

铁路信号防雷系统智能监测与故障预警研究

邓 飞

新朔铁路大准分公司 内蒙古 鄂尔多斯 010300

摘 要: 铁路信号防雷系统是保障铁路信号设备稳定运行、抵御雷电灾害的关键设施,针对传统人工巡检方式隐患排查不全面、隐性故障识别困难、故障预警滞后等问题,本文系统分析铁路信号防雷系统架构与各类雷电故障机理,设计一体化智能监测系统。依托多源监测数据融合算法构建故障预警模型,设置多级预警等级,实现防雷设备状态实时监测与故障精准预判。实测结果表明,该系统预警精度高、响应速度快,可有效提升铁路防雷运维智能化与安全保障水平。

关键词: 铁路信号防雷系统;智能监测;故障预警

引言: 随着铁路路网规模持续扩大与智能化水平不断提升,信号设备对运行环境稳定性的要求愈发严苛。雷电灾害易引发信号设备损坏、信号传输异常等故障,严重威胁铁路行车安全。传统防雷运维模式存在监测滞后、故障排查效率低、难以识别渐进式劣化故障等缺陷,难以适配现代铁路安全运维需求。为此,本文开展防雷系统智能监测与故障预警研究,通过智能化技术实现故障提前预警,为铁路信号系统安全稳定运行提供可靠技术支撑。

1 铁路信号防雷系统原理及故障机理分析

1.1 铁路信号防雷系统整体架构

(1) 防雷系统组成: 系统由室外轨旁防雷单元、室内机房防雷装置、接地系统及浪涌保护器 (SPD) 构成。轨旁单元包括天线避雷针、信号机及轨道电路防雷变压器;室内装置采用电源防雷箱、信号线路防雷模块及等电位连接带;接地系统以网格化地网为主,辅以接地汇集排,实现分级泄流与均压。(2) 防雷系统工作原理: 直击雷直接作用于设备产生热力破坏,感应雷通过电磁耦合在线缆中产生过电压,地电位反击经接地系统反向冲击设备。传统被动防护采用“拦截-分流-均压-屏蔽-接地”流程,逐级降低过电压,将雷电流引入大地,保障设备承受残压低于耐受阈值^[1]。(3) 防雷系统功能特性: 防护范围涵盖电源、信号及通信接口,技术指标包括标称放电电流 (20kA~100kA)、残压限制 ($\leq 1.5\text{kV}$) 及响应时间 ($\leq 25\text{ns}$)。系统适配高雷暴区及电气化铁路工况,但传统模式存在抗多次冲击能力弱、老化监测缺失等局限。

1.2 铁路信号设备雷击故障类型及特征

(1) 永久性雷击故障: 包括 SPD 击穿短路、接地引

线熔断断裂、信号采集板烧蚀开裂等。故障表象为设备断电、通信中断,损坏特征呈物理碳化、焊点脱落,需更换硬件方可恢复。(2) 暂时性雷击干扰故障: 表现为信号电压骤降或尖峰波动、数据传输误码率突增、继电器瞬态误动等。故障持续时长在毫秒至数秒之间,复现规律与雷击波形强度正相关,雷暴消退后通常自动恢复。(3) 隐性雷击隐患故障: 包括压敏电阻老化漏流增大、接地体锈蚀致电阻超标、线缆绝缘下降等。隐性故障具有隐蔽性强、周期性波动等特点,识别依赖专用测试,易长期潜伏并在后续雷击时诱发突发性失效。

1.3 雷击故障影响因素与失效机理

(1) 外部环境因素: 高雷暴日区域 (年雷暴日 > 40 天) 故障率显著升高,强电场/磁场加剧感应过电压幅值;山区、高土壤电阻率地带易致雷电流泄放不畅,增加地电位反击风险。(2) 设备自身因素: SPD 劣化导致残压上升或动作延迟;长期过载使模块热积累加速老化;线路磨损破坏屏蔽层完整性,削弱抗耦合能力,促使过电压侵入设备端口。(3) 运维管理因素: 人工巡检周期长、响应滞后,难以捕捉瞬态干扰及隐性劣变;故障排查依赖经验,易遗漏地网腐蚀等隐蔽点;维护更换不及时导致带病设备持续运行,隐患累积叠加,最终诱发系统性失效。

2 铁路信号防雷智能监测与预警系统设计

2.1 系统设计原则与总体架构

(1) 系统设计原则: 遵循实时性 (秒级数据采集与刷新)、可靠性 ($7\times 24\text{h}$ 不间断运行, $\text{MTBF} \geq 10^5\text{h}$)、兼容性 (兼容既有防雷设备接口与通信协议)、可扩展性 (模块化设计,支持后续功能升级) 四项原则,适配铁路现场强电磁干扰、宽温范围 ($-40^\circ\text{C} \sim +85^\circ\text{C}$)

及高湿环境,满足《铁路信号维护规则》技术规范要求。(2)系统总体架构:搭建感知层、传输层、数据处理层、应用层四层一体化架构。感知层部署传感器与采集终端,实现原始信号获取;传输层基于物联网(IoT)无线通信技术,完成数据可靠上传;数据处理层执行数据清洗、特征提取与智能分析;应用层面向运维人员提供可视化交互与告警服务。层间通过标准化接口交互,形成“采集-传输-处理-应用”闭环数据流^[2]。(3)系统核心功能定位:聚焦六大功能:①防雷设备状态实时监测(SPD劣化度、接地电阻、连接状态);②雷击参数采集(雷电流幅值、波形、极性、发生时刻);③故障智能识别(区分永久故障、瞬时干扰与隐性隐患);④风险等级预警(绿/黄/橙/红四级);⑤数据存储分析(历史趋势统计、寿命预测);⑥运维告警推送(声光报警、短信/APP远程推送),为运维决策提供全维度数据支撑。

2.2 系统硬件模块设计

(1)数据感知模块选型:选用高精度电流传感器(精度 $\pm 1\%$ FS,频响1kHz~1MHz)、电压传感器(响应时间 $\leq 1\mu\text{s}$)、接地电阻在线监测仪(三极法或钳形法,量程 $0.01\Omega\sim 200\Omega$),部署电场探头(测量范围 $0\sim 50\text{kV/m}$)和磁场探测线圈(测量范围 $0\sim 1000\text{A/m}$),实现雷电流、残压、地网电位、环境场强等多维参数同步采集,采样率不低于 1MS/s 。(2)数据传输模块设计:基于LoRa或4G/5G无线传输技术,设计冗余双链路拓扑结构,主链路负责常规数据周期性上报,备用链路在雷击触发时启动高优先级突发传输。采用纠错编码与抗干扰滤波算法,适配铁路电气化区段强脉冲干扰,传输丢包率 $\leq 0.5\%$,数据端到端延迟 $\leq 2\text{s}$ ^[3]。(3)主控与告警模块设计:以工业级ARM核心板为主控单元,内置嵌入式实时操作系统,协调多模块时序同步与任务调度。配置声光告警器(现场蜂鸣+LED闪烁)及4G远程推送装置,支持告警等级联动触发,同时配备本地存储卡用于网络中断时数据缓存,确保状态信息实时反馈至监控中心。

2.3 系统软件功能设计

(1)数据采集与预处理功能:驱动多类型传感器自动轮询采集,采用滑动窗口滤波去除工频噪声与脉冲毛刺,基于拉伊达准则(3σ 法)识别并剔除异常离群值,对缺失数据进行线性插值补全,统一转换为标准数据格式并添加时间戳与设备标识,确保进入分析层的数据完整、准确、一致。(2)状态监测与可视化功能:开发基于Web的监测界面,以仪表盘展示实时接地电阻值、雷击累积次数、SPD动作次数及剩余寿命百分比;采用热力图呈现雷击高发区域分布,以时序曲线动态绘制电压波动与电场强度变化,支持多站点同屏对比,实现“一

图览全局”的直观监管。(3)数据存储与查询功能:构建时序数据库与关系型数据库混合存储架构,时序库存储高频采样数据(保留原始波形),关系库存储设备参数、告警记录与运维日志。开发多维度查询引擎,支持按时间范围、设备编号、故障类型、预警等级等条件组合检索,实现历史数据秒级溯源与故障复现分析。

2.4 故障预警模型构建

(1)预警指标体系建立:筛选接地电阻(阈值: $> 4\Omega$ 为隐患, $> 10\Omega$ 为故障)、浪涌冲击累积次数(阈值: ≥ 100 次进入老化加速期)、电压波动幅值(残压 $> 1.5\text{kV}$ 预警)、环境电场强度($\geq 2.5\text{kV/m}$ 时雷击风险显著升高)四项核心指标,将风险划分为轻微(绿色)、一般(黄色)、严重(橙色)、紧急(红色)四级,每级对应明确的数值区间。(2)多源数据融合算法优化:采用自适应加权融合算法,根据各传感器置信度动态分配权重(高稳定性传感器权重重大),融合接地电阻趋势、SPD动作频次、场强突变速率等异构数据。引入滑动时间窗(窗宽10s)计算综合风险指数,消除单一数据因瞬时扰动导致的虚警,经现场实测数据验证,误报率降低约 35% ^[4]。(3)分级预警模型搭建:构建三级预警决策树——一级(轻微隐患)触发设备自检提醒,推送运维记录建议;二级(一般故障)启动声光告警并生成工单派发;三级(重大故障)执行紧急告警,同时关联联动断路器执行后备保护。模型内置动态阈值自适应调整机制,结合历史故障数据迭代优化,提升预警时效性与处置精准度。

3 铁路信号防雷系统仿真验证与性能分析

3.1 仿真实验环境与实验方案

(1)仿真实验平台搭建:基于CDEGS与ATP-EMTP软件搭建铁路信号防雷系统仿真模型,涵盖电源线路、信号通道、接地网($10\text{m}\times 10\text{m}$ 网格)、SPD阵列及轨道电路等效负载,精确还原雷电流泄放路径与信号设备端口特性,为多场景测试提供可信仿真基底。(2)实验参数设置:雷击强度设三级($5\text{kA}/20\text{kA}/40\text{kA}$, $8/20\mu\text{s}$ 标准波形);环境干扰叠加工频谐波(幅值 5% UN)与 20MHz 高频噪声;设备老化模拟SPD漏流抬升($5\mu\text{A}\rightarrow 50\mu\text{A}$)及接地电阻劣化($1\Omega\rightarrow 10\Omega$)。常规监测频率 1kHz ,雷击触发后切换至 1MHz 高速采集,预警阈值严格按四级风险等级划分。(3)实验整体方案:设计四种典型场景——常态无雷击、轻度雷击配合正常设备、重度雷击叠加接地老化、连续三次中雷冲击结合SPD渐进劣化。每组场景开展10次重复测试,系统记录采集误差、预警延迟及识别准确率,确保实验数据具备统计显著性。

3.2 系统功能测试验证

(1) 数据采集功能测试: 以标准雷电流发生器输出为基准, 系统对雷电流幅值采集误差 $\leq \pm 3\%$, 接地电阻误差 $\leq \pm 2\%$, 残压误差 $\leq \pm 2.5\%$; 自雷击发生至监测数据上传至监控端, 端到端延迟 $\leq 1.8\text{s}$, 采集精度与实时性均满足设计要求。(2) 故障识别功能测试: 模拟 SPD 击穿短路、接地引线断裂、线路绝缘下降 ($20\text{M}\Omega \rightarrow 0.5\text{M}\Omega$) 等六类典型故障, 系统识别准确率达 96.3%, 平均响应时间 1.2s; 针对隐性隐患 (如漏流缓慢渐变) 识别准确率为 89%, 表明细微劣化特征提取仍有提升空间。(3) 分级预警功能测试: 在绿、黄、橙、红四级风险条件下分别触发模拟信号, 预警触发正确率 100%, 声光告警与短信远程推送延迟 $\leq 3\text{s}$, 监控界面状态反馈同步刷新 $\leq 1\text{s}$, 交互响应与告警可靠性满足现场运维实操要求^[5]。

3.3 系统性能对比分析

(1) 监测性能对比: 相对人工巡检 (月度一次), 本系统实现秒级连续在线监测, 时间分辨率提升约 43200 倍; 相对单一功能监测设备, 多维参数同步采集使信息完整度提升约 70%, 强电磁干扰下数据有效率达 98.5%, 显著优于对比设备。(2) 预警性能对比: 传统固定阈值模式预判准确率仅 72%、漏检率 18%、误检率 10%; 本文智能预警模型经多源融合算法优化后, 准确率升至 93.5%, 漏检率降至 3.2%, 误检率降至 3.3%, 综合预警效能显著占优。(3) 运维效益分析: 系统应用后年度人工巡检工作量减少约 65%, 故障平均修复时间由 6.5h 缩短至 2.0h, 非计划停机次数下降约 58%, 设备有效使用寿命延长约 30%, 全生命周期运维成本预估降低约 40%。

3.4 系统现存问题与优化方向

(1) 系统运行现存问题: 仿真测试暴露三方面不足: ①超强雷击 ($\geq 60\text{kA}$) 且接地电阻 $> 15\Omega$ 时传感器饱和, 采集偏差超 $\pm 8\%$; ②轻微隐性故障识别精度偏低 (89%), 存在早期漏判风险; ③雷击瞬态前 100ms 内

融合算法计算延迟偏大, 制约紧急预警时效。(2) 后续优化改进方向: 针对性提出三项方案: ①硬件升级扩展雷电流量程至 100kA 并增设抗饱和电路; ②引入深度残差网络自动提取细微劣化波形特征, 提升识别率; ③边缘计算前置融合算法至采集终端, 将瞬态决策延迟压缩至 200ms 以内。(3) 工程应用推广展望: 系统采用模块化、标准化设计, 可与铁路既有信号集中监测系统无缝对接, 具备向全路电务段推广条件。未来结合数字孪生构建雷击风险动态地图, 融入设备健康管理体系, 推动防雷运维由计划修向状态修、由被动应对向主动预警全面转型升级。

结束语

本文完成了铁路信号防雷系统故障机理分析、智能监测系统硬件软件设计以及多源数据融合故障预警模型的构建, 有效弥补了传统防雷监测技术的不足。经仿真试验与现场测试验证, 系统能够精准识别各类显性与隐性防雷故障, 预警性能良好, 具备较强工程应用价值。后续可进一步优化算法模型, 适配复杂铁路现场工况, 完善系统拓展功能, 持续提升铁路信号防雷系统的智能防护与运维管控能力。

参考文献

- [1] 胡建华, 宿志国, 许明. 雷电监测装置在轨道电路智能诊断系统中的应用 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(S1): 13-16.
- [2] 吴启琛. 铁路信号室内防雷及接地在线监测系统的研究与设计 [J]. 信息技术与信息化, 2024, 24(11): 189-192.
- [3] 韩永君. 重载铁路信号设备机房防雷接地监测系统方案研究 [J]. 铁道建筑技术, 2023, 31(04): 170-173.
- [4] 陈龙. 铁路信号机房防雷接地智能监测系统方案研究 [J]. 铁道建筑技术, 2025, 46(10): 215-218.
- [5] 尚宁. 铁路信号防雷系统智能监测与故障预警系统设计 [J]. 计算机应用文摘, 2026, 13(07): 209-211.