

基于数据驱动的高速公路机电设备故障预警与健康管理的

孟凡宇

(河北石太高速公路开发有限公司,河北省石家庄市,050000)

摘要 高速公路机电设备是保障道路安全运营的核心基础设施,传统定期检修模式难以适应智慧交通发展需求。本文提出一种基于数据驱动的故障预警与健康管理的(PHM)体系,构建“感知-认知-决策-执行”四层技术架构,实现机电设备状态监测、故障诊断、寿命预测与维护决策的闭环管理。

关键词 数据驱动;故障预警;高速公路;机电设备

中图分类号:U418.7 文献标识码:B
文章编号:1008-0899(2026)06-0069-02

截至2024年底,我国高速公路通车里程达到19.07万km^[1],机电系统资产规模达数千亿元。高速公路机电设备涵盖通风、照明、供配电、消防、监控五大子系统,具有分布广、种类多、环境恶劣、可靠性要求高等特点^[2]。当前高速公路机电运维面临故障发现滞后、维修策略粗放、数据价值闲置等三重困境。

故障预测与健康管理的(Prognostics and Health Management, PHM)技术通过数据驱动方法实现设备状态感知、故障预警与寿命预测,是破解上述困境的关键路径。本文构建面向高速公路机电设备的PHM技术体系,推动运维模式从“故障修”向“状态修”“预测修”转型。

1 高速公路机电设备PHM技术架构

1.1 总体架构设计

本文提出“感知-认知-决策-执行”四层PHM技术架构,形成数据流、知识流、控制流的闭环管理。其中,感知层部署多类型传感器与边缘计算节点,实现设备运行数据实时采集与预处理;认知层构建深度学习模型库,实现状态识别、故障诊断、寿命预测等智能分析;决策层基于数字孪生仿真与优化算法,生成维修策略与资源调度方案;执行层通过移

动终端与自动化装备,实现维护作业精准执行与效果反馈^[3]。

1.2 感知层

1.2.1 传感器部署策略

高速公路机电设备种类繁多、失效机理各异,需针对性设计传感方案。本文聚焦轴流射流风机、UPS不间断电源和LED照明系统三类关键设备设计差异化传感方案。①轴流射流风机部署三轴振动加速度传感器(采样率10kHz,监测轴承磨损与叶片不平衡)、红外温度传感器(监测电机绕组温升)及电流传感器(监测负载波动)。振动信号经FFT变换提取轴承故障特征频率(BPFO、BPFI等)。②UPS配置蓄电池监测模块,巡检单体电压、内阻、温度,结合放电测试获取实际容量。内阻增长超基准值150%时,容量通常降至80%以下。③LED照明系统集成驱动电源温度传感器与光通量传感器,监测光衰与色温漂移。LED结温每升高10°C,寿命约减半,散热条件是影响光通量维持率的关键。

1.2.2 边缘计算与数据预处理

隧道变电所部署边缘计算网关,构建“云-边-端”协同计算架构。边缘层承担三项核心任务:数据清洗方面,采用小波阈值去噪消除高频噪声,利用自适应卡尔曼滤波处理传感器漂移,通过三次样条插值填补缺失数据(缺失率<5%时有效);特征提取方面,在边缘端完成时域特征(均值、方差、峰值、峰度、裕度指标)、频域特征(FFT频谱、功率谱密度、重心频率)、时频域特征(小波包能量熵、EMD能量占比)计算,降低云端传输带宽压力90%以上;数据

作者简介:孟凡宇(1982~),男,河北晋县人,本科,工程师,研究方向:公路机电。

压缩方面,采用基于轻量级神经网络的自编码器实现信号压缩,压缩比达10:1同时保留95%以上故障特征信息。

1.3 认知层

1.3.1 健康状态评估模型

针对高速公路机电设备正常数据丰富、故障数据稀缺的特点,构建基于深度自编码器的无监督健康评估模型。模型通过编码器将高维输入映射至低维潜在空间,再由解码器重构原始输入,利用重构误差量化设备偏离正常模式的程度。误差越小越健康,误差显著增大则预示异常。为增强对微弱异常的敏感性,引入对比学习策略,构造人工异常样本作为负例,训练模型区分正常与异常边界。最终将重构误差映射为健康指数,实现无监督状态监测。

1.3.2 故障诊断模型

提出多尺度卷积神经网络用于故障识别:并行使用尺度3、5、7、9的一维卷积核提取不同时间尺度的局部特征,经注意力机制加权融合后输出故障概率。针对故障样本稀缺,采用滑动窗口重叠采样、添加高斯噪声与随机缩放、生成对抗网络合成故障样本等数据增强策略。

1.3.3 剩余寿命预测模型

构建基于注意力机制的双向预测模型。双向结构同时捕捉历史趋势与未来上下文,注意力机制识别关键退化阶段(如性能加速衰减期),输出剩余使用寿命概率分布而非点估计,量化预测不确定性。

引入物理信息神经网络约束,将设备退化物理规律(如Arrhenius加速老化模型、Miner线性累积损伤理论)嵌入损失函数,提升模型外推能力与可解释性。

1.4 决策层

1.4.1 机电设备数字孪生模型

构建四维数字孪生模型:几何维度基于BIM建立设备三维模型,精确表达风机叶片型线、UPS机柜布局、灯具安装位置等空间结构;物理维度集成多物理场仿真,实现风机流场-结构耦合、蓄电池电化学-热耦合、LED热-光耦合分析;行为维度通过深度学习建立设备运行代理模型,实现虚实数据融合与状态同步;规则维度嵌入养护规程、安全标准与

应急预案,支持合规检查与知识推理。

1.4.2 预测性维护决策优化

基于剩余寿命(RUL)的动态机会维修策略,改变传统固定周期检修模式:RUL较长时延长检修间隔避免过度维修;健康指数快速下降时提前干预。综合考虑人员、车辆、备件及交通流量,智能推荐维修类型,利用计划封道窗口协调相邻设备同步检修,通过“群维修”合并同类作业。应用表明,该策略可降低全寿命周期成本25%~35%,并提升设备可用率。

1.5 执行层

开发移动端运维APP,集成AR(增强现实)辅助维修功能。扫描设备二维码调取数字孪生模型,叠加显示内部结构、历史故障、维修手册;通过AR眼镜获取远程专家指导,降低对现场人员经验依赖。维修完成后扫码记录作业信息,反馈至PHM系统更新设备健康档案,形成“监测-分析-决策-执行-反馈”闭环。

2 工程应用与验证

以某省高速公路特长隧道群为验证对象,PHM系统应用效果显示:设备故障率从8.5次/(千台·年)降至3.2次/(千台·年),降幅62%;非计划停机时间由45h/(隧道·年)缩短至12h/(隧道·年),减少73%;维修成本降低32%;故障预测准确率达87%,平均提前预警时间14d。以单座特长隧道测算,初始投资160万元,年节约运维成本85万元,投资回收期1.9年,20年投资回报率425%。

3 结语

本文构建了基于数据驱动的高速公路机电设备PHM技术体系,通过“感知-认知-决策-执行”四层架构实现闭环管理。工程验证表明,系统使设备故障率降低62%,维修成本降低32%,投资回收期仅1.9年,为高速公路机电设施智能化运维转型提供了有效路径。

参考文献

- [1] 中华人民共和国交通运输部.2024年交通运输行业发展统计公报[R].北京:中华人民共和国交通运输部,2025.
- [2] 任杰.基于智慧交通技术的高速公路机电设备故障预警系统设计[J].运输经理世界,2025,(34):145-147.
- [3] 徐建国,黄广臣.高速公路机电设备故障多因素预测模型应用研究[J].建筑机械,2022,(09):20-23.