

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2023.03.063

交通隧道智能巡检系统分析方法与应用研究

余剑青

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司深圳分公司, 广东 深圳 518000]

摘要: 为了高效率解决交通隧道巡检维护中人员响应速度慢,消息滞后,应急调度不及时等问题,通过分析交通隧道实际运维中出现的各类事故和灾害,建立了交通隧道事故和灾害预警模型,并据此提出了交通隧道智能巡检解决方案。该方案可实现隧道的火灾监测、交通预警和危化品泄漏处置等智慧运维巡检功能,提高交通隧道养护维修的效率以及管理水平的精细化程度。

关键词: 交通隧道;机器人;智慧隧道;运维平台;智能巡检系统

中图分类号: TN312+.8

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2023)03-0253-06

0 引言

据《2021年交通运输行业发展统计公报》的统计,截至2021年底,全国公路总里程有528.07万km,公路隧道23268处、2469.89万m,其中特长隧道1599处、717.08万m;长隧道6211处、1084.43万m^[1]。随着国内城市化的加速发展,交通隧道逐渐成为人们日常出行的主要通道,具有交通量大、车速高、隧道长等交通特征,交通隧道运行安全隐患和风险也相对增加^[2]。交通隧道由于空间封闭,可能造成洞内交通事故隐患及处置困难、火灾难于发现和危化品泄漏等严重影响交通隧道人员安全的问题。目前国内外交通隧道的巡检手段主要依赖人工和手持设备,如利用隧道内固定摄像头静态检测和人工日常巡检等手段,导致出现问题时很难及时到达现场,不但费时费力而且效率较低,有时还会出现漏检和错检,巡检报表生成周期长、数据混乱,因而有一定的局限性。近年来国内部分桥梁、大坝和滑坡等领域已经应用巡检机器人进行监测,但是针对交通隧道的巡检系统相对较少。随着交通压力的增大和交通隧道建设的迅速发展,传统的巡检手段已不符合目前长隧道和特长隧道的需求。交通隧道智能检测技术是未来的发展方向和应用趋势,综合大数据、人工智能、云计算、物联网、机器人、5G通信等前沿技术的交通隧道智能巡检技术是使隧道正常、安全、有序运营的重要保证。本文通过分析交通事故、火灾事故、危化品泄漏事故的灾害模型,创新性地提出了交通

隧道智能巡检解决方案。该解决方案可根据隧道运行数据信息和实时在线监测信息,生成科学合理的巡检指令来控制轨道巡检机器人运行,有效提升巡检工作效率和隧道管理水平。

1 交通隧道智能巡检系统功能需求分析

“交通隧道智能巡检系统”由轨道式巡检机器人、轨道、软件平台、供电平台、通信平台组成,通过部署在监控中心的管理平台,能够实时管理及控制机器人在线进行巡检任务作业,同时将巡检状态和结果通过桌面控制器传输到服务器,也可以通过移动客户端随时传送给管理人员,使其第一时间得到巡检报告及报警信息,管理人员则通过远程管理的方式对每台机器人的状态进行监控管理^[3]。系统具有巡检功能可定制、巡检效率高等特点,可满足交通隧道巡检要求^[4]。

根据交通隧道日常运维管理的实践经验,交通隧道运营安全的危险来源主要包括:火灾、交通事故、危险物品倾泻等突发事件。这些突发事件会造成人员伤亡、财产损失、车辆损坏、交通拥堵,影响人员及车辆的安全。需要通过事故树分析法与布尔代数原理对隧道火灾因素进行分析,建立交通隧道事故灾害模型,构建事故预防机制来分析交通隧道事故造成的影响与危险程度等因素^[5],从而使交通隧道智能巡检系统能够采取必要的应急措施和救灾行动,迅速控制灾情^[6]。因此,建立正确的交通隧道突发事件的分析模型具有十分重要的意义。

1.1 交通隧道交通事故分析

从交通隧道的交通流疏导的角度来看,一旦发生突发事件造成交通堵塞,进行交通流疏导可选择的疏

收稿日期: 2022-06-23

作者简介: 余剑青(1984—),男,硕士,高级工程师,主要从事工程设计工作。

导策略十分有限,将直接导致车辆绕行距离较长或交通中断。通常多要素共同作用是导致隧道交通事故发生的原因^[7],驾驶员、车辆、管理和所处环境任何一种要素出现状况,都会引起交通事故的发生。

交通隧道交通事故模型框图见图 1。

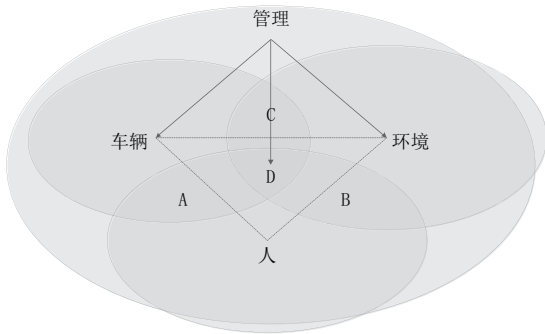


图 1 交通隧道交通事故模型框图

图 1 中:A 是车辆故障和人为错误而引发的隧道交通事故区;B 是人为错误与隧道环境不良而引发的隧道交通事故区;C 是由于车辆因素对隧道条件的破坏以及由隧道条件所造成的隧道交通事故区;D 是车辆、人、隧道综合引起的隧道交通事故区,是由于隧道环境不良和人为错误而带来的隧道事故。导致隧道交通事故发生的每个要素中,高效的日常巡检措施是减少隧道交通事故发生的主要因素之一。除了从车辆性能优化和道路驾驶辅助系统设置来提高驾驶员的操控水平、车辆的安全性能和隧道交通设施件辅助之外,对于驾驶员、隧道、车辆等环境要素的智能管理是决定隧道整体安全状况的要素之一。也就是说,事故发生与否的关键因素之一是隧道智能化管理的完善性。

1.2 交通隧道火灾事故分析

狭长半封闭是交通隧道结构的主要特点,火灾事故发生时,火灾造成的烟雾不易排出隧道,救援人员难以快速到达火灾区域,极易造成群死群伤事故。根据交通隧道的特点建立火灾事故模型,利用各种导致火灾事故因素之间的逻辑关系推导出基本事件之间的关系,这些事件又可以包含重复的因素,最后得出交通隧道火灾的事故模型,见图 2。

常用的交通隧道消防灭火设备主要包括自动喷淋装置和需要人工操作的消火栓等。为了有效达到消防灭火作用和充分效降低火灾事故损失,智慧管养及应急救援已成为现阶段研究的热点。对于交通隧道,除了设置火灾自动报警系统、排烟控烟系统、消防灭火系统之外,还需要根据交通隧道火灾事故模型合理地配置智能火灾巡检功能。

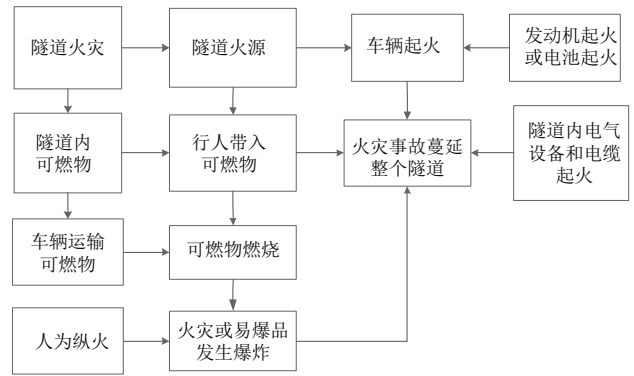


图 2 交通隧道火灾事故模型框图

1.3 交通隧道危化品泄漏事故分析

随着交通货运的快速发展,车辆运输的物品种类越来越多,货物中的危险品数量也在相应增加。在危化品的运输途中,发生泄漏事故是不可避免的。非交通事故和交通事故导致的交通隧道危化品泄漏存在 1:3 的比例关系。运输事故是引起危化品泄漏的最关键环节。运输事故导致危化品泄漏的主要原因有车辆受到外部物体撞击引起储存危化品的罐体破裂、遇到尖锐物体将罐体击破、外力挤压使得储罐破损等。危化品运输车辆交通隧道中通行时一旦发生意外,会导致危化品燃烧爆炸伤及车辆及人员,甚至导致隧道坍塌并可能产生有毒液体和气体外泄,导致人员伤亡,需要大量的救援力量,加之隧道交通不便等因素使得应急抢救工作更加困难。因此,加强对危化品车辆在交通隧道中发生泄漏事故及巡检方案的研究,对降低类似事故风险,增强交通隧道安全运维管理能力具有很强的实践意义。如果以“运输过程中危化品泄漏”为主要因素事件,可得到如图 3 所示的交通隧道危化品泄漏事故模型。该模型以车辆撞击导致储罐破裂、尖锐物将储罐击破、外力挤压导致储罐破损为事故模型主要因素。

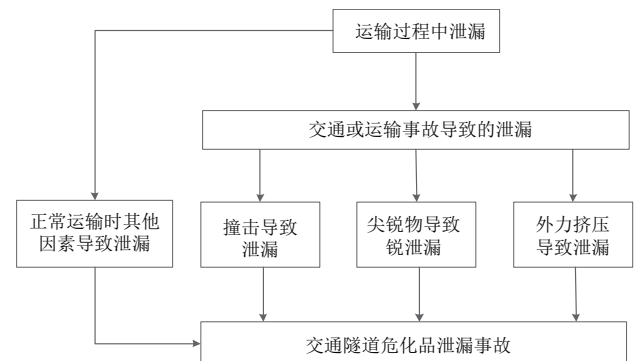


图 3 交通隧道危化品泄漏事故模型框图

2 交通隧道智能巡检系统功能应用解决方案

伴随着交通隧道车流量的迅速增加,交通隧道

运行安全隐患和风险也相对增加。为有效提升交通隧道运行的安全性,需要定期对交通隧道进行智能化巡检并在突发情况下及时响应,需要可替代人工完成隧道常规巡检任务,降低运维人员作业风险和劳动强度,提高隧道运营维护的自动化程度和智能化水平,节约交通隧道运营管理费用。交通隧道巡检解决方案是一套基于事故模型运算的可形成标准化的智能巡检程序,是快速响应和有效救援的基础数据信息保障,需要通过合理的设计、高效的操作系统以及可更新的运行机制来综合运行。巡检系统采用边缘计算,可以辨识和评估潜在在交通隧道事故发生的可能性以及发生过程、后果和影响严重程度。在此基础上,对管养机构的人员、技术、装备、指挥和协调等方面超前作出系统考虑。解决方案是对应急、巡检、救援等隧道事故处置能力的一个综合检验,通过解决方案可事先模拟系统的反应及救灾效果,检验隧道设备和人员是否足够,救援响应时间是否迅速,各救援单位路线考虑是否完备,事故应急救援的程序和现场指挥体系等是否有效,进而校验分析解决方案的不足和改进完善的措施。

2.1 交通隧道交通事故智能巡检解决方案

交通隧道交通事故的智能巡检技术能够为隧道管养部门的交通安全管理工作及交通事故应急处置起到较好的辅助作用。交通隧道交通事故智能巡检解决方案模型包括交通数据采集、交通预测预警、交通疏导策略分析、交通信息发布等。根据交通多要素共同作用是导致隧道交通事故发生的研究结果,结合隧道交通事故模型,构建了基于突变理论的交通事故预警分级模型,并建立了以交通流参数为主要预警指标的交通事故预警体系及其模型,形成的交通隧道交通事故智能巡检体系如图4所示。

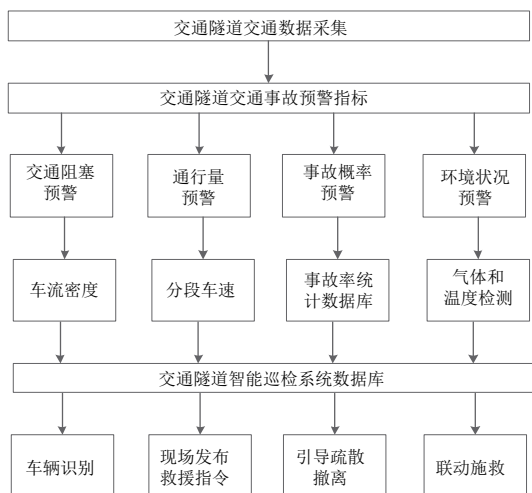


图4 交通隧道交通事故解决方案框图

交通预测预警建模响应策略是交通隧道交通事故巡检体系的重要组成部分,应重点从预测预警开展交通隧道事故巡检技术的研究。

2.2 交通隧道火灾事故智能巡检解决方案

交通隧道火灾燃烧规律不同于普通的建筑物,隧道中人员和车辆的疏散较普通建筑更加困难。根据交通隧道火灾事故模型,针对交通隧道内火灾蔓延规律和智能巡检系统的分析研究,制定交通隧道火灾应急预案和智能巡检方案。根据交通隧道内火灾的不同类型,利用数学模型分析法对火灾情况进行场景仿真,分析不同火灾场景交通隧道内的火灾产生规律,对防止火灾蔓延的措施进行模拟研究,进而分析智能巡检系统的运行逻辑,通过考虑火灾时系统正常运行的判据,建立起火灾时交通隧道引导人员疏散的模型,为智能巡检系统的鲁棒性提供技术支持,如图5所示。

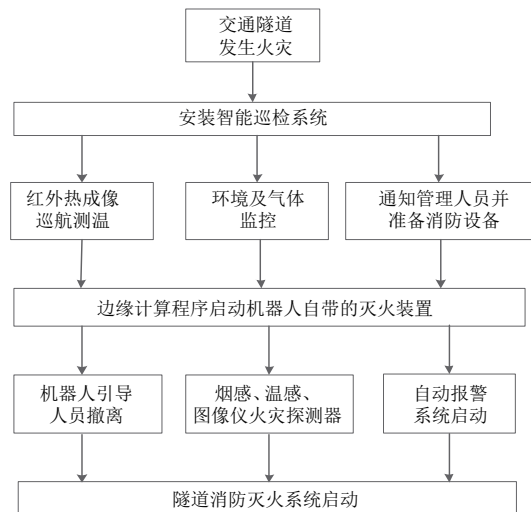


图5 交通隧道火灾事故解决方案框图

2.3 交通隧道危化品泄漏事故智能巡检解决方案

结合交通隧道危化品泄漏事故模型及危化品交通隧道运输事故规律,以跨学科的多维度归纳演绎法解析交通隧道危化品泄漏事故风险解决方案并提出智能巡检控制理论及方法。探讨交通隧道危化品泄漏事故分析模型,有助于降低危化品的运输风险。系统考虑交通型和非交通型事故引发泄漏的隧道特征、交通及车辆状况、驾驶人员和安全管理等修正因子,可得到交通隧道危化品泄漏事故解决方案,如图6所示。

交通隧道危化品泄漏事故解决方案主要包括以下范围:危化品运输信息,对运输活动的全过程信息进行采集分析,包括容器的规格容量,运输车辆、起点和终点、途经路线情况等;危险或触发事件的识

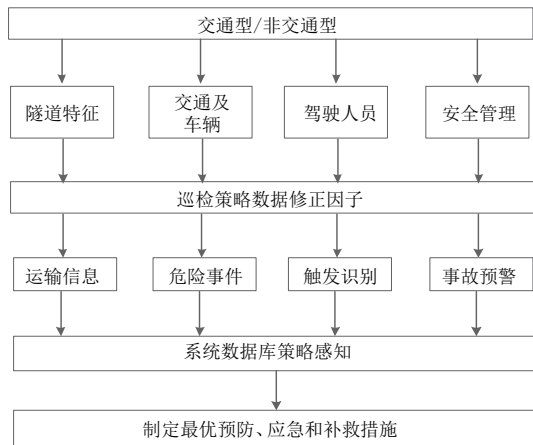


图6 交通隧道危化品泄漏事故解决方案框图

别,主要以日常巡检统计数据为基础,对道路运输过程的危险进行识别;事故警示,对以往发生的所有相关事故进行罗列,起到分析、警示和预防作用;防范模式,按危化品风险评价定义管控模式选择;模式选择,通过存储有多个重大类似事故的数据库,对当前事故进行相似度匹配;处置事故结果,根据数据库匹配结果预判具体事故造成的损失和伤害以及引发的其他后果;可能性计算,模拟计算事故发生的概率和频率;风险评估,根据事故后果进行风险估算;数据汇总,汇总后得出危化品运输的风险情况;评估数据应用,通过风险数据分析结果,严格按既定的危化品巡检策略执行;策略结果感知,计算机通过积累风险数据,选择制定最优预防、应急和补救措施等。

3 应用案例介绍

3.1 工程概况及设计依据

深圳市侨城东路北延通道工程北起福龙路,南至滨海大道,全线涉及龙华区、南山区和福田区,全长约 15.7 km。其中隧道长度约 13.9 km,最长段隧道约 6.6 km,道路等级为城市快速路,主线双向 6 车道,设计速度 60~80 km/h。

隧道机器人功能遵循《公路隧道养护技术规范》(JTG-H12—2015)的要求,实现对隧道内部机电设备、消防设施、土建结构、交通安全设施的日常运维巡检以及安全救援,具体包括隧道内部结构检查、设备巡检、事故侦测、安全防护、现场救援、设施防盗等几大功能。交通隧道智能巡检系统由轨道式巡检机器人、轨道、软件平台、供电平台、通信平台组成,通过部署在监控中心的管理平台,实时管理及控制机器人在线进行巡检任务作业,同时将巡检状态和结果通过桌面控制器传输到服务器,也可以通过移动客户端随时传送给管理人员,使其第一时间得到巡

检报告及报警信息,管理人员则通过远程管理的方式对每台机器人的状态进行监控管理,如图 7 所示。

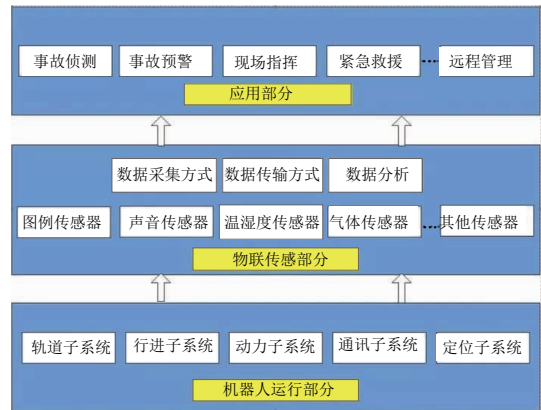


图7 交通隧道智能巡检系统运行框图

3.2 交通隧道智能巡检系统设计

交通隧道智能巡检系统基于智能巡检运维服务平台,由远程控制系统、无线通信系统及轨道巡检机器人本体功能结构组成,如图 8 所示。



图8 交通隧道智能巡检系统功能结构示意图

系统为金字塔式架构,通过远程控制系统对机器人进行指挥、控制、监视,并对巡检机器人上传的数据进行存储,管理人员可以通过远程控制系统对数据进行实时查询、检索与分析,并针对数据异常进行预警、提供决策支持,实现巡检全过程自动管理。机器人本体携带有红外热成像仪、高清相机、有害气体传感器等设备,以全自主或遥控方式,联动视频和雷达执行交通检测、基于红外热感应执行火灾检测、通过气体传感器执行有害危化品的气体检测,以及可见光检测和环境温湿度检测等任务,实现检测标准化、智能化、多样化。

远程控制系统通过无线通信装置与前端轨道巡检机器人进行通讯,无线通信系统采用 1.2G~2.4G 无线加密通信网络,每隔 500~1 000 m 部署一个定向网络天线,覆盖巡检机器人的全部活动区域。轨道巡检机器人为整个巡检系统的核心,由机器人本体、轨道以及辅助系统组成,其中辅助系统包括自动防火门、控制箱等,如图 9 所示。

交通隧道智能巡检系统采用可充电锂电池为巡检机器人供电,同时搭载电压监测组件,为系统提供

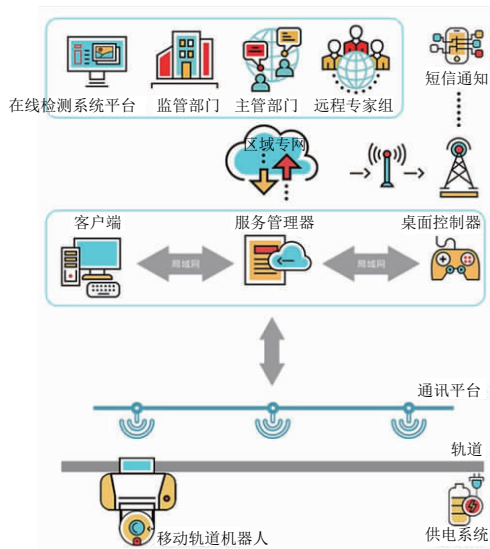


图9 交通隧道智能巡检系统供电及示意图

准确的电量评估。供电系统具备过流保护和熔断机制,当设备出现异常时,可以防止电流过大而损害电池。通过在同一段巡检线路上部署双机器人实现交替不间断巡检运行。当机器人电量低于安全阈值时,机器人内部搭载的电源管理组件会将机器人当前的电量状况上传至管理系统,若当时无紧急事件,机器人将返回充电桩进行充电,此时机器人处于待机状态;若出现紧急情况,机器人可随时结束充电而执行巡检任务。充电桩采用无线充电的形式,电源采用220 V市电,经滤波电路-载波电路-逆变电路将市电转化为谐振频率的交流电,通过发射线圈产生交变磁场,产生频率、电压均相同的电压,再经整流、滤波后为机器人充电。

3.3 交通隧道智能巡检轨道机器人设计

侨城东路北延通道隧道主线每 km 设置一个巡逻区间,一个巡逻区间布置 2 台轨道式机器人、2 台充电站,2 台充电站分别位于巡逻区间两端。当 1 台机器人充电时,另 1 台机器人进行巡检,实现交替式不间断巡检运行。机器人分为运行部分、物联传感部分、应用部分 3 大部分。机器人运行部分包括缆索子系统、行进子系统、动力子系统、通讯子系统、定位子系统 5 大子系统,这 5 大子系统是保证隧道机器人运行的基础,使其能沿隧道侧壁自由运动,便于收集隧道内部运行过程中产生的各种数据;物联传感部分包括图像传感、声音传感、温湿度传感、有害气体传感、红外热成像传感、激光三维视觉传感、能见度传感等多种传感方式,是隧道机器人进行隧道感知的重要途径;应用部分是在物联传感部分所获得的大量数据基础上,具体开展多种应用,包括自动预警

子系统、紧急救援子系统、数据分析子系统、远程管理子系统等,以满足用户需求。

通讯网络拓扑采用光纤环网线型链路结构,沿轨道布置,通过网络交换机接入隧道监控系统环网中。轨道附属 SLAM 信标站布置间隔为 50 ~70 m,轨道无线指令信标布置间隔为 10 ~20 m,无线加密通信网络覆盖整个隧道巡检区域,实现机器人无线组网。交通隧道智能巡检系统前端机器人安装如图 10 所示。



图10 交通隧道智能巡检系统前端机器人安装示意图

3.4 交通隧道智能巡检系统工作状态解析

交通隧道智能巡检系统通过对交通事故、火灾事故、危化品泄漏事故模型的解析,制定交通隧道机器人巡检方案。巡检系统接收隧道现场数据包括:交通通行状况、火灾事故侦测、危化品运输及泄漏监测等。巡检系统根据数据解析结果指挥现场巡检机器人执行救援和逃生引导、设备和结构检测、声光报警以及投放应急器材等,如图 11 所示。

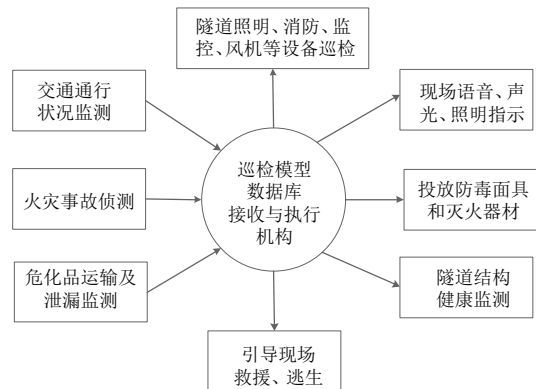


图11 交通隧道智能巡检系统工作状态框图

交通隧道智能巡检系统工作模式包含自动巡检、手动巡检与联动巡检 3 种模式,其中以手动巡检模式优先级最高,联动巡检模式次之。

自动巡检模式:管理人员根据巡检时间、路线、任务自动进行调配,智能巡检系统按照调配的任务进行自动巡检,巡检数据自动传输至后台保存并生成巡检报告。

手动巡检模式:管理人员通过后台手动控制界

面,控制机器人到达指定位置进行作业。

联动巡检模式:智能巡检系统可与火灾自动报警系统、防火门监控系统、交通事件检测系统等其他系统进行联动,当隧道内火灾探测器发出报警信号或者防火门状态异常时,智能巡检系统派出就近机器人前往现场进行查看,同时向管理人员发出告警。

交通隧道智能巡检系统能有效提升交通运行的安全性,可定期对隧道进行巡检并在突发情况下及时响应,节约隧道运维的资金投入。

4 结 语

交通隧道智能巡检系统可应用嵌入式多模块集成技术,将隧道内3类主要事故:交通、火灾、危化品泄漏模型融入其中,形成隧道空间及环境智能巡检信息模型,并与维修养护计划和事故数据及日常记录等数据进行关联,实现隧道的智能化检测、预警和管理,极大地提升了隧道运维管理能力。

参考文献:

- [1] 交通运输部.2021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,2022.
- [2] 中国公路学报编辑部.中国交通隧道工程学术研究综述·2022[J].中国公路学报,2022,35(4):25-28.
- [3] 李文锋,袁聪,李科,等.巡检机器人在公路隧道运营中的应用[J].公路交通技术,2021,37(增刊1):6.
- [4] 吴文彬.基于智能巡检机器人的隧道维护自动检测系统[J].自动化与信息工程,2021,42(1):3.
- [5] 孙玉梅,李勇,聂振钢.3D GIS与BIM集成技术在公路隧道智慧运维中的应用[J].测绘通报,2020(10):127-130.
- [6] CHE H L, SHI C, HU H, et al. Research on navigation and location system of inspection robot for urban utility tunnel [C]// 2020 4th International Conference on Robotics and Automation Sciences (ICRAS), [S.l.]:[s.n.], 2020: 11-14.
- [7] WEI D, CUI J, ZHAO Z, et al. Design of real-time obstacle avoidance control system for power tunnel fire-fighting robots [C]// 2020 IEEE 2nd International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCSIT), Weihai: [s.n.], 2020:309-312.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:cdq@smedi.com