

基于物联网的公路机电设施状态监测与能效管理研究

曾顺泽

中咨华科交通建设技术有限公司 北京市 100000

DOI:10.32629/ems.v8i3.18712

[摘要] 随着公路交通向智慧化、数字化方向发展,机电设施在保障道路安全与运行效率方面发挥着越来越重要的作用。基于物联网技术的状态监测与能效管理,已成为提升公路运营水平的关键路径。本文围绕物联网在公路机电设施中的应用展开研究,首先分析其在实时监测、风险预警和节能降耗方面的重要性;随后从构建全维度感知监测体系、实施精细化能效管理、创新智慧运维模式以及深化多技术融合应用等方面提出优化策略。研究旨在为提升公路机电设施的运行可靠性、能源利用效率和协同管理能力提供理论参考与实践借鉴。

[关键词] 物联网;公路机电设施;状态监测;能效管理

随着智能交通体系的快速发展,公路机电设施规模不断扩大,其运行状态与能效水平直接影响道路安全与服务质量。传统人工巡检与粗放式管理已难以满足现代公路运营的精细化需求。物联网技术凭借其感知、传输与智能分析能力,为机电设施的实时监测、能耗优化和故障预警提供了新的技术路径。开展基于物联网的状态监测与能效管理研究,对于提升公路系统的智能化水平、降低运维成本、实现绿色高效运行具有重要意义。

一、基于物联网的公路机电设施状态监测与能效管理的重要性

公路机电设施作为保障路网高效运转的“数字路基”与“系统血脉”,涵盖监控、通信、收费、供配电、隧道通风照明等多个子系统,其运行状态与能效水平对公路运营质量具有决定性影响。在智慧交通与“双碳”目标协同推进的背景下,基于物联网技术开展状态监测与能效管理工作,具有不可替代的重要意义。

首先,保障路网通行安全的核心支撑。公路机电设施故障易引发交通拥堵、行车安全隐患等连锁问题,据统计,全国高速公路机电设备故障导致的非计划性停运时间年均超过1200小时,直接经济损失达数十亿元。物联网技术通过部署多类型传感器实现对设备运行参数、环境状态的实时感知,可提前预警设备故障风险,如电缆绝缘老化、高压开关柜温升超标等,从被动维修转向主动预防,显著降低故障引发的安全事故概率。例如,在隧道机电系统中,基于物联网的照明随车调光控制可避免“黑洞”“白洞”现象,提升驾驶员视

线适应性,有效减少交通事故。其次,提升运维管理效率的关键路径。传统公路机电设施运维依赖人工巡检,存在效率低、成本高、响应滞后等弊端。物联网构建的“感知-传输-平台”一体化监测体系,可实现设备状态的远程可视化监控与智能诊断,大幅提升运维效率。沪昆高速湖南段的实践表明,基于物联网的智慧供电系统可将设备故障响应时间从2.7小时压缩至18分钟,典型故障处置时间缩短67%。同时,通过大数据分析优化运维资源调度,可降低备件库存成本与巡检能耗,实现运维管理的精细化升级。最后,推动绿色低碳发展的必然要求。交通行业作为碳排放大户,公路机电系统能耗占运营成本比重较高且呈上升趋势,2024年全国高速公路机电系统平均能耗成本同比上升9.7%,与“双碳”目标形成尖锐矛盾。物联网技术可实现对机电设施能耗的实时监测与动态优化,如通过车流量与光照强度数据调节照明亮度、基于负荷预测优化供配电调度,显著提升能源利用效率。实践验证显示,物联网智慧供电系统可使综合能效提升22%,全生命周期内可减少二氧化碳排放12.7万吨,为交通行业绿色转型提供有力支撑。

二、基于物联网的公路机电设施状态监测与能效管理优化策略

(一) 构建全维度感知监测体系,提升数据采集与融合能力

针对当前公路机电设施监测分散、数据割裂、精度不足的痛点,以“云-边-端”协同架构为核心骨架,打造覆盖全设备、全参数、全场景的感知监测网络,为后续能效管理与

智能运维奠定数据基础。在边缘层,结合公路沿线高低温、强振动、多粉尘等复杂工况,精准部署具备宽频带响应特性与高环境适应性的智能监测终端,重点选用基于法拉第磁光效应的光学电压传感器、高精度电流传感器及环境温湿度传感器等设备,其中光学电压传感器可实现 -40°C 至 85°C 极端环境下 $\pm 0.2\%$ 的超高测量精度,有效规避传统传感器在恶劣条件下的数据失真问题,确保设备电压、电流、温升、绝缘状态等核心运行参数的采集准确性。通信网络层面采用分层异构设计策略,主干网依托硬切片5G专网技术,通过专属网络切片保障设备运行关键数据的低延迟、高可靠传输,传输时延控制在20ms以内;区域级网络则采用高速电力线通信(HPLC)技术,充分利用公路沿线现有电力线路资源,减少额外布线成本,同时提升隧道、山区等复杂地形的通信覆盖能力,整体实现98.7%以上的连接稳定性与数据传输成功率。为破解不同子系统异构通信协议导致的数据孤岛难题,专项开发多协议自适应适配器,兼容Modbus、IEC104、DL/T645等9种主流工业通信协议,实现监控、供配电、照明等多子系统数据的标准化转换;在此基础上,引入改进D-S证据理论的多源数据融合算法,通过对不同传感器采集数据的权重分配与冲突消解,显著提升数据融合准确率18.7%以上,有效过滤冗余与干扰数据。最终搭建统一的云端数据管理平台,深度集成地理信息系统(GIS)与建筑信息模型(BIM)技术构建公路机电设施数字孪生模型,将实体设备的运行状态与三维空间信息精准映射至虚拟平台,实现设备状态的三维可视化实时监测与全生命周期追溯,同时借助模型的空间定位能力,将故障定位精度从传统的500米大幅提升至50米,为快速故障处置提供精准空间指引。

(二) 实施精细化能效管理,推动能源高效利用

针对当前公路机电系统能效管控粗放、能源浪费严重的突出问题,以全生命周期能效最优为目标,构建“预测-调控-评估-优化”闭环管理体系,通过精准化调度与科学化评估,最大限度提升能源利用效率,助力交通行业绿色低碳转型。在能耗调控核心环节,建立时空耦合的能耗优化模型,深度融合多源数据实现精准预测与动态调度:一方面整合路网车流量历史数据、实时监测数据及未来24小时交通流量预测结果,另一方面接入区域气象部门的光照强度、环境温度、降水概率等气象数据,同时联动机电设备运行参数(如照明功

率、供配电负荷等),通过机器学习算法挖掘不同场景下的能耗规律,生成15分钟粒度的动态调度指令,确保能源供给与实际需求精准匹配。针对高能耗重点子系统,制定差异化节能优化方案:照明系统作为能耗大户,全面推广WF-IoT融合物联网调光方案,在路段关键位置部署微波雷达或视频车辆检测器,实时感知车辆通行状态,实现“前方有车高亮、无车低亮、夜间休眠”的随车调光模式,同时结合光照传感器数据自适应调节亮度阈值,既避免“长明灯”造成的能源浪费,又保障行车安全,经实践验证可确保节能率达30%以上;供配电系统则采用动态负荷预测与三相不平衡补偿协同技术,通过智能算法精准预测不同时段负荷变化趋势,提前调整供电策略,同时借助补偿装置平衡三相电流,降低线路损耗,在此基础上结合公路沿线闲置空间布局光伏组件,构建“光伏+储能+充电”一体化系统,实现可再生能源就地消纳,不仅可缓解高峰时段电网供电压力,还能实现日均削峰填谷电量3800kWh以上,提升能源供给稳定性与经济性。

(三) 创新智慧运维模式,提升故障处置与资源调度效率

针对传统公路机电设施运维“事后维修为主、响应滞后、成本高昂”的痛点,依托物联网感知数据与智能算法,构建全流程智能化运维体系,推动运维模式从“被动应对”向“主动预判、精准处置”转型,大幅提升运维效率与资源利用率。核心举措是建立“预防性维护-预测性维护-远程诊断”三位一体的全周期运维体系,打破传统运维各环节割裂的局面。在预测性维护环节,深度应用LSTM-Attention混合模型,该模型通过Attention机制强化对设备关键运行参数变化趋势的关注,结合历史故障数据、实时运行数据(如变压器油温、负荷电流、绝缘电阻等)及环境数据,精准预测设备剩余使用寿命,其中对核心供电设备变压器的预测误差可控制在8%以内,能够提前7-15天预警潜在故障风险;针对电缆等线路类设施,开发基于故障行波特征提取的专项诊断算法,先通过小波包变换对采集到的故障信号进行降噪与特征提取,再利用SVM分类器对故障类型与位置进行精准识别,使电缆绝缘老化等典型故障的诊断准确率提升至96.5%,为预防性维护提供精准依据。为实现故障响应的高效管控,构建四级智能告警机制,依据故障影响范围、紧急程度将故障划分为特级、一级、二级、三级四个等级:特级故障(如隧道供电中断、主干通信瘫痪)立即通过平台、短信、电话三重

渠道推送至运维负责人及管理层,启动应急响应流程;一级故障(如单台收费设备故障)明确2小时内处理时限,由区域运维人员优先处置;中低等级故障则纳入常规运维队列,实现故障响应的分级管控与有序处置,避免资源错配。在资源调度优化层面,依托GIS技术搭建可视化运维资源调度平台,整合运维人员技能档案(如擅长的设备类型、资质等级)、人员实时地理位置、备件仓库库存分布、运维车辆实时位置等多维度数据,通过智能算法实现派工与路线的双重优化:派工环节基于“技能匹配度最高、距离最近”原则自动筛选最优运维人员,确保故障处置的专业性与及时性;路线规划环节采用遗传算法,综合考虑路段通行状况、多故障点分布等因素,优化巡检与处置路线,有效减少无效行程,经实践验证可降低维护成本30%以上。

(四) 深化技术融合应用,强化安全与协同管控能力

针对当前公路机电物联网系统技术融合深度不足、安全防护薄弱、子系统协同性差的核心短板,以“技术集成赋能、安全底线筑牢、协同效能提升”为导向,推动多技术跨领域融合应用,构建全方位、多层次的技术保障体系,为监测与能效管理系统稳定高效运行提供坚实支撑。在核心技术融合层面,重点推动宽禁带半导体材料与数字孪生技术的深度融合,破解传统技术在能效与优化精度上的瓶颈。宽禁带半导体以其高频、高效、耐高温的核心优势,成为提升机电设备能效的关键突破口,预计2026年SiC-MOSFET器件的规模化普及将推动高频高效变流器在供配电系统中的广泛应用,相较于传统硅基器件,可使变流器转换效率提升至99%以上,显著降低设备能耗与散热压力;同时,将数字孪生技术与宽禁带器件应用深度结合,构建涵盖供配电、照明等全系统的数字孪生模型,通过实时映射实体设备运行状态,可实现纳秒级电磁暂态过程模拟与故障推演,精准捕捉系统运行中的潜在风险点,为运行参数优化提供精细化决策依据,大幅提升系统优化精度与可靠性。在安全防护体系构建上,立足公路机电物联网系统“泛在连接、多源数据交互”的特性,打造轻量化、高适配的安全防护体系,避免过度防护导致的系统冗余与响应延迟。采用国密算法SM9构建设备间双向身份认证机制,无需依赖第三方密钥管理中心,简化认证流程的同时,可有效抵御伪造设备接入、中间人攻击、数据篡改等6类常见网络安全威胁;针对设备运行数据、能耗数据等敏

感信息,实施全生命周期加密管理,传输环节采用TLS1.3协议加密,存储环节采用AES-256加密算法,确保数据在采集、传输、存储、应用全流程的安全可控,保障路网运营数据隐私与安全。在子系统协同管控上,打破传统各子系统独立运行、数据割裂的壁垒,建立全域协同控制机制。通过微服务架构对监测、能效调控、运维等18个核心功能模块进行容器化部署,实现各功能模块的独立升级与灵活调用,支持秒级弹性扩容,可快速适配不同路段、不同规模的机电系统需求;基于微服务架构搭建协同控制中枢,构建供配电、照明、监控等子系统的联动规则库,例如当监控系统检测到隧道内车流量骤增时,自动触发供配电系统负荷提升指令与照明系统亮度调节指令,实现多系统响应的同步性与协调性,最大化全系统能效与运行效率。

三、结语

基于物联网的公路机电设施状态监测与能效管理,是推动公路交通向智能化、绿色化转型的重要支撑。通过构建全维度感知体系、实施精细化能效管理、创新智慧运维模式以及深化多技术融合,可以显著提升设施运行的可靠性、安全性与能源利用效率。未来,应进一步加强标准体系建设、数据共享机制完善以及关键技术研发,以实现公路机电设施的全生命周期智慧管理,为现代交通运输体系的高质量发展提供持续动力。

[参考文献]

- [1] 吴小军,姬同旭,李昌龙.一种适用于高速公路机电板块养护的数字化编码体系[J].交通节能与环保,2023,19(05):73-78.
- [2] 万梅新.机电设施状态监测在高速公路中的应用[J].集成电路应用,2023,40(07):240-241.
- [3] 李博悟.高速公路隧道机电工程关键设施检测技术研究[J].运输经理世界,2023,(17):82-84.
- [4] 马静,陈忱,韦卫.面向大数据的公路机电设施运行监测探究[J].中国交通信息化,2019,(09):102-104.
- [5] 宿增强.“后交通时代”公路机电设计业务发展方向探讨[J].中国交通信息化,2018,(11):35-36.

作者简介:曾顺泽(1987年6月),男,湖北黄冈,汉族,工程师,大学本科,研究方向:公路机电、智慧高速方向。