

基于智慧化管控的地下车行系统安全与韧性提升研究

李大绪, 田 臻, 张毅彬

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 地下车行系统一般包括城市地下主干路、地下车库联络道和地下车库, 系统内部技术标准差异大、分合流出入口多、各子项联动性强, 利用传统地下道路监控系统对其管控具有较大的安全风险挑战。根据已有研究成果, 可依托数字孪生, 对地下道路进行数字化和智能化建设, 建设高效智能的运维管理平台以提升系统的安全与韧性。针对系统本身的安全风险点, 归纳总结了智慧隧道的建设经验, 通过增强智慧管理平台系统的模块功能, 聚焦交通安全和防灾韧性, 并提出了具体的智能化管控措施, 以期为同类项目提供参考。

关键词: 立体地下车行系统; 智慧隧道; 智慧管理平台; 安全与韧性

中图分类号: U491.5; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)11-0001-06

Research on Safety and Resilience Enhancement of Underground Vehicle Traffic System Based on Intelligent Management and Control

LI Daxu, TIAN Zhen, ZHANG Yibin

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: The underground vehicle traffic system generally includes the urban underground arterial roads, underground garage access roads and underground garages. There are significant differences in internal technical standards within the system, numerous split and combined flow entrances and exits, and strong interactivity among various sub-items. The use of traditional underground road monitoring systems for the control has the significant safety risks and challenges. Based on the existing research results, the digital twins can be relied on to carry out the digital and intelligent construction of underground roads, and an efficient and intelligent operation and maintenance management platform can be built to enhance the safety and resilience of the system. In view of the security risk points of the system itself, the construction experience of the intelligent tunnel is summarized. By enhancing the functional modules of the intelligent management platform system, the traffic safety and disaster prevention resilience are focused. And the specific intelligent control measures are proposed in order to provide the references for similar projects.

Keywords: three-dimensional underground vehicle traffic system; intelligent tunnel; intelligent management platform; safety and resilience

0 引 言

传统隧道综合监控系统目前一般按照城市地下道路弱电系统设计, 由交通监控、环境监测及设备监控、火灾自动报警及消防联动、视频监控、通信、有线广播、中央控制管理等子系统组成^[1], 系统较为全面, 但各方面功能均较为基础。城市核心区开发强度大, 交通供需矛盾突出, 因此一般构建了由“地下

干道-地下车库联络道-地下车库”组成的地下车行系统, 以提高核心区的交通疏解能力, 释放地面空间, 共享地下资源。不同于一般的地下道路, 地下车行系统内部技术标准差异大、出入口进出点多、各子项联动性强, 如果利用传统隧道综合监控系统进行运营管控, 在安全韧性方面具有较大的挑战。

2021 年 10 月, 交通运输部印发《数字交通“十四五”发展规划》, 提出推动数字交通与传统交通深度融合, 加快数字交通基础设施建设, 推进智慧交通建设。2024 年 11 月 26 日, 中共中央办公厅、国务院办公厅印发《关于推进新型城市基础设施建设 打造韧性城市的意见》, 要求推动新一代信息技术与城市基

收稿日期: 2025-03-08

基金项目: 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司启明星计划(K2023N015A)

作者简介: 李大绪(1991—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事道路交通规划与设计等工作。

基础设施建设深度融合,以信息平台建设为牵引,以智能设施建设为基础,以智慧应用场景为依托,推动城市基础设施数字化改造,构建智能高效的新型城市基础设施体系,持续提升城市设施韧性、管理韧性、空间韧性,推动城市安全发展。隧道智能运营是智慧交通体系的重要组成部分,能够提高隧道运维管理效率^[2-4]。智慧化隧道管控对于提升地下车行系统的安全与韧性,增强城市综合承载力具有重要意义。

针对地下道路的智慧化运营与管控,国内已有相关研究成果部分应用到了工程案例中。张刘锋^[5]、赵海云^[6]、王维娜^[7]通过对智慧隧道数字孪生应用平台的技术探讨,较为全面地阐述了智慧化控制系统的架构组成以及在地下道路中的功能提升和应用。方忠强^[8]以太湖隧道为例,从视觉系统、广播系统、车路协调系统、通风系统等方面研究了水下隧道的智能运营设施设计要点。詹鹏宇^[9]以深圳妈湾隧道为例,对长大隧道的智慧系统解决方案进行了研究,相较于常规综合监控系统,增设了结构监测、全息感知、智能巡检机器人等方面设施。黄平^[10]对道路入口处的智能控制系统进行了技术研究,针对紧急情况进行多级预警,以提升地下道路的安全水平。

从国内研究现状可以看出,关于智慧隧道数字孪生应用平台的研究应用已有了尝试案例,但由于地下车行系统本身的复杂性(内部技术标准差异大、出入口进出点多、各子项联动性强),目前尚无相关的案例研究。本文结合地下车行系统的特点,借助智慧化管控平台,对地下车行系统的交通韧性与防灾安全进行研究,以提升地下车行系统的综合承载能力。

1 地下车行系统的风险点及需求分析

1.1 常规地下道路控制系统存在的问题

一般城市地下道路均配备综合监控系统,传统隧道综合监控系统较为全面,但各方面功能均较为基础,在实际运营管养中主要存在以下问题:

(1)故障响应被动,主动风险评价缺失。地下道路的结构健康与设备运行状态,多数通过人工定期巡检判断,风险预防措施较为滞后,缺少全息感知的主动评判和预防。

(2)系统各自独立,无法实现互联互通控制,时效性低。现有地下道路机电系统存在多个子系统并存,集成度不高,数据接口无法共享,导致风险反应

时间长且易出错。

(3)极端情况(水灾、火灾、交通拥堵)识别不足,风险抵抗韧性差。极端情况判别主要靠人工管理,缺少科学的决策支持。

(4)缺乏结构体健康监测,常规养护数据不足,无法综合评判隧道的服役状态,未来风险发生的变数较大。

1.2 地下车行系统风险点分析

立体地下车行系统内部由多种地下设施组成,内部组织复杂多样,相较于一般单体城市地下道路,其风险点有如下特殊性:

(1)功能定位高,规模大,要求具有更强的承载力,确保足够的通行能力和运营安全保障能力。地下道路系统内部多点进出,交通组织复杂,分合流出入口多,出入口区域安全风险大。

(2)内部技术标准差异大,从外围地下干道到地下车库联络道,最后到达地下车库,技术标准不统一,交通安全管控要求高。系统端部衔接处线形指标低(“平面小半径+竖向大纵坡”等不利组合),易造成视距不足,行车安全风险高。

(3)系统联动性强,其中一子项(如地下环路)内部一旦发生火灾或者交通事故,会引起相邻子项(如地下干道)二次风险发生,分段管控的需求高。

1.3 系统需求与建设目标

随着交通运输领域新型基础设施建设的不断推进,交通基础设施智能化不断升级,构建智慧隧道势在必行^[8]。智能化市政基础设施是新质生产力在市政基础设施领域的运用。立体地下车行系统内部组织复杂多样,为实现地下道路安全、低碳、高效三大目标愿景(见图1),必须建设具有全息感知、深度融合、优化决策、协同控制、高效管理的智慧地下道路,以提升系统内部的安全与韧性。

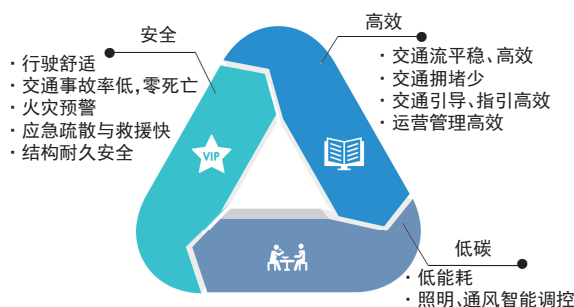


图1 智慧地下道路建设目标图

2 智慧管理平台系统提升

基于现行规范标准设计,传统地下道路监控系

统主要有六大部分,包括交通监控、环境监测及设备监控、火灾自动报警及消防联动、视频监控、通信系统、有线电话广播系统^[1]。系统覆盖了基础功能,但存在较大的智慧提升空间。以交通监控模块为例,传统交通监控主要为监视车辆运行,及时发现和处理交通异常事件,实施隧道内部交通控制以及隧道内外的交通协调,保证隧道交通秩序和行车安全。其主要的控制设备有车道指示器、可变情报板、微波车检器和超高检测器等,管理手段和决策主要依靠人工,并且是在事件发生后进行处理。全路段的交通流信息采集、交通事件快速准确识别和报警、交通流态势研判、系统交通均衡诱导等交通态势评估和主动管控的智慧交通管理有待进一步升级。

通过案例调研,在目前国内外已建成的长地下道路中,部分道路已经考虑对既有传统运营管理平台进行提升(见表1)。

针对隧道管理中涉及的安全、畅通、节能、运维等业务需求,立足数字孪生平台底座,在常规监控系统基础上进一步升级,打造出具有运行监测、智慧管控、应急处置、辅助决策、智慧运维的新一代智慧运营管理平台。主要须增设和升级以下系统(见图2):一是对交通监控模块进行融合增强,打造智慧交通管控系统,实现隧道交通智慧监测、态势评估及主动管控;二是在设备监控模块上增设能耗监测,实现绿色、低碳效果;三是在火灾报警系统上融合增强智慧防灾功能,特别关注面向城市韧性提升的水灾监测及管控;四是完全新增地下定位服务、结构健康监测、应急响应机器人等功能模块。

3 交通韧性与安全提升

3.1 地下系统交通运行全息感知

传统地下道路运行感知系统主要依靠纯视频、线圈车检器等设备,借助视频监控、断面交通流信息采集以及常规事件监测等手段,来管理地下道路的运行状况。然而,这种方式存在不少弊端,比如信息采集较为粗放,信息追溯困难,误报、漏报情况频发。基于智慧化管控的地下车行系统,在传统隧道综合监控系统的基础上,增设了全息感知模块,将视频监控、局部毫米波雷达以及边缘计算技术(MEC)有机融合。其技术路径为:利用路段边缘计算平台和车端计算单元,对感知源头的数据进行输入,随后把数据导入事件识别模块和数据仓库,开展数据分析、处理以及可视化编辑工作,以此实现隧道运行状态监

表 1 智慧隧道管理系统应用情况表

调研案例	隧道机电系统(在原系统模块基础上提升)	新增功能
港珠澳大桥海底隧道	基于微波雷达的交通全息感知系统	1. 基于 BIM 的三维运维系统,各系统之间数据共享联动 2. 结构健康监测系统
深中通道	1. 智慧交通管控:交通运行风险评估、交通风险预警 2. 伴随式智慧信息服务 3. 隧道光环境智能调节 4. 智慧应急响应:三维动态应急救援,车辆高温预警	1. 设备智慧运维:AR 巡检管理 2. 智能巡检机器人 3. 数字交通孪生平台
上海北横通道	1. 交通流全景展示及态势分析 2. 智能分析和联动模块(视频事件检测) 3. 毫米波雷达交通全息感知试点 4. 火灾分析辅助决策系统(烟气场重构与态势预测)	1. 地下定位服务试点 2. 全生命周期管养以及手机移动端管养
无锡太湖隧道	1. 全频广播投放系统 2. 基于 5G 基站进行车路协同技术管控 3. 基于 CPS 的隧道通风节能系统 4. 自适应智能无极调光照明系统	—
深圳妈湾跨海隧道	1. 智慧隧道全息感知系统:交通事件识别及异常情况警报 2. 消防设施智能监测系统:数据实时采集+远程控制	1. 建立基于 BIM 和 GIS 为基础的运维平台 2. 隧道结构多维监测 3. 智能巡检机器人
日本中央环状线	1. 弯道拥堵预告 2. 图像识别隧道内车辆停车、低速、避让行为 3. 对火灾的探知和判定	—

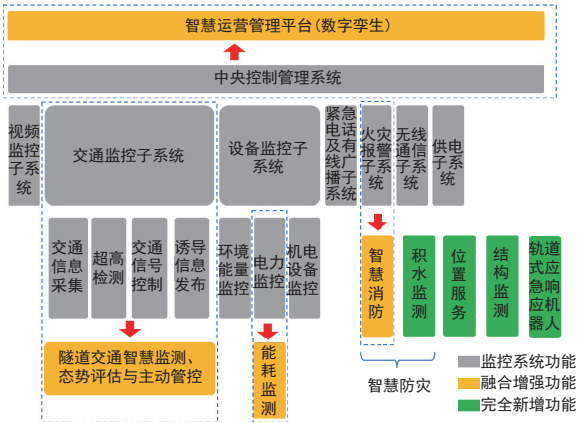


图 2 智慧管理系统提升内容图

管、障碍物检测、三维全息隧道模拟等功能,最终达成隧道运维管理,为地下道路管理增添助力。该系统能够实现对地下道路运行状态的全空间覆盖,对

车辆进行连续轨迹跟踪,并实现全域展示,具备事件类型丰富、数据颗粒度细、信息完整度高等优势(见图3和图4)。与常规隧道相比,24 h全息事件判定不仅涵盖常规交通事件,还新增了运维事件监测功能,提升了运维效率,能够部分替代人工巡检,节省人工巡检费用。而且,事件判定时延低,还支持远期车路协同信息服务。以深圳前海地下道路系统为例,包括临海大道隧道、滨江大道隧道以及桂湾、妈湾两处地下车行联络道。原有监控系统为常规管控方式,地下车行系统复杂,导致交通堵塞、事故屡发。智慧化管控平台项目在原监控系统基础上进行智慧化建设,其交通运行全息感知系统提供了全空间覆盖,有效减少了交通堵塞和事故的发生,同时降低了人工巡检频率。

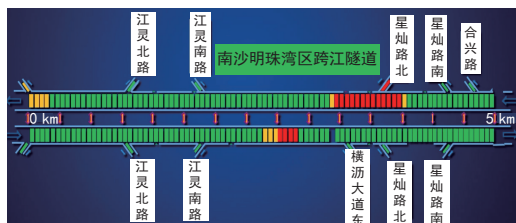


图3 地下道路交通运行状态综合感知与评估图

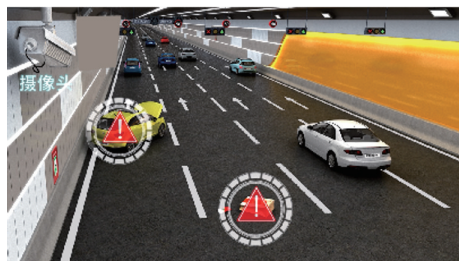


图4 地下道路突发事件识别图

3.2 基于实时交通态势的地下车行系统联动管控

(1) 隧道入口超高超限智能监测和联动管控

在隧道入口接地点处,利用先进的智能监测技术,如超高检测仪、地磁传感器等,对驶入车辆的高度和载重进行实时监测,判断车辆是否超高超限。一旦发现超高超限车辆,立即启动联动管控机制,同时激发超高显示信号板,联动与之相关的车道信号灯(红灯)、声光报警器共同报警,阻止违规车辆进入地下道路,并触发车牌识别相机,拍照取证。对误入隧道的超高车,采取“车辆轨迹跟踪+启动联动管控”预案,全程监管,以保障地下道路的安全与正常运行。图5为地下环路入口超高超限智能监测和联动管控图。

(2) 系统内部出入口协同联动控制

在地下车行系统中,地下环路与地下干道衔接



图5 地下环路入口超高超限智能监测和联动管控图

处的交通流控制,关键在于构建全方位的内部协同联动机制。首先,信息采集系统要协同作业,分布在地下环路和隧道的传感器、摄像头等设备,实时精准采集车流量、车速、车辆位置等数据,并通过统一的数据传输网络,迅速汇总至交通控制中枢,确保信息全面且及时;其次,在信号控制层面,借助智能算法,依据实时交通数据动态调整信号灯配时,实现地下环路与隧道的信号灯联动。同时,交通诱导系统协同发力,通过地下环路和隧道内的电子诱导屏、车载导航系统,向驾驶员同步推送前方路况、拥堵点、推荐行驶路线等信息,引导车辆合理选择路径,避免在衔接处扎堆,从整体上均衡交通流,提升地下道路系统在衔接区域的运行效率,保障交通顺畅、安全。

当隧道内出现特殊情况时,如发生火灾、正在管养、交通严重拥堵或发生交通事故等,相关部门可立即通过远程控制系统启动布置在入口匝道接地点龙门架处的可变情报板、交通信号灯、防火卷帘门等,阻止车辆进入隧道。这不仅能够为应急救援车辆开辟出畅通的通道,确保救援工作及时开展,还能避免车辆进入正在管养的路段,保障道路管养工作安全、高效进行。广州明珠湾区跨江隧道与横沥地下环路构建了地下车行系统,系统内部的联动控制已按照上述措施进行提升落实(见图6),后续将结合运行反馈对其进一步优化。

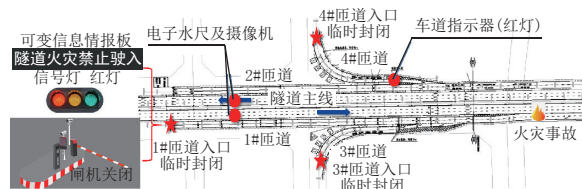


图6 地下环路与隧道联动管控示意图

(3) 隧道出口与地面路网联动管控

隧道出口与地面路网联动管控是智慧化隧道的重要功能之一,此功能充分考量匝道接地点、衔接交织段以及进口道排队段的通行能力,合理调配道路时空资源,确保匝道关联路段能够高效有序地运行(见图7)。

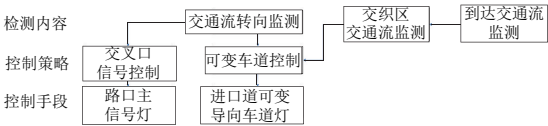


图7 隧道出口与地面路网联动管控技术路线图

具体实现方式包括3个方面:一是对到达交通流进行检测,分别在匝道接地段和进口道排队段获取相关交通数据;二是将转向交通流与下游交叉口的信号配时进行联动,依据交通流转向监测情况优化信号灯配时,提高交叉口通行效率;三是设置可变车道,以某交叉口为例(见图8),把第二、四根车道设为直行/直左可变车道,根据实时交通流监测结果灵活调整。这些措施根据隧道内交通流量情况和特征,匹配地面交叉口信号控制,有效应对了交通流量不均衡等问题,显著提升了整体通行效率。

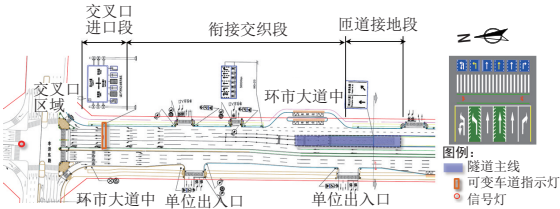


图8 隧道出口与地面路网联动控制应用图

(4)地上地下一体化交通诱导管控

地上地下一体化的交通诱导管控系统从车辆进入外围路网开始,便可启动全方位的诱导流程。

一方面,交通标识系统分阶段发挥作用。一级诱导通过显示牌呈现地下环路周边地区主干道及环路的实时路况,引导车辆初步规划路线;当车辆进入地下干道,二级诱导显示地下环路交通流状况、停车场位置、车位及剩余数量等信息,帮助驾驶员进一步调整行程;车辆驶向地下环路时,三级诱导指引其顺利进入各商业体及停车场;进入车库后,车库内诱导发布环路交通状况,引导车主从环路、地块坡道选择出口路径,若环路拥堵,诱导系统会及时提示“环路拥堵请勿进入”。

另一方面,借助手机移动端,车主无论处于外围道路、地下道路还是车库内部,都能实时获取路况信息,灵活调整出行计划。这种一体化的交通诱导系统,不仅实现了环路外围路网流量的动态合理分配,提供精准的环路内部停车诱导和地上入口一体化诱导,还能均衡交通流量,结合地下交通道路管控技术,打造“地面-地下环路-地块”一体化联动控制,自动识别地下隧道交通流状态和事件,实现自动报警和快速管控,全面保障交通的高效与顺畅。图9为地上地下一体化交通诱导管控系统图。

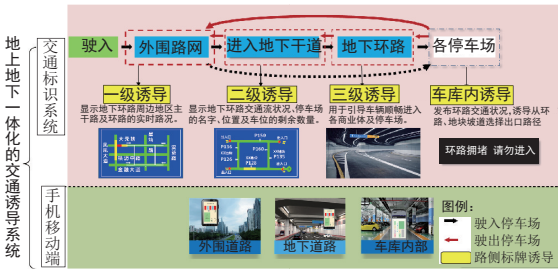


图9 地上地下一体化交通诱导管控系统图

3.3 地下定位和交通引导

利用隧道内北斗定位导航系统,解决了隧道内无GNSS信号条件下的定位导航问题,用户可以直接通过百度、高德、腾讯地图等APP获得隧道内外一体化高精度定位导航服务。采用无源体制,基于软件无线电的实现形式,产生用于隧道内播发的北斗信号,精确地表征北斗卫星信号在隧道服务区域内各坐标点的信号功率、信号动态和信号时延,各类卫星定位终端可在隧道内接收信号,完成定位解算和导航服务。

该系统主要包括室外接收天线、室外机箱、室内交接箱、时间同步设备及射频电缆、用户终端等。室外卫星通过GNSS接收天线将信息传送至一体化交换机箱(时钟同步单元、管控一体平台等),隧道内部布置北斗基站作为交接箱,发射天线与基站采用射频电缆连接,最终将信息传递到用户终端(见图10)。以上海北横通道为例,针对特长地下道路(19.1 km),设置北斗定位导航系统进行精确导航定位,大大降低了开错车、乱变道等现象,保障了隧道运营畅通。

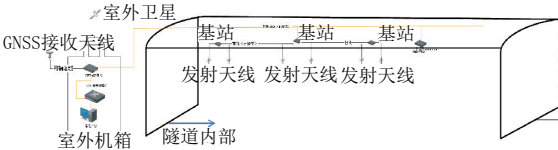


图10 隧道位置服务系统

4 防灾安全提升

4.1 面向城市韧性提升的水灾监测及管控

积水监测与报警模块是地下环路智慧防灾系统的重要组成部分,可精准监测隧道内积水位情况,及时提供报警信息,并依据内置预案对洞口交通实施有效管制。

地面的积水倒灌时,监测装置一旦发现水害情况,会立即向隧道管理平台报警。管理平台收到警报后:一方面,向上汇报给交警、防汛、道运、应急等部门,同时通过微信公众平台、腾讯地图等渠道发布信息;另一方面,向下发送控制指令,控制隧道入口

的信号灯显示“隧道淹水禁止进入”的信息,利用可变情报板、定向声广播、声光报警器等设备提醒外部人员,还会通过隧道内的广播和情报板分别发出“隧道积水尽快驶离”“隧道倒灌尽快驶离”的提示,以此实现对水灾的有效监测和管控。图11为隧道积水检测和报警功能图。

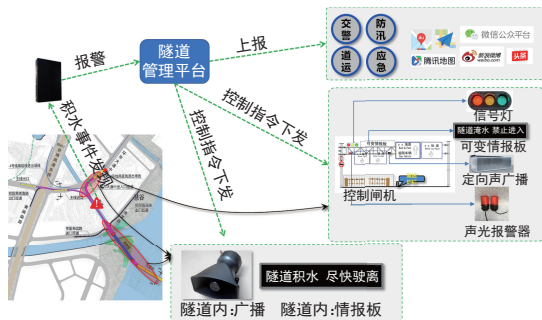


图11 隧道积水检测和报警功能图

4.2 火灾态势评估预测和消防联动控制

智慧消防模块是地下环路智慧防灾系统的关键部分,承担着早期火灾探测、消防联动控制,以及地下环路火灾温度、烟气场重构和火灾态势评估预测的重任。传统隧道消防系统存在诸多难点及痛点,如火灾报警信息少、预警慢,还常出现漏报、误报,火灾发生时,摄像头易被遮挡,无法感知火场状况,更无法预测火灾蔓延趋势,也不能及时评估应急预案实施效果。

针对上述这些难题,智慧消防模块采用固定摄像机(枪机)实现无死角监控,利用视频识别算法分析视频中的火光、烟雾,一旦发现异常,迅速报警。同时,通过深度学习模型,确定火源位置、规模以及烟气场、温度场等关键信息,将火场温度分布和变化以直观、动态的形式呈现,为消防工作提供有力支持(见图12)。上海北横通道内部设置智慧消防模块,通过深度学习模型进行烟气场重构和态势预测,对潜在火灾风险点进行主动评判和干预,有利于降低隧道内火灾发生频率。

5 结语及展望

推进城市数字化、智慧化发展是面向未来构筑



图12 智慧消防模块图

城市竞争新优势的关键之举,智能化的地下交通基础设施体系将提升城市韧性,推动安全发展。结合地下车行系统自身特点,本文研究总结智慧化管理平台系统的功能提升内容,并提出关于交通安全韧性的智慧化管控措施,对今后类似工程的建设具有借鉴意义。关于智慧隧道建设:一方面,受限于立项资金问题,落地项目较少,已建有智慧管控的隧道工程中多数以设备前端为主,运营阶段的监测数据分析较浅;另一方面,随着云计算、物联网、人工智能等技术的发展,可利用运营阶段的数据积累,进一步研究通过AI智能进行主动评判和干预,降低发生安全事故的概率,把握预防为主的新方向。

参考文献:

- [1] 王佳斌.地下车库联络道综合监控系统设计探讨[J].城市道桥与防洪,2017(7):29-31.
- [2] 黄俊,陈喜坤,李宏,等.结构智能健康监测系统在水下隧道中的应用[J].地下空间与工程学报,2017,13(增刊1):306-313.
- [3] 李银杰.智慧隧道车道管理系统的设计与实现[D].杭州:杭州电子科技大学,2020.
- [4] 李志晟.智慧隧道管养模式的探索与应用[C]//中国土木工程学会2017年学术年会论文集.北京:中国土木工程学会,2017:664-676.
- [5] 张刘锋.智慧隧道数字孪生应用平台技术探讨与应用[J].交通与运输,2024,40(2):68-73.
- [6] 赵海云.基于数字孪生的隧道一体化智慧运营管控技术与平台研究[J].交通与运输,2024,37(增刊1):173-179.
- [7] 王维娜,马建平.新一代智慧隧道综合管控平台设计与应用[J].中国交通信息化,2023(12):112-114.
- [8] 方忠强,张鹏,涂齐亮,等.太湖隧道智能运营设施设计方案研究[J].地下空间与工程学报,2023,19(1):220-228.
- [9] 詹鹏宇.长大隧道的智慧系统解决方案研究[J].现代建筑电气,2024,15(10):25-30.
- [10] 黄平,孙培翔.城市地下道路入口智能控制系统设置及技术研究[J].城市道桥与防洪,2024(6):13-16.