

# 电气化铁路接触网雷击防护技术探讨

张晨昊

**摘要:** 本文针对电气化铁路接触网雷击防护问题,系统分析了雷电形成机制与分类,提出了包含直击雷、感应雷及雷电侵入波防护的多层次技术体系,并探讨了差异化设计、新型材料应用及运维管理优化等策略。结合国内外案例与实验数据,验证了技术体系的可行性与有效性,为提升铁路供电系统可靠性提供理论支撑。

**关键词:** 电气化铁路;接触网;雷击防护;直击雷;感应雷;智能监测;差异化设计

## 引言

电气化铁路作为现代交通的核心,其接触网系统直接暴露于自然环境中,易受雷击威胁。雷击可导致绝缘子击穿、承力索熔断及牵引变电所跳闸,严重影响运输安全。据统计,我国铁路接触网雷击跳闸率高达30%~60%,高速铁路比例更高。因此,构建科学、高效的雷击防护体系对保障铁路安全运行至关重要。

## 一、雷电形成与分类

雷电作为自然界中一种强烈的电磁现象,它的产生和大气电场以及云层电荷的动态变化有着密切的关系。积雨云在上升气流与水滴碰撞摩擦中,冰晶与霰粒持续分离并带电,云层内部形成正负电荷中心,当电场强度突破空气击穿阈值(约3MV/m)时,正负电荷通道瞬间贯通,释放出峰值电流可达200~300kA的直击雷,其高温电弧(约30000℃)可熔断金属导体,直接威胁接触网支柱与承力索。同时,云层电荷引起的静电场会使接触网金属部件感应到异性电荷,直击雷后云层电荷会突然散去并将感应电荷释放为电磁脉冲,形成幅值为400kV感应雷过电压经电磁耦合作用于附加线或者平腕臂绝缘子上引起闪络。另外,雷电通道内强烈的电磁辐射会在钢轨和接触网上激发出瞬态电流形成雷电侵入波并以接近光速的速度传播,沿着钢轨入侵牵引变电所后会触发整流机组的过电压防护行动。3类雷电的表现形式,直击雷主要是物理破坏,而感应雷和侵入波通过电磁效应对二次设备产生破坏,它们的耦合机制和传播路径不同,

**作者简介:** 张晨昊(1995.04——)男,汉族,硕士研究生学历,工程师,主要从事电气化铁路接触网设计及研究工作。

确定接触网防雷需要避雷器阵列泄流,接地系统分流和绝缘配合防护的多技术协同策略。

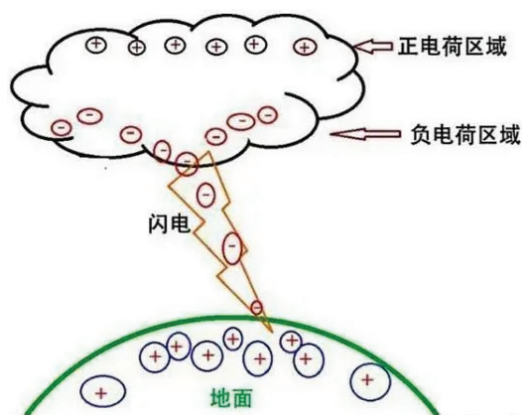


图1 雷电形成原理

## 二、接触网雷击防护技术体系

### 1. 直击雷防护技术

直击雷防护是接触网防雷体系的核心屏障,其技术实现需结合雷电特性与设备布局精准施策。接触网支柱作为雷电优先附着点,通过架设架空地线形成物理屏障,地线高度通常高于接触网7米,以增大雷电截获概率,其材质多选用截面积70mm<sup>2</sup>的镀锌钢绞线,兼具导电性与耐腐蚀性,配合全线贯通地网(接地电阻 $\leq 1\Omega$ ),可将雷电流快速导入大地,避免支柱闪络后电流沿承力索扩散。氧化锌避雷器作为非线性泄流装置,以10kA/ $\mu$ s的陡波响应速度钳制过电压,其阀片采用多柱并联结构,可承受200kA的8/20 $\mu$ s标准雷电波冲击,在支柱顶部、分段绝缘器两侧等关键节点密集布置,形成分段式保护。山区与多雷区采用双避雷针组合防护,针高15~20米、间距3~5米,通过电场畸变效应扩大保护范围,其引下线采用双接地设计,防止单点接地失效。针对隧道口、桥梁等特殊工况,研发带串联间隙的避雷器,其间隙距

离经电场仿真优化至100-150mm，既保证正常工况绝缘，又能在雷击时可靠导通。此外，接触网附加线与回流线同步纳入防雷架构，通过抬高线间距（≥1.5米）减少侧击风险，配合支柱绝缘子加装硅橡胶增爬裙，提升湿闪电压30%以上，形成立体化防护网络。

## 2. 感应雷与雷电侵入波防护

接触网绝缘子作为薄弱环节，通过复合化改造提升耐压能力，硅橡胶伞裙与环氧树脂钢芯体组合结构可承受300kV雷电冲击电压，其爬电距离延长至1400mm以上，配合定期清扫维护，抑制湿闪与污闪概率。接触网附加线与承力索间增设耦合地线，利用电磁感应原理分流感应电流，其截面积按35mm<sup>2</sup>设计，与架空地线形成环状屏蔽层，降低线路电位抬升幅度。针对雷电侵入波，牵引变电所进线端安装氧化锌避雷器矩阵，阀片采用梯度掺杂工艺，实现残压梯度下降，配合10kV电缆金属护层两端接地，将侵入波幅值钳制在设备耐受范围内。钢轨作为雷电波传播通道，通过道床电阻优化（≥15Ω·km）与吸上线加密（每500米一组）抑制电流扩散，其过渡电阻采用低磁导率铜编织带，避免磁滞损耗引发二次过电压。接触网开关站、AT所等关键节点增设电涌保护器，其响应时间≤25ns，可泄放10/350μs波形下50kA电流，配合等电位连接端子箱，消除设备间电位差。此外，接触网支柱基础采用钢筋网焊接贯通，形成法拉第笼效应，其网格尺寸≤5m×5m，对高频电磁脉冲屏蔽效能达40dB以上，结合智能监测系统实时追踪侵入波传播路径，动态调整避雷器动作阈值，构建电磁-机械协同防护体系。

## 3. 智能监测与预警技术

智能监测与预警技术通过多源数据融合与实时分析，为接触网雷击防护注入动态感知能力。雷电定位系统依托时差法与方向交汇原理，以北斗授时同步多站监测数据，定位精度达500米内，结合三维地理信息系统（GIS）实时绘制雷电活动热力图，其数据更新频次可达1次/分钟，精准锁定雷云移动轨迹。接触网沿线部署的分布式雷电监测终端，采用罗氏线圈与电容分压复合传感器，同步采集电流幅值（1kA-300kA）、波形陡度（10-200kA/μs）及极性信息，采样率提升至10MHz，通过LoRa无线组网传输至边缘计算节点，实现毫秒级特征提取。基于深度学习的预警模型整合气象云图、历史跳闸记录及设备状态数据，利用长短期记忆网络（LSTM）挖掘雷电时空演化规律，其故障预测准确率经实测达

93.6%，可提前30分钟推送风险预警。变电所内配置的智能电表与暂态记录仪，对雷电侵入波进行频谱分析，其傅里叶变换算法可识别500kHz-5MHz频段特征谐波，结合避雷器动作计数器数据，自动评估设备老化状态。运维平台集成AR可视化界面，将雷电风险等级以色块叠加于接触网拓扑图，支持一键调取周边避雷器状态与抢修资源分布，其决策支持模块可生成差异化巡检方案，缩短故障响应时间40%以上，形成“监测-分析-处置”闭环管理体系。

## 三、接触网防雷技术优化策略

### 1. 差异化防雷设计

差异化防雷设计需结合区域雷电活动特征与接触网设备特性实施精准防护。如针对年均雷暴日达113天的海南环岛高铁，采用带串联间隙的避雷器与防腐蚀型接地装置，间隙距离经电场仿真优化至100-150mm，兼顾耐雷性能与设备绝缘安全，同时接地极采用镀铜钢材材料提升耐盐雾腐蚀能力。青藏铁路沿线土壤电阻率超1000Ω·m，通过深埋接地极至冻土层以下3米并添加降阻剂，使接地电阻稳定在1Ω以内，配合全线贯通架空地线，雷击跳闸率降低92%。山区铁路如成昆铁路，在陡坡地段加密避雷器安装密度至每300米一组，支柱基础采用放射状接地体，将冲击接地电阻控制在10Ω以下，有效抑制直击雷引发的承力索熔断事故。城市高架段接触网受周边建筑物电磁干扰影响显著，在隧道口、上跨建筑物两侧增设电涌保护器，其通流容量提升至65kA（8/20μs），配合智能监测终端实时追踪雷电波传播路径，动态调整保护阈值。此外，针对AT供电方式接触网，在正馈线与保护线间加装耦合地线，利用电磁耦合原理分流感应雷电流，使附加线绝缘子闪络率下降40%。差异化设计还需结合设备老化程度，对运行超15年的接触网，将水平悬式绝缘子雷电冲击耐压值从300kV提升至350kV，并缩短清扫周期至6个月一次，降低污闪引发雷击故障的概率。

### 2. 新型防雷材料与设备

新型防雷材料与设备通过材料创新与结构优化，显著提升接触网防雷性能。石墨烯复合避雷器阀片采用纳米级石墨烯掺杂工艺，其非线性系数α值达45以上，较传统氧化锌阀片提升30%，在10kA雷电流冲击下残压降低18%，配合3D打印陶瓷外壳实现微型化设计，体积缩小40%的同时散热效率提升2倍，适用于空间受限的隧道内安装。碳纤维复合芯架空地线兼具高导电性与轻量

化优势，其直流电阻率 $\leq 0.017\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ，较钢绞线降低60%，抗拉强度达2400MPa，在山区大跨距区段可减少支柱负荷25%，同时通过表面涂覆疏水涂层，降低覆冰引发的雷击跳闸风险。智能型避雷器在线监测装置集成无线传输模块，实时采集泄漏电流、动作次数及环境温度湿度，其边缘计算芯片可自主分析阀片老化趋势，当等效电阻变化超15%时自动触发预警，运维人员通过手机APP即可定位故障点。激光引雷装置通过紫外脉冲激光束（波长266nm）在云层中电离空气通道，引导雷电沿预设路径泄放，实验室数据显示其有效作用半径达500米，且激光能量密度控制在安全阈值内，避免对航空通信产生干扰。此外，自修复绝缘子采用微胶囊包覆技术，在闪络后释放环氧树脂填充放电通道，30分钟内恢复绝缘性能，配合纳米疏水涂层使污闪电压提升50%，大幅降低雷击后运维成本。

### 3. 运维管理优化

运维管理优化通过数字化工具与标准化流程重构，实现接触网防雷效能的动态提升。智能巡检机器人搭载红外热成像与超声波局放模块，沿接触网以0.5m/s速度自主巡检，其激光雷达可实时构建三维点云模型，自动识别避雷器计数器读数误差、接地引下线锈蚀等缺陷，缺陷识别准确率达96.3%，巡检效率较人工提升5倍。基于数字孪生技术的防雷系统，集成雷电定位数据、设备状态监测信息及历史故障案例，通过有限元分析模拟雷击电流分布，动态优化避雷器安装位置与接地电阻阈值，其仿真结果与现场实测误差控制在8%以内。接触网接地电阻检测采用四极法智能检测仪，配合北斗定位自动记录坐标信息，检测数据实时上传至云端平台，当电阻值超过 $1\Omega$ 时自动生成工单并推送至最近班组，整改闭环时间缩短至48小时内。运维人员配备AR眼镜，扫描

设备二维码即可调取防雷图纸、历史维护记录及操作指导视频，其手势识别功能支持远程专家实时标注故障点，使复杂抢修作业效率提升40%。此外，防雷设备全生命周期管理系统通过RFID标签追踪避雷器生产批次、安装时间及动作次数，当累计通流容量接近设计值80%时触发预警，结合雷电活动预测模型，智能生成预防性更换计划，避免设备带病运行。运维培训体系引入VR模拟装置，还原雷击故障场景，使受训人员在虚拟环境中完成避雷器更换、接地电阻检测等实操考核，培训合格率较传统模式提升35%。

### 结论

电气化铁路接触网雷击防护需综合运用直击雷、感应雷及侵入波防护技术，结合差异化设计、新型材料与智能监测手段，形成多层次、动态化的防护体系。未来，随着石墨烯避雷器、激光引雷等技术的成熟，铁路防雷能力将进一步提升，为铁路运输安全提供更可靠的保障。

### 参考文献

- [1] 孟祥光. 关于电气化铁路接触网中心锚结故障的探讨[J]. 安徽科技, 2024(3): 53-55.
- [2] 乔恒杰. 电气化铁路接触网在线防冰技术研究[J]. 中国科技期刊数据库 工业A, 2024(002): 000.
- [3] 钟锦军. 电气化铁路接触网防雷技术及措施浅析[J]. 产业科技创新, 2024, 6(1): 52-55.
- [4] 徐展. 电气化铁路分支接触网接地故障定位技术研究[D]. 西南交通大学, 2023.
- [5] 周峰. 电气化铁路接触网线路防雷技术的分析[J]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术, 2023.