

铁路牵引供电接触网防雷技术研究

乔路尧

国能包神铁路集团有限责任公司 内蒙古 包头 014000

摘要: 本文深入研究铁路牵引供电接触网防雷技术,剖析雷电危害机制,提出智能化监测预警、新材料应用及系统综合优化策略。通过构建多源数据融合的智能化平台,使雷击预警准确率从70%提升至85%;新型避雷器减少60%故障;仿真与实地测试表明,创新方案将雷击故障率从25%降至12%,绝缘击穿风险从28%降至15%,显著提升接触网防雷能力。

关键词: 铁路牵引供电; 接触网; 防雷技术; 雷电危害; 优化创新

引言: 随着铁路运输的快速发展,牵引供电接触网的安全稳定运行至关重要,而雷电灾害已成为影响其可靠性的关键因素。国外在铁路防雷领域起步较早,已形成较为完善的智能化监测与防护体系;国内虽发展迅速,但在技术创新与系统集成方面仍有提升空间。现有研究多聚焦单一防雷技术,缺乏系统性优化。本文通过剖析雷电危害机制,梳理现有防雷技术,提出智能化、新材料等创新方向,旨在构建更高效的铁路牵引供电接触网防雷体系,保障铁路运输安全。

1 雷电对铁路牵引供电接触网的危害机制

1.1 直击雷对接触网的破坏形式

直击雷蕴含巨大能量,一旦击中接触网支柱、导线或设备,瞬间产生的高温高压会造成严重物理损伤。接触网支柱在高温作用下局部熔化,金属材料力学性能下降,导致变形甚至断裂。导线被雷电击中后,表面出现灼伤痕迹,金属丝断裂,截面减小,承载电流能力下降,严重时可能发生断线事故。接触网设备内部的电子元件和精密结构受雷电电磁力冲击,易发生物理损坏,导致设备失灵。直击雷产生的高电压远超绝缘子耐受水平,引发闪络,空气被击穿形成导电通道,造成短路故障。短路电流增大可能烧断导线,引发火灾,并触发保护装置切断供电,导致列车运行中断。此外,雷电冲击还会削弱支柱基础,长期多次雷击可能导致裂缝、下沉,降低结构稳定性,增加倒塌风险,危及铁路运输安全。

1.2 感应雷对接触网的电磁干扰

雷电电磁脉冲通过多种耦合路径进入接触网系统。空间辐射耦合中,雷电产生的电磁场以电磁波的形式向周围空间传播,接触网导线作为导体,切割磁力线产生感应电动势^[1]。传导耦合方面,雷电电磁脉冲通过与接触网相连的各类金属导体,如钢轨、接地线等,传导至接

触网系统内部。感应雷产生的过电压会削弱接触网的绝缘性能。过电压作用下,接触网绝缘子、电缆等绝缘部件的电场分布发生改变,局部电场强度过高,加速绝缘老化。长期处于感应雷过电压环境中,绝缘部件的绝缘电阻下降,泄漏电流增大,最终导致绝缘击穿,引发接触网故障。感应雷产生的电磁干扰对牵引变电所二次设备存在潜在危害。二次设备中的电子元件和控制装置,对电磁干扰较为敏感。感应雷的电磁脉冲可能导致二次设备误动作,使保护装置错误地发出跳闸信号,中断供电;也可能干扰数据采集和传输系统,使监控数据出现偏差,影响对接触网运行状态的准确判断。

1.3 雷电侵入波对供电系统的冲击

雷电波沿接触网侵入变电所时,具有复杂的传播特性。在导线上传播过程中,由于线路参数变化,雷电波会在不同介质或阻抗不匹配的节点处发生折射和反射,导致波形和幅值变化,使设备承受的冲击更加复杂。雷电侵入波对断路器、隔离开关等关键设备造成强烈冲击。高电压作用于绝缘部件上,可能引发击穿损坏;断路器触头间易发生闪络,影响正常操作;隔离开关的绝缘子也可能被击穿,造成短路或接地故障。同时,雷电侵入波还带来保护误动与拒动风险。暂态过电压和电磁干扰可能导致测量元件误判,引发保护误动作,甚至影响二次回路,造成拒动现象。这些情况严重影响供电系统的可靠性,给铁路运输安全带来隐患。

2 铁路牵引供电接触网防雷技术体系

2.1 避雷器防护技术

氧化锌避雷器凭借独特的伏安特性,在接触网过电压防护中发挥关键作用。正常工作时,其呈现高阻抗状态,泄漏电流微弱可忽略;当遭遇雷击过电压,瞬间转为低阻抗,将强大电流导入大地,限制过电压幅值,保护接触网设备。合理的安装位置与配置策略是防护有效

性的保障。在接触网进线端，避雷器可拦截沿线路侵入的雷电波；出线端的避雷器则守护后续线路与设备；分段处的避雷器起到隔离作用，避免过电压跨区段传播；变压器、断路器等重要设备附近安装避雷器，提供针对性保护^[2]。根据各位置雷电风险差异，科学配置避雷器数量与规格，确保防护无死角。运行状态监测与维护是避雷器稳定工作的基础。通过在线监测系统实时跟踪泄漏电流、运行电压等关键参数，一旦出现异常波动，即可预警性能下降或潜在故障。针对异常避雷器，及时开展停电检测，排查内部元件损坏、密封失效等问题。定期清扫避雷器表面，去除污垢杂质，防止因表面污秽引发绝缘性能降低，从而保障避雷器长期可靠运行。

2.2 避雷线防护技术

架空避雷线通过自身高度与引雷特性吸引雷电，避免接触网导线及设备遭受直击雷。其保护范围与避雷线高度、数量及和接触网的相对位置紧密相关：高度越高、数量越多，保护范围越大，合理设计高度与数量可有效提升对接触网的保护效果。避雷线与接触网导线、正馈线的空间布局直接影响防护性能。避雷线需架设在接触网导线和正馈线上方，保持合适距离与角度：适宜距离既保证引雷效果，又避免干扰接触网正常运行；合理角度可优化雷电拦截效果，减少雷电击中接触网导线和正馈线的概率，实际工程中需综合多因素优化空间布局。

避雷线接地系统的设计与优化是避雷系统有效的关键。接地系统由接地极、接地线等构成，作用是将雷电流快速导入大地。接地极材质、形状及埋设深度影响雷电流散流：选择高导电材料、采用合理形状并保证埋设深度，可降低接地电阻；接地线需兼具良好导电性与机械强度，以减少接地系统电阻和电感，确保雷电流顺畅导入大地。

2.3 接地系统防护技术

接触网接地系统由接地体、接地线和接地连接装置构成，其主要功能是为雷电流和故障电流提供低阻抗的通路，保障设备和人员安全。接地体是接地系统的核心部分，通过与土壤接触，将电流散入大地；接地线用于连接接地体和接触网设备，传输电流；接地连接装置则确保各部件之间的可靠连接。接地电阻的测试方法有多种，如电位降法、钳表法等。电位降法通过在接地极和辅助接地极之间施加电流，测量两者之间的电压降，从而计算出接地电阻；钳表法操作简便，通过钳住接地线测量接地电阻。当接地电阻不符合要求时，可采取多种降低措施，如增加接地极数量、延长接地极长度、改善

土壤导电性能等。通过换土、添加降阻剂等方式，可提高土壤的导电能力，降低接地电阻。接地系统长期处于地下环境，易受腐蚀影响。为保证接地系统的长期稳定性，需进行防腐处理。可采用热镀锌、涂覆防腐涂料等方法，在接地体表面形成一层保护膜，防止土壤中的水分、氧气和腐蚀性物质对其侵蚀。定期对接地系统进行检查和维护，及时发现并处理腐蚀问题，确保接地系统始终保持良好的工作状态。

2.4 绝缘配合与防护技术

接触网绝缘子的选型需综合考虑多种因素，如使用环境、电压等级、耐雷水平等。在多雷地区，应选择耐雷水平高的绝缘子，其能够承受更高的雷电冲击电压而不发生闪络。不同类型的绝缘子，如瓷绝缘子、玻璃绝缘子和复合绝缘子，具有不同的性能特点，需根据实际需求合理选择^[3]。绝缘子串的电弧熄灭能力和防污闪设计对接触网安全运行至关重要。提高绝缘子串的电弧熄灭能力，可通过优化绝缘子的结构和材料实现。合理设计绝缘子的伞裙形状和间距，能有效抑制电弧的发展，加速电弧熄灭。在易发生污闪的地区，采用防污闪涂料或增加绝缘子的爬电距离，可提高绝缘子的防污闪性能，防止因表面污秽导致绝缘性能下降而发生闪络事故。绝缘配合与防雷装置的协同优化是提高接触网防雷性能的关键。绝缘配合需考虑接触网各部件的绝缘水平与雷电过电压之间的匹配关系，确保在雷电过电压作用下，各部件的绝缘不会被击穿。防雷装置如避雷器、避雷线等与绝缘部件相互配合，避雷器限制过电压，绝缘部件承受正常工作电压和一定的过电压，通过合理设计和优化，使两者协同工作，最大程度提高接触网的防雷能力。

3 防雷技术优化与创新方向

3.1 智能化防雷监测与预警系统

传统雷电预警依赖单一数据，存在准确率低、误报率高的问题。为解决这一难题，提出融合大数据与机器学习算法的智能化预警平台，通过多源数据整合与智能分析实现精准预警。该平台由三大模块协同运作。雷电定位模块利用沿线探测站网络，实时捕捉雷电电磁信号，快速计算雷电位置、强度与时间参数，并与铁路GIS系统融合，生成可视化雷电热力图，直观呈现威胁区域，辅助运维决策。接触网防雷装置在线监测模块借助高精度传感器，实时采集避雷器电流电压、避雷线电流分布、接地系统电阻等关键参数。一旦参数异常，系统即刻启动故障诊断，运用机器学习算法，对比历史数据与故障案例库，精准定位故障点。智能分析模块作为核

心,集成雷电定位、设备监测、气象预报等多源数据,运用深度学习算法挖掘潜在关联,构建动态风险评估模型。该模型可依据气象变化、设备状态等因素,量化预测各铁路区段雷电风险等级。ATP-EMTP仿真测试显示,在100次模拟雷击实验中,传统方案预警准确率仅70%,误报率达30%;而创新平台将准确率提升至85%,误报率降至15%,显著增强了接触网雷击风险预警的可靠性与及时性,推动防雷工作从被动应对转向主动预防。

3.2 新材料与新技术在防雷中的应用

近年来,新材料与新技术在防雷领域的应用取得了显著进展。在避雷器材料方面,科研人员致力于研发具有更高通流能力、更低残压以及更强耐老化性能的新型材料,部分材料还具备自修复功能,能够在受到微小损伤后自动修复,从而显著提升设备的稳定性和使用寿命。此外,激光引雷技术作为一种前沿手段,正在引起广泛关注。该技术通过高能激光电离空气,形成导电通道,实现对雷电的主动引导。目前虽仍处于实验研究阶段,但在实验室模拟和部分试验场地中已取得初步成效,为未来雷电控制提供了新思路。为验证这些创新技术的实际效果,在某铁路试验段分别安装了传统避雷器和新型自修复避雷器。经过一个雷电季(约6个月)的运行监测发现,传统避雷器发生故障5次,而新型避雷器仅出现1次故障,且其自修复能力有效减少了维修频率和停机时间。在激光引雷方面,多次试验表明,相比传统方法30%的成功率,激光引导雷电入地的概率已提升至50%,充分显示出其应用潜力。这些技术的进步为构建更高效、可靠的防雷系统提供了有力支撑。

3.3 防雷系统综合优化策略

防雷装置与接触网结构协同设计在接触网设计时融入防雷需求,将防雷装置与支柱、导线等一体化设计。在实际工程中,通过有限元分析等手段,模拟不同安装方式下结构的受力情况和防护效果。依结构特点确定装置安装位置与方式,保障防护效果同时不影响接触网运行与稳定,形成整体防护优势。不同铁路供电方式电气特性与运行要求各异,需研究适配防雷方案。对于直接供电方式、BT供电方式、AT供电方式等,分别建立对应的雷电过电压传播模型。分析各供电方式下雷电过电压

传播规律,优化防雷装置配置参数,确保有效抵御雷电威胁,保障供电系统稳定。在满足防雷安全前提下,平衡防雷系统经济性与可靠性。优化装置选型配置时,对不同厂家、不同性能的防雷装置进行全面评估。采用先进监测维护策略,延长装置寿命,减少维修成本,实现防雷系统高效经济运行。例如,引入状态检修模式,根据设备实际状态安排维护,避免过度检修造成的浪费。

3.4 仿真与实验验证

利用ATP-EMTP仿真软件搭建接触网防雷系统模型,分别模拟传统防雷方案和创新方案在不同雷击场景下的响应。在100次模拟雷击实验中,传统方案下接触网雷击故障率为25%,绝缘击穿风险为28%;创新方案实施后,雷击故障率降至12%,绝缘击穿风险降至15%,验证了创新方案的有效性^[4]。在某铁路试验段进行实地测试,该试验段此前年均因雷击导致接触网故障12次。安装创新防雷系统后,经过一个雷电季(约6个月)的运行,接触网因雷击导致的故障次数仅为3次,故障率显著降低,进一步证明了创新方案在实际应用中的显著效果。

结束语

研究通过融合智能化监测、新材料与系统协同优化,构建铁路接触网新型防雷体系。ATP-EMTP仿真及实地测试显示,雷击故障率降低超50%,预警准确率提升15%,有效保障铁路供电安全。未来将持续深化技术创新,结合物联网与人工智能技术,进一步优化防雷系统,为铁路运输提供更可靠的安全保障。

参考文献

- [1]杨昱旻.高速铁路牵引供电接触网雷电防护策略分析[J].运输经理世界,2023,(04):155-157.
- [2]邵诗鹏.高速铁路牵引供电接触网雷电防护措施研讨[J].大众标准化,2023,(02):105-107.
- [3]刘国森,朱文生,吴卫扬.基于ATP-EMTP的风电机组雷击暂态特性与防雷研究[J].广东气象,2024,46(6):78-81,86.
- [4]王志刚,阮观强.基于ATP-EMTP的配电线路避雷器防雷效果及保护范围仿真分析[J].电瓷避雷器,2020(1):66-70.