Research on Operation and Maintenance Management System of Electromechanical Systems for Internet of Things Expressways

Hu Zhang

Henan Transportation Investment Group Co., Ltd., Zhengzhou, Henan, 450000, China

Abstract

With the continuous expansion of China's expressway network, electromechanical systems—crucial infrastructure for road safety and operational efficiency—now face heightened demands for maintenance management quality. This study focuses on IoT-enabled maintenance management frameworks for highway electromechanical systems. It first outlines the necessity of IoT applications, covering system components, equipment impacts, operational risks, and how these systems ensure stability. A “sensor layer-network layer-application layer” architecture is proposed, detailing functional modules across each tier. The research further analyzes core modules including full lifecycle management, intelligent fault resolution, and workforce optimization. These findings contribute to developing efficient smart maintenance systems, significantly enhancing operational efficiency and system reliability in highway electromechanical infrastructure.

Keywords

Internet of Things; Highway; Electromechanical Systems; Maintenance Management System; Intelligent O&M

基于物联网的高速公路机电系统运维管理体系研究

张虎

河南交通投资集团有限公司, 中国·河南 郑州 450000

摘要

随着我国高速公路里程持续增长, 机电系统作为保障道路安全高效运行的核心设施, 其运维管理质量面临更高的要求。基于此, 本文聚焦物联网应用下的高速公路机电系统运维管理体系。先是简要阐述了物联网应用必要性, 涵盖机电系统构成及设备影响、运行风险因素及体系对运营稳定性的保障作用, 同时设计了“感知层-网络层-应用层”的物联网应用架构, 详细阐述机电系统应用架构各层功能。在此基础上, 研究深度剖析高速公路机电系统运维管理的核心功能模块, 具体涉及全生命周期管理、智能故障处理闭环、人员与资源调度等。研究成果可助力构建高效智能的运维管理体系, 助力快速提升高速公路机电系统运维效率及其稳定性。

关键词

物联网; 高速公路; 机电系统; 运维管理体系; 智能运维

1 引言

高速公路机电系统作为保障行车安全、提升通行效率的关键支撑, 其稳定运行直接关乎路网整体效能。当前智慧交通建设加速推进, 监控、收费、通信等机电电子系统日益复杂, 设备数量激增且分布广泛, 传统运维模式主要依赖人工巡检, 目前暴露出时效性不足、成本偏高、故障预判能力薄弱等问题。^[1]在此过程中, 如何有效依托技术创新突破运维瓶颈, 成为行业发展的重要课题。物联网技术凭借其高效

传输、智能分析的特性, 为构建新型运维管理体系提供可行路径。因此, 下述将围绕基于物联网的高速公路机电系统运维管理体系展开研究, 探索其应用逻辑与实践路径, 以期为行业转型升级提供思路。

2 高速公路机电系统运维管理体系物联网应用的必要性

2.1 机电系统构成及设备影响

高速公路机电系统是保障道路高效运转的核心基础设施, 主要由监控系统、收费系统、通信系统、供配电系统、照明系统及隧道机电系统等多子系统构成。其中监控系统摄像机、车辆检测器等负责实时路况感知, 收费系统ETC门架、车道控制器支撑精准收费, 通信系统光纤网络与交换机保障

【作者简介】张虎(1979-), 男, 中国河南驻马店人, 本科, 高级工程师, 从事高速公路机电工程、高速公路信息化工程研究。

数据传输。各子系统设备独立运行又相互联动，任何环节设备故障都可能引发连锁反应^[2]。例如通信中断会导致监控与收费数据传输受阻，供配电故障会造成隧道照明熄灭，直接威胁行车安全。因此，机电设备稳定运行是高速公路通行效率与安全的重要基础，其运维质量直接决定路网管理效能。

2.2 机电设备运行的风险因素

对于高速公路机电设备，其运行环境兼具显著复杂性、不确定性。从空间分布来看，高速公路机电设备或暴露于野外，如沿线摄像机、ETC门架；或处于特殊场景如隧道、收费站，长期面临自然环境、人为因素双重考验。从自然环境的角度来看，高温、暴雨、冰冻等极端天气均可能导致机电设备受潮、线路老化或部件损坏；例如夏季高温易使供配电设备过载，冬季冰雪可能冻裂通信光缆。从人为方面来看，车辆震动、施工干扰及人为破坏可能造成设备位移、线路松动。这些风险因素相互交织，致使传统人工巡检难以全面覆盖，亟需通过物联网技术实现动态监测。

2.3 体系对运营稳定性的保障作用

基于物联网的运维管理体系可通过实时感知与主动响应机制，为高速公路运营稳定性提供关键保障。传统模式下，设备故障主要依赖人工巡检，存在响应滞后、漏检率高的问题，极易导致小故障演变为大事故。而物联网体系通过在设备部署传感器，可实时采集运行参数如电压、温度、信号强度，借助网络层快速传输数据^[3]，在故障萌芽阶段触发预警。例如光纤在线监测系统可通过衰减曲线分析提前定位潜在断点，避免通信中断；供配电监测模块可实时追踪电流变化，预防过载停机。由此可显著缩短故障处理时效，通过历史数据挖掘设备劣化规律，从根本上降低系统瘫痪风险，保障高速公路全天候稳定运营。

3 基于物联网技术的高速公路机电系统应用架构设计

3.1 感知层：设备状态实时捕捉

感知层是物联网技术在高速公路机电系统运维中的基础环节，通过部署各类传感器与智能终端，实现对机电设备运行状态的全方位、实时捕捉。针对监控系统摄像机，安装亮度传感器、抖动监测器，实时采集画面清晰度、信号稳定性等参数，自动识别镜头污染、角度偏移等故障；在收费系统的ETC门架与车道控制器中，嵌入电压传感器与通信探针，追踪设备供电稳定性及数据交互成功率；对于通信系统光纤线路，配置光功率传感器，持续监测信号衰减；供配电系统的变压器、UPS则配备温度传感器与电流互感器，记录运行温度、负载变化等关键指标。

此外，隧道机电系统风机、消防设备等，通过振动传感器与红外探测器捕捉异常运行状态。这些感知设备将采集到的原始数据初步过滤，识别超出阈值异常信号，为后续故障诊断提供基础数据，形成机电系统“神经末梢”的实时感

知网络，确保各类设备状态信息的全面捕捉、及时反馈^[4]。

3.2 网络层：数据高效传输集成

网络层主要承担感知层数据的传输与集成功能，是连接感知层与应用层的关键纽带。依托高速公路沿线已有的光纤专网作为主干传输通道，保障大量实时监测数据高速传输，尤其适用于隧道、桥梁等关键路段的大容量数据交互。在光纤覆盖相对薄弱的区域，辅以5G无线网络为补充，解决偏远路段设备的通信盲区问题，确保沿线机电设备的全连接。

网络层还需具备数据预处理能力，通过边缘计算节点对感知层传输的原始数据清洗、筛选、压缩，剔除冗余信息。该过程中还需提取设备运行特征参数，例如摄像机故障代码、光纤衰减曲线，以此尽可能地减少数据传输量。同时采用加密传输协议保障数据安全，防止传输过程中出现信息泄露或篡改。基于这一“光纤+5G”的混合网络架构与数据预处理机制，网络层实现机电系统各类数据高效集成、可靠传输，为应用层智能决策提供数据支撑。

3.3 应用层：智能决策与执行落地

应用层是物联网技术在高速公路机电系统运维中的核心应用环节，通过整合数据资源与功能模块，实现智能决策与运维执行的闭环管理。该层以云平台为载体，集成设备台账管理、实时监控大屏、故障预警系统、工单派发模块等功能^[5]。

设备台账管理模块存储机电设备的型号、安装位置、维修记录等全生命周期信息，通过与感知层数据关联，形成设备健康档案；实时监控大屏汇聚各路段机电系统运行状态，以可视化图表展示关键指标（如设备完好率、故障处理时效），支持管理人员全局掌握系统运行情况；故障预警系统基于网络层传输的特征数据，结合历史故障模型，自动识别潜在故障并分级预警，如将ETC门架通信中断判定为一级预警，触发紧急响应流程。

除此之外，应用层还具备数据分析功能，通过挖掘设备运行数据规律，生成预防性养护计划。例如根据季节变化预测供配电系统负载高峰，提前安排检修。最终应用层将决策结果转化为具体运维指令，实现从数据感知到执行落地的全流程智能化管理，以此尽可能地提升高速公路机电系统运维效率与精准度。

4 高速公路机电系统运维管理体系的核心功能模块

4.1 设备全生命周期管理模块

在基于物联网技术的高速公路机电系统运维体系构建中，设备全生命周期管理模块是重要支撑，可实现从设备入库直至报废的全流程数字化管控。在设备入库阶段，系统将录入工号、附件信息、登记时间、使用寿命、出厂日期、厂家等详细资料。并通过物联网技术自动生成唯一条形码或电

子标签,关联设备基础信息与物联网感知节点,实现“一物一码一终端”的精准绑定^[6]。

在高速公路机电设备运行期间,模块可实时同步感知层传输的状态数据,例如供配电设备电压波动、通信设备信号强度等。同时结合运行年限、维护记录等信息,动态更新设备健康评分。当设备接近使用寿命或故障频率超出阈值时,系统自动触发报废预警,同步推送至资产管理人员。此外,模块通过数据库存储设备全生命周期数据,支持基于物联网的历史轨迹追溯,如查询某摄像机的安装时间、维修次数、传感器更换记录等,为设备采购、更新提供数据支撑。

4.2 智能故障处理闭环模块

在高速公路机电系统运维管理中,智能故障处理闭环模块主要依托物联网技术构建“预警-派单-维修-验收”的全流程机制。当感知层监测到设备异常,例如光纤衰减超标、ETC门架通信中断等,模块自动接收故障信号,结合网络层传输的特征数据分级研判,生成故障工单并推送至区域运维中心。

其中工单主要涵盖故障设备物联网终端ID、历史维修方案、关联传感器实时数据等信息,便于维修人员快速定位问题。维修人员可通过移动客户端接收工单,现场处理时扫描设备电子标签调取详细参数,处理完成后上传维修记录,系统自动同步至数据库。模块还具备在线监督功能,管理人员可通过物联网实时查看维修进度,维修完成后自动触发验收流程,对比处理前后的设备状态数据,确认故障解决后闭环工单。

5 基于物联网的高速公路机电系统运维管理体系实践案例

5.1 案例概况

研究选取广东省高速公路光纤在线监测系统,应用于广东省南北向主干线(全长约650公里)的通信系统运维管理。该线路串联12个收费站、8座隧道及5个服务区,通信光缆总长度达1300公里,是维系监控、收费等机电系统数据传输的核心链路。传统运维中,光缆故障依赖人工巡检定位,平均排查时间超4小时,年均因通信中断导致的监控盲区、收费数据延迟等问题频发,影响高速公路运营效率。基于任光远提出的物联网三层架构及谢黎所述“全业务管理阶段”技术要求,该省于2020年部署光纤在线监测系统,实现光缆状态的实时感知与智能运维。

5.2 实践应用方案

感知层沿光缆线路每2公里设置1个光纤传感器,采集光功率、衰减系数等参数,通过光时域反射技术(OTDR)

捕捉光缆断点、弯曲等异常。网络层采用光缆自身信道作为主传输链路,同步搭载4G备用网络,将传感器数据经边缘节点预处理后,传输至省级运维中心。应用层开发光纤运维云平台,集成设备台账(光缆型号、敷设时间、接头位置)、实时监测大屏、故障预警模块及工单系统。

5.3 成效分析

表1 基于物联网的高速公路机电系统运维管理实施成效

指标	传统模式	物联网模式	提升幅度
故障定位误差	≥500米	≤5米	99%
平均故障处理时间	4.2小时	1.1小时	73.8%
年均故障次数	32次	8次	75%
年度运维成本	156万元	48万元	69.2%

该案例验证了物联网架构可行性,其中感知层实现光缆状态实时捕捉,网络层保障数据高效传输,应用层通过核心模块联动提升运维效率,符合自动化监测降低人工成本的实践效果,为高速公路机电系统物联网运维提供了典型范式。

6 结论

综上所述,研究通过构建基于物联网的高速公路机电系统运维管理体系,明确物联网应用必要性,设计了“感知-网络-应用”三层架构,并结合广东省光纤在线监测案例验证了体系有效性。实践表明,该体系能显著提升故障处理效率、降低运维成本,为机电系统稳定运行提供有力支撑。随着物联网技术深化应用,高速公路机电运维将趋于智能高效化,为智慧交通发展奠定坚实基础。

参考文献

- [1] 王秋,王强,胡永恺,等.高速公路机电系统数智化运维管理探讨[J].公路交通技术,2025,41(03):197-204.
- [2] 赵同龙.集中监控模式下高速公路机电系统设备运维管理[J].设备管理与维修,2024,(20):10-12.
- [3] 邓国红.机电设备智慧运维管理系统在高速公路工程中的应用研究[J].通讯世界,2024,31(06):193-195.
- [4] 费志雄.高速公路机电系统智能化运维管理体系探究[J].电子元件与信息技术,2024,8(05):83-85.
- [5] 张璐.高速公路项目智能机电设备运维管理系统研究[J].交通世界,2024,(12):174-176.
- [6] 吴梅花.高速公路机电系统智能化运维管理体系探究[J].中国交通信息化,2024,(02):127-129.
- [7] 胡汉桥,陆由,雷伟.高速公路机电系统运维管理一体化探究与实践[J].中国交通信息化,2022,(01):36-39.