

# 铁路牵引供电接触网避雷线雷电防护分析

奇 欣

国能包神铁路有限责任公司 内蒙古 鄂尔多斯 017000

**摘要:** 随着铁路运输高速化、电气化发展,雷电对牵引供电接触网的威胁日益严峻。本文深入剖析铁路牵引供电接触网避雷线雷电防护体系,系统阐述避雷线拦截、分流雷电的工作原理,详细分析避雷线布置架设、接地装置施工、材料选择等设计要点。同时,针对当前防护中存在的设计参数不合理、施工质量不达标等问题,提出优化设计、加强施工管理、完善监测体系等改进措施,旨在提升铁路接触网避雷线雷电防护能力,保障铁路供电系统安全稳定运行,为铁路防雷工程建设与运维提供理论参考与实践指导。

**关键词:** 铁路牵引供电;接触网;避雷线;雷电防护

引言:在铁路电气化进程中,牵引供电接触网作为核心供电设施,其安全稳定运行直接关系到铁路运输效率与行车安全。然而,频繁的雷电活动常导致接触网跳闸、设备损坏等故障,严重影响铁路正常运营。避雷线作为接触网雷电防护的关键设施,通过拦截雷电、分流泄放雷电流,可有效降低雷击风险。但随着铁路线路延伸、运行环境复杂化,现有避雷线防护体系暴露出诸多不足。因此,深入研究铁路牵引供电接触网避雷线雷电防护,优化防护设计与运维策略,对保障铁路供电可靠性、推动铁路行业高质量发展具有重要意义。

## 1 雷电对铁路牵引供电接触网的危害

雷电作为一种强大的自然放电现象,蕴含着极高的能量,会对铁路牵引供电接触网造成多方面严重危害。直击雷可能直接击中接触网的承力索、接触线等关键部件,瞬间产生的高温足以熔断金属线材,破坏接触网结构,导致接触网断线塌网事故,中断铁路供电与行车。雷击产生的过电压还会击穿绝缘子,破坏其绝缘性能,引发闪络放电,造成接触网接地短路,使断路器跳闸,引发大面积停电。感应雷同样威胁巨大,当雷电击中接触网附近区域,会在接触网线路上产生感应过电压,这种过电压沿着线路迅速传播,侵入供电设备内部,损坏变压器、避雷器、继电保护装置等电气设备,导致设备功能失效,影响铁路供电系统的正常控制与保护功能。此外,雷电还可能干扰接触网的通信信号系统,造成信号传输错误、中断,使列车运行控制系统无法正常工作,威胁行车安全。据统计,在雷电高发地区,因雷击导致的接触网故障占总故障的30%以上,严重影响铁路运输的安全性和可靠性<sup>[1]</sup>。

## 2 铁路牵引供电接触网避雷线工作原理

### 2.1 避雷线的基本原理

避雷线基于尖端放电与引雷入地的原理工作。避雷线安装于接触网顶部,其高度高于接触网导线,能够优先吸引雷电,使雷电流通过自身及接地装置安全导入大地,从而保护下方的接触网设备免受雷击。避雷线的保护范围与高度、长度、接地电阻等因素密切相关,合理的设计与安装能够有效扩大保护区域。

### 2.2 避雷线与接触网的电气连接

避雷线通过架空地线与接触网支柱连接,并经接地装置与大地相连。在正常情况下,避雷线与接触网之间保持一定的绝缘距离,避免对接触网的正常供电产生影响;当遭受雷击时,避雷线迅速导通雷电流,将其引入大地。良好的电气连接能够确保雷电流快速泄放,降低接触网设备上的过电压。

### 2.3 避雷线的分流作用

避雷线能够将雷电流进行分流,减少流经接触网设备的雷电流幅值。当雷电击中避雷线时,雷电流会沿着避雷线向两侧的接地装置分散流动,降低单一接地点的雷电流密度,减轻对接触网设备的冲击,从而提高接触网的防雷性能。

## 3 铁路牵引供电接触网避雷线雷电防护设计要点

### 3.1 避雷线的布置与架设

避雷线的布置与架设需以科学数据为支撑,精准适配铁路沿线环境。在平原地区,通常按100-120米间距设置避雷线,而在山区等高雷暴风险区域,间距需压缩至70-96米,同时将避雷线高度在常规基础上提升1-2米,例如在某山区铁路项目中,通过缩短间距和提高高度,雷击事故率降低了40%。施工时,采用张力放线技术,将张紧力严格控制材料许用应力的40%-60%,避免因张力不足导致雷击点偏移,或张力过大引发材料疲劳断裂。利用有限元分析软件模拟大风、覆冰等极端工况,优化

悬挂点与固定点布局, 确保避雷线在-30℃至50℃环境温度变化下, 仍能保持稳定。针对桥梁、隧道等特殊区段, 采用专用抱箍、锚固装置等, 如在跨海大桥区段, 采用高强度不锈钢抱箍固定避雷线, 保证其能有效覆盖接触网设备, 全方位提升雷电防护效能<sup>[2]</sup>。

### 3.2 接地装置的设计与施工

接地装置作为雷电能量的泄放枢纽, 其设计施工质量至关重要。设计前, 需沿铁路线路每隔500米进行土壤电阻率测量, 对于土壤电阻率大于 $500\Omega \cdot m$ 的高阻区域, 采用深井接地极(深度可达30米)配合伸长水平接地极的复合方案, 并填充高效降阻剂, 使接地电阻降至 $10\Omega$ 以下。施工过程中, 严格遵循焊接标准, 采用放热焊接技术, 确保接地体之间连接牢固, 焊缝长度不得小于接地体直径的6倍且双面焊接。接地极埋设深度不低于0.8米, 回填土选用黏土并分层夯实, 每层厚度控制在20-30厘米。工程竣工后, 建立定期检测机制, 每季度进行一次接地电阻测量, 每年开展一次外观检查, 如发现接地体腐蚀程度超过原截面30%, 立即进行更换, 保障接地装置长期稳定运行, 为雷电电流提供高效、可靠的泄放通道。

### 3.3 与其他防雷措施的配合

铁路牵引供电接触网的雷电防护需构建协同防护体系。在设计阶段, 依据各防雷装置特性建立雷电能量分配模型, 例如设定避雷器动作电压为接触网额定电压的1.8-2.2倍, 确保雷击过电压超过阈值时, 避雷器迅速导通, 将剩余能量导入大地。结合绝缘子的绝缘耐受电压(不低于 $100kV$ )和浪涌保护器的限压能力(残压控制在设备耐受电压的80%以内), 形成三级防护结构。在实际应用中, 针对不同电压等级设备, 优化防雷装置布局, 如在 $27.5kV$ 接触网分段处、供电线入口等关键节点, 每间隔500米增设一组避雷器, 在变压器侧安装浪涌保护器。通过这种多层次、梯度式的防护设计, 有效降低雷击对接触网设备的损害, 保障铁路供电系统安全稳定运行, 减少因雷击导致的停电事故。

### 3.4 避雷线材料的选择与性能优化

避雷线材料的性能直接决定其雷电防护能力。传统热镀锌钢绞线成本较低, 但在沿海、酸雨等腐蚀环境中, 使用寿命仅为10-15年, 且通流能力有限, 难以应对高强度雷击。铝合金复合导线凭借重量轻(约为钢绞线的 $1/3$ )、耐腐蚀(表面氧化膜可有效防护)、导电性能好(电导率达纯铝的90%)等优势, 逐渐成为复杂环境的首选材料。近年来, 石墨烯复合导线因其超高导电性(电导率为铜的10倍)和机械强度(抗拉强度超钢绞线3

倍), 成为提升避雷线耐雷水平的研究热点。此外, 通过在避雷线表面涂覆纳米防腐涂层, 可使材料耐腐蚀性能提升3-5倍, 延长使用寿命至25-30年。优化材料绞合结构, 采用分层绞合且层间添加绝缘填充物的方式, 降低趋肤效应影响, 使避雷线在雷击瞬间通流能力提升50%, 为接触网提供更可靠的防护。

### 3.5 智能监测系统的设计与集成

智能监测系统是实现避雷线状态实时管控的关键。在避雷线关键节点, 每隔1-2公里安装光纤电流传感器(测量精度达 $0.1A$ )、分布式温度传感器(测温精度 $\pm 0.5^\circ C$ )和应变传感器(应变测量精度 $1\mu\epsilon$ ), 实时采集电流、温度、应力等数据, 并通过5G物联网技术传输至云平台。利用大数据分析和机器学习算法, 建立避雷线状态评估模型, 如通过分析电流突变、温度异常升高、应力波动等数据, 可提前3-6个月预测避雷线老化、断裂等潜在故障。当系统监测到雷电活动或避雷线异常时, 自动触发三级预警机制(黄色、橙色、红色), 并联动避雷器、断路器等设备采取应急措施。同时, 开发可视化管理平台, 运维人员可通过手机APP或电脑端查看避雷线运行状态、历史数据及雷电防护效果, 实现从被动维护到主动预防的转变, 显著提升铁路牵引供电接触网雷电防护的智能化和可靠性水平。

## 4 铁路牵引供电接触网避雷线雷电防护存在的问题及改进措施

### 4.1 存在的问题

#### 4.1.1 避雷线设计参数不合理

部分铁路接触网避雷线在设计阶段, 未充分考虑线路沿线复杂的地形地貌、气象条件及雷电活动规律。例如, 在雷电活动频繁且地形起伏较大的山区, 避雷线的高度、间距、接地电阻等参数仍沿用常规设计标准, 导致避雷线的保护范围有限, 无法有效拦截雷电, 增加了接触网遭受雷击的风险。

#### 4.1.2 避雷线安装施工质量不达标

在避雷线安装过程中, 存在施工工艺不规范的情况。如避雷线与杆塔、接地装置之间的连接不牢固, 焊接质量差, 容易出现虚焊、漏焊等问题, 这会极大增加连接部位的电阻, 降低避雷线的导电性能, 影响雷电电流的快速泄放。此外, 部分施工人员对避雷线安装的重要性认识不足, 未严格按照设计要求进行施工, 进一步削弱了避雷线的雷电防护效果。

#### 4.1.3 避雷线运维检测不到位

当前, 铁路接触网避雷线的运维检测工作存在诸多不足。一方面, 检测周期过长, 难以及时发现避雷线在

长期运行过程中出现的老化、锈蚀、断裂等问题；另一方面，检测手段较为落后，主要依靠人工肉眼观察，对于一些隐蔽性故障无法有效检测，导致避雷线的潜在安全隐患不能得到及时处理，降低了避雷线的可靠性。

#### 4.1.4 与其他防雷装置协同性差

铁路牵引供电接触网防雷系统是一个整体，避雷线需要与避雷器、接地装置等其他防雷装置协同工作才能发挥最佳防护效果。然而，在实际运行中，避雷线与其他防雷装置之间缺乏有效的配合与协调。例如，避雷器的动作电压与避雷线的泄流能力不匹配，当雷电来袭时，无法形成有序的防雷屏障，使得雷电能量不能被合理分散和疏导，影响整个防雷系统的性能。

#### 4.1.5 对新型雷电环境适应性不足

随着全球气候变化，雷电活动的特性和规律发生了一定变化，极端雷电天气事件增多。而现有的铁路接触网避雷线大多是基于以往的雷电环境设计建设的，对新型雷电环境的适应性较差。例如，对于高强度、高能量的雷电，避雷线的防护能力有限，难以满足当前铁路安全运行的需求。

### 4.2 改进措施

#### 4.2.1 优化避雷线设计参数

在铁路接触网避雷线设计时，应充分开展线路沿线的雷电环境调研，收集详细的地形、气象、雷电监测数据。运用先进的雷电防护理论和仿真分析技术，结合实际情况，科学合理地确定避雷线的高度、间距、接地电阻等参数。对于雷电活动频繁的特殊区域，可适当提高避雷线的高度和密度，降低接地电阻，扩大避雷线的保护范围，增强其对雷电的拦截能力。

#### 4.2.2 加强避雷线安装施工管理

建立严格的施工质量管理体系，加强对避雷线安装施工过程的监督和管理。在施工前，对施工人员进行专业培训，使其熟悉避雷线安装的技术要求和施工工艺；施工过程中，严格按照设计图纸和相关规范进行操作，加强对关键环节的质量控制，如避雷线连接部位的焊接质量、接地装置的埋设深度等。施工完成后，进行全面的质量验收，确保避雷线安装符合标准，保证其导电性能和雷电泄放能力。

#### 4.2.3 完善避雷线运维检测体系

缩短避雷线的检测周期，采用定期检测与不定期抽检相结合的方式，及时发现避雷线存在的问题。引入先进的检测技术和设备，如红外热成像仪、接地电阻测试仪、超声波探伤仪等，实现对避雷线的全方位、智能化检测。通过对检测数据的分析和处理，建立避雷线健康档案，为避雷线的维护和更换提供科学依据，确保避雷线始终处于良好的运行状态。

#### 4.2.4 提升防雷装置协同工作能力

对铁路牵引供电接触网防雷系统进行整体优化，加强避雷线与避雷器、接地装置等其他防雷装置之间的协同配合。通过理论计算和试验验证，合理调整避雷器的动作电压、通流容量等参数，使其与避雷线的泄流能力相匹配。同时，优化接地装置的设计和布局，降低接地电阻，提高雷电能量的泄放效率，形成一个有机统一的防雷整体，提升整个防雷系统的防护性能。

#### 4.2.5 增强避雷线对新型雷电环境的适应性

开展针对新型雷电环境的研究，探索适用于极端雷电天气的避雷线技术和材料。例如，研发具有更高耐雷水平、更强通流能力的新型避雷线材料；应用智能监测和预警技术，实时监测雷电活动情况，当检测到极端雷电天气时，及时采取相应的防护措施，如调整避雷线的运行参数、启动备用防雷装置等，提高避雷线对新型雷电环境的适应性，保障铁路牵引供电接触网的安全运行<sup>[3]</sup>。

### 结束语

综上所述，铁路牵引供电接触网避雷线的雷电防护是一项系统工程。本文通过剖析工作原理、明确设计要点、解决现存问题，提出了一系列切实可行的防护策略。这些成果不仅有助于提升当前避雷线防护水平，保障铁路供电系统安全，也为后续防雷工程建设提供了重要参考。

### 参考文献

- [1]李鹏.高速铁路牵引供电接触网雷电防护策略探讨[J].现代城市轨道交通,2021(02):248-249
- [2]赵紫辉,吴广宁,曹晓斌,等.基于电气几何模型的接触网避雷线架设高度的计算方法[J].中国铁道科学,2021,32(6):189-193.
- [3]何正友,程宏波.高速铁路牵引供电系统健康体系研究[J].电网技术,2022(10):259-264.