

Research on intelligent operation and maintenance of highway electromechanical equipment throughout its lifecycle

Jinhui Ye

XinJiang Transportation Planning Survey and Design Institute Co.,Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830006, China

Abstract

As the core component of the digital system of transportation infrastructure, the operation status of highway electromechanical equipment directly affects toll collection capacity, traffic control efficiency, and driving safety. In the traditional operation and maintenance mode, equipment management is focused on passive maintenance, lacking data-driven analysis and a lifecycle perspective, resulting in high system failure rates, high downtime costs, redundant resource allocation, and a lack of forward-looking planning. Under the strategy of building a strong transportation country and the trend of intelligent transportation development, constructing an intelligent operation and maintenance system with “perception analysis prediction active regulation” as the core has become a key breakthrough direction for the digital transformation of highways. This article provides theoretical support and practical paths for engineering governance in the intelligent evolution stage of the highway industry, based on the analysis framework of life cycle theory, electromechanical system coupling mechanism, and digital modeling of operation and maintenance.

Keywords

expressway; Mechanical and electrical equipment; Digital twin; Intelligent Operations

高速公路机电设备全生命周期智能运维研究

冶金辉

新疆交通规划勘察设计院有限公司, 中国·新疆 乌鲁木齐 830006

摘 要

高速公路机电设备作为交通运输基础设施数字化体系的核心组成, 其运行状态直接影响收费能力、交通管控效率与行车安全。在传统运维模式中, 设备管理集中于被动维修, 缺乏数据驱动分析与生命周期视角, 导致系统故障率高、停机成本大、资源配置冗余且缺乏前瞻规划。在交通强国战略与智能交通发展趋势下, 构建以“感知—分析—预判—主动调控”为核心的智能运维体系成为高速公路数字化转型的关键突破方向。本文以生命周期理论、机电系统耦合机理与运维数字化建模为分析框架, 为高速公路行业在智能化演进阶段的工程治理提供理论支撑与实践路径。

关键词

高速公路; 机电设备; 数字孪生; 智能运维

1 引言

高速公路机电系统包括收费系统、监控系统、通信系统、供配电系统、超限监测系统以及隧道机电系统(含隧道供配电、照明、通风、消防、监控), 其核心功能涵盖数据采集、控制执行与运营服务。相比土建工程的缓慢劣化机理, 机电设备呈现快速退化—突发失效—功能崩溃的脆弱性, 系统状态受负载响应、环境扰动、制造质量与人工干预的多源因素耦合影响。如今随着车路协同、云控平台和车联网的普及, 机电系统数据规模呈爆炸式增长, 设备运行信息具有强时序性、高维结构和非平稳特征, 传统阈值判断与线性模型无法支撑

故障早期识别, 需要引入算法驱动的预测性维护模式。为此, 研究机电设备从规划设计、制造安装、运行维护到退役更新的全生命周期行为, 对构建智能运维体系具有基础性意义。

2 高速公路机电设备全生命周期属性及运行机制

2.1 生命周期阶段性性能退化规律

高速公路机电设备生命周期一般包括规划设计、制造安装、启用调试、稳定运行、性能衰减与退役更换六个阶段, 各阶段呈现不同的耦合行为和退化模式(见表1)。设计阶段的关键在于设备适配性、接口标准化与冗余能力规划, 若缺乏功能预留与应急策略, 后续升级将导致改造成本激增。设备安装阶段的性能劣化主要源于施工环境质量偏差、电磁干扰与安装误差, 传感器校准、布线路由与供电隔离直接影响初期可靠性。启用调试阶段的设备故障规律呈“集中暴露”

【作者简介】冶金辉(1984-), 男, 中国新疆人, 本科, 高级工程师, 从事智慧交通、机电工程、交通信息化、地质灾害监测研究。

特征，系统在第一次长时间上线过程中形成稳定工作点，其逻辑错误、软硬件兼容性问题、版本冲突和参数漂移集中显现，属于故障强敏感阶段。进入稳定运行阶段后，设备表现出以温度负荷、环境湿度、灰尘沉积与接口疲劳为主的渐进式退化，故障强度与运行工况呈线性或准指数相关。长期运

行后，系统软硬件界面失配增加，模块间依赖链条变长，导致连锁失效概率提升，从而进入性能衰减阶段^[1-2]。退役阶段的核心矛盾在于单点替换引发的系统兼容性退化，老旧设备与新设备混用可能使整体系统稳定性下降，因此需要在生命周期视角下统筹更新策略。

表 1 高速公路机电设备生命周期阶段特征与运维重点

生命周期阶段	主要运行特征	典型风险类型
规划设计阶段	功能需求梳理、系统架构与接口方案确定	冗余能力不足、接口标准不统一
制造安装阶段	设备生产与现场安装调试	安装偏差、电磁干扰、接线与接地问题
启用调试阶段	首次长周期上线运行，工作点逐步稳定	逻辑错误、参数配置不当、版本冲突
稳定运行阶段	工况相对稳定，渐进式退化为主	温升过高、灰尘沉积、接口疲劳与松动
性能衰减阶段	效率明显下降，故障频率与连锁失效概率上升	硬件老化、软硬件不兼容、频繁小故障
退役更换阶段	新旧设备并存，系统环境高度异质化	接口不兼容、协议冲突、系统稳定性下降

2.2 机电系统结构耦合与故障传导路径

高速公路机电架构不存在“单点独立”的设备，任何子系统均通过电力、通信与控制链路相互耦合。其中供电系统连接收费、监控、通信与隧道设备，若主供电端存在微弱频闪，摄像机、高速相机或识别单元会产生图像抖动、帧率下降与识别精度失真，进而触发收费异常、车辆识别失败与交通诱导错误。通信系统作为数据载体，一旦出现吞吐瓶颈或链路抖动，视频系统可能触发高延迟缓存，隧道通风与照明联动模块在控制信号延迟下产生安全隐患。环境监测系统的数据精度与自适应控制策略高度相关，传感器漂移导致的“虚高”污染指标会触发隧道照明过度响应，形成能耗浪费，而“虚低”指标则可能诱发照度不足与驾驶风险。因此，机电设备智能运维必须以系统耦合为研究基础，通过行为图谱识别故障传播路径，避免单点维护导致二次退化。

3 全生命周期智能运维体系总体架构

3.1 多模态数据采集与结构化建模

智能运维的基础是数据标准化采集与语义一致性建模。高速公路机电系统的数据来源主要包括设备运行指标、电气负载、电磁干扰、温湿度、图像内容、日志信息与维护记录，各类信息具有采样频率不一致与数据维度差异大的双重特征。状态感知层需采用多模态采集策略，通过光学传感、功率传感、电流互感器、RFID、工业总线和边缘网关进行数据融合，构建包含静态属性、运行工况与维护历史的统一设备画像。采用时间序列表征设备运行行为，通过自适应采样策略避免低价值数据占用算力，引入局部队列机制控制边缘节点缓存空间，提升前端采集效率与监控覆盖度。为了消除传感器漂移误差，可在设备运行周期内建立动态校准曲线，通过环境参数回归模型修正偏差，形成可在线更新的标定体系，从而提升采集体系的长期稳定性和可追溯性。基于上述感知与建模框架，可构建如图 1 所示的“感知—分析—预判—主动调控”闭环智能运维总体架构^[3]。

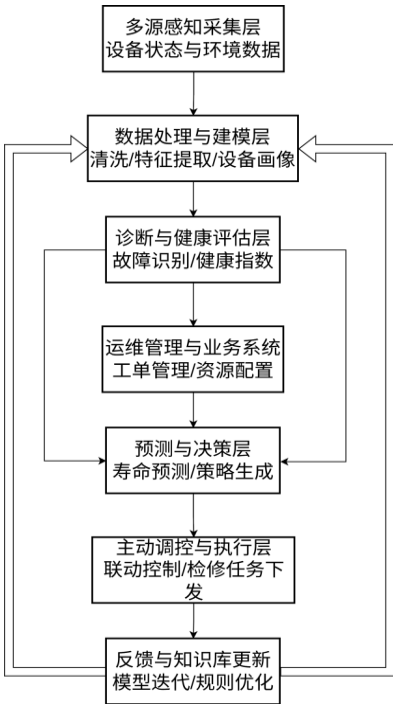


图 1 高速公路机电设备全生命周期智能运维总体架构

3.2 数据驱动的诊断与预测算法

智能运维的核心是建立实时诊断与提前预警的算法体系。机电设备故障空间呈现非线性特征，传统阈值模式难以捕捉早期信号，必须引入机器学习与深度学习模型开展状态识别。基于 LSTM 的时序分析能够捕捉电流波动、摄像帧率下降等潜在退化，卷积神经网络可用于图像级设备状态识别，如车道监控摄像机的污渍程度、车流拥堵信息与夜间照明效果^[4-5]。分析决策层还应包括规则模型与经验模型，以满足反复出现的典型故障场景与算法偏差环境下的工程纠偏。机电设备智能运维不能停留在“识别与报警”阶段，而应实现主动调节。以收费系统为例，当设备识别精度下降并伴随硬件温升时，系统应触发软限速策略、切换备用识别单元并调整空调制冷功率，而不必等待故障扩大后人工干预。

通信系统可在网络抖动下自动切换备链路，通过 SDN 控制实现路径优化；隧道风机故障时可通过下游风机联合调节减小压差冲击，避免局部烟气回流与气流扰动。主动干预策略的关键在于容错机制与安全边界合理配置，确保干预行为不会造成二次损伤或引发对等系统稳定性问题。

4 数字孪生驱动的机电设备治理机制与工程实现路径

4.1 数字孪生驱动的机电设备治理机制

数字孪生是智能运维体系的核心，它通过构建虚实映射实现系统状态的动态预测与同步控制。在高速公路场景中，数字孪生模型不仅模拟设备的运行参数，还需嵌入环境扰动与交通行为。为此，需要构建三种层次：物理孪生映射、逻辑功能孪生与演化孪生。物理孪生聚焦温度、振动、功耗与环境耦合；逻辑孪生表达收费流程、通信拓扑与信号调度；演化孪生则推演设备故障老化过程，通过加速退化模拟、场景仿真与异常场景推演建立风险判别机制。在收费系统中，识别模块单一替换价格较低，但若造成收费中断与事故排查，将直接引发交通效率损失与人工诉讼成本。应通过全生命周期成本函数衡量设备策略，包括初始投资、运行维护、停机风险、节能收益与报废价值，并在数字孪生环境下进行多场景仿真，从而找到最优路径。例如风机系统更换周期的优化并非“越晚越省钱”，其设备效率下降导致长期能耗增加，可能超过更换本体成本，且一旦发生隧道烟气回流事故，则损失呈指数级增长。生命周期成本与风险函数联合求解，是智能运维决策的重要方法。

4.2 智能运维关键技术与工程实现路径

机电设备运行状态并非静态，而是呈动态非平稳分布。以配电系统为例，设备在低负载时温升较低，高峰负载下温升速率增加，并呈现“快速—缓慢—稳态”三相变化，具有显著的环境依赖性。单一电流监测无法识别异常，因为高温可能来自灰尘堵塞或散热失效。在多源融合体系中，通过将温度、电流、湿度与时间段关联分析，可建立多维异常判别空间，采用密度聚类算法识别“偏离群集”的极小早期信号，从而提前触发检修任务。预测性维护并非简单延迟的定期检

修，而是建立基于状态变化率与多周期演化的动态策略。采用 ARIMA+LSTM 混合模型处理信号退化序列时，ARIMA 负责任务平滑，LSTM 捕捉非线性趋势，通过残差监测建立“预测窗口”。当预测窗口趋势出现连续偏移并超过动态安全阈值时，便认为进入强敏感阶段，从而触发提前维护。该方法显著降低人工阈值调整的不确定性，适用于识别摄像器件图像过曝、识别单元误判率升高、风机轴承振动异常等复杂场景。机电设备长期升级过程中若缺乏接口标准化，会造成系统维护障碍。模块化策略要求设备具备功能单元化设计，通过可插拔式接口实现快速替换。例如收费系统的识别、计费、车道控制与通信子模块均可采用统一总线标准，通过逻辑绑定实现快速软硬件替换，从而把设备维护从“现场调试”转变为“功能替换”。模块化策略不仅提高检修效率，还能减少跨系统干扰，使维护行为可预测并可复现。

5 结语

高速公路机电设备全生命周期运维是交通基础设施数字化的重要组成，其关键不在于设备本体维护，而在于系统耦合行为、状态感知能力与预测治理策略。研究表明，基于数字孪生的动态治理体系能够实现“从事后维修到前瞻维护”的模式转变，通过多源数据融合、智能诊断与预测性维护持续提升系统可靠性和资源使用效率。未来研究应进一步深化机电设备跨代兼容性、算法模型可解释性与运行安全边界，并在国家级交通基础设施中构建统一的智能运维标准体系，以支撑交通强国战略落地。

参考文献

- [1] 朱亮伟,周学军,李晓琦,等.多模态数据驱动的高速公路机电设备寿命预测[J].公路交通科技,2025,42(9):12-26.
- [2] 于泉,郭增增,梁锐.基于马尔科夫链的高速公路机电设备寿命预测研究模型[J].公路交通科技,2018,35(1):28-35.
- [3] 徐红辉,王翀,范杰.基于故障状态演化的高速公路机电设备智能维护系统设计[J].现代电子技术,2019,42(24):112-115.
- [4] 徐红辉.高速公路机电设备运行状态无线监测方法仿真[J].计算机仿真,2019,36(11):121-125.
- [5] 成世龙,覃喜.电池技术在高速公路机电设备智能管理中的应用[J].电池,2025,55(3):10006-10007.