高速公路机电设备远程在线监测与故障预警技术

吴玉龙　刘俊程

河南交通投资集团有限公司信阳分公司　河南　信阳　464000

摘　要：高速公路机电设备是保障路网通行稳定、安全、高效运行的核心基础设施，设备运行状态直接决定高速公路整体运营质量。针对传统机电设备人工巡检方式效率低、滞后性强、故障发现不及时、运维成本高等问题，本文研究高速公路机电设备远程在线监测与故障预警核心技术。系统阐述远程在线监测技术架构、数据采集与传输方式、故障识别算法、预警机制等核心内容，分别探究设备状态感知、数据处理分析、故障预警输出、系统运维支撑等关键技术模块，构建全流程、自动化、智能化的设备监测预警体系。该技术可实现机电设备运行参数的实时采集、动态监测、异常识别与提前预警，有效降低设备故障发生率，减少设备停机时长，提升高速公路机电系统运行稳定性与运维智能化水平，为高速公路机电设备精细化运维提供技术支撑。

关键词：高速公路；机电设备；远程监测；在线监测；故障预警；智能运维

引言：国内高速公路运营网络持续延伸，沿线布设的机电设备总量大幅提升，传统人工定时巡检的运维模式，已无法适配当前分散化、大数量级机电设施的精细化管控要求。人工巡检模式存在监测间隔长、覆盖盲区多、故障发现滞后等固有短板，极易引发机电设备带故障运行，直接影响高速公路通行安全与运营服务质量。在此背景下，构建一套覆盖全品类机电设备的远程在线监测与故障预警系统，成为高速公路运维数字化升级的核心方向。本文围绕该系统的分层技术架构、核心感知传输技术、故障预警关键算法与落地功能展开系统论述，为高速公路机电运维智能化改造提供可落地的技术路径。

1 高速公路机电设备监测预警总体技术架构

高速公路机电设备远程在线监测与故障预警系统采用分层化、模块化的技术架构，整体架构从下至上分为数据感知层、数据传输层、数据处理层、预警分析层、应用管理层五大核心层级，各层级相互配合、独立运行，实现设备数据全流程采集、传输、处理、分析与预警输出。整体架构以设备实时运行数据为核心，依托物联网数据采集技术与智能分析算法，摒弃人工干预的滞后性，实现机电设备 24 小时不间断在线监测，同时针对异常数据特征完成故障识别与分级预警，保障设备运行状态全程可控[1]。

数据感知层为架构基础，主要负责各类机电设备运行参数、状态信息、环境参数的实时采集，覆盖供配电设备、照明设备、通风设备、监控设备等全品类机电设施；数据传输层承担数据中转作用，将感知层采集的原始数据稳定、实时上传至后台系统；数据处理层负责对原始数据进行清洗、降噪、归一化处理，剔除无效数据与干扰数据，提升数据精准度；预警分析层依托智能算法与设备运行阈值模型，对处理后的有效数据进行分析比对，识别设备异常状态与潜在故障；应用管理层主要实现监测数据展示、预警信息推送、设备状态统计、运维数据存储等功能，为运维人员提供直观、高效的设备管控渠道。各层级模块化设计可适配不同类型、不同规格的高速公路机电设备，具备较强的通用性与适配性。

2 机电设备远程在线监测核心技术

2.1 多维度设备状态感知技术

多维度状态感知是实现远程在线监测的核心前提，主要通过各类高精度传感器、数据采集终端，实现对高速公路机电设备运行状态的全方位、精细化数据采集。针对不同类型机电设备的运行特性，采集参数分为运行工况参数、设备本体参数、环境关联参数三大类，全面覆盖设备运行的核心监测维度。对于供配电设备，主要采集电压、电流、功率、频率、负载率、设备温度、线路绝缘电阻等参数；对于照明、通风设备，重点采集设备启停状态、运行时长、工作功率、转速、能耗数据等参数；对于监控类机电设备，采集设备在线状态、画面帧率、信号强度、存储状态、设备温度等核心数据。同时，同步采集设备运行环境的温度、湿度、粉尘浓度、振动幅度等环境参数，规避环境因素对设备运行状态判断的干扰。所有感知终端均采用嵌入式安装方式，适配

高速公路户外、隧道、机房等不同运行场景，具备抗干扰、耐高低温、防水防尘的特性，可保障复杂环境下数据采集的稳定性与准确性[2]。

2.2 实时数据传输技术

数据传输技术是连接前端感知设备与后台监测系统的关键纽带，直接决定在线监测的实时性与数据完整性。结合高速公路机电设备分布分散、点位跨度大、部分点位信号薄弱的特点，系统采用有线与无线融合的双模数据传输方式，适配不同场景的传输需求。在隧道、机房、收费站等信号稳定、设备集中的区域，采用以太网、光纤有线传输方式，该传输模式具备带宽大、延迟低、稳定性强、数据丢包率低的优势，可满足大批量、高频次设备数据的实时传输需求，保障核心设备数据传输无遗漏、无延迟。在户外路段、偏远分散设备点位，采用 4G/5G 无线传输技术，搭配专用数据传输模块，突破布线限制，实现分散设备数据的远程上传。同时，系统配置数据缓存机制，当网络临时波动、信号中断时，前端采集终端可自动缓存实时数据，网络恢复后自动补传数据，有效避免数据丢失，保障设备监测数据的连续性与完整性。

2.3 监测数据预处理技术

前端感知设备采集的原始数据存在大量噪声数据、冗余数据与异常干扰数据，易导致后续状态分析与故障判断出现偏差，因此需要通过数据预处理技术完成数据优化，为故障预警分析提供精准的数据支撑。数据预处理主要包含数据清洗、数据降噪、数据归一化、数据筛选四个核心环节。数据清洗主要剔除重复数据、缺失数据与无效数据，删除设备启停瞬间、网络波动产生的异常无效数值；数据降噪通过滤波算法过滤环境干扰、设备电磁干扰产生的噪声数据，平滑数据波动曲线，还原设备真实运行状态；数据归一化针对不同类型、不同量级的监测参数进行统一标准化处理，消除参数维度与数值区间的差异，提升后续数据分析算法的运算效率与精准度；数据筛选根据设备运行特性，筛选核心监测参数，剔除冗余无效参数，精简数据运算体量，降低系统运行负荷。经过预处理后的监测数据，可真实、精准反映机电设备的实际运行状态，为故障预警模型运算提供可靠依据。

3 机电设备故障预警关键技术

3.1 设备故障阈值建模技术

故障阈值模型是实现设备异常识别与故障预警的基础核心模型，通过界定各类机电设备正常运行的参数区间，实现异常数据的精准判定。结合不同机电设备的出厂参数、额定运行指标、长期稳定运行数据，为每类设备构建专属的静态阈值与动态阈值双重判定体系。静态阈值依据设备额定运行参数设定，为设备运行的基础安全区间，例如供配电设备的额定电压、电流区间，照明设备的额定功率区间等，当监测参数超出静态阈值范围，直接判定为设备异常故障。动态阈值基于设备长期历史运行数据训练生成，结合设备运行时长、负荷变化、环境波动等动态因素，自适应调整参数判定区间，适配设备老化、季节环境变化带来的运行参数小幅波动，避免固定阈值导致的误预警、漏预警问题。阈值建模过程中，通过海量正常运行数据迭代优化模型参数，不断提升阈值区间的精准度，保障故障判定的科学性与准确性[3]。

3.2 智能故障识别算法

为提升复杂工况下设备故障的识别能力，弥补单一阈值判定的局限性，系统引入智能故障识别算法，实现设备显性故障与隐性潜在故障的全方位识别。单一阈值仅能判定参数超标的显性故障，而设备老化、性能衰减、线路隐性损耗等潜在故障，无法通过瞬时参数变化识别，需依托算法对数据趋势、参数关联特征进行深度分析。系统采用趋势分析算法与关联分析算法相结合的识别模式，趋势分析算法通过对设备长期运行参数的时序变化特征进行拟合，分析参数缓慢衰减、波动加剧等异常趋势，提前识别设备性能老化、隐性损耗等潜在故障；关联分析算法挖掘不同监测参数之间的内在关联关系，例如设备温度与运行负荷、能耗与工作状态的关联变化，当多项关联参数出现协同异常波动，即可判定设备存在故障隐患。该算法可有效区分设备正常波动与异常故障状态，大幅降低故障预警的误报率与漏报率，提升故障识别的智能化水平。

3.3 分级故障预警输出技术

为实现故障的精细化管控，提升运维处置效率，系统采用分级故障预警技术，根据设备故障影响范围、严重程度、紧急程度，将预警等级划分为一般预警、次要预警、重要预警、紧急预警四个层级，不同等级预警对应不同的输出方式与处置优先级。一般预警对应设备轻微参数波动，无运行安全隐患，仅记录设备状态数据，无需紧急处置；次要预警对应设备小幅异常，设备可正常运行但存在潜在隐患，系统推送常规预警提示，提醒运维人员定期核查；重要预警对应设备明显异常，运行性能下降，存在故障扩大风险，系统主动弹窗提示、推送预警信息，要求运维人员限期处置；紧急预警对应设

备严重故障、停机故障或安全隐患故障，系统触发声光报警、实时弹窗、短信推送多重预警方式，第一时间告知运维人员紧急抢修。分级预警技术可实现故障精准分类，帮助运维人员优先处置高危故障，合理分配运维资源，提升设备故障处置的针对性与高效性[4]。

4 系统核心功能与技术优势

4.1 设备全天候在线状态监测

依托远程数据采集与无线传输技术，系统可实现高速公路所有联网机电设备 24 小时不间断在线监测，完全替代传统人工定时巡检模式。系统可实时展示每台设备的在线状态、核心运行参数、实时工况信息，支持单设备精准信息查询、多设备批量数据统计、指定区域设备整体状态监测，实现全路段机电设备运行状态的可视化集中管控。对于隧道通风、道路照明、供配电等直接影响通行安全的关键设备，系统支持高频次数据采集与秒级状态更新，精准捕捉设备瞬时异常状态，实现设备运行全程无死角监测，有效规避人工巡检盲区与固定巡检间隔带来的监测空白问题。所有设备运行数据同步写入本地数据库形成连续可追溯的状态档案，无需现场运维人员定期手动填报，大幅降低一线巡检人员的重复性工作负担，从技术层面提升全路段机电设备运维的响应速度与管控精度。

4.2 故障智能化预警与溯源

基于分级阈值判定模型与多维度智能识别算法，系统可自动识别各类机电设备的显性故障与早期隐性故障，实现故障提前预警、运行风险主动预判，从根本上改变传统事后维修的被动运维模式。系统可根据不同路段、不同设备的运行特征，动态调整预警判定阈值，降低无效告警占比，将故障预警信息精准推送至对应运维责任人员，避免告警信息泛发导致的处置延误。同时，系统内置全链路故障溯源功能，可自动调取故障发生前后的连续设备运行数据、核心参数变化曲线、关联路段环境监测数据，精准定位故障发生点位、故障所属类型、直接诱发因素，无需运维人员现场人工逐一排查分析。该功能可大幅压缩故障排查耗时，显著提升故障整体处置效率，同时持续积累全量设备故障特征数据，为后续设备周期性运维、定向精准检修、到期设备更换提供完整的数据支撑。

4.3 运维数据智能化管理

系统具备完善的数据存储、统计、分析功能，可长期存储设备运行实时数据、历史数据、故障预警数据、环境监测数据等全维度数据。支持按设备类型、运行时段、区域路段、故障类型进行数据分类统计与可视化展示，自动生成设备运行报表、故障统计报表、能耗运行报表等数据资料。通过海量历史数据的积累与分析，可精准掌握设备运行规律、老化趋势、故障高发特征，为设备精细化运维、定期检修、设备优化调配提供全面的数据支撑，实现机电设备运维的数字化、智能化管控[5]。

结束语

高速公路机电设备远程在线监测与故障预警技术，依托物联网感知、数据传输、智能分析、分级预警等核心技术，构建自动化、智能化、精细化的设备运维监测体系，有效解决传统人工运维模式效率低、监测滞后、故障预判能力薄弱等问题。该技术可实现机电设备运行状态实时监测、潜在故障提前预警、故障问题精准溯源，大幅提升高速公路机电系统运行稳定性与可靠性，降低设备运维成本与故障停机损失。通过模块化、层级化的技术架构设计，该监测预警体系可适配各类高速公路机电设备与复杂运行场景，具备良好的通用性与实用性，能够有效推动高速公路机电设备运维模式的智能化升级，为高速公路长期安全稳定运行提供坚实的技术保障。

参考文献

[1] 赵磊. 高速公路机电设备智能运维平台构建探讨 [J]. 中国交通信息化,2024(3):76-81.

[2] 周涛. 基于大数据的机电设备故障预测模型研究 [J]. 现代电子技术,2023,46(10):52-57.

[3] 李明. 高速公路机电设备远程监测系统设计与应用 [J]. 公路交通科技,2024,41(2):145-151.

[4] 罗方. 高速公路机电设备智能故障检测系统 [J]. 中国交通信息化.2023（5):110—112.

[5] 彭加斌. 面向故障诊断的机电系统状态监测与预测性维护方法探析 [J]. 科海故事博览, 2025(31): 14-16.