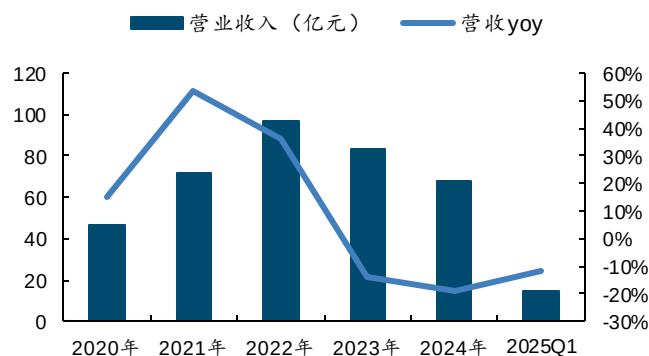
高性能永磁钕铁硼磁粉的研发与产业化是公司的重点研发项目，主要应用于冰箱门封产品。公司计划通过配方设计、熔炼钕铁合金、气流磨制粉、氮气渗氮及粘接剂压制成型等工艺，开发新型钕铁硼磁粉并实现产业化，目标磁性指标为：内禀矫顽力 (H_{cj}) $\geq 90000\text{e}$ 、剩磁 (Br) $\geq 6000\text{Gs}$ 、最大磁能积 ($(BH)_{max}$) $\geq 8\text{ MGOe}$ ，以替代钕铁硼等稀土永磁材料，降低成本并提升产品性能。

2020-2022 年，公司全资子公司合肥领远与安徽大学绿色产业创新研究院合作，共同推进钕铁硼磁粉的产业化研发。2022 年，该材料完成实验室小试并进入中试阶段。2023 年，公司调整研发中心建设募投项目，将原“新型环保 PVC 门封的开发”课题变更为“高性能永磁钕铁硼磁粉研发及产业化”等课题，预计 2026 年 1 月完成全部研发工作。

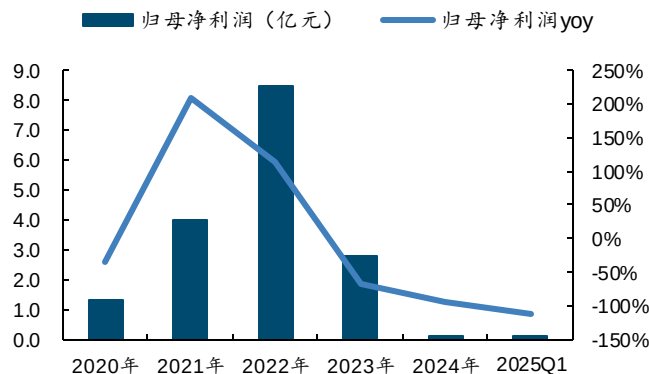
■ 中科三环

近年来公司业绩呈现较大波动。2020-2022 年营业收入和净利润持续增长，其中 2021 年归母净利润同比增长 208.44%，2022 年增长 112.56%，增速显著。但 2023 年至今业绩承压，营收和净利润持续下滑。2024 年、2025Q1 公司分别实现营收 67.51 亿元和 14.61 亿元，同比下降 19.23%、11.58%；归母净利润分别为 0.12 亿元、0.13 亿元，同比下降 95.64%、113.66%。公司业绩波动主要源于两方面：一是下游订单波动较大，公司以稀土永磁材料出口为主，受国际局势影响显著。二是上游原材料中包含价格波动剧烈的重稀土，导致产品定价及业绩随之波动。

图表44：近两年来公司营业收入出现一定幅度下降



图表45：受订单和价格影响公司归母净利润波动明显



来源：iFind，国金证券研究所

来源：iFind，国金证券研究所

中科三环作为磁材行业龙头企业，目前主营产品仍为烧结钕铁硼和粘结钕铁硼永磁材料，2024 年磁材产品成品产量达 1.06 万吨。由于钕铁硼含镨、钕等高成本重稀土元素，且重稀土供应价格波动大、产量不稳定，公司重点推进重稀土减量技术，以降低新能源汽车驱动电机、节能家电及高端电子消费等领域的产品成本。在重稀土减量技术方面，公司一方面优化制备工艺，通过晶粒细化、晶界扩散及晶界调控等技术的组合应用，深入研究矫顽力提升机制，开发低/无重稀土高矫顽力磁体制备方法。另一方面，公司积极探索替代材料，自 20 世纪 90 年代起持续研发钕铁氮、钕铁氮类永磁材料。目前，公司钕铁氮材料尚未大规模推广的核心瓶颈在于生产成本。受制备工艺限制，钕铁氮成本未能显著低于粘结钕铁硼磁体，因此应用范围仍有限。

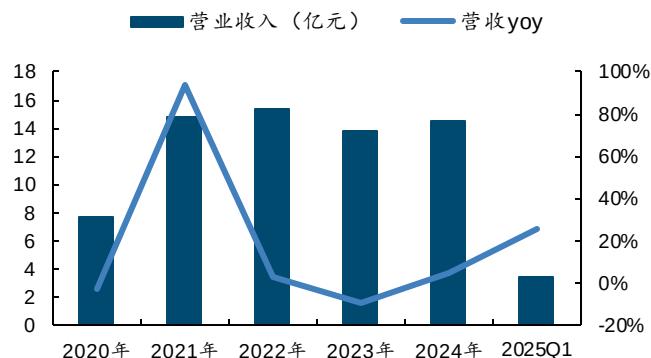
■ 德马科技

近年来，公司营业收入呈现波动趋势，归母净利润保持持续增长。从营收端看，公司 2024 年和 2025Q1 分别实现营业收入 14.57 亿元和 3.51 亿元，同比增长 5.29%、25.55%。2023 年公司营业收入下降幅度较大，同比下降 9.51%，主要系宏观环境经济下行影响。从盈利端看，近五年来公司保持归母净利润增长态势，2024 年和 2025Q1 分别实现归母净

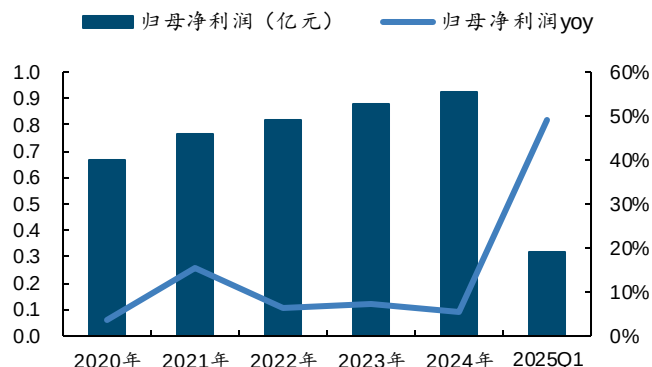


利润 0.93 亿元和 0.32 亿元，同比增长 5.63%和 49.12%，2020-2024 年归母净利润 CAGR 达 8.63%。

图表46：公司营业收入相对稳健



图表47：公司归母净利润保持增长态势



来源：iFinD，国金证券研究所

来源：iFinD，国金证券研究所

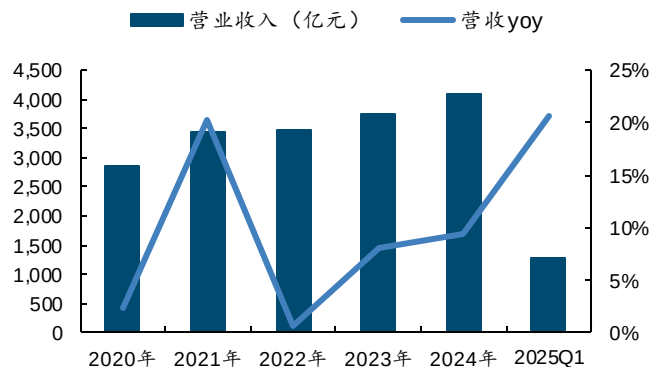
德马科技是国内智能物流装备领域的领军企业，核心产品包括智能输送分拣系统、拣选机器人、拆码垛机器人及智能物流搬运机器人等。公司持续深耕智能物流及智能制造装备的前沿技术研发，已构建涵盖机器人技术、输送技术、分拣技术、驱动技术和软件系统的完整产业链布局。

在驱动技术创新方面，公司开发的工业输送用直驱电动滚筒采用先进的直驱电机技术，针对输送设备空间受限、负载要求高的工况特点，通过电机磁场仿真优化，应用磁场调制技术和铁芯拼接工艺，实现了高槽满率与高功率密度的电机设计，显著提升了驱动效率。目前该产品已进入小批量生产阶段。

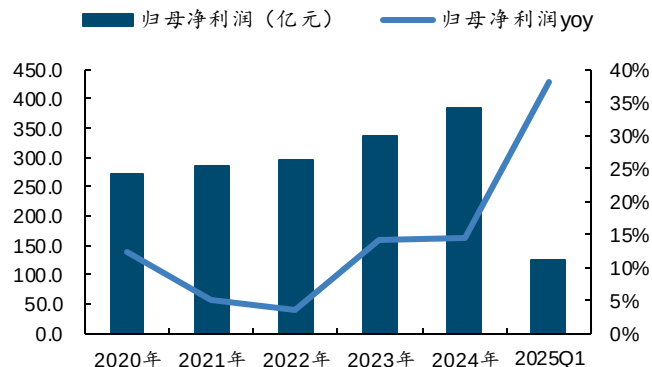
美的集团

美的集团营业收入保持稳定增长趋势。2024 年和 2025Q1 公司分别实现营业收入 4,090.84 亿元和 1,284.28 亿元，同比增长 9.47%和 20.61%，2020-2024 年营收 CAGR 达 9.39%。2024 年和 2025Q1 公司分别实现归母净利润 385.37 亿元和 124.22 亿元，同比增长 14.29%和 38.02%，2020-2024 年归母净利润 CAGR 达 9.08%，公司业绩增长稳健。

图表48：2025Q1 实现营收 1,284.28 亿 (+20.61%)



图表49：2025Q1 实现归母净利润 124.22 亿 (+38.02%)



来源：iFinD，国金证券研究所

来源：iFinD，国金证券研究所

美的作为家电行业领军企业，持续深化技术创新。2024 年，其工业技术事业群 GMCC 美芝研发团队牵头的“高适配性静音变频压缩机关键技术研究及产业化”项目取得重大突破。该项目通过创新应用谐波磁场调制技术，并采用 TFSS 方法论对系统能量流动及噪音振动进行降维分析，解决了压缩机系统振动大、噪音高的行业难题。该项目通过对变频压缩机流场的综合优化设计，在显著提升产品可靠性的同时实现了小型化突破，为家电行业绿色发展提供了技术支撑，同时成果荣获 2023 年度中国轻工业联合会科学技术奖一等奖。



图表50：美芝获中国轻工业联合会科学技术奖一等奖



来源：GMCC 美芝公众号，国金证券研究所

图表51：静音变频压缩机采用谐波磁场调制技术



来源：GMCC 美芝公众号，国金证券研究所

五、风险提示

技术路线迭代不及预期风险。谐波磁场电机对转矩的放大效果高度依赖磁路设计，钕铁氮永磁材料在制备、成型等关键工艺环节尚未成熟，量产技术仍需提升。加之新方案替代传统电机和钕铁硼材料需要市场验证周期，若技术迭代进度滞后，将直接影响谐波磁场电机和钕铁氮材料的成本效益与性能表现，进而延缓其产业化替代进程。

稀土及其制品出口限制风险。我国作为全球最大的稀土资源国和生产国，稀土已成为关键战略资源。在当前国际局势动荡、中美贸易摩擦加剧的背景下，我国于 2024 年 4 月对重稀土及相关物项实施出口管制，钕铁氮永磁材料被列入管制清单。若稀土出口限制政策持续收紧，可能会压缩钕铁氮永磁材料海外市场。

机器人发展不及预期风险。人形机器人作为高端制造业的代表性产品，正在成为高性能电机和永磁材料的重要增量市场，有望带来近百亿谐波磁场电机市场空间。若机器人放量不及预期，将制约谐波磁场电机的市场放量，并影响钕铁氮永磁材料的市场空间。



行业投资评级的说明：

买入：预期未来 3—6 个月内该行业上涨幅度超过大盘在 15%以上；

增持：预期未来 3—6 个月内该行业上涨幅度超过大盘在 5%—15%；

中性：预期未来 3—6 个月内该行业变动幅度相对大盘在 -5%—5%；

减持：预期未来 3—6 个月内该行业下跌幅度超过大盘在 5%以上。



特别声明：

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

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

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

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

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

此报告仅限于中国境内使用。国金证券版权所有，保留一切权利。

上海

电话：021-80234211

邮箱：researchsh@gjzq.com.cn

邮编：201204

地址：上海浦东新区芳甸路 1088 号

紫竹国际大厦 5 楼

北京

电话：010-85950438

邮箱：researchbj@gjzq.com.cn

邮编：100005

地址：北京市东城区建国门内大街 26 号

新闻大厦 8 层南侧

深圳

电话：0755-86695353

邮箱：researchsz@gjzq.com.cn

邮编：518000

地址：深圳市福田区金田路 2028 号皇岗商务中心

18 楼 1806



【小程序】
国金证券研究服务



【公众号】
国金证券研究