

电机铁芯叠压工艺对性能影响分析

龚俊豪

贵州航天林泉电机有限公司 贵州 贵阳 550081

【摘要】：电机运行效率与能耗水平受铁芯叠压工艺质量制约，冲片叠压过程中存在毛刺、对齐偏差及绝缘涂层损伤等问题，易引发涡流损耗增加与磁通分布不均。通过优化冲压毛刺控制、改进绝缘处理、强化叠压定位精度及压力均匀控制，实现叠压结构一致性提升与磁路稳定性增强。改进后铁损明显降低，电机运行噪声与振动减小，整体能效水平得到提升。

【关键词】：电机铁芯；叠压工艺；铁损；磁性能；效率提升

DOI:10.12417/2705-0998.26.10.004

引言

电机铁芯作为能量转换核心结构，其内部叠压状态直接影响磁通分布与能量损耗水平。当前生产过程中，冲片加工精度波动、叠压对位偏移及绝缘层稳定性不足等现象较为常见，导致局部涡流损耗增加，运行噪声与振动问题突出。针对冲片毛刺引发的短路风险，采取精密冲裁与去毛刺处理，可减少局部磁场畸变；针对叠压偏移问题，引入高精度定位夹具与自动化叠压控制，可提升结构一致性；针对绝缘失效问题，优化涂层工艺与压力控制参数，可增强层间绝缘稳定性。多环节协同改进后，铁芯磁性能稳定性增强，运行损耗降低，整机运行状态趋于平稳。

1 冲片加工精度控制路径优化

1.1 冲裁边缘毛刺抑制技术

冲裁边缘质量直接影响铁芯叠压后的层间接触状态与局部电磁特性稳定性。采用高刚性精密冲裁系统配合微间隙控制工艺，通过优化凹凸模配合间隙，使剪切区应力分布更加均匀，从源头降低撕裂性毛刺产生概率。结合多级冲裁路径设计，将材料变形区与断裂区有效分离，减少边缘二次拉伸现象。引入在线表面检测与边缘轮廓识别技术，对冲裁过程中的微观缺陷进行实时反馈调节，实现冲裁参数动态修正。通过材料表面强化预处理工艺提升抗剪切能力，使冲裁断面形成更加稳定的光滑过渡层结构，从而降低局部涡流集中风险并改善叠压界面接触均匀性。

1.2 尺寸一致性校准方法

铁芯冲片尺寸一致性直接影响叠压后的同轴度与磁路对称性。采用多点同步测量与高频抽检结合方式，对冲片关键尺寸参数进行闭环控制，通过建立尺寸偏差数据库实现加工漂移趋势识别^[1]。结合热稳定补偿冲裁系统，对冲压过程中的模具热膨胀进行动态修正，减少长时间加工带来的尺寸累积误差。引入数字化视觉定位与边缘轮廓比对技术，对冲片轮廓进行亚毫米级校准处理，使批次间尺寸离散度显著降低。通过分级公差控制策略，将不同功能区域的尺寸精度要求进行差异化管理，使磁通通道区域保持更高一致性，从而优化整体磁性能分

布。

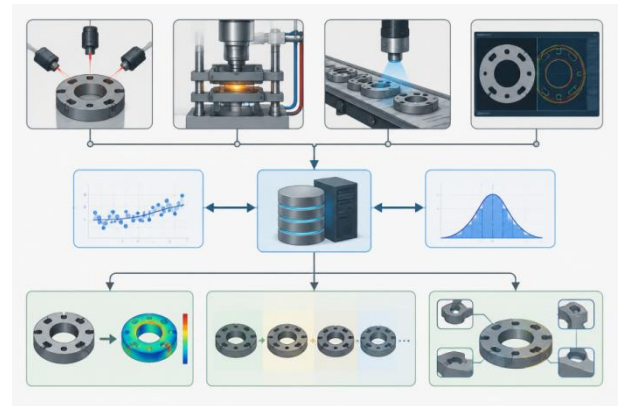


图1 铁芯冲片尺寸一致性闭环校准系统

1.3 冲压模具精度维护机制

冲压模具状态稳定性对冲片几何精度与断面质量具有决定性影响。通过构建模具磨损演化监测体系，对关键受力区域进行周期性形变检测，实现磨损趋势预判与维护节点前移。采用表面强化涂层技术提升模具抗磨损能力，并通过微结构优化减少冲击载荷集中效应。引入模具间隙自适应调整机构，使冲裁过程间隙保持在稳定区间内波动，避免因长期运行造成的精度漂移。结合振动信号与冲裁力曲线分析，对模具工作状态进行多维度评估，实现异常状态快速识别与参数修正，从结构层面保障冲裁过程连续稳定性与冲片一致性。

2 叠压定位结构稳定性提升方案

2.1 高精度定位夹具设计应用

叠压过程中定位夹具结构精度直接决定铁芯层间对中状态与整体几何稳定性。采用多基准协同定位结构，通过中心轴向约束与径向限位同步作用，使冲片在堆叠过程中保持稳定同轴分布状态。结合微调补偿机构，对夹具定位基准进行纳米级误差修正，使装配间隙控制在极小波动范围内。引入高刚性复合材料框架结构，降低长期载荷作用下的形变风险，提高定位系统结构刚度一致性。通过模块化夹持单元设计，使不同规格冲片能够在统一基准体系下实现快速切换，同时保持定位重复精度稳定。配合表面低摩擦涂层处理技术，减少叠压过程中的

微滑移现象，使层间对齐状态更加稳定连续，从结构层面提升铁芯整体磁路一致性。

2.2 自动对位叠压控制技术

叠压自动对位控制依托高精度传感识别与闭环控制体系，实现冲片层间位置的实时修正与动态对齐。通过视觉识别系统对冲片边缘特征进行高频采样分析，结合空间坐标重建算法，生成精准对位路径指令。叠压执行机构采用多轴联动驱动方式，在垂直压装过程中同步完成横向微调补偿，使层间偏差在叠压过程中逐步收敛。引入压力反馈控制模块，根据叠压阻力变化调整下压速率与定位补偿量，避免因局部卡滞造成结构偏移^[2]。结合数字孪生模型对叠压轨迹进行预演优化，使实际运行路径与理论最优路径高度匹配，从而提升整体叠压过程的连续性与一致性，减少结构累积误差对磁性性能分布的影响。

2.3 层间偏移误差修正方法

层间偏移误差主要来源于冲片加工微差与叠压过程动态扰动，需通过多阶段修正机制进行逐级控制。采用分层校准策略，在初始叠压阶段进行粗定位修正，通过机械限位结构快速消除大范围偏移量。在中间叠压阶段引入微位移补偿系统，对累积误差进行逐层分配调整，使偏移趋势逐步回归基准中心位置。末端叠压阶段通过高灵敏位移检测单元进行精细修正，使残余误差收敛至极低水平。结合数据驱动误差模型，对历史叠压偏移规律进行特征提取，形成预测性补偿参数库，实现误差前置修正。通过弹性缓冲结构与动态约束系统协同作用，降低外部振动与压力波动对层间位置稳定性的干扰，使叠压结构呈现更高的一致性连续性。

3 层间绝缘可靠性强化路径

3.1 绝缘涂层均匀性优化处理

绝缘涂层均匀性直接影响铁芯层间电阻稳定性与涡流抑制能力。采用多参数协同涂布控制体系，通过雾化粒径分布优化与喷涂轨迹精细规划，使涂层在冲片表面形成连续且厚度一致的覆盖结构。结合表面能调控预处理技术，提高涂层附着界面润湿一致性，减少局部堆积与空隙缺陷。引入实时厚度检测与反馈调节机制，对涂层沉积速率进行动态修正，使微观厚度偏差控制在极小范围内。通过分区喷涂能量分配策略，对不同几何区域实施差异化沉积控制，改善边缘区域与中心区域涂层一致性差异。利用纳米级填充材料增强涂层结构致密性，使绝缘层内部孔隙率显著降低，从结构层面提升层间电气隔离稳定性与长期可靠性。

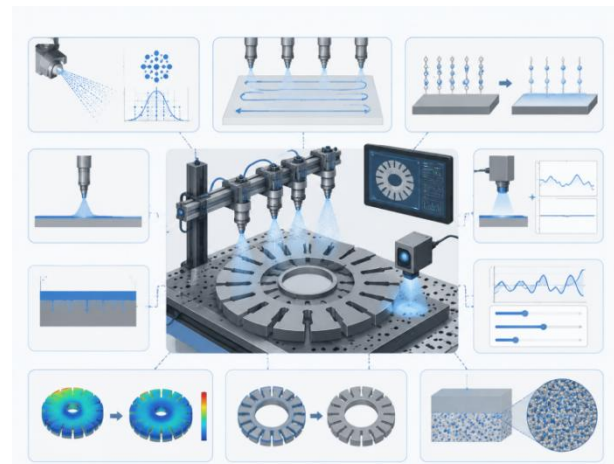


图2 绝缘涂层均匀性协同控制与实时反馈优化系统

3.2 叠压压力梯度控制方法

叠压过程中压力分布不均会导致绝缘层局部受损与电气性能退化。采用分段式压力加载控制策略，通过多级压力曲线设计实现载荷平滑递进，使冲片在叠压过程中受力状态保持渐进式变化。结合多点压力传感阵列，对叠压界面受力分布进行实时监测，并通过反馈控制系统对压力执行机构进行动态调整，避免局部应力集中。引入柔性缓冲介质结构，在压力传递路径中形成能量分散层，使瞬时冲击载荷得到有效削弱^[3]。通过叠压速度与压力协同调控机制，实现压装过程动力学参数同步优化，使层间接触状态更加均匀稳定。结合有限元仿真结果对压力分布模型进行修正，使实际压力梯度更贴近理想均匀状态，从力学层面提升绝缘层完整性与结构稳定性。

3.3 层间击穿风险抑制机制

层间击穿风险主要源于绝缘薄弱区域与局部电场集中效应，需要构建多维度协同抑制体系。通过优化冲片边缘结构与涂层连续性设计，减少尖角效应引起的电场畸变，使电场分布趋于均匀化。引入高介电强度复合绝缘材料，提高层间耐电压能力，并通过微结构调控降低局部电荷积累概率。结合多尺度缺陷检测技术，对叠压后的潜在绝缘薄弱点进行空间分布识别，实现风险区域精准定位。通过电场仿真驱动结构优化方法，对磁路与绝缘路径进行协同设计，使高电场区域得到有效分散。引入环境适应性控制机制，对温升、湿度及振动耦合影响进行抑制，降低绝缘性能衰减速率，从多物理场协同角度提升层间抗击穿能力与长期运行稳定性。

4 磁性能与损耗控制优化措施

4.1 涡流损耗抑制结构设计

涡流损耗来源于铁芯内部交变磁场作用下的感应电流闭环路径，需要通过结构层级优化实现有效抑制。采用薄片化叠压结构设计思路，通过减小单片厚度降低感应电流回路面积，使涡流形成路径被显著切割与分散。结合高电阻率绝缘隔离层

布局优化,使层间电流传导路径受阻,增强电磁隔离效果。引入斜接缝与错位叠压结构,使磁通路径由连续闭合转变为多段分散传递状态,减少局部磁密集中现象。通过局部开槽与微结构调控设计,对高频磁场区域进行路径引导,使涡流能量向低密度区域扩散消散。结合材料磁导率梯度设计理念,使磁通分布与电流感应路径实现解耦,从结构层面降低高频损耗积累,提高铁芯在复杂工况下的能量转换效率。

4.2 磁通分布均匀化调整策略

磁通分布不均会导致局部磁饱和与附加损耗增加,需要通过结构与材料协同优化实现均衡控制。采用磁路对称性优化设计,通过几何结构均衡调整,使磁通路径长度与截面积保持一致性分布,减少局部磁密峰值区域形成。结合分区磁导率调节方法,对不同磁通密集区域进行材料参数匹配优化,使磁场强度呈渐变式过渡。引入多层叠压微偏移控制技术,通过微小错位结构打散磁通集中路径,实现磁力线扩散均匀化^[4]。利用有限元磁场仿真对磁通分布进行多场耦合优化分析,对局部饱和区域进行结构修正,使磁通流动路径更加平滑连续。结合动态运行工况适配机制,使磁通分布在不同负载条件下保持稳定状态,从磁场结构层面降低能量损耗波动,提高整体运行稳定性。

4.3 铁损检测与反馈调节机制

铁损形成与磁滞损耗及涡流损耗耦合相关,需要通过多维度监测与闭环调节实现动态控制。采用高频损耗检测系统,对铁芯运行状态下的磁滞曲线与能量损耗特征进行实时采集,通过频域分析提取损耗变化趋势。结合多点温升监测与磁场强度分布数据融合分析,实现铁损空间分布识别与异常区域定位。引入自适应控制模型,根据损耗变化规律动态调整叠压压力、磁通路径参数及结构约束条件,使损耗增长趋势得到抑制。通过数据驱动优化算法建立铁损预测模型,实现运行参数与损耗变化之间的关联映射。结合反馈调节执行机构,对关键影响因素进行实时修正,使铁损水平在不同工况下保持稳定受控状态,从运行全过程实现能量损耗的精细化管理与持续优化。

5 结构稳定性与运行状态优化成效

5.1 振动噪声控制表现提升

铁芯叠压结构优化后,整体刚度分布趋于均匀,局部松动与微间隙显著减少,使电磁激励引起的机械振动传播路径得到有效抑制。

通过叠压密实度提升与层间接触一致性增强,结构共振频率偏移范围收敛,避免与电磁激励频率发生耦合放大效应。结合阻尼特性增强设计,使振动能量在结构内部快速衰减,减少外部辐射噪声强度。磁通分布均匀化进一步降低周期性力波动幅度,使转矩脉动引发的机械振动趋于平稳状态。叠压定位精度提升带来结构对称性改善,使不平衡力矩显著下降,整体运行过程中的噪声谱线趋于平滑,宽频噪声成分明显减少,运行声学表现更加稳定。

5.2 温升与能耗下降表现分析

铁芯叠压质量提升后,层间电阻稳定性增强,涡流损耗路径被有效抑制,使局部发热源分布更加均匀。磁通分布优化降低磁滞循环损耗强度,使单位周期能量损耗显著下降。通过结构紧密性提升,热传导路径更加连续,内部热阻降低,热量扩散效率提升,使温度梯度趋于平缓^[5]。叠压压力均匀控制减少局部高压接触点引起的热点集中现象,使热源分布由集中型向分散型转变。铁损控制机制与损耗反馈调节协同作用,使运行状态下能量转换效率提升,输入功率中无效损耗比例下降,整体能耗水平呈现稳定下降趋势,温升曲线变化速率减缓,高负载工况下热稳定性增强。

5.3 整体运行稳定性改进表现

结构精度与磁性性能协同优化后,铁芯运行状态的动态波动幅度明显减小,机械、电磁与热场之间的耦合扰动得到有效削弱。叠压一致性提升使磁路对称性增强,转矩输出波动降低,运行过程呈现更高连续性。绝缘结构稳定性增强降低局部放电与击穿风险,使长期运行可靠性显著提升。振动与热耦合效应减弱,使结构疲劳累积速率下降,运行周期内性能衰减趋势趋缓。多参数反馈调节机制使关键运行指标保持在稳定区间内波动,异常状态触发概率降低。整体运行表现趋向平稳化与可控化,在复杂负载变化条件下仍能维持较高的能量转换一致性与结构稳定性。

6 结语

电机铁芯叠压工艺的优化路径集中体现于冲片精度、叠压结构、绝缘稳定与磁性性能协同控制等多维度协同提升机制。通过结构一致性增强与多场耦合调控,使损耗分布趋于均衡,运行状态稳定性明显改善,整体能效水平与可靠性同步提升,工艺参数控制精度与动态响应能力进一步强化。

参考文献:

- [1] 张颖.面向永磁同步电机铁芯封装工艺的优化研究[D].江南大学,2025.
- [2] 黄秀东,郭硕,杜冰,等.非晶合金铁芯粘接-冲裁-叠压工艺研究[J].塑性工程学报,2024,31(2):51-57.
- [3] 吴学鹏,王超,王峰.油压机数字化改造在电机铁芯制造中的应用[J].轨道交通装备与技术,2023,(S2):113-115.
- [4] 刘雪东.胶粘型电机铁芯点胶喷射装置研发及胶点力学性能探究[D].燕山大学,2023.
- [5] 于书汉.Fe基非晶合金在电机铁芯应用的研究[D].沈阳工业大学,2023.