

增材制造技术在电机设计中的创新 应用与前沿发展综述

陈熙文^{1,2}, 邱鑫^{1,2*}, 戚国阳^{1,2}, 杨建飞^{1,2}, 于皓^{1,2}

(1. 南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210023;

2. 江苏省三维打印装备与制造重点实验室, 江苏 南京 210042)

Review of Innovative Applications and Cutting-Edge Developments of Additive Manufacturing Technology in Motor Design

Chen Xiwen^{1,2}, Qiu Xin^{1,2*}, Qi Guoyang^{1,2}, Yang Jianfei^{1,2}, Yu Hao^{1,2}

(1. School of Electric and Automation, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of 3D Printing Equipment and Manufacturing, Nanjing 210042, China)

Abstract: [Objective] This paper focuses on the innovative applications of additive manufacturing (3D printing) in the field of electric motors, aiming to provide theoretical support and practical references for the development of high-performance motors. [Methods] Firstly, the additive manufacturing technology is elaborated from aspects such as industry background, process principles, technical systems, and competitive advantages. Then, its innovative applications in key motor components, including stators, rotors, permanent magnets, windings, and cooling structures, are systematically reviewed to clarify its cutting-edge development directions. Finally, the trends and current challenges of additive manufacturing in motor manufacturing are deeply analyzed. [Results] By 2023, the global 3D printing market value has exceeded \$15 billion, with a compound annual growth rate of over 20%. In recent years, researchers have analyzed the materials adaptability such as high-temperature alloys, composite magnetic powders, and conductive polymers using mainstream processes like laser powder bed fusion and binder jetting, while identifying technical bottlenecks in precision, surface roughness, and post-heat treatment. [Conclusion] Additive manufacturing technology, with its unique layer-by-layer deposition principle and design freedom, has brought comprehensive transformations to the motor field, ranging from material preparation to system integration.

Key words: additive manufacturing; high-performance motor; materials adaptability; design freedom

摘要: [目的] 本文聚焦于增材制造(3D打印)在电机领域的创新应用,旨在为高性能电机的研发提供理论支撑与实践参考。[方法] 首先,从行业背景、工艺原理、技术体系与竞争优势等方面对增材制造技术进行阐述。然后,系统梳理了该技术在电机定子、转子、磁钢、绕组及散热结构等关键部件中的创新应用,以明晰其前沿发展方向。最后,深入分析了增材制造技术在电机制造领域的发展趋势与当前挑战。[结果] 截至2023年,全球3D打印产值已突破150亿美元,年复合增长率超过20%。近年来,相关研究人员围绕激光粉末床熔融、粘结剂喷射等主流工艺,分析了高温合金、复合磁性粉末以及导电聚合物等材料适配性,并指出在精度、表面粗糙度和后热处理方面的技术瓶颈。[结论] 增材制造技术以其独特的逐层堆积原理与设计自由度,为电机领域带来了从材料制备到系统集成的全方位变革。

关键词: 增材制造; 高性能电机; 材料适配性; 设计自由度

0 引言

为应对全球能源转型,电机系统亟需技术突破,其功率密度、轻量化和散热性能已成为制约电动汽车、航空航天等领域发展的瓶颈。传统硅钢叠片及冲压工艺存在材料利用率低(通常不足60%)^[1]和几何自由度受限的问题。增材制造技术为电机创新提供了新路径。通过选区激光熔化(Selective Laser Melting, SLM)等金属增材制造,

基金项目: 江苏省研究生实践创新计划项目(SJXC25-0719)

Jiangsu Province Postgraduate Practice and Innovation Program Project (SJXC25-0719)

可在转子内部直接打印集成冷却流道,并在定子中实现软磁复合材料(Soft Magnetic Composite, SMC)的晶粒定向排列,显著降低磁滞损耗。试验表明,该技术可大幅提升电机功率密度^[2-3],冷却效能提高 60% 以上。

当前,增材制造在电机领域的应用已从快速原型发展到系统集成阶段。有企业利用该技术将大型电机壳体制造周期缩短 80%,但仍面临软磁材料性能衰减、层间结合强度不足等挑战。

为突破这些瓶颈,研究热点聚焦于多材料打印、高精度高集成度工艺优化以及与机器学习相结合等方向。例如,五轴设备可实现铜绕组与导磁合金一体成形,使槽满率提升 15~30%;机器学习算法可优化工艺参数,将打印致密度稳定控制在 99.5% 以上^[4-8]。

本文综述了增材制造技术在电机应用中的研究进展,旨在为下一代高功率密度电机提供从批量生产向个性化快速响应的转型路径,奠定更高效、可靠的电机系统基础。

1 增材制造技术概述

增材制造技术,又称 3D 打印,是一种分层叠加、从无到有的数字化成形技术——用激光、电子束或喷头把金属、塑料、陶瓷等材料逐层熔融、固化或粘结,无需模具,直接打印出任意复杂形状的零件,实现设计即制造^[9]。

1.1 增材制造的工作过程

自 20 世纪 90 年代前后兴起以来,增材制造已成为现代制造业的核心技术。该技术以三维模型为基础,通过材料逐层叠加的方式直接制造实体^[10]。尽管具体材料和工艺多样,但其分层制造的基本原理始终一致。

与传统减材制造不同,增材制造无需模具,直接逐层累加材料成形。该技术融合信息技术、材料科学与精密机械,核心优势在于高材料利用率、高效制造复杂结构,显著缩短产品研制周期、降低成本,并实现传统工艺难以达到的高精度与快速响应能力^[11]。

增材制造的工作过程如图 1 所示。首先对三维模型进行数字化切片,打印机依据切片获得的二维轮廓信息,在 X-Y 平面内完成单层制造;通过逐层堆积材料,在 Z 轴方向叠加出实体厚度,最

终实现整体成型^[12]。

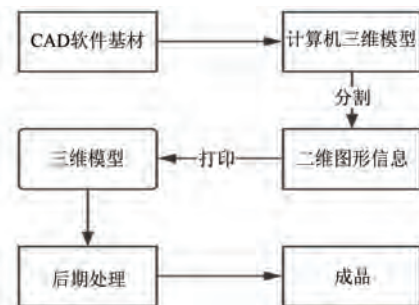


图 1 增材制造工作流程图

Fig. 1 Workflow of additive manufacturing

1.2 增材制造的技术分类

在电机制造领域,增材制造通过逐层堆积突破了传统加工的体积和形状限制,是实现轻量化、高效率及功能集成的关键技术。SLM 技术凭借高致密度与高精度,主要用于打印 Fe-3Si 定子铁心和高导电率铜绕组,可直接替代硅钢片叠压以减轻质量,其冷却通道集成能力也有助于提升电机功率密度^[13]。SLM 技术流程图如图 2 所示。

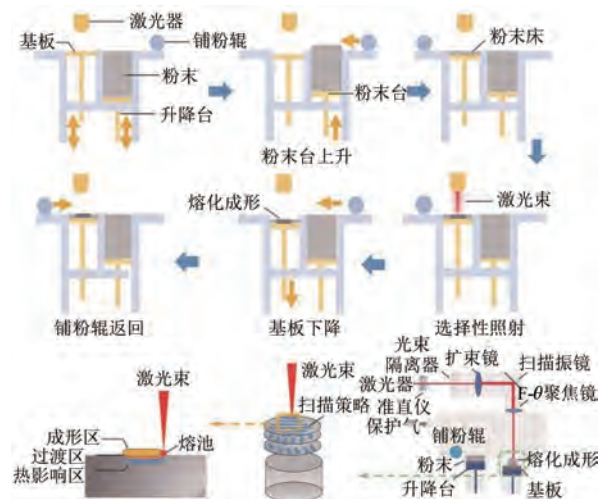


图 2 SLM 技术流程图

Fig. 2 SLM technology flowchart

电子束熔化(Electron Beam Melting, EBM)技术利用真空环境和高能电子束,适用于制造高熔点合金部件,如航空航天电机的转子骨架。其优势在于高温高压环境下,形状稳定性好,残余应力低^[14]。EBM 技术的流程图如图 3 所示。

激光熔敷沉积(Laser Engineered Net Shaping, LENS)主要用于制造 SMC 和功能梯度材料。通过熔敷陶瓷颗粒,可显著抑制涡流损耗并优化散热性能,适用于特定磁场分布控制的关键部件。

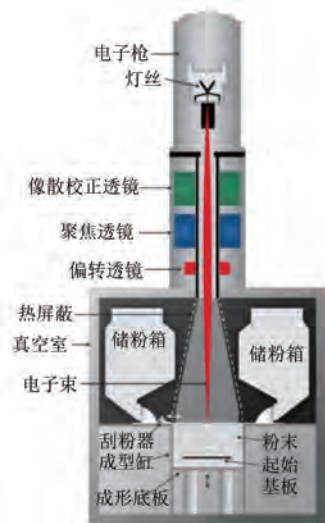


图 3 EBM 技术流程图

Fig. 3 EBM technology flowchart

LENS 技术流程图如图 4 所示。

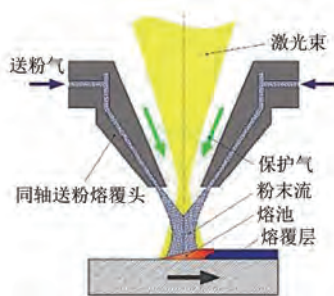


图 4 LENS 技术流程图

Fig. 4 LENS technology flowchart

选择性激光烧结 (Selective Laser Sintering, SLS) 技术通过逐层铺粉和激光烧结成形三维物件。首先,先在平台铺粉,激光按切片数据扫描烧结粉末形成一层实体;然后,工作台下落,重复铺粉与烧结,使新层与已烧结部分牢固结合,循环至工件完成。该技术无需模具,适用材料广泛(如陶瓷、金属及复合材料),尤其对金属粉末,SLS 可直接制造高强度复杂零件^[15],是当前研究重点。SLS 技术流程图如图 5 所示。

总体而言,SLM 技术解决了铁心致密化问题,SLS 技术通过高效烧结优化了软磁材料性能与结构完整性,EBM 技术满足了高强度支撑需求,LENS 技术可功能化改造材料性能。四者协同作用,为电机高性能提供了完整技术支撑。

1.3 增材制造在电机设计及制造中的优势

增材制造技术在电机关键部件制造中展现出

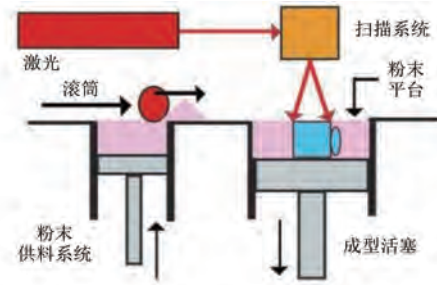


图 5 SLS 技术流程图

Fig. 5 SLS technology flowchart

三大优势:设计自由度高、材料利用率高和生产周期短。

(1)设计自由度:突破传统模具限制,直接成型复杂结构,可一体化集成冷却流道和异形绕组,优化散热与电磁性能。

(2)材料利用率:逐层堆积可大幅减少浪费。以转子为例,材料利用率可从传统切削的 30 ~ 50% 提升至 90% 以上。

(3)生产周期:省去模具开发环节,可实现快速成形。在定制化生产中,制造时间可从数周缩短至数天。

对于千台级生产,增材制造在复杂结构和大批量多品种生产中具有优势,且无需模具费用。但设备折旧占比高,除非部件复杂度高或需功能一体化,否则传统工艺在单件成本上仍具优势。

2 增材制造技术在电机关键部件中的创新应用

在现代电机制造中,定子、转子、绕组、磁钢及散热结构等关键部件直接影响电机整体性能。增材制造技术为上述部件提供了新路径:可精准成形定子复杂内部结构,提升机械与电磁性能;灵活定制绕组,优化导电路径;提高磁钢成型精度并制造先进散热结构,改善磁场分布,满足高负荷散热需求。本文将围绕能量转换路径,进一步探讨增材制造如何重塑核心部件,突破传统磁路设计限制^[16]。

2.1 增材制造技术在定子中的应用

定子是电机中产生旋转磁场的静止部件,通常由铁心、绕组和机座构成。传统叠片铁心采用高磁导率硅钢片,但难以实现复杂三维磁路与高效散热。增材制造提供了新途径:如粘结剂喷射

(Binder Jetting, BJT) 技术可制备高硅 (6.5 wt. %) 软磁材料, 通过优化烧结与绝缘工艺, 在保证强度、电阻率与饱和磁化强度的同时, 降低涡流损耗^[17]。Khoshoo 团队^[18]进一步优化层厚、烧结参数及绝缘涂层处理, 有效降低涡流损耗, 推动工程应用。

为评估后处理工艺对磁性能的影响, 研究者对比了不同热处理条件下的铁损数据, 如表 1 所示。由表 1 可知, 800 °C 退火后铁损由 2.77 W/kg 降至 1.87 W/kg。

不同频率与热处理条件下软磁材料的铁损^[19]对比如表 2 所示。由表 2 可知, 氢气退火在低磁密区间可有效降低损耗, 且不影响饱和磁化强度。此外, 0.5 mm 厚烧结 Fe-6Si 样品的 RT 拉伸曲线如图 6 所示, 在室温下力学强度可行, 为其在定子铁心中的应用提供了依据。

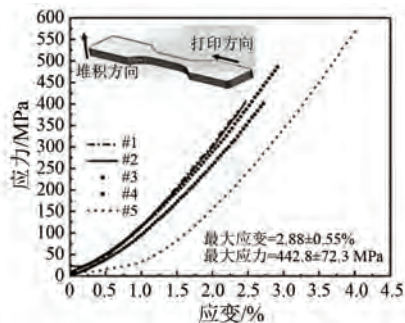


图 6 0.5 mm 厚烧结 Fe-6Si 样品的 RT 拉伸曲线

Fig. 6 Tensile curves of a 0.5 mm thick sintered Fe-6Si sample at RT

表 1 不同热处理条件下 3D 打印软磁材料的铁损

Tab. 1 Iron loss of 3D printed soft magnetic materials under different heat treatment conditions

磁通密度/T	打印烧结态的校正损耗/ $(W \cdot kg^{-1})$	750 °C, 2 h 退火的校正损耗/ $(W \cdot kg^{-1})$	800 °C, 2 h 退火的校正损耗/ $(W \cdot kg^{-1})$
0.5	2.77	1.96	1.87
1	14.99	14.23	13.99
1.5	39.37	41.64	41.34

在轴向磁通电机定子设计中, 为适应三维磁通路径并降低损耗, 研究提出了仿叠片希尔伯特分形几何结合高硅 (6.5 wt. %) 硅钢的方案。增材制造测试结果表明, 该方案 200 Hz 下涡流损耗与超薄叠片相当, 480 Hz 时接近 29 Ga 传统叠片。此外, 通过 SLM 与拓扑优化, 降低打印定子芯漏

流损耗, 并以 50 μm 为最小绝缘间隙, 在构建平面垂直方向保持恒定, 有效抑制涡流^[20]。

表 2 不同频率与热处理条件下软磁材料的铁损对比

Tab. 2 Comparison of iron losses in soft magnetic materials under different frequencies and heat treatment conditions

频率/Hz	磁通密度/T	仅烧结/ $(W \cdot kg^{-1})$	750 °C, 2 h 退火/ $(W \cdot kg^{-1})$	800 °C, 2 h 退火/ $(W \cdot kg^{-1})$
60	0.5	2.77	1.96	1.87
400	0.5	67.06	63.49	62.85
1 000	0.5	362	371	372
10 000	0.1	293.63	261	259.5
20 000	0.05	177.51	146.03	144.4

在混合结构设计中, 将增材制造的 SMC 齿部与传统层压轭部结合, 提升了扭矩密度并降低高频损耗。例如, 高速永磁电机采用该方案后, 铜耗降低, 最高效率接近 95%^[21]。

尽管这些技术显著提升了电机性能, 但仍面临材料、成本与工艺标准化等挑战。未来需加强多材料打印、智能算法与电磁性能关联研究, 推动增材制造在高效电机领域的产业化应用。

2.2 增材制造技术在转子中的应用

在定子旋转磁场的驱动下, 转子将电磁能转化为机械能, 其性能至关重要。常见转子结构包括鼠笼式和绕线式^[22], 如图 7 所示。鼠笼式结构简单、成本低, 分为铸铝和导电性更优的铜条两种, 适用于需坚固、免维护、成本低、允许 1~5% 滑差以及不追求宽调速的常规动力场合; 绕线式结构可通过外接电阻调速, 适用于起重机等需调节起动性能的场合。转子的设计制造质量直接影响电机的振动、噪声和效率: 质量不均会引起振动, 气隙过小会导致摩擦, 过大则增加磁阻、降低效率。

增材制造为转子制造带来显著突破: 例如采用 SLM 制备 Fe-5.0wt. % Si 软磁合金转子, 结合轴向分块设计可有效抑制涡流^[23]; 另有研究利用增材制造实现非对称斜极结构, 降低了开关磁阻电机的转矩脉动与风阻损耗, 展示了该技术在复杂结构转子制造中的潜力^[24]。

黄培文团队^[25]提出基于 SLM 技术的新型线起动同步磁阻电机 (Line-Start Synchronous Reluctance Motor, LSSynRM), 将磁通屏障与三维

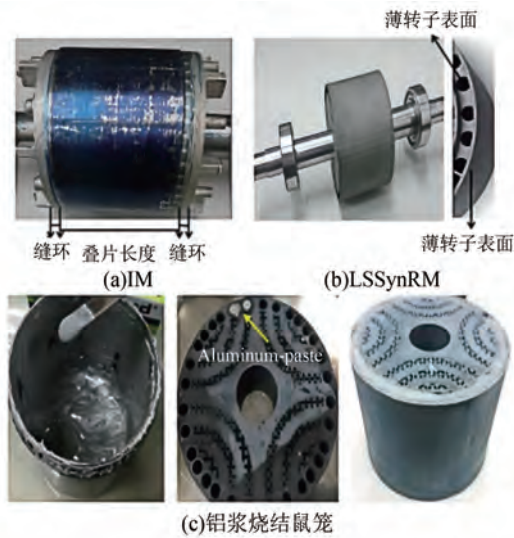


图 7 新型 LSSynRM 原型

Fig. 7 Prototype of the novel LSSynRM

网状支撑结构集成, 避免了传统叠片工艺的机械薄弱点。在磁障中填充 70% 三维网格的转子, 可抑制高速变形, 实现快速起动, 运行效率提升至 88%, 显著降低振动。然而, 更高填充率虽能进一步减振, 却会降低转矩和磁阻扭矩, 未来可通过分块设计或 SMC 优化突破上述限制。

有限元分析值与试验值对比如图 8 所示, 图中显示二者吻合, 验证了电磁场计算的准确性, 为结构优化提供了有效仿真依据。

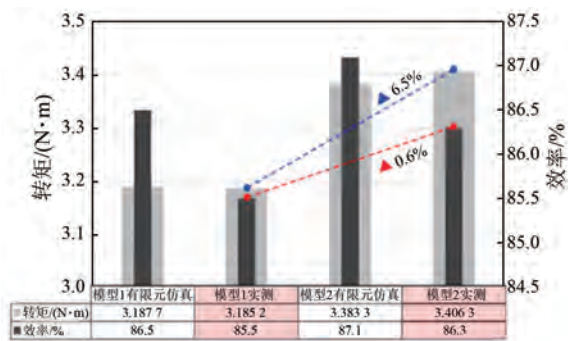


图 8 有限元分析值与试验值的比较

Fig. 8 Comparison of FEM analysis and experimental results

另一项研究采用激光粉末床熔融 (Laser Powder Bed Fusion, LPBF) 技术制造 SynRM 的 Fe-5.0wt. % Si 软磁转子^[26]。受设备限制, 转子分段打印后组装, 缩短了涡流路径。测试表明, 该转子在额定转速下扭矩较传统层压转子降低了 13%, 其在高转速下性能更优, 表明增材制造为复

杂结构优化与软磁材料应用提供。

Gargalis 等人^[27]采用 LPBF 技术制备了 Fe-5.0wt. % Si 高硅含量软磁材料, 其相对磁导率达 2 200, 饱和磁化强度为 1.22 T, 电阻率为 $104 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 。试验结果表明, 在额定转速 600 r/min 下, 3D 打印转子电机的输出转矩比传统叠片转子电机低 13%, 效率下降 22%; 而在 1 500 r/min 时, 其最大机械功率与效率有所改善, 但最高效率仍仅为 65%, 低于传统电机的 83%。测功机测量的集成电机转速-转矩曲线如图 9 所示。

图 9 中, 可以直观看到该 3D 打印转子在不同转速下的转矩输出特性, 其转矩随转速升高而逐渐下降的趋势与上述试验数据吻合, 进一步印证了增材制造转子性能与设计预期的匹配程度。

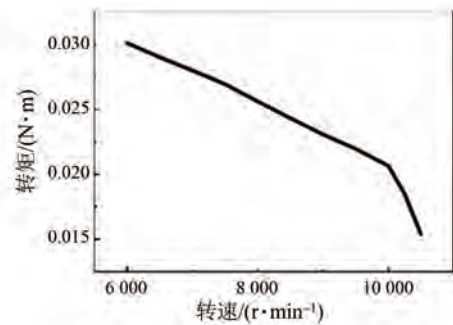


图 9 测功机测量的集成电机转速-转矩曲线

Fig. 9 Speed-torque curve of integrated motor measured by dynamometer

Lammers 团队^[28]证实, 增材制造可实现永磁同步电机转子内部冷却通道的一体成型与结构优化, 显著提升其动态响应效率。

Hong 团队^[29]则利用熔融沉积成型技术以聚碳酸酯材料打印 SynRM 转子绝缘磁障, 使屏障宽度由 2 mm 缩减至 1 mm, 通过增加磁障数量将输出功率提升 5.79%, 效率提高 0.6%, 在 1 500 r/min、500 W 工况下转矩增加 6.5%。

增材制造技术在未来 3~5 年有望通过多材料打印、智能优化与在线监控实现突破, 但目前仍面临材料、精度与跨学科设计等挑战。

2.3 增材制造技术在绕组中的应用

绕组是电机实现电能与磁能转换的核心部件, 分为主极励磁绕组和电枢绕组。交流电机的电枢绕组通常位于定子, 直流电机则位于转子^[30]。

中小型三相异步电动机的定子绕组按相数分为单相、两相、三相;按每槽绕组数分为单层、双层、单双层混合及正弦绕组。单层绕组包括同心式、链式、交叉式等,双层绕组有叠绕组与波绕组;按每极每相槽数可分为整数槽与分数槽绕组^[31]。单层绕组结构简单、槽满率高,适用于 10 kW 以下的电机;双层绕组可通过短距设计抑制谐波,多用于 10 kW 以上电机。

增材制造为绕组设计带来创新和突破。Simpson 等人^[32-33]采用直接金属激光烧结技术制造异形截面绕组,电导率为标准退火铜的 68%,在 480 Hz 下相比传统绕组降低损耗 19%;Lorenz 团队^[34]利用多材料 3D 打印制备铜-陶瓷复合绝缘齿槽线圈,电导率为标准铜的 71%,在 15 000 r/min、40 kHz 工况下,凭借陶瓷绝缘的导热性($3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)和紧凑结构,实现了更高电流承载能力。

此外,Pecotich 团队^[35]集成增材制造微型液冷通道,仅增加 5% 体积即可实现 30% 温升降幅;Sixel 团队^[36]采用陶瓷材料打印嵌入式换热器,实现连续电流密度 33 ARMS/mm²,且使绕组最高温度保持在 132 °C 以下。Selema 团队^[37]通过 3D 打印冷却通道与改进材料缓解热点,有限元分析显示该方案可显著降低质量、提升散热性能。3D 线圈与冷却设计主要概念如图 10 所示。

图 10 中,传统绕组结构(a)中圆导线与冷却通道接触面积有限;新方案(b)采用矩形导体与平底槽设计,并引入 3D 打印热交换器,有效提升散热能力。

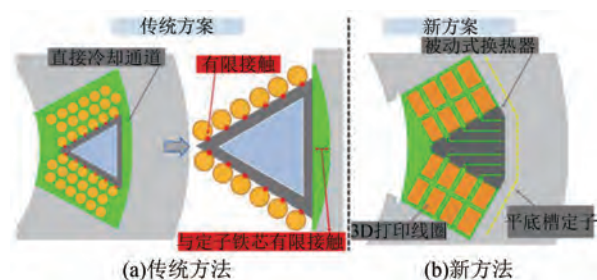


图 10 3D 线圈与冷却设计主要概念

Fig. 10 Key concepts of 3D coil and cooling design

Rautio 团队^[38]采用 LPBF 技术制备 AlSi10Mg 合金,分析了硅相分布与孔隙率对电阻率的影响,建立了工艺-结构-性能关联模型,电阻率误差小于 4.6%,并提取了温度系数。针对航空电机需

求,该团队验证了空心导体在直流 70 A 与交流 100 ARMS(最高 1 200 Hz)下的稳定电热性能,集成热管后散热效率显著提升。通过导体形状优化算法设计的 E 型滤波电感器,使系统效率提高 12%,展现了增材制造在电磁拓扑中的优势。散热结构设计对绕组可靠性同样关键,将在 2.5 节讨论。

当前,增材制造绕组技术正成为下一代高性能电机设计的关键支撑,预计未来 3~5 年内可实现从实验室到工业化量产。未来重点聚焦智能算法驱动的多物理场优化、纳米复合材料创新应用及在线质量监控,以提升制造精度、加强多材料界面控制性能,并解决批量生产成本与一致性挑战。

2.4 增材制造技术在磁钢中的应用

永磁电机中,磁钢提供恒定磁场,其性能决定电机转矩上限。常用磁钢材料(铁氧体、钕铁硼、钕钴)的剩磁、矫顽力与热稳定性^[39]是衡量电机效率、功率密度与可靠性的关键指标,增材制造正在带来革命性变革,实现性能与成形精度的协同突破。

钕铁硼等稀土磁钢具有高剩磁、高矫顽力与高磁能积,可提升功率密度和效率。剩磁越高,输出功率越大;矫顽力越高,抗退磁能力越强。高电阻率降低涡流损耗,高磁导率有利于磁场建立与能量转换。

实际应用中,磁钢常见形状为矩形、瓦形和扇形等,多采用单极或多极辐射充磁。技术要求侧重高温稳定性、磁通一致性与环境适应性,如风电与驱动电机分别对盐雾防护和高温稳定性有严格要求。

增材制造为磁钢带来突破,可通过多材料增材制造将钕铁硼永磁体与磁障结构集成,协同优化磁电性能与机械强度。例如,参数化建模的非对称磁障设计提升了扭矩密度与功率因数,但后续热处理对磁性能的影响仍需研究^[40]。

增材制造还为高速转子磁体固定提供了多种方案。Ralchev 团队^[41]研究表明,整体式卡槽固定通过一次性打印环形卡槽,在大于 3×10^4 r/min 转速下实现磁铁位移误差小于 0.05 mm,显著降低离心应力;弹性嵌入式固定虽增加材料消耗,但提供额外振动抑制优势。分段式支撑架支持磁铁快速更换,具备良好的可维护性与轻量化特性。

Wei Yuan 团队^[42]采用 Halbach 永磁阵列一体化成型技术,制成仅 1.07 kg 的轻量转子。该转子由 20 块方形钕铁硼磁块构成 Halbach 圆柱,外径长 76.4 mm、总长 110 mm,最大扭矩 0.044 N·m,最大电流 4 A,线圈填充因子 53%,层间距 0.7 mm。Hall 传感器测得磁通密度为 157 mT,理论角分辨率 0.16°,试验最小步进角 0.32°,位置误差 $\pm 0.64^\circ$ 。比例积分控制下闭环带宽为 4 Hz,0.2 Hz 正弦参考信号误差 $\leq 0.64^\circ$ 。不同设计方案下转子气隙中的磁通密度分布如图 11 所示。

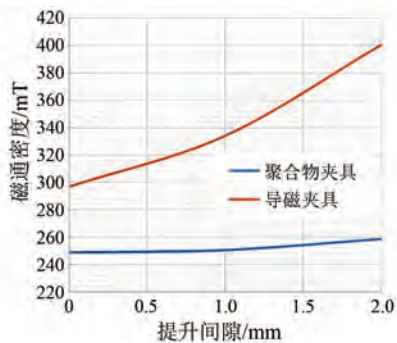


图 11 转子气隙中磁通密度模块的比较

Fig. 11 Comparison of magnetic flux density modules in rotor air gap

增材制造在磁钢机械强化方面优势明显。Fuchslocher 团队^[43]通过聚合物磁体全埋磁钢拓扑优化,在高速转子中将磁通密度提升至 1.8 T,实现了磁体全表面受力支撑与结构可拆卸,磁通利用率达 400 mT 以上。粘结磁体方面,熔融长丝制造与磁性聚合物材料技术可将钕铁硼磁体相对磁导率提升至 7.5,剩磁达 0.68 T,适用于复杂形状各向同性磁体制造。

但粘结磁体增材制造面临磁性能与成型质量的平衡难题。对此不同团队采取不同策略:Fuchslocher 团队^[43]侧重拓扑结构设计;Parmar 团队^[44]优化打印温度与磁粉粒径;史宏斌团队^[45]开发螺杆挤出直写结合多级脱脂烧结,将致密度提升至 98.5%,各向异性度低于 5%,剩磁达 0.68 T,为制造含复杂冷却流道的各向同性磁体提供新途径。

在高端永磁材料直接成型方面,SLM 技术可实现无模具近净成形钕铁硼磁体,金属增材制造可制造复杂形状定转子铁心。高碳铁材料经脱脂

与烧结后磁通密度峰值达 2.0 T,配合多级磁障与不对称永磁体布局,平均转矩达 7.98 N·m,转矩脉动降至 4.07%。Hossain 团队^[46]在永磁辅助 SynRM 转子中采用三层磁障结构,配合钕铁硼磁体提升气隙磁密正弦度,铁损降低 17.01 W。

热管理是增材制造磁钢应用的关键。将 3D 打印换热器嵌入绕组间隙,仿生流道使冷却效率提升 50%,绕组温度稳定在 80 °C 以内,冷却体积减少 30%,梯度多孔结构降温 28 K。

增材制造为磁钢制造带来变革性潜力,核心优势在于实现复杂结构一体化成形、优化磁路设计并缩短研发周期。当前挑战包括磁性能易受损、致密度与力学性能待提升和制造成本较高等。未来方向为多尺度结构调控、智能材料集成及 AI 生成式设计,以优化多物理场耦合性能,推动高性能磁钢规模化应用。

2.5 增材制造技术在散热结构中的应用

热管理是限制电机功率密度的关键因素之一,增材制造使散热系统成为高性能设计的重要支撑。LENS 技术制造的空冷转子集成叶片与磁障通道,在 10 220 r/min 下绕组温降 33 K,功率损耗减少超过 85%,转矩密度显著提升^[47]。

SLM 技术实现鼠笼转子一体化成型,翼型针翅散热器传热系数达 0.184 W/K,温降 14.5 °C;碳纤维箱梁减重 59%,在 5.75 kN 轴向力下变形 ≤ 0.3 mm^[48-49]。

增材制造在电机性能优化方面成果显著:Chang 团队^[50]提出不等气隙转子轴向磁通解析器,提升偏心容错能力。Huang 团队在高速转子中集成螺旋冷却通道,温升从 120 K 降至 65 K;Wu 等人通过磁性金属增材制造实现叶轮电机一体化设计,提升结构鲁棒性与功率密度^[51]。

在绕组端部热管理方面,多激光选区熔化技术在导体内部构建微型流道,换热面积增加 3 倍,热点温度降低 35~40 °C;优化截面与内部冷却结构弥补电导率略低的不足,梯度孔隙设计使抗振性能提升超过 50%^[52]。

在定子冷却系统方面,Cakal 团队通过螺旋和扭结设计增强湍流、破坏热边界层,降低热点温度;铝合金与铜合金分别适用于常规与极端热负荷;结合拓扑优化的支撑结构减少材料用量,凸显三维螺旋流道散热优势^[53]。

多种散热器的传热系数对比如图 12 所示。由图 12 可知,翼型针翅设计在体积约束下效率最高;环形翅片的总体性能优于纵向翅片和桁架类翅片,而简单立方板的性能最低。这为高功率密度电机的热管理方案选型提供了定量依据。

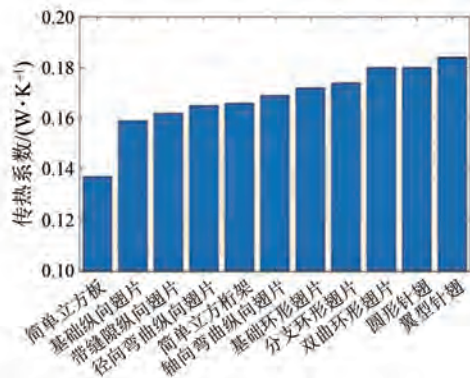


图 12 多种散热器的传热系数对比

Fig. 12 Comparison of heat transfer coefficients for various heat sinks

陶瓷增材制造为电机散热提供了新路径。Sixel 团队^[54]采用聚碳酸酯铝粉复合材料,通过熔融长丝制造技术开发三维打印直接绕组热交换器,利用聚合物绝缘实现绕组与冷却介质直接接触。非封装测试中,在 20.4 ARMS/mm² 电流密度下绕组热点温度为 148 °C,相比传统水套冷却降低了 75 °C,避免附加涡流损耗,实现 11.8 kW/kg 的连续比功率。

航空电机散热需求推动增材制造发展。Vahid 团队^[55]通过 AlSi10Mg 空心线圈集成热管实现高效散热,直流电阻率误差<4.6%,仿真精度>99.5%。采用低热阻导热膏使线圈温降 17%,并量化磁芯导致的邻近效应(损耗增加 84%),为高功率密度航空电机提供热管理支撑。导热材料对散热性能的改善效果如图 13 所示。

增材制造的双仿生冷板技术模拟叶片脉络与血管结构,构建微尺度流道网络,使冷却剂分布均匀性提升 50%,电池最高温度降低 12~15 °C,组内温差控制在 3 °C 以内。该模块化设计减重 20%,展示了良好的设计自由度与集成化热管理潜力^[56]。

增材制造可一体成型复杂散热结构,突破材料与限制,结合多材料打印与智能调控实现性能提升。尽管面临可靠性与成本挑战,未来 3~

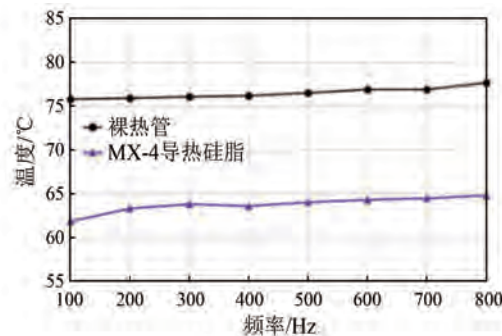


图 13 导热材料对散热性能的改善效果

Fig. 13 Improvement effect of thermal conductivity materials on heat dissipation performance

5 年有望发展出智能自适应散热系统,推动电机向高效紧凑方向发展。

3 增材制造技术在电机制造领域的应用进展与未来挑战

增材制造技术已使电机关键部件实现设计自由与性能提升,从概念验证迈向高端应用。其产业化并非取代现有工艺,而是推动设计、材料、工艺到验证的系统性变革。当前仍面临三大挑战:结构功能一体化设计与材料适配;多材料高精度制造与系统集成;多物理场耦合设计及产业化应用瓶颈。

3.1 结构-功能一体化的创新设计与材料适配

增材制造的核心优势在于实现传统工艺难以企及的结构-功能一体化。通过生成式设计及拓扑优化,可自动生成兼顾电磁效率与力学性能的轻量化结构,如优化后的转子铁心可减重 30% 而不损失转矩密度。同时,该技术可直接成型内含复杂流道的冷却结构,例如集成蛇形通道的电机外壳,散热效率提升 40% 以上,绕组温降达 15~20%,从而显著提升功率密度与持续运行能力^[57]。

然而,将这一设计优势转化为产业化仍面临挑战。首先,设计范式发生根本转变:工程师需从制造导向设计转向功能驱动的一体化设计,这要求深度融合多物理场仿真,对建模精度与跨学科协同提出更高要求。其次,材料与工艺的强耦合性成为关键瓶颈。构件最终性能(如磁性能、机械强度)高度依赖激光功率、扫描速度等工艺参数。例如,为追求高致密度(如 Ti-6Al-4V 达 99.2%)或高强度(如 Inconel 718 达 1 180 MPa),

需精细调控能量输入,但这可能牺牲延展性或引入残余应力。因此,建立针对不同功能材料的专用工艺数据库与质量控制标准,是实现设计意图、保证批次一致性的产业化先决条件。

3.2 面向性能与精度的多材料增材制造技术挑战

电机是由铜绕组、硅钢片、绝缘体和壳体组成的多材料系统。增材制造的发展方向是实现多材料功能一体化,但目前技术尚未达到这一目标。主要挑战包括:适合增材制造的高性能软磁和永磁材料有限,新型磁粉末在快速凝固中易因热循环导致磁性能下降;同时,快速熔凝会产生孔隙等冶金缺陷,影响力学和电磁性能。现有技术也难以达到复杂磁路所需的微米级精度。

微观上,材料与工艺的耦合缺陷是核心瓶颈:高表面粗糙度在微型绕组和薄壁铁心中引发热磁耦合,增大涡流并降低散热;异质界面因热膨胀失配导致结合强度不足,喷头切换精度阻碍冷却流道与电磁部件的一体化集成。此外,主流金属增材设备成型尺寸多小于一米,难以实现多相材料快速切换,亟需新一代混合制造平台。

3.3 基于多物理场耦合的设计与产业化应用瓶颈

即便攻克了增材制造电机的设计与制造难题,其产业化仍面临样品到产品的应用障碍。

当前设计验证仍以电磁性能为核心,热、力、流及工艺等多物理场未形成早期闭环,高频工况下的性能漂移难以在设计阶段发现,技术成熟度停留在原型阶段。

成本分析多局限于与传统工艺的静态对比,缺乏全生命周期价值评估,拓扑优化、功能集成、维修便捷等隐性收益未被量化,导致出现用短期成本衡量长期效益的偏差。

标准缺位源于制度积累不足。高端领域对材料可追溯性、工艺可重复性和认证路径确定性要求极高,当前增材制造电机面临无标可依与有标不适的双重困境,难以融入现有产业技术规制体系。

4 结语

增材制造正深刻改变电机制造模式。本文综述其在定子、转子、绕组、磁钢及散热结构中的创新应用,并分析趋势与挑战。

该技术提升了部件性能。定子方面:BJT 和

SLM 技术可实现高硅软磁材料复杂成形,降低高频涡流损耗;转子方面:一体化成型内部冷却流道、非对称斜极与复杂磁障,提升机械强度与电磁性能;绕组方面:异形截面与多材料复合绝缘结构降低交流损耗,陶瓷绝缘绕组导热优于传统树脂;磁钢方面:多材料打印与拓扑优化实现永磁体精准固定与磁路优化,粘结与烧结磁体性能稳步提升;散热结构方面:集成式仿生冷却流道与空心导体显著改善绕组散热,支撑高功率密度发展。

然而,该技术仍面临材料性能不足、冶金缺陷(孔隙、裂纹等)、工艺参数复杂及精度有限等挑战。大尺寸与多材料集成技术尚不成熟,大型电机应用受限;成本效益在大规模生产中仍需验证。

未来,随着材料、工艺与智能算法的进步,多材料打印、智能拓扑优化、在线监控等技术将逐步成熟。数字孪生结合增材制造有望实现实时优化与预测,推动电机向高效、紧凑、智能方向发展,预计未来 3~5 年内可实现关键技术突破与产业化应用。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

陈熙文负责文献检索、资料分析与初稿撰写,邱鑫、杨建飞负责框架设计与终稿审核,戚国阳、于皓负责文献整理、分类及格式校对,陈熙文和戚国阳进行了论文的审核和修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The literature search, data analysis, and initial draft preparation were conducted by Chen Xiwen. The framework design and final manuscript review were completed by Qiu Xin and Yang Jianfei. Qi Guoyang and Yu Hao were responsible for literature organization, classification, and formatting proofreading. The manuscript revision and final approval were performed by Chen Xiwen and Qi Guoyang. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

参考文献

- [1] 中国工程院化工,冶金与材料工程学部,中国材料研究学会. 中国新材料技术应用报告[M]. 北京: 化学工业出版社, 2024.
Chinese Academy of Engineering, Chemical, Metallurgical and Materials Engineering Division, Chinese Materials Research Society. Application Technologies of Advanced Materials in China [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2024.
- [2] 张洪宝, 胡大超. 增材制造技术的应用及发展[J]. 上海应用技术学院学报(自然科学版), 2016, 16(1): 93-98.
Zhang H B, Hu D C. Application and development of additional material manufacturing technology [J]. Journal of Shanghai Institute of Technology (Natural Science), 2016, 16(1): 93-98.
- [3] 胡安芮. 多角度各向异性极薄硅钢应用于高转矩密度电机研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2023.
Hu A R. Research on application of multi-angle anisotropic ultra-thin silicon steel to high torque density motor [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2023.
- [4] Kolli S, Beretta M, Selema A, et al. Process optimization and characterization of dense pure copper parts produced by paste-based 3D micro-extrusion [J]. Additive Manufacturing. 2023, 73: 103670.
- [5] 《中国公路学报》编辑部. 中国汽车工程学术研究综述·2023[J]. 中国公路学报, 2023, 36(11): 1-192.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's automotive engineering research progress: 2023 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(11): 1-192.
- [6] 王鑫旭, 闫承琳, 李晓旭, 等. 机器学习在增材制造中的研究进展[J]. 材料导报, 2025, 39(增刊2): 564-576.
Wang X X, Yan C L, Li X X, et al. Research progress of machine learning in additive manufacturing [J]. Materials Reports, 2025, 39(S2): 564-576.
- [7] 黄荣, 丁东红, 梁炯洪, 等. 电弧增材制造成形控制研究进展与挑战[J]. 制造技术与机床, 2025(11): 103-119.
Huang R, Ding D H, Liang J H, et al. Research progress and challenges in forming control of wire arc additive manufacturing [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2025(11): 103-119.
- [8] 王磊, 卢秉恒. 我国增材制造技术与产业发展研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(4): 202-211.
Wang L, Lu B H. Development of additive manufacturing technology and industry in China [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(4): 202-211.
- [9] 吴珊, 周阳, 史志武, 等. 增材制造专用材料标准现状与体系研究[J]. 中国材料进展, 2024, 43(9): 859-864.
Wu S, Zhou Y, Shi Z W, et al. Current research status and standard system of materials for additive manufacturing [J]. Materials China, 2024, 43(9): 859-864.
- [10] 张云波, 乔雯钰, 张鑫鑫, 等. 3D打印用高分子材料的研究与应用进展[J]. 上海塑料, 2015, 43(1): 1-5.
Zhang Y B, Qiao W Y, Zhang X X, et al. Research and application progress of polymer materials used in 3D printing [J]. Shanghai Plastics, 2015, 43(1): 1-5.
- [11] 郭恒瑞, 王飞, 白彦军, 等. 基于PI基材的液态金属柔性电路板封装3D打印技术研究[J]. 中国塑料, 2025, 39(12): 64-71.
Guo H R, Wang F, Bai Y J, et al. Study on 3D printing of flexible liquid metal circuits with encapsulation on a polyimide substrate [J]. China Plastics, 2025, 39(12): 64-71.
- [12] 韩璐, 危岩, 刘成梅, 等. 生物印刷电子材料的研究进展[J]. 中国印刷与包装研究, 2013, 5(3): 1-10.
Han L, Wei Y, Liu C M, et al. Development progress of electroactive materials for potential 2D and 3D bio-printing [J]. China Printing and Packaging Study, 2013, 5(3): 1-10.
- [13] 薛莹. FDM 3D打印螺纹连接件的尺寸精度分析与研究[J]. 现代机械, 2025(6): 32-35+40.
Xue Y. Analysis of dimensional accuracy of FDM 3D-printed thread connectors [J]. Modern Machinery, 2025(6): 32-35+40.
- [14] Deckard C R. Method and apparatus for producing parts by selective sintering: US4863538 [P]. 1989-09-05.
- [15] Deckard C R. Method for producing parts by selective sintering: US5639070 [P]. 1997-06-17.
- [16] 陈秀平, 徐起连, 李岩. 大功率永磁同步发电机

- 定子冷却系统优化分析[J]. 大电机技术, 2020(5): 29-33.
- Chen X P, Xu Q L, Li Y. Optimal analysis of stator cooling system of large power permanent magnet synchronous generator [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2020(5): 29-33.
- [17] Cramer C L, Nandwana P, Yan J Q, et al. Binder jet additive manufacturing method to fabricate near net shape crack-free highly dense Fe-6.5 wt.% Si soft magnets [J]. Heliyon, 2019, 5(11): e02804.
- [18] Islam K J, Pham T Q, Suen H, et al. Eddy current loss reduction in binder jet printed iron silicon cores [C]// 2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Detroit, MI, USA, 2022: 1-7.
- [19] 韦福东, 王建辉, 刘朋鹏. 基于软磁复合材料的超高速永磁同步电机电磁设计分析[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(1): 78-82.
- Wei F D, Wang J H, Liu P P. Electromagnetic design and analysis of ultra-high-speed motor based on soft magnetic composite material [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(1): 78-82.
- [20] Gadiyar N, Goodall A D, Todd I, et al. Characterization of an axial flux machine with an additively manufactured stator [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2023, 38(4): 2717-2729.
- [21] Pyo H J, Jeong J W, Yu J H, et al. Design of 3D-printed hybrid axial-flux motor using 3D-printed SMC core [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2020, 30(4): 1-4.
- [22] Kim D M, Kim J H, Lee S Y, et al. Estimation method for rotor eddy current loss in ultrahigh-speed surface-mounted permanent magnet synchronous motor [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2021, 57(2): 1-5.
- [23] 刘海华, 张金萍, 赵艳祥. 永磁电机磁钢工程设计与研究[J]. 现代工业经济和信息化, 2017, 7(16): 26-28.
- Liu H H, Zhang J P, Zhao Y X. Design of the magnet steel for permanent magnet motor [J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2017, 7(16): 26-28.
- [24] Tseng G M, Tsai M C, Huang P W, et al. A radially inserted permanent-magnet magnetic coupling design based on 3D printing [C]// 2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems, Pattaya, Thailand, 2015: 973-976.
- [25] Huang P W, Tsai M C, Jiang I H. 3-D structure line-start synchronous reluctance motor design based on selective laser melting of 3-D printing [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(11): 1-4.
- [26] Tseng G M, Jhong K J, Tsai M C, et al. Application of additive manufacturing for low torque ripple of 6/4 switched reluctance motor [C]// 2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems, Chiba, Japan, 2016: 1-4.
- [27] Gargalis L, Madonna V, Giangrande P, et al. 3D printing as a technology enabler for electrical machines: manufacturing and testing of a salient pole rotor for SRM [C]// 2020 International Conference on Electrical Machines, Gothenburg, Sweden, 2020: 12-18.
- [28] Lammers S, Adam G, Schmid H J, et al. Additive manufacturing of a lightweight rotor for a permanent magnet synchronous machine [C]// 2016 6th International Electric Drives Production Conference, Nuremberg, Germany, 2016: 41-45.
- [29] Hong H S, Liu H C, Cho S Y, et al. Design of high-end synchronous reluctance motor using 3-D printing technology [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(11): 1-5.
- [30] 李宗耀, 初秋, 车爽, 等. 少稀土组合磁极 Halbach 永磁同步电机性能和材料成本研究[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(12): 74-82.
- Li Z Y, Chu Q, Che S, et al. Research on performance and material cost of Halbach permanent magnet synchronous motor with less rare earth combined magnet poles [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(12): 74-82.
- [31] Zhang Z Y, Jhong K J, Cheng C W, et al. Metal 3D printing of synchronous reluctance motor [C]// 2016 IEEE International Conference on Industrial Technology, Taipei, China, 2016: 1125-1128.
- [32] Simpson N, North D J, Collins S M, et al. Additive manufacturing of shaped profile windings for minimal AC loss in electrical machines [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(3): 2510-2519.
- [33] Gargalis L, Madonna V, Giangrande P, et al. Additive manufacturing and testing of a soft magnetic rotor for a switched reluctance motor [J]. IEEE

- Access, 2020, 8: 206982-206991.
- [34] Lorenz F, Rudolph J, Wemer R. Design of 3D printed high performance windings for switched reluctance machines [C]// 2018 XIII International Conference on Electrical Machines, Alexandroupoli, Greece, 2018; 2451-2457.
- [35] Pecotich J, Klink D, Heins G, et al. Additively manufactured electric machine conductors with integrated end turn cooling [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2025, 61(4): 6183-6192.
- [36] Sixel W, Liu M D, Nellis G, et al. Ceramic 3D printed direct winding heat exchangers for improving electric machine thermal management [C]// 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Baltimore, MD, USA, 2019; 769-776.
- [37] Selema A, Ibrahim M N, Vansompel H, et al. Detection and mitigation of hotspots in electrical machine windings using 3D printing technology [C]// 2024 International Conference on Electrical Machines, Torino, Italy, 2024; 1-7.
- [38] Rautio T, Torbati-Sarraf H, Allam T, et al. Enhancement of electrical conductivity and corrosion resistance by gold-nickel coating of additively manufactured AlSi10Mg alloy [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 17: 521-536.
- [39] 徐磊, 朱孝勇, 张超, 等. 直线旋转永磁电机及其控制技术综述与新发展[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 1972-1984.
- Xu L, Zhu X Y, Zhang C, et al. Overview and new development of linear and rotary permanent magnet machines and control technologies [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 1972-1984.
- [40] 苗绪世, 李明, 伦淑娴. 新型陶瓷屏蔽套材料对屏蔽式永磁同步电机电磁热性能的影响研究[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(12): 1317-1326.
- Miao X S, Li M, Lun S X. Study on the effect of new ceramic shielding can material on the electromagnetic thermal properties of canned permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(12): 1317-1326.
- [41] Ralchev M, Mateev V, Marinova I. 3D printed designs for permanent magnets fixation on high speed rotors [C]// 2023 18th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems, Varna, Bulgaria, 2023; 1-4.
- [42] Wei Y, Nguyen V H, Kim W-J. A 3-D printed Halbach-cylinder motor with self-position sensing for precision motions [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2022, 27(3): 1489-1497.
- [43] Fuchslocher M, Albrecht T, Bargende M, et al. Development of alternative magnetic fixation technologies for axial flux machines [C]// 2022 12th International Electric Drives Production Conference, Regensburg, Germany, 2022; 1-6.
- [44] Parmar H, Liu X B, Gandha K, et al. Effects of magnetic field annealing on the hard magnetic properties of milled Nd-Fe-B powders [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2023, 587: 171328.
- [45] 史宏斌, 王嘉炜, 王艺潼, 等. 基于柱塞与螺杆结构的固体推进剂 3D 打印挤出成型对比分析[J]. 固体火箭技术, 2024, 47(6): 884-892.
- Shi H B, Wang J W, Wang Y T, et al. Comparative analysis of 3D printing extrusion molding for solid propellants based on plunger and screw [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2024, 47(6): 884-892.
- [46] Hossain M J, Schroeder P, McCann R A. Novel design of permanent magnet-assisted synchronous reluctance motor using metal additive manufacturing technology [C]// 2024 IEEE Green Technologies Conference, Springdale, AR, USA, 2024; 80-84.
- [47] 周游, 石超杰, 曲荣海, 等. 磁场调制永磁直线电机拓扑研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(4): 1469-1484.
- Zhou Y, Shi C J, Qu R H, et al. Overview of flux-modulation linear permanent magnet machines [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(4): 1469-1484.
- [48] 郑贝贝, 任建平. 基于增材制造的随形冷却水路注塑模具技术研究进展[J]. 塑料工业, 2025, 53(12): 7-14.
- Zheng B B, Ren J P. Research progress on injection molding mold technologies with conformal cooling water channels based on additive manufacturing [J]. China Plastics Industry, 2025, 53(12): 7-14.
- [49] Singh S, Payarou T, Boby M, et al. Cold-spray additive manufacturing of a petal-shaped surface permanent magnet traction motor [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(3): 3636-3648.
- [50] Chang T W, Huang P W, Huang W C, et al.

- Additive manufacturing high fault-tolerant axial flux variable reluctance resolver [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2023, 59(11): 1-5.
- [51] Wu S T, Huang P W, Chang T W, et al. Application of magnetic metal 3-D printing on the integration of axial-flow impeller fan motor design [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2021, 57(2): 1-5.
- [52] Sarap M, Kallaste A, Ghahfarokhi P S, et al. Analysis of advanced passive heatsinks for electrical machines enabled by additive manufacturing [C]// 2023 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis, Newcastle upon Tyne, United Kingdom, 2023: 1-6.
- [53] Cakal G, Hembel A, Sarlioglu B. Additively manufactured heat exchanger for improved cooling of electric machines [C]// 2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Detroit, MI, USA, 2022: 1-6.
- [54] Wiley C, Talebi D, Sankarraman S V, et al. Design of a carbon fiber rotor in a dual rotor axial flux motor for electric aircraft [C]// 2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Detroit, MI, USA, 2022: 1-8.
- [55] Vahid S, Chowdhury T, Koushan S, et al. Electrical characteristics of additively manufactured hollow conductor coils with integrated heat pipes for electric aircraft applications [C]// 2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Detroit, MI, USA, 2022: 1-8.
- [56] 张鑫磊, 袁也, 陈洪胜, 等. 选区激光增材制造钛合金构件微结构设计及力学性能[J]. *航空学报*, 2025, 46(24): 271-283.
- Zhang X L, Yuan Y, Chen H S, et al. Microstructure design and mechanical properties of titanium alloy components for laser selective additive manufacturing [J]. *Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica*, 2025, 46(24): 271-283.
- [57] 李敏, 李林林, 周俊鹏. 基于改进型滑模变结构的永磁同步电机的无位置传感器矢量控制[J]. *电机与控制应用*, 2024, 51(2): 22-33.
- Li M, Li L L, Zhou J P. Sensorless vector control of PMSM based on improved sliding mode with variable structure [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2024, 51(2): 22-33.

收稿日期:2026-01-26

收到修改稿日期:2026-03-20

作者简介:

陈熙文(2002—),女,硕士研究生,研究方向为电机本体,3119454115@qq.com;

*通信作者:邱鑫(1985—),男,博士,副教授,研究方向为伺服控制、永磁电机智能驱动、三维打印控制系统及电动汽车电驱动系统等,qiuxin_nh@163.com。