

智慧交通背景下高速公路机电设备智能运维技术研究

刘 伟

山西省交通新技术发展有限公司, 山西 太原 030006

[摘要]智慧交通迅速发展,给高速公路机电设备运维管理提出更高的要求。针对传统运维模式下设备监测手段落后、故障诊断效率低、运维数据利用率不高、预防性维护能力弱等主要问题,文中对高速公路机电设备的组成及特点进行了梳理,对目前存在的主要矛盾进行了分析,重点研究了物联网设备状态监测、大数据故障分析、人工智能故障诊断、远程运维和智能预警等技术在实际应用中的应用途径。经过研究发现,创建以“感知、分析、诊断、预警”为主的智能运维技术体系,可以明显改善机电设备的运维速度和管理水准,促使高速公路机电运维由原先的被动抢修转向主动预防,给智慧交通环境下高速公路运营管理给予一些参考。

[关键词]智慧交通;高速公路;机电设备;智能运维;物联网;人工智能

DOI: 10.33142/ec.v9i9.20410

中图分类号: U417

文献标识码: A

Research on Intelligent Operation and Maintenance Technology of Mechanical and Electrical Equipment on Highways under the Background of Intelligent Transportation

LIU Wei

Shanxi Provincial Transportation New Technology Development Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi, 030006, China

Abstract: The rapid development of smart transportation has put forward higher requirements for the operation and maintenance management of highway electromechanical equipment. In response to the main problems of outdated equipment monitoring methods, low fault diagnosis efficiency, low utilization of operation and maintenance data, and weak preventive maintenance capabilities under traditional operation and maintenance modes, this article summarizes the composition and characteristics of highway electromechanical equipment, analyzes the main contradictions currently existing, and focuses on the application of technologies such as IoT equipment status monitoring, big data fault analysis, artificial intelligence fault diagnosis, remote operation and maintenance, and intelligent early warning in practical applications. After research, it has been found that creating an intelligent operation and maintenance technology system based on "perception, analysis, diagnosis, and warning" can significantly improve the operation and maintenance speed and management level of mechanical and electrical equipment, promote the transformation of highway mechanical and electrical operation and maintenance from passive repair to active prevention, and provide some reference for highway operation and management in the smart transportation environment.

Keywords: smart transportation; highway; mechanical and electrical equipment; intelligent operation and maintenance; Internet of Things; artificial intelligence

引言

伴随着我国高速公路通车里程不断增长、路网密度不断提高,高速公路机电系统规模和复杂程度也越来越大。行业发展重心已经由以工程建设为主转变为建设与养护并重,机电设备的智慧化养护成了高速公路行业高质量发展的核心问题。机电设备是保证高速公路收费、监控、通信、照明、通风、消防等主要业务正常运转的重要基础设施,机电设备运行状况的好坏直接影响到收费能力、交通

管控效率和行车安全。在智慧交通发展的大背景之下,高速公路机电系统正向着数字化、集成化、智能化的方向快速前进。但是传统的依靠人工巡检、经验判断为主的运维方式已经不能满足对海量设备进行管养的需求。依靠物联网、大数据、人工智能这些新一代信息技术来开展机电设备的智能运维工作,已经成为高速公路行业高质量发展的重大课题。本文在分析高速公路机电设备组成特点和运维存在的问题之后,主要研究智能运维关键技术的应用途径,

希望给相关实践提供一定的理论参考。

1 高速公路机电设备组成及特点

高速公路机电工程系统属于高速公路交通工程的核心管理设施,由监控、通信、收费、低压供配电、照明以及隧道机电工程六个子系统组成,共同完成道路运营管理。本系统以监控、通信、收费三大子系统为主,监控系统负责高速公路全线实时监视和控制,包括外场设备、监控站、监控分中心、监控总中心等多级管理结构,逐步发展为以视频智能分析、大数据、云计算、人工智能、数字孪生等技术为支撑的智慧监控;收费系统采用部联网中心、省收费结算中心、路段管理中心、收费站、ETC 门架系统、收费车道五级管理架构,完成车辆缴费、通行费拆分等工作;通信系统完成数据传输、信息交互,是各个子系统之间的信息纽带,正在向通信一张网方向发展;供配电与照明系统给机电设备提供电力保障、道路照明支持,隧道机电工程对隧道这一特殊路段配置通风、消防、火灾报警等专项设备。各个子系统互相配合来达到高速公路运营管理的目的。就设备特征而言,高速公路机电系统越来越具有数量大、种类多、数字化、集成化等特点。设备部署环境复杂,从收费站的室内设备到沿线的外场设施,从隧道内的特殊环境到跨路段的通信节点,不同的场景对设备的可靠性、实时性、环境适应性等各方面的要求也存在差异。这些特点决定了机电设备的运维管理要从系统的角度出发来统筹考虑,创建起一个包含设备整个生命周期的精细管理体系。

2 高速公路机电设备运维存在的问题

2.1 设备监测手段较为落后

目前我国高速公路机电设备运行监测还主要依靠传统的手工巡检方式。单条路段上万个机电设备完成全覆盖巡检一般要一周左右。由于低频次、长周期的巡检方式不能得到设备运行状态的实时掌握,大量的间歇性故障以及早期性能衰退信号不能被及时发现。更重要的是,机电运维过程中还没有充分地利用物联网以及智能控制技术。机房动环、隧道消防等主要设施没有有效的感知设备,故障不能及时发现和预警。机电设施运行过程中存在状态无法观测、告警晚到、维修响应慢等状况。同时机电设备巡检方式还处在数字化、智能化转型期,巡检数据的自动采集、可信存储、记录溯源、智能分析等全流程技术还不完备。过分依靠人工的监测方式不但造成故障被发现得晚,而且运维决策缺少及时、准确的数据支持,不能达到现代高速公路对设备运行可靠性的要求。

2.2 故障诊断效率不高

在传统的运维模式下,对于机电设备的故障诊断依靠的是运维人员个人的经验和技术水平,没有形成系统的、标准的诊断流程以及工具。各种隐蔽的故障不容易被发现。当设备出现故障的时候,运维人员要排查出诸多的原因,但是诊断工作耗时长、效率低。尤其在隧道这样的特殊地段,隧道机电设施存在不确定性大、对环境变化较为敏感、隐蔽性强、维修难度大等特点。除此之外^[1],监控、收费、办公三大网络在路段层次上不能互相连接,造成明显的数据孤岛。设备巡检、故障处理、维护记录等各个环节的信息互相割裂,不能进行跨系统的关联分析和全局态势的研判。由于信息壁垒的存在,造成故障诊断无法从全局的角度去综合分析,同样的故障多次出现却不能产生有效的知识积累和经验复用。机电设备故障发现慢、维护处理难、过程管理乱、维护成本高等问题已经成为影响机电运维效率提高的主要瓶颈。

2.3 运维数据利用不足

高速公路机电系统长时间运转之后就会产生大量的历史运维数据,包含设备运行参数、故障记载、维修工单、巡检报告等各类信息。但是大量的历史运维数据没有进行归纳分析,不能为预防性养护决策提供支持。传统的运维模式下,设备的管理是被动式的维修,缺少了数据驱动的分析以及生命周期的视角,造成系统故障率高、停机成本大、资源浪费严重、没有前瞻性的规划。这些数据大多以碎片化的形式分散存储在各个业务系统当中,设备全寿命周期数据分散,存在信息孤岛现象,不能对质量、成本进行系统的分析。数据质量参差不齐,部分数据有缺失、重复或者不一致的地方,不能直接用来做深入的分析。也不能对某一类机电设备的全生命周期进行管理。缺少对设备性能退化规律的定量认识,也就不能科学地制定出维修策略和更换计划。数据丰富但是信息匮乏的状况,造成很多有价值的操作维护经验不能被有效地提取、传承。

2.4 预防性维护能力较弱

目前高速公路机电设备的维护策略还存在着以事后维修、定期保养为主的状况,预防性维护的能力比较弱。传统的运维模式中,故障发生之后才开始处理,缺少预防性的维护。大部分路段仍旧是以故障维修为主,预防性维护不到位,设备状态监测依靠人工巡检,存在漏检、误判的风险。目前在高速公路机电设备运维管控实际工作中存在着以换代修的现象,不利于降低养护成本、提高运营效益。由于缺少对设备健康状况的连续监测以及对设备剩余

寿命的精确预估,运维人员很难在设备出现潜在故障之前就加以察觉并予以处理。由于设备长时间使用造成的性能下降,以及技术更新所引起的匹配问题,都会对机电系统造成严重的影响^[2]。预防性维护能力欠缺,会加大突发故障造成的安全风险和运营损失,还会造成设备全生命周期养护成本居高不下,与智慧交通所要达到的精益化管理目标背道而驰。

3 高速公路机电设备智能运维技术应用

3.1 物联网设备状态监测

物联网技术是实现机电设备智能运维的数据基础。在各种机电设备上安装多种类型的感知终端,形成全线物联网感知网,可以对设备运行状况实行全天候、实时化的监测。通过创建多层物联网感知网络,设置边缘计算预处理单元,在设备端对数据进行初步清洗和异常初筛,可以有效地减小数据传输时延以及云端计算负荷。利用物联网应用基础平台对高速公路各机电设备数据及业务进行一定程度的融合,构建起高速公路机电设备智能运行监测系统,可以实现对高速公路机电设备供电情况、网络状况、在线率等的实时监测。从技术架构上看,感知层依靠传感器、智能箱等前端设备来获取电压、电流、温度、湿度、振动等各方面的运行参数,网络层采用光纤通信、5G 等传输方式把数据传送到后端,平台层对这些数据进行统一管理和分析。该系统可以及时发现设备的故障并把故障设备的位置和故障的原因告知机电维护人员,使机电维修人员能够及时地对设备进行维修,提高机电维修效率,减少人力成本。该系统可以准确地判断出外场机电设备的健康状况,减少现场维护次数约 15%,减少运维和巡检车辆行驶里程约 30%,达到节能减排、降低运维成本的目的。

3.2 大数据故障分析

大数据技术给机电设备运维由“经验驱动”转向“数据驱动”赋予了技术助力。对高速公路机电设备运行数据进行采集、分析,可以对机电设备运行状况、故障预测、维修决策等问题进行研究。创建起一套完备的高速公路机电设备监测系统,从而达成对设备的实时监测以及数据分析的目的。在此基础上利用机器学习的方法建立机电设备运行状态的检测模型,可以对设备出现的异常运行进行及时的检测。大数据分析的主要价值就是从大量的历史数据里找到设备运行的规律性特点以及隐藏的关系,将多种实时数据流以及机器学习模型结合起来可以达到故障早期预警的目的,用强化学习来改进维护决策,用图神经网络去挖掘设备间的关联缺陷^[3]。通过对同一个类型的设备在

不同的季节、不同的负载条件下故障频率的分布进行分析,可以得到环境因素和设备可靠性之间定量的关系。大数据分析的又一重要方向就是设备全生命周期管理,即对设备性能退化轨迹进行持续跟踪,给制定个性化的维护计划提供科学依据。数据处理时间由原来的 33.33%缩短到现在的 100%。

3.3 人工智能故障诊断

人工智能技术给机电设备故障诊断的自动化、精准化提供主要算法支持。将设备运行数据、环境参数、维护记录等进行整合之后,就能达成对故障实施精准预估并开展主动式的健康管理。就技术实现而言,深度学习技术在隧道机电设备运维中已经取得了比较大的进展,利用 CNN、RNN 以及它们的改进架构可以达到很好的特征自主提取和故障模式识别的效果。以多传感器数据融合为基础的深度学习诊断系统,在故障识别准确率、诊断时效性上都有较大的提高。融合设备运行数据、视频图像和环境参数来开展多维关联分析,可以自行判定故障类型、严重程度及原因,给出处理意见。人工智能诊断的又一重要方向就是知识图谱的创建和运用,借助大模型技术挂载行业知识库,重点进行故障根因剖析并给出针对性运维建议,助力一线人员做出决策。经由实验验证得知,检测办法对于高速公路机电设备故障诊断的准确率比传统的模型要高。人工智能技术的加入不但大大缩短了故障定位的时间,更重要的是使运维人员由原来的“人找故障”变为“故障找人”,使运维人员可以将更多的精力放在疑难问题的解决上。

3.4 远程运维与智能预警

远程运维和智能预警属于智能运维技术体系的最终产出部分,同时也是达成运维闭环管理的重要手段。利用实时数据采集、远程诊断、智能预警等方式可以大大提高设备的管理水平。在远程运维上创建一系列智能运维工具,达成远程自动化运维,异常状况精准定位,故障诊断和解决办法自动推送等目的,从而全面提高机电运维的智能化水平。运维人员不用到现场,就可以通过远程监控平台查看设备运行状况,调取历史数据,执行诊断操作,从而达到机电设备故障早发现、早处理的目的^[4]。智能预警依靠创建多维度预警指标体系来达成异常预警以及预防性养护的目的。经过对广东省南沙大桥智慧运维模式试点项目的实施,实现了设备断电秒级告警、远程故障处理等效果,故障发现和处理时间比以前减少了 30%以上,运维成本也下降了 30%以上。远程运维和智能预警相结合,把机电运维由被动抢修转变为主动预防性养护。

表 1 高速公路机电设备智能运维关键技术对比

技术手段	核心技术	部署方式	主要功能	应用效果
物联网状态监测	多源传感+边缘计算	现场部署	实时采集设备运行参数	减少现场维护频次约 15%
大数据故障分析	分布式存储+机器学习	云端/中心侧	挖掘历史数据规律、预测故障趋势	数据处理时间压缩至原时长 33.33%
人工智能诊断	CNN/RNN/知识图谱	云端推理+边缘轻量模型	自动识别故障类型与根因	诊断准确率优于传统模型
远程运维与预警	数字孪生+智能告警	中心侧+移动终端	远程处置与风险预警	故障处理时间缩短 30%以上

4 结语

智慧交通不断推进,高速公路机电设备运维管理由原来的被动应对转变为现在的主动预防。本文从设备组成特点入手,对目前运维中出现的监测手段落后、诊断效率低、数据利用率不高、预防性维护不足这四个问题进行了系统的分析,并提出了物联网状态监测、大数据故障分析、人工智能诊断、远程运维和智能预警等技术在实际使用中可以应用的方法。研究表明,创建起以感知、分析、诊断、预警为主要内容的智能运维技术体系,可以明显改善机电设备的运行可靠性以及维护速度。随着数字孪生、大模型等前沿技术不断被融入高速公路机电设备智能运维当中,使得高速公路机电设备智能运维向着全生命周期、全要素覆盖的方向发展,给智慧交通高质量发展赋予了更为有力

的技术支撑。

[参考文献]

- [1]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.
 - [2]田霖.智慧化建设在高速公路机电系统中的应用[J].工程技术研究,2025,10(4):217-219.
 - [3]孙广为.智慧化建设在高速公路机电系统中的应用分析[J].运输经理世界,2023(33):146-148.
 - [4]张雷鸣.新基建背景下高速公路机电智能化管理创新研究[J].智能制造研究与应用,2026,2(5):139-141.
- 作者简介:刘伟(1979—),毕业于重庆交通学院机械设计制造及其自动化专业,现就职于山西省交通新技术发展有限公司,高级工程师。