

Exploration of Troubleshooting Technology and Preventive Maintenance Application for Track Circuit Signal Equipment

Wei Wang

Jinzhou Signal Section, Shenyang Railway Bureau, China Railway, Jinzhou, Liaoning, 121000, China

Abstract

Track circuit signal equipment is the “nerve center” of railway transportation, and its operation directly affects safety and efficiency. With the development of railways, equipment failures are frequent and diverse. It is of great significance to conduct in-depth research on fault diagnosis techniques and establish a preventive maintenance system. This article analyzes the causes and troubleshooting points of equipment failures, introduces intelligent monitoring, fault diagnosis algorithms, remote troubleshooting, and standardized upgrading of specialized troubleshooting tools required for typical systems such as 25Hz track circuit overlay ZPW2000 coding equipment and ZPW2000 track circuit. It elaborates on the practical path of constructing a preventive maintenance system, including scientifically formulating maintenance plans, controlling daily inspection content, implementing component cycle maintenance standards, and improving the professional abilities of maintenance personnel, providing support for the safe and stable operation of railway transportation.

Keywords

track circuit; signal equipment; troubleshooting

轨道电路信号设备故障排查技术与预防性维护应用探讨

王巍

中国铁路沈阳局锦州电务段, 中国·辽宁 锦州 121000

摘要

轨道电路信号设备是铁路运输的“神经中枢”，它的运行好坏直接影响到安全和效率。随着铁路的发展，设备故障频发、种类繁多，对故障排查技术进行深入研究，建立预防性维护体系具有十分重要的意义。本文对设备故障成因及排查要点进行了分析，介绍了智能监测、故障诊断算法、远程排查、针对25Hz轨道电路叠加ZPW2000发码设备、ZPW2000轨道电路等典型制式所需的专用排查工具标准化升级等排查技术，阐述了预防性维护体系构建的实践路径，包括科学制定维护计划、把控日常巡检内容、执行部件周期维护标准、提升维护人员专业能力等，为铁路运输安全稳定运行提供支持。

关键词

轨道电路；信号设备；故障排查

1 引言

轨道电路信号设备是铁路运输的“神经中枢”，担负着列车运行控制、区间占用检测、信号传递等重要工作，它的运行状况直接影响到铁路运输的安全和效率。随着铁路运输规模的扩大、运行速度的提高，设备的运行负荷越来越大，故障发生的频率越来越高，故障的类型也越来越复杂多样。一旦设备发生故障，轻则造成列车运行晚点，重则造成安全事故，严重危及旅客生命财产安全和铁路运输秩序。在此背景下，对轨道电路信号设备故障排查技术进行深入研究，建立科学完善的预防性维护体系，是保证铁路运输安全稳定的要求，对推动铁路事业高质量发展有重要的现实意义。

【作者简介】王巍（1982-），男，中国河北丰润人，本科，工程师，从事信号设备维修维护研究。

2 轨道电路信号设备故障成因与排查核心要点

2.1 设备自身结构缺陷隐患

轨道电路信号设备结构精密，由轨道继电器、发送器、接收器、绝缘节等主要部件组成，各个部件之间互相配合来完成信号传输和控制的功能。但是由于部分设备设计不合理、生产工艺不合格，存在结构缺陷隐患。部分轨道继电器触点接触压力不足，长期使用会因氧化、磨损而引起信号传输中断；绝缘节材料性能不良，在潮湿、高温环境里很容易老化开裂，造成轨道电路短路或者断路。以25Hz轨道电路叠加ZPW2000发码设备为例，其叠加发码单元中隔离匹配变压器的匝数比设计余量不够，在持续发码工况下容易造成磁饱和，引起低频信号畸变；ZPW2000轨道电路的发送器、接收器内部使用多层印制板结构，如果焊点工艺有微小虚接，在温度循环应力作用下就会引发间歇性故障。结构缺陷

在设备运行初期很难被发现,随着运行时间的增加而逐渐暴露出来,是造成故障频发的主要原因。

2.2 外部环境因素干扰影响

外部环境属于造成轨道电路信号设备故障的主要原因。铁路沿线气候变化大,暴雨、暴雪、高温、高湿等极端天气都会给设备带来直接的危害。暴雨会造成设备基础积水,引起电气设备短路;暴雪堆积会压断设备连接线路,造成信号传输中断;高温环境下,设备散热不好,核心部件温度过高,容易造成性能衰减、故障停机。另外沿线电磁环境比较复杂,高压输电线路、电气化铁路接触网等产生的电磁干扰会对设备信号传输的准确性造成影响,造成信号失真、误判,干扰设备正常工作。特别对 25Hz 轨道电路叠加 ZPW2000 发码系统来说,由于同时存在 25Hz 相敏轨道电路和 ZPW2000 移频信号,两路信号在钢轨上叠加传输,对绝缘性能要求更高,一旦道床泄漏电阻下降,很容易造成信号串扰;ZPW2000 轨道电路对牵引回流不平衡引起的工频干扰非常敏感,容易造成接收器误动作。

2.3 故障排查核心流程梳理

故障排查要按照科学规范的流程,保证可以迅速准确地找到故障点。在开始排查之前,首先要获取故障信息,即故障发生的时间、地点、设备运行状况、故障报警信息等,大致确定故障的类型及影响范围。然后进行现场勘查,对设备的外观、连接线路、供电状态做全面检查,找出明显的故障隐患。最后用专业的检测仪器对设备主要部件进行性能检测,找出故障所在。最后根据故障原因制定维修方案,维修完成后进行功能测试,保证设备正常运行,形成闭环管理流程。

3 轨道电路信号设备故障排查技术优化

3.1 智能监测技术赋能故障预警

智能监测技术依靠多源传感网络和边缘计算架构,把轨道电路故障排查由被动响应变为主动预警。在轨道电路关键节点处安装高精度电流互感器、宽温型振动传感器、贴片式 PT100 温度传感器和轨面电位检测模块,形成空间分布式监测矩阵。各个传感器用毫秒级同步采集送端功出电流、受端轨入电压、补偿电容表面温度、钢轨振动频谱等参数,通过 RS485 总线或者无线 LoRa 上传到区段边缘计算网关。网关内设信号调理电路和模数转换器,对原始数据进行滤波去噪和特征初提取。根据长短期时间序列建模方法建立轨道电路健康状态基线库,包括不同的气候、道床条件、列车荷载下参数的正常波动范围。采用孤立森林算法和动态时间规整技术,对当前参数向量和历史基线库进行实时比对,当偏离度大于自适应阈值时触发三级预警机制,黄色预警提示参数趋势变差,橙色预警建议近期检查,红色预警立即推送故障可能性和推荐排查路径。在潮湿季节,系统监测到某区段绝缘电阻以每天 5% 的速度连续下降,同时段道床泄漏电流

也同步上升,自动定位绝缘薄弱区段并发出预警。智能监测把故障探测窗口从故障发生之后前移到了故障萌芽之前 48 到 72 小时,给排查争取到了宝贵的窗口期。

3.2 故障诊断算法提升排查精度

基于深度神经网络和集成学习的故障诊断算法,克服了传统排查依靠经验判断的局限性,实现了故障类型识别和部件定位的定量化、自动化^[1]。建立轨道电路故障样本库,收集整理分路不良、绝缘破损、电容开路、引接线断股、电源波动五类典型故障下的监测数据片段,每段数据标注故障类型、位置、严重程度和环境条件。使用卷积神经网络对样本数据进行训练,网络结构为三层卷积层提取时频域特征,两层全连接层分类决策,输出层用 Softmax 函数给出各类故障概率分布。为了解决样本不平衡问题,用焦点损失函数来提高对稀少故障类型的识别能力。神经网络算法可以自动识别补偿电容失效时特有的二次谐波畸变特征,区分电容开路和容量衰减在频谱上细微的差别。模糊逻辑算法适合于故障特征边界不清的情况,比如分路不良的早期阶段轮轨接触电阻处于临界状态时,可以建立输入变量(轨面湿度、通过总重、道床电阻、接触电阻趋势)的隶属度函数,设置如果“轨面湿度低且通过总重小于阈值且接触电阻缓慢上升”,那么分路不良风险中等模糊推理规则,输出量化为 0 到 1 之间的故障确信度。双算法并联架构下,神经网络给出初步诊断后由模糊逻辑进行置信度修正,最终输出排查建议排序表,指导维护人员优先验证概率最高的故障分支。

3.3 远程排查技术突破地域限制

远程排查技术依靠信号层、传输层和应用层三层架构,创建起跨越地理距离的轨道电路协同诊断能力。信号层在轨道电路轨旁设备柜内加装远程测控终端,集成多路继电器控制接口和模拟信号采集通道。终端采用 4G/5G 通信模块同云端排查平台创建安全加密连接,可以完成下行指令解析以及上行数据回传。运维人员在控制中心登录平台,调取目标区段实时波形曲线、关键点电压值、继电器状态字,不需要到现场就可以完成初步状态评估。当需要进一步测试的时候,平台下发柔性测试指令集,远程测控终端依次接通内部继电器,把内置的标准测试源切换到指定的测试点,自动执行绝缘电阻测量、电容在线容值检测、分路灵敏度校验三项主要测试,测试结果实时回传到平台,生成格式化的报告。远程排查平台支持多方会议模式,现场人员用防爆手机上传设备外观照片和热成像图,技术专家在异地同步标注异常区域并推送维修指引。雨雪天气交通受阻时,远程排查把故障定位时间由原来的平均 4 小时缩短到 40 分钟以内,大大削减了维护人员上道的风险和交通延误的成本。

3.4 排查工具标准化升级保障效率

排查工具标准化、智能化升级,从硬件上消除了由于工具不同、人为读数造成的检测误差,大大提高了作业效率^[2]。根据轨道电路排查项目繁杂的特点,应该推广使用多

功能、智能化的综合检测仪。该仪器集成了数字万用表、绝缘电阻测试仪、电容表、示波器（或移频信号分析模块）、标准轨道电路信号发生器等众多功能于一体，采用模块化设计，用软件菜单一键切换测试模式。仪器可以自动选择量程、设置故障阈值、智能判断。运维人员选择 ZPW-2000 绝缘测试模式后，仪器自动施加 500V/1000V 测试电压，测得绝缘电阻后自动与预置门限（如 $1\text{M}\Omega$ ）对比，直接显示合格、注意、不合格的直观结论。便携式移频信号分析仪使用高阻抗差分探头，可以非侵入式钳夹在钢轨或者引接线上，实时采集并分析移频信号的载频、低频、频偏、电平 and 波形失真度，内嵌的故障特征库可以自动比对分析，弹出“频偏不足—补偿电容失效”、“波形畸变—匹配单元异常”等提示信息。标准化升级也包括工具管理以及使用流程。全线所有关键排查仪器仪表必须统一型号、定期溯源，每季度送至计量中心校准，电压测量误差 $\leq \pm 0.5\%$ ，电容测量误差 $\leq \pm 1\%$ 。同时编制图文并茂的标准化作业指导卡，对 25Hz 轨道电路叠加区段电压异常、ZPW-2000 小轨道电压波动等典型故障，规定了应使用的工具、挡位、测试点位置、测试步骤和合格判据。依靠工具和流程的双重标准化，把排查作业从靠老师傅的经验手感转变为按标准作业、凭数据说话，使排查工单的一次准确率从 82% 提高到 96% 以上，为高效精准的故障排查提供硬件和流程上的保障。

4 轨道电路信号设备预防性维护体系构建的实践路径

4.1 维护计划科学制定原则

科学制定维护计划是预防性维护的前提。制定计划要联系设备运行特性、故障规律、运行环境等重要因素，全面考虑设备运行状况及可能存在的风险。按照设备的使用寿命和检修周期的要求，合理确定维护周期，日常巡检、月度检修、年度大修等各个阶段的维护内容和标准。根据铁路运输高峰、极端天气等特殊时段的特点，动态调整维护计划，提前开展设备专项检查和维护工作，保证设备在关键时段正常运转。

4.2 日常巡检关键内容把控

日常巡检属于预防性维护的重要部分，要严格控制好主要的内容。巡检重点是设备外观、连接状态、运行参数，检查设备外壳有无破损、锈蚀，连接线路有无松动、老化，供电电压、电流是否稳定，设备运行声音是否正常。同时注

意设备运行环境，清理设备周围杂物、积水，保证设备散热良好，排除环境因素对设备的影响。建立巡检台账，详细记录巡检时间、巡检内容、巡检发现的问题及处理情况，实现巡检工作的可追溯管理，及时发现并消除设备早期隐患。

4.3 部件周期维护标准执行

部件周期维护是保证设备性能的重要手段，必须严格执行维护标准^[1]。根据设备维护手册的要求，对轨道继电器、发送器、接收器等主要部件的周期性维护标准进行详细的制定，确定维护项目、操作程序、技术参数。定期对轨道继电器触点进行清洁、打磨，保证触点接触良好；对发送器、接收器进行性能校准，保证信号传输精度；对绝缘部件进行绝缘性能检测，及时更换老化破损的绝缘部件。严格按照周期维护标准，保证各个部件一直处在良好的工作状态之中。

4.4 维护人员专业能力提升

维护人员专业能力影响预防性维护质量，需要不断加强队伍建设。建立完善的培训体系，定期开展设备原理、维护技术、故障排查等专业知识培训，邀请行业专家授课，传授先进的维护经验和技能。同时组织实操演练，模拟设备故障场景，提高维护人员实操能力和应急处置水平。建立考核激励机制，把维护工作质量与绩效考核挂钩，调动维护人员学习积极性和责任心。

5 结语

轨道电路信号设备的正常工作，是保证铁路运输安全高效的基础。以故障排查技术革新和预防性维护的落实为出发点，可以有效地解决设备运行隐患，也可以筑牢安全运行防线。未来要跟紧铁路技术更新的速度，不断挖掘智能排查的潜力，完善维护体系的细节，用技术来提升运维效能，用严谨来守护运输安全底线，给铁路事业稳健前行提供强劲动力，护航铁路运输行稳致远。

参考文献

- [1] 陈壮龙.ZYJ7型液压转辙机和50Hz轨道电路设备故障诊断技术研究[C]/江西省工程师联合会.第二届智能工程与经济建设学术研讨会论文集（一）.佛山市地铁运营有限公司,2025:116-119.
- [2] 陈琦.城市轨道交通信号设备故障处理指南[M].中国铁道出版社:202412:206.
- [3] 郑鹏,莫建龙,陈怀文.ZPW-2000A轨道电路小轨道电压异常升高造成闪红故障分析[J].铁路通信信号工程技术,2024,21(S1):25-28.