

Research on the Path of Intelligent Upgrading of Highway Mechanical and Electrical Systems Empowered by Mechatronics Technology

Wei Suo

Xinjiang Jiaoke Information Development Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

Abstract

Under the background of the convergence of the strategy of building a strong transportation nation and the digital China strategy, the intelligent upgrade of highway electromechanical systems has become a core issue in industry development. Mechatronics technology, through the deep integration of the closed loop of “perception-decision-execution,” provides a key technical path to solve the dilemma of traditional system silos and improve the overall efficiency of the road network. This paper first elucidates the irreplaceable core value of this technology in achieving system integration, collaboration, and autonomous intelligence. It then analyzes the two major practical bottlenecks of insufficient integration and non-uniform standards in current electromechanical systems. Finally, it systematically proposes a specific intelligent upgrade path driven by mechatronics technology from four dimensions: reconstructing system architecture, deepening perception integration, forging decision-making centers, and weaving dense collaborative networks.

Keywords

mechatronics; highway electromechanical system; system integration

机械电子技术赋能公路机电系统智能化升级路径研究

索伟

新疆交科信息开发有限责任公司，中国·新疆乌鲁木齐 830000

摘要

在交通强国与数字中国战略交汇的时代背景下，公路机电系统的智能化升级已成为行业发展的核心议题。机械电子技术通过“感知-决策-执行”的闭环深度融合，为破解传统系统孤岛困境、提升路网整体效能提供了关键技术路径。本文将首先阐释该技术在实现系统一体化协同与自主智能方面不可替代的核心价值，继而剖析当前机电系统存在的集成度不足与标准不统一两大现实瓶颈，最后从重构系统架构、深化感知融合、锻造决策中枢、织密协同网络四个维度，系统性地提出了以机械电子技术为驱动的具体智能化升级路径。

关键词

机械电子技术；公路机电系统；系统集成

1 引言

当前，我国正深入实施交通强国战略，并大力推进“新基建”与基础设施数字化升级，为公路交通的智能化转型指明了方向。《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》等政策文件明确提出，要推动先进信息技术与交通基础设施深度融合，提升基础设施全要素、全周期数字化水平。在此背景下，公路机电系统作为保障路网运行的神经中枢，其智能化水平是政策落地关键。传统机电系统因固有技术架构与建设模式，面临集成困难、数据割裂、响应迟滞等挑战，难

以满足未来智慧路网要求。探索以机械电子技术为核心的智能化升级路径，是响应国家战略部署的必然选择，也是破解行业瓶颈、实现路网能效跃升的迫切需求。

2 机械电子技术赋能公路机电系统智能化升级的重要性

机械电子技术的深度融合，为公路机电系统的演进注入了新的生命动能，使其从传统的功能执行单元跃升为具备自主智能的有机体系。通过集成传感、控制与执行功能，机械电子装置将离散的物理设备转化为具有环境感知、自主决策与精准执行能力的智慧单元。多模态传感器的融合应用，使系统能够实时捕捉路面状态、交通流与气象变化，形成对交通环境的全方位感知；嵌入式智能与边缘计算技术的

【作者简介】索伟（1990—），男，回族，中国新疆乌鲁木齐人，本科，中级职称，从事机械电子/电力研究。

引入，赋予机电设备在复杂场景下的自主分析与即时响应能力，显著提升系统应对突发事件的敏捷性与准确性；而高精度伺服驱动、智能执行机构的应用，则实现了照明控制、信息发布、应急处置等环节的精细化、自适应调节。这种“感知-决策-执行”一体化的技术路径，不仅优化了单点设备性能，更推动了路网级协同控制与资源优化配置，从而在提升通行效率、保障行车安全、降低运营能耗等方面发挥关键作用，为构建安全、高效、绿色的智慧公路系统奠定坚实的技术基础。

3 当前公路机电系统存在的主要问题

3.1 系统集成度不足制约功能发挥

当前公路机电系统的各类设备与子系统往往呈现各自为政的状态，系统之间缺乏有效的深度整合。监控、收费、照明、通风、供配电等子系统多独立建设、独立运行，形成多个信息与控制孤岛。例如，隧道照明控制系统与交通流量监测系统之间缺乏联动，无法实现依据实时车流量对灯具功率与开启数量进行精准调节；收费站的车辆通行数据与主线交通监控系统之间未能打通，难以基于收费数据预测和疏导主线车流。这种割裂状态使得系统整体效能停留在简单叠加层面，而非实现“1+1>2”的协同效应。设备之间的信息壁垒导致管理效率低下，在面对突发事件时难以快速形成统一、高效的跨系统联动响应机制，资源无法得到最优配置，限制了机电系统作为公路“神经网络”本应发挥的全局性支撑与保障作用。

3.2 标准体系与数据融合障碍

公路机电系统在长期发展过程中，由于缺乏全国统一、前后贯通的强制性技术标准与数据规范，不同时期、不同供应商建设的子系统在接口协议、数据格式、通信规约等方面存在显著差异。这种异构性导致系统间的互联互通存在实质性障碍。实践中，常见的控制总线协议与网络通信协议并存，不同数据采集设备的采样频率、精度、编码方式各异，使得从底层传感器采集的原始数据到上层管理平台进行分析处理时，面临数据“听不懂、用不上”的困境。例如，环境监测设备采集的能见度数据格式可能与交通事件检测系统的输入要求不符，需要额外的、复杂的转换与适配，这不仅增加了系统集成的复杂性与成本，也引入了延时和误差风险。标准体系的碎片化与数据的异构性，严重阻碍了机电系统数据的汇聚融合与综合开发利用，使得系统难以形成统一的态势感知与决策支持能力。

4 机械电子技术赋能公路机电系统智能化升级的实践路径

4.1 重构机电融合架构

推动公路机电系统向“感知-决策-执行”一体化的融合架构演进，是迈向智能化的基石。这意味着要从传统的功能模块简单堆叠，转向构建以统一数据与智能模型驱动的体

系。在设备端，应大力推动集成化的“智能机电单元”的发展，通过将环境感知技术、本地计算能力与精准执行机制等核心功能进行深度融合，实现高效协同与智能控制，从而提升整体系统的响应速度与操作精度。

例如，新一代的照明灯杆可集成气象传感器、高清摄像机和通信模块，使其能够自主感知天气与交通状况，并执行最优的照明策略（如图1）。在路段或区域层面，需部署具备数据汇聚与处理能力的边缘计算节点，对来自多个终端的数据进行快速融合与实时分析，支撑本地化的闭环控制，如隧道的自适应通风与照明联动。在云端，构建覆盖全网的数字孪生平台，对物理系统进行高精度虚拟映射，通过仿真推演和模型优化，制定全局性的调度与运维策略，并下发至边缘与终端。这种端边云协同的架构，本质上是将机械的精确物理控制、电子的敏捷信息处理与智能的深度数据分析融为一体，能够有效打破信息孤岛，实现从“单体智能”到“系统智能”的跃迁，为更高层次的自主协同与全局优化奠定坚实、灵活且可扩展的架构基础。



图1 智能照明灯杆图

4.2 深化多模态感知融合

实现公路环境的精准感知，依赖机械电子技术对多源异构传感信息的深度融合与智能解析。单一的传感器难以应对全天候、全路况的复杂环境，必须发展多模态感知的“机电一体化”前端。这需要从硬件层面推动传感模块的微型化、低功耗与高可靠集成，例如，将毫米波雷达的测速测距能力、热成像摄像机的温度感知能力与高清可见光摄像机的纹理识别能力，封装于统一的防护壳体内，形成“一体化智能感知终端”，从而可靠捕捉车辆轨迹、车型分类、路面异常、能见度变化等多维信息（如图2）。

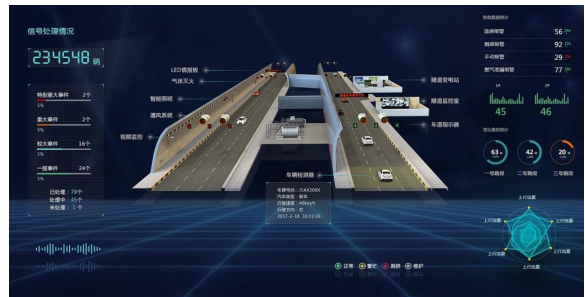


图2 公路隧道一体化智能感知终端图

在信息处理层面,需充分发挥嵌入式 AI 芯片的强大算力,在数据采集的最前端对不同物理特性的各类感知信号进行精准的时序同步与空间配准,继而完成高效的特征提取与多目标关联,实现真正意义上的“前融合”。通过这一流程,系统能够生成对交通参与者、路面实时状态以及周边环境事件的全方位、统一的结构化描述,为后续的智能分析与决策提供高质量的数据基础。这种深度融合不仅提升了感知的精度与鲁棒性,例如在夜间或雨雾条件下仍能有效工作,更重要的是,它为后续的决策与控制提供了语义更加清晰、维度更加丰富的“环境一张图”,使得系统能够“看得全、辨得清、认得准”,为智能决策提供高质量的输入。

4.3 构建分层决策体系

智能化升级的核心是从程序化的被动控制,转变为基于实时情境的自主决策与主动干预。这要求将智能“大脑”嵌入到机电系统的关键节点中。通过将经过优化的控制算法与决策模型,以嵌入式软件的形式植入边缘控制器、区域服务器乃至关键机电设备(如可变信息标志控制器、隧道通风主控器),使其具备在一定规则和权限下的自主分析与判断能力。

例如,隧道入口部署的环境感知终端一旦实时检测到能见度数值低于预设的安全阈值,与其高度协同的边缘控制器无需依赖远程云端的指令回传,即可根据本地预置的“事件-预案”联动知识库进行自主判断与决策,并迅速执行多项操作:自动调节照明系统以提高隧道内光照强度、实时驱动情报板发布醒目的警示信息,同时及时启动风机系统加强空气流通效率。这一基于“边缘智能”的分布式决策机制,显著压缩了从环境感知到智能判断再到设备执行的整个闭环过程的响应时间,将传统响应延迟从分钟级缩短至毫秒级或秒级水平,从而极大提升了在低能见度等突发状况下交通事件的处置效率与行车安全水平。同时,这些分布式的决策节点并非孤岛,它们接受云端数字孪生系统下发的优化策略与模型更新,并将本地执行效果数据反馈至云端,形成“在线学习、持续进化”的闭环,使系统的决策能力随着数据积累和算法迭代而不断增强,逐步从“执行预案”向“生成最优策略”演进。

4.4 构建协同控制网络

真正的系统级智能化,其实现离不开对监控、收费、通信、照明、供电等多个机电子系统之间数据与指令的无缝流转和高效协同的高度依赖。这些子系统必须能够实时交

互、共享信息,并基于统一逻辑进行联动响应,才能支撑起复杂场景下的智能决策与自动化运行。

首先,需推动制定基于开放标准的统一设备接口与数据通信协议,使遵循新标准生产的各类传感器、控制器和执行机构能够实现“即插即用”与互联互通。其次,构建面向公路业务的统一数据模型与语义标准,对“车辆拥堵”“交通事故”“设备故障”等业务概念进行明确定义,使得监控系统识别的事件能够被收费、通信等系统无歧义地理解与处理。在此基础上,建立基于事件驱动的协同控制平台,该平台作为“交通大脑”的协同中枢,接收来自全路网各类智能机电单元上报的事件与状态信息,通过预置的协同策略库或实时运算,生成跨子系统的联动控制指令。例如,当协同平台收到“主线严重拥堵”事件时,可自动触发指令,联动上游收费站实施入口管控、发布诱导信息,并调整沿线可变限速标志,形成一体化的诱导与管控方案。通过构建这一“标准-数据-平台”三位一体的协同网络,分散的机电设备得以整合为有机整体,实现从“单点响应”到“全局联动”的质变。

5 结语

机械电子技术与公路机电系统的深度融合,标志着公路基础设施从被动响应向主动服务的深刻变革。通过架构重构、感知融合、决策赋能与协同网络构建的系统性路径,将有效克服当前系统存在的集成与协同障碍。这一过程不仅是技术的革新,更是公路运营管理模式与服务体系的重塑,其目标在于构建一个更安全、高效、绿色、智能的道路交通环境。未来,随着技术迭代与生态完善,以机械电子技术为基石的智能化升级将持续释放潜能,为人民群众的美好出行和交通运输的高质量发展提供持久而可靠的动力。

参考文献

- [1] 孙俊峰.公路交通机电通信技术的应用与研究[J].新潮电子, 2024(2):106-108.
- [2] 郭世君.现代通信技术的特征及其在高速公路机电系统中的应用[J].新潮电子, 2025(15):181-183.
- [3] 罗祥红.高速公路机电工程中的通信系统应用[J].电子技术, 2024(2):170-171.
- [4] 贾涛英.基于人工智能的公路机电设施智能监测与维护系统分析[J].电子技术, 2025(6):162-163.
- [5] 王先辉.高速公路机电运维信息化管理措施[J].电子乐园, 2023(1):0127-0129.