

轨道交通火灾自动报警系统布线优化技术研究

夏照明

上海百联电器科技服务有限公司, 上海 200025

DOI:10.61369/ERA.2026050030

摘 要： 轨道交通火灾自动报警系统的稳定运行依赖可靠布线系统，复杂工况下传统布线存在适配性差、效率低等弊端。文章聚焦布线优化技术，阐述系统核心作用及运行要求，分析新型布线材料和技术的特点及优势。以可靠性约束的建立、效率目标的量化、协同优化算法展开来研究布线路径规划的方法。结合实际项目，分析多场景适应性、长距离信号稳定难、信号干扰等难点及解决办法，为同类工程布线优化提供技术参考，提高轨道交通火灾自动报警系统安全性和运行效能。

关 键 词： 轨道交通；火灾；自动报警；布线

Research on Wiring Optimization Technology for Automatic Fire Alarm Systems in Rail Transit

Xia Zhaoming

Shanghai Bailian Electric Appliance Technology Service Co., Ltd., Shanghai 200025

Abstract： The stable operation of automatic fire alarm systems in rail transit relies on a reliable wiring system. However, traditional wiring methods exhibit drawbacks such as poor adaptability and low efficiency under complex operating conditions. This paper focuses on wiring optimization techniques, elucidating the core functions and operational requirements of the system, and analyzing the characteristics and advantages of new wiring materials and technologies. The study explores methods for wiring path planning through the establishment of reliability constraints, quantification of efficiency objectives, and the application of collaborative optimization algorithms. By integrating practical projects, it analyzes challenges such as multi-scenario adaptability, difficulties in maintaining long-distance signal stability, and signal interference, along with their solutions. This research provides technical references for wiring optimization in similar projects, enhancing the safety and operational efficiency of automatic fire alarm systems in rail transit.

Keywords： rail transit; fire; automatic alarm; wiring

轨道交通是城市交通的骨干，轨道交通的运营安全关系到人民群众生命财产安全，火灾自动报警系统是防范火灾风险的第一道防线。布线系统是信号传输的重要载体，其好坏直接关系到报警系统反应快慢和是否可靠。当前轨道交通场景复杂多变，传统布线在环境适应性、抵御干扰等方面有所不足，不能很好地达到高标准的安全要求。深入探究布线优化技术，对于攻克实际工程难题，提升系统运行稳定性有着重大的现实价值，而且能给轨道交通消防安全保障体系的改进给予有力支撑。

一、轨道交通火灾自动报警系统概述

轨道交通火灾自动报警系统是保障轨道交通运营安全的重要技术系统，它在轨道交通线路的车站、区间隧道、车辆段等不同的地方都起着火灾早期探测和报警的作用。该系统利用各种火灾探测设备对环境中的火灾特征参数进行感知，将探测到的信号传输给火灾报警控制器，火灾报警控制器对信号进行分析处理后，如果判断存在火灾隐患或者发生火灾，就会及时发出报警信号，并且可以联动启动相关的消防设备，为后续的火灾扑救和人员疏散争取宝贵的时间。系统稳定运行关乎轨道交通乘客和工作人员生命安全，也牵涉到轨道交通设施的财产安全，其设计和运行要

充分考虑轨道交通环境的特殊性，满足可靠性、实时性、抗干扰性等多方面要求，为轨道交通运营构筑起坚实的消防安全防线，助力轨道交通行业迈向更安全、更高效的运营状态。

二、新型布线材料与技术

（一）新型布线材料

轨道交通火灾自动报警系统的布线材料升级，围绕安全性、环境适应性和使用寿命展开优化。

一类是低烟无卤阻燃交联聚乙烯（XLPE）线缆，氧指数达到32%，900℃高温下可以保持180min不燃，燃烧时产生的有毒气

体浓度 $\leq 50\text{ppm}$ ，相比传统的 PVC 线缆减少了60%，可以为区间隧道火灾场景下的人员疏散争取宝贵时间；并且该线缆绝缘层的击穿电压 $\geq 30\text{kV/mm}$ ，地下站95%的湿度环境下放置30天后，绝缘电阻仍然 $\geq 1000\text{M}\Omega$ ，适用于潮湿多尘的环境。

另一类带光纤传感的智能线缆，内部集成有分布式光纤传感器，可以对线路的温度以及振动参数进行实时监测，在轨道出现振动（振幅 $\leq 0.5\text{mm}$ ）时，能够以小于0.1s的响应时间及时反馈出线缆的应力状况，材料的机械强度满足要求，拉伸断裂强度 $\geq 18\text{MPa}$ ，弯曲半径达线缆直径的6倍，可满足区间隧道狭小空间的敷设需求。另外两类材料均通过了 RoHS 环保认证，回收率大于85%，满足项目绿色施工的要求，给布线系统提供安全、智能、环保的材质支持。

（二）新型布线技术

新型布线技术聚焦轨道交通场景的特殊性，通过布线方式革新和工艺改进提升系统整体性能。布局上采用分区优化和路径简化的方式进行革新，对于地下站、区间隧道等场所，用 BIM 技术创建三维布线模型，去掉冗余路径，区间隧道布线路径比传统方案缩短12%，材料损耗减少8%，按照信号类型分区敷设，将火灾报警信号线与其他线缆物理隔离，降低干扰风险。工艺上用“高精度对接、模块化安装”的办法，线路连接用压接式端子工艺，接头接触电阻 $\leq 5\text{m}\Omega$ ，比传统焊接工艺信号衰减降低40%，引入模块化线槽，工厂预制率90%，现场组装效率提高50%。防护技术创新应用双层屏蔽改进，对重要区域线缆采用“铝箔+铜网”双层屏蔽，屏蔽效能 $>85\text{dB}$ ，可抵御35kV牵引供电系统电磁干扰，线槽加涂防火涂料，耐火极限提升至180min，符合消防标准。管理上采用数字化技术改进，以 RFID 标签对线缆实施全生命周期追踪，施工时借助激光定位仪对敷设精度加以校准，误差维持在 $\pm 3\text{mm}$ 之内，同时搭建布线监测平台，随时监测施工进度和品质情况，效率得到改进达60%。

三、项目概况



图1 布线图

本工程为上海轨道交通市域机场联络线火灾自动报警系统布线工程，线路全长68.627公里，共设9座车站（其中地下站6座、地面站3座）、9个区间风井、2个主变电所、1个车辆基地、1个

调度中心、1个培训中心。项目核心就是为上述区域建立火灾自动报警系统（FAS）布线网络，同时配套气体灭火系统布线，满足轨道交通高可靠性、抗干扰性、消防安全规范的要求。布线范围包括站厅、站台、设备房、区间隧道等不同的场所，敷设方式有线槽敷设、线管预埋、线缆穿放等，工程量大、场景复杂，需要适应轨道交通运营环境下振动、电磁干扰、温湿度变化等特殊工况，保证火灾报警信号传输的实时性、准确性。

四、基于可靠性与效率的布线路径规划

（一）布线路径规划的可靠性约束条件构建

轨道交通火灾自动报警系统的布线路径规划要先确定可靠性约束条件，这些条件要符合轨道交通运营环境实际需求。要顾及路径经过区域的结构稳定状况，避开容易受到振动，沉降影响的地方，防止线路因为结构发生变形而受到物理损坏。同时考虑火灾场景高温、烟雾扩散的特性，防止路径经过火灾风险很高或者灭火救援无法到达的地方，保证火灾发生时线路还能保持最基本的信号传输功能。还要考虑电磁环境的影响，规划路径时要避开强电磁干扰源，减少信号失真的概率。另外，路径规划要依照消防安全规范线路防护的要求，线路穿管、桥架敷设的防护标准，经由多维度约束条件叠加，给布线路径规划形成稳固的基础框架，使规划出来的路径可以应对轨道交通复杂工况下的各种风险。

（二）布线路径规划的效率目标量化

根据效率目标进行布线路径规划时，要将效率指标进行明确量化，不能含糊其辞。效率目标可以从施工效率、传输效率、运维效率这三个方面来展开。施工效率方面需要测算不同的路径方案施工周期、人工成本和材料损耗量，优化路径缩短施工流程减少对轨道交通正常建设或者运营的干扰。从信号传输效率上来说，考虑信号传输的特性，计算路径长度对信号衰减的影响，保证信号质量的前提下尽量减小传输距离、加快信号响应速度。运维效率需要考虑后期线路检修的便捷性，规划路径时要留有足够的检修空间，明确线路标识和巡检通道，减少运维人员的工作量与时间成本。通过对这些效率指标进行量化分析，在保证可靠性的基础上实现资源投入和效益产出之间的最佳平衡。

（三）可靠性与效率协同的路径优化算法应用

布线路径规划需要通过优化算法来实现可靠性和效率的协调，不能单方面以某个目标为主导而忽略其他因素导致规划失误。这类算法要先把可靠性约束条件和效率量化目标转变成数学模型，确定各个参数的权重比例，在火灾风险高的地方，可以适当加大可靠性参数的权重；在火灾风险常规的地方，可以适当加大效率参数的权重。算法运行时需要对不同的路径方案进行多轮迭代计算，模拟各种工况下的路径表现，如模拟振动、火灾、电磁干扰等工况，评估路径的可靠性水平，同时得到对应的方案效率指标数值。经过算法的动态调整和筛选，得到既满足可靠性要求，又使效率最大的最优路径方案。该算法可以克服传统经验式规划的缺点，使布线路径规划更加科学、准确地满足轨道交通火

灾自动报警系统的功能要求。

五、项目难点及对策

（一）多场景布线环境适配性差

轨道交通各个区域环境差别很大，地下站潮湿多尘、区间隧道空间狭小并且存在振动干扰、设备房管线密集，传统的布线方式不能适应多场景需求。地下站布线容易因为潮湿而使线缆绝缘性能下降，区间隧道布线受空间限制难以展开施工，设备房与其他专业管线交叉时容易出现路径冲突，都会影响布线的可靠性与施工效率，不符合火灾自动报警系统对线路稳定性的要求。

解决对策：对不同的场景采取不同的布线方案。地下站区域使用防潮性能好、阻燃的线缆，线槽敷设时加装防水密封措施，线缆穿管后用防火泥封堵管口，防止潮气进入；区间隧道布线优先利用预留桥架，采用分段施工，每50m 设临时固定支架，减少振动对线缆的影响，选用抗拉伸线缆，防止施工时拖拽损伤线缆。设备房布线前联合土建、装修及其他安装专业开展管线综合排布，用 BIM 技术模拟布线路径，提前规避与通风管、强电管等的冲突，对必须交叉的部位采取分层隔离措施，保证布线路径合理且不干扰其他专业施工。施工期间，针对每一个场景的布线状况展开专门检测，地下站线缆绝缘电阻检测，区间隧道线缆抗振动性能检验等，保证契合各个场景的环境特点。

（二）长距离线路信号衰减与稳定性控制难

轨道交通市域线线路跨度大，机场联络线全长超 68 公里，区间风井、隧道等区域布线距离长，信号在传输过程中易出现衰减现象。同时，线路途经地下、地面等不同环境，温度、湿度变化大，且受列车运行产生的电磁干扰、振动等因素影响，易导致信号传输不稳定，出现误报警或报警延迟等问题。传统线缆在长距离传输中难以兼顾低衰减和抗干扰性能，给系统稳定运行带来挑战。

解决对策：选用低衰减、高屏蔽性能的专用阻燃通信线缆，满足长距离传输的技术要求。在布线设计中，每隔一定距离设置信号放大器或中继器，补偿信号衰减，确保信号传输强度。采用双层屏蔽线缆并做好屏蔽层单端接地处理，增强抗电磁干扰能力，减少列车运行及周边电气设备的干扰影响。对隧道、区间风井等特殊区域，采用穿管敷设并固定牢固，减少振动对线缆的影响。定期使用专用仪器检测线路信号衰减值和传输稳定性，对超出允许范围的线路及时调整或更换，确保长距离线路信号传输的可靠性。

（三）布线系统调试阶段信号干扰严重

布线完毕后进行系统调试，发现火灾报警控制器接收的探测器信号经常误报，信号衰减等。经排查，主要是由于区间隧道内牵引供电系统产生强电磁干扰，站厅层大量电子设备运行产生杂波干扰，部分线缆接头接触不良加大了信号传输损耗，造成系统不能准确识别火灾信号，不符合火灾自动报警系统可靠性要求，不解决会影响系统对火灾的早期预警功能。

表1 信号干扰测试结果对比表

测试场景	干扰源类型	未防护时测试结果	防护措施	防护后测试结果
主变电所	10kV 高压设备	3.2dB/100m	1. 线缆采用双层屏蔽；2. 增设金属屏蔽室；3. 接地电阻 $\leq 4\Omega$	0.3dB/100m
区间隧道	列车牵引供电（35kV）	2.8dB/100m	1. 线缆远离牵引电缆 1.5m；2. 穿镀锌钢管屏蔽；3. 分段接地	0.4dB/100m
站厅层	大量电子设备（闸机）	1.5dB/100m	1. 线槽采用金属材质；2. 强弱电分槽敷设；3. 关键节点增设滤波器	0.2dB/100m

解决对策：从抗干扰设计和接线质量控制两方面入手解决问题。对于电磁干扰，将区间隧道内布线线路更换为屏蔽线缆，屏蔽层两端可靠接地，接地电阻不大于 4Ω ，调整线缆敷设路径，与牵引供电线缆保持不小于1米的安全距离，减小电磁耦合影响；站厅层布线采用穿金属管敷设，金属管整体接地，形成法拉第笼效应，降低杂波干扰。对信号衰减问题进行全面检查线缆接头，重新规范线缆接头的制作工艺，采用压接端子连接，保证接触面积满足要求，对多股线缆进行搪锡处理，防止氧化造成接触不良。使用专用线缆测试仪逐段测量信号衰减值，对于信号衰减超标的部分，分析原因并更换线缆或者增加信号放大器，保证信号传输满足要求。调试阶段模拟各种干扰场景对系统稳定性进行检测，一直保持信号的传递直到干扰排除为止。保证火灾报警系统可以正确的接收和发送信号。

六、实践效果及经验总结

（一）实践效果

本项目针对多场景适配、专业协调、信号干扰等布线施工问题，从技术层面入手，提高布线施工质量、效率。项目整体

布线施工按期完成，检测结果表明各区域线缆绝缘电阻均大于 $20M\Omega$ ，信号传输延迟小于0.5秒，火灾报警系统调试合格率达到100%，符合轨道交通火灾自动报警系统功能要求，在后续的试运行中也没有出现由于布线引起的系统故障，为轨道交通的正常运营提供安全保障。

（二）经验总结

项目实践过程中，我意识到轨道交通火灾自动报警系统布线优化要结合工程实际场景，不能只按照理论方案。前期调研越充分，布线方案就越贴合，像针对地下站潮湿情况提前做好地下站潮湿情况的防范，避免后期返工；多专业协同最重要的是主动出击而不是被动挨打，我主动牵头组织各专业协调会，提前确定好施工界面和时间节点，减少了交叉作业的干扰。技术难点的解决要兼顾可靠性和可操作性，解决信号干扰的时候，既使用了屏蔽线缆等技术手段，又采取了改变路径、控制接头质量等实操方法，保证方案可以落地执行。另外布线优化不是孤立的工序，它贯穿于施工的全过程，从前期预埋到后期调试，每一个环节的质量控制都会影响最终的效果，这也为以后类似项目提供了一种可借鉴的全流程管控思路。

七、结语

轨道交通火灾自动报警系统布线优化是项融合材料、技术、管理的系统工程，必须联系工程实际场景和核心需求。通过对新型材料、路径规划、工程实践的研究可以形成一套科学性和可操作性并存的优化方案。经过实践证明，有针对性的材料选择、科

学的路径规划、有效的难点应对可以大大提高布线系统可靠性和效率。未来的布线优化可以进一步加入智能感知、数字孪生等技术，达到全生命周期动态控制的目的。希望本研究成果可以给轨道交通消防安全领域技术升级提供一些参考，推动行业朝着更安全、高效、智能的方向发展。

参考文献

- [1] 李永政, 郑然, 程秀峰, 等. 城市轨道交通火灾自动报警系统国产化适用性分析与技术创新 [J]. 今日消防, 2025, 10(08): 11-14.
- [2] 陈洪平, 陈国胜. 电子布线系统抗干扰技术及应用 [J]. 自动化与仪器仪表, 2024, (05): 268-271.
- [3] 罗嘉欣. 面向复杂曲面的线缆智能布线设计与优化方法研究 [D]. 湖南工业大学, 2024.
- [4] 郑冰晶. 智能建筑综合布线施工技术分析 [J]. 散装水泥, 2023, (06): 119-121+124.
- [5] 陈聪, 宋辉. 苏州轨道交通火灾自动报警系统功能梳理及改进建议 [J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(05): 117-120.