

城市轨道交通全自动运行线路隧道区间水灾及外部入侵安全监测技术

黄 俐

(南宁轨道交通集团有限责任公司, 530029, 南宁//正高级工程师)

摘 要 以南宁轨道交通5号线(以下简为“5号线”)为工程背景,提出了FAO(全自动运行)状态下影响5号线隧道区间安全的关键因素,对水灾和隧道区间外部入侵监测防控进行了分析,总结了当前业内对于此类问题的解决方案。通过采用视频智能分析、阵列光纤光栅传感、大数据分析等技术,搭建城市轨道交通线网智慧水灾预警系统和基于光栅阵列的隧道区间外部入侵智能监测系统,可以实现城市轨道交通FAO线路隧道区间水灾及外部入侵等安全状态的在线监测及预警。

关键词 城市轨道交通;全自动运行线路;隧道区间;火灾;外部入侵;安全监测技术

中图分类号 X924.3:U231

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.02.031

Safety Monitoring Technology of Tunnel Interval Flood and External Invasion of Urban Rail Transit FAO Line

HUANG Li

Abstract Taking Nanning Rail Transit Line 5 ('Line 5' in short) as the engineering background, the key factors affecting the tunnel interval safety of Line 5 under FAO (fully automatic operation) mode are discussed, the monitoring and prevention of flood and tunnel interval external intrusion are analyzed, and solutions currently available in the industry are summarized. By using video intelligent analysis, array fiber grating sensing, big data analysis as well as other technologies, the intelligent flood early warning system of urban rail transit line network and the intelligent monitoring system of tunnel interval external intrusion based on grating array could be built, which enables the online monitoring and early warning of rail transit FAO line safety status including tunnel interval flood and external intrusion.

Key words urban rail transit; FAO line; tunnel interval; fire; external intrusion; safety monitoring technology

Author's address Nanning Rail Transit Group Co., Ltd., 530029, Nanning, China

2021年7月国务院安全生产委员会、国家防汛抗旱总指挥部印发了《关于切实加强城市安全工作的通知》,要求深刻吸取一些城市因强降雨和安全生产问题发生的重大事故教训,强化城市建设和市政设施建设运行安全监管。南宁轨道交通集团有限责任公司积极响应上级单位政策与号召,结合南宁轨道交通5号线(以下简为“5号线”)安全运营需求,重点关注FAO(全自动运行)状态下隧道区间水灾及外部入侵的安全状态在线监测及预警问题。经分析与总结国内外的相关案例,发现目前大多采用的类似水位传感器、全站仪、三维激光扫描等的传统手段,均无法实现隧道区间水灾及外部入侵的实时在线监测及预警功能。因此,整合了行业内科研机构及企业的相关资源,针对上述问题进行了探索研究。本文通过采用水位传感和视频智能分析、阵列光纤光栅传感和大数据分析等技术,搭建城市轨道交通线网水灾智慧预警系统和隧道区间外部入侵智能监测系统,以保障城市轨道交通FAO线路的运行安全。

1 南宁轨道交通5号线概况

5号线采用了GOA4(无人干预列车运行)级FAO系统,于2021年12月16日开通运营,是华南地区首条开通的FAO线路。5号线采用了现代计算机、通信、控制与系统集成等的先进技术,可实现列车站间行驶、到站停车、开关车门、发车离站、回库、洗车、休眠和唤醒等全过程的自动运行,其可靠性和效率相比有人驾驶线路显著提高。

2 FAO系统下列车运营安全风险因素分析

文献[1-2]将列车运行的GOA(自动化等级)划分为5级,其中,GOA4是真正意义上的FAO。GOA4级FAO系统对车辆、牵引控制、信号控制、通

信、站台门、综合监控等系统都提出了更高标准的要求,以便在突发异常情况下,可以尽量降低故障对列车运营和乘客生命安全带来的严重影响。

GOA4 模式下由于列车上无司机值守,对运营安全影响较大的因素主要包括信号系统故障、站台门/车门故障、乘客临时紧急状况处置、轨道障碍物检测系统故障、隧道区间的火灾和水灾及外部入侵等。目前对于各系统的故障都有后备降级及应急处理预案,对于火灾的防控亦有较成熟的监控和预防措施。但对于隧道区间水灾以及外部入侵的监测防控,目前业内还缺乏成熟的措施和手段,而 GOA4 模式下对于区间水灾及外部入侵的监测和预警显得尤为重要。

2.1 水灾

针对车站和正线区间积水,目前一般采用基于潜污泵浮球控制器监测液位的方案,而出入口、矮风井处则不设置水位探测设备。水位报警仅能反映泵房集水井内的液位高低,无法判断出入口、隧道内是否存在积水及其深度。隧道区间内摄像头的布设目前也未覆盖到各区段的最低点,当发生汛情的情况下,调度人员无法第一时间了解现场情况。

GOA4 模式下无司机对区间进行瞭望,无法及时发现隧道区间内是否存在积水过高的异常情况。如果区间积水过高而又无法及时发现,会导致自动运行的列车无法及时停运,出现危害乘客生命财产安全的严重事故。目前城市轨道交通中此类事故发生的频率较大、概率较高,尤其 2021 年河南郑州“7·20”特大暴雨灾害发生后,国务院安全生产委员会和国家防汛抗旱总指挥部联合发布了《关于切实加强城市安全工作的通知》,要求全国的轨道交通建设和运营单位展开自查和整改措施。

2.2 隧道区间外部入侵

根据我国城市轨道交通开通运营重大安全事故通报来看,隧道区间外部入侵带来的运营安全影响最为频繁和重大。虽然目前各城市都制定了轨道交通保护条例及审批、巡查制度等,但随着城市轨道交通线网越来越密、分布越来越广,城市的高速建设对其运营安全带来的影响亦越来越大。越来越多的勘探工作在城市的各处角落开展,不少都位于城市轨道交通的红线保护区内。尽管要求这些地质勘探单位按照规定必须进行作业申请报备,但作业单位的素质参差不齐,仍给城市轨道交通运营安全带来巨大的风险。例如,在 2021 年,南宁、深

圳、成都、广州等城市均出现了因外部单位违规施工导致城市轨道交通隧道区间被击穿等重大安全事故。类似的安全事故时有发生,仅仅依靠现有的技术手段和人工巡查方式难以及时发现和预防。

区间水灾及隧道外部入侵等事件严重威胁城市轨道交通运营安全,如发现不及时,将会给运营安全造成重大影响甚至灾难性后果。因此,迫切需要利用新技术和新方法,全方位、实时在线地对隧道区间内列车运行基础结构及运行环境进行安全监测及预警,从而整体提升城市轨道交通运营安全管理水平。

3 隧道区间水灾及外部入侵安全监测技术研究现状

3.1 隧道区间水灾安全监测技术研究现状

隧道区间水灾安全监测主要包括水情监测和给排水系统监测。水情监测是对水灾情况最直观的监视,给排水系统监测是对区间排水能力的监测。

依据 GB 50157—2013《地铁设计规范》^[3]的要求,给排水设备应在车站控制室显示设备运行、手动/自动、故障等状态及液位信息。目前,已建城市轨道交通线路通常均通过区间给排水的液位信息实现对隧道区间水灾的安全监测。给排水的液位信息一般通过液位传感器(如:浮球、超声波、激光)进行采集,并将其上传到综合监控系统进行监测。此类监测技术,如本文第 2.1 节所述,存在极大的安全风险。

城市轨道交通区间最低点排水能力一般按当地 50 年一遇的暴雨强度来设计和实施,给排水系统如能正常运行,可以有效防止水灾的发生。但目前对于给排水系统的功能检测主要采用人员定期巡检的方式,通过给排水设备启停测试仅能了解到设备的启停功能正常与否,无法监测到设备的排水能力,对于水灾的预防仍存在极大的风险。

因此,目前各城市轨道交通公司纷纷考虑对原有监测技术进行升级改造,如:增设区间摄像头、水位监测仪表等的数量;建设给排水在线监测系统;新建防汛防涝监控平台,与当地气象部门和防汛指挥平台进行联动,优化水灾情况下城市轨道交通停运疏散机制,细化并设定多级停运标准等措施。此外,国内针对水位监测技术也开展了基于视频图像的水位监测方法研究^[4],为城市轨道交通隧道区间水灾监测提供了参考。

3.2 隧道区间外部入侵安全监测技术研究现状

针对隧道区间外部入侵的监测技术,国内外目前主要通过对隧道区间结构的监测来判断可能存在外部入侵的隐患。文献[5]介绍了基于全站仪的城市轨道交通隧道自动化监测技术。文献[6]介绍了基于“BIM + GIS(建筑信息模型 + 地理信息系统)”的城市轨道交通安全监测技术。文献[7]将测量机器人和静力水准自动化监测技术应用于城市轨道交通既有车站和隧道区间的安全监测。此外,一些单位对三维激光扫描技术在隧道安全监测中的应用开展了较深入的研究。

上述几种监测技术手段在一定程度上解决了某些问题,但针对FAO状态下运营的隧道区间外部入侵问题较少涉及。由于运营隧道区间外部入侵事件存在偶然性和突发性,且通常其发生的时间持续性较短,再加上列车正常运营工作状态下一般的测量手段无法使用,因此,为了保证FAO状态下城市轨道交通运营安全的可靠性,亟待研究开发实时在线监测的智能系统。

4 城市轨道交通隧道区间安全监测系统平台

4.1 城市轨道交通线网水灾智慧预警系统

4.1.1 水灾智慧预警系统平台

水灾智慧预警系统平台由水位实时监测系统、泵坑排水监测及预警系统、视频监测及智能识别系统、水情态势推演系统、水灾应急辅助决策系统及智能分析管理系统等构成(见图1)。应用大数据智能分析、机器学习技术等,构建以区间为建模对象的水情预测系统,通过对给排水设备运行状态、区间视频监测信息、区间水位信息、水泵自身排水能力、天气气象等数据的分析挖掘,实现区间水情的短时、短期预测。在短时水情预测模型的基础上,结合天气气象信息及泵坑排水能力,构建突发水灾情况下的水情发展趋势推演仿真模型,将水泵运行情况与泵坑的水位变化情况进行匹配分析。当出现泵组全力运行而水位不仅未下降反而逐步走高的情况时,城市轨道交通线网水灾智慧预警系统发出紧急预警,触发应急预案,为各层级的应急处置及列车运行组织调整提供辅助决策。

4.1.2 泵坑排水监测及预警系统

通过对综合监控及BAS(环境与设备监控系统)进行改造,泵坑排水监测及预警系统借助车站

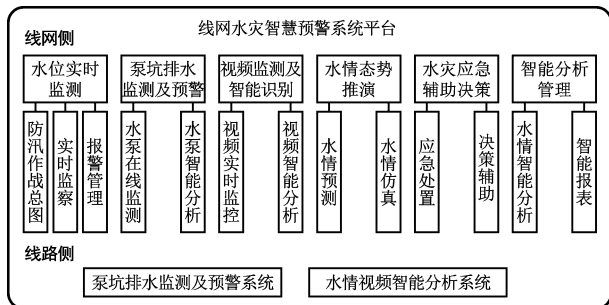


图1 城市轨道交通线网水灾智慧预警系统平台软件构成

Fig.1 Composition of platform software of urban rail transit line network intelligent flood early warning system

级及中央级综合监控系统的硬件、网络及软件平台,实现对该系统的集成。泵坑排水监测及预警系统实现了对水泵数据实时采集监测,并通过建模分析实现了水泵的远程巡检、排水能力分析、水泵的自诊断等功能,以保证突发情况下设备的正常运行。

4.1.3 水情视频智能分析系统

作为水灾智慧预警系统的一个重要组成部分,水情视频智能分析系统对视频监控系统进行了改造,即在各车站风亭、区间最低点等水情监察关键位置增加高清红外摄像头,实现对全线车站、区间水情的实时监视,由线路中央级CCTV(闭路电视)系统汇聚各车站水位分析视频流并转发给视频监测及智能识别系统。水情视频智能分析系统为视频监测及智能识别系统提供了所需的视频流数据,再由视频监测及智能识别系统对每路摄像头的视频数据进行分析建模,通过对水情监察视频图像进行智能分析,实现对区间水位异常情况的监测及报警。

4.2 城市轨道交通隧道区间外部入侵光栅阵列全时全域智能监测系统

城市轨道交通隧道区间外部入侵光栅阵列全时全域智能监测系统是以大容量光纤光栅阵列传感测量技术为基础,运用大数据技术分析判别外部入侵事件相关信息,从而进行预警并触发应急处置流程的一套城市轨道交通运营安全监测系统(见图2)。该系统能对长大区间内的振动信号进行全时全域监测,具备对轨道交通隧道结构全时全域安全监测的潜力,将成为解决轨道交通隧道结构安全监测的有效手段之一。

4.2.1 系统工作原理

基于光栅阵列的光纤传感技术可用于测量应变、温度及振动等物理量,能够适应较为恶劣的测

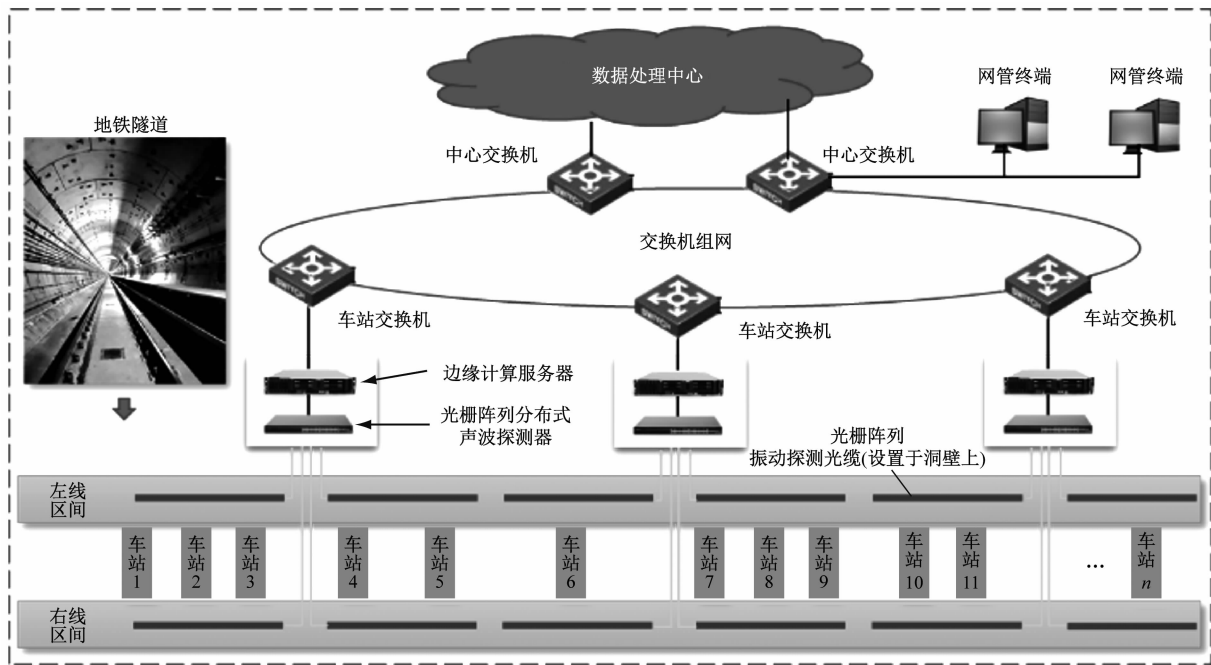


图2 光栅阵列全时全域隧道区间外部入侵智能监测系统

Fig. 2 Full-time and whole-area tunnel interval external intrusion intelligent monitoring system based on grating array

试环境,因此它被广泛应用于大型工程结构的静态或动态测量。

城市轨道交通隧道区间通常位于地面以下深达十几米到几十米,其线路总长亦有十几公里到几十公里不等;沿线红线保护区内危险施工作业项目存在偶发性、突发性以及高危险性,故若要实现隧道区间外部入侵实时在线监测及预警,对测量系统的可靠性、精确性、实时性等都提出了较高的要求。一般的分布式传感技术通常采用布里渊散射或拉曼散射等原理,很难实现高精度实时在线测量预警。将大容量超弱反射 FBG(光纤光栅)通过阵列方式组成传感网络,利用每相邻两光栅反射光同时到达干涉仪产生的干涉相位变化感知振动,这样既可实现探测光缆上任意位置的振动响应,同时也解决了分布式振动传感中的多点定位问题。

在1根基于阵列光栅干涉技术的光栅阵列振动探测光缆上可制备数万乃至数十万个光栅传感点。在城市轨道交通全线运营区间隧道洞壁敷设光栅阵列振动探测光缆,实时获取整个隧道结构的振动数据。利用光纤将测量数据传输至集中站布设的光栅阵列分布式声波探测器进行数据解调,再将其传输至边缘计算服务器进行数据预处理。将预处理后的数据通过网络传输系统传送至中心云平台数据处理中心,利用大数据和云计算分析最终结

果,并将监测结果反馈至用户界面。

当城市轨道交通的红线保护区内发生危险机械作业时,传感网络可以感知区间隧道光缆上任意位置的异常振动信号,通过大数据建模分析,及时预警并触发应急防范预案流程。

4.2.2 系统功能

城市轨道交通运营安全光栅阵列全时全域智能系统能够快速监测、分析城市轨道交通保护区红线范围内的外部入侵作业信号,并根据告警信息级别及时向用户推送告警信息,包括危险等级、作业类型、发生位置、发生时间及持续时长等。该系统可以解决人工巡查过程中发现隐患不及时、定位不精准等弊端,实现对隧道的全时全域在线监控,形成“随时发现、随时定位、及时处理”的高效处理机制,可有效提升轨道交通运营安全管理水平。

5 结语

针对 FAO 线路隧道区间水灾及外部入侵问题,本文提出城市轨道交通线网水灾智慧预警系统与隧道区间外部入侵光栅阵列全时全域智能监测系统,很好地解决了现有技术手段尚不能解决的困难,未来将在很大程度上有效保障5号线的全生命周期安全运营,同时亦可为轨道交通行业其他建设

(下转第145页)