

智慧高速背景下机电系统升级改造关键技术研究

范祖恒

浙江中控信息产业股份有限公司 浙江 杭州 310053

摘要: 智慧高速背景下,机电系统升级改造至关重要。本文围绕“感知、通信、管控、服务”分析功能需求,聚焦稳定性等性能需求,兼顾安全需求。设计“云-边-端”总体架构,采用“存量优化、增量赋能”等技术路线。深入研究了智能感知、高速通信等关键技术,旨在解决传统系统痛点,提升路网通行效率与安全水平,降低运营成本,为智慧交通建设提供机电支撑。

关键词: 智慧高速;机电系统;升级改造;关键技术

引言: 在智慧交通蓬勃发展的当下,高速公路作为交通网络的关键部分,其智能化升级迫在眉睫。机电系统作为高速公路运营管理的核心支撑,传统模式已难以满足智慧高速需求。升级改造机电系统,实现全面感知、高效通信、智能管控与优质服务,成为提升高速公路运营效率、保障安全、降低成本的必由之路,对推动智慧交通建设意义重大。

1 智慧高速机电系统需求分析

1.1 功能需求

智慧高速机电系统的功能需求围绕“感知、通信、管控、服务”四大核心展开,全面支撑高速公路智能化运营与管理。需实现全域交通状态精准感知,涵盖车流量、车速、路况、气象等多维度数据的实时采集,以及隧道、桥梁等关键路段的专项监测,满足交通调度的基础数据需求。具备高效的通信传输功能,实现路侧设备与监控中心、车路之间的数据高速交互,支撑ETC无感通行、可变情报板动态引导等核心应用。需构建智能管控体系,实现交通事件自动识别、应急处置快速联动,以及收费、监控、养护等子系统的协同运作,提升路网运营效率。同时,满足公众出行服务需求,提供实时路况查询、路径规划、应急求助等便捷服务,兼顾运维管理需求,实现设备状态在线监测、故障预警与精准运维,全方位覆盖智慧高速运营的全流程场景,打破传统机电系统功能单一、协同不足的局限。

1.2 性能需求

智慧高速机电系统的性能需求聚焦稳定性、实时性、兼容性与可扩展性,保障系统长期高效运行。实时性方面,数据采集周期不超过1秒,交通事件识别响应时间 ≤ 3 秒,指令下发延迟控制在50ms以内,确保突发情况能够快速处置、信息实时同步^[1]。稳定性要求系统全年可用性 $\geq 99.99\%$,具备抗恶劣天气、电磁干扰、设备故

障等能力,关键设备采用双机热备模式,避免单点故障导致系统瘫痪。兼容性需支持与现有高速公路机电设备、省级交通管控平台的无缝对接,兼容不同厂商设备协议与数据格式,降低升级改造成本。可扩展性要求系统架构具备灵活扩展能力,能够适配5G、AI等新技术迭代,支持新增感知设备、业务功能的快速接入,满足未来智慧高速车路协同、自动驾驶等场景的拓展需求,同时确保系统运行效率不随业务量增长而下降。

1.3 安全需求

智慧高速机电系统的安全需求贯穿数据采集、传输、存储、应用全流程,兼顾设备安全、数据安全与网络安全。设备安全方面,需防范路侧感知设备、通信设备被非法入侵、篡改或破坏,具备防物理损坏、防恶意操控能力,关键设备采用加密认证机制。数据安全要求对车流量、车辆信息、收费数据等敏感信息进行端到端加密,采用AES-256或SM4算法保障数据安全,实现数据脱敏、备份与恢复,防止数据泄露、丢失或篡改,符合《网络安全法》《个人信息保护法》相关要求。网络安全需构建多层次防护体系,划分网络区域、设置访问权限,防范网络攻击、病毒入侵等风险,采用零信任架构强化访问控制,定期开展安全审计与漏洞检测。

2 机电系统升级改造总体架构设计

2.1 设计原则与目标

机电系统升级改造总体架构设计遵循“安全优先、存量适配、智能高效、绿色低碳、可扩展”的核心原则。安全优先即始终将系统安全与运营安全放在首位,构建全流程安全防护体系;存量适配兼顾现有设备资源,避免重复建设,降低升级改造成本,实现新旧系统平稳过渡;智能高效聚焦技术赋能,提升系统自动化、智能化水平,减少人工干预;绿色低碳融入节能技术,降低设备能耗,实现绿色运营;可扩展预留技术接口,适配未

来新技术、新场景的拓展需求。设计目标是构建“感知全面化、通信高速化、管控智能化、服务精细化”的智慧高速机电体系,解决传统机电系统感知不全面、协同性差、智能化水平低等痛点,实现交通事件自动识别、精准调度、高效运维,提升路网通行效率与安全水平,降低运营成本,为智慧交通建设提供坚实的机电支撑,助力实现“零大规模瘫痪、事故率趋近于零”的运营目标。

2.2 总体架构设计

智慧高速机电系统升级改造总体架构采用“云-边-端”三层架构,自上而下分为云端管控层、边缘计算层与终端感知层,各层协同联动、数据互通。云端管控层作为系统核心,部署云计算平台、大数据分析平台与智能管控平台,负责全域数据汇总、分析、决策与调度,实现对全路网机电设备、交通状态的统一管控,支撑跨区域协同调度与长期数据研判^[2]。边缘计算层部署在路段现场,负责本地数据实时处理、事件快速响应与设备本地管控,降低云端算力压力,实现“离线兜底”,确保突发情况下系统正常运行,提升响应速度。终端感知层由各类路侧设备组成,包括高清摄像头、毫米波雷达、气象检测器、ETC门架等,实现交通流量、路况、气象、设备状态等多维度数据的全面采集,是系统数据的核心来源。此外,架构包含通信传输层与安全防护层,通信传输层保障各层数据高速、可靠传输,安全防护层覆盖全架构,确保系统与数据安全,形成“感知-传输-分析-决策-管控”的全闭环体系。

2.3 升级改造技术路线

机电系统升级改造采用“存量优化、增量赋能、分步实施、整体协同”的技术路线,确保升级过程平稳有序、高效落地。第一步,开展现有机电设备排查与评估,对老化、低效、不兼容的设备进行升级或替换,保留可利用设备并完成协议适配,优化现有收费、监控、通信子系统,解决传统系统痛点,实现存量资源最大化利用。第二步,搭建“云-边-端”协同架构,部署边缘计算节点与云端管控平台,完成各层设备与系统的对接调试,实现数据互联互通,构建基础智能化体系。第三步,引入AI、大数据、5G等新技术,部署智能感知设备、高速通信网络与智能分析算法,实现交通事件自动识别、智能调度、精准运维等高级功能,赋能系统智能化升级。第四步,完善安全防护体系与运维机制,开展系统安全测试与优化,建立标准化运维流程,加强人员培训,确保系统长期稳定运行。

3 机电系统升级改造关键技术研究

3.1 智能感知与数据采集技术

智能感知与数据采集技术是智慧高速机电系统升级的基础,核心是构建“空地一体化、全时段、无盲区”的感知网络。采用多设备协同感知模式,整合8K高清摄像头、毫米波雷达、激光雷达等设备,实现车流量、车速、车辆特征、路况等数据的精准采集,其中高清摄像头识别准确率 $\geq 98\%$,毫米波雷达在极端天气下实现车辆存在性精准检测。引入物联网(IoT)技术,实现各类感知设备的联网接入与统一管理,部署分布式传感网络,覆盖隧道、桥梁等关键路段,采集CO浓度、路面沉降、设备运行参数等专项数据^[3]。应用北斗厘米/毫米级定位技术,增设地基增强基站,实现车辆位置、轨迹的高精度定位,定位误差 ≤ 1 厘米,隧道等盲区增设室内定位基站,确保定位不中断。同时采用数据预处理技术,对采集的多源异构数据进行清洗、去重、标准化处理,提升数据质量,为后续分析决策提供可靠支撑,实现“感知无盲区、数据无差错”的目标。

3.2 高速通信与网络技术

高速通信与网络技术保障系统各层协同运作的核心支撑,重点解决数据传输的低延迟、高可靠、大容量需求。构建“5G-A+光纤专网+卫星通信”的天地一体化通信体系,实现全路网通信全覆盖,5G-A网络下行速率 $\geq 10\text{Gbps}$,时延 $\leq 1\text{ms}$,满足车路协同、实时管控等高频交互场景需求。升级现有光纤传输网络,采用10G/40G波分复用技术,遵循ITU-T G.652/G.657标准,提升主干网络带宽至1000Mbps以上,实现管控数据、执法数据与民用数据的物理隔离,保障数据传输安全。部署光纤自愈环网,实现单点故障时自动切换路径,确保通信连续性,关键节点采用双机热备模式,提升网络可靠性。在山区、隧道等光纤难以覆盖区域,采用E-band/V-band毫米波传输与卫星通信兜底,配备便携式卫星通信终端,确保自然灾害等极端情况下通信不中断,同时优化网络协议,采用QoS优先级划分,保障视频监控、紧急呼叫等高实时性业务优先传输。

3.3 云计算与大数据分析技术

云计算与大数据分析技术为智慧高速机电系统提供高效算力支撑与数据研判能力,实现数据价值最大化。构建国家中枢-省级节点-路段边缘的三级算力架构,云端部署超级算力集群与大数据平台,负责全域数据汇总、存储与深度分析,边缘节点负责本地数据实时处理,降低云端算力压力,实现“本地响应、云端统筹”。采用分布式存储技术,构建大容量、高可靠的数据存储体系,支持结构化与非结构化数据的高效存储,实现数据备份与快速恢复,满足长期数据留存与查询需求。引入大数据分析

算法,对交通流量、设备状态、气象数据等进行多维度分析,实现交通拥堵预测、设备故障预判、养护计划优化等功能,其中交通流量预测误差不超过5%,可提前30分钟预警拥堵状况。同时,构建运维经验知识图谱,整合海量运维案例,为故障诊断与运维决策提供科学依据,推动运维管理从“经验驱动”向“数据驱动”转型。

3.4 人工智能与决策控制技术

人工智能与决策控制技术是提升系统智能化水平的核心,实现交通事件自动识别、智能调度与精准管控。应用深度学习算法,对视频监控数据进行实时分析,自动识别车辆违停、行人闯入、交通事故等异常事件,响应时间 ≤ 3 秒,识别准确率 $\geq 98\%$,实现事件快速预警与处置。在收费管理方面,采用卷积神经网络模型实现车型自动分类,识别错误率降低至0.2%,结合ETC技术实现无感通行,提升收费效率。构建智能决策控制模型,基于实时交通数据与分析结果,自动调整可变情报板信息、动态限速标志等,实现交通流智能诱导,提升路网通行能力;针对设备运维,采用机器学习算法预判设备故障,提前72小时预警隐患,延长设备平均无故障时间。引入数字孪生技术,构建高速公路机电系统虚拟映射,支持运维人员在仿真环境中测试优化方案,提升决策科学性与管控精度。

3.5 能源管理与绿色技术

能源管理与绿色技术聚焦节能降耗、绿色运营,降低机电系统运营成本,实现生态环保目标。采用智能节能控制技术,对隧道照明、通风设备进行精细化管控,结合车流量、光照强度、CO浓度等数据,自动调节照明亮度与风机转速,可降低35%以上的能耗。推广应用节能设备与新材料,替换传统高能耗照明灯具、空调设备,采用LED节能灯具、太阳能供电系统等,提升能源利用效率,在服务区、应急停车带等区域部署太阳能供电设备,实现清洁能源互补。构建能源监测与管理平台,实时采集各设备能耗数据,分析能耗异常情况,优化能源分配方案,建立节能评估体系,定期统计能耗数据,量化节能成效。同时,减少应急维修车辆出行,优化运维路线,降低燃

油消耗与尾气排放。

3.6 安全与可靠性技术

安全与可靠性技术是保障机电系统长期稳定运行的关键,构建“设备安全、网络安全、数据安全、运维安全”的全方位防护体系。设备安全方面,采用加密认证技术,防范设备被非法入侵与篡改,关键设备具备IP65防护等级,配备防雷接地装置,接地电阻 $\leq 4\Omega$,抵御恶劣环境影响。网络安全方面,采用防火墙、入侵检测系统等设备,构建多层次网络防护,划分网络区域,设置最小权限访问控制,定期开展渗透测试与安全审计,防范网络攻击与病毒入侵^[4]。数据安全方面,采用端到端加密技术,对敏感数据进行脱敏处理,建立数据备份与恢复机制,利用区块链技术确保设备全生命周期数据不可篡改,满足合规要求。运维安全方面,建立标准化运维流程,实现设备全生命周期管控,部署智能故障诊断系统,快速定位故障并推送修复建议,配备在线式UPS与柴油发电机组,确保设备7×24小时不间断运行,提升系统可靠性,降低故障停机风险。

结束语

智慧高速机电系统升级改造关键技术研究意义深远。通过明确需求、设计架构、规划路线,深入探索多项关键技术,有效解决了传统机电系统诸多问题。不仅提升了路网通行效率与安全水平,还降低了运营成本,实现了绿色可持续发展。未来,随着技术持续进步,机电系统将不断完善,为智慧交通发展注入更强动力,创造更大价值。

参考文献

- [1]王增生.智慧交通背景下高速公路机电系统的创新升级路径探索[J].汽车导报,2024(3):190-192.
- [2]张宛翔,罗昊程,李冰,等.基于大数据的高速公路智慧管控系统应用研究[J].交通节能与环保,2025,21(4):80-83.
- [3]刘进,崔培强,田孝武,等.高速公路新型供配电系统一体化解决方案[J].交通节能与环保,2024,20(5):17-21.
- [4]李瑾.智慧高速背景下路网运行状态实时监测与数字化管理平台构建[J].数字技术与应用,2025,43(12):86-88.