

城市隧道一体化集成平台的研究与建设

张彬

[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: 城市隧道受其构造形态与环境的双重制约,使地下隧道管理困难,发生安全事故后救援难度大。随着我国隧道建设里程的不断突破,传统的隧道管养方式已无法适应当前的发展现状和需求。针对传统隧道工程在交通监控、灾害应急和设施养护领域存在的技术瓶颈与管理痛点,科技文化中心地下空间综合开发工程项目提出“全数据融合-全要素感知-全周期管控”的一体化智慧平台架构,着力构建具有自主决策能力的智能管控系统与运维管养协同平台,通过分级管控措施有效提升防灾应急能力,为提升城市地下空间城市管理和服

务提供了智能化、便捷化的解决方案。同时,该平台的搭建模式也可为今后类似项目提供有益的参考和借鉴。

关键词: 城市隧道;地下环路;一体化智慧平台;交通监控;综合监控;防灾应急;分级管控

中图分类号: U457

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)01-0101-07

Research and Application of Integrated Platform for Urban Tunnel

ZHANG Bin

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

Abstract: Urban tunnel is constrained by its structural forms and the environment, leading to difficulties in underground tunnel management and challenges in rescue efforts following safety incidents. As the mileage of tunnels in China continues to expand, the traditional tunnel management and maintenance methods can no longer meet the current development status and demands. In response to the technical bottlenecks and management pain points in traffic monitoring, disaster response, and facility maintenance associated with traditional tunnel engineering, an integrated smart platform framework of "full data integration - full element perception - full cycle control" is proposed for the underground space comprehensive development project of Technology and Culture Center, which focuses on building an intelligent control system with autonomous decision-making capabilities and an operation, maintenance and management collaborative platform. Through tiered management and control measures, the disaster prevention and emergency response capabilities are effectively enhanced, providing an intelligent and convenient solution for improving urban underground space management and services. Additionally, the construction model of this platform can also provide the beneficial reference for similar projects in the future.

Keywords: urban tunnel; underground loop; integrated smart platform; traffic monitoring; integrated monitoring; disaster prevention and emergency response; hierarchical control

0 引言

近年来,随着我国“交通强国”战略的实施,我国隧道建设里程增速保持在每年1 100 km以上。截至2024年末,我国投入运营的隧道总数超5.6万条,总里程突破4.8 km,其中公路隧道占比达52%。作为典型的半封闭式受限空间,隧道工程受构造形态与环境的双重制约,形成机电设备密集、通信困难的特殊空间,造成地下隧道管理困难,发生安全事故后救援难度大等问题。在不断重视安全的大环境下,传

统的隧道管养方式已无法适应当前的发展现状和需求。在此背景下,2023年9月20日,交通运输部印发《关于推进公路数字化转型加快智慧公路建设发展的意见》,提出运用现代数字技术赋能公路交通,以“可视、可测、可控、可服务”为目标^[1],提升路网智能感知、决策、调度、服务能力^[2],为后续地下隧道工程的建设提出新的标准和要求。

1 智慧系统需求目标

科技文化中心地下空间综合开发工程项目位于余杭中轴线南端,包含“一环两隧”及配套地面道路,地下环路主线长度约2.48 km,设置3对地面出入口及3对地下直联出入口与隧道进行连接,地块衔接

收稿日期: 2025-11-05

作者简介: 张彬(1979—),男,硕士,高级工程师,从事城市交通与地下空间规划设计、工程总承包管理工作。

出入口共10处。创明路隧道长约1.729 km,创景路隧道长约1.804 km。本项目是华东片区首个“地面—隧道—地下环路—地下车库”四位一体包含多座地下互通立交的综合性立体交通工程。作为片区重要的交通基础设施,建设智慧一体化管理平台,保障区域级立体交通系统安全、高效运行,促进未来科技城市发展至关重要。

相比传统隧道工程,地下环路更像一个立体交叉的交通网,由于开设多个出入口,各个方向的车流交汇让监控难度加大。多处弯道也容易造成通风死角而导致烟雾容易堆积,火灾初期不容易察觉,同时复杂的结构也让日常检修需要更细致的排查。

针对隧道管养中长期存在的数据孤岛、响应滞后、协同效率低等难点,力图将智慧地下道路综合平台与地面道路管理无缝衔接,整合交通监控、环境与设备监控、公共安全、通信4个通用系统,以及地下定位、运维管理、防灾等 N 个扩展系统,实现安全、低碳、高效三大目标^[3-15]。

2 一体化集成平台搭建

当前隧道管理系统存在两大核心痛点:一方面,交通监控、环境监测、设备养护等子系统独立运行,形成“数据孤岛”,急需构建集成化管控中枢实现跨系统协同;另一方面,养护系统的数字化进程滞后于智能监控技术发展,两套体系的数据格式互不兼容。这要求搭建具备数据中台功能的智能运维大脑,既能实时融合多源异构数据,又能打通养护工作与设备状态的闭环链路。

为解决这一难题,本项目开发一套高度集成的智慧一体化管理平台。该综合管理平台采用定制化开发,深度契合业务场景需求,构建起集智能化、协同化于一体的管理生态。如图1所示其核心功能模块涵盖5大子系统。

(1)综合监控系统:依托物联网传感器与智能终端,实现全域数据实时采集与可视化呈现,管理者可通过大屏界面直观掌握运行态势。

(2)区域交通管理系统:依托出入地块道闸,道路诱导发布屏等设备,区域三级诱导与控制管理。

(3)智慧运管系统:融合人工智能算法,对业务流程进行自动化调度与智能优将物理实体映射为虚拟数字模型,支持场景模拟、预演化,显著提升运营效率。

(4)公共安全系统:建立多部门协同响应机制,在安全预警、资源调配、应急处置等环节实现快速联动。

(5)数字孪生系统:基于三维建模与仿真技术,将物理实体映射为虚拟数字模型,支持场景模拟、预演展示。

管理平台各子系统并非独立运行,而是通过共享数据中台实现深度协同,打破信息孤岛,确保各子系统间数据格式统一、语义一致。

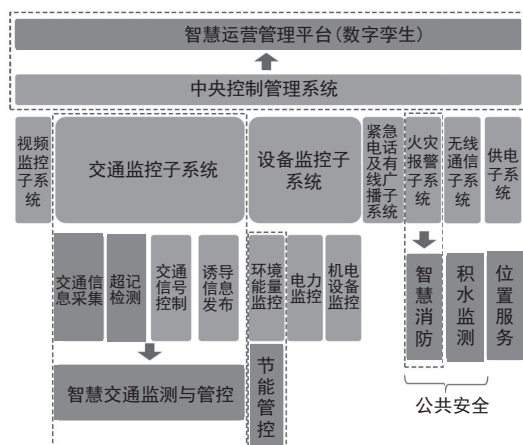


图1 智慧一体化管理平台架构

3 数据传递关系

系统数据交互架构以一体化集成平台为顶层核心,通过“平台集成”机制对五大业务系统进行集中管控;5大业务系统与底层的公共数据库开展双向数据交互(包含“数据传递”与“数据获取”),具体逻辑如下。

3.1 顶层集成:一体化集成平台

“一体化集成平台”作为总控层,通过“平台集成”能力,对以下五大业务系统实现集中集成与协同调度:综合监控系统、区域交通管理系统、智慧管养系统、公共安全系统、数字孪生系统,数据传递关系如图2所示。

3.2 业务系统与公共数据库的双向数据交互

五大业务系统与“公共数据库”(数据中枢)进行双向数据流转,各系统的交互逻辑如图3所示。

3.2.1 综合监控系统

向公共数据库传递:交通流量数据、设备运行状态信息、各类事件信息(如设备告警、交通异常事件);

从公共数据库获取:交通事件处理结果、设施维护情况、安全事件详情等数据。

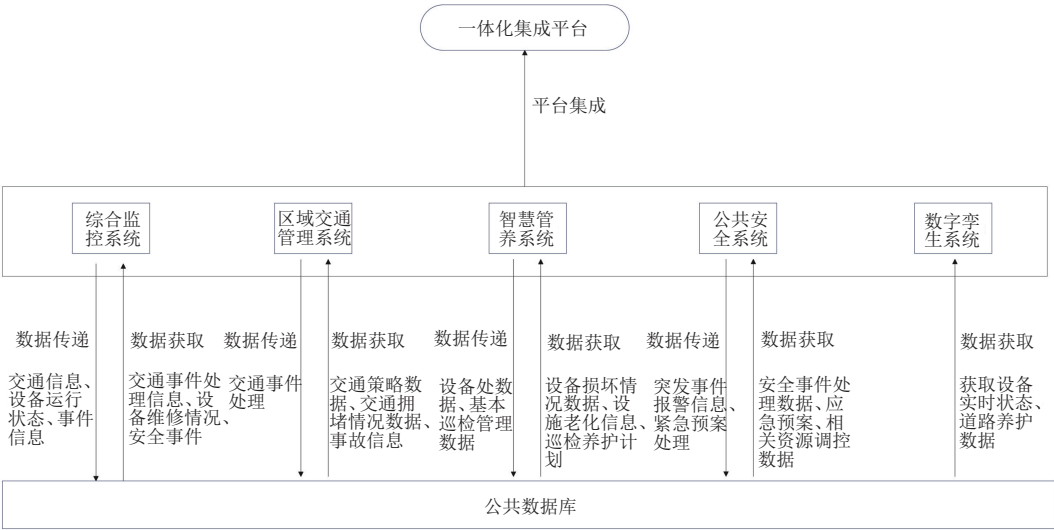


图2 数据传递关系图

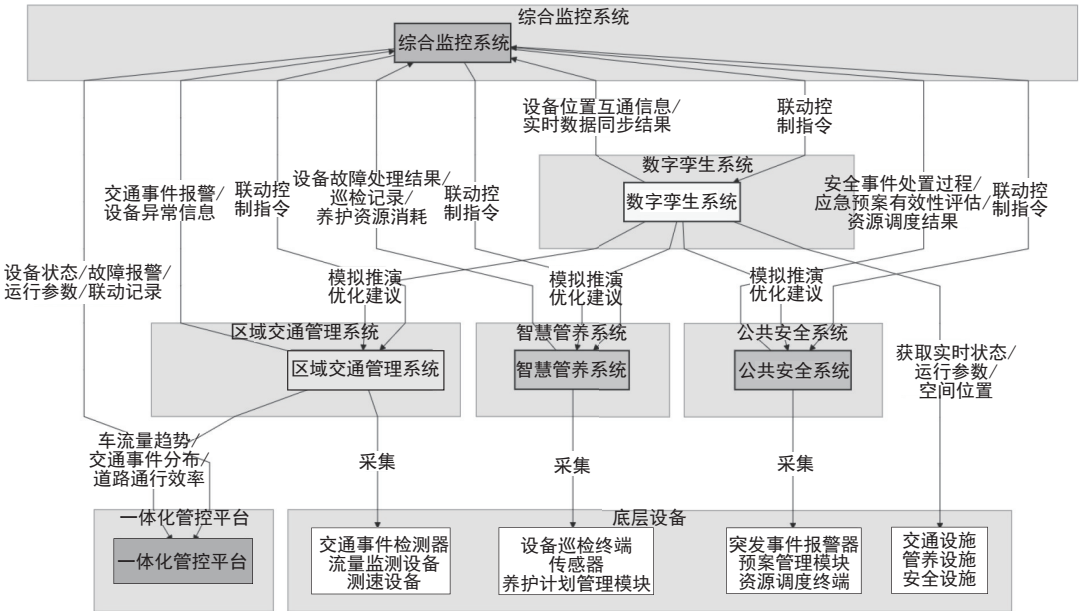


图3 各系统数据交互逻辑图

3.2.2 区域交通管理系统

向公共数据库传递：交通事件处理过程相关数据；

从公共数据库获取：交通拥堵态势数据、交通调度管理数据、事故信息（如位置、类型）等。

3.2.3 智慧管养系统

向公共数据库传递：设施检测原始数据、设施基础信息（如位置、规格）、设施养护记录等；

从公共数据库获取：设施损坏情况、设备检测数值（如传感器监测结果）、巡检与养护计划等数据。

3.2.4 公共安全系统

向公共数据库传递：安全事件处置过程数据（如应急响应步骤）、应急资源分布数据（如救援力量位置）；

从公共数据库获取：突发事件预警信息（如火灾、事故预警）、应急救援处置指引（如最优救援路径）等数据。

3.2.5 数字孪生系统

从公共数据库获取：设施设备实时运行状态、监测评价类数据（如设施健康度评估）等，用于支撑虚拟场景模拟与运行趋势预测。

4 综合监控系统

在综合监控首界面，通过6大板块实现一环两隧全概览，如图4所示，具体包括：

基础信息：概览一环两隧整体信息，包括：线路长度、出入口数量、运营时间。

保畅行：概览一环两隧交通整体状态，包括：道

路拥挤状态、实时交通流量等。

护安全:一环两隧事件信息实时报警,包括:事件类型、上报时间、感知设备等。

监环境:概览一环两隧整体行车环境,包括:光照度、空气质量等。

管养护:一环两隧机电设备整体运行情况,包括:设备在线率、完好率等。

促保障:一环两隧机电设备实时报警,包括:报警设备、报警类型、处置状态等。

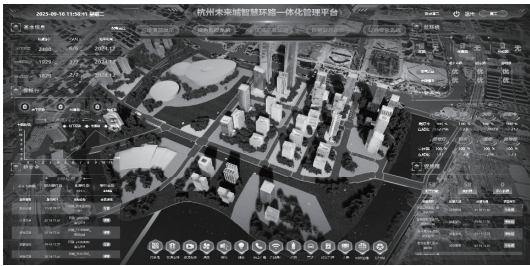


图4 一体化管理平台驾驶舱界面

在综合监控系统中实现对交通监控、通风、照明等13个机电系统设备的统一控制、状态监管等。在每个系统监控界面,通过设备不同状态图例,实现设备不同图例实时展示当前设备状态,通过不同隧道按钮直接切换不同设施监控。同时,通过“设备定位”按钮实现二三维之间的便捷切换。通过设备“设备巡检”按钮一键实现当前子系统的三维巡检功能,如图5所示。

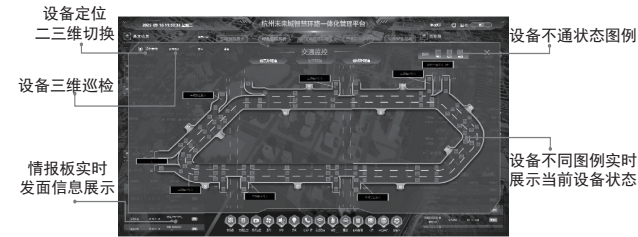


图5 综合监控系统界面

在具体功能包括设备、环境的监控,具体又包括:对机电设备的运行状态实时监测、对机电设备远程直接控制操作、对设备运行故障信息实时报警、对报警信息处置过程实时跟踪、对隧道运行环境实时监测及报警、对隧道交通事件实时报警、对隧道交通流量实时监测等。

除了设备的监控,更重要的是通过变形图上的单一设备图例,可以直接实现设备的远程控制以及信息的在线编辑及实时下发。

5 区域交通管理系统

目前全国仅15%~20%的隧道部署了交通流量预

测系统,且模型精度不足,实时预测功能覆盖率低,部分项目仍依赖人工统计或简单线性模型(如历史平均法),导致高峰流量预测误差率过大。事故检测技术局限性传统视频监控依赖人工轮巡,烟雾、车辆异常等事件误报率达25%。

通过搭建综合监控多元感知,外场建设方面,除了传统机电设备,本项目还布置了多种新型感知设备,保障设施的运行安全:通过视频分析,实现对交通事件、抛洒物等事件实时检测,快速响应。区域三级诱导与控制管理依托出入地块道闸,道路诱导发布屏等设备,实现从外到内的1~3级动静态车辆引导,如图6、图7所示,具体包括以下几方面。

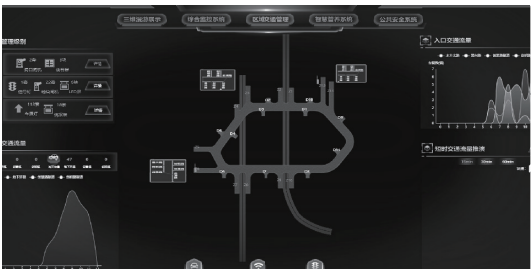


图6 交通流量预测界面

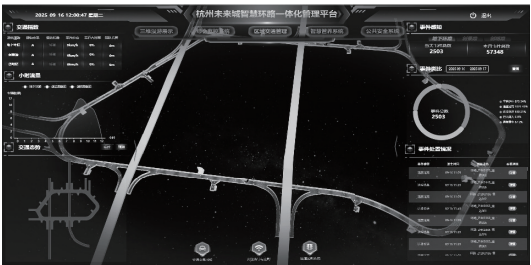


图7 综合监控感知界面

(1)道路一级诱导,通过道路入口三块诱导发布屏,进入环路的一个道路入口道闸控制,实现进入地下环路的最外围诱导控制。

(2)道路二级诱导,通过地块入口道闸控制,以及区域入口诱导发布,实现环路与地块进出车流的诱导控制。

(3)隧道内三级诱导,通过地块车位信息诱导,以及隧道内交通诱导及预测,实现一环两隧车流的诱导控制。

6 智慧管养系统

隧道内机电设备正常运行是保障通行安全的重要前提,一环两隧智能化建设包含着数十种机电系统,安装了数千个机电设备,对于后期运维管养提出了较高要求。智慧一体化管理平台打通

了传统隧道运行监管系统与养护作业系统的数据壁垒,形成从“故障实时上报—人工确认报警—工单自动派发—状态同步监管”的闭环管理,极大提升了设施养护工作效率。同时,智慧一体化管理平台强化机电运维专业的功能与应用,增强平台数据分析能力,为运营板块的数字化转型持续发力。

6.1 故障自动获取、实时上报

智慧隧道内部署的传感器、设备监测模块等物联网终端,对机电设备运行参数及隧道环境状态进行 7×24 h 实时监测。一旦检测到设备异常,终端设备立即以标准化数据格式将故障信息(包含故障类型、位置、发生时间等)实时上报管理平台,确保故障信息第一时间被系统捕获。

6.2 养维护工单派发

智慧管养系统依据预设的工单派发规则(如实时故障处置类、计划执行类),生成标准化电子工单。工单内容涵盖养维护任务、故障详情、处置要求、预期完成时间等要素,并通过移动端应用,即时推送至对应维保团队负责人,如图 8 所示。



图 8 养维护工单派发 APP 界面

6.3 作业状态同步监管

从工单派发开始,维修人员在移动端接收任务后签到确认,维修过程中上传处置进度(如现场交底、故障排查等关键节点)、现场照片。平台端通过数据接口实现工单状态与维修现场的数据同步,管理人员可直观查看各工单执行进度、现场情况等。维修完成后,系统自动归档工单全流程数据,形成故障处置记录档案,如图 9 所示,便于后续统计分析与复盘优化。

6.4 人员巡检轨迹查看

根据定位基站,获取作业人员的轨迹信息,并依托高精度底图,实现人员作业轨迹回放等,便于管理者掌握养维护人员的作业全过程。

同时,通过搭建智慧管养子系统,针对三条设施的不同子系统、不同设备建立完备的数字化资产档案,呈现详细的品牌、型号等基础信息,同时对设



图 9 数字化资产管理

备的初次上线、使用缺陷、运维养护、设备更换等过程信息进行详细记录,实现一环两隧资产数字化管理。

7 公共安全管理系统

公路隧道应急管理领域长期存在灾变响应时效性瓶颈,其症结在于传统人工巡检模式存在双重缺陷:主观判读误差导致 20% 以上的次生事故诱因,响应延迟均值超过规范标准允许的 3 倍阈值。在热烟耦合效应显著的受限空间内,这种滞后性会触发结构损伤连锁反应,形成指数级扩散的灾变传播链。因此,构建基于智能化感知网络的异常事件识别系统,已成为提升交通安全韧性的关键技术路径。

为高效处置环路积水、火灾、交通事故等突发事件,针对地下环路主线、匝道、地块出入口等复杂的交通组织特点,管理平台针对 8 大类事件进行分段、分级预警,通过可视化的应急事件处置预案,形成从“事件自动发现—人工确认报警—预案自动关联—设备自动运转—过程实时跟踪”的闭环管理,如图 10 所示。

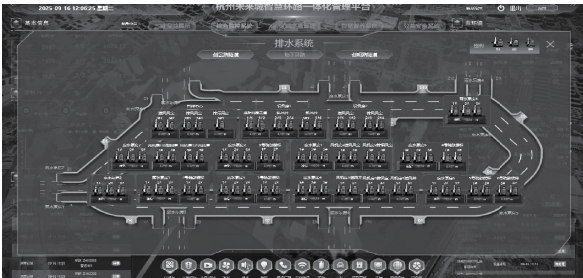


图 10 应急预案可视化编辑

7.1 事件报警自动采集及人工确认

基于雷达、Citilog、积水检测、火灾报警等系统实现一环两隧不同事件的自动采集,以“事件图片+事件短视频+实时视频”三确认形式,准确判断是否发生异常事件以及事件的类型、位置和严重程度等。

7.2 预案关联及人工启动

确认事件后,可视化应急联动系统根据事件类

型、事件等级,自动匹配预案库联动方案,经人工确认后,一键触发预案启动指令。

7.3 预案执行过程实时监控及升级

根据启动的预案,一键开启机电设备预设工作状态,通过隧道内广播、情报板、车道灯等设备向驾乘人员发布警报与应急指示,有序开展应急救援工作。

7.4 预案可视化编辑

借助图形化技术,以直观形式呈现应急预案启动的各机电系统、设备状态、发布信息等,通过可视化平台便捷修改预案,支持模拟演练发现漏洞并改进。

8 数字孪生系统

利用数字孪生技术,智慧一体化管理平台通过搭建“三维漫游、机电设备自动巡检、积水变化三维展示”等数字化孪生应用场景,实现地下环路交通状态一屏观,设备状态及时感,运行环境实时知,如图11所示。通过模型算法,可视化孪生展示了交通流仿真预测、积水事件趋势推演等,充分体现大数据智能应用的思路。

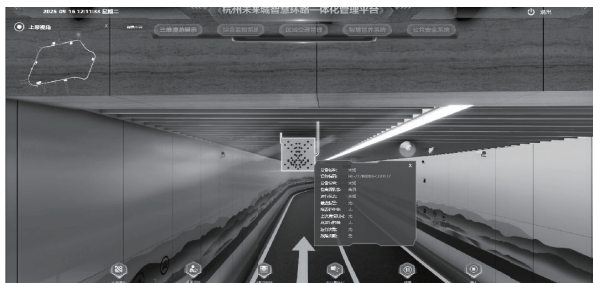


图11 数字三维自巡检界面

8.1 沉浸式三维场景构建

基于激光扫描技术,构建环路全要素三维模型,包括土建结构、机电设备、通风管道、照明系统等。

动态加载周边地形地貌数据,实现隧道与地理环境的无缝衔接。

8.2 多视角自由漫游

车行视角:以车辆行驶的动态视角,支持漫游暂停、继续、结束等操作。

上帝视角:以“上帝视角”俯瞰环路全貌,并快速定位关键区域。

关键点位跳转:预设环路各入口、设备间、水泵房等兴趣点,一键直达目标位置。

8.3 设备状态实时映射

二三维设备状态同步:三维模型中的设备(如风

机、水泵、摄像头)与实际物理设备实时联动,状态同步更新。

二三维场景无缝切换:预设各机电设备三维模型点位,实现二维、三维设备的任意场景切换,方便用户以不同视觉效果查看设备点位信息、状态信息等。在三维场景中查看设备运行状态、实时信息、维修记录信息等,在二维场景中,全局查看点位信息、状态信息、故障信息等。

9 试运行效果

为检测系统功能模块及其协同工作能力,开展试运行测试工作,测试场景涵盖正常工况下的功能验证,如交通流量平稳、设备正常运行时各模块工作状态;也包含异常场景模拟,如交通拥堵、设备故障、火灾报警、网络中断等突发状况,全方位检验系统在不同情况下的响应能力和稳定性。

其中,交通态势分析数据采集偏差,部分路段交通流量、车速数据采集不准确,源于传感器安装角度不当与校准参数错误。重新调整传感器安装位置与角度,并校准参数,使数据采集准确率从75%提升至99%。在复杂交通场景下,交通态势预测模型结果偏差较大,通过引入深度学习算法优化模型,结合大量历史数据训练,将预测准确率提高至95%。

经过2个月的试运行测试,整体效果达到预期目标,系统功能稳定、数据准确、模块协同良好,系统稳定运行,各功能模块运转正常。

10 结 语

科技文化中心地下空间智慧环路管理平台的建设,构建了国内领先、浙江首个“全息感知、智能决策、主动控制、高效管理”的数字孪生智慧隧道管理系统。后续也将从以下几方面继续开展研究:

(1)通过运营过程中,交通、公共安全、管养等数据的积累,引入AI智能分析,不断优化智慧管理平台的各种应急预案、态势分析。

(2)利用智慧管理平台的可拓展性,研究周边地面交通与隧道环路联合管理的模式,形成区域交通智慧化管控。

(3)分析研究周边类似地下环路数字化、智慧化更新改造可行性,打造区域智慧环路管理平台中心。

智慧管理平台不仅提升了地下空间的交通效率和管理水平,还为未来科技城的可持续发展提供了有力支撑。随着相关技术的不断进步和应用的深入,城市隧道自身管理系统的数字化、智慧化的更新需求将会越来越多,这也是城市更新里重要的一个板块。

参考文献:

[1] 交通运输部.关于推进公路数字化转型加快智慧公路建设发展的意见[Z].北京:交通运输部,2023-09-20.

[2] 朱熙豪,陶杰,郑于海,等.智慧隧道应用场景建设探析[J].中国交通信息化,2023(4):110-114.

[3] 张喻.数字孪生技术在隧道管控平台中的应用浅析[J].中国交通信息化,2023(6):97-99.

[4] 黎琮莹,聂杰雄,许振伟.基于毫米波雷达的隧道数字孪生安全管控系统[J].中国交通信息化,2023(4):140-143;159.

[5] 汪志涛.基于边缘计算的智能道路交通系统设计与应用[J].交通与运输,2022,38(3):50-54.

[6] 伍朝辉,常莹,李青,等.基于三维视频融合的隧道运营管理创新应用研究[J].隧道建设(中英文),2022,42(1):154-161.

[7] 张嘉旎,陈琦.浙江智慧隧道融合管理平台[J].中国交通信息化,2022(7):137-140.

[8] 李昌伟.基于AI+视频监控的智慧城市中心系统设计于实现[D].杭州:杭州工业大学,2019.

[9] 王志伟,杨超.高速公路隧道监控系统的现状与发展[J].现代隧道技术,2009,46(6):8-16.

[10] 沈航,张煜.智慧隧道监控与管理平台方案探析[J].中国交通信息化,2021(4):123-125.

[11] 郑帅,姜谔男,赵龙国. IFC 标准下隧道智能管理系统建立与应用[J].公路工程,2021,46(1):29-34;67.

[12] 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.

[13] 杨一帆,邹军,石明明.数字孪生技术的研究现状分析[J].应用技术学报,2022,22(2):176.

[14] 陈丽阳.基于数字孪生的公路隧道智能管控技术研究[D].重庆:重庆交通大学,2024.

[15] 罗川平,晏荣,王晓媛.5G+数字孪生应用的探讨[J].广西通信技术,2022(2):41.