

公路隧道机电系统智能化改造与运行效率提升研究

陈宇

新疆交通规划勘察设计研究院有限公司智能科技分公司, 新疆 乌鲁木齐 830000

[摘要]伴随“交通强国”推进和新疆丝路核心区建设双重背景,公路隧道机电系统的运行稳定性、智能化水平对区域的交通通行效率以及安全性有着直接的影响。目前新疆公路隧道机电系统存在一些不足之处,设备历经岁月侵蚀而老化、智能化程度相对滞后、适配性较差、运维成本居高不下等,难以契合特殊工况下的通行需求。基于此,基于新疆的地域特征引入智能机电系统技术,开展公路隧道机电系统智能化升级的路径研究,在提高机电系统运行效率的同时降低运维成本,从而助力新疆的公路交通高质量发展。

[关键词]公路隧道;机电系统;智能化改造;运行效率;新疆地域特征

DOI: 10.33142/ect.v4i2.19197

中图分类号: U491.116

文献标识码: A

Research on Intelligent Transformation and Efficiency Improvement of Mechanical and Electrical Systems in Highway Tunnels

CHEN Yu

Intelligent Technology Branch of Xinjiang Transportation Planning Survey, Design and Research Institute Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830000, China

Abstract: With the dual background of promoting the "transportation power" and the construction of the core area of the Silk Road in Xinjiang, the operational stability and intelligence level of the mechanical and electrical system of highway tunnels have a direct impact on the regional traffic efficiency and safety. At present, there are some shortcomings in the electromechanical system of highway tunnels in Xinjiang. The equipment has aged over time, the level of intelligence is relatively backward, the adaptability is poor, and the operation and maintenance costs are high, making it difficult to meet the traffic needs under special working conditions. Based on this, intelligent electromechanical system technology is introduced based on the regional characteristics of Xinjiang to conduct research on the path of intelligent upgrading of highway tunnel electromechanical systems. This will improve the operational efficiency of the electromechanical system while reducing operation and maintenance costs, which assisting in the high-quality development of highway transportation in Xinjiang.

Keywords: highway tunnel; mechanical and electrical systems; intelligent transformation; operational efficiency; regional characteristics of Xinjiang

引言

新疆地处西北边疆,占据我国国土面积六分之一的广袤土地,且地形复杂,公路隧道作为穿越山地、跨越荒漠的核心交通设施,截至2025年底,新疆已建成通车公路隧道93座,其中长及特长隧道46座,多处于偏远地区,同时面临着地质条件复杂、温差极端等特殊挑战。公路隧道机电系统涵盖通风、监控、照明、消防等多个子系统,其运行状态对隧道的通行效率与安全有着直接的影响。然而,目前新疆东速公路隧道机电系统已经使用了多年,设备老化问题十分严重,并且智能化水平较低、运维难度大、能耗偏高。基于此,充分围绕新疆公路隧道的特殊工况以及实际发展需求引入先进的智能技术,实现机电系统的精准管控,破解地域环境带来的运维难题。

1 新疆公路隧道机电系统现状

1.1 新疆公路隧道机电系统现状

对G30连霍高速果子沟隧道、G7京新高速梧桐大泉隧道等30座典型隧道调研发现,新疆公路隧道机电系统由通

风、照明、监控、消防、供配电五大子系统构成。通风多用轴流风机,以人工启停为主,部分特长隧道有简易变频控制,照明以高压钠灯为主,少数新建隧道用LED灯,为分段人工开关控制;监控以视频监控为主,缺乏智能化的检测预警;消防以固定式消火栓、灭火器为主,联动响应差;供配电有柴油发电机作备用电源,在低温环境下启动比较难。且约70%的公路隧道机电系统建于2015年前,设备老化率高。

1.2 新疆地域特征对机电系统运行的影响

新疆因其独特的地域环境,在公路隧道基地系统的运行方面存在着诸多挑战。新疆大部分地区属于温带大陆性气候,冬季最低气温常常能够降至-40℃以下,极端低温会导致机电设备出现冻损,甚至无法正常启动。控制器、传感器等电子元件在低温条件下电子信号传输会受到干扰,检测的精度大幅下降。LED灯具、变频器等设备在高温下容易出现过载保护现象,但是频繁出现过载保护会影响设备的正常运行,以及隧道内的通风效果和照明效果。新疆拥有广袤的沙漠和戈壁,风沙天气频繁,风沙也会对

机电系统的运行造成严重的影响。当风沙堵塞通风风机的进风口、过滤器时，会降低通风效果，增加能耗，加速风机的磨损，损害风机的性能。照明灯具的灯罩在风沙颗粒的反复摩擦响，影响照明效果。新疆公路隧道远离城市，这种地理位置的特殊性给隧道的运维工作带来了诸多困难，运维人员难以实现常态化巡检、偏远隧道通信信号薄弱，加之故障维修所需的设备、配件运输不便，导致故障修复时间变长，影响隧道的正常通行。

2 适配新疆的公路隧道最新智能机电系统技术筛选

针对新疆隧道通风效率低、能耗高、风沙易堵塞等问题，筛选“AI智能变频通风+风沙自适应过滤”技术，适配新疆地域特征的最新智能机电技术汇总如表1所示。

表1 适配新疆的公路隧道核心智能机电技术汇总表

系统类型	核心智能技术	适配性优势	核心功能
通风系统	AI智能变频通风+风沙自适应过滤	低温抗冻、风沙防护，能耗低	自动调控风机转速，清除风沙堵塞，提升通风效率
照明系统	LED智能调光+光感自适应控制	低温抗冻、风沙防护，能耗低，运维便捷	自动调节亮度，避免眩光，延长灯具寿命
监控系统	AI视频分析+边缘计算+远程运维平台	适配偏远路段，通信要求低，运维高效	异常情况自动预警，远程监控与运维
消防系统	智能消防联动技术	响应速度快，适配极端环境	火灾早期预警，自动联动应急设备
供配电系统	智能供配电+低温备用电源	低温抗冻，运行稳定	故障自动报警，备用电源自动切换

3 新疆公路隧道机电系统智能化改造方案构建

3.1 改造框架构建

构建“一个智能管控平台+五大智能子系统”的改造框架，改造框架如图1所示。

3.2 核心改造内容

3.2.1 智能管控平台建设

智能管控平台承担数据采集、分析、调控、预警、运维等功能，具体建设内容：

3.2.1.1 数据采集与整合模块

在公路隧道机电系统的智能化管理进程中充分围绕交通的流量数据整合五大子系统的运行数据，采集温湿度、风沙浓度、光照强度等环境参数等，通过边缘计算网关将原始数据进行初步分析和筛选，实现本地数据处理，从而适配通信信号薄弱的偏远隧道。

3.2.1.2 AI智能分析与调控模块

采用机器学习算法对隧道内的运行数据、环境参数和交通流量数据进行分析，通过对历史数据和实时数据的学习和分析实现通风、消防等子系统的自动调控，当识别出交通异常、设备故障以及火灾等异常情况时能够第一时间发出预警信号，以便相关人员可以及时采取相应的处理措施。

3.2.1.3 远程运维与控制模块

构建云端运维平台，支持电脑端、手机端访问，以便运维人员能够远程查看设备的当前状态、及时将预警信息发送给相关的运维人员、运维人员通过电脑端或手机端的前端界面远程调试设备、根据实际需求下达调控指令，构建云端运维平台无需现场巡检。

3.2.1.4 数据存储与追溯模块

配备大容量的本地存储与云端备份全面存储设备运行数据、故障记录信息等关键资料，以便后续开展深入的数据分析、追溯与系统的持续优化，同时在数据存储安全方面采用防尘、防潮、防干扰等技术手段，更好地适配新疆极端环境下的数据存储安全需求。

3.2.2 五大智能子系统改造

拆除老化的轴流风机，更换为低温抗冻型AI变频风机，在风机进风口安装风沙自适应过滤装置，配备CO浓度、能见度、风沙浓度传感器，接入智能管控平台，实现风机转速的自动调控与风沙过滤装置的自动反吹，解决风沙堵塞、低温冻损、能耗偏高的问题。替换传统高压钠灯为低温抗冻型LED灯具，在隧道入口、出口及内部安装光感传感器与交通流量传感器，配备智能调光模块，接入智能管控平台，实现灯具的自动开关、亮度渐变与动态调光，降低能耗，提升通行安全，同时灯具外壳采用风沙防护设计，延长使用寿命。更换老化的监控摄像头，安装高清红外防沙防雾摄像头，部署边缘计算网关，采用AI视频分析技术，实现车辆违规、火灾、设备故障等异常情况的自动识别与预警，接入远程运维平台，实现实时监控与远程故障排查，解决偏远隧道运维难、故障响应慢的问题。升级烟感、温感传感器，采用智能联动控制模块，将消防水泵、排烟风机、应急照明、交通管控等设备接入智能管控平台，实现火灾早期识别、自动预警与设备联动，缩短应急响应时间，提升消防保障能力。更换老化的变压器与电缆，采用智能变压器，配备低温抗冻型柴油发电机，安装电压、电流传感器，接入智能管控平台，实现供配电系统运行状态的实时监测、故障自动报警与备用电源的自动切换，解决冬季备用电源启动困难、供电不稳定的问题。



图1 新疆公路隧道机电系统智能化改造框架图

3.2.3 地域适配性优化改造

结合新疆极端气候、多风沙的特征,额外开展适配性优化改造,确保设备稳定运行。对所有智能设备进行低温防护处理,设备外壳采用防寒材质,电子元件选用耐低温型号,配备加热装置,确保设备在-40℃环境下正常启动与运行。对风机进风口、传感器、摄像头等设备加装风沙防护罩,定期自动清理风沙,避免风沙侵入设备内部,减少设备故障。在偏远隧道部署信号放大器,采用5G+北斗双模通信,确保监控数据、设备运行数据的实时传输,解决通信信号薄弱的问题。

4 案例验证

4.1 实验设计

为验证智能化改造方案可行性与优越性,选取新疆G30连霍高速果子沟特长隧道(4.3公里,2011年建成,机电老化,地处天山,气候恶劣)为案例,用MATLAB/Simulink构建模型,结合实际参数模拟改造前后机电系统运行,重点模拟通风、照明等指标。设置冬夏温度、风沙日数等仿真参数,从运行效率、能耗、运维、安全4项核心指标对比改造效果。

4.2 案例验证结果

案例验证结果表明,本文提出的新疆公路隧道机电系统智能化改造方案全方位、深层次地适配新疆极端气候、多风沙、偏远路段的复杂工况。

4.2.1 改造方案的适配性强

本文提出的智能化改造方案,在低温的防护方面进行了保温处理,在通风系统的入口处安装了高效的风沙过滤装置、采用了抗干扰能力强的通信设备和多通道冗余通信技术改造,解决了新疆极端环境下机电设备冻损、风沙堵塞等问题,从而提高机电设备运行的稳定性。

4.2.2 运行效率显著提升

智能化改造方案构建了智能管控平台与五大智能子系统的协同联动体系,能够实时采集和分析隧道内的各种数据,实现了机电系统的精准调控,且现了信息的共享和协同工作,调控响应时间缩短,提高了隧道的通行效率,从而更好地满足新疆跨区域交通顺畅通行的需求。

4.2.3 能耗与运维成本大幅降低

本文提出的智能化改造方案,通过采用一系列先进的技术,有助于降低机电系统的能耗,例如采用LED智能调光、AI变频通风等技术,可以使得照明系统根据实际的需求,对亮度进行合理的调整,LED智能调光系统可以节省电能,避免不必要的能源浪费。远程运维平台的搭建实现了对隧道机电设备的实时监控和远程管理,提高运维效率的同时降低运维成本。

4.2.4 安全保障能力显著增强

AI视频分析利用高清摄像头和先进的图像识别算法,可以实时监测和分析隧道内的车辆以及行人情况,结合智

能消防联动等技术的应用,实现了异常情况的自动识别,且在突发异常情况时能够快速响应,有效防范了交通事故与火灾风险,为隧道内人员的生命财产安全提供了可靠保障。

5 结论与展望

5.1 结论

本文围绕新疆公路隧道机电系统智能化改造与运行效率提升展开研究,得出以下结论:

①当前新疆公路隧道机电系统普遍存在一些不足之处,例如智能化应用水平不高,设备逐渐老化、能耗问题较高,运维难度较大等。并且对机电系统正常运行造成影响的相关因素,包括偏远路段多风沙、极端气候。

②为了解决机电系统存在的问题,紧密围绕新疆的地域气候筛选出的AI智能变频通风、LED智能调光、AI视频分析、远程运维等核心技术,以便能够为新疆公路隧道机电系统的智能化改造提供了可靠的技术支撑。

③构建的“一个管控平台+五大智能子系统”智能化改造方案可以提高机电系统的运行效率,降低能耗以及设备故障率,同时也减少了人工的巡检成本。因其针对性强、可行性高,能够完全达到改造目标,为新疆公路隧道机电系统的智能化升级提供了切实可行的路径参考。

5.2 展望

虽然本文的研究在推进新疆公路隧道机电系统智能化方面取得了一定的应用成果,但是仍存在一些不足之处,为了可以持续推动公路隧道机电系统智能化水平的提高,在未来的研究中,可从以下多个关键方向进行深入的探讨与分析:

①充分围绕不同区域的地域特点进一步优化智能调控算法,运用大数据分析和机器学习技术构建差异化的智能化调控模型,提升改造方案在不同区域隧道中的针对性与适配性。

②公路隧道机电系统中的应用中引入数字孪生技术,构建公路隧道机电系统数字孪生模型,以便能够实时模拟设备的具体运行状态、提前预测设备可能出现的故障类型和时间以及全生命周期的管理,进一步提升运维智能化水平。

③组织国内的科研机构、高校和企业加强智能设备的国产化研发,研发适配性更强、成本更低的本土智能设备,通过国产化研发的突破降低改造与运维成本,推动智能化技术在新疆公路隧道中的广泛应用。

④为了确保智能机电系统能够长期稳定运行,构建智能化的改造长效机制,注重对运维人员的专业培训,邀请行业内的专家进行授课与指导,从而提高运维人员的专业技能水平与智能化操作水平,确保智能机电系统长期稳定运行,通过建立智能化改造长效机制助力新疆丝绸之路经济带核心区交通基础设施高质量发展。

[参考文献]

[1]沈湘萍,王霄,马煜磊.“互联网+”高速公路运营与服务智能化生态系统构建[J].公路交通科技(应用技术)

- 版),2018,14(12):320-323.
- [2]崔棧.机电设备管理的信息化技术应用探讨[J].科学与信息化,2023(6):28-30.
- [3]王伟.浅谈机电一体化技术发展[J].青年文学家,2011(24):320.
- [4]高奎刚.智能化技术在高速公路监控系统中的应用[J].交通世界,2013(16):126-127.
- [5]张小琴.浅谈机电一体化的科学性和先进性[J].陕西教育(教学版),2012(20):114-115.
- [6]张亦洋.高速公路机电设备的智能化管理研究[J].建材与装饰,2019,0(24):295-296.
- [7]黄锐.高速公路机电系统的信息化维护分析[J].运输经理世界,2023(3):155-157.
- [8]孟斌.高速公路机电系统智能化管理与维护研究[J].运输经理世界,2025(2):142-144.
- [9]郭俊.高速公路机电设备管理信息化建设构想[J].科技风,2014(14):263-263.
- [10]程沁斌.浅析高速公路机电系统维护的信息化管理[J].数码世界,2020(2):222-222.

作者简介：陈宇（1986.7—），男，高级工程师，就职新疆交通规划勘察设计研究院有限公司智能科技分公司，从事智能交通方向的工作。