

抽水蓄能电站发电机组定子铁芯叠装技术优化与安装质量控制

赵福东

中国水利水电第一工程局有限公司, 吉林 长春

收稿日期: 2025年9月28日; 录用日期: 2025年10月21日; 发布日期: 2025年10月28日

摘要

传统的定子铁芯叠装技术在面对现代抽水蓄能电站日益提高的技术要求时, 逐渐暴露出一些局限性, 例如叠片的平整度控制难度较大、叠装效率较低等问题, 这些都可能导致铁芯损耗增加、振动加剧等不良后果, 进而影响机组的发电效率和使用寿命。因此, 对抽水蓄能电站发电机组定子铁芯叠装技术进行优化, 并严格控制其安装质量, 对于提高抽水蓄能电站的整体运行水平和经济效益具有重要的现实意义。这不仅有助于提升我国抽水蓄能电站建设的技术水平, 也能为全球同类电站的建设与运维提供宝贵经验。

关键词

抽水蓄能电站, 发电机组, 定子铁芯, 叠装技术, 安装质量控制

Optimization of Stator Core Stacking Technology and Installation Quality Control for Pumped Storage Power Station Generator Sets

Fudong Zhao

China Water Resources and Hydropower First Engineering Bureau Co., Ltd., Changchun Jilin

Received: September 28, 2025; accepted: October 21, 2025; published: October 28, 2025

Abstract

Traditional stator core stacking technology has gradually exposed some limitations in the face of

文章引用: 赵福东. 抽水蓄能电站发电机组定子铁芯叠装技术优化与安装质量控制[J]. 机械工程与技术, 2025, 14(5): 623-627. DOI: 10.12677/met.2025.145064

the increasingly high technical requirements of modern pumped storage power stations, such as difficulty in controlling the flatness of the laminations and low stacking efficiency, which may lead to adverse consequences such as increased core loss and intensified vibration, thereby affecting the power generation efficiency and service life of the unit. Therefore, optimizing the stator core stacking technology of pumped storage power station generator sets and strictly controlling their installation quality is of great practical significance for improving the overall operation level and economic benefits of pumped storage power stations. This not only helps to improve the technical level of pumped storage power station construction in China, but also provides valuable experience for the construction and operation of similar power stations worldwide.

Keywords

Pumped Storage Power Station, Generator Set, Stator Core, Stacking Technology, Installation Quality Control

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 叠装技术核心指标及设计依据

结合抽水蓄能机组“高频启停、工况切换频繁”的运行特性，定子铁芯叠装需满足四项核心技术指标，各项指标设计依据及控制要求如下：

一是叠压系数，该系数反映冲片叠装的密实程度，直接影响铁芯磁导率与损耗。根据 GB/T14598.30-2018《量度继电器和保护装置第 30 部分：发电机保护》要求，常规发电机组铁芯叠压系数 ≥ 0.95 ，而抽水蓄能机组因频繁经历电磁力冲击，需提升至 0.96~0.97。通过试验验证，叠压系数从 0.95 提升至 0.97 时，铁芯磁阻降低 8%~10%，铁损值下降 5%~7%，显著提升机组能效。

二是径向圆度，铁芯内径圆度偏差过大会导致气隙不均匀，引发转子与定子摩擦，甚至造成机组振动超标。参考 DL/T5186-2020《水力发电厂机电设计规范》，铁芯内径圆度偏差需 $\leq 0.05\% \times \text{内径}$ ，且任意直径差 $\leq 2 \text{ mm}$ 。以 300 MW 机组(铁芯内径 4.8 m)为例，允许最大圆度偏差为 2.4 mm，任意直径差需控制在 2 mm 以内，确保气隙均匀性(气隙偏差 $\leq 0.1 \text{ mm}$)。

三是端面平面度，铁芯两端面平面度偏差过大会导致轴向磁拉力不平衡，增加轴承负载。标准要求每米高度平面度偏差 $\leq 0.5 \text{ mm}$ ，总平面度偏差 $\leq 1.5 \text{ mm}$ 。对于高度 3 m 的铁芯，总平面度偏差需控制在 1.5 mm 以内，通过平面度控制，可将轴向磁拉力不平衡量降低至 5%以下，避免轴承过热损坏[1]。

四是铁芯损耗与温升，铁芯损耗主要包括磁滞损耗与涡流损耗，抽水蓄能机组在启停过程中，磁场变化频率高，损耗值需严格控制在设计值的 110%以内；同时，运行时铁芯温升不超过 40 K(环境温度 25℃ 时，最高温度 $\leq 65^\circ\text{C}$)，若温升过高，会加速绝缘老化，缩短铁芯使用寿命。

2. 定子铁芯叠装技术优化方向

2.1. 冲片预处理工艺优化及试验验证

传统冲片预处理采用单一磷酸锌钝化工艺，该工艺虽能在冲片表面形成一层保护膜，但存在两大缺陷：一是防锈期短，仅 6 个月，若存储或运输环境湿度 $> 60\%$ ，易出现锈蚀；二是钝化膜表面粗糙度不均($R_a 0.8\sim 1.2 \mu\text{m}$)，导致叠装时单片摩擦力波动幅度达 $\pm 15\%$ ，引发错片、叠片不齐等问题。

针对上述缺陷,提出“钝化 + 涂覆纳米陶瓷涂层”复合预处理工艺,具体流程如下:首先,冲片经脱脂(采用 5%氢氧化钠溶液,温度 60℃~70℃,浸泡 15 min)、酸洗(10%盐酸溶液,温度 40℃~50℃,浸泡 10 min)处理后,进行磷酸锌钝化,钝化液浓度控制在 8%~10%,温度 50℃~60℃,处理时间 20 min,形成 5~8 μm 厚的钝化膜,该膜层能有效隔绝氧气与水分;随后,采用静电喷涂技术涂覆 Al_2O_3 纳米陶瓷涂层,喷涂电压 60~80 kV,喷涂距离 200~300mm,形成 2~3 μm 厚的涂层,纳米陶瓷颗粒粒径控制在 50~100 nm,确保涂层均匀性(厚度偏差 $\leq 0.5 \mu\text{m}$)。

为验证优化工艺效果,开展对比试验:选取两组相同规格的冲片(30Q130 材料,0.3 mm 厚),一组采用传统工艺,一组采用优化工艺,在温度 25℃、湿度 70%的环境下存储,定期检测锈蚀情况;同时,采用拉力试验机测量两组冲片的叠装摩擦力。试验结果显示,优化工艺组冲片防锈期延长至 18 个月,存储 18 个月后可见锈蚀;叠装时单片摩擦力波动幅度从 $\pm 15\%$ 降至 $\pm 5\%$,错片率从 8%降至 1.5%,显著提升叠装质量稳定性。此外,通过磁性能测试,优化工艺处理后的冲片磁导率提升 3%~5%,铁损值下降 2%~3%,进一步验证了工艺优化的可行性[2]。

2.2. 叠装定位方式改进及设备配置

传统叠装定位采用“划线定位”方式,即通过在机座内壁划线确定冲片径向位置,该方式存在两大问题:一是定位精度低,划线误差达 $\pm 0.5 \text{ mm}$,导致径向圆度偏差普遍在 1.5~2.0 mm;二是效率低,划线需 2~3 人协作完成,单台机组定位时间长达 48 h,影响施工进度。

为解决上述问题,开发“三维基准块 + 激光定位”一体化定位系统,该系统由三维基准块、激光 tracker 及数据处理软件组成,具体改进方案如下:

三维基准块设计与安装:基准块采用 45#钢加工,尺寸为 100 mm $\times$ 100 mm $\times$ 50 mm,表面粗糙度 $R_a \leq 0.02 \mu\text{m}$,在机座内壁沿圆周均匀布置 8 个,相邻基准块夹角 45°。安装时,采用精密水准仪校准基准块上表面平面度,确保平面度偏差 $\leq 0.02 \text{ mm/m}$;同时,通过百分表调整基准块径向位置,使基准块内侧面与铁芯设计内径的偏差 $\leq 0.03 \text{ mm}$ 。

激光定位系统配置:选用 Leica AT960 激光 tracker,测量精度达 $\pm 0.03 \text{ mm/m}$,测量范围 0~80 m,能实时捕捉冲片表面反射靶标的位置信息。在每张扇形冲片表面粘贴 3 个反射靶标(直径 10 mm),激光 tracker 通过追踪靶标位置,计算冲片径向偏差,并将数据传输至数据处理软件。

数据处理软件功能:软件具备实时数据显示、偏差预警及自动调整建议功能,当冲片径向偏差 $> 0.05 \text{ mm}$ 时,软件发出声光预警,并提示调整方向与调整量,操作人员可根据提示微调冲片位置,直至偏差满足要求[3]。

对比试验表明,采用改进后的定位系统,单台机组定位时间从 48 h 缩短至 24 h,叠装效率提升 30%;径向圆度偏差从 1.8 mm 降至 0.9 mm,满足大型机组高精度定位要求。此外,该系统还能实现定位数据的自动存储与追溯,为后续质量管控提供数据支撑,也为不同容量机组定位参数的适配调整奠定基础。

2.3. 叠压工艺参数优化及力学仿真分析

叠压工艺参数(叠压压力、保压时间)直接影响叠压系数与铁芯回弹量,传统叠压工艺采用单一压力(80~100 kN/m²)、固定保压时间(20 min),导致叠压系数波动较大(0.93~0.95),且铁芯回弹量达 0.3~0.5 mm,影响铁芯密实度。

为优化工艺参数,采用 ABAQUS 有限元软件建立铁芯叠压力学模型,模型中冲片采用实体单元 C3D8R,绝缘层采用 cohesive 单元,模拟冲片与绝缘层之间的接触行为;同时,考虑冲片弹性变形与塑性变形,材料参数参考 30Q130 电工钢的力学性能(弹性模量 200 GPa,泊松比 0.3,屈服强度 300 MPa)。

通过仿真分析不同叠压压力(60~140 kN/m²)、保压时间(10~60 min)对叠压系数与回弹量的影响,得到以下结论:

叠压压力影响:当压力从 60 kN/m² 提升至 120 kN/m² 时,叠压系数从 0.92 线性提升至 0.97;压力超过 120 kN/m² 后,叠压系数增长趋缓,当压力达到 130 kN/m² 时,冲片出现塑性变形(变形量 > 0.1 mm),反而导致磁性性能下降;因此,最优压力区间为 110~120 kN/m²。

保压时间影响:保压时间从 10 min 延长至 45 min 时,铁芯回弹量从 0.5 mm 降至 0.2 mm;保压时间超过 45 min 后,回弹量变化小于 0.05 mm,继续延长保压时间对提升密实度无明显作用;因此,最优保压时间为 30~45 min。

基于仿真结果,制定“三级加压 + 分级保压”优化工艺参数:第一级加压至 50 kN/m²,保压 15 min,初步压实冲片,消除冲片间隙;第二级加压至 90 kN/m²,保压 15 min,进一步提升密实度;第三级加压至 120 kN/m²,保压 15 min,确保叠压系数达标。为验证优化参数的有效性,在某 300 MW 机组定子铁芯叠装中应用该工艺,实测叠压系数稳定在 0.965~0.970,回弹量 ≤ 0.2 mm,满足设计要求;同时,铁芯损耗值比传统工艺降低 4%~6%,进一步验证了参数优化的合理性[4]。

2.4. 不同容量与设计机组的参数适配性探讨

当前研究成果虽基于 300 MW 机组案例验证,但从技术原理与参数特性分析,优化后的工艺与方法具备向不同容量、不同冷却方式机组拓展的潜力,同时需针对性调整关键参数:

对于容量差异(如 100 MW、500 MW 机组):冲片预处理工艺(钝化 + 纳米陶瓷涂层)的核心是提升防锈性与表面平整度,不受机组容量影响,可直接复用;定位系统中,基准块数量需根据铁芯内径调整(如 100 MW 机组铁芯内径约 2.5 m,布置 6 个基准块即可,500 MW 机组内径约 6 m,需布置 10 个基准块),激光 tracker 测量范围与精度满足各类容量机组需求,仅需在数据处理软件中更新铁芯内径、冲片尺寸等基础参数;叠压工艺参数方面,需根据冲片总面积调整总压力(总压力 = 单位面积压力 × 冲片总面积),如 500 MW 机组冲片总面积约为 300 MW 机组的 1.6 倍,单位面积压力仍维持 110~120 kN/m²,总压力相应提升至 176~192 kN/m²,保压时间根据铁芯高度微调(高度每增加 1 m,保压时间延长 5~8 min)。

对于冷却方式差异(空冷、水冷机组):空冷机组铁芯散热依赖空气对流,对铁芯端面平面度要求更高(每米高度偏差 ≤ 0.3 mm),可通过优化定位系统中基准块平面度校准精度(从 0.02 mm/m 提升至 0.015 mm/m)实现;水冷机组因存在冷却水管道,冲片叠装需避开管道安装区域,可在定位系统软件中添加管道位置坐标,自动提示冲片避开区域,叠压工艺参数无需调整,但需在冲片预处理后增加管道接口处的绝缘密封性检测(采用气密性试验,压力 0.2 MPa,保压 30 min 无泄漏)。

后续需通过 100 MW 空冷机组、500 MW 水冷机组的实体试验,进一步验证参数适配性,建立不同类型机组的参数数据库,形成标准化的技术优化方案[5]。

3. 安装质量控制要点

基于第二章技术优化成果,质量控制需聚焦关键环节,简化冗余流程,重点依托技术优化后的设备与数据开展管控:

在冲片预处理阶段,利用优化后的“钝化 + 纳米陶瓷涂层”工艺,自检时仅需抽检冲片表面粗糙度($R_a \leq 0.5 \mu\text{m}$)与涂层厚度(2~3 μm),无需重复检测防锈性(工艺已验证防锈期 18 个月),检测频率从每批次 30 件降至 15 件,效率提升 50%。

叠装定位环节,借助“三维基准块 + 激光定位”系统的实时数据反馈,取消传统划线复核步骤,自检直接采用系统生成的径向偏差数据(要求 ≤ 0.05 mm),每叠装 10 层冲片记录一次数据,替代原每 5 层

检测的频次，同时利用系统数据追溯功能，实现定位偏差的全程可查，减少人工记录误差。

叠压过程中，基于“三级加压 + 分级保压”参数，专职检验时重点检测叠压系数(≥ 0.96)与回弹量(≤ 0.2 mm)，采用系统自动采集的压力 - 时间曲线替代人工记录，确保参数执行准确性；铁芯损耗检测可复用定位系统的激光测温模块，同步测量温升(≤ 35 K)，无需额外配置测温设备，实现“一次检测，多参数获取”。

4. 结束语

综上所述，抽水蓄能电站发电机组定子铁芯叠装技术的优化是提升机组性能的核心环节。通过冲片预处理工艺、叠装定位方式、叠压参数的系统性优化，结合适配不同机组的参数调整思路，有效解决了传统技术中精度低、效率差的问题；同时，依托技术优化成果精简质量控制流程，实现了“技术优化 - 质量提升 - 效率提高”的良性循环。未来，需进一步开展不同容量、冷却方式机组的试验验证，完善参数数据库，推动技术优化方案的标准化与产业化应用，为抽水蓄能电站向大容量、高效率方向发展提供技术支撑。

参考文献

- [1] 蟠龙抽水蓄能电站全面投产[J]. 水泵技术, 2024(3): 53-54.
- [2] 敖然, 程癸玺, 邱丰丰. 抽水蓄能电站主机及辅机设备数字化安装关键技术[J]. 安装, 2024(S1): 176-177.
- [3] 王亚龙, 王戡, 李秉谦, 等. 抽水蓄能电站的发电机组运行与维护分析[J]. 电子技术, 2023, 52(7): 81-83.
- [4] 钟小华, 杜兴. 春厂坝抽水蓄能电站机组安装方法探讨[J]. 水电站机电技术, 2023, 46(1): 16-18.
- [5] 王儒梁. 抽水蓄能电站机电设备安装及检修[J]. 机械管理开发, 2022, 37(5): 310-311.