

负荷波动环境下地铁供电设备可靠性保障探析

刘莉 汤旖 王利明

成都地铁运营有限公司 成都 610051

【摘要】：城市轨道交通的快速发展使供电系统面临日益复杂的负荷波动工况。列车启停、多车同时制动及季节性客流变化导致供电设备承受频繁的电流冲击与电压波动，加速关键部件性能劣化。如何从设备选型、状态监测与运维策略层面构建适应性保障体系，成为提升地铁供电系统韧性的关键课题。基于此，以下对负荷波动环境下地铁供电设备可靠性保障进行了探讨，以供参考。

【关键词】：负荷波动环境；地铁供电设备；可靠性保障；探析

DOI:10.12417/2705-0998.26.11.036

引言

地铁供电系统作为城市轨道交通的“心脏”，其设备可靠性直接关系到运营安全与效率。随着客流密度波动与再生制动能量回馈加剧，供电负荷呈现高频次、大幅度的动态变化，对设备绝缘老化、热稳定性及保护配合提出严峻挑战。探析负荷波动环境下供电设备的失效机理与保障策略，具有重要的工程实践价值。

1 负荷波动环境概述

地铁供电系统的负荷波动环境是指由列车运行工况变化、客流时空分布不均以及再生制动能量回馈等因素共同作用所形成的动态电力负载状态。城市轨道交通具有运行间隔短、启停频繁、客流峰谷差异显著等特征，导致牵引供电负荷呈现剧烈且非线性的波动特征。在早高峰时段，列车密集发车与加速运行会使供电电流急剧攀升，而在平峰或低峰时段，负荷则显著下降，形成明显的周期性波动。此外，列车制动时产生的再生能量回馈至接触网，一方面可实现节能，另一方面却可能造成电压抬升与谐波污染，进一步加剧供电环境的复杂性与不确定性。这种负荷波动不仅使供电设备长期处于交变应力与热循环状态，还可能导致设备绝缘加速老化、触头磨损加剧、保护装置误动或拒动等问题。因此，深入理解负荷波动环境的形成机理与特征规律，是开展地铁供电设备可靠性保障研究的前提基础，也是制定针对性防护策略与优化运维方案的重要依据。

2 可靠性保障理论基础

2.1 可靠性评估的基本方法

可靠性评估是衡量设备在规定条件下、规定时间内完成规定功能能力的技术手段。其基本方法涵盖概率统计分析 with 工程经验判断两大路径。概率统计方法以故障率、平均无故障时间、可靠度函数等指标为核心，通过收集设备运行历史数据，建立寿命分布模型，量化设备在不同服役阶段的失效风险。工程分析法如故障模式与影响分析，则从系统功能分解出发，逐一识别设备各组件可能发生的故障模式及其对系统的影响程度，确定关键薄弱环节。此外，故障树分析通过逻辑门符号构建从顶

事件到底事件的因果链条，直观呈现多重故障组合导致系统失效的路径。可靠性框图将系统各单元按串并联关系连接，计算整体可靠度水平。

2.2 设备可靠性模型的建立

设备可靠性模型是对设备寿命特征与失效规律进行数学化抽象与系统化描述的工具。其建立过程首先需要明确设备的边界条件与功能定义，确定建模对象是单一设备还是子系统。随后，基于历史故障数据、加速老化试验结果或现场运行记录，选择合适的概率分布函数来描述设备失效时间分布，常用的包括指数分布、威布尔分布及正态分布等。模型建立过程中需考虑设备的运行环境、负载条件及维护策略等协变量因素，引入比例风险模型或加速失效时间模型，使模型更贴近实际工况。对于复杂设备，可采用分层建模思路，将设备分解为功能模块，分别建立子模型后再进行系统集成。

2.3 负荷波动对可靠性的影响机制

负荷波动对地铁供电设备可靠性的影响机制主要体现在热应力循环、电气应力冲击与机械疲劳累积三个方面。当负荷电流频繁变化时，设备内部导体与绝缘材料将经历反复的升温与冷却过程，产生热胀冷缩的交替变形，导致绝缘层与导体界面出现微裂纹或分层，加速绝缘老化与介电强度下降。电流冲击产生的瞬时大电流会在设备接触点产生高温电弧，造成触头材料熔融、转移与氧化，增加接触电阻，进一步加剧发热与损耗，形成恶性循环。负荷波动还会引起电压波动与谐波畸变，使保护装置面临复杂的电气环境，可能导致误动或拒动，破坏供电系统的选择性配合。此外，频繁的电磁应力冲击会使变压器铁芯磁滞损耗增大，绕组绝缘承受更高的电动力，加速机械疲劳与结构松动。

3 供电设备可靠性问题分析

3.1 设备自身设计缺陷

设备自身设计缺陷是影响供电可靠性的先天因素，往往在设备投运前就已埋下隐患。设计缺陷可能体现在材料选用不当，例如绝缘材料耐温等级不足、导电材料抗腐蚀性差，导

致设备在长期运行中加速老化。结构设计不合理也是常见问题，如散热通道狭窄、通风不良，造成设备内部热量积聚，温升超标，影响元器件寿命。电气参数匹配不当，如保护定值设置裕度不足，在故障工况下容易导致越级跳闸，扩大停电范围。此外，机械结构强度不足，如隔离开关触头弹簧压力衰减过快，会导致接触电阻增大，引发发热烧蚀。部分设备在设计时未充分考虑地铁运行环境的特殊性，如振动、潮湿、粉尘等因素，导致早期故障率偏高。针对设计缺陷，应在设备选型阶段加强技术审查，并要求供应商提供型式试验报告与运行经验反馈，从源头提升设备可靠性。

3.2 运行维护管理不足

运行维护管理不足是导致设备可靠性下降的常见人为因素，体现在制度执行、技术能力与资源配置等多个层面。检修计划若缺乏科学依据，仅凭经验或固定周期进行维护，容易造成“过修”浪费资源或“欠修”留下隐患。检修流程执行不严格，如未按工艺标准进行紧固力矩校验、清洁程度不达标，会直接降低检修质量。人员技能水平参差不齐，对新型设备原理与故障模式掌握不够，导致故障判断延误或误判，延长停电时间。工器具与检测设备管理不到位，如仪器未按期校准、专用工具缺失，影响检修精度与效率。备件管理混乱，库存信息不准确，紧急抢修时无法快速找到合适备件，延误恢复进度。此外，检修记录填写不规范，故障信息未有效归档分析，导致同类问题反复发生，无法形成经验反馈闭环。加强运行维护管理，需建立标准化作业流程、完善人员培训体系、优化备件库存策略，并借助信息化手段提升管理效率。

3.3 环境因素的干扰

环境因素是影响供电设备可靠性的外部诱因，具有不可控性与突发性特点。地铁供电系统所处环境复杂，隧道内高湿度、高粉尘环境容易导致绝缘子表面污秽积聚，在潮湿天气下引发闪络放电。季节性温差变化引起设备热胀冷缩，可能导致螺栓松动、触头接触不良，增加接触电阻，进而引发发热故障。雨水倒灌或渗漏可能导致电缆沟积水、开关柜受潮，引发短路或接地故障。鼠虫等小动物侵入设备内部，可能咬伤电缆绝缘或造成相间短路，是引发跳闸的常见原因。振动与冲击也是不可忽视的因素，列车运行产生的机械振动可能导致设备连接件松动、焊点开裂，尤其对安装于轨道旁的设备影响更为显著。外部施工或异物侵入，可能损伤电缆或架空线路，造成供电中断。针对环境干扰，应加强设备防护等级设计，改善运行环境条件，并建立环境监测与预警机制，提前采取防护措施，降低环境因素对设备可靠性的影响。

4 负荷波动环境下地铁供电设备可靠性保障措施

4.1 设备选型与优化配置策略

设备选型与优化配置是应对负荷波动环境、提升供电系统

可靠性的首要环节。在选型阶段，应优先选择具有较强过载能力、宽工作温度范围及良好热循环耐受性的设备，如采用热稳定性更高的真空断路器、具有抗谐波能力的干式变压器以及耐冲击电流的电缆附件。对于关键设备，应适当提高绝缘等级与额定容量，预留一定的安全裕度以应对负荷尖峰冲击。在配置策略上，应遵循冗余与分散相结合的原则，对牵引变电所、馈线开关等关键节点采用 N+1 或 N+2 冗余配置，确保单台设备故障时系统仍可正常运行。同时，通过优化供电分区与联络开关设置，实现负荷在相邻变电所之间的灵活转供，增强系统应对局部负荷突增的能力。

4.2 设备状态监测与故障预警技术

设备状态监测与故障预警技术是实现地铁供电设备从定期维修向状态维修转变的关键手段。监测系统应覆盖变压器、开关柜、电缆、整流器等核心设备，针对负荷波动环境下易退化的关键参数进行实时采集，包括局部放电信号、触头温度、电流谐波含量、绝缘介损及振动频谱等。传感层可采用光纤光栅温度传感器、高频电流互感器、超声波传感器等先进器件，实现对设备内部状态的精准感知。数据经边缘计算预处理后上传至云端平台，利用机器学习算法建立设备健康状态评估模型，通过对比历史数据与当前特征，识别异常趋势。当监测参数超过预设阈值或偏离正常波动范围时，系统自动触发预警，提示运维人员提前介入排查。同时，建立故障预测模型，结合负荷波动特征与设备退化规律，预测剩余使用寿命与最佳维修窗口。

4.3 负荷调节与平衡控制方法

负荷调节与平衡控制方法是缓解负荷波动对供电设备不利影响、维持系统稳定运行的重要技术手段。在牵引变电所侧，可配置无功补偿装置与有源滤波器，动态补偿负荷变化引起的无功功率与谐波电流，稳定母线电压水平，减轻设备电气应力。同时，采用基于再生制动能量回收与存储的能馈装置，将列车制动产生的多余电能回馈至中压电网或储存于超级电容、飞轮储能系统中，实现峰值负荷的削峰填谷，降低供电设备短时过载风险。在列车运行调度层面，通过优化列车发车间隔与运行图，避免多列车同时启动或制动导致的负荷叠加，实现负荷的时空均衡分布。此外，可引入智能潮流控制技术，通过在线监测各馈线负荷状态，实时调整联络开关状态与变电所输出电压，自动平衡相邻供电区段的负荷分配。

4.4 改善设备运行环境

改善设备运行环境是提升供电设备可靠性的基础性保障措施，通过主动营造适宜的工作条件，降低环境因素对设备性能的负面影响。针对隧道内高湿度问题，应在变电所及电缆夹层加装工业除湿设备，并优化通风系统设计，确保空气流通，防止凝露现象。对于粉尘严重的区段，可在设备柜体进风口加

装过滤网,并定期清理,同时采用正压式柜体,防止外部粉尘侵入内部。温度控制方面,对变压器、整流器、开关柜等发热量大的设备,应配置温控风机或空调系统,确保设备运行温度维持在允许范围内,并可设置超温报警功能,提前干预。防潮防渗措施需重点关注电缆沟、电缆竖井等部位,完善防水封堵与排水设施,定期检查渗漏点,及时修复。防小动物方面,应在设备区入口设置挡板、封堵孔洞,并在关键部位安装超声波驱鼠器或粘鼠板,定期检查。针对振动问题,对安装于轨道旁或桥架上的设备,应选用抗振型安装支架,并加装减震垫片,减少振动传导。此外,定期清扫设备表面灰尘与污秽,保持绝缘子、散热器等部件的清洁,也是改善运行环境的重要环节,可有效降低闪络与过热风险。

4.5 建立动态监测预警系统

建立动态监测预警系统是实现供电设备主动防御、防范故障于未然的关键技术手段,通过实时感知设备状态,提前发现潜在异常,为运维决策提供依据。该系统应覆盖主要供电设备,包括变压器、整流器、开关柜、电缆、隔离开关、接触网等,部署对应的传感器,如温度传感器、局部放电传感器、振动传感器、电流电压互感器等,实现全维度状态感知。监测数据通

过有线或无线网络实时传输至后台分析平台,平台利用大数据分析机器学习算法,建立设备健康状态评估模型与故障预警阈值。当监测参数超过正常范围或呈现劣化趋势时,系统自动发出预警信号,提示运维人员及时干预。预警信息应分级管理,区分一般异常、严重异常与紧急故障,对应不同的响应流程与处置时限。系统还应具备趋势分析功能,能够预测设备剩余寿命或建议检修窗口,实现从“被动抢修”向“主动维护”的转变。此外,监测系统应与 SCADA 系统、检修管理系统实现数据互通,将预警信息与检修计划自动关联,生成建议性工单,提升运维效率。通过动态监测预警系统的建设,可以大幅降低突发故障概率,缩短故障响应时间,为负荷波动环境下供电系统的安全稳定运行提供有力保障。

5 结语

负荷波动环境下地铁供电设备可靠性保障是一项系统工程,需融合智能监测、动态评估与预防性维护等多维手段。通过建立负荷特征与设备退化关联模型,优化保护配置与冗余设计,可有效提升系统抗扰动能力。未来应进一步探索数字孪生与人工智能技术在故障预警中的应用,为地铁安全运营筑牢供电基石。

参考文献:

- [1] 闵秦峰.机组负荷大幅度波动原因分析及解决措施[J].电力设备管理,2026,(9):54-56.
- [2] 沈佳昀.智能配电系统中的负荷波动与智能监控管理分析[J].集成电路应用,2025,42(11):688-689.
- [3] 顾秋涵,赵文彬,郑欣,徐斌.考虑双维波动性的地铁冲击负荷网储协同平抑策略[J].电工电能新技术,2024,43(1):32-42.
- [4] 崔臻.基于分区分模块的地铁供电系统可靠性评估研究[D].西南交通大学,2021.
- [5] 王平,陈霞,金辉,杨茜茜,林圣.地铁交流牵引供电设备时变故障率分析[J].北京交通大学学报,2020,44(6):126-133.