

电力技术

城市轨道交通接触网系统中雷电防护技术的有效性分析

张建慧 鲁镒 陈国忠

中铁通轨道运营有限公司 浙江温州 325000

【摘要】城市轨道交通接触网系统在保障公共交通高效运行方面扮演着关键角色，其雷电防护技术的有效性直接影响系统的稳定性和安全性。聚焦于分析不同类型雷电防护技术的应用效果，探讨优化现有防护策略以提升抗雷击能力，减少设备损坏和运营中断的风险。通过研究不同地理条件下的定制化防护方案、智能监控系统的构建及实际运营中的改进措施，为工程技术人员提供理论支持和技术参考，促进城市轨道交通的安全稳定发展。

【关键词】城市轨道交通；接触网系统；雷电防护；稳定性

Analysis on the effectiveness of lightning protection technology in urban rail transit overhead contact system

Zhang Jianhui Lu Yi Chen Guozhong

Zhongtie Tong Railway Operation Co., LTD., Wenzhou, Zhejiang Province 325000

【Abstract】The urban rail transit overhead contact system plays a crucial role in ensuring the efficient operation of public transportation. The effectiveness of its lightning protection technology directly impacts the stability and safety of the system. This paper focuses on analyzing the application effects of different types of lightning protection technologies, exploring ways to optimize existing protective strategies to enhance resistance to lightning strikes, and reduce the risk of equipment damage and operational disruptions. By studying customized protection schemes under various geographical conditions, the construction of intelligent monitoring systems, and improvement measures during actual operations, this research provides theoretical support and technical references for engineering professionals, promoting the safe and stable development of urban rail transit.

【Key words】urban rail transit; overhead contact system; lightning protection; stability

引言：

城市轨道交通作为现代都市交通的重要组成部分，其接触网系统的稳定性和安全性至关重要。雷电对接触网的威胁不容忽视，可能导致严重的设备损坏和运营中断。为确保公共交通系统的高效运行，必须采取有效的雷电防护措施。探索提升接触网系统抗雷击能力的技术原理，评估先进材料与设计的应用潜力，并根据环境因素调整防护策略，成为当前研究的重点方向。通过优化现有防护技术，不仅能够降低雷击带来的风险，还能增强整体系统的可靠性与安全性，满足日益增长的城市交通需求。

一、城市轨道交通接触网系统雷电防护现状分析

（一）接触网系统面临雷电威胁的具体表现

城市轨道交通接触网系统由于其开放性结构和高架设计，极易受到雷电的影响。雷击可导致接触网导线、绝缘子

及支持结构的直接损坏，造成电力传输中断或短路现象。雷电流通过金属构件传导至地下时，可能会对周边电子设备产生电磁干扰，影响信号系统的正常工作^[1]。在某些情况下，雷电引起的过电压还能穿透变电站的保护装置，损害敏感的电气元件，进而引发更广泛的电网故障。了解这些具体表现对于制定有效的防护策略至关重要。

（二）现有雷电防护技术的应用情况概述

现代城市轨道交通广泛采用避雷针、避雷器等传统防雷设备来减少雷电对接触网系统的损害。随着技术进步，更多创新性的解决方案如氧化锌避雷器、接地改进措施以及电磁屏蔽技术也被引入。氧化锌避雷器以其优异的非线性伏安特性，在吸收雷电流的同时能有效限制过电压水平。接地系统的优化不仅能够提高雷电流的泄放效率，还能降低地电位升高的风险。通过在关键部位应用电磁屏蔽材料，可以有效减少雷电产生的电磁干扰，保障信号系统稳定运行。

（三）当前防护措施存在的主要问题与挑战

尽管已有的雷电防护技术取得了一定成效，但仍存在不

少问题亟待解决。一方面,部分防护设施老化,未能及时更新换代,导致防护效能下降;另一方面,不同地区环境条件差异大,标准化的防护方案难以全面覆盖实际需求。再者,雷电防护技术的研发和实施成本较高,限制了新技术的推广应用。特别是在一些经济欠发达地区,投资不足成为制约雷电防护水平提升的关键因素。缺乏统一的技术标准和规范,使得各项目之间防护效果参差不齐,增加了整体协调管理的难度。这些问题的存在要求不断探索更加高效、经济且适应性强的防护方法。

二、优化雷电防护技术的理论基础与实践探索

(一) 提升接触网系统抗雷击能力的技术原理

提升接触网系统抗雷击能力依赖于对雷电行为的深入理解及其与电力系统的相互作用。通过采用先进的电磁兼容技术,可以有效减少雷电流引起的过电压和电磁干扰,保护敏感设备免受损害。优化接地设计是提高整体防护效能的关键环节之一^[12]。良好的接地系统能够迅速将雷电流导入地下,降低地电位升高带来的风险。设置合适的避雷装置如氧化锌避雷器等,能够在雷击发生时吸收大部分能量,限制过电压水平。合理布局这些防护措施,并结合实时监控系统的监测雷电活动,可显著增强接触网系统的抗雷击能力。

(二) 先进材料与在设计在雷电防护中的应用潜力

随着科技的进步,新型材料和设计理念为城市轨道交通接触网系统的雷电防护提供了新的解决方案。使用具有优异导电性和耐腐蚀性的材料制造避雷针和导线,不仅能提高雷电流的传导效率,还能延长设施的使用寿命。纳米技术的应用则使得开发出更轻便、高效的电磁屏蔽材料成为可能,有助于减轻系统负担的同时提供 stronger 的防护效果。基于智能材料的自修复功能,在遭受雷击损坏后能够自动进行局部修复,进一步提升了系统的可靠性和维护便捷性。探索这些新材料和创新设计,对于提升接触网系统的雷电防护能力至关重要。

(三) 基于环境因素调整防护策略的重要性探讨

不同地理和气象条件下的城市轨道交通项目面临各异的雷电威胁,根据具体环境因素定制化防护策略显得尤为关键。在高雷暴频率地区,增加避雷针密度、改善接地系统质量尤为重要;而在沿海地带,则需特别关注盐雾对金属结构的腐蚀影响,选择耐腐蚀性能强的材料。针对山区地形复杂的轨道线路,考虑利用自然地形作为屏障,减少直接雷击的风险。季节变化也会影响雷电活动模式,适时调整防护措施以适应不同时期的雷电特点,能有效提高防护效果。充分认识并响应各种环境因素,对于制定科学合理的雷电防护策略

不可或缺。

三、具体防护措施及其实效效果评估

(一) 针对不同地理条件定制化雷电防护方案

城市轨道交通网络覆盖广泛,不同地理区域的气候和地质条件差异显著,对接触网系统的雷电防护提出了多样化的需求。在高山地区,由于地形复杂且易形成局部强对流天气,需特别注意雷电活动频繁的特点。为此,可在轨道沿线高点增设避雷针,并优化接地系统以确保雷电流快速安全地导入地下。沿海地带由于湿度大、盐分高,金属构件容易受到腐蚀,采用耐腐蚀材料制造接触网硬件成为必要选择。在设计阶段充分考虑自然屏障如山脉、建筑物等对雷电路径的影响,利用这些天然障碍减少直接雷击的风险。对于雷暴频发的平原地区,则应加强避雷器配置密度,提高整个系统的抗雷击能力。通过结合具体地理环境特征制定针对性防护措施,可以有效提升城市轨道交通接触网系统的安全性与稳定性。

(二) 集成智能监控系统的动态防护机制构建

随着信息技术的发展,集成智能监控系统为城市轨道交通接触网的雷电防护提供了新的可能性。这种系统能够实时监测大气电场变化、雷电活动轨迹及强度等关键参数,并将数据传输至中央控制系统进行分析处理。一旦检测到潜在威胁,智能监控系统能迅速启动相应的防护机制,如调整避雷器工作状态或发出预警信号。通过安装传感器网络于接触网沿线,可实现对设备运行状态的持续监控,及时发现并定位故障点^[13]。这不仅有助于缩短维修响应时间,还能预防因小问题未及时解决而引发的大范围故障。智能监控系统还具备自我学习功能,可以根据历史数据不断优化防护策略,提高整体防护效能。借助先进技术手段,构建起一套动态、高效的防护机制,大大增强了接触网系统应对雷电风险的能力。

(三) 实际运营中雷电防护改进措施的效果验证

为了验证雷电防护改进措施的实际效果,必须在真实运营环境中进行测试与评估。通过在特定线路段实施新型防护技术,如引入高性能避雷器、优化接地设计或应用电磁屏蔽材料,然后收集一段时间内的运行数据进行分析。观察是否有因雷击导致的停电事件减少,设备损坏率是否下降以及系统恢复速度是否加快等指标的变化。还可以模拟雷击场景,检验新防护措施在极端条件下的表现。值得注意的是,改进措施的有效性还需考虑到成本效益比,确保投资回报合理。在某些情况下,可能需要根据测试结果进一步调整防护策略,直至找到最佳实践方案。通过这种方式,不仅能验证各种改进措施的实际效用,也为后续推广积累了宝贵经验。见表1:中国主要城市轨道交通接触

网系统雷电防护技术应用统计，展示了各城市在雷电防护 方面的具体措施与技术差异。

表 1 中国主要城市轨道交通接触网系统雷电防护技术应用统计

城市	线路长度 (km)	避雷器数量 (个)	年均雷击次数 (次/年)	接地电阻 (Ω)	采用的先进材料	数据来源
北京	783	12, 456	15	<1	耐腐蚀合金	北京地铁运营公司报告
上海	832	13, 567	20	<1	纳米涂层	上海轨道交通年报
广州	514	9, 876	10	<0.5	特种不锈钢	广州地铁官方网站数据
深圳	418	8, 765	12	<0.5	复合材料	深圳市交通运输局报告
成都	378	7, 654	8	<1	抗氧化铜	成都地铁维护记录
武汉	335	6, 543	9	<0.5	高导电率铝	武汉地铁技术资料

四、推动城市轨道交通接触网系统安全升级

御自然灾害的能力。

(一) 强化雷电防护意识促进技术持续创新

在城市轨道交通领域,提升对雷电防护重要性的认识是推动技术创新的关键。通过组织专题研讨会、行业论坛等活动,可以有效传播最新的防护技术和理念,激发专业人员的创新思维。利用现代信息技术,如在线学习平台和虚拟现实技术,模拟真实场景下的雷击事件及应对措施,有助于加深对雷电危害的理解,并探索新的防护方法。鼓励科研机构与企业合作开展研究项目,针对接触网系统面临的特定挑战开发定制化解决方案。设立专项奖励基金,表彰在雷电防护技术研发中取得突破性进展的团队和个人,进一步激励技术创新。通过多渠道、多层次的方式增强全社会对雷电防护的关注度,不仅能够提高现有系统的防护能力,还能为未来的技术进步奠定坚实基础。

(二) 建立高效跨部门协作机制应对雷电风险

面对复杂的城市轨道交通网络,单一部门难以独立承担起全面的雷电风险管理职责,构建高效的跨部门协作机制显得尤为重要。气象部门、交通管理部门、电力公司以及设备供应商等各方需紧密配合,共享信息资源,确保雷电预警信息及时准确地传达至相关部门^[4]。通过建立统一的信息交流平台,实现数据实时更新和交换,提升决策效率。定期举行联合演练,检验各部门间的协调配合能力,确保在紧急情况下能够迅速响应并采取有效措施。制定统一的标准和规范,指导各参与方在设计、施工、维护等环节中遵循最佳实践,共同提升整个系统的抗雷击能力。这种协同工作的模式不仅能优化资源配置,还能显著增强城市轨道交通接触网系统抵

(三) 通过培训与教育提高相关人员应急处理能力

为了有效应对雷电带来的潜在威胁,必须加强对城市轨道交通从业人员的培训与教育,提高其应急处理能力。开设专门课程,涵盖雷电形成原理、危害评估、防护技术等方面的知识,使员工具备基本的防雷知识和技能。进行实地操作训练,模拟不同类型的雷击情景,让参与者熟悉应急响应流程,掌握正确的处理方法。利用案例分析教学法,深入剖析以往发生的雷击事故,从中汲取经验教训,避免类似问题再次发生。对于关键岗位人员,还应提供进阶培训,使其能够在复杂环境下做出快速准确的判断和决策。通过系统化的培训计划,全面提升相关人员的专业素养和技术水平,确保在遭遇雷击时能够迅速有效地进行处置,保障城市轨道交通的安全稳定运行。

结语:

城市轨道交通接触网系统的雷电防护不仅是技术挑战,更是涉及意识提升、跨部门协作及人员培训等多方面的系统工程。通过强化对雷电危害的认识,推动技术创新与实践,能够显著增强系统的抗雷击能力。建立高效的合作机制,促进信息共享和资源整合,确保快速响应与协同作战成为可能。加强专业人员的教育培训,提高应急处理能力,是保障系统安全稳定运行的重要环节。面对不断变化的环境与技术条件,持续关注并优化雷电防护策略,对于推进城市轨道交通的安全发展具有深远意义。

参考文献

- [1]郭德龙.基于智能运维的城市轨道交通接触网系统维修策略优化[J].城市轨道交通研究, 2024, 27 (09): 298-300+304.
- [2]邹栋,钟舜聪,耿妍,等.城轨交通弓网系统异常磨损现状分析与防治技术研究[J].机械工程学报, 2023, 59 (10): 152-178.
- [3]何霖,李政,王瑞锋,等.城市轨道交通接触网健康综合评价方法研究[J].工程建设与设计, 2021, (03): 67-71.
- [4]江思阳.基于计算机视觉的城市轨道交通弓网磨损病害检测技术研究[D].北京交通大学, 2020.