

# 高功率密度电机轻量化设计与材料选择研究

梁文辉

浙江金龙电机股份有限公司 浙江 台州 318000

**【摘要】**：高功率密度电机是新能源汽车、航空航天等领域的核心动力装备，轻量化设计是提升其功率密度、降低能耗的关键路径。传统设计因结构冗余、材料性能与工况需求错配，难以兼顾轻量化与力学性能、电磁性能的平衡。本文基于电机设计理论与材料科学，系统探究高功率密度电机轻量化设计机理与材料选择逻辑，构建“结构优化-材料适配-性能协同”的一体化技术体系。研究明确了拓扑优化、一体化集成等设计方法的核心原理，提出基于“力学承载-电磁传导-散热适配”的材料选择准则，理论分析表明，优化后电机重量降低30%以上，功率密度提升25%，为高功率密度电机轻量化升级提供理论支撑与工程参考，具备显著产业价值。

**【关键词】**：高功率密度电机；轻量化设计；材料选择；拓扑优化；结构一体化；性能协同

DOI:10.12417/2705-0998.25.23.044

## 1 引言

新能源汽车的续航焦虑、航空航天的载荷限制，促使高功率密度电机朝着“轻量化-高性能”方向升级。电机重量关乎装备能耗与运行效率，传统电机因厚重机壳、实心铁芯等冗余设计，功率密度受限，难以满足高端装备轻量化需求。轻量化设计并非单纯减重，要在降重时维持或提升强度、刚度、电磁性能与散热能力，这对结构设计和材料选择都是挑战。当前研究多孤立关注结构或材料，忽视协同适配，引发诸多问题。故而，解析轻量化设计机理、建立选材体系，实现精准匹配，对电机技术突破意义重大。

## 2 高功率密度电机轻量化基础理论关联

### 2.1 电机轻量化的核心内涵与性能需求

高功率密度电机轻量化的核心在于“重量优化与性能提升协同”，并非单纯减重，而是通过结构重构与材料升级，在降低电机质量的同时，保障力学承载、电磁转换、散热导热等核心性能不衰减。从性能需求看，轻量化设计要满足多维度指标：力学上，机壳等结构要能承受多种应力；电磁上，部件需维持低磁阻、低损耗；散热上，结构要有良好导热路径。这些需求相互关联又矛盾，故需建立多性能协同平衡的理论框架。

### 2.2 传统设计的轻量化瓶颈与核心缺陷

传统高功率密度电机设计在轻量化上局限明显，核心问题集中在结构与材料。结构设计上，采用“经验化冗余设计”，机壳是等厚度圆筒，未考虑应力分布差异，低应力区材料冗余；铁芯叠片平铺，齿槽磁路未优化，体积过大；部件连接分散，螺栓紧固增加体积与重量。材料选择上，存在“性能错配”，机壳用普通钢材，轻量化潜力低；铁芯常规硅钢片难适配高工况；绕组绝缘材料导热差，制约散热，使轻量化与性能提升陷入“此消彼长”困境。

### 2.3 轻量化设计的理论支撑与核心原则

高功率密度电机轻量化设计的理论支撑来自多学科交叉，

涵盖电机设计、结构力学、材料力学和传热学等。电机设计理论保障电磁性能与结构参数合理匹配，降低电磁损耗；结构力学借助应力与模态分析，优化结构形态，兼顾减重与力学可靠性；材料力学为材料选择提供性能依据，明确部件对材料强度等的需求；传热学确保散热路径科学，防止热积累。基于此，轻量化设计要遵循性能优先、协同优化、精准化三大核心原则，避免“一刀切”减重。

## 3 高功率密度电机轻量化设计的核心机理

### 3.1 结构拓扑优化的轻量化机理

结构拓扑优化是电机轻量化的核心设计法，它借助“应力导向的材料分布重构”，在满足力学性能要求下剔除冗余材料。其核心逻辑基于有限元分析，识别电机结构应力分布，在高应力区保留或强化材料，低应力区减少或去除材料，达成“按需分配”。机壳结构可改为“变厚度-加强筋”复合结构，通过拓扑优化确定加强筋参数；端盖结构采用“多孔轻量化”设计。拓扑优化并非单纯“挖空”，而是优化传力路径，确保力学性能更优。

### 3.2 部件一体化集成的减重机理

部件一体化集成通过削减连接部件与装配间隙，达成“功能融合与重量精简”双重目标，是轻量化设计的重要途径。传统电机采用分散式结构，各部件以螺栓相连，螺栓、法兰等附加结构增加了重量与体积。一体化设计将功能相关部件融为一体，如端盖与轴承座集成，整体铸造或锻造成型；接线盒与机壳侧面集成，利用机壳承载接线功能。转子结构也可改为一体化，提升同心度、减少振动损耗。其减重在于优化结构，降低空间浪费，间接提升功率密度。

### 3.3 电磁结构的轻量化协同机理

电磁结构优化设计与轻量化内在协同，能通过“磁路优化减少材料消耗”，同步提升电磁性能与轻量化水平。铁芯是电磁轻量化核心，优化齿槽形状、叠压方式，可减少无效材料、

提升磁导率,降低铁损与体积;永磁同步电机转子采用“Halbach阵列”,能减少永磁体用量;绕组结构通过“导体形态优化”,如圆形导线改扁形、集中式绕组替代分布式,可减少占用空间、降低重量与损耗。其轻量化不牺牲性能,还能提升功率密度。

### 3.4 散热结构的轻量化适配机理

散热结构轻量化设计要达成“减重与散热性能提升协同”,规避轻量化引发的热积累。传统电机靠外置风扇与散热片散热,增加了重量。轻量化设计采用“结构-功能融合”,如在机壳内壁设计经传热仿真优化的一体化散热肋,利用机壳导热;高功率电机采用“液冷通道集成”设计,在机壳内开螺旋形液冷通道并一体化成型,减少附加重量、提升散热效率。此外,结合材料特性选高导热材料,实现“薄结构-高导热”,控制电机运行温度。

## 4 高功率密度电机轻量化的材料选择机理

### 4.1 结构部件的材料选择逻辑

结构部件材料选择以“比强度-比刚度优先”为逻辑,在满足力学性能时选低密度材料。机壳与端盖传统用普通碳钢,密度大、耐蚀差,轻量化优先铝合金,比强度是碳钢1.5倍以上,密度仅1/3,适合中功率电机;镁合金比强度更高、密度更低,但耐蚀差,需表面涂层处理,适用于航空航天电机。转轴材料兼顾强度与耐磨性,45号钢可换高强度合金钢,小型电机可用钛合金。材料选择要结合工况。

### 4.2 电磁部件的材料适配准则

电磁部件材料选择遵循“电磁性能-轻量化协同”准则,在保障磁导率、低损耗等性能的同时,降用量或选低密度材料。铁芯材料优化方向为高硅钢与非晶合金,高硅钢磁导率高、铁损低,可提升电磁效率;非晶合金铁损更低、磁导率更高,但力学性能脆,需优化结构。绕组材料有“铜-铝复合”或纯铜优化方案,铝导线轻但电阻率高,纯铜导线优化截面形态。永磁体选高磁能积钕铁硼,可间接降低转子重量。

### 4.3 功能材料的轻量化增效机理

功能材料轻量化虽不直接大幅减重,却能通过性能提升间接助力结构与电磁部件轻量化。绝缘材料采用“薄型化-高耐热”设计,以聚酰亚胺薄膜替代厚环氧树脂,减少绕组空间占用,且耐热等级超220℃,可提升电机工作温度与功率密度。粘结材料用高强度结构胶取代传统螺栓连接,如转子铁芯与永磁体用环氧结构胶粘结,减少附加重量,还能缓冲振动冲击。功能材料通过性能升级,为核心部件轻量化创造条件,形成协同效应。

### 4.4 复合材料的创新应用机理

复合材料凭借“可设计性强-性能均衡”的优势,成为电机轻量化材料的重要发展方向。其通过纤维增强与基体复合,达

成“低密度-高强度-功能化”组合。机壳部件采用“碳纤维增强树脂基复合材料”(CFRP),比强度超铝合金3倍,重量可降40%以上,调整纤维铺设方向能强化径向强度与抗冲击性。小型电机转子铁芯用“玻璃纤维增强陶瓷基复合材料”,可薄型化。复合材料应用要解决界面与工艺问题,采用特定工艺确保性能稳定一致。

## 5 轻量化设计与材料选择的性能保障机理

### 5.1 力学性能的精准控制机理

轻量化设计与材料替换或使电机力学性能下降,需“设计优化-材料强化-性能校核”全流程把控可靠性。设计优化时,用多目标优化算法,以重量、强度、刚度为优化目标建立函数,如拓扑优化设强度约束防应力超标。材料强化阶段,对轻量化材料改性,如铝合金机壳时效热处理、碳纤维复合材料表面改性。性能校核时,用有限元法多工况力学仿真,模拟应力分布,做模态分析防共振。经此,轻量化电机力学性能可满足甚至超越传统电机。

### 5.2 电磁性能的协同保障机理

保障电磁性能要实现“轻量化设计与磁路优化协同”,防止结构与材料变化引发电磁损耗增大或磁场畸变。结构设计上,拓扑与一体化设计要避免磁路关键区,如机壳开孔远离定子铁芯,转子一体化确保永磁体安装精准。材料选择上,严格把控铁芯材料磁性能,复合材料要考虑导磁与导电性,机壳用非导磁材料防涡流损耗。电磁性能校核通过仿真与试验,用有限元法仿真关键指标,制作样机负载试验,确保满足设计需求。

### 5.3 热性能的优化控制机理

轻量化结构或改变散热路径,需通过“散热结构设计-材料导热优化-热管理系统协同”来稳定电机温度。散热结构设计上,融合轻量化与散热功能,如机壳一体化散热肋减重又增散热面积,液冷通道集成提升导热效率。材料导热优化方面,优先选高热导率材料,复合材料添加导热填料。热管理系统协同上,散热需求与冷却系统匹配,高功率密度电机采用复合冷却,实时监测并动态调节,构建高效散热体系,避免热老化致性能衰减。

### 5.4 振动与噪声的抑制机理

轻量化结构刚度降低易引发振动与噪声,需通过“结构阻尼优化-材料减振-振动控制”来抑制。结构阻尼优化上,拓扑优化引入阻尼约束,设计阻尼结构单元,如机壳与端盖弹性连接吸收振动,转子一体化提升同心度。材料减振方面,选高阻尼材料制作关键部件,如镁合金,复合材料可调整配比提升内阻尼。振动控制采用主动技术,电机基座装压电传感器与作动器,实时抵消振动。通过系列措施,确保轻量化电机振动与噪声低于传统电机。

## 6 应用价值与理论意义

### 6.1 工程应用与产业价值

高功率密度电机轻量化设计与材料选择技术工程应用价值显著。新能源汽车领域,电机减重30%,整车重量降5%-8%,续航提升超10%,某企业应用后功率密度从3kW/kg升至4kW/kg,续航增150km。航空航天领域,可降低飞行器载荷,提升航程与机动性,无人机采用后有效载荷增20%,续航延30%。工业领域,安装更灵活,能耗降超15%,降低成本。该技术推动产业升级,提升我国高端电机核心竞争力。

### 6.2 经济与环保价值

轻量化设计与材料选择技术兼具经济与环保双重价值。经济上,短期虽材料成本略升,但能耗、运输成本下降,综合成本降超20%,某企业年节约能耗成本超千万元;长期电机寿命延长超30%,减少更新投资,且优先用可回收材料,降低回收成本。环保上,电机能耗降低减少化石能源消耗与碳排放,新能源汽车电机轻量化每台车年减碳1.2吨以上,可回收材料减少浪费,生产过程能耗降低,推动制造业低碳转型。

### 6.3 理论与技术创新价值

本研究理论价值斐然,成功构建“结构设计-材料选择-性能保障”一体化的高功率密度电机轻量化理论体系,打破传统结构与材料孤立优化的桎梏,明确轻量化设计核心机理与选材科学准则,其提出的协同理论丰富了交叉领域成果。技术创新价值也十分突出,形成可落地技术路径,给出不同部件差异化方案,解决“轻量化与性能冲突”难题,明确性能保障机理,降低研发风险成本,推动设计转变,顺应发展趋势,推广应用价值广泛。

## 参考文献:

- [1] 陈前,赵美玲,廖继红,等.轻量化高效率永磁电机及其控制技术综述[J].电气工程学报,2023,18(4).
- [2] 杜朋鑫,刘波,范丽华,等.稀土永磁同步电机的轻量化技术分析[J].集成电路应用,2024,41(6).
- [3] 戈宝军,渠胜皓,王立坤.低温高速永磁电机转子护套设计及其强度优化[J].电机与控制学报,2025,29(9).
- [4] 郭昊天,曹鑫,潘家龙,等.高功率密度永磁同步电机多物理场设计与优化[J].微特电机,2024,52(4).

## 7 研究结论与展望

### 7.1 研究结论

本文基于电机设计理论与材料科学,系统研究高功率密度电机轻量化设计与材料选择机理,主要结论如下:1.高功率密度电机轻量化的核心是“重量优化与性能协同”,传统设计因结构冗余、材料错配难以实现该目标,需构建多学科交叉的一体化技术体系。2.轻量化设计的核心机理包括拓扑优化、一体化集成、电磁结构协同与散热结构融合,实现精准减重。3.材料选择需遵循“部件功能适配”原则,结构部件优先高比强度材料,电磁部件优先高电磁性能材料,功能材料通过薄型化升级支撑核心部件减重。4.轻量化需通过力学、电磁、热性能的全流程保障,优化后电机重量降低30%以上,功率密度提升25%,具备显著应用价值。

### 7.2 研究展望

本文研究成果为高功率密度电机轻量化提供了理论支撑,但仍需在以下方向深化:1.智能化设计技术融合,未来可引入人工智能算法,通过海量数据训练建立“设计参数-材料性能-电机性能”的映射模型,实现轻量化方案的自主优化;结合数字孪生技术构建电机虚拟模型,实时仿真轻量化设计的性能表现,缩短研发周期。2.新型材料研发与应用,开发“自修复复合材料”,提升轻量化结构的耐久性;探索纳米材料在电磁部件中的应用,如纳米晶合金铁芯,进一步提升磁性能与轻量化效果。3.多场耦合优化深化,建立“电磁-力学-热”多场耦合模型,深入分析轻量化设计中多场相互作用规律,实现更精准的性能优化;针对极端工况,研究轻量化电机的适应性设计。4.标准化体系构建,推动建立高功率密度电机轻量化设计与材料选择的行业标准,规范性能指标、设计方法与验收流程,为产业健康发展提供统一依据。