

智慧高速背景下机电系统运维发展趋势分析

朱成成 王彩华

河南交通投资集团有限公司洛阳分公司 河南 洛阳 471000

摘要：随着新一代信息技术的迅猛发展与交通强国战略的深入推进，高速公路正加速向“智慧高速”转型。作为智慧高速建设的核心支撑，机电系统（包括收费、通信、监控、供配电、照明、隧道通风与消防等子系统）在保障路网安全、提升通行效率、优化出行体验等方面发挥着不可替代的作用。然而，传统机电系统运维模式已难以满足智慧高速对高可靠性、高智能化、高协同性及全生命周期管理的需求。本文立足于智慧高速的发展背景，系统梳理当前机电系统运维面临的挑战，深入剖析其技术演进逻辑，并从智能化诊断、平台化集成、预测性维护、标准化体系、绿色低碳化及人才结构转型等多个维度，全面探讨机电系统运维的未来发展趋势。研究表明，构建以数据驱动、AI赋能、平台支撑、标准引领、绿色高效为核心的新型运维体系，是实现智慧高速高质量发展的关键路径。

关键词：智慧高速；机电系统；运维管理；预测性维护；数字孪生；人工智能

引言

高速公路关乎国民经济运行效能与民众出行体验。近年来，5G、物联网等新一代信息技术深度融合应用，“智慧高速”应运而生，其通过全面感知、智能决策等，力求实现路网运行安全、管理高效、服务优质、能源节约。机电系统是智慧高速的“神经末梢”与“执行器官”，ETC门架精准计费、视频事件实时预警、隧道环境联动调控等，都依赖庞大复杂的机电设施网络。一条百公里级高速公路，机电设备数量可达数万台套，涵盖数十种类型，设备稳定高效运行是智慧高速功能落地的前提。但传统机电系统运维长期处于“被动响应、经验主导、信息孤岛、人力密集”状态，存在故障发现滞后、维修效率低、资源调配粗放、知识传承难等痛点。在智慧高速对系统提出更高要求的当下，传统运维模式已明显不适应。所以，深刻理解并前瞻把握机电系统运维发展趋势，对推动智慧高速建设行稳致远意义重大。

1 智慧高速对机电系统运维的新要求

1.1 高可靠性与业务连续性要求

智慧高速的核心应用场景，如自由流收费、车路协同（V2X）、自动驾驶专用车道等，对底层机电系统的稳定性提出了近乎苛刻的要求。任何关键设备（如RSU路侧单元、高清摄像机、激光雷达）的宕机或性能下降，都可能导致业务中断，甚至引发安全事故。因此，运维必须从“事后修复”转向“事前预防”，确保系统具备极高的可用性和业务连续性。

1.2 全域感知与实时响应能力

智慧高速强调对路网状态的“全息感知”。这意味着运维系统不仅要监控设备自身的运行状态（如电压、

电流、温度），更要能关联分析其产生的业务数据（如车流量、车牌识别率、事件报警准确率）。当感知到异常时，运维体系需具备秒级乃至毫秒级的自动诊断与预警能力，并能快速联动调度维修资源。

1.3 数据驱动与智能决策支持

海量的设备运行数据、环境数据和业务数据是智慧高速的宝贵资产。运维不再是孤立的技术活动，而是需要深度融入整个路网的运营决策闭环^[1]。运维数据应能反哺路网调度、养护规划、投资决策等上层应用，为管理者提供基于数据的科学洞察。

1.4 全生命周期一体化管理

智慧高速追求的是从规划设计、建设施工、运营维护到最终报废的全生命周期价值最大化。运维阶段的数据和经验反馈，对于前端的设计选型和建设质量至关重要。因此，亟需建立一个贯穿项目全生命周期的统一数据平台，打破各阶段的信息壁垒。

2 当前机电系统运维面临的主要挑战

2.1 “信息孤岛”现象严重

不同厂商、不同年代建设的机电子系统往往采用各自独立的监控平台和通信协议，数据格式不统一，接口标准不开放。这导致运维人员需要在多个系统间来回切换，无法形成对全路网设备状态的全局视图，极大地制约了协同效率。

2.2 运维模式被动且低效

目前主流的运维模式仍是“故障报修-人工巡检-现场处置”的被动响应式。这种模式不仅响应周期长，而且过度依赖一线人员的经验和技术水平，存在较大的不确定性。同时，定期巡检成本高昂，且难以发现潜在的、

非显性的故障隐患。

2.3 缺乏有效的预测与健康管理 (PHM) 能力

设备从健康状态到完全失效通常经历一个渐进的过程。传统运维缺乏对设备退化趋势的有效监测和建模能力,无法在故障发生前进行精准预警和干预,导致“小病拖大,大病难医”,增加了维修成本和停机风险。

2.4 运维知识难以沉淀与传承

高水平的运维专家是行业的宝贵财富,但其经验多以个人记忆或非结构化文档的形式存在,难以系统化地沉淀、共享和复用。一旦人员流动,极易造成知识断层,影响整体运维水平。

3 智慧高速背景下机电系统运维的发展趋势

面对上述挑战与新要求,机电系统运维正在经历一场由内而外的深刻变革,呈现出以下六大核心发展趋势。

3.1 运维智能化:从“人防”到“技防+智防”

首先,智能故障诊断能力显著增强。传统运维中,设备告警往往仅能定位到“某摄像机离线”,但无法区分是电源故障、网络中断还是镜头遮挡。而基于深度学习的智能诊断系统,可融合多源数据进行综合研判。例如,通过分析该摄像机的历史视频流质量、供电电压波动曲线、所在交换机端口状态及周边同类设备运行情况, AI模型可精准识别故障类型,并自动生成包含可能原因、排查步骤和所需工具的处置建议。其次,知识图谱成为运维知识沉淀与复用的关键载体。通过构建覆盖设备型号、部件构成、典型故障模式、历史维修记录、备件清单、专家经验等要素的机电设备知识图谱,系统能够实现语义级的理解与推理。当新故障发生时,系统不仅能匹配相似历史案例,还能基于因果关系链进行逻辑推演,推荐最优解决方案。这有效解决了“老师傅退休即失传”的行业痛点,使隐性知识显性化、碎片知识体系化。最后,数字孪生技术为运维提供沉浸式仿真环境。通过建立高保真的机电系统数字孪生体,运维人员可在虚拟空间中进行设备拆解、故障模拟、预案演练和维护培训。例如,在对特长隧道通风系统进行升级改造前,可在孪生环境中模拟不同风机组合策略下的气流分布与污染物扩散效果,从而优化控制逻辑,避免在真实环境中试错带来的安全风险与运营中断。数字孪生不仅是“可视化看板”,更是“决策沙盘”和“训练场”。

3.2 平台一体化:构建统一的智慧运维中枢

打破“信息孤岛”、实现全域协同,必须依赖一个统一、开放、可扩展的智慧运维管理平台。平台建设首要任务是实现异构系统的统一接入与高质量数据治理。通过制定并强制执行设备接入标准(如采用MQTT、

CoAP等轻量级物联网协议),并部署边缘计算网关进行协议转换与数据预处理,平台可将来自收费、监控、供配电、隧道等十余个子系统的海量、多模态数据(结构化遥测数据、非结构化日志、视频流元数据等)汇聚至统一的数据湖。在此基础上,运用数据清洗、关联、打标等治理手段,形成标准、一致、可信的运维数据资产^[2]。其次,平台需提供“一张图”全景可视化能力。依托GIS地理信息系统与BIM建筑信息模型的深度融合,将物理高速公路及其上所有机电设备在数字地图上进行毫米级精准映射。管理者可通过三维可视化界面,直观查看任意桩号处设备的实时运行状态(如ETC门架交易成功率、情报板在线率)、历史健康趋势、当前告警级别及关联工单。这种“所见即所得”的全局视图,极大提升了态势感知与指挥调度效率。更重要的是,平台应推动运维流程的自动化与智能化(AIOps)。将传统的纸质或Excel工单流程,转变为线上化、自动化的闭环管理。当AI引擎检测到潜在故障时,可自动创建电子工单,并根据故障等级、地理位置、技术人员技能标签与实时位置,智能派发给最合适的维修人员。同时,通过RPA(机器人流程自动化)技术,自动完成跨系统操作,如在ERP系统中申领备件、在OA系统中发起审批、在财务系统中生成结算单据,实现“数据多跑路,人员少跑腿”。

3.3 维护预测化:迈向预测性维护(PdM)

预测性维护(PdM)是运维模式从“被动救火”转向“主动防火”的关键跃迁,其核心在于利用数据洞察设备的“亚健康”状态。实施PdM的基础是全面的状态感知网络。在关键设备(如UPS电源、隧道射流风机、核心交换机)上加装低成本、低功耗的传感器,持续采集振动、温度、电流、电压、噪声等特征参数。这些数据通过边缘节点进行初步处理后上传至云端平台。平台的核心能力在于构建精准的健康评估与寿命预测模型。利用时间序列分析、异常检测算法(如LSTM自编码器、孤立森林)对历史数据进行深度挖掘,建立设备正常运行的“数字画像”。一旦实时数据偏离该画像,即触发预警^[3]。更进一步,通过生存分析、深度学习回归等方法,可估算设备的剩余使用寿命(RUL),为维护决策提供量化依据。最终,PdM的价值体现在驱动精准、经济的维护决策。平台可根据预测结果,自动生成差异化的维护策略:对于RUL较长的设备,延长巡检周期;对于即将失效的设备,则提前安排维护窗口,准备备件,并通知相关人员。

3.4 管理标准化:建立全生命周期运维规范

标准化是确保运维体系高效、稳定、可复制的根本

保障，必须贯穿于设备从“摇篮到坟墓”的全生命周期。在数据层面，亟需统一设备编码规则（如采用国家或行业标准的分类编码）、数据字典（明确定义每个数据项的含义、单位、精度）和接口协议（规定数据交互的格式与方式）。这是实现数据互联互通的前提。在流程层面，应梳理并固化涵盖“监测-预警-诊断-派单-处置-验收-复盘”全过程的标准作业程序（SOP）。每个环节都应有明确的责任主体、输入输出、时限要求和质量标准，并嵌入到智慧运维平台中，确保执行的一致性与可追溯性。在评价层面，需建立一套科学、多维的运维绩效指标（KPI）体系。除了传统的MTTR（平均修复时间）、MTBF（平均无故障时间）外，还应纳入设备完好率、预防性维护执行率、用户满意度、能耗强度等指标，全面衡量运维工作的质量与价值，驱动PDCA（计划-执行-检查-改进）循环。

3.5 运维绿色化：践行“双碳”战略

在国家“双碳”目标引领下，机电系统运维必须将绿色低碳理念融入日常管理。一方面，推进能耗的精细化与智能化管理。通过部署智能电表和能耗监测终端，对隧道照明、通风、收费站空调等高能耗设施进行分项计量。结合车流量、洞外光照度、气象数据等，利用AI算法动态优化设备运行策略。例如，实现“按需照明”（根据车流密度自动调节亮度）和“智能通风”（根据CO/VI浓度阈值启停风机），在保障安全的前提下，实现显著节能。另一方面，构建绿色供应链与循环经济体系^[4]。在设备选型阶段，优先采购高能效、长寿命、易回收的产品。建立废旧设备回收台账，对含有贵金属或有害物质的部件（如蓄电池、电路板）进行专业回收处理，探索备件再制造技术，最大限度减少资源浪费和环境污染。

3.6 人才复合化：打造新型运维工程师队伍

技术的革新最终要靠人来实现。未来的运维工程师角色正在发生深刻变化，亟需从单一技能型向“IT+OT+

DT”复合型人才转型。他们不仅需要掌握传统机电设备的安装、调试、维修等“OT”（运营技术）技能，还需具备数据分析、Python脚本编写、API调用、平台配置等“IT/DT”（信息技术/数据技术）能力。为此，行业应加强顶层设计：一是深化校企合作，推动高校开设“智能交通运维”等交叉学科专业；二是建立在职培训与认证体系，鼓励现有员工学习新技能；三是改革薪酬与晋升机制，向具备复合能力的“数字工匠”倾斜，激发人才转型的内生动力。

4 结语

本文分析表明，未来的机电系统运维将不再是孤立、被动的技术保障工作，而是深度融合了数据智能、平台协同、预测决策和绿色理念的综合性、战略性管理活动。构建一个以“一个平台（统一智慧运维平台）”为核心，“两大支柱（智能化诊断与预测性维护）”为驱动，“三大保障（标准化体系、绿色化理念、复合化人才）”为支撑的新型运维生态，是行业发展的必然方向。这一体系能够有效破解当前运维面临的痛点，全面提升智慧高速的韧性、效率与服务水平。展望未来，随着6G、量子计算、更先进的AI大模型等前沿技术的成熟，机电系统运维将变得更加自主、自愈和自优。我们有理由相信，在技术创新与管理变革的双重驱动下，智慧高速的“神经系统”将愈发强健，为建设交通强国和数字中国贡献坚实力量。

参考文献

- [1] 孟祥磊.高速公路机电系统智慧运维模式应用分析[J].北方交通,2025,(09):92-94.
- [2] 王欢.高速公路机电智慧运维解决方案探讨[J].中国交通信息化,2025,(05):32-34+38.
- [3] 王永帝.基于智慧运维的高速公路机电设备应用分析[J].交通世界,2024,(15):198-200.
- [4] 曾旺.基于智慧运维的高速公路机电设备管理研究[J].中国设备工程,2024,(09):26-28.