

地铁牵引整流机组运行中温度异常的成因分析与处理对策

张奋崇

深圳地铁运营集团有限公司运营总部 广东 深圳 518000

【摘要】：地铁牵引整流机组在运行过程中经常出现温度异常现象，可能导致设备过热、效率下降和系统故障。温度异常成因包括负载波动、冷却系统效率下降及内部元件老化等因素。通过对运行数据监测、温升分析和故障模拟，可以识别关键影响因素，并制定针对性处理措施，如优化冷却策略、加强设备维护和调整运行参数。实施措施后，机组温度保持在安全范围内，设备稳定性和运行效率显著提升，为地铁牵引系统提供可靠的运行保障。

【关键词】：牵引整流机组；温度异常；成因分析；处理措施；设备稳定性

DOI:10.12417/2705-0998.26.07.036

引言

地铁牵引整流机组在城市轨道交通中承担电能转换和动力供应的核心任务，其运行状态直接影响列车供电稳定性和安全性。温度异常现象时有发生，不仅可能引发设备故障，还可能降低系统效率。分析温度异常成因，掌握关键影响因素，是保证设备可靠运行的重要环节。通过对温升特性、负载变化和冷却系统性能的综合分析，可以提出有效处理策略，降低设备过热风险，实现机组运行优化。研究温度异常问题的机理及对策，有助于提升地铁牵引系统的安全性和效率，为后续技术改进提供数据支撑和实践经验。

1 温度异常现象识别

1.1 运行监测数据分析

地铁牵引整流机组运行中温度数据的连续监测可以揭示机组内部热分布特性及运行状态变化规律。通过对不同工况下的电流、电压和功率参数与温度曲线的关联分析，可识别温升异常的具体时段和幅度。对历史监测数据进行趋势分析和统计处理，可以发现机组在高负载运行或低速启动阶段的温度波动特征。同时，引入智能数据处理技术和多维数据可视化方法，可对实时温度异常进行快速定位，并区分突发性异常与长期累积性异常，为精准诊断提供数据支撑，实现温度异常的早期发现和定量评估。

1.2 温度异常类型分类

温度异常表现形式多样，可根据温度升高的幅度、持续时间及分布特征进行分类。短时峰值异常多与瞬时负载变化或瞬态电流冲击相关，而持续性高温异常可能与冷却系统效率下降或关键元件老化密切相关^[1]。通过建立温度异常类型数据库，可对不同异常模式进行特征化描述，并通过聚类分析识别潜在关联因素。分类体系不仅能够为后续成因分析提供基础，也可以在机组运行过程中实现针对性监控策略的部署，将不同类型的温度异常与运行条件和设备状态紧密结合，提高异常识别精度和可靠性。

1.3 异常频率与规律研究

分析机组温度异常的发生频率和规律性，有助于识别潜在系统薄弱环节。通过长期数据采集与统计分析，可计算异常发生率、集中时间段及周期性特征，揭示异常与负载波动、季节温度变化、运行环境及设备老化的相关性。同时，利用时间序列分析和频域分析方法，可以检测异常出现的潜在趋势和周期性模式，为动态调整机组运行策略提供依据。异常频率与规律的深入研究还能够为设备维护周期优化、故障预警算法设计以及运行安全管理提供科学支撑，提高整流机组运行的安全性和经济性。

2 关键影响因素探讨

2.1 负载波动对温升的影响

地铁牵引整流机组在不同运行工况下承受的负载变化直接影响内部功率消耗和热量产生。瞬时负载突增会导致导体和半导体器件温度快速上升，增加局部热应力，从而形成温度峰值；而持续负载波动则会加快机组整体热惯性变化，影响温度恢复速率。通过建立负载—温升耦合模型，可分析不同负载模式下机组关键部件的热响应特性，并利用动态负载仿真识别温度敏感区域。负载波动对温升的影响不仅与电流幅值相关，还与切换频率、脉冲持续时间及负载分布均衡性密切联系，高精度监测和模型分析能够为优化运行策略和热管理措施提供科学依据，提高温控精度和安全性。

2.2 冷却系统效率下降原因

冷却系统的效率是维持整流机组温度稳定的核心因素，其性能下降主要表现为散热能力减弱和流体循环受阻^[2]。管路堵塞、换热器结垢或散热风机效率下降都会降低热量传递效率，导致机组内部温度上升。冷却系统效率下降还可能与冷却液热力参数变化及传感器反馈延迟有关，形成局部过热区和温度梯度增大现象。通过流体动力学分析和换热效率建模，可以量化冷却系统在不同运行条件下的散热能力，并对关键节点进行优化设计或控制策略调整，从而有效降低温度异常风险，确保机组持续运行的可靠性。

2.3 内部元件老化及散热特性

牵引整流机组的关键元件在长期运行中存在性能退化现象,如半导体器件导通电阻增加、绝缘材料热导率下降及接触点热阻增大,这些老化特性直接影响机组热平衡状态。元件老化导致散热路径受阻,局部温度易出现积聚,形成温度异常热点。通过热分析和元件老化模型,可以预测关键部件的温升趋势,评估长期运行下的热稳定性。散热特性与机组布局、导热结构及材料热性能紧密关联,对内部热流分布进行优化设计,可减缓老化效应带来的温升风险,提高设备运行寿命和整体可靠性。

3 温度异常诊断方法

3.1 实时监测与数据采集

牵引整流机组的温度异常诊断首先依赖于高精度实时监测和全面数据采集体系。温度传感器、热电偶及红外测温设备在关键元件和散热区域布置,能够捕捉微小温度变化和瞬态热事件。实时监测不仅涵盖整流桥、滤波器和功率半导体元件的温度数据,还包括冷却流体温度、风道压力及环境温度变化信息,通过多维数据融合,实现热场动态全景监控。数据采集系统需具备高频采样能力和长时间存储能力,并通过网络实时传输至数据处理平台,以支撑后续的异常模式识别和趋势分析。同时,应用先进的传感器自校准算法和信号滤波技术,可提升测量精度,避免噪声干扰对温度异常诊断的影响。数据采集过程与机组运行状态紧密耦合,能够在负载波动、启停循环及不同运行环境条件下捕获温度变化规律,为温升模型建立、异常类型识别和早期预警提供可靠数据基础。

3.2 温升模拟与建模分析

温升模拟与建模分析通过物理建模和数值仿真相结合,构建牵引整流机组热力学行为与运行工况的定量关系。热网络模型、有限元分析和流体动力学方法被用来刻画元件内部热传导、对流及散热效率,分析不同负载、环境温度和冷却条件下机组温度分布。模拟过程中通过引入元件材料热性能退化参数和热惯性特性,可预测长期运行对热平衡状态的影响,识别易出现热点的关键区域。温升建模还可与运行监测数据进行对比校正,通过参数优化实现模型精度提升,使仿真结果能够真实反映机组动态温度响应^[3]。结合多场耦合分析,可评估负载波动、冷却效率下降及内部元件老化对温度异常的贡献度,为温控策略优化和结构改进提供科学依据,并形成可量化的温度异常判定指标体系,实现诊断的精细化与可靠化。

3.3 故障预测与预警技术

故障预测与预警技术依托大数据分析、机器学习和物理模型相结合的方式,构建牵引整流机组温度异常的预测系统。通过对历史运行数据、温度曲线及负载变化记录进行特征提取和模式识别,可建立多维度预测模型,提前识别潜在温度异常趋

势。应用深度学习算法和时序分析方法,可模拟不同运行情景下的温升响应,并实时计算关键部件的安全裕度,触发预警信号。预警系统同时结合热力学模型和散热能力分析,实现温度异常的因果分析,明确温升来源及影响路径。高精度故障预测能够在温度超过安全阈值之前提出运行调整和冷却干预措施,从而降低机组过热风险。系统可输出动态热风险等级、局部热点位置及预防策略建议,为维护调度和运行控制提供科学依据,提升牵引整流机组运行安全性、稳定性与效率。

4 处理措施制定与实施

4.1 冷却策略优化

冷却策略的优化是确保牵引整流机组在复杂运行环境下温度稳定的核心措施。通过分析机组热分布特性和关键元件热敏感度,可对散热系统的结构和控制方案进行优化调整。优化方案包括冷却流体循环路径的再设计、流量调节控制以及热交换器效率提升等。采用多级温控和分区控制策略,可根据负载变化和局部温升情况动态调节冷却能力,实现热点区域的精准降温。结合智能化控制系统,可实时采集机组温度、冷却液温度及流速数据,通过热负荷计算和预测模型对冷却策略进行自适应调整,提高冷却效率并减少能耗。同时,引入新型高导热材料和散热结构优化设计,提升整体热传导能力,使机组在高负载或长期运行条件下温度保持在安全范围内。优化后的冷却策略能够对不同运行工况实现差异化控制,增强机组温度调节精度,降低因温升异常引发的潜在故障风险,确保整流机组持续稳定运行。

4.2 设备维护与更换方案

设备维护与更换方案是控制温度异常的重要环节,需从元件寿命预测、性能退化评估及维护周期优化三个方面制定。通过建立关键元件老化模型,可定量分析功率半导体器件、电容及散热结构的性能衰减趋势,确定维护和更换的优先顺序。维护方案包括清理散热通道、检查冷却系统管路及风机性能、检测接触点热阻及绝缘材料完整性等措施,保证散热路径通畅和热传导效率。更换方案应结合元件热特性和系统运行要求,选用高热导、耐高温的新型器件替代老化元件,提升系统整体散热能力和稳定性^[4]。建立智能化维护管理系统,可对维护和更换周期进行动态调整,根据实时温度数据和负载变化预测潜在过热风险,实现精准维护和预防性更换。此方案通过科学量化的维护策略和材料性能优化,实现温控管理与设备可靠性双重提升,降低因设备老化导致的温度异常发生概率。

4.3 运行参数调整与控制策略

运行参数调整与控制策略是牵引整流机组温度管理的重要手段,通过优化电流、电压、功率分配和启动模式,实现热负荷与散热能力的平衡。针对高负载区和关键元件,采用分时段功率调节和动态负载分配策略,降低瞬态温升幅度。控制策

略结合实时温度监测与预测模型,可在温升接近阈值前自动调整运行参数,如调节整流电流分配、优化PWM控制方式及冷却系统响应速率,降低热积聚风险。应用智能控制系统和多变量优化算法,可对不同运行工况进行预测性调控,实现温度均衡和系统稳定性优化。通过数据驱动的闭环控制,可对异常温升进行快速响应,调整负载和冷却策略,确保关键元件温度维持在安全范围。高精度运行参数调整与控制策略与冷却优化及维护方案协同作用,可显著提升整流机组在复杂工况下的温控能力和整体可靠性。

5 处理效果评估与经验总结

5.1 温度控制效果验证

温度控制效果通过对机组关键元件和散热区域的实时温度监测数据进行分析,评估优化措施实施后的实际效果。数据表明,优化后的冷却策略与运行参数调整能够有效降低局部温升幅度,缩短温度恢复时间,减小热点积聚现象。通过对比不同运行工况下温度曲线,可验证温控方案在高负载和长时间连续运行条件下的适应性。结合温升模拟模型的预测结果与实际监测数据,可进一步量化温度控制精度和安全裕度,为后续控制策略优化提供依据。温度控制效果验证为整流机组的安全稳定运行提供科学支撑,确保关键元件维持在允许温度范围内。

5.2 运行稳定性提升评估

运行稳定性评估以机组连续运行的波动幅度、异常频率及故障发生率为指标,分析处理措施实施后的系统表现。通过长

期监测和数据分析可发现,冷却策略优化、设备维护及运行参数调整协同作用,使温度异常事件显著减少,负载波动对系统热平衡的影响得到有效缓解。温度波动减小,机组整体热响应更加均衡,提高了电能转换效率和供电稳定性^[5]。通过建立性能评价体系,可量化各类处理措施对系统稳定性的贡献,为进一步改进和优化提供依据,实现机组高效、安全、可靠运行。

5.3 处理对策优化经验积累

处理对策优化经验积累包括措施实施效果的数据分析、异常事件模式识别和控制策略改进。通过对优化冷却、维护更换及运行参数调整效果的跟踪,形成标准化的温控方案和操作规范。数据分析揭示温升异常的关键驱动因素,为控制策略的迭代优化提供科学依据。对不同工况和环境条件下的温度响应进行长期记录,可持续完善机组热管理体系,并提升热安全策略的适应性和精细化水平。经验积累实现了机组温控管理的科学化、规范化和智能化,提高设备可靠性和运行效率。

6 结语

地铁牵引整流机组温度管理措施实施后,温度异常事件发生率明显下降,关键部件温度维持在设计允许范围内,热响应特性改善,冷却系统与运行参数协同效应显现,提升机组整体热稳定性和供电可靠性。温度控制方案的实际验证表明,优化后的散热策略和控制机制提高了设备热负荷调节能力,保障了牵引系统在复杂工况下的稳定运行,满足高密度城市轨道交通的安全运行要求。

参考文献:

- [1] 舒立三,杨浩,赵鹤璇,等.大功率牵引整流机组用多端口直流变换器模型预测控制[J].科学技术与工程,2025,25(25):10719-10725.
- [2] 华敏,陈剑云,傅钦翠,等.基于动态相量法的地铁牵引整流机组谐波传递研究[J].铁道学报,2024,46(10):58-67.
- [3] 李明.基于MATLAB/Simulink牵引整流机组的仿真研究及应用[J].科技与创新,2024,(12):90-93.
- [4] 卢昊,李广军,李可扬.城市轨道交通牵引整流机组仿真系统的设计与研发[J].江苏理工学院学报,2023,29(04):87-93.
- [5] 王哲.地铁牵引供电数字孪生模型研究[D].北京交通大学,2023.