

电力机车电气系统“故障-维修”闭环管理模式构建与应用

赵鹏越

国家能源集团铁路装备公司沧州分公司 河北沧州 061100

摘要: 电力机车作为铁路运输的核心装备,其电气系统的稳定运行是保障运输安全、提升运输效率的关键。现阶段,电力机车电气系统故障时有发生,传统维修模式存在故障诊断滞后、维修决策目标不清晰、资源浪费等问题,难以满足现代化铁路运输需求。本文围绕电力机车电气系统构成与常见故障,构建“故障-维修”闭环管理模式,从故障诊断、维修决策、维修实施、效果评估及闭环反馈五个环节展开系统设计,明确各环节技术原理与操作规范,并提出模式应用中的体系融合、人员培训、信息化平台搭建要点。通过该模式实现故障精准识别、维修科学决策、效果持续改进,有效提升电力机车电气系统可靠性,降低运维成本,为铁路运输设备管理提供理论支撑与实践参考。
关键词: 电力机车; 电气系统; 故障诊断; 维修决策; 闭环管理; 信息化平台

引言

随着铁路运输向重载化、高速化发展,电力机车承担的运输任务愈发繁重,其电气系统作为控制与动力传输核心,零部件长期处于高电压、大电流、强振动环境中,随着设备耗损,故障发生率持续攀升。电气系统故障不仅导致机车停运、运输延误,更可能引发脱轨、火灾等重大安全事故,威胁驾乘人员生命与运输企业财产安全。传统维修模式多采用定期维修或事后维修,前者易出现过度维修、增加运维成本,后者因故障响应不及时、扩大故障影响范围。为解决上述问题,构建涵盖故障识别、维修执行、效果评估与持续改进的“故障-维修”闭环管理模式成为关键,该模式通过各环节有机衔接与信息闭环流动,打破传统维修的碎片化局限,实现从故障发生到维修优化的全流程管控,对提升电力机车电气系统运维水平、保障铁路运输安全高效具有重要意义。

一、电力机车电气系统概述

1. 电力机车电气系统构成

电力机车电气系统由供电、牵引、控制、辅助四大子系统协同组成。供电系统通过受电弓从接触网引入高压交流电,经主断路器、互感器完成转换与监测,提供稳定电能;牵引系统以变压器、变流器、电机为核心,变压器降压后,变流器将交流电转换并逆变为可调频调压的交流电,驱动电机带动车轮实现牵引;控制系统依托列车网络系统,通过传感器采集速度、电流等参数,

向牵引、制动系统发送指令以实现调速与制动;辅助系统含空调、空压机等设备,经辅助变流器转换电压,保障人员舒适与设备运转^[1]。

2. 常见故障类型及危害

电气系统常见故障为短路、断路、元件损坏三类。短路多因绝缘老化等导致,如变流器功率模块短路,会产生大电流烧毁设备、引发火灾并致机车停运;断路常由导线断裂等引起,如电机电源线断路会致动力缺失,控制系统信号断路可能引发失控;元件损坏如传感器漂移、变压器绕组烧毁,会导致系统功能异常,此类故障维修决策判断较为复杂,且部分元件修时较长如变压器损坏,严重影响机车周转率。这些故障既降低效率、增加成本,更威胁铁路运输安全。

二、“故障-维修”闭环管理模式构建

1. 故障诊断环节

(1) 诊断技术原理

电力机车电气系统故障诊断以传感器监测技术与数据分析算法为核心。传感器监测技术在系统关键部位部署电压、电流、温度、振动传感器,实时采集供电电压波动、牵引电流变化、元件温度异常、设备振动频率等信号,传感器采用高精度芯片控制采集误差,为诊断提供原始数据;数据分析算法分三阶段,信号预处理通过滤波去除噪声,特征提取用小波变换、傅里叶变换提取故障特征(如短路电流突变、元件损坏温度异常),故障识别运用神经网络(经大量数据训练提升复杂故障精度)、支持向量机(小样本场景高效),将特征参数与预设故障库匹配,实现故障类型与位置自动识别^[2]。

(2) 诊断流程设计

作者简介: 赵鹏越(1996.12—)男,汉,山西大同人,本科,助理工程师,研究方向:从事电力机车电工。

故障诊断遵循“信号采集-数据处理-故障定位-类型判断-报告生成”五步流程。信号采集：传感器按预设频率采集信号，供电系统以0.1/s频率采集电压电流数据，牵引系统以0.05/s频率采集温度振动数据，数据经传输模块送至诊断终端；数据处理：终端用滤波消除电磁干扰，插值法补全缺失数据确保完整；故障定位：提取故障特征参数输入识别模型，结合故障库确定位置（如牵引变流器功率模块、供电主断路器）；类型判断：依参数变化判断故障类型（短路、断路、元件损坏）与严重程度（轻微温度异常为一般故障，电流突变伴火花为严重故障）；报告生成：系统自动生成含故障时间、位置、类型、严重程度及处理建议的报告，推送至运维平台支撑维修决策。

2. 维修决策环节

(1) 维修策略制定依据

维修策略制定需综合故障严重程度、设备运行状态、维修成本。故障严重程度按影响划分，严重故障（如牵引系统短路、控制系统失效）致机车停运或安全事故，需紧急维修；一般故障（如辅助照明损坏、传感器轻微漂移）影响小，机车回库后计划性维修。设备运行状态通过累计时长、历史故障、当前参数评估，运行久、故障频发、参数近报废阈值的设备，即便故障轻也需预防性维修；运行短、参数稳定的设备采用事后维修减少冗余。维修成本含直接成本（备件采购、人员薪酬、工具费用）与间接成本（停运损失、故障扩大损失），需在保证质量下选成本最低方案，如备件更换成本高则优先维修。

(2) 决策模型构建

维修决策采用层次分析-模糊综合评价组合模型。先构建层次结构，目标层为“选最优维修方案”，准则层含故障解决率（权重最高）、维修成本（次之）、维修时长、设备寿命延长效果，方案层为紧急、计划性、预防性维修；再通过层次分析法，邀10名运维专家对准则层指标两两比较，建判断矩阵算权重；随后用模糊综合评价，设评价集（优秀、良好、一般、较差），专家依方案表现打分生成模糊矩阵；最后权重与矩阵相乘得综合得分，选最高分方案，定量与定性结合避免主观随意。

3. 维修实施环节

(1) 维修资源配置

维修资源围绕人、物、财配置。每个维修单元参照故障类型与维修技能需求进行人力资源配置，以严重故障（如牵引变流器维修）配3-5名高压电气维修高级技师，一般故障（如传感器更换）配1-2名中级技师，设1名技术负责人统筹质控为参照合理配比维修单元人力结构；物力含工具与备件，工具按需求备专用设备（如牵

引变压器用高压绝缘测试仪、变流器用专用拆卸工具），备件采“常用库存+紧急调配”模式，常用件（传感器、接触器）存机务段仓库，紧急件（变流器功率模块）由区域中心调配；财力依方案预算拨付费用（含人员薪酬、备件采购、工具租赁），建成本动态监控，预留10%-15%应急资金应对突发支出。

(2) 维修操作规范

规范含维修标准、维修流程、检修工序、工具使用、质量检验。检修标准确保维修质量一致性，为维修成果验收提供依据避免因人为操作差异导致维修效果参差不齐，保障设备修复后能稳定达标运行；维修流程规范维修工作的先后逻辑，避免流程混乱导致漏项或重复操作，提升维修效率，并实现维修过程可追溯，便于后续分析故障根源、优化维修方案；检修工序指导维修人员精准执行操作，避免因步骤错误损坏部件，按“断电-检查-维修-组装”，断电时断主断路器并挂“禁止合闸”标识，检查用目视与仪器结合确认故障，按标准更换或修复（如换传感器确保接线正确固定牢固），组装按拆卸逆序确保到位；工具使用前查状态，绝缘工具测绝缘性防破损漏电，严格按说明书操作；质量检验含过程与售后，过程由技术负责人查关键步骤（如变流器接线紧固），售后通过空载（查通电参数）与负载（模拟工况测牵引控制功能）试验验证，合格后方结束维修。

4. 维修效果评估环节

(1) 评估指标体系建立

电力机车维修评估体系旨在科学衡量维修质量、成本与效率，包含3类一级指标及8项可量化二级指标，且各项指标均明确计算方法与合格阈值以保障评估客观可比；其中可靠性指标含故障修复率（成功修复次数/总维修次数，阈值 $\geq 95\%$ ，反映维修技术有效性，低于阈值需审查维修方案或人员能力）与平均无故障工作时间（总正常运行时间/故障次数，新机车 ≥ 500 小时、老旧 ≥ 300 小时，体现设备耐用性，低则需强化预防性维修），经济性指标含单位维修成本（单次总费用/维修时长，紧急维修 ≤ 1200 元/小时、计划性 ≤ 800 元/小时，超则优化采购或提效）与备件利用率（实际用备件数/领用数，阈值 $\geq 85\%$ ，低则需精准诊断、建回收机制），效率指标含维修时长（诊断完至验收合格时间，严重故障 ≤ 4 小时、一般 ≤ 8 小时，超时查人员或工具问题）、机车周转率（维修后运行时间/总时间，阈值 $\geq 70\%$ ，低则缩维修时、减闲置）与故障复发率（30天内同一故障再发次数/总维修次数，阈值 $\leq 5\%$ ，超则重查故障根源），该体系整体可规范维修行为、降本提效，保障机车稳定

运行与运输任务落实。

(2) 评估方法选择

评估用对比分析与统计分析结合。对比分析将维修后指标与维修前、行业标准比，如比前后平均无故障时间判可靠性提升，比单位成本与行业均值析成本控制；统计分析收集3-6个月数据，用均值、标准差、趋势图析指标规律，如算故障复发率月度均值绘趋势图判是否下降，用维修时长标准差评过程稳定性；评估时排除恶劣天气、运输任务变化等干扰，确保结果仅反映维修效果，完成后生成报告明确优劣，为闭环反馈提供依据。

5. 闭环反馈机制

闭环反馈机制是持续改进核心，将评估结果分层

反馈至诊断、决策、实施环节优化。故障诊断环节，若识别准确率低、定位偏差大，换高精度传感器、补故障库、优算法参数提准确性；维修决策环节，若方案成本高、时长长，调模型准则层权重、优评分标准、更故障严重程度划分，避过度或不足维修；维修实施环节，若质量不稳定、备件利用率低，修订操作规范、强人员培训、优备件流程建领用审核减浪费。反馈采定期与即时结合，每月开会议定改进措施，遇严重质量问题即时启动，实现“诊断-决策-实施-评估-反馈-优化”循环。

表1清晰地展示了闭环反馈机制各环节信息流向与改进措施：

表1 电力机车电气系统“故障-维修”闭环反馈机制信息流向表

反馈环节	问题类型	改进方向	责任部门
故障诊断环节	故障识别准确率<90%、定位偏差>5cm	更换高精度传感器、补充故障特征库、优化诊断算法	技术研发部、诊断中心
维修决策环节	单位维修成本超行业标准10%、维修时长超计划20%	调整决策模型权重、优化方案评分标准、更新故障严重程度划分	运维管理部、决策中心
维修实施环节	故障复发率>5%、备件利用率<80%	修订维修操作规范、加强人员培训、建立备件领用审核机制	维修工程部、备件管理部

三、闭环管理模式应用要点

1. 与现有管理体系融合

将“故障-维修”闭环管理模式与现有设备管理、安全管理体系融合，需从制度、流程、数据三方面推进。制度融合上，修订设备管理制度，将闭环管理要求纳入设备维护规程，明确各环节责任主体与考核标准，如在设备巡检制度中增加故障诊断数据记录要求，在安全管理制度中补充维修安全管控条款；流程融合上，梳理现有设备台账管理、备件采购及维修作业许可、应急处置流程，将故障诊断、维修实施嵌入其中，例如备件采购增加基于维修决策的需求预测，应急处置加入故障诊断报告快速调用功能；数据融合上，建立统一数据标准，整合设备运行数据、安全事故记录与闭环管理的诊断、评估数据，消除数据孤岛，同时用维修效果评估数据反哺现有体系，优化设备可靠性分析。

2. 信息化平台搭建

信息化平台作为闭环管理技术载体，功能与架构需满足数据传输与协同需求。平台含数据采集、故障诊断、维修决策、维修管理、效果评估、反馈优化等模块，数据采集模块实时采集存储传感器与设备运行数据，故障诊断模块集成算法自动识别定位并生成报告，维修决策模块嵌入模型输出最优方案，维修管理模块实现资源调度、进度跟踪、质量检验线上化，效果评估模块自动算

指标并生成报告，反馈优化模块分类推送评估结果提醒改进^[5]。平台采用“云-边-端”三层架构，终端层含传感器、维修终端负责数据采集与现场操作，边缘层部署在基层管理单位承担数据预处理、实时诊断与本地调度以降云端压力，云端层建在集团数据中心，实现全路数据存储、大数据分析、模型迭代，支持运用、检修等多子分公司协同，为各修程维修前提供机车设备技术参数，便于维修决策精准化。

结束语

综上，本文围绕电力机车电气系统运维痛点，构建“故障-维修”闭环管理模式，通过故障诊断、维修决策、维修实施、效果评估、闭环反馈五个环节系统设计，实现故障从识别到优化的全流程管控。实践表明，该模式能显著提升电气系统可靠性，减少故障复发率，缩短维修时长，为铁路运输安全高效提供保障。

参考文献

- [1]张强.新能源汽车电气系统的故障诊断与预防维护策略研究[J].内燃机与配件, 2024, (21): 88-90.
- [2]凌子威, 唐浩, 梁高洋, 阳皓.新能源汽车电气系统安全性测试研究[J].装备制造技术, 2024, (10): 36-41+53.