

Analysis of Railway Locomotive Quality Risk Prevention and Control Measures Based on Condition Monitoring

Mingming Cui

Locomotive Branch of Baoshen Railway Group, National Energy Group, Dianta Town, Shenmu City, Yulin, Shaanxi, 719316, China

Abstract

Under the current circumstances where the working conditions of railway locomotives are becoming increasingly complex and their service life is gradually extending, the traditional quality control method mainly based on regular maintenance is difficult to accurately reflect the true state of the equipment. Quality risk prevention and control based on condition monitoring involves collecting data from the operation of key systems of locomotives and, based on the multi-source information and condition characteristics collected, identifying the deterioration trend and conducting early warning and hierarchical control. This approach can detect potential quality issues in advance and monitor and track them throughout the entire process, significantly enhancing the efficiency of quality risk prevention and control for railway locomotives. Based on this, this article will briefly analyze the common quality risks of railway locomotives, explore the risk prevention and control principles of condition monitoring, and propose effective risk prevention and control strategies, with the aim of promoting the transformation of locomotive quality management from experience-based to data-supported.

Keywords

Railway locomotive Status detection Quality risk Prevention and control measures

基于状态监测的铁路机车质量风险防控措施分析

崔明明

国家能源集团包神铁路集团机务分公司, 中国·陕西 榆林 719316

摘要

在当前铁路机车工况日趋复杂以及服役年限逐渐延长的情形下, 传统的以定期检修为主的质量控制方式, 很难准确地反映设备真实状态。基于状态监测的质量风险防控是从机车的关键系统运行过程中采集数据, 并依据采集到的多源信息和状态特征完成劣化趋势的判识以及预警分级控制。该种方式能够提前发现潜在的质量问题, 并对其全过程的监控和跟踪处理, 大大提高铁路机车质量风险防控效率。基于此, 文章将简要分析铁路机车常见的质量风险, 探讨状态监测的风险防控原理, 并提出有效的风险防控策略, 以期能促进机车的质量管理从以经验为主向数据为支撑的方向转变。

关键词

铁路机车; 状态检测; 质量风险; 防控措施

1 引言

当前中国铁路运输实现了高速化、重载化以及智能化, 铁路机车的运行环境也不断趋于复杂, 为此对其运行的可靠性与安全性也提出了更高的要求。传统的以计划检修及事后维修为主的管理方法很难达到现代铁路运输中对安全风险前置控制的需求, 在此背景下, 基于状态监测的质量风险防控理念应运而生, 其依托于状态监测手段获取机车运行过程中各关键部件的实时状态, 并结合数据分析等手段提供机车故障预警服务, 能够有效补充与完善传统机车维修模式的不

足, 成为铁路机车质量管理工作的一项重要发展方向。

2 铁路机车质量风险的主要类型

2.1 牵引系统性能衰减型质量风险

牵引系统作为机车动力输出的核心, 其质量风险主要包括牵引电机绝缘老化、功率器件热应力累积、控制单元参数漂移等^[1]。因为其长时间处于大功率运行状态, 绝缘性能会慢慢降低, 且可能会出现潜在的局部放电问题, 无法在常规检修中及时察觉。此外, 在频繁启停及负载波动情况下, 牵引变流装置内半导体器件容易产生热疲劳裂纹, 造成器件输出性能下降, 埋下质量运行隐患。

2.2 制动系统响应失稳型质量风险

制动系统的质量风险主要表现在制动响应滞后、制动力分配不均、执行机构性能衰退等方面。随着铁路机车运行

【作者简介】崔明明(1984-), 男, 回族, 中国陕西西安人, 本科, 国家注册安全工程师, 助理工程师, 从事铁路机车质量管理工作。

里程的不断增长,车辆制动管路内部的密封胶圈老化、阀类元件的精度逐渐降低等问题逐步显现,会导致压力传递过程中出现非线性变化。不仅如此,在电空制动系统中,由于传感器信号发生漂移或者控制逻辑出现偏差,使得制动指令与实际的执行状态产生差异,使得在某些工况下存在制动功能异常或非稳定状态的风险。

2.3 走行部结构疲劳型质量风险

走行部长期承受交变载荷及线路冲击,因而存在的质量问题大多数表现为结构疲劳或磨损过大。轮对、轴承、悬挂装置等受力构件在复杂路况下容易产生细小裂纹或局部应力集中,如不能得到及时发现,将会发展成宏观裂纹而影响其正常使用。而且轮轨关系变化引起的振动特征异常,会加速相关部件的性能退化,形成隐性质量风险积累。

2.4 电气系统功能退化型质量风险

机车电气系统点多面广,质量风险具有分散性和叠加性。线缆绝缘性能降低、接插件接触电阻增大、电子模块老化,会导致信号传输不稳定或失效;此外,电气设备在复杂电磁环境及温湿度的变化下工作,其工作参数会发生缓慢偏移,从而造成系统运行状态偏离设计要求的趋势,但在短时间内不会呈现出明显的故障状态。

3 基于状态监测的铁路机车质量风险防控原理

基于状态监测的铁路机车质量风险防控主要是依托对机车关键部位运行状态的连续采集与客观量化,通过在牵引系统、制动系统、走行部及电气装置等核心单元布设监测单元,对温升、振动幅值、电参量波动和结构响应特征进行同步记录,形成反映设备真实工况的状态数据集。在数据处理层面,对原始信息进行去噪、归一与特征重构,提取能够表征部件性能变化的敏感指标,并结合时间序列演化规律,对状态偏移趋势进行判定^[2]。针对不同运行条件下参数表现差异明显的问题,引入工况匹配与自适应修正机制,对载荷变化、速度区间和环境因素进行综合约束,避免单一参考标准导致的识别偏差。在风险判定过程中,通过状态特征之间的关联分析,建立设备健康水平的动态表征方式,使质量风险识别由静态结果转向连续判断,并将监测输出转化为可执行的风险控制依据。

4 基于状态监测的铁路机车质量风险防控措施

4.1 构建多源感知协同的状态监测体系

对于基于状态监测的铁路机车质量风险防控框架来说,在多源感知协同监测体系的建设过程中需要密切贴合机车各主要系统的结构特征和运行机理。针对牵引系统中功率变换频繁、电磁应力集中的特点,在牵引电机、逆变器和主回路上的关键点位安装温度、电压、电流协同感知单元,开展负载波形和温升情况的同步监控。制动系统方面的建模依据侧重于气路与执行机构的工作特性,在控制阀的动作压力、动作位移和响应时间等方面加强它们之间的联动检测,

进一步解构制动性能减退变化的过程。走行部是机车承载导向的核心要素,可以从振动、冲击和轴温等多方面入手进行重点监测,将其联合起来得到作用条件变化对机车内部结构疲劳的影响情况。对电气系统而言,则需把绝缘状态和环境参数融为一体,实施对绝缘老化、电应力耦合作用下变化状态的综合作用。针对服役时间较长、劣化过程缓慢的零部件系统,采用更高的采样分辨率和更高的信号稳定度控制,增强对抗随机噪声的干扰能力,使得在细微的状态变化在采样后的数据中体现出来,为后续的风险判别提供更准确的基础数据。为了确保多源数据具有一致的时间顺序和尺度,应建立统一的数据接口规范和高精度时间同步方式,对各个来源系统采集到的不同采样频率、量纲和数据格式进行规整统一,确保跨系统状态信息在同一时间轴下实现关联分析。

4.2 实施状态特征提取与劣化趋势判识

按照状态监测体系运行要求,在状态特征提取及劣化趋势判识过程中要结合机车结构机理和运行工况对原始监测信号进行分层处理与针对性解析,并对牵引、电气、走行部等关键系统的工况下电流波动、温升变化率、振动能量分布等信号进行归一化处理,减小非故障原因对数据判识结果的影响。基于此,在不同的工况条件下,构建多维特征向量,使单一时刻的状态量转换为表示部件劣化演变过程的连续指标序列值,从而作为劣化判识的数据源^[3]。

首先,在劣化趋势识别时重点考虑状态量随运行里程、时间和环境累计变化具有非线性特点,通过对比历史稳定区间段与当前运行区间段,识别状态指标斜率、波动频率、分布形态等细微偏移情况,以区分随机扰动与结构劣化现象。如牵引电机温度峰值没有明显的增减变化,但升温速率有逐渐增大的趋势,则可以认为散热条件和内部损耗都可能存在缓慢异常;再如走行部振动中有些特定频带的能量占比越来越大,虽然没有达到报警的阈值,但表明轴承接触状态发生改变。其次,加强跨系统的关联分析,基于车组或列车的工作状态,将单个部件的状态变化结合到整车系统中来开展辨识,同时借鉴同型号车辆、相近工况下相似特征的演变过程修正不同的偏离值,使劣化趋势判断更贴近实际运行状态。

4.3 建立分级预警与动态阈值控制机制

基于状态监测数据在时间序列和工况维度上的演变规律,并结合设备失效模态与风险扩散路径来构建分级预警与动态阈值控制机制。首先,按牵引系统、制动系统和走行部的重要状态量的风险敏感度分层,将预警等级划分为关注、警示、限制运行,并明确其相应的动作策略与处置边界。需要注意的是,按此划分标准的阈值设置不是一次给定后就保持不变的常数,而是根据工况以及以往的历史分布特性对不同运行区段、载荷条件和环境参数下的状态波动区间进行自适应修正,以保证预警判据始终处于能理解、能执行的范围之内。其次,动态调整阈值时,可以综合考虑统计分位与趋

势偏移量来区分长期稳定状态与短时异常,防止受到短时扰动而出现过度干预的问题。如在监测牵引电机温升过程中,牵引列车经过长时间的坡道爬坡工况后,系统可根据持续的功率输出大小同步升高温升预警阈值。因此,应着重监测升温速率而不是单纯的数值变化,以达到更精准的异常探测目的。再者,分级预警和检修策略要实现互为联动,不同等级的预警,应给予相应的技术核查手段及处置时间,达到科学分配风险处置资源的目的。其中较低等级预警是指状态监测预警,主要是跟踪设备状态以及变化趋势;中等级预警是指触发专项检测、开展参数复测;高等级预警是指设备已接近危急值,应马上采取运行控制或检修计划变动等管控措施^[4]。如走行部振动监测时,如有振幅值始终接近高危预警值但无突变现象出现,那么此时仅应触发中等级预警后安排专项监测工作,无需采用停运措施,保障连续运行的同时减少风险发生概率。

4.4 推进状态驱动的检修决策优化

在检修决策中应围绕状态监测数据开展,并将设备实际运行状态作为检修触发及检修方案制定的核心要素,逐步取代现有的按里程、时间固定周期开展检修的做法。首先,利用长期运行积累的状态监测数据对牵引系统、电气设备和走行部关键状态参数进行持续追踪,并针对部件开展健康度评估建模工作,将温升偏移量、振动幅值变化、绝缘性能衰减进行量化,直接映射到检修需求上,判断检修的对象和时点。其次,引入状态分级和风险权重系数,按照系统级别和设备的重要程度分级划分状态劣化情况,优先将风险暴露大的部件安排进检修计划,规避资源平均分配带来的效率损耗。再者,制定检修策略时,要结合状态监测数据的历史状态值和实时监测结果进行联动分析,解析反复出现的异常行为和病害的演变规律,对检修程度和作业内容进行动态修正。如,对出现衰变速率逐步递减的部件开展延寿型维修措施;对于劣化速率快速增加的局部部件则可实施提前更换处理等,从而形成分层、分级的检修方案结构。同时,依托状态预测模型对剩余可靠运行区间进行测算,为检修窗口安排提供量化依据,使检修计划与运用需求保持协同。

5 强化数据闭环与风险防控反馈机制

基于状态监测体系,应将数据采集、风险识别、预警响应、处置措施、检修结论等全部纳入闭环管理,实施质量

风险防控过程连续跟踪和动态调整。首先,通过监测数据与处置结果的一一对比,找准预警触发条件与真实故障状态间的偏差原因,精准定位数据误差、预警阈值设定与权重分配等方面的源头错误,并据此优化模型库的合理设置,克服模型固定带来的固有局限性以及复杂多变的工况条件造成的难以准确判断风险问题等情况。运用既往的运行数据与检修情况对已显露的质量问题开展状态回溯分析,从参数发生演变至状态异常出现的整个进程中发现状态异常提前预警的先导特征和相关的耦合变量,支撑预警逻辑的动态迭代优化。其次,注重持续汇集车辆类型、线路、工况等多方面的运行故障数据,逐步建立机车系统层面的风险分布特征库,并对风险在不同零部件、不同寿命周期、不同运用条件下集中存在的风险高发区段进行量化刻画。通过相关联的数据相互对比分析出质控的风险程度和发展变化趋势,在分析的基础上制定更加科学的检修周期、合理匹配更有效的使用环境和改进相关技术参数。最后,将分析的结果进行有效回流到产品设计、规范标准环节中,把结构薄弱处、参数冗余度不足或者适应性存在缺陷的部位进行有针对性地修订完善,最终形成设计—制造—运用—检修的一个闭环,使质量风险防控模式在实际运行反馈中持续更新。

6 结语

总而言之,基于状态监测的铁路机车质量风险防控体系,以运行数据为依据,把监测、分析和处置充分结合,形成动态调整、不断完善的管理方法,可及时识别演化初期阶段的质量风险,大幅提高检修决策的有效性与及时性。随着数据积累与模型迭代不断深化,该防控体系在复杂工况适应能力和风险响应精度方面将持续增强,为铁路机车安全稳定运行提供可靠支撑。

参考文献

- [1] 李凯.安全风险管控技术在铁路客车检修工作中的应用分析[J].中国科技纵横,2024(21):80-82.
- [2] 王志华.铁路机车车辆运行故障监测诊断技术分析[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2023(1):4.
- [3] 曹振.关于提高铁路机车整备效率的探讨[J].太原铁道科技,2024(4):36-39.
- [4] 饶跃.智能化技术在铁路机车故障诊断系统中的应用[J].中国战略新兴产业,2025(18):51-53.