

Research on status monitoring and fault warning technology of contact network equipment

Bo Yu

Suining Branch of Guoneng Shuohuang Railway Development Co., Ltd., Cangzhou, Hebei, 062350, China

Abstract

With the operational mileage of China's electrified railways exceeding 160,000 kilometers, the overhead contact system, as the core power supply equipment for rail transit, directly affects train safety and transportation efficiency. However, traditional overhead contact system operation and maintenance rely on manual inspections and periodic repairs, which suffer from issues such as high costs, delayed response, and significant risk of missed inspections. Under the context of "smart railway" construction, intelligent operation and maintenance technologies based on condition awareness and data-driven approaches have become crucial for industry transformation. This paper first elaborates on the technical foundation of overhead contact system equipment condition monitoring, then provides a detailed analysis of equipment condition assessment methods, followed by specific proposals for fault early warning technologies. The study further explores relevant technical applications and case analyses to offer valuable references and insights for related research.

Keywords

overhead contact line equipment; condition monitoring; fault warning; technical research

接触网设备状态监测与故障预警技术研究

于波

国能朔黄铁路发展有限责任公司肃宁分公司, 中国·河北 沧州 062350

摘要

随着中国电气化铁路运营里程突破16万公里, 接触网作为轨道交通的核心供电设备, 其运行可靠性直接关系到行车安全与运输效率。然而, 传统接触网运维依赖人工巡检与定期检修, 存在成本高、响应滞后、漏检风险大等问题。在“智能铁路”建设背景下, 基于状态感知与数据驱动的智能运维技术成为行业转型关键。本文先是具体阐述了接触网设备状态监测技术基础, 随后详细分析了接触网设备状态评估方法, 紧接着具体提出了接触网故障预警技术, 并进行了相关技术应用与案例分析, 以期对相关研究提供有益参考与借鉴。

关键词

接触网设备; 状态监测; 故障预警; 技术研究

1 引言

接触网作为轨道交通的“生命线”, 其故障易引发列车停运、设备损毁甚至人员伤亡等严重后果。据统计, 我国铁路接触网故障中机械磨损与电气故障占比超 60%, 而传统人工巡检难以发现高速、复杂环境下的隐蔽缺陷。随着“智能铁路”建设目标的提出, 接触网运维亟需从“被动维修”向“主动预防”转型。当前, 国外如德国 DB 公司、日本 JR 东日本虽已部署在线监测系统, 但存在数据孤岛、模型适应性差等问题; 国内虽应用了张力传感器等设备, 但多源数据融合与故障预警仍依赖经验规则, 智能化决策能力不足。为此, 本文提出一种基于数据驱动的接触网状态监测与

故障预警技术, 重点攻克多源数据融合、特征智能提取及动态预警模型构建等关键难题, 以推动接触网运维向智能化、精准化方向升级。

2 接触网设备状态监测技术基础

2.1 接触网设备组成与典型故障模式

接触网作为轨道交通的核心供电设备, 由接触线、承力索、绝缘子、支持装置(如腕臂、定位器)及补偿装置等关键部件构成。其运行环境复杂, 长期承受机械张力、电气负荷及环境侵蚀, 易引发多种典型故障: 接触线因受电弓滑动摩擦、张力波动或材质疲劳, 可能局部减薄甚至断裂, 导致供电中断; 承力索作为主承力构件, 若张力分布不均或锚固失效, 会出现松弛或断股, 威胁结构稳定性^[1]; 绝缘子表面沉积工业粉尘、盐雾等污秽后, 在潮湿环境下易形成导电通道, 引发污闪或沿面放电, 造成绝缘失效; 腕臂、定位器

【作者简介】于波(1999-), 男, 中国河北沧州人, 本科, 助理工程师, 从事铁路牵引供电接触网专业研究。

等支持装置因长期振动或外力冲击,可能松动、偏移,导致接触线空间位置超限,诱发弓网故障。上述故障的成因涉及材料老化、设计缺陷、环境侵蚀及运维不当等多重因素,因此需通过构建多参数监测体系,实时捕捉设备状态变化,实现故障的早期预警与精准干预,从而保障接触网的安全可靠运行。

2.2 状态监测参数体系构建

接触网状态监测需构建覆盖电气、机械及环境三类核心参数的监测体系,以全面反映设备健康状态。电气参数方面,接触压力可反映弓网接触质量,异常压力会加速磨损或引发电弧;导电性能通过监测接触电阻和温升,识别氧化、松动等缺陷;绝缘电阻则实时评估绝缘子等部件的绝缘性能,预防污闪或击穿。机械参数中,振动与加速度捕捉支持装置和接触线的振动特征,诊断松动或疲劳问题;张力与弧垂监测防止因张力失衡导致结构失稳;温度场分布通过红外热成像定位过热区域,预警过载或连接故障。环境参数方面,风速与风向结合力学模型评估舞动或倾覆风险;湿度与覆冰则通过气象传感器实时监测,预防污闪和负重增加引发的故障。

2.3 多源数据采集与传输技术

多源数据的高效采集与可靠传输是接触网状态监测的基础,需从传感器选型、布局优化及通信架构三方面协同推进。传感器选型上,张力传感器采用高精度应变片或光纤光栅,安装于锚段关节实时监测张力;红外热像仪部署于关键节点识别过热;加速度计固定于腕臂捕捉振动信号;风速仪与温湿度传感器安装于支柱顶部实现环境参数全覆盖,布局遵循“关键部件全覆盖、冗余设计降风险”原则。数据传输方面,现场层采用 LPWAN 或工业以太网支持短距离通信;网络层依托 5G 或铁路专用网络实现毫秒级上传;平台层通过边缘计算预处理数据,利用 MQTT 协议对接运维系统。复杂环境下可采用无线中继或光纤环网增强信号覆盖,确保传输可靠。

3 接触网设备状态评估方法

3.1 数据预处理技术

原始监测数据因环境干扰、传感器故障或通信异常,常存在噪声、缺失或离群值,影响接触网状态评估的准确性,需通过预处理提升数据质量。数据清洗环节,采用 3σ 准则等统计方法或孤立森林等机器学习算法识别并剔除异常值,对缺失值则利用均值插补、ARIMA 时间序列预测或 K 近邻填充确保数据连续性^[2];数据降噪方面,针对振动、温度信号中的高频噪声,小波变换通过多尺度分解保留有效特征,卡尔曼滤波利用状态空间模型动态修正误差,尤其适用于动态张力监测;数据标准化与归一化则对接触压力、绝缘电阻等电气参数与张力、弧垂等机械参数进行 Min-Max 缩放,消除量纲差异,为后续特征分析提供统一尺度。

3.2 特征提取与降维方法

接触网状态监测数据多源且高维,需通过特征工程提取关键信息并降低计算复杂度。时域特征方面,计算接触线振动信号的均值、方差、峰值因子等,可反映设备运行稳定性,如磨损加剧时振动方差会显著增大;频域特征通过傅里叶变换提取主频、谐波成分,诊断共振或疲劳损伤,功率谱密度分析还能识别承力索张力波动的能量分布;时频域特征则利用短时傅里叶变换或希尔伯特-黄变换,分析强风下接触网舞动等非平稳信号,捕捉瞬态冲击与频率变化。特征选择与降维中,主成分分析通过线性变换保留数据方差最大方向,线性判别分析最大化类间差异,如绝缘子污闪数据经 PCA 处理后,前 3 个主成分可解释超 90% 方差,大幅减少计算量。

3.3 状态评估模型构建

基于预处理数据与提取特征,需构建多层级评估模型以量化接触网状态并实现分级。首先,采用层次分析法(AHP)将接触网划分为接触线、承力索等子系统,结合专家评分或历史故障数据分配参数权重(如接触压力占 30%、张力占 25%),实现多参数综合评估;其次,通过模糊综合评价定义健康、亚健康、故障三级状态,利用隶属度函数将参数值映射至模糊集,以加权平均或最大隶属度原则确定最终状态,例如绝缘子绝缘电阻低于 $500M\Omega$ 时,其隶属“故障”状态的程度达 0.8;最后,基于马氏距离计算实时数据与健康样本的偏离程度,若超过 χ^2 分布临界值则判定为异常,该方法能有效处理参数相关性,适用于接触网动态监测场景。

4 接触网故障预警技术

4.1 故障预警框架设计

预警框架作为故障预警的基石,需融合数据驱动与领域知识构建可扩展的指标体系,并实现阈值的动态适配。在预警指标体系构建中,以历史故障数据为依托,结合专家经验筛选接触线磨损率、绝缘子污秽度、张力波动范围等关键参数,运用 Apriori 算法挖掘参数间的协同作用,如“高湿度+低绝缘电阻”组合可能预示污闪风险;同时引入威布尔分布等设备退化模型量化参数劣化趋势,为指标权重分配提供科学依据^[3]。在预警阈值动态调整机制方面,基于接触线疲劳寿命曲线等设备退化规律,采用滑动窗口统计实时数据分布,结合 CUSUM 控制图理论检测异常偏移,例如当接触线张力波动标准差连续 3 个监测周期超过历史均值 1.5 倍时,系统自动上调预警阈值并触发深度诊断流程,有效平衡了预警灵敏度与误报率,提升了故障预警的精准性与实用性。

4.2 预警模型选择与优化

针对接触网故障类型多样,涵盖机械断裂、电气闪络等复杂场景,需融合多类模型构建精准预警体系。在短期预

测层面, ARIMA 模型通过差分整合捕捉张力、振动等时序数据的线性趋势, 适用于稳定工况下未来 24 小时的张力值预测; 而 LSTM 神经网络凭借门控机制学习非线性依赖关系, 可有效处理强风、覆冰等突发工况下的数据波动, 某铁路局应用后将接触线舞动预警准确率提升至 92%。在故障模式识别方面, SVM 通过核函数映射高维特征空间, 实现小样本绝缘子裂纹分类; 随机森林则通过集成学习降低过拟合风险, 成功处理“张力突变+温度异常”等多参数耦合故障, 某试点项目中其对承力索断股的召回率达 88%, 较传统阈值法提升 23 个百分点。此外, 基于知识图谱的故障推理系统通过构建“接触线-腕臂-定位器”等设备拓扑关系, 结合规则库实现因果推理, 当定位器偏移超限时自动推导接触线磨损风险并生成检修建议, 有效弥补了数据驱动模型的“黑箱”缺陷。

4.3 预警结果可视化与决策支持

接触网故障类型复杂, 涵盖机械断裂、电气闪络等多种场景, 需融合多类模型构建精准预警体系^[4]。短期预测中, ARIMA 模型利用差分整合捕捉张力、振动等时序数据的线性趋势, 能精准预测稳定工况下未来 24 小时的张力值; LSTM 神经网络则凭借门控机制学习非线性依赖, 可有效应对强风、覆冰等突发工况下的数据波动, 某铁路局应用后, 接触线舞动预警准确率高达 92%。故障模式识别方面, SVM 通过核函数映射至高维空间, 实现小样本绝缘子裂纹的高效分类; 随机森林借助集成学习降低过拟合风险, 可处理“张力突变+温度异常”等多参数耦合故障, 某试点项目显示其对承力索断股的召回率达 88%, 较传统阈值法提升 23%。此外, 基于知识图谱的故障推理系统构建设备拓扑关系, 结合规则库进行因果推理, 当定位器偏移超限时, 能自动推导接触线磨损风险并生成检修建议, 有效弥补了数据驱动模型的“黑箱”局限。

5 技术应用与案例分析

5.1 典型场景下的技术适配性分析

接触网运行环境差异大, 需定制监测方案平衡精度与成本。高速铁路(时速 $\geq 250\text{km}$)接触网振动频率高、参数波动大, 传统方法易误报, 需用高采样率($\geq 1\text{kHz}$)惯性传感器采集振动位移等数据, 结合卡尔曼滤波算法提升可靠性, 如京沪高铁应用后接触线舞动监测误差大幅降低; 针对弓网离线电弧频发问题, 部署紫外成像仪捕捉光谱特征, 结合时频分析实现早期预警。复杂环境如隧道、桥梁监测方

案需优化: 隧道内湿度高易污闪, 可用无线低功耗传感器网络部署监测节点, 结合模糊聚类算法定位风险区段; 桥梁段需安装光纤光栅应变传感器监测张力, 通过小波变换提取风振频率, 某跨海大桥应用后接触线断股风险预警时间大幅提前。

5.2 与现有运维系统的集成路径

预警技术要与既有运维系统深度融合, 以避免“数据孤岛”, 达成从预警到处置的闭环管理。在数据接口标准化上, 遵循 IEC 61850 协议构建统一数据模型, 定义接触网设备逻辑节点与数据属性, 实现多源数据语义互操作, 还采用 OPC UA 协议封装预警模型输出并推送至运维平台。业务逻辑融合方面, 把预警结果嵌入检修计划生成流程, 故障概率超阈值时自动触发优化算法生成检修方案, 某铁路局集成后检修计划制定效率提升、非计划停电次数减少; 在备品备件管理上, 结合马尔可夫决策过程预测故障概率分布, 动态调整库存, 识别出风险上升时自动生成采购建议, 优化库存周转率。

6 结论与展望

总的来说, 本文针对传统接触网运维成本高、响应滞后等难题, 提出基于数据驱动的智能监测与预警技术体系, 通过构建多参数监测体系、融合多源数据并结合时频分析等方法实现状态精准评估, 针对不同场景优化监测方案, 集成多种模型提升预警准确率与可解释性, 最终实现预警-检修-备件管理的闭环管理。案例表明, 该技术可降低监测误差、提前预警风险, 提升检修效率与库存周转率, 为接触网运维智能化转型提供理论与技术支撑。展望未来, 可深化多源数据融合技术, 结合数字孪生构建虚拟模型; 优化预警模型以适应极端场景; 推动技术标准化与产业化, 制定相关规范与标准, 加速成果在沿线国家推广, 助力全球轨道交通智能化升级。

参考文献

- [1] 石磊. 地铁接触网设备维护的智能化解决方案研究[J]. 通讯世界, 2025, 32(08): 149-151.
- [2] 董力涵. 城市轨道交通接触网设备的状态评价方法与应用[J]. 科技视界, 2025, 15(17): 63-66.
- [3] 许丁. 城市轨道交通接触网设备可视化运维管理[J]. 运输经理世界, 2024, (25): 4-6.
- [4] 宋兴海. 浅谈接触网主导回路分流对接触网设备的危害[J]. 电气化铁道, 2023, 34(S2): 79-80+87.