

高速公路机电设备智能化管理系统的设计与实现

鲍 钟

宁波交投公路营运管理有限公司甬北分公司 浙江 宁波 315040

摘 要：本文探讨了高速公路机电设备智能化管理系统的设计与实现，针对传统管理模式下的设备管理混乱、状态监测滞后等问题，系统设计旨在实现设备信息的数字化管理、实时监测设备状态、提升故障诊断与预警能力、优化维护管理流程以及强化数据分析与决策支持。系统采用分层架构设计，采用先进开发技术和数据库设计，实现了关键功能并经过严格测试，有效提升了高速公路机电设备的管理效率。

关键词：高速公路；机电设备；智能化管理系统；设计；实现

1 高速公路机电设备管理现状及问题分析

1.1 管理现状

当前我国高速公路机电设备体系庞大，涵盖收费系统（如ETC车道设备、收费终端、车牌识别装置）、监控系统（含高清摄像头、气象监测仪、信息发布屏）、通信系统（光传输设备、交换机、应急电话）以及供电系统（UPS电源、柴油发电机、配电箱）等多个类别。这些设备广泛分布于收费站、服务区、隧道及沿线道路，呈现出“点多、线长、面广”的分布特征。在管理模式上，多数运营单位仍以传统方式为主：设备基础信息依赖Excel表格或本地数据库存储，更新滞后且易出现数据冗余；设备状态监测主要通过定期人工巡检完成，巡检周期通常为1-3个月，难以捕捉实时动态；故障处理多为“事后响应”，即设备发生故障后由养护人员到场排查维修；维护记录以纸质单据存档，查询和统计分析困难。部分经济较发达地区的高速公路尝试引入信息化工具，但多局限于单一功能模块（如设备台账管理），缺乏系统性和智能化能力^[1]。

1.2 存在的问题

传统管理模式暴露出诸多短板：一是设备信息管理混乱，不同部门的设备数据未实现共享，存在“信息孤岛”现象，导致设备重复购置或闲置浪费，据行业统计，约30%的运营单位因信息不互通造成年均10%以上的设备资源浪费；二是状态监测时效性差，人工巡检受天气、交通、人员经验等因素影响，易出现漏检、误判，设备潜在故障难以及时发现，如隧道通风机轴承磨损等渐进性故障，往往在完全失效后才被察觉，造成运营中断；三是故障诊断精度低，依赖维修人员经验判断故障原因，平均排查时间超过4小时，严重影响道路通行效率；四是维护计划缺乏科学性，采用“一刀切”的定期维护模式，对状态良好的设备过度维护，而对高负荷运

行设备维护不足，导致维护成本居高不下，部分路段年度维护费用占设备总价值的比例超过15%。

2 系统设计目标与原则

2.1 设计目标

本系统旨在构建一套覆盖高速公路机电设备全生命周期的智能化管理平台，具体目标包括：一是实现设备信息的数字化管理，建立统一的设备台账，支持信息的快速查询、更新与共享，确保设备基础数据的准确性和完整性；二是实现设备运行状态的实时监测，通过传感器与物联网技术，采集关键参数并可视化展示，使管理人员实时掌握设备运行态势；三是提升故障诊断与预警能力，基于历史数据和实时监测信息，运用算法模型预判潜在故障，缩短故障定位时间至1小时以内；四是优化维护管理流程，根据设备状态生成个性化维护计划，记录维护过程并评估效果，降低维护成本10%以上；五是强化数据分析与决策支持，通过多维度数据统计与趋势分析，为设备采购、更新及养护资源调配提供科学依据。

2.2 设计原则

系统设计遵循以下原则：实用性原则，以解决实际问题为导向，功能模块贴合高速公路运营单位的业务流程，操作界面简洁直观，降低管理人员学习成本；可靠性原则，采用成熟稳定的技术架构和硬件设备，确保数据采集不中断、系统运行无故障，平均无故障运行时间（MTBF）不低于1000小时；可扩展性原则，系统架构预留接口，支持新增设备类型、功能模块及用户数量，满足未来5-10年的业务发展需求；安全性原则，通过用户权限分级、数据加密传输与存储、操作日志记录等措施，防止数据泄露与非法篡改；经济性原则，在满足功能需求的前提下，优先选用性价比高的技术方案，控制系统建设与运维成本^[2]。

3 高速公路机电设备智能化管理系统设计

3.1 需求分析

在需求分析阶段,系统需满足一系列功能性及非功能性需求。功能性需求方面,系统需实现设备信息管理、状态监测、故障诊断与预警、维护管理及数据分析与报表等核心功能,涵盖设备全生命周期的管理、实时监测与预警、维护计划制定与执行、数据分析与报表生成等。非功能性需求则关注系统性能、安全性、兼容性和可维护性等方面。系统需根据设备类型动态调整数据采集频率,确保页面响应迅速,并支持多用户同时在线。同时,采用HTTPS协议加密数据传输,MD5加密存储用户密码,并设定不同角色的操作权限以保障安全性。系统还需支持主流操作系统和浏览器,且代码模块化设计便于后期维护与升级。

3.2 系统架构设计

系统采用分层架构设计,分为感知层、网络层、数据层、应用层和用户层。感知层由部署在机电设备上的传感器(如温度传感器、电流传感器)、智能仪表及数据采集终端组成,负责采集设备运行状态数据;网络层通过光纤、4G/5G无线网络将感知层数据传输至数据中心,支持断点续传以保障数据完整性;数据层包括数据库服务器与数据处理模块,实现数据的存储、清洗与转换;应用层是系统核心,包含五大功能模块,通过业务逻辑处理实现各项管理功能;用户层为管理人员提供Web端与移动端访问入口,支持多终端协同操作。

3.3 功能模块设计

3.3.1 设备信息管理模块

该模块负责设备全生命周期信息的管理,包括基础信息管理(设备编号、名称、型号、生产厂家、安装位置等)、文档管理(上传设备手册、验收报告等电子文件)、生命周期管理(记录设备购置、安装、调试、维修、报废等时间节点)及关联管理(建立设备与所属路段、养护班组的关联关系)。支持按设备类型、安装位置等多条件组合查询,导出Excel格式的设备清单,满足盘点与审计需求。

3.3.2 状态监测模块

模块通过对接感知层设备,实时采集机电设备的运行参数,如收费终端的交易成功率、监控摄像头的帧率、发电机的转速等。在系统界面以仪表盘、曲线图、状态指示灯等形式可视化展示数据,当参数超出预设阈值(如UPS电池电压低于190V)时,立即触发声光报警并显示异常设备位置。支持历史数据查询与趋势分析,如查看某台通风机近30天的温度变化曲线,辅助判断设备性能衰减情况^[3]。

3.3.3 故障诊断与预警模块

模块整合设备历史故障数据、实时监测数据及环境参数,构建故障诊断模型。对于已知故障类型(如摄像头无信号),通过规则库匹配故障特征并推送解决方案;对于未知故障,采用机器学习算法(如随机森林)分析数据异常模式,生成故障概率预测。预警分为三级:一级预警(轻微异常)提示关注,二级预警(潜在故障)安排检查,三级预警(紧急故障)立即派单维修。同时,记录故障处理过程,形成故障知识库,不断优化诊断精度。

3.3.4 维护管理模块

模块实现维护工作的全流程管理,包括维护计划生成(根据设备运行时长、故障率及预警信息自动生成,可手动调整)、工单派发(通过系统消息或短信通知维护人员)、维护记录(填写维修内容、更换部件、工时等)及效果评估(维修后设备运行参数对比)。支持备品备件管理,设置库存预警,当备件数量低于阈值时自动提醒采购,避免因备件短缺延误维修。

3.3.5 数据分析与报表模块

模块基于数据仓库技术,对设备运行、故障、维护等数据进行多维度分析。生成设备运行状态报表(如各路段设备在线率)、故障统计报表(如月度故障类型占比)、维护成本报表(如单台设备年度维护费用)等固定报表,同时支持用户自定义报表维度与指标。通过数据可视化工具(如柱状图、折线图)展示分析结果,辅助管理人员发现管理薄弱环节,优化资源配置。

3.4 数据库设计

数据库采用MySQL关系型数据库,主要设计以下核心表:设备信息表(Equipment),存储设备ID、名称、型号、安装位置等基础字段;状态监测表(StatusMonitor),包含监测ID、设备ID、监测时间、参数名称、参数值等字段;故障信息表(FaultInfo),记录故障ID、设备ID、故障类型、发生时间、处理状态等;维护记录表(MaintenanceRecord),存储维护ID、设备ID、维护类型、开始时间、结束时间、维护人员等;用户表(User),包含用户ID、用户名、密码、角色、所属部门等。表与表之间通过主键与外键关联(如StatusMonitor表的设备ID关联Equipment表的设备ID),确保数据一致性,同时建立索引提升查询效率。

4 高速公路机电设备智能化管理系统实现

4.1 开发环境与技术选型

系统开发环境为Windows10操作系统,开发工具采用IntelliJIDEA(后端)与VisualStudioCode(前端)。技术

选型如下：前端采用Vue.js框架，结合ElementUI组件库构建用户界面，实现页面的动态渲染与交互；后端采用SpringBoot框架，简化开发流程并支持RESTful API设计；数据库选用MySQL 8.0，保证数据存储的稳定性与安全性；数据采集采用MQTT协议，实现传感器与服务器的低功耗通信；服务器部署采用Docker容器化技术，便于环境一致性管理与快速部署^[4]。

4.2 关键功能实现

4.2.1 设备信息管理功能实现

设备信息录入界面采用分步表单设计，分为基本信息、技术参数、安装信息三个步骤，每步完成后自动保存草稿。设备编号采用“路段代码+设备类型代码+序号”规则自动生成，确保唯一性。通过集成百度地图API，在录入安装位置时可直接在地图上标记坐标，支持按地图范围查询设备分布；文档管理模块支持PDF、Word等格式的设备手册上传，采用阿里云OSS存储，通过文件MD5值避免重复上传。权限控制基于RBAC模型，管理员可配置不同角色（如路段管理员、维护人员）的操作权限，限制设备删除、参数修改等敏感操作。

4.2.2 状态监测功能实现

状态监测界面采用仪表盘与实时曲线组合展示，关键参数超限后字体变红并闪烁提醒。数据采集频率可配置，普通设备每30秒采集一次，关键设备（如隧道消防泵）每5秒采集一次。通过WebSocket技术实现数据实时推送，页面无需刷新即可更新数据；历史数据查询支持按时间范围、参数类型筛选，采用ECharts绘制趋势图，可放大查看某一时间段的细节数据。针对视频设备，集成视频质量诊断算法，自动检测雪花、偏色、遮挡等异常，诊断结果同步至状态监测界面。

4.2.3 故障诊断与预警功能实现

系统启动时自动加载预训练的故障诊断模型，模型参数定期更新。当设备参数超出正常范围时，先触发阈值预警，同时将最近10分钟的运行数据输入模型进行二次判断。例如，当变压器温度超过设定阈值时，模型结合负载电流变化率、环境温度等因素，判断是正常升温还是异常过热。故障工单生成时，系统自动关联历史维修记录，推荐相似故障的处理方案。维护人员可通过APP

接收工单，点击“导航”按钮自动规划至故障地点的最优路线。故障处理完成后，系统根据实际解决情况自动优化诊断模型参数，提高后续判断准确性。

4.2.4 维护管理功能实现

维护计划生成逻辑综合考虑设备保修期限、运行时长、历史故障率等因素，例如对运行超过3年且故障率高于平均水平的收费打印机，缩短维护周期至3个月。计划生成后推送至路段管理员审核，审核通过后自动分解为月度工单；备件管理模块与维护工单联动，当创建涉及备件更换的工单时，自动检查库存，若库存不足则触发采购申请。维护人员领用备件时通过扫码登记，系统自动扣减库存。工单验收时需上传维修前后的对比照片，经管理员在线审核通过后才算完成。

4.3 系统测试

测试环境模拟高速公路运营，部署模拟器生成数据。功能测试验证模块需求，通过率高。性能测试模拟并发操作，系统响应快，满足设计要求。兼容性测试覆盖主流设备和浏览器，无兼容性问题。试点应用显示系统稳定，故障发现时间缩短，诊断准确率提升，减少无效维护支出。

结束语

随着高速公路机电设备的日益复杂化和智能化，构建高效的机电设备管理系统显得尤为重要。本系统通过智能化技术和管理手段，实现了设备全生命周期的科学管理，不仅提高了故障发现与处理的效率，还降低了维护成本。未来，将持续优化系统功能，提升智能化水平，为高速公路的安全、高效运营提供更加坚实的保障。

参考文献

- [1]黄本锐,苏爱斌,覃荣武.基于人工智能的高速公路隧道机电设备管理系统的设计与应用[J].自动化应用,2024,65(13):49-51,55.
- [2]郑雄杰.高速公路机电设备管理系统AI智能体的建设及应用[J].中国交通信息化,2024(10):121-124.
- [3]刘昊.高速公路机电设备智慧运维探索与实践[J].建筑技术开发,2021,48(6):113-114.
- [4]赵淑俊.高速公路机电设备物资管理系统的设计与实现[J].企业改革与管理,2020,(13):210-211.