 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i7.11038

Techniques for Diagnosing and Repairing Faults in the Electromechanical Systems of Highways

Chongtao Zhao

Yunnan Changshui Airport North Expressway Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 650206, China

Abstract

The highway electromechanical (EM) system serves as a critical support framework for ensuring road safety and enabling information-based management,and its operational stability directly affects traffic efficiency and service quality.This study systematically analyzes fault types commonly occurring in complex environments across subsystems such as power supply and distribution,communication,toll collection,and monitoring,focusing on fault detection and repair technologies.Layered and zoned fault inspection and multi-system linked diagnostic strategies are proposed,alongside an evaluation of rapid repair and maintenance support methods.By integrating these multidimensional technologies,the efficiency of fault handling and the operational reliability of EM systems are enhanced,providing technical support for the safe and stable operation of highway electromechanical systems.

Keywords

highway electromechanical system; fault detection; fault repair; intelligent diagnostics; maintenance management

高速公路机电系统故障排查与修复技术

赵重涛

云南长水机场北高速公路有限责任公司，中国·云南 昆明 650206

摘　要

高速公路机电系统是保证道路安全运行、信息化管理的重要支撑系统，其运行稳定性直接影响到交通能力及服务质量。对供配电、通信、收费、监控等子系统在冗杂环境下容易出现的各种故障问题，从故障排查以及修复技术思路实行系统的分析。本文又提出分层分区排查、多系统联动诊断的方案，并对快速修复、运维保障技术途径实行分析。利用多维技术融合的方式增加机电系统故障处理能力和运行可靠性，给高速公路机电系统安全稳定运行给出技术支持。

关键词

高速公路机电系统；故障排查；故障修复；智能诊断；运维管理

1 引言

伴随我国高速公路网络规模的不断扩大，机电系统已经变成支撑道路运行管理、信息交互及安全保障的重要基础设施，机电系统的稳定性、可靠性直接影响到交通系统整体运行水平。机电系统长期处在高负荷、多干扰、冗杂气候的运行环境之中，供配电波动、通信中断、设备老化等故障时有发生，系统故障隐蔽性强、关联性强、排查难度大。传统的靠着人工经验的检修方式已经不能满足快速响应、准确定位的要求，必须使用系统化、智能化的技术手段来增加故障处理能力。在此背景下，有必要从系统结构、运行机制入手，融合现代监测、数据分析技术，对机电系统故障的识别、定位、修复途径实行研究，然后增加机电系统运维能力和运行安全水平。

【作者简介】赵重涛（1992–），男，中国云南寻甸人，本科，助理工程师，从事高速公路机电运维研究。

2 高速公路机电系统组成与运行特征

2.1 高速公路机电系统供配电结构与运行逻辑

高速公路机电系统的供配电结构由主供电源、备用电源、各级配电装置组成，保证路段设备正常工作。主供电借助高低压变配电设施向各个功能子系统供电，配电网络有着分区、分路的能力来满足不同的设备负载需求。系统运行逻辑使用集中监控及分布控制相结合的方式，可以对电力供应实行实时调节，也可以对故障实行自诊断。供配电结构中核心节点有变电站、馈线柜、断路器等，保证局部设备出现异常时，可以利用切换或者隔离的方式维持整个系统的运行。设备监控以及电力数据采集系统对电流、电压、功率、开关状态等实行实时监测，给故障分析、负载改良提供数据支持，保证机电系统在高峰交通流量下依然可以安全稳定地运行。

2.2 收费系统与通信网络的架构组成及功能特点

高速公路收费系统由入口、出口、中间收费站组成，靠着自动化收费设备完成车辆信息采集和计费管理。系统架

构使用集中管理平台以及分布式终端设备相结合的方式，可以实现车道自动识别、电子不停车收费及账务数据传输等功能。通信网络由光纤传输、无线通信、局域网组成，形成全线实时数据交互网络。网络架构有着冗余链路和多协议支持的功能，可以保证单点故障或者网络波动的时候，数据传输的连续性以及系统业务的稳定性。通信网络同收费系统周密耦合，对收费数据实行实时汇总、异常监测及远程控制管理，继而增强整个运营效率以及系统可靠性。

2.3 监控系统与隧道机电设备运行环境特征分析

高速公路监控系统包含道路、收费站和隧道全线，有视频监控、环境监测以及交通流量检测子系统。隧道机电设备囊括通风、照明、排水、消防等设备，运行环境有高温、高湿、通风不良等特殊条件。设备在长期运行中受到机械振动、粉尘污染、腐蚀性气体侵蚀等外部因素的影响，故障发生率会增加。监控系统依靠集中控制室对设备状态实行实时监测，具备远程控制以及异常报警的功能。数据采集装置对温度、湿度、风速和设备运行参数实行连续记录，为设备健康管理及故障预警给出基础，保证隧道以及道路通行安全以及系统稳定运行 [1]。

3 高速公路机电系统常见故障类型及形成机理

3.1 供电中断与电气元件故障的发生机制

高速公路机电系统供电中断主要是设备断电、电压波动、电流异常，一般由外部电源故障、线路损坏、电气元件老化造成。变压器、断路器、开关柜等重要元件在长期运行中会因为绝缘下降、接触不良、机械磨损等原因造成局部或者全线供电中断。雷电、短路、过载情况加速元件性能衰退，增大系统突然断电的风险。供电中断会造成下游设备功能失效，影响收费、监控、通信系统正常工作。凭借电气元件状态监测、负荷分析、历史故障数据分析可以找出潜在的故障源，给系统预防性维护及快速修复给予依据。

3.2 通信网络中断与数据传输异常故障分析

高速公路机电系统通信网络中断一般表现为数据传输延迟、丢包、链路断开，主要是由于光纤损伤、设备端口故障、协议异常造成的。网络节点有路由器、交换机、光纤终端，设备老化或者接口松动都会造成信号衰减、通信失败。环境因素雷击、湿度变化、施工干扰都会造成网络不稳定性。通信故障会直接影响到收费信息、监控视频、交通管理数据的传递，减少整个系统的响应能力。使用实时网络监测、数据流分析、链路冗余等手段，可以及时发现异常，实现故障定位和快速恢复，保证机电系统连续运行 [2]。

3.3 设备老化磨损与环境因素诱发故障机理

高速公路机电设备在长时间运行中，由于机械摩擦、材料疲劳、电子元件寿命限制等原因，会出现性能衰退。环境因素温度波动、湿度过高、粉尘、腐蚀性气体侵蚀等都会加快设备老化，造成风机、电机、泵类、照明设施等故障频发。设备老化造成绝缘性能减少、电路阻抗改变、机械磨损异常，影响系统运行稳定。隧道、桥梁等特殊路段振动、冲击荷载增大，故障风险增大。建立设备健康监测体系，利用振动、温度、运行状态数据分析可以发现潜在的失效趋势，给运维决策给予科学依据，到了预防性维护、延长设备使用寿命的目的。

4 高速公路机电系统故障检测与诊断技术方法

4.1 基于在线监测的状态感知与数据采集技术

高速公路机电系统在线监测技术就是对供配电、通信、监控、隧道设备等核心节点处的传感器实行布设，然后到了对设备运行状态的连续采集以及实时监测。供配电部分使用电流互感器、电压互感器以及功率表实行电参数采集，采样精度为 0.1%，采样频率为 1 秒一次，可以得到电流、电压、有功功率、无功功率和功率因数等数据。通信网络用光纤传感器及 SNMP 协议设备采集链路状态、数据包丢失率、延迟时间，延迟精度可以到了毫秒级。安装温湿度传感器、振动传感器、烟雾检测器，对风机转速、泵流量、照明负载实行实时采集，数据传输使用 Modbus、CAN 总线、以太网协议，信息延迟小于 100 毫秒。采集到的数据经由集中数据采集平台汇总处理，借助边缘计算模块对异常信号展开初步识别，自动生成运行状态曲线及设备健康指数，达成状态感知及趋势剖析，给故障诊断赋予可靠的数据根基 [3]。

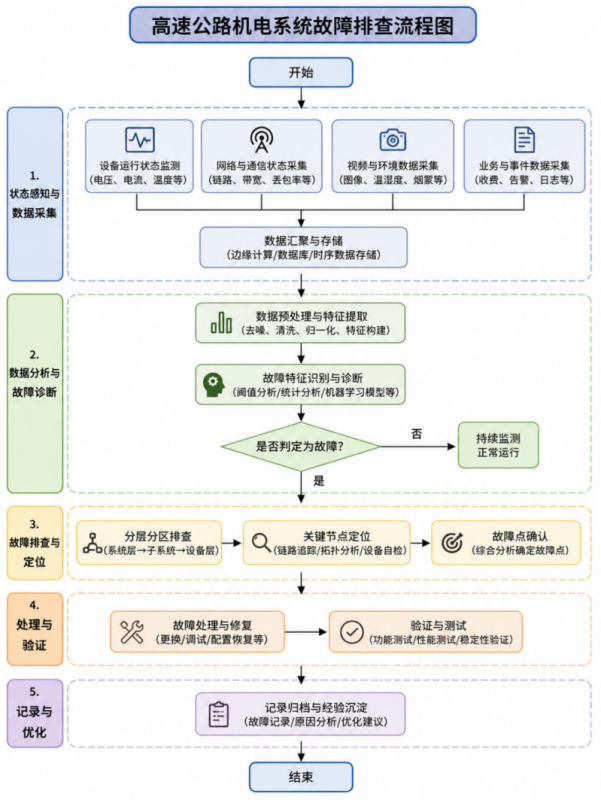
4.2 基于数据分析的故障特征识别与诊断方法

数据分析以历史运行数据、实时采集数据为依赖，用统计分析、特征提取、模型计算来实现故障识别。供配电系统利用功率波动幅度、谐波含量、电流偏差等指标来识别异常，当阈值电流偏差大于 10% 或者谐波含量大于 5% 时就会发出警报。通信网络用数据包丢失率、时延抖动、链路吞吐量来评定，丢包率大于 2% 或者平均时延大于 50 毫秒就标记为潜在故障。监控隧道设备用振动信号的频谱分析、温度变化率、流量异常等特征来诊断，风机转速波动超过 50 转 / 分钟或者泵流量下降超过 15% 作为故障判定标准。数据分析方法有多变量统计分析、主成分分析、机器学习模型，支持向量机、随机森林、神经网络等，对传感器数据实行训练以及预测，实现故障特征识别、分类、优先级排序，给运维人员给出决策依据和修复方略。

4.3 智能化远程监测与故障预警技术应用

智能化远程监测系统依靠云平台和物联网技术达成高速公路机电系统全线包含及集中管理。设备端安装传感器节点，将电流、电压、温度、湿度、振动数据凭借 LoRa、4G/5G、以太网传输到边缘计算网关，网关对异常数据实行本地初步分析并上传到云平台。云平台利用大数据分析及人工智能算法，对采集的数据实行趋势分析、异常模式识别以及预测性建模，实现故障预警。系统设置阈值，电压偏差大于 5% 或者温度大于 70 摄氏度时触发自动告警，告警信息借助短信、邮件和控制中心界面推送。远程监测可以实时调节设备参数，调节风机转速、切换冗余电源、调节泵流量等，

减少事故风险[4]。平台可以生成每天的运行报表以及历史趋势图，用机器学习模型预测设备的潜在失效时间，提前安排维护资源，增加高速公路机电系统的安全性以及运维能力。图 1 为高速公路机电系统故障排查流程剖析图图 1 高速公路机电系统故障排查流程图



5 高速公路机电系统故障排查流程与定位技术应用策略

5.1 分层分区的故障排查思路与实施方法

分层分区故障排查把高速公路机电系统分成供配电层、通信层及设备层，用区域和功能模块的分级方针来增加故障排查能力。供配电层用智能断路器以及功率监测装置对电源分区实行实时检测，电流偏差大于 10% 或者电压波动大于 5% 就锁定故障区域。通信层用链路状态监测、时延分析、数据丢包率计算来确定异常节点，丢包率大于 2% 或者链路时延大于 50 毫秒的段落作为优先排查对象。设备层用振动传感器、流量计、温湿度传感器获取实时参数，风机转速波动超过 50 转 / 分钟或者泵流量下降超过 15% 时实行模块化排查。系统把各个层次的数据用监控平台实行可视化展示，融合历史故障数据以及智能算法，得到分层分区排查方案，实现按照区域、按照设备类型逐层定位故障源，增加整体故障处理速度及精度。

5.2 关键节点与核心设备的快速定位技术

快速定位技术就是对高速公路机电系统主要节点创建数字模型和实时监控数据库，然后到了故障迅速定位的目的。核心节点有主变电站、汇控中心、重点交换机、隧道关键设备风机、泵站等。供电节点用高精度电流互感器、电压传感器采集数据，采样频率为 1 秒一次，利用电流异常幅值、功率波动趋势快速定位故障位置。通信节点使用 SNMP 协议及链路监测，丢包率大于 2% 或者时延大于 50 毫秒时自动标记为异常端口。隧道关键设备用振动传感器、温湿度传感器和流量计实行实时数据采集，超过阈值就会自动报警。系统使用数据融合技术将电力、通信、设备数据融合在一起，用算法计算出异常权重，然后实现故障快速定位以及优先级排序，增加维修响应速度，减少停运风险[5]。

5.3 多系统联动分析与综合诊断机制构建

多系统联动分析就是将供配电、通信、设备监控等数据融合起来实行高速公路机电系统融合诊断。平台把电压、电流、功率、谐波参数和链路状态、丢包率、时延、风机转速、泵流量、温湿度数据同步分析。使用多变量统计方法以及神经网络模型对数据实行特征提取，找出异常关联关系以及潜在的故障源。系统可以实现跨子系统联动，供电异常造成通信中断或者风机停机时，根据逻辑判断以及权重计算自动关联故障原因。融合诊断机制可以产生优先处理列表及修复建议，靠着动态调节阈值及预测模型，到了故障提前预警、准确定位、多系统协同维护的目的，然后增加高速公路机电系统整体运行可靠性以及运维能力。

6 结语

高速公路机电系统是交通运行保障的重要支撑，故障排查和修复能力的好坏直接影响到道路运行能力和安全水平。对系统组成、故障类型、诊断技术实行系统的分析，利用在线监测、数据分析、智能预警等手段，可以大大提高故障识别的准确性以及响应速度。分层分区排查和核心节点定位技术的应用，使故障处理更加准确高效，多系统联动诊断也加强了整体协同能力。伴随技术不停融合、改良，机电系统运维会朝着更加智能化、精细化的方向发展，给高速公路的安全稳定运行给出强有力的保障。

参考文献

[1] 王乾选.高速公路机电系统检测技术的应用研究[J].汽车周刊,2026,(05):66-68.

[2] 焦琪.高速公路隧道机电系统节能优化与运行调控策略[J].汽车周刊,2026,(05):170-172.

[3] 石磊.基于物联网的高速公路机电系统智能运维平台研究[J].汽车周刊,2026,(05):236-237+257.

[4] 张雷鸣.新基建背景下高速公路机电智能化管理创新研究[J].智能制造研究与应用,2026,2(05):139-141.

[5] 冀发强.论高速公路机电设备故障检测智能系统[J].交通科技与管理,2026,7(09):7-9.