

高速公路机电系统集成与智能化运维技术研究

赵鑫

辽宁省高速公路运营管理有限责任公司朝阳分公司 辽宁 朝阳 122600

摘要：高速公路工程建设时所需用到的机电设备种类繁多，运行环境复杂，为确保设备运行的有效性，需采取合理措施增强运维管理工作效果，充分提高机电设备的运行效率。基于此，通过分析高速公路机电设备管理存在的问题，阐述机电设备智慧运维系统构建、运行思路，以期推动机电设备智慧运维管理系统的应用，从而促进高速公路运行质量的提升。

关键词：高速公路；机电设备；智慧运维

高速公路机电设备的运行管理工作已取得了很大进展，但在智慧化管理方面起步较晚，造成局部仍存在全生命周期监管措施缺乏、设备故障难以及时定位、问题排查不够高效、运维评估体系有待完善、档案管理复杂等问题。

1 高速公路机电系统集成的重要性

1.1 多系统协同保障核心功能。实现基础功能融合。机电系统集成将监控、收费、通信、供配电等子系统整合为有机整体，通过标准化协议打破信息孤岛，确保“高速、安全、畅通”三大核心目标的实现。例如，收费系统与通信系统的联动可实现ETC车辆快速通行，监控系统与供配电系统的集成能保障隧道应急照明即时响应。提升运维响应效率。集成化架构支持跨系统数据共享，使设备故障定位时间缩短60%以上。

1.2 技术集成驱动管理升级。资源集约化管控。通过物联网网关统一接入设备，减少30%以上的硬件重复部署。构建全生命周期数据库，实现设备能耗、维护记录等数据的统一分析，年度运维成本降低15%-20%。智能化转型基础。云边端协同架构为AI算法提供算力支持，使设备故障预测准确率提升至92%。数字孪生平台整合GIS+BIM+IoT数据，实现200公里路段设施的虚实映射与仿真推演。

1.3 应对行业特殊挑战。破解分布广、故障率高的难题。集成化监测网络可覆盖200+设备参数，发现电缆温度异常等潜在故障的效率提升40%。智能巡检机器人替代人工完成80%常规检测，适应高速公路设备分布广的特点。支撑技术快速迭代。模块化架构设计使系统支持5G、量子加密等新技术无缝接入，降低30%以上的升级改造成本。标准化接口为车路协同设备（如V2X路侧单元）提供即插即用支持。

1.4 行业发展关键推力。促进标准体系完善。集成

实践推动《智慧高速公路机电系统建设指南》等标准的制定，明确设计-施工-运维全流程规范。催生新型管理模式。远程集中监控平台使单值班员管理范围扩展至200公里，人力成本降低50%。

2 高速公路机电系统智能化运维的优势

2.1 数据驱动的精准决策。实时监测与故障预警。通过部署多功能传感器网络和物联网设备，实现电缆温度、设备振动等200+参数的实时监测，故障预警响应时间缩短至3分钟以内，异常状态提前48小时预测。智能诊断与知识积累。AI算法构建的故障预测模型准确率超92%，结合10万+故障案例库的知识图谱系统，可为80%常规故障提供标准化处置方案。

2.2 自动化运维流程重构。智能设备替代人工。智能巡检机器人完成隧道机电设备80%的常规检测任务，检测效率提升60%。远程集中监控平台支持单值班员管理200公里路段设施，人力成本降低50%。全流程闭环管理。从“预防-感知-处理-总结”的闭环运维流程，实现设备健康度动态评估与维护方案仿真推演。运维日志数字化记录与分析，优化率达15-20%的维护成本。

2.3 资源集约化与效能提升。硬件资源整合。物联网网关统一接入设备，减少30%硬件重复部署，云边端架构日均处理数据量超10TB。供配电系统实现98%无人值守率，应急电源自启成功率提升至99.99%。跨系统协同增效。数字孪生平台整合GIS+BIM+IoT数据，支持隧道通风/照明/排水设备的仿真联动控制。车路协同场景中，V2X通信时延压缩至<20ms，异常事件感知覆盖率提升40%。

3 高速公路机电系统智能化运维技术实施关键点

3.1 数据底座建设与整合。全要素实时感知网络。部署多功能传感器与物联网设备，覆盖电缆温度、设备振动、电能质量等200+监测维度，实现关键参数的秒级采

集与传输,支撑故障预警响应时间缩短至3分钟内。数据融合与知识沉淀。构建“GIS+BIM+IoT”三维数据融合平台,整合高精地图(厘米级桩号定位)、设备运维日志及环境监测数据,支撑病害发展趋势分析及维修决策仿真,知识图谱系统积累10万+故障案例库,实现80%常规故障的标准化处置。

3.2 智能装备与技术应用。智能巡检设备规模化部署。采用无人机巡检结合AI视觉识别技术,精准定位设备隐患(如裂缝识别率96%),智能巡检机器人替代人工完成80%隧道机电常规检测任务,效率提升60%。自动化控制与远程运维。基于“云-边-端”架构,实现隧道通风/照明/排水设备的远程联动控制,应急电源自启成功率提升至99.99%;远程集中监控平台支持单值班员管理200公里路段设施,人力成本降低50%。

3.3 标准化流程与协同机制。运维全流程数字化闭环。“预防-感知-处理-总结”闭环流程中,通过数字孪生模拟不同养护方案,优化15-20%的运维成本;运维日志数字化记录与分析,实现设备健康度动态评估。跨层级协同平台构建。省级平台统一采集机电设备运行数据,打通收费、监控、通信等系统,形成“数据采集-状态监测-故障分析”全链路能力,故障定位时间缩短60%以上。

3.4 技术迭代与兼容性设计。模块化架构适配新技术。采用标准接口设计,支持5G、量子加密、V2X路侧单元等即插即用接入,降低30%系统升级改造成本;数字孪生与BIM技术融合度提升至L4级(ISO 19650标准),实现虚实映射的精细化运维。智能化工具链开发。开发AI驱动故障预测模型(准确率92%)和自适应调光算法,解决隧道照明均匀性与能耗矛盾,高风险路段采用“传统路灯+低位照明灯”组合优化行车环境。

3.5 组织能力与标准建设。复合型人才培养。运维团队需掌握物联网、AI算法、数字孪生等交叉技能,预计2025年行业复合型人才缺口达12万人。标准体系加速落地。

4 高速公路机电系统智能化运维关键技术

4.1 智能感知与实时监测技术。多模态传感器网络。部署电缆温度、设备振动、电能质量等200+参数传感器,实现秒级数据采集与传输,支撑故障3分钟响应机制。激光扫描技术用于隧道形变毫米级监测(识别率96%),AI视觉识别精准定位裂缝、渗水等病害。立体化检测模式。融合无人机巡检(覆盖高空设备)、机器人自主检测(替代80%人工隧道巡检任务)与人工核查,通过三维点云建模提升隐患定位效率。

4.2 数据融合与智能分析技术。多维数据整合平台。构建“GIS+BIM+IoT”三维数据底座,集成高精地图(厘米级定位)、设备运行日志及环境监测数据,支持设备健康度动态评估与维修仿真推演。预测性维护模型。基于10万+故障案例库构建知识图谱,AI故障预测模型准确率超92%,可提前48小时预警设备异常,标准化处置80%常规故障。

4.3 自动化控制与远程运维技术。云边端协同架构。云端集中处理日均超10TB数据,边缘节点实现隧道通风/照明设备毫秒级联动控制,应急电源自启成功率提升至99.99%。远程诊断与闭环管理。远程监控平台支持单值班员管理200公里路段设施,工单系统实现“登记-处理-评价-知识更新”全流程闭环,人力成本降低50%。

4.4 标准化流程与跨系统协同技术。全生命周期运维体系。制定《标准化维护宝典》,涵盖设备清洁、链路追踪、测试管控等全流程,通过数字孪生优化15-20%维护成本。跨层级资源整合。“1+N”大运维模式构建省级统一平台,整合收费、监控、通信等子系统,故障定位时间缩短60%,资源利用率提升30%。

4.5 模块化扩展与安全保障技术。即插即用接口设计。支持5G、V2X、量子加密等新技术快速接入,降低30%系统升级改造成本,满足车路协同设备灵活部署需求。自适应调优算法。隧道照明采用动态调光技术,结合“传统路灯+低位照明灯”组合方案,提升光照均匀性并降低能耗。

5 高速公路机电系统行业标准建立与完善

5.1 标准体系框架系统性构建。全链条覆盖标准规范。发布《机电工程施工标准化指南》和《建设技术规范》,明确硬件配置、软件系统开发、施工验收等全流程要求,形成“设计-施工-运维”一体化标准体系。通过《机电工程质量鉴定办法》细化原材料抽检、隐蔽工程检测等质量控制节点,填补国内空白。关键技术领域专项标准。聚焦充电设施、隧道安全、智慧高速等场景制定细分标准。发布充电设施建设管理标准,明确光伏储能一体化、应急信息发布等具体要求;通过限速优化标准提升安全管控能力。

5.2 关键领域标准细化与升级。充电设施标准创新。高速公路充电设施地方标准,涵盖防雷接地、数据安全、充电导引等12项技术细则,推动“光储充换一体化”低碳服务区建设。隧道安全与智慧管控标准。新版《公路隧道本地控制器》行业标准修订完成,明确设备功能、抗电磁干扰要求,支撑隧道通风/照明设备毫秒级联动控制。通过智慧机群协同施工编队标准,实现路面

施工智能化转型。

5.3 质量管控标准完善与实践。全过程质量监督体系。创新构建机电工程质量鉴定体系，新增服务区充电桩、软件系统检测项目，缺陷修复响应周期缩短30%。通过《智慧机群协同施工标准》，将路面施工精度提升至毫米级。标准化与弹性化平衡。新版《公路机电工程质量检验评定标准》引入动态参数调整机制，适应5G、V2X等新技术应用场景，支持检测方法迭代升级。黑龙江技术规范明确设备接口协议兼容性要求。

5.4 新技术融合与标准协同。低碳技术标准化。零碳服务区、黄河流域绿色公路等案例纳入标准体系，明确碳排放监测、固废资源化利用指标。“超充走廊”建设标准推动液冷超充设备规模化部署。智慧技术标准突破。智慧高速标准实现车路协同设备跨省互联，人工智能流水线技术规程推动预制构件生产数字化。寒区车路协同标准支撑极端环境设备可靠性验证。

5.5 跨区域协同与推广机制。省级标准互认与升级。充电标准、山东工单闭环体系等被纳入《交通运输标准化典型案例》，形成“地方试点-行业推广-国家规范”递进路径。“1+N”运维模式通过跨区域资源调度提升标准执行效率。国际标准对接探索。钢管混凝土桥梁技术国际标准输出经验被借鉴，机电系统标准制定中融入ISO/IEC网络安全框架，提升跨境设备兼容性。

6 高速公路机电系统集成与运维未来发展趋势

6.1 全场景深度融合与智能化升级。多系统集成与数字底座构建。基于“GIS+BIM+IoT”三维数据底座，整合收费、监控、通信、供配电等子系统，实现设备状态实时感知与全生命周期管理，支撑省级平台对200+设备参数的集中管控。通过三阶段建设（数据化-流程化-数字化）完成全省机电系统监测运维平台转型，运行效率提升30%。AI驱动运维模式创新。应用知识图谱和预测性

维护模型（准确率超92%），实现故障预警、远程诊断及维修方案自动生成，机电系统故障响应时间缩短至3分钟内。“1+N”大运维模式通过智慧大脑平台重构业务流程，人力成本降低50%。

6.2 “交通+能源”双网协同演进。清洁能源融合应用。政策推动交通基础设施与能源网络深度融合，2027年目标实现交通行业电能占比10%、沿线非化石能源发电装机容量500万千瓦，光伏充电站、储能设备成为机电系统标配。隧道照明系统引入动态调光算法，结合分布式能源提升能效。绿色低碳技术渗透。采用新型节能材料、智慧照明优化算法及设备能耗动态监测，推动机电系统碳排放降低15%-20%。高速通过运维数据分析优化设备维护周期，综合成本下降20%。

6.3 标准化与模块化架构普及。全链条标准体系落地。《智慧高速公路机电系统建设指南》等政策加速制定，覆盖设计、施工、运维全流程，预计2026年形成统一技术规范与接口标准。“远程+现场”运维模式通过标准化工单系统实现跨区域协同。模块化适配新技术。支持5G、V2X、量子加密等模块即插即用，降低30%系统升级成本。车路协同设备与智能巡检机器人规模化部署，提升复杂场景运维效率。

总之，高速公路工程应进一步推动机电设备智慧化水平，增强机电设备运行管理的信息化、智慧化效果，优化系统构建方案并降低运维管理工作成本，提高高速公路机电设备运行可靠性。

参考文献

- [1]唐凯健，高速公路收费业务智慧运维管理解决方案.2022.
- [2]侯银红，高速公路机电系统集成与智能化运维技术探讨.2023.