

# 面向智慧高速的机电工程运维管理优化策略研究

袁国宏

云南省交通科学研究院有限公司 云南 昆明 650000

**摘要:** 随着我国高速公路网络规模持续扩大和智能交通技术迅猛发展,“智慧高速”已成为交通基础设施高质量发展的核心方向。作为智慧高速系统运行的关键支撑,机电工程(包括监控、通信、收费、供配电、照明、隧道通风与消防等子系统)的稳定高效运行直接关系到道路安全、通行效率与用户体验。然而,当前机电工程运维管理仍普遍存在“重建设、轻运维”、信息化水平低、响应滞后、资源调配不合理等问题,难以满足智慧高速对高可靠性、高智能化和高协同性的要求。本文在分析智慧高速背景下机电工程运维面临的新挑战与新需求的基础上,系统梳理现有运维模式的痛点,提出融合数字孪生、物联网、大数据、人工智能等新一代信息技术的运维管理优化策略。重点从构建“云-边-端”一体化智能运维架构、推进全生命周期数据治理、实施预测性维护机制、建多源协同应急响应体系以及完善标准化与人才保障机制等方面展开论述,并结合实际案例验证策略的有效性。研究成果可为提升智慧高速机电系统运维效能、降低全生命周期成本、保障路网安全畅通提供理论支撑与实践路径。

**关键词:** 智慧高速; 机电工程; 运维管理; 数字孪生; 预测性维护; 智能运维

## 引言

近年来,国家大力推进新型基础设施建设,“交通强国”战略深入实施,智慧高速作为融合先进信息技术与传统交通基础设施的典型代表,正加速从概念走向大规模应用。智慧高速通过全面感知、泛在互联、智能决策与主动服务,实现对人、车、路、环境的动态协同管理,其核心在于构建一个“感知—传输—计算—控制—服务”闭环的智能系统。在这一系统中,机电工程是物理层与信息层之间的桥梁,承担着数据采集、指令执行、能源保障和安全保障等关键功能。然而,随着机电系统复杂度指数级增长(如ETC门架系统、高清视频监控、毫米波雷达、气象监测站、智能诱导屏等设备数量激增),传统的以人工巡检、故障报修、被动响应为主的运维模式已显疲态<sup>[1]</sup>。一方面,设备点多面广、类型繁杂,人工巡检效率低下且易遗漏隐患;另一方面,缺乏对设备运行状态的实时掌握与趋势预判,导致“小故障酿成大事故”,严重影响高速公路的安全运营与公众出行体验。在此背景下,如何借助新一代信息技术重构机电工程运维管理体系,实现从“被动维修”向“主动预防”、从“经验驱动”向“数据驱动”、从“分散管理”向“协同联动”的根本性转变,成为智慧高速建设亟需解决的关键课题。本文旨在系统探讨面向智慧高速的机电工程运维管理优化策略,为行业提供可复制、可推广的技术路径与管理范式。

## 1 智慧高速对机电工程运维的新要求

### 1.1 高可靠性与可用性

智慧高速强调“零中断”服务体验,要求机电系统具备99.9%以上的可用性。任何关键设备(如通信主干网、收费服务器、隧道风机)的宕机都可能导致局部路网瘫痪或重大安全事故,因此运维必须确保系统高可靠运行。

### 1.2 实时性与敏捷性

车路协同、自动驾驶等应用场景对数据传输与指令执行的延迟极为敏感(通常要求 $< 100\text{ms}$ )。运维系统需具备毫秒级故障感知与分钟级恢复能力,实现“秒级发现、分钟级处置”。

### 1.3 数据驱动与智能决策

智慧高速产生海量异构数据(视频流、传感器数据、交易日志等),运维需从这些数据中挖掘设备健康状态、性能瓶颈与潜在风险,支撑智能诊断与优化决策。

### 1.4 全生命周期管理

从规划设计、建设安装、运行维护到报废更新,机电设备全生命周期各阶段数据需贯通共享,实现资产价值最大化与运维成本最优化。

### 1.5 多系统协同联动

机电各子系统(监控、通信、收费、供配电等)不再是孤立存在,而是深度耦合。例如,隧道火灾不仅触发消防系统,还需联动通风、照明、情报板与交通管控系统。运维需打破系统壁垒,实现跨系统协同响应。

## 2 当前机电工程运维管理的主要问题

### 2.1 运维模式粗放,依赖人工经验

多数路段仍采用“定期巡检+故障报修”模式,巡检

周期长（通常为月度或季度）、覆盖不全，且高度依赖运维人员经验，缺乏标准化作业流程与量化评估指标。

## 2.2 信息系统孤岛化，数据价值未释放

各子系统独立建设运维平台，数据格式不统一、接口不开放，形成“数据烟囱”。设备运行状态、故障记录、维修历史等关键数据分散存储，难以进行关联分析与全局洞察<sup>[2]</sup>。

## 2.3 故障响应滞后，修复效率低下

当前多数故障依赖用户投诉或人工巡检发现，平均故障发现时间长达数小时甚至数天。即便发现问题，定位过程也极为繁琐，需逐级排查线路、模块、电源等环节，平均修复时间（MTTR）居高不下。这种“事后补救”模式不仅影响通行效率，还可能因延误处置而放大事故后果。

## 2.4 缺乏预测能力，维护成本高企

“坏了才修”的事后维修模式导致非计划停机频繁，备件库存冗余与短缺并存，人力与物流成本居高不下。据统计，事后维修成本通常是预防性维护的3-5倍。

## 2.5 应急协同不足，处置能力薄弱

面对极端天气、交通事故、设备群发故障等突发事件，缺乏统一指挥调度平台，各运维单位、路政、交警、消防等部门信息不通、指令不畅，应急响应效率低下。

# 3 面向智慧高速的机电工程运维管理优化策略

## 3.1 构建“云-边-端”一体化智能运维架构

为应对海量设备接入与实时处理的双重挑战，亟需构建分层协同的“云-边-端”一体化智能运维架构。在终端侧，应部署具备边缘计算能力的智能感知设备，如支持AI推理的高清摄像机、集成状态监测的智能网关等，使其能够在本地完成数据预处理、异常初步识别与快速响应（如自动切换备用链路或重启服务），从而大幅降低对中心系统的依赖与网络带宽压力。在边缘侧，路段或区域分中心可部署边缘服务器集群，负责汇聚辖区内设备状态数据，执行中级诊断任务，并根据预设策略进行本地化控制，如调整照明亮度或启动备用电源。而在云端，省级或国家级运维平台则聚焦全局视角，利用高性能计算资源对全网数据进行深度挖掘，训练并优化预测模型，生成宏观运维策略，并通过统一门户向下分发指令。这种架构既保障了关键场景的实时性，又实现了全局资源的智能调度，形成了“就近处理、分级决策、上下联动”的高效运维闭环。

## 3.2 推进全生命周期数据治理与资产数字化

实现智能运维的前提是数据的贯通与可信。应以设备为核心，建立覆盖全生命周期的数字资产档案，详细

记录从设计参数、采购合同、安装调试、运行日志到维修更换的全过程信息。通过为每台设备赋予唯一身份标识（如二维码或RFID标签），并与BIM模型或GIS地图绑定，实现“一物一码、一码到底”的精细化管理。在此基础上，构建统一的数据中台，打通设计院、施工单位、运维单位之间的数据壁垒，制定标准化的数据采集、存储与交换规范，确保各类异构数据能够被有效整合、清洗与关联<sup>[3]</sup>。只有当设备的历史轨迹清晰可见、当前状态实时可知、未来趋势可预测时，运维决策才能真正建立在数据基础之上，而非经验猜测。

## 3.3 实施基于AI的预测性维护机制

预测性维护（Predictive Maintenance, PdM）是智能运维的核心突破点。通过在关键设备上部署传感器，持续采集电流、电压、温度、振动、误码率等运行参数，并结合历史故障数据，利用机器学习算法（如长短期记忆网络LSTM、随机森林或图神经网络）构建设备健康状态评估模型。例如，对隧道风机的轴承振动频谱进行时频分析，可识别早期磨损特征；对UPS电池组的充放电曲线建模，可预测剩余使用寿命；对视频摄像头的图像质量与网络延迟进行联合监测，可提前预警镜头老化或遮挡风险。一旦模型识别出异常趋势，系统可自动生成维护工单，推荐最优维修方案、所需备件清单及最佳作业窗口，并推送至相关责任人。这种“按需维护”模式不仅显著降低非计划停机率，还能优化备件库存、延长设备寿命，实现运维成本与服务质量的双赢。

## 3.4 建立多源协同的智能应急响应体系

智慧高速的应急处置必须超越单一部门的局限，走向多源协同。应整合机电、路政、交警、气象、消防等多维数据，构建高速公路应急指挥“一张图”平台。当系统检测到突发事件（如交通事故、恶劣天气、设备群障）时，可自动触发预设的应急预案，将处置流程、责任分工、资源需求等信息实时推送给相关单位。同时，平台可智能调度距离最近的养护车辆与技术人员，联动情报板发布绕行提示，调整信号灯配时，并通知相邻路段做好分流准备。更重要的是，该体系应支持跨部门音视频会商、指令一键下达与执行状态回传，形成“监测—预警—决策—执行—反馈”的完整闭环。通过流程自动化与信息共享，应急响应时间可大幅压缩，处置效率显著提升。

## 3.5 构建数字孪生驱动的可视化运维平台

数字孪生技术为机电运维提供了全新的交互范式。基于BIM+GIS+IoT融合，构建高速公路机电系统的高保真数字孪生体，实现物理世界与虚拟世界的实时映射与

双向互动。运维人员可在三维可视化界面中直观查看任意设备的地理位置、运行状态、告警信息及历史曲线，无需翻阅纸质图纸或登录多个系统<sup>[4]</sup>。更进一步，平台支持在虚拟环境中模拟故障场景下的系统响应效果，如测试某一路由器宕机后通信链路的切换路径，或演练隧道火灾时各子系统的联动逻辑。这种“先仿真、后执行”的模式极大提升了决策的科学性与安全性。此外，数字孪生平台还可用于远程诊断、参数调优及人员培训，推动运维工作从“现场依赖”向“远程智能”转型。

### 3.6 完善标准化体系与人才保障机制

技术变革必须辅以制度与人才的同步升级。首先，应加快制定智慧高速机电运维的系列标准，包括设备接口协议、数据交换格式、运维服务等级协议（SLA）等，打破厂商技术壁垒，促进系统互联互通。其次，大力培养复合型运维人才，既要掌握传统机电工程知识，又要具备数据分析、AI应用与网络安全技能。可通过校企合作、在职培训、技能认证等方式，推动运维队伍知识结构更新。最后，建立以结果为导向的绩效考核体系，将设备可用率、平均修复时间（MTTR）、预测准确率、用户满意度等关键指标纳入KPI，引导运维工作从“完成任务”转向“创造价值”，形成持续改进的良性循环。

### 4 案例分析：某省级智慧高速机电智能运维平台实践

以某东部省份G50智慧高速示范段为例，该路段全长120公里，部署了超过5000个智能感知设备。项目团队围绕上述优化策略，构建了一套完整的智能运维平台。在架构设计上，采用“省云+路段边缘”两级模式，边缘节点部署轻量化AI引擎，实现视频异常事件（如抛洒物、逆行）的本地识别与上报，有效减轻云端负载。在数据治理方面，建立了包含12类设备、3.2万条记录的数字资产库，数据完整率达98%，为后续分析奠定基础。平台上线后，对200台隧道风机实施振动在线监测，成功提前7

天预警3起轴承早期故障，避免了因风机停机导致的隧道封闭事件。在2024年台风“海葵”过境期间，系统自动联动关闭高架路段照明、发布动态限速提示，并协调相邻路段分流，应急指令下发时间由原来的15分钟缩短至45秒。整体来看，平台使平均故障修复时间从4.2小时降至1.1小时，年度运维成本下降22%，用户关于设备故障的投诉率下降35%。该实践充分验证了所提策略在提升运维效率、保障路网安全方面的显著成效。

### 5 结语

面向智慧高速的机电工程运维管理正处于从传统模式向智能化、数字化转型的关键阶段。本文提出的“云-边-端”架构、全生命周期数据治理、预测性维护、多源协同应急、数字孪生可视化及标准化人才保障六大优化策略，构成了一个系统性解决方案，能够有效应对当前运维面临的挑战，提升机电系统的可靠性、安全性与经济性。未来，随着5G-A/6G、量子通信、具身智能等新技术的发展，机电运维将进一步向“自治化”演进——系统具备自我感知、自我诊断、自我修复甚至自我优化的能力，真正实现“无人值守、少人维护”的终极目标。同时，运维数据也将反哺高速公路的规划、设计与建设，形成“建管养运”一体化的良性循环，为交通强国建设提供坚实支撑。

### 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]周涓宇.智慧高速机电一体化运维平台的设计与实践[J].中国交通信息化,2024,(09):131-133+140.
- [4]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.