

高速公路隧道通风照明系统运维管理研究

龙明杰

广西交通投资集团有限公司梧州高速公路运营有限公司平南分公司, 广西 梧州 530000

[摘要]高速公路隧道运营里程持续增长, 通风照明系统作为核心机电设施, 其运维管理水平直接影响行车安全与能源消耗。针对系统故障频发、能耗偏高、维护效率低下等问题, 从系统构成、运行现状、关键技术及管理优化四个维度展开研究。基于隧道污染物运移机理与视觉适应性理论, 分析了通风与照明系统的协同运行机制。结合现行运维管理模式, 归纳了风机故障、灯具光衰、传感器漂移等典型故障类型及其成因。围绕区域控制器联网监测、智能调光控制、故障诊断等技术路径。研究表明, 构建数据驱动的运维管理体系、完善设备巡检机制、强化应急保障能力, 可有效降低系统故障率并提升运营效益。

[关键词]高速公路隧道; 通风系统; 照明系统; 运维管理

DOI: 10.33142/sca.v9i6.19814

中图分类号: U453.7

文献标识码: A

Research on the Operation and Maintenance Management of Ventilation and Lighting Systems in Highway Tunnels

LONG Mingjie

Pingnan Branch of Guangxi Communications Investment Group Wuzhou Expressway Operation Co., Ltd., Wuzhou, Guangxi, 530000, China

Abstract: The operating mileage of highway tunnels continues to grow, and the operation and maintenance management level of ventilation and lighting systems, as core mechanical and electrical facilities, directly affects driving safety and energy consumption. Research is conducted from four dimensions: system composition, operational status, key technologies, and management optimization, to address issues such as frequent system failures, high energy consumption, and low maintenance efficiency. Based on the transport mechanism of tunnel pollutants and the theory of visual adaptability, the collaborative operation mechanism of ventilation and lighting systems was analyzed. Based on the current operation and maintenance management mode, typical fault types and their causes such as fan failure, light attenuation of lamps, and sensor drift have been summarized. Surrounding the technical paths of regional controller networking monitoring, intelligent dimming control, fault diagnosis, etc. Research has shown that building a data-driven operation and maintenance management system, improving equipment inspection mechanisms, and enhancing emergency support capabilities can effectively reduce system failure rates and improve operational efficiency.

Keywords: highway tunnels; ventilation system; lighting systems; operation and maintenance management

引言

到 2025 年, 中国公路隧道数量达到 28724 座, 总里程超过 3259 万延米, 隧道机电系统的规模和复杂程度不断增大。通风系统主要用于排除车辆尾气、控制有害气体浓度并改善洞内空气环境, 照明系统保证驾驶员的视觉安全, 两者都是隧道机电设施的主要部分。但是目前的运维管理存在着诸多难题, 照明系统存在过量照明、调光能力不足等状况, 运营电费不断攀升, 通风系统存在维护效率低、能耗偏大、洞内空气质量难以实时精准控制等问题。行业规范标准滞后、维护技术水平低下的问题又加大了运维的困难。在智慧交通和绿色低碳发展的双重背景下, 创

建起系统的、智能化的运维管理方案成为行业急需解决的重大问题。

1 高速公路隧道通风照明系统概述

1.1 通风系统组成与功能

高速公路隧道通风系统的主要功能就是, 在发生火灾时迅速将隧道内的烟气和一氧化碳排出隧道外, 保持隧道内空气的清新。主要污染物为一氧化碳、氮氧化物、烟尘, 按照《公路隧道通风设计细则》(JTG/TD70/2-02-2014) 规定, 正常交通情况下 CO 浓度不大于 250ppm, 烟雾透过率不大于 0.0070m^{-1} 。通风系统是由通风机、风道和风口、控制系统、传感器网络等组成。按照规范要求, 用区

域控制单元（本地控制器）来完成通风设备的自动控制，即污染物浓度检测、风机启停控制、状态反馈等模块。根据风机种类的不同，隧道通风常用的风机有轴流风机和射流风机两种。轴流风机风量大、全压高，适合于长隧道以及需要强制送排风的横向或半横向通风方式，一般安装在专用风井或者风道内。射流风机体积小、安装灵活、投资成本低，沿隧道拱顶或侧壁纵向布置，依靠高速喷射气流推动隧道内空气流动，适合于纵向通风方式，是目前中短隧道和交通量较小路段最常用的一种风机类型。按照《公路隧道用射流风机》（JT/T1448-2022）标准，射流风机电机的防护等级不得小于 IP55，绝缘等级不得小于 H 级，在 250℃ 高温下可以正常可靠工作 60min。从通风方式上讲，纵向通风采用射流风机沿隧道方向推送气流，投资小、维护方便，应用最广；横向通风利用独立的送风道和排风道进行均匀换气，适用于长隧道和交通量大的路段。通风系统控制逻辑就是用检测到的浓度与阈值进行比较，当污染物浓度超过限值的时候，自动启动风机稀释。按照《公路隧道设计规范第二册》（JTGD70/2-2014）的规定，通风控制要保证电机不能频繁启闭造成喘振，风机控制周期不得小于 10min，应该先启动累计运行时间最短的风机，每台风机之间间隔启动且启动时间间隔不得小于 30s。

1.2 照明系统组成与功能

隧道照明系统设计目的就是给驾驶员提供连续、均匀、无眩光的视觉环境。隧道照明要解决“黑洞效应”和“白洞效应”，对入口段、过渡段、中间段和出口段的亮度设计提出不同的要求。按照 JTGD70/2-2014 的规定，隧道照明的设计要达到路面平均亮度、路面亮度总均匀度、路面中线亮度纵向均匀度、眩光控制等目的。照明系统的设计要考虑到隧道的长度、路面的种类、设计速度、交通流量等各方面因素，进行光源光色的选择、灯具型号的选择、诱导照明的设计、控制系统的设置，从而提高驾驶的安全性和舒适性，降低运营成本。主要设备有照明灯具（以

LED 为主）、配电箱、控制柜、亮度检测器和通信模块。LED 灯具光效高、寿命长、调光性能好。入口段使用大功率灯具来辨识路况，中间段基本照明保持原有的基础照度，出口段设置过渡照明来减小亮度反差。

1.3 通风与照明系统协同关系

按照 JTGD70/2-2014，隧道内烟雾浓度（VI 值）过高时会导致能见度下降，此时通风系统应开启排烟，照明系统应根据烟雾浓度检测值来维持或者提高亮度以保证安全，而两者能耗都比较高，在节能控制方面有协同优化的空间。从系统整合的角度来说，通风和照明系统可以共享车流量、车速、能见度这些环境监测数据，从而达到联动控制的目的。车流量较少的时候可以同时减小通风量和照明亮度，发生事故或者火灾的时候，通风排烟和应急照明要共同发挥作用，保证人员疏散和救援作业。

2 系统运行现状与问题分析

2.1 常见故障类型与成因

按照《公路隧道养护技术规范》（JTG H12-2015）的养护分类标准，隧道通风系统最常见故障首推风机轴承损坏，占通风故障约 40%，表现为异响振动、过载过热停机，诱因为隧道潮湿、尾气油污附着及间歇启停导致轴承缺油卡死。其次为 CO/能见度传感器积灰受潮，占 25%~30%，造成数据漂移、频繁误报，引发风机无序启停。此外，风机出力不足、风量不够多源于叶片积灰结垢及轴承阻力增大。

照明系统中 LED 灯具的理论寿命可以达到 5 万 h 以上，但是实际使用中驱动电源先失效的现象比较常见。隧道内振动、高温、湿度变化等都会使电子元器件老化变快，灯具提前报废。另外，亮度检测器探头被灰尘遮盖之后，检测值小于实际亮度，从而导致控制系统出现误判现象，进而造成中间段照明不够或者入口段过亮的情况发生。

2.2 运维管理中存在的突出问题

当前隧道通风照明系统运维管理存在的主要问题可

表 1 高速公路隧道通风照明系统常见故障类型与成因

故障类别	故障现象	主要成因
通风机故障	风机异响、风量不足、电机不转	轴承磨损、叶片积尘、电机烧毁
风道及风口故障	局部漏风、末端风量不足	风道破损、连接件松动、密封老化开裂
照明灯具故障	灯具不亮、频闪、亮度不均	灯珠损坏、驱动电源失效、密封老化进水
光衰超标	照度低于规范要求	灯具老化、散热不良、质量缺陷
传感器故障	检测数据异常或中断	探头污染、线路老化、零点漂移
通信与网络故障	远程监控中断、控制失效	光纤断连、交换机故障、协议不匹配
供配电故障	设备断电、电压异常	空开跳闸、线路短路、防雷失效

以概括为五个方面,第一,巡检维护不到位。部分管理单位没有形成标准化的巡检制度,设备检查依靠人工经验,漏检现象时有发生。风机、灯具处于高空或者侧壁,巡检难度大,使维护盲区更加严重。第二,故障响应缓慢。故障响应机制包含故障检测和诊断、故障处理与修复、预防和控制等环节。目前的模式大多为故障后的维修,缺少预防性维护的能力,修理时间较长。第三,备件管理不规范。灯具型号繁多,驱动电源参数千差万别,备件储备没有统一的标准。紧急故障时由于备件不匹配或者短缺不能及时修复,导致设备停运时间延长。第四,技术不均衡。利用空气流速智能检测、风机状态实时监测、环境参数自适应调节等技术手段,可以实现通风系统自动化的管理。但大量隧道仍采用老旧控制系统,技术升级滞后。第五,数据利用率低。大多数隧道已经部署了监控系统,但是采集到的数据大多只用作实时报警,没有深入分析和趋势预测的能力,不能支撑预防性维护决策。

3 通风照明系统运维管理关键技术

3.1 通风设备运行监测技术

通风设备运行监测是保证系统可靠性的根基。按照《公路工程质量检验评定标准第二册机电工程》(JTG2182-2020)以及《公路隧道通风设计细则》对现代监测技术进行系统的研究,主要是对风机状态的跟踪、空气质量检测和风道完整性评价这三方面展开探究。风机状态实时追踪技术就是在风机本体上安装振动传感器、温度传感器和电流检测模块,对电机轴承温度、振动幅值、运行电流进行实时监测。当监测参数超过设定的阈值时,系统会发出报警信号,并把故障特征记录下来,给维修决策提供依据。依据相关标准,射流风机振动限值应符合规定,在250℃高温下应能正常可靠运转60min。振动频谱分析可以发现轴承磨损、叶轮不平衡等早期故障的征兆,使维修工作由“事后维修”转变为“状态维修”。利用性能曲线监测通风管路故障是成熟的方法,通过实测风机风量、风压参数,与标准性能曲线比较,根据偏离程度来判断管路是否堵塞、漏风等。按照JTG2182-2020,射流风机安装完毕后要进行试运行,检验其轴向推力、出口风速和噪声是否满足设计要求。通风效率优化控制要符合规范要求,电机不能频繁启闭造成喘振,风机控制周期不小于10min,先启动累计运行时间最短的风机来达到磨损均衡的目的,每台风机之间间隔启动,启动时间间隔不小于30s。通风区域控制单元要有故障自诊断能力。沿隧道纵向布置多个气体传感器,绘制出污染物浓度分布图,根据污染物浓度分布图来改变各个区段风机的启停组合以及运行转速,在

保证空气质量的前提下降低能耗。

3.2 照明智能调光控制技术

照明控制技术可以保证隧道运行节能、安全可视。根据《公路隧道设计规范第二册》(JTGD70/2-2014)第六章第八节的规定,照明控制应具备手动控制功能,宜采用自动控制,以手动为备用;照明区域控制单元应具有模块化结构、现场手动和编程控制功能、亮度数据采集处理和故障自诊断功能。无级调光技术是用PWM或者0-10V信号来调节LED灯具的输出功率,从而达到0%到100%连续平滑调光的目的,克服了传统分级调光精度低、亮度忽明忽暗的缺点。灯随车走自适应按需照明技术,把毫米波雷达和洞外亮度感知融合起来,创建起“感-算-控”一体化系统,车辆靠近的时候自动开启前方照明,离开的时候动态调节降低,无车时段保持最低安全照度,综合节电率可达到30%~60%。可变色温控制技术就是调节灯具的相关色温(CCT)来适应隧道外部环境的变化,从而达到二次节能和提高驾驶舒适性的目的。应急和诱导照明按照JTGD70/2-2014第6.7节的规定,长度大于500m的隧道应设应急照明系统,中断时间不大于0.3s。诱导标沿侧壁连续设置,成视觉参照带。

3.3 机电设备故障诊断技术

机电设备故障诊断技术是提高运维效率的主要保证。依据《公路隧道养护技术规范》中关于机电设施养护的分类(经常检修、定期检修、应急检修、专项工程),要采用多种诊断手段相结合的方式。基于规则的故障诊断是目前使用最广的方法。将常见的故障现象和原因形成专家规则库,当监测系统检测到异常数据时,会自动匹配到规则库中相应的故障原因和处理建议,适合于灯具不亮、风机电流异常等有明显场景的故障。基于数据驱动的故障诊断用机器学习算法对历史运行数据进行分析,找出设备由正常到失效的发展规律。经过训练的分类模型可以对实时数据进行故障预判,在故障发生之前发出预警,适合于光衰趋势预测、风机剩余寿命评估等场景。建立故障案例库,记载设备信息、环境状况、维修过程和更换部件等,可以给同类故障诊断提供参照。远程诊断技术依靠物联网平台把现场监测数据实时传送到云端,由专家团队远程判断,可以大大降低偏远山区隧道人员往返的成本,缩短故障确认的时间。

4 运维管理优化与保障措施

4.1 建立健全运维管理体系

运维管理体系是保证通风照明系统长久稳定运转的根基^[1]。依据《公路隧道养护技术规范》(JTGH12-2015)

的要求,隧道养护质量应达到相应养护等级标准,机电设施技术状况评定应满足规定要求。体系构建的主要内容有制度框架、责任分工、流程规范和考核机制这四个部分。从制度框架上制定出隧道通风照明系统运维管理规程,对设备巡检周期、维护作业标准和故障响应时限做出规定。在责任划分上创建起管理单位、运维班组、现场操作人员三级责任制,把设备完好率、故障修复及时率这些指标分解到岗。从流程规范角度出发,依据 JTG2182-2020 中的分项工程划分,对巡检、保养、维修等工作编写标准化指导书,使作业质量有章可循。考核机制上把运维质量同绩效挂钩,定时开展设备完好率,能耗水平等指标的统计分析及考核通报。

4.2 完善设备巡检与维护机制

设备巡检属于发现隐患、防止故障的第一道防线。根据隧道环境复杂的特点,推行人工巡检和智能监测相结合的复合巡检方式^[2]。人工巡检分为日巡检、周巡检、月巡检、年检四个周期,分别编制检查清单。日巡检主要检查灯具的亮灯情况、风机运行声音、控制柜的状态,周巡检增加探头清洁和传感器校准,月巡检对风机振动、电流、温升进行定量检测,年检系统对风机进行效率测试、照度测量、绝缘电阻试验。智能监测用物联网技术可以对隧道环境和设备状态进行实时监测,平台自动记录运行数据,当参数出现异常的时候发出报警,并且产生维修工单,从而形成起异常发现、任务派遣、维修执行、结果回馈的闭环管理。建立设备全生命周期档案和光衰跟踪台账,给预防性更换提供依据。

4.3 完善应急处理与安全保障机制

依据《公路隧道设计规范》的消防要求,应急预案分为总体预案和专项预案两层,分别确定组织机构和响应程序,对通风失效、照明全部熄灭、供电全部中断等典型情况的处置办法做出规定^[3]。应急设备的保障上,应急照明应使用 EPS 或者 UPS 供电,蓄电池组要定期做容量测试或者放电试验,保证切换时间满足 JTG 2182-2020 的要求。按照规范要求,射流风机在 250℃ 高温环境下可以正常可

靠地工作 60min,反向效率不得小于 95%。风机安装时应设置安全吊链做二次保护,其承载力不得小于风机及附件自重的 15 倍。双路供电和柴油发电机组需定期带载试验,保证市电中断时自动切换。每半年开展一次专项应急演练,检验预案的可行性并加以修订完善。实行 7×24h 值班制,规定故障处理的时限,照明全灭等严重故障到场时间要严格按照合同规定的时间进行限定。对同型号电机、驱动电源、控制器等关键备件实行常备库存,并和设备厂家建立应急联动机制。

5 结语

高速公路隧道通风照明系统运维管理属于一个包含技术、管理、人员等诸多要素的系统工程。从系统构成和运行特点入手,对目前运维管理中出现的主要问题进行了分析,主要有巡检不到位、故障响应慢、技术手段落后等。对通风设备监测、照明智能调光、机电故障诊断这三个关键技术进行研究,提出提高系统可靠性和节能性的技术途径,从管理体系、巡检制度、应急保障三个方面提出管理改进措施。研究发现,创建“数据监测+规范控制+预防维修”的运维管理机制,是达成隧道通风照明系统高效、安全、绿色运作的可行办法。随着区域控制器、无级调光与自适应照明、自动诊断等技术的应用不断深入,隧道机电系统的运维管理也将会向着预测性维护、自适应控制、少人值守方向发展。今后还可以对多系统协同优化算法、设备剩余寿命预测模型、全生命周期成本分析等做进一步研究。

[参考文献]

- [1]李文,矣靖.高速公路隧道机电系统维护管理[J].云南水力发电,2024,40(S2):123-126.
- [2]黄伦松.智能检测技术在高速公路隧道通风系统维护中的应用研究[J].企业科技与发展,2025(3):92-95.
- [3]靳德富.高速公路隧道照明系统智能控制技术[J].交通科技与管理,2024,5(12):5-7.

作者简介:龙明杰(2000—),男,汉族,广西平南人,本科,任职于广西交通投资集团有限公司梧州高速公路运营有限公司平南分公司,研究方向为高速公路机电维护。