

# 发电机定子铁芯叠片涡流损耗分布特性研究

陈子慧

(中船电机科技股份有限公司, 江苏 无锡 214000)

**摘要** 发电机定子铁芯叠片涡流损耗是影响电机效率的关键因素。本文系统研究了涡流损耗的形成机理与分布特性, 重点探讨了叠片结构参数、材料特性和绝缘性能对损耗的影响规律。通过理论分析结合有限元仿真, 揭示了硅钢片厚度、层间电阻及短路效应与涡流损耗的关联机制。研究表明, 优化叠片厚度、提升绝缘涂层的阻断能力以及控制加工工艺能有效抑制涡流损耗。实验验证进一步证实了理论模型的准确性, 为定子铁芯设计与材料选型提供了理论依据和工程优化方向。

**关键词** 发电机; 定子铁芯; 叠片; 涡流损耗; 分布特性

中图分类号: TM31

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.003

## 0 引言

涡流损耗是发电机定子铁芯能量损耗的重要组成部分, 直接影响电机效率与温升。随着电机高功率密度与高频化发展, 叠片铁芯的涡流损耗问题日益突出。本文聚焦定子铁芯叠片的涡流损耗分布特性, 从材料选择、结构参数及绝缘性能等多维度解析其作用机理, 揭示不同工况下涡流场的分布规律, 阐明叠片间短路与绝缘失效对损耗的非线性影响, 并提出综合优化策略。通过理论与实验结合, 旨在为提升电机能效与可靠性提供技术参考。

## 1 涡流损耗的形成机理

涡流损耗源于交变磁场作用下导体内部形成的闭合感应电流, 其能量耗散遵循焦耳—楞次定律。根据麦克斯韦方程组, 交变磁场在铁磁材料中产生的感应电动势可表述为:

$$P_e = \frac{\pi^2 f^2 B^2 d^2}{6\rho} \quad (1)$$

式(1)中,  $d$  为硅钢片厚度, m;  $\rho$  为材料电阻率,  $\Omega \cdot \text{m}$ 。式(1)表明, 涡流损耗与频率  $f$ 、磁感应强度  $B$  的平方成正比, 与电阻率  $\rho$  成反比<sup>[1]</sup>。

硅钢片作为导磁材料, 其电阻率直接决定涡流损耗水平。典型硅钢材料 3.1 wt%Si 的电阻率为  $46.10 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ , 较普通碳钢  $12 \mu\Omega \cdot \text{cm}$  提升约 3.8 倍。当磁感应强度从 1.0 T 增至 1.5 T 时, 涡流损耗占比由 35% 跃升至 62%, 这与磁场能量密度与的正相关性直接关联。材料厚度对损耗具有显著非线性影响: 0.35 mm 硅钢片在 50 Hz 工况下涡流损耗为 0.55 W/kg, 而 0.5 mm 片厚时增至 0.75 W/kg, 厚度增加 43% 导致损耗上升 36%。

## 2 叠片结构对涡流损耗的影响

### 2.1 硅钢片厚度与材料选择

硅钢片厚度与涡流损耗呈平方正比关系, 其数学关系可表示为:

$$P_e \propto \frac{f^2 \cdot B^2 \cdot d^2}{\rho} \quad (2)$$

式(2)中,  $d$  为硅钢片厚度, mm;  $f$  为工作频率 Hz。0.35 mm 硅钢片在 50 Hz 工况下涡流损耗为 0.55 W/kg, 而 0.5 mm 片厚时增至 0.75 W/kg, 厚度增加 43% 导致损耗上升 36%。新能源汽车驱动电机领域已广泛采用 0.25 ~ 0.30 mm 超薄硅钢片, 部分企业正在研发 0.2 mm 规格, 其涡流损耗较传统 0.35 mm 硅钢降低 19% ~ 27%。

硅含量是调控电阻率的关键因素, 3.1 wt% 高硅钢的电阻率达  $46.10 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ , 较普通硅钢  $12 \mu\Omega \cdot \text{cm}$  提升 3.8 倍, 由此降低涡流损耗 22%。但硅含量需控制在 5% 以下以防止材料脆化, 同时需平衡磁导率与磁感强度——硅含量每增加 1%, 饱和磁感强度下降约 0.03 T。

### 2.2 层间电阻的临界效应

1. 层间电阻是表征硅钢片绝缘涂层阻断横向电流能力的核心参数, 其临界阈值可由下式确定:

$$R_c = \frac{\rho_{ins} \cdot t_{ins}}{A_{contact}} \quad (3)$$

式(3)中,  $\rho_{ins}$  为涂层电阻率,  $\Omega \cdot \text{m}$ ;  $t_{ins}$  为涂层厚度, m;  $A_{contact}$  为叠片有效接触面积,  $\text{m}^2$ 。当层间电阻低于  $50 \Omega \cdot \text{mm}^2$  时, 叠片间漏电流路径形成, 导致涡流损耗非线性增长。实验数据显示, 层间电阻从  $300 \Omega \cdot \text{mm}^2$  降至  $0.01 \Omega \cdot \text{mm}^2$  时, 定子总损耗增加 19.7%, 其中涡流损耗占比提升 15.8%。

2. 临界电阻的物理本质在于绝缘涂层对横向电流的阻断能力。涂层电阻率与厚度呈正相关性, 典型半有机涂层电阻率范围为  $1 \times 10^{12} \sim 1 \times 10^{14} \Omega \cdot \text{m}$ , 厚度为  $1 \sim 3 \mu\text{m}$ 。当涂层厚度减薄至  $0.5 \mu\text{m}$  或存在局部破损时, 层间电阻可骤降至  $10 \Omega \cdot \text{mm}^2$  以下, 引发跨层涡流集中效应, 局部涡流密度可达正常区域的 3 倍。通过优化涂层成分如添加氮化硼纳米片可将电阻率提升至  $1 \times 10^{16} \Omega \cdot \text{m}$ , 同时维持涂层机械强度  $\geq 50 \text{ MPa}$ , 实现损耗抑制与工艺稳定性的平衡<sup>[2]</sup>。

### 2.3 叠片间短路的影响

1. 叠片间短路主要由冲裁毛刺或绝缘涂层破损引发, 其直接后果是形成跨层导电通路。当毛刺高度超过  $20 \mu\text{m}$  时, 短路概率提升至 78%, 导致局部涡流密度骤增至正常区域的 3 倍, 引发磁场畸变和能量损耗集中。实验表明, 短路率每增加 10%, 定子铁损上升  $12\% \sim 15\%$ , 温升梯度达  $8 \sim 12 \text{ }^\circ\text{C}$ , 且在磁密  $1.5 \text{ T}$  工况下, 短路区域的损耗占比可达总损耗的 35% 以上。

2. 涂层破损面积超过  $0.5 \text{ mm}^2$  时, 横向电阻率从  $300 \Omega \cdot \text{mm}^2$  降至  $5 \Omega \cdot \text{mm}^2$  以下, 促使涡流路径跨越叠片边界, 形成宏观电流环。此类短路会导致高频谐波磁场下铁芯局部磁饱和, 磁滞损耗同步增加  $18\% \sim 22\%$ 。此外, 短路区域的温升加速绝缘涂层热老化, 电阻率以  $0.3\%/^\circ\text{C}$  的速率衰减, 进一步扩大短路范围。通过优化冲裁工艺毛刺高度  $\leq 10 \mu\text{m}$  和强化涂层耐压性能击穿电压  $\geq 1000 \text{ V}$ , 可将叠片短路率控制在 0.5% 以下, 降低温升波动幅度至  $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

## 3 涡流场分析与优化策略

### 3.1 涡流场分析方法

涡流场分析采用有限元法 (FEM) 结合瞬态磁场求解器, 通过离散化叠片铁芯为六面体或四面体单元, 求解麦克斯韦方程组中的矢量磁位方程:

$$\nabla \times (\nu \nabla \times A) = -\sigma (\nabla \phi + \frac{\partial A}{\partial t}) \quad (4)$$

式 (4) 中,  $\nu$  为磁阻率,  $\sigma$  为电导率,  $A$  为矢量磁位,  $\phi$  为标量电位。通过仿真表明, 叠片边缘因磁通畸变和层间漏磁效应, 涡流密度显著高于中心区域。在某  $500 \text{ W}$  永磁同步电机模型分析中, 边缘区域涡流密度达  $2.35 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ , 较中心区域  $1.60 \times 10^6 \text{ A/m}^2$  提升 47%。如表 1 所示。

在分析过程中需考虑磁导率非线性和谐波磁场影响。瞬态求解器以时间步长  $\Delta t = 10 \mu\text{s}$  迭代计算, 捕捉磁场动态变化。层间漏磁效应导致磁力线跨越叠片边界, 横向磁通分量占比达  $12\% \sim 18\%$ , 进一步加剧边缘

涡流聚集。有限元模型需设置周期性边界条件以减少计算规模, 典型网格密度为  $0.5 \text{ mm}$ , 误差控制在  $< 3\%$ 。通过对比谐波分量 (5 次、7 次) 对涡流密度的贡献, 发现高频谐波  $400 \text{ Hz}$  引起的损耗增幅可达低频  $50 \text{ Hz}$  的 3.2 倍。

表 1 涡流密度分布表

区域	涡流密度 ( $\text{A/m}^2$ )	相对中心区增幅
边缘区	$2.35 \times 10^6$	47%
过渡区	$1.92 \times 10^6$	20%
中心区	$1.60 \times 10^6$	—

### 3.2 异常涡流机制与抑制

异常涡流源于材料内部晶界缺陷与加工残余应力的协同作用。晶界处原子排列失序导致局部电导率下降约 18%, 形成涡流热点区域。加工应力超过材料屈服强度 30% 时, 晶格畸变会诱发各向异性磁导率分布, 使涡流密度梯度增加至正常区域的 2.3 倍。通过脉冲磁场处理可使非晶合金磁畴偏转  $15^\circ$ , 显著降低过渡区磁阻损耗 30%, 同时将晶界缺陷密度控制在  $5 \times 10^4/\text{cm}^2$  以下<sup>[3]</sup>。

抑制工艺需多维度协同: 激光焊接采用低热输入模式并辅以氩气吹扫冷却, 将热影响区宽度压缩至  $0.4 \text{ mm}$  以内, 抑制晶粒粗化至  $5 \mu\text{m}$  级。同步优化晶界结构, 添加  $0.3 \sim 0.5 \text{ wt}\%$  稀土元素如钇、铈可提升晶界结合能至  $6.8 \text{ eV}$ , 阻断跨晶界涡流路径扩展。该复合调控体系可将局部涡流强度降低至基准值的 45%, 同时维持材料磁导率  $\geq 1.2 \times 10^4 \text{ H/m}$ 。

### 3.3 优化策略

1. 材料优化: 采用  $0.2 \text{ mm}$  超薄硅钢片结合原子层沉积 (ALD) 技术制备的  $2 \text{ nm}$  氧化铝涂层, 通过抑制横向电流路径, 将涡流损耗降低 22%。其中, 氧化铝涂层介电强度达  $550 \text{ V}/\mu\text{m}$ , 热导率  $5.2 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ , 有效平衡绝缘与散热需求。同时, 硅钢片晶界处引入稀土元素如  $0.3 \sim 0.5 \text{ wt}\%$  钇, 提升晶界结合能至  $6.8 \text{ eV}$ , 阻断跨晶界涡流扩展。

2. 工艺控制: 冲裁工艺采用激光切割与精密模具设计, 毛刺高度压缩至  $\leq 20 \mu\text{m}$ , 降低叠片短路率至 0.5% 以下。叠压阶段通过动态压力调节系统, 将压力控制在  $15 \sim 20 \text{ MPa}$  范围内, 确保绝缘涂层破损面积  $< 0.05 \text{ mm}^2$ , 横向电阻率稳定在  $300 \Omega \cdot \text{mm}^2$  以上。同步优化退火工艺, 退火温度偏差  $\leq \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ , 晶粒尺寸控制在  $5 \mu\text{m}$  级, 磁滞损耗降低 18%。

3. 绝缘强化: 石墨烯 / 氮化硼异质结涂层通过垂直堆叠结构实现层间电阻率突破  $1 \times 10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$ , 横向

电流密度耐受能力达 200 A/mm<sup>2</sup>。其中, 氮化硼层厚度 1.7 nm, 石墨烯层厚 0.3 nm, 异质界面形成 C-N 键合密度  $1.5 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ , 阻断电子跨层迁移<sup>[4]</sup>。

## 4 实验验证

### 4.1 实验设计

实验选用 50W250 无取向硅钢材料, 其硅含量 3.1%, 电阻率  $46.10 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ , 基材厚度 0.5 mm。在 Brockhaus FT600 层间电阻测试仪中设置动态压力调节系统, 接触压力控制在 1 200 ~ 1 400 N, 接触面积标准化为 100 mm<sup>2</sup>, 确保测量重复性误差  $\leq 2\%$ 。通过调节氧化铝涂层厚度 0.5 ~ 3  $\mu\text{m}$  及热固化工工艺参数, 制备 5 组层间电阻样本: 0.01  $\Omega \cdot \text{mm}^2$ 、10  $\Omega \cdot \text{mm}^2$ 、50  $\Omega \cdot \text{mm}^2$ 、150  $\Omega \cdot \text{mm}^2$ 、300  $\Omega \cdot \text{mm}^2$ , 覆盖绝缘失效至优质涂层的全工况范围。

采用 SK300 交直流磁测设备, 配置双 H 线圈和磁通密度传感器, 测量频率范围 50 ~ 1 000 Hz, 基波磁密 1.0 ~ 1.5 T, 测试精度  $\pm 0.5\%$ 。实验前对硅钢片进行周期性退磁处理 (退磁场强  $\geq 300 \text{ A/m}$ ), 消除剩磁对磁滞损耗的影响。损耗分离采用铁损模型, 其中涡流损耗系数  $K_c$  通过磁密-损耗曲线拟合确定, 磁滞损耗系数  $k_h$  基于 B-H 回线积分计算, 附加损耗系数  $k_e$  设为 0 以排除干扰。数据采集系统以 10  $\mu\text{s}$  时间分辨率同步记录层间电阻、磁密波形及损耗分量, 每组样本重复测量 3 次取均值, 确保置信度  $\geq 95\%$ 。

### 4.2 实验结果

实验数据揭示了层间电阻与涡流损耗的非线性关系 (见表 2)。当层间电阻  $\geq 50 \Omega \cdot \text{mm}^2$  时, 涡流损耗增幅稳定在 0.22% ~ 2.1%, 表明绝缘涂层有效约束涡流于单层叠片内; 电阻降至 1  $\Omega \cdot \text{mm}^2$  以下时, 跨层电流路径形成, 涡流损耗增幅跃升至 15.8% ~ 19.7%。总铁损增幅中, 涡流损耗占比从基准工况的 58% 升至 73%, 验证了横向漏电流对损耗的主导作用<sup>[5]</sup>。

表 2 层间电阻与涡流损耗的非线性关系表

层间电阻 ( $\Omega \cdot \text{mm}^2$ )	涡流损耗 (W/kg)	总铁损增幅 (%)
300	1.111	基准值
50	1.123	0.22
1	1.287	15.8
0.1	1.305	17.5
0.01	1.330	19.7

在电阻 0.01  $\Omega \cdot \text{mm}^2$  工况下, 叠片间形成宏观导电网络, 涡流路径长度扩展至正常值的 2.3 倍, 导致损耗密度激增。可见, 该工况下磁滞损耗占比从 42% 降至 27%, 而附加损耗含异常涡流占比提升至 18%。高

频谐波 400 Hz 测试显示, 0.01  $\Omega \cdot \text{mm}^2$  样本的涡流损耗对频率敏感度较基准样本提高 3.2 倍, 证实绝缘失效加剧高频谐波损耗。

### 4.3 实验分析

实验数据表明, 当层间电阻达到 50  $\Omega \cdot \text{mm}^2$  的临界阈值时, 涡流损耗增幅稳定在 0.22% ~ 2.1%, 验证了临界效应理论中绝缘涂层对横向漏电流的抑制作用。此时叠片间横向电场强度低于 0.8 kV/m, 涡流路径被严格限制在单层硅钢片内, 跨层导电网络未形成。有限元仿真显示, 该工况下磁滞损耗占比稳定在 42% ~ 45%, 附加损耗受谐波磁场影响波动范围  $\leq \pm 0.7 \text{ W/kg}$ , 与实验数据偏差  $\leq 1.3\%$ 。

当短路率超过 5% 时, 晶界缺陷与叠片间导电通道形成宏观电流网络, 导致涡流路径长度扩展至正常工况的 2.3 倍, 损耗偏离线性规律。此时层间电阻  $\leq 1 \Omega \cdot \text{mm}^2$  的样本中, 附加损耗占比从基准值的 18% 跃升至 28%, 且高频谐波 400 Hz 损耗敏感度提升 3.2 倍。有限元模型通过自适应网格细化及材料参数离散化, 将模拟误差压缩至 4.3% 以内。模型验证表明, 晶界网络导电率非线性变化是损耗非线性化的主要诱因。

## 5 结论

本研究系统揭示了定子铁芯叠片涡流损耗的关键影响因素及作用机理, 明确了硅钢片厚度、绝缘性能与加工工艺的协同优化路径。研究表明, 通过材料选型、结构设计及工艺控制可显著约束涡流路径, 降低能量损耗。基于理论与实验验证的优化策略为高效电机设计提供了重要依据。未来研究需进一步探索高频工况下新型复合材料的应用潜力, 结合智能化制造技术提升叠片铁芯的综合性能, 推动电机系统向高效、低损耗方向持续发展, 助力新能源技术革新与产业升级。

## 参考文献:

- [1] 王群, 陈曦. 线性压缩机电机损耗和温度分布特性研究 [J]. 制冷学报, 2025, 46(01): 124-131.
- [2] 刘晶, 张经销. 桁架式变压器铁芯叠片机双孔定位系统研究 [J]. 电气技术, 2025, 26(01): 80-84.
- [3] 魏贞, 王宏伟. 永磁起动发电机在弱磁条件下磁场与涡流损耗分析 [J]. 南方农机, 2024, 55(15): 140-143.
- [4] 郁文威, 李勤, 霍英姐, 等. 阶梯式涡流场涡运动特性研究 [J]. 科学技术创新, 2023(25): 34-37.
- [5] 苏立, 毛成, 沈春和, 等. 混流式水轮机启动过程中涡流场与压力脉动分析研究 [J]. 云南水力发电, 2022, 38(11): 243-246.