

轨道交通接触网事故应急响应与处置策略探讨

高 伟 何承乾*

重庆江跳线轨道交通运营管理有限公司, 重庆 402247

[摘要]轨道交通接触网系统作为电力牵引的能量传输载体,其运行可靠性直接影响列车运营安全与运输效率。随着城市轨道交通网络化运营的持续推进,接触网面临设备老化加速、环境扰动增强、运维复杂度提升等多重挑战。传统被动式故障处置模式在应对复合型事故时暴露出响应滞后、协同低效等技术瓶颈,难以满足现代轨道交通高密度、高可靠性的运营需求。文章从接触网事故的全生命周期管理视角出发,构建涵盖智能监测、应急处置、技术创新的立体化防控体系,着力突破现有应急管理机制中存在的信息孤岛与决策迟滞问题,为提升轨道交通系统韧性提供理论支撑与方法指引。

[关键词]接触网事故;应急响应;智能运维;数字孪生;安全生态

DOI: 10.33142/sca.v8i6.16847

中图分类号: U226

文献标识码: A

Discussion on Emergency Response and Disposal Strategies for Contact Network Accidents in Rail Transit

GAO Wei, HE Chengqian*

Chongqing Jiangtiao Rail Transit Operation and Management Co., Ltd., Chongqing, 402247, China

Abstract: As the energy transmission carrier of electric traction, the operational reliability of the contact network system of rail transit directly affects the safety and transportation efficiency of train operation. With the continuous promotion of networked operation of urban rail transit, the overhead contact system is facing multiple challenges such as accelerated equipment aging, increased environmental disturbance, and increased operational complexity. The traditional passive fault handling mode has exposed technical bottlenecks such as response lag and inefficient collaboration in dealing with composite accidents, which makes it difficult to meet the high-density and high reliability operational needs of modern rail transit. Starting from the perspective of full lifecycle management of contact network accidents, this article constructs a three-dimensional prevention and control system covering intelligent monitoring, emergency response, and technological innovation, focusing on breaking through the problems of information silos and decision-making delays in existing emergency management mechanisms, and providing theoretical support and methodological guidance for improving the resilience of rail transit systems.

Keywords: contact network accidents; emergency response; intelligent operation and maintenance; digital twin; safe ecology

接触网系统作为露天架设的刚性悬挂装置,长期承受机械振动、电气负荷与环境侵蚀的耦合作用。复杂电磁环境下的材料性能退化、极端气候引发的结构失稳、人为操作不当导致的设备损伤等风险因素相互交织,使得接触网成为轨道交通故障率最高的关键设备之一。当前应急管理体系存在三大核心矛盾:多源异构数据的融合分析能力不足导致预警精度受限,跨部门协同机制缺失造成资源调度效率低下,以及技术装备更新滞后影响现场处置效能。这些系统性缺陷在应对大规模连锁故障时尤为突出,亟需通过技术革新与管理优化构建主动防御体系。

1 接触网事故的成因和类型

1.1 接触网事故的成因

接触网作为轨道交通牵引供电的核心载体,其事故成因可系统划分为设备本体缺陷、外部环境侵蚀及人为管理疏漏三个维度。设备老化是接触网功能失效的主要诱因。长期暴露于复杂电磁环境中的接触网组件,易受材料疲劳、机械磨损及化学腐蚀的综合作用。关键部件如绝缘子、分

段绝缘器、线夹等因制造工艺偏差或服役周期超限,可能引发绝缘性能下降、机械强度衰减等问题。此外,弓网动态耦合过程中的振动与冲击,加速了导线局部变形、连接件松脱等隐性缺陷的积累,形成系统性故障隐患。接触网的露天特性使其直接暴露于气象与地理环境的作用场中^[1]。极端温度波动导致的金属热胀冷缩效应,可能造成线索张力失衡、补偿装置卡滞;强风荷载引发的横向偏移超出设计阈值时,将破坏弓网受流稳定性;冰雪附着不仅增加接触网垂直载荷,更可能引发放电闪络。运营维护体系中的管理漏洞与执行偏差构成重要风险源。设计阶段对线路特征参数匹配性论证不足,可能埋下结构共振隐患;施工安装过程中的工艺标准执行偏差,导致设备初始状态偏离设计要求;日常维保作业中检测周期设置不合理、故障识别能力不足,致使缺陷未能及时消除。

1.2 接触网事故的类型

接触网事故类型多样,主要包括设备事故、人身事故和自然灾害事故三类。设备事故是指接触网设备及其附属

装置因损坏或故障而影响列车正常运行,通常与设备质量、维护状况以及运行环境密切相关;人身事故则是指在接触网检修或维护过程中发生的人员伤亡事件,多因操作不规范、安全防护不到位或从业人员培训不足引发;自然灾害事故则由雷击、暴风、暴雪、地震等不可控自然因素造成,具有突发性和不可预测性,严重威胁城市轨道交通系统的安全运营^[2]。由于接触网事故成因复杂、类型繁多,为确保轨道交通系统的安全稳定运行,需从多方面加强管理与防范,如提升设备维护水平、加强人员培训、优化运行环境等,同时应建立健全的事故预防与应急处置机制,以实现各类突发事件的快速响应和有效应对。

2 接触网事故应急响应关键环节

2.1 事故的发现与报告

接触网事故的早期识别与信息流转效率直接决定应急响应的时效性。现代监测体系通过多源感知网络构建全天候预警能力:分布式光纤传感技术可实时捕捉接触网机械振动、温度场分布等物理参数异变;红外热成像装置精准识别局部过热隐患;声学监测系统通过放电特征频谱分析预判绝缘劣化趋势。这些技术手段形成立体化监测矩阵,实现从被动响应向主动防御的转变。信息传递机制需遵循分级分类原则,构建标准化通报流程。现场人员通过移动终端采集事故位置、影响范围等核心参数,经加密信道上传至控制中心智能分析平台。控制中心基于预设算法进行事故等级判定,同步启动多部门联席会议机制。应急指挥部依托数字孪生系统生成三维态势图,为后续决策提供空间可视化支撑。全过程需确保信息链路的完整性与保密性,避免信息失真或延迟扩散。

2.2 应急指挥与协调

高效应急指挥体系需突破传统科层制架构,建立技术主导的扁平化决策模式。双指挥官制度通过专业分工实现决策优化:技术指挥官负责故障机理分析、处置方案制定等专业技术决策;行政指挥官统筹资源配置、跨部门协调等管理事务。两者通过专用通信信道保持实时交互,形成技术可行性-管理可操作性的双向校验机制^[3]。资源调度平台深度融合建筑信息模型与地理信息系统,构建动态资源数据库。系统自动匹配事故点周边可用设备、人员及物资储备,结合实时交通路况规划最优运输路径。三维可视化界面直观展示接触网受损部位、抢修队伍位置及物资运输进度,支持指挥层进行多方案比选与动态调整。该平台需具备抗电磁干扰能力,确保极端环境下指挥链路的稳定性。

2.3 现场处置与救援

现场处置需遵循先隔离后修复的基本原则,建立分层作业体系。首阶段实施物理隔离措施:通过分段绝缘器操作实现故障区段电气隔离,布置警示标识与机械屏障阻断次生风险。次阶段展开快速修复作业,模块化抢修设备的应用显著提升效率——预制成型导线连接组件缩短线索

续接时间,液压升降平台实现高空作业精准定位,自锁式紧固件降低安装过程的人为误差。新型清障技术的引入重构了传统处置范式。激光能量精准清除接触网附着异物的同时,避免机械接触造成的二次损伤;高分子复合材料临时修补技术可在不停电条件下恢复设备基本功能;智能机器人搭载多轴机械臂,实现复杂地形下的设备拆装作业。处置全程需同步开展环境监测,实时评估次生灾害发生概率并动态调整处置方案。

3 接触网事故应急策略与建议

3.1 加强事故预警和监测

构建接触网全生命周期监测体系是风险防控的基础。多维感知网络需集成分布式光纤传感、红外热成像与声发射检测技术,形成覆盖机械、电气、环境参数的立体监测矩阵。光纤传感系统通过布里渊散射效应捕捉导线应变分布,实现毫米级形变监测精度;红外阵列探测器建立温度场梯度模型,识别局部过热异常;声学传感器组网分析放电特征频谱,预判绝缘介质劣化趋势。数据融合平台采用边缘计算架构,在设备端完成原始信号降噪与特征提取,通过时间序列分析建立设备健康基线。机器学习算法对多源异构数据进行时空关联分析,构建接触网状态退化预测模型。预警阈值设置需考虑设备服役年限、环境荷载特征及运行工况差异,实施动态调整机制。数字孪生系统将物理实体与虚拟模型深度绑定,实现故障模拟推演与处置预案预验证。

3.2 完善应急预案和演练

应急预案体系需建立场景-任务-能力的映射关系。基于故障树分析法(FTA)识别关键风险节点,划分暴雨、强风、冰冻等典型灾害场景,制定差异化处置流程。预案内容须明确应急响应触发条件、指挥权限转移规则及资源调配优先级,嵌入情景-应对决策树逻辑框架。跨区域协同机制需统一技术标准与通信协议,构建多层级信息共享平台,实现应急资源的动态互济。演练体系采用桌面推演-功能测试-实战演练的渐进式设计。桌面推演侧重流程验证,通过数字沙盘模拟多因素耦合事故场景;功能测试考核特定设备在极端环境下的可靠性;实战演练重点检验跨部门协同效率与现场处置能力^[4]。演练后评估需建立量化指标体系,运用德尔菲法识别流程瓶颈,形成演练-反馈-优化闭环改进机制。

3.3 提升应急处置能力和效率

人机协同系统的决策优化需构建多模态交互通道。基于数字孪生的虚拟操作界面实现手势识别与语音指令的融合控制,作业人员可通过自然交互方式调取设备三维模型与历史维修记录。认知计算引擎实时分析现场视频流数据,自动标注故障特征区域并推送相似案例处置方案。生理信号监测模块集成脑电波与肌电传感技术,建立作业人员认知负荷的动态评估模型,当注意力阈值突破安全区间时自动启动辅助决策模式。装备系统的环境适应性升级涵盖极端工况应对能力。耐高温机械臂采用氮化硅陶瓷关节

与气膜隔热技术,可在 800℃环境中持续作业 30min;防爆型检测仪器通过本质安全设计消除电火花引燃风险,适用于易燃易爆气体环境;抗电磁干扰通信模块应用频率捷变与扩频技术,保障强电磁场下的数据传输稳定性。装备维护体系引入预防性健康管理技术,通过振动频谱分析与润滑油金属颗粒检测预判机械故障。处置流程的时空优化依托运筹学理论构建。基于马尔可夫决策过程建立应急处置时序模型,确定最优任务序列与资源分配方案。空间路径规划采用改进算法,综合考虑障碍物分布、装备运输尺寸与作业半径约束,生成三维空间最优移动路径。时间同步机制应用精确时钟协议,确保分布式系统的时间误差小于 1 微秒,实现多设备协同操作的精准时序控制。

3.4 加强技术研发和创新

智能材料的微观结构设计开启功能突破新维度。石墨烯增强复合材料通过定向排列技术构建三维导电网络,在保持机械强度的同时将导电率提升 2 个数量级;四维打印形状记忆聚合物实现接触网部件的自重构能力,受特定光热刺激后可恢复预设形态;压电-摩擦电复合纳米发电机将机械振动能转化为电能,为在线监测设备提供自供能解决方案。材料失效预测模型融合分子动力学模拟与机器学习,在原子尺度揭示裂纹扩展规律。集群智能系统的协同控制突破传统集中式架构限制。基于博弈论的资源分配算法实现无人机群的任务动态调度,通过纳什均衡优化实现覆盖范围最大化;仿生蚁群优化算法指导地面机器人集群的路径规划,在复杂地形中建立最优物资运输通道;联邦强化学习框架使水下机器人具备协同决策能力,在通信受限环境下仍能保持任务执行一致性。系统鲁棒性通过数字免疫技术增强,当检测到异常行为节点时自动启动隔离与自愈程序。跨科学技术融合催生颠覆性创新方向。量子传感技术将接触网形变监测精度提升至皮米级,通过金刚石-空位色心实现磁场与应变的同步测量;拓扑绝缘体材料构建新型防雷击装置,利用表面态电子传输特性引导雷电流安全泄放;基于超表面的电磁隐身涂层可调节接触网雷达散射截面,降低强电磁干扰对敏感设备的耦合效应。这些技术突破正在重塑接触网系统的安全边界与性能极限。

4 长效保障机制与技术支持

4.1 智能运维技术集群

数字孪生系统通过多物理场耦合建模技术构建接触网虚拟镜像,实现物理实体与数字模型的深度交互。多源感知数据经边缘计算节点预处理后,通过数据同化技术动态修正模型参数,确保虚拟模型的保真度。预测性维护模块采用隐马尔可夫模型分析设备退化轨迹,结合蒙特卡洛模拟预测剩余使用寿命,生成差异化检修策略。系统支持故障模式影响分析(FMEA),在虚拟环境中验证处置方案的有效性,降低现场试错风险。自修复材料技术突破传统被动防护模式,形成动态响应机制。形状记忆合金导线

通过热致相变效应实现形变自恢复,其晶体结构在特定温度阈值下发生可逆转变,有效缓解线索蠕变累积。微胶囊封装技术将修复剂嵌入复合材料基体,当裂纹扩展至临界尺寸时触发修复剂释放,完成微观缺陷的原位填充。此类材料的服役性能需建立加速老化评价体系,通过湿热循环、机械疲劳等复合应力试验验证长期可靠性。

4.2 安全生态体系建设

人员资质认证体系实施分级动态管理,构建培训-考核-授权闭环控制链。带电作业资质认证涵盖高压电场环境模拟、绝缘配合原理、紧急避险规程等核心模块,采用增强现实技术构建高风险作业场景。认证考核引入生理参数监测系统,实时评估操作者的应激反应与行为规范性。资质有效期实施积分制管理,通过继续教育学分与实操复训维持资格有效性。安全文化培育机制依托认知心理学理论构建多维教育体系。事故案例库采用失效模式与效应分析方法解构事故链,建立设备缺陷-人为失误-环境作用的关联图谱。警示教育基地运用虚拟现实技术还原典型事故场景,通过沉浸式体验强化风险感知能力。安全行为塑造工程采用正向激励与负向约束相结合的策略,建立个人安全绩效与组织考核的联动机制,促进安全规范的內化与外化。

5 结语

本研究构建的接触网事故防控体系,通过智能运维技术集群与安全生态系统的深度融合,实现了从单一故障处置向全链条风险管控的范式转变。数字孪生技术与自修复材料的应用,标志着接触网运维进入预测-自愈新阶段;多维感知网络与扁平化指挥架构的协同创新,有效提升了应急响应的时空精度。未来研究需重点关注复杂环境耦合作用下的设备失效机理,开发具有环境自适应能力的智能材料,并探索基于群体智能的分布式决策模型。通过持续推动技术创新与管理变革,最终实现轨道交通接触网系统本质安全水平的跃升。

[参考文献]

- [1]王睿鹏.轨道交通刚性接触网异常磨损研究及治理[J].人民公交,2025(2):88-90.
- [2]蔡俊锋,李岩,仵东博,等.基于物联网的接触网在线监测技术[J].中国科技信息,2025(6):85-87.
- [3]郭德龙.FMECA 助力轨道交通供电柔性接触网安全风险管控[J].中国质量,2024(6):11-17.
- [4]马飞,许红杰.地铁供电系统安全作业分析与优化策略研究[J].现代职业安全,2024(9):58-60.

作者简介:高伟(1992.1—),单位名称:重庆江跳线轨道交通运营管理有限公司,毕业学校和专业:西南交通大学(机械设计制造及其自动化);*通讯作者:何承乾(1991.2—),单位名称:重庆江跳线轨道交通运营管理有限公司,毕业学校和专业:西南交通大学(电气工程及其自动化)。