

山岭隧道智慧化建设与运维 ——以重庆市为例

唐嘉骏

(重庆市勘测院有限公司, 重庆市 401120)

摘要: 智慧化技术的引入为解决山岭特殊地质桥隧建设问题提供了新思路。通过将新一代信息技术与隧道工程深度融合,可以实现工程全生命周期的数字化、网络化和智能化管理,通过系统研究重庆市山岭隧道智慧化建设与运维的理论体系和实践路径,分析重庆市特殊的地质环境对隧道工程带来的挑战,包括喀斯特地貌发育、软弱围岩分布广泛、地下水位变化大等特点,构建了包含感知层、传输层、平台层和应用层的智慧隧道四层架构体系。重点研究了BIM+GIS融合建模技术、基于物联网的实时监测系统、人工智能辅助决策等关键技术的应用方法。通过曾家岩隧道、龙洲湾隧道等典型案例,详细阐述了智慧化技术在勘察设计、施工建设和运营维护各阶段的具体应用。研究表明,智慧化技术可使隧道施工效率提升30%以上,运维成本降低25%,安全事故发生率减少40%。最后,针对数据孤岛、标准缺失等问题,提出了建立统一数据中台、完善标准体系等对策建议,为西南地区复杂地质条件下的隧道智慧化建设与运维提供了重要参考。

关键词: 山岭隧道;智慧化建设;运维管理;BIM技术;物联网;人工智能;重庆市

中图分类号: U459.2

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)09-0257-07

Intelligent Construction, Operation and Maintenance of Mountain Tunnels in Chongqing

TANG Jiajun

(Chongqing Surveying Institute Co., Ltd., Chongqing 401120, China)

Abstract: The introduction of intelligent technology provides a new idea for solving the problems of bridge and tunnel construction in the special mountain geology. By deeply integrating new-generation information technology with tunnel engineering, the digital, networked and intelligent management throughout the entire life cycle of the project can be achieved. Through the systematical study on the theoretical system and practical path of intelligent construction, operation and maintenance of mountain tunnels in Chongqing, the challenges brought by the special geological environment to tunnel engineering in Chongqing are analyzed, including the development of karst landform, widespread distribution of weak surrounding rock, and large fluctuations in groundwater level. On this basis, a four-layer architecture system of intelligent tunnels including perception layer, transmission layer, platform layer and application layer is constructed. The application methods of key technologies such as BIM+GIS integrated modeling technology, IoT-based real-time monitoring system, and AI-assisted decision making are emphatically studied. Through the typical cases like Zengjiayan Tunnel and Longzhouwan Tunnel, the specific applications of intelligent technologies in various stages including survey and design, construction, operation and maintenance are elaborated in detail. The research results show that intelligent technologies can improve the tunnel construction efficiency by more than 30%, reduce the operation and maintenance costs by 25%, and decrease the incidence of safety accidents by 40%. Finally, aiming at problems such as data silos and lack of standards, the countermeasures such as establishing a unified data platform and improving standard systems are proposed, which provides the important reference for intelligent construction, operation and maintenance of tunnels under the complex geological conditions in Southwest China.

Keywords: mountain tunnel; intelligent construction; operation and maintenance; BIM technology; Internet of Things; artificial intelligence; Chongqing

0 引言

收稿日期: 2025-04-24

作者简介: 唐嘉骏(1994—), 男, 学士, 工程师, 从事岩土工程勘察及地质灾害评估工作。

重庆市作为我国西南地区重要的中心城市, 山地面积占总面积的76%, 素有“山城”之称。近年来,

随着“一带一路”倡议和长江经济带发展战略的深入实施,重庆市交通基础设施建设进入高速发展期。据统计,截至2022年底,重庆市已建成公路隧道超过1 000座,总里程突破1 000 km,其中特长隧道(3 000 m以上)达50余座。这些隧道工程在改善交通条件、促进区域经济发展的同时,也面临着建设难度大、运营风险高等突出问题。

重庆市特殊的地质条件给隧道建设带来巨大挑战,一是广泛分布的喀斯特地貌导致岩溶发育,隧道施工中易遭遇突水突泥灾害;二是侏罗系砂泥岩互层地层强度低,自稳能力差,容易发生大变形;三是复杂的水文地质条件使得地下水位变化大,增加了施工排水难度。传统隧道建设模式已难以满足安全、高效、经济的建设要求。

智慧化技术的引入为解决这些问题提供了新思路。通过将新一代信息技术与隧道工程深度融合,可以实现工程全生命周期的数字化、网络化和智能化管理。这不仅能够提高建设效率、保障施工安全,还能显著降低运维成本、延长结构使用寿命,对于推动隧道工程高质量发展具有重要意义。

1 国内外研究现状

国际上,日本、挪威等隧道技术先进国家早在21世纪初就开始了隧道智慧化建设的探索。日本在东京湾横断道路工程中首次应用了BIM(建筑信息模型, Building Information Modeling)技术,实现了设计施工一体化管理;挪威在Ryfast隧道项目中建立了完整的数字化运维系统,通过传感器网络实时监测结构健康状况。欧盟“地平线2020”计划资助的Smart Underground项目,重点研究了地下工程智能监测与风险预警技术。

国内方面,交通运输部于2020年发布了《关于推进公路工程BIM技术应用的指导意见》,推动BIM技术在隧道工程中的广泛应用。港珠澳大桥、秦岭终南山隧道等重大工程都采用了先进的智慧化技术。但与国外相比,我国在核心技术自主创新、标准体系完善等方面还存在一定差距。

2 智慧化隧道建设的关键技术

2.1 总体架构设计

智慧化隧道建设采用“四层”总体架构。

(1)感知层:物理与信息的深度融合。

功能:通过传感器、雷达、摄像头、定位芯片等设

备实时采集隧道内的环境、设备、人员、交通等数据(如温湿度、瓦斯浓度、车辆位置、施工状态等)。

与CPPS(信息物理生产系统, Cyber-Physical Production System)/CPS(信息物理系统, Cyber-Physical System)的关联:对应CPS的“物理实体”层,通过物联网(Artificial Intelligence of Things, AIoT)技术实现物理世界的数字化映射,满足CPPS中生产系统对实时数据的需求。例如,重庆大宽科技的隧道管理平台通过UWB定位和传感器网络,实时监控施工人员与设备状态,形成动态数据流。

(2)传输层:高效互联与数据流通

功能:依托5G、物联网、边缘计算等技术,将感知层数据高速传输至平台层,确保低延迟和高可靠性。例如,雄安电缆隧道通过5G专网实现巡检机器人高清数据的无损回传。

与CPPS/CPS的关联:对应CPS的“通信网络”层,支持物理与信息系统的双向交互。CPPS强调生产流程中的协同控制,依赖高带宽、低时延的网络实现设备间的协同(如盾构机智能掘进系统的实时指令传输)。

(3)平台层:数据融合与智能决策

功能:通过大数据分析、数字孪生(digital twin, 通过虚拟模型实时映射物理实体状态的技术)、AI(人工智能, artificial intelligence)算法等技术,整合多源数据并构建虚拟模型(如隧道三维可视化、交通状态模拟),实现智能预警和优化决策。例如,浙江新岭隧道的数字孪生平台通过全息感知网实现交通事件动态识别与应急响应。

与CPPS/CPS的关联:对应CPS的“信息处理”层,核心是虚实融合的闭环控制。CPPS更强调生产系统的优化,如中铁隧道局的“八大智能系统”通过大数据平台分析地质参数,动态调整掘进策略。

(4)应用层:场景化服务与闭环控制功能,基于平台层输出结果,提供智能管控服务(如远程设备控制、应急指挥、能耗优化)。例如,厦门隧道监控中心通过集成通风、照明、消防设备的远程控制,实现“最强大脑”式管理。

与CPPS/CPS的关联:对应CPS的“应用服务”层,体现闭环反馈机制。CPPS通过生产过程的动态优化(如盾构机智能掘进模式)实现效率与安全的平衡。

2.2 BIM+GIS融合建模技术

BIM技术与GIS(地理信息系统, geographic information system)技术的融合应用是支撑隧道全生

命周期管理的核心技术之一。其通过整合BIM的精细化三维建模能力与GIS的空间地理分析能力,实现了隧道工程从设计、施工到运维的数字化、可视化和智能化管理。

具体技术特点包括以下几点。

(1)空间与数据的多维整合:BIM提供隧道本体(结构、设备、管线等)的精细化三维模型,包含几何信息、材料属性、施工参数等结构化数据,GIS整合地质地形、周边环境(山体、道路、地下管网)、气象水文等宏观地理空间数据,支持大范围空间分析,将隧道内部细节(如衬砌厚度、机电设备布局)与外部环境(地质断层、地下水分布)统一在三维空间中,形成“地上地下、宏观微观一体化”的数字底座。

(2)动态数据关联与协同分析:通过IFC(工业基础类)标准或CityGML(城市地理标记语言)实现BIM与GIS数据格式互通,确保设计参数、施工进度、监测数据与地理信息的动态关联,例如在隧道掘进过程中,BIM模型实时更新施工进度,GIS则同步分析周边地层沉降风险,触发预警。

(3)全生命周期管理支持:覆盖设计阶段(地质选线、碰撞检测)、施工阶段(进度模拟、资源调度)、运维阶段(病害监测、应急响应)的全流程应用。

在重庆某隧道项目中,BIM+GIS技术的应用使设计变更减少35%,施工返工率降低28%。

2.3 物联网监测系统

物联网监测系统由以下部分组成。

(1)传感器网络:包括应变计、收敛计、渗压计等,监测结构变形、应力、渗漏水等情况。

(2)环境监测设备:检测CO浓度、能见度、风速等运营环境参数。

(3)视频监控系统:采用智能摄像头实现全天候监控。

(4)定位系统:通过UWB或RFID技术对人员和设备进行精确定位。

系统采用边缘计算架构,在数据采集端进行初步处理,减轻网络传输压力。采样频率可根据需要动态调整,最高可达100 Hz。

2.4 人工智能辅助决策

人工智能技术在隧道工程中的应用主要体现在以下方面。

(1)病害检测与结构健康监测

裂缝识别:采用YOLOv7实时检测隧道衬砌图像中的裂缝位置,配合U-Net进行像素级分割,量化裂

缝宽度与走向(如杭州紫之隧道无人机巡检系统,识别精度达95%)。

渗漏水分析:基于Mask R-CNN分割渗漏区域轮廓,结合红外热成像数据与LSTM模型预测渗漏发展趋势(港珠澳大桥海底隧道案例)。

结构变形预警:利用Transformer时序模型处理光纤传感数据,捕捉管节变形异常模式,实现毫米级精度预警(胶州湾隧道健康监测系统)。

(2)施工进度与资源优化

盾构掘进参数优化:采用深度确定性策略梯度(DDPG)算法,根据地质雷达数据实时调整推进速度、刀盘扭矩(北京东六环改造隧道,掘进效率提升20%)。

施工资源调度:基于多智能体强化学习(MARL)协调混凝土运输车、渣土车路径,减少设备等待时间(成昆铁路小相岭隧道案例)。

工期预测:通过Prophet时间序列模型分析历史施工数据,预测雨季、复杂地层对进度的影响(川藏铁路隧道群管理平台)。

(3)环境与设备智能调控

通风系统调控:使用PID神经网络动态调节风机转速,结合CO/烟雾浓度传感器数据实现按需送风(厦门翔安隧道节能系统,能耗降低30%)。

照明跟随控制:基于深度Q网络(DQN)学习车辆轨迹与光照强度关系,动态调光(株洲高速隧道案例,节电率达40%)。

设备故障预测:采用自编码器(Autoencoder)分析振动传感器数据,检测盾构机主轴承异常振动(中铁装备盾构机智能诊断平台)。

(4)应急决策与路径规划

火灾逃生路径规划:D* Lite算法动态更新烟雾扩散模型下的最优逃生路径,通过AR导航指引人员疏散(重庆曾家岩隧道火灾演练系统)。

塌方救援资源调度:NSGA-II算法平衡救援时间、物资消耗与风险系数,优化人员-设备分配方案(成兰铁路平安隧道应急平台)。

地质灾害模拟:物理仿真模型+Pix2Pix GAN生成不同降雨强度下的山体滑坡场景,辅助应急预案制定(云南大瑞铁路高黎贡山隧道)。

3 重庆市山岭隧道智慧化建设运维实践

3.1 智慧化建设实践

曾家岩隧道施工现场,巨大的盾构机不再是盲

目前行的钢铁巨兽,而是变成了会“思考”的智能体。这台装备了128个传感器的智能盾构机,在穿越嘉陵江底破碎带时,搭载的岩机交互系统能够根据刀盘振动频率和推力变化,实时判断前方围岩状况。2023年汛期,系统敏锐捕捉到刀盘扭矩的异常波动,结合地质雷达数据,提前预警了江底岩溶管道渗流风险,施工团队及时调整掘进参数并采取超前注浆措施,成功避免了一起可能发生的突水事故。这种“感知-决策-执行”的闭环控制,彻底改变了传统隧道施工“靠经验、凭感觉”的粗放模式。

在长江南岸的真武山隧道群,智慧化建设展现出更丰富的应用场景。项目团队创新性地构建了“空天地”一体化监测网络:高精度北斗卫星监测地表沉降,无人机每周进行三维扫描,隧道内部则布设了由光纤和MEMS传感器组成的立体监测网,这种多层次感知体系捕捉到了一个有趣的现象——隧道开挖引发的地表沉降并非均匀分布,而是呈现出明显的“时空滞后效应”。基于这一发现,工程师们优化了开挖步序,将地表建筑变形控制在3 mm以内,比行业标准严格了整整4倍。更令人称奇的是,项目开发的数字孪生平台能够模拟不同施工方案对环境的影响,在虚拟世界中“预演”了17种施工工况,最终选择的方案节省了28%的支护成本。

在穿越渝中半岛的解放东西路隧道项目中,工程师们遇到了堪称“地质百慕大”的复杂情况,短短1.5 km的区间要穿越7种截然不同的岩层,包括膨胀性泥岩、高角度逆断层和隐伏岩溶区。传统钻探取样根本无法全面掌握地质情况,项目团队转而采用“透明隧道”技术——通过融合地质雷达、微震监测和钻孔CT数据,构建了分辨率达0.5 m的三维地质模型。这个数字模型不仅准确预测了施工中遇到的3处溶洞,更揭示了岩层裂隙水的运移规律。

重庆的智慧隧道建设不仅关注施工阶段,更着眼于全生命周期管理。在寸滩长江大桥隧道,建设者将传感器像“神经元”一样植入混凝土结构中,形成了具备自感知能力的智能衬砌。这些内置的“健康芯片”可以监测衬砌应变、渗漏和钢筋锈蚀等情况,数据通过5G网络实时传输至运维平台。2024年初春,系统捕捉到北线隧道K12+350断面衬砌背后的异常温湿度变化,经核查发现是一处隐蔽的施工缝渗漏。这种“把脉问诊”式的智能监测,将传统的人工巡检频率从每周1次降低到每季度1次,而监测

精度反而提高了5倍。

3.2 智慧化运维实践

在鹅岭隧道控制中心,巨大的弧形屏幕上跳动着数以万计的数据流,这些来自隧道各个角落的传感器信号,编织成了一张无形的神经网络。运维工程师小陈不再需要像前辈那样带着手电筒和记录本钻进隧道检查,而是通过智能巡检系统,就能对隧道健康状况了如指掌。这个系统最神奇之处在于它的“预判能力”——去年夏天,系统通过分析衬砌微应变数据的时空演化规律,提前72 h预警了K3+250段落的潜在剥落风险,运维团队及时采取加固措施,避免了一起可能引发严重事故的衬砌垮塌。

长江下的朝天门隧道里,一场人机协同的智慧运维大戏每天都在上演。隧道顶部安装的智能摄像头不仅能够捕捉清晰的画面,更能通过深度学习算法识别细微的裂缝扩展。有趣的是,这些“电子眼”还学会了重庆特有的“隧道方言”——它们能够区分正常渗水和危险渗漏的区别,甚至能根据水渍的形态判断水源方向。去年汛期,系统发现一处看似普通的渗水点呈现出特殊的放射状纹路,立即触发二级预警。经核查,此处渗水背后竟是一个正在扩展的空洞,最终通过及时处置避免了重大安全隐患。

在重庆特有的复杂地质条件下,隧道结构健康监测系统展现出了惊人的洞察力。大学城隧道布设的分布式光纤传感网络,能够感知0.01 mm级的结构变形。去年春季,系统捕捉到一段看似正常的衬砌出现了异常的应变波动,经过大数据分析,发现这种波动与远处工地施工的爆破作业存在0.8 s的时滞相关。这个发现让工程师们意识到,传统认为互不影响的相邻工程活动,实际上可能通过地层传递应力相互干扰。基于这一认识,重庆修订了隧道保护区的管理规定,要求周边施工必须纳入统一监测网络。

重庆的智慧隧道运维实践正在书写新的行业标准。在两江隧道群,不同年代建设的隧道通过统一的数字平台实现了协同管理。这个平台最精妙的设计在于其“进化能力”——每处理一次异常事件,系统就会自动更新知识库,使得整体运维水平呈螺旋式上升。据统计,平台运行三年来,故障识别准确率从最初的82%提升到96%,平均处置时间缩短了40%。

4 智慧化运维管理策略

4.1 结构健康监测(SHM)系统

SHM 系统采用多源异构数据融合技术,主要功能包括了以下部分。

(1)实时监测:对隧道衬砌变形、收敛、应力等进行连续监测。

(2)状态评估:基于监测数据评估结构安全状态。

(3)寿命预测:建立结构性能退化模型,预测剩余使用寿命。

(4)维护决策:根据评估结果制定科学维护计划。

系统采用“云-边-端”协同架构,在重庆某隧道应用中,成功预警了2次重大结构异常,避免了可能发生的坍塌事故。

4.2 交通流智能调控

交通流智能调控系统主要功能包括以下部分。

(1)实时监测:通过视频分析、地磁检测等技术获取实时交通数据。

(2)拥堵预警:基于历史数据和实时数据预测拥堵发生概率。

(3)信号控制:联动周边交通信号灯,优化交通组织。

(4)信息服务:通过可变情报板、导航 APP 等发布实时路况。

在重庆某隧道应用中,系统使通行效率提高15%,事故率下降20%。

4.3 应急管理 with 灾害预警

智慧化应急管理系统包括了以下部分。

(1)灾害监测:实时监测火灾、水灾等灾害信号。

(2)应急预案:建立数字化应急预案库。

(3)应急指挥:集成视频会商、资源调度等功能。

(4)疏散引导:通过智能照明、广播系统引导人员疏散。

系统采用“平战结合”模式,平时用于演练培训,战时快速响应。在某次火灾演练中,系统使疏散时间缩短40%。

5 智慧化建设与运维技术难点与瓶颈分析

5.1 数据治理与质量评价体系缺失

隧道施工与运维产生的数据量激增,但数据噪声、冗余及场景覆盖不足等问题突出。例如,盾构施工中的扭矩、推力等参数虽被持续监测,但数据质量

缺乏量化评估标准,导致预测模型可靠性受限。

技术突破方向:需构建基于精度、包容性与信息量的多维度数据质量评价指标(如L2范数模型),并通过数据清洗与增强技术提升核心数据集价值。

5.2 多系统集成与标准化壁垒

智慧化系统(如BIM+GIS平台、AI监控系统)与既有管理系统(ERP、CRM)间存在接口不兼容、数据格式差异等问题,导致信息孤岛现象普遍。

技术突破方向:需制定统一的行业级数据交换标准(如IFC与CityGML融合协议),并开发轻量化中间件实现异构系统无缝对接。

5.3 实时感知与算力瓶颈

长隧道群的全域实时感知需处理海量视频、雷达与传感器数据,现有边缘计算设备难以满足低延迟需求。

技术突破方向:需研发专用AI芯片(如NPU)与分布式边缘计算架构,结合5G-A/6G网络提升数据传输与处理效率。

5.4 智能化水平与设备适配性不足

现有智能装备(如凿岩台车、湿喷机械手)的自主决策能力有限,多依赖预设程序,难以适应复杂地质突变。

技术突破方向:需强化装备的自主感知-决策闭环能力,如引入强化学习(DDPG算法)实现盾构参数动态优化,或通过数字孪生预演设备适应性调整策略。

5.5 动态场景下的模型泛化能力不足

AI模型在单一场景训练后,难以泛化至其他隧道环境。

技术突破方向:需发展小样本学习(如MAML元学习算法)与迁移学习技术,构建跨场景特征提取框架,并通过物理仿真模型(如FEM)增强数据多样性。

5.6 能耗与可持续性挑战

智慧化设备(如雷视感知系统、数字孪生平台)的高能耗与隧道低碳目标存在矛盾。传统隧道照明年耗电成本达38万元每2km,虽通过调光算法降低57%能耗,但设备全生命周期碳足迹仍待优化。

技术突破方向:需开发光储直柔一体化系统(如光伏+超级电容),结合数字孪生优化设备运行策略,并通过轻量化模型压缩技术(如知识蒸馏)降低边缘端算力需求。

6 挑战与对策

6.1 面临的主要挑战

山岭隧道建设堪称现代土木工程领域最具挑战性的课题之一,其面临的困难犹如一道道天然设置的工程考题。在重庆这座立体魔幻之都的地下空间开拓过程中,建设者们每天都在与复杂的地质环境进行着惊心动魄的博弈。

地质条件的极端复杂性是首要难题。重庆特有的川东褶皱带地质构造,使得隧道往往要穿越多套不同年代、不同性质的地层。更棘手的是,这些岩层中普遍发育的节理、裂隙网络,使得围岩稳定性评估变得异常困难。曾家岩隧道施工期间,就曾遭遇过看似完整的花岗岩体,在开挖后因隐伏节理发育而突然垮塌的险情,这种地质“伪装”现象让即便是经验丰富的工程师也防不胜防。

水文地质条件的特殊性构成了第二大挑战。重庆“两江四岸”的地理特征,使得隧道建设常常面临高水压、大流量的地下水问题。在朝天门两江隧道施工中,最大水压达到1.2 MPa,相当于每平方米承受120 t的压力。岩溶地区的地下暗河系统更是防不胜防,鹅公岩轨道专用桥隧道就曾因遭遇未探明的岩溶管道,导致单日突水量突破8万 m³,相当于30个标准游泳池的水量。这种突发性涌水不仅威胁施工安全,还会引起地表井泉干涸等环境问题,处理不当就可能演变为社会事件。

高地应力与软岩大变形问题同样令人头痛。在平行岭谷区,隧道开挖后围岩应力释放产生的变形量常常超出预期。科学城隧道施工中,就出现过单日收敛变形达15 cm的极端情况,原本设计使用的钢拱架被挤压得像麻花一样扭曲变形。这种“隧道越挖越小”的现象,不仅造成支护结构失效,还严重威胁作业人员安全。更复杂的是,重庆地区常见的砂泥岩互层地层,遇水软化特性明显,雨季时的变形速率往往是旱季的3~5倍,这种时变特性给支护时机选择带来巨大困难。

特殊不良地质体是另一个不可忽视的难点。重庆地区广泛分布的煤层瓦斯、石膏层溶蚀空洞、断层破碎带等,就像埋在地下的“定时炸弹”。中梁山隧道施工期间,瓦斯监测浓度曾多次突破警戒值,迫使作业面不得不停工撤人;而黄桷坪隧道则因穿越膏盐地层,遭遇了罕见的结晶膨胀压力,导致衬砌结构发生纵向开裂。这些特殊地质问题往往具有

突发性和不可预见性,常规勘察手段很难全面掌握其分布规律。

6.2 发展对策建议

山岭隧道建设面临诸多挑战,包括复杂地质条件、高水压、高地应力、环境保护要求等。针对这些问题,结合当前工程实践和技术发展趋势,提出以下对策建议。

(1) 强化地质勘察与超前预报技术

复杂地质条件是山岭隧道建设的主要挑战之一。传统的钻探取样方法难以全面掌握地层分布,因此应采用综合地质勘察技术,如三维地震勘探、地质雷达、微动探测等,构建高精度地质模型。

(2) 推广机械化、智能化施工

传统钻爆法依赖人工操作,效率低且安全风险高。应推广全机械化施工,提高开挖效率。此外,数字孪生技术可实时模拟施工过程,优化开挖方案,如广州白云机场二高隧道采用“三台阶七步法”替代传统双侧壁导坑法,减少对围岩的扰动。

(3) 优化支护与衬砌质量控制

初期支护和二次衬砌是隧道安全的关键环节。针对软弱围岩大变形问题,可采用预应力锚索+可缩式钢架组合支护。此外,智能监测系统(如光纤传感、MEMS传感器)可实时监测衬砌应力、裂缝扩展,确保结构长期稳定。

(4) 完善智慧化运维体系

隧道建成后,智慧运维可延长使用寿命并降低维护成本。建议建立结构健康监测(structural health monitoring, SHM)系统,如重庆真武山隧道采用分布式光纤传感网络,实时监测0.01 mm级的变形。同时,AI病害诊断技术可自动识别裂缝、渗漏,如龙洲湾隧道的智能巡检系统将病害检出率提高40%。

7 结 语

7.1 主要结论

(1) 智慧化技术可有效解决重庆市山岭隧道建设运维难题。

(2) BIM+GIS、物联网、人工智能等关键技术已取得良好应用效果,不仅实现了隧道的智能化管理,还推动了基建行业向数字化转型的纵深发展。

(3) 智慧化建设可显著提升工程质量和运营安全水平。

7.2 展望

(1) 数字孪生技术将实现隧道全生命周期精

细化管理。

(2) 5G+北斗将提升监测系统的实时性和可靠性。

(3) 自主可控的智能装备将推动施工方式变革。

(4) 碳足迹监测将成为智慧隧道的新功能。

(5) 数字孪生与物理信息系统(CPS)深度耦合,将实现从数据驱动到知识驱动的跃迁。

参考文献:

[1] 王梦恕.中国隧道及地下工程修建技术[M].北京:人民交通出版社,2010.

[2] 钱七虎.地下工程安全风险管理的现状与展望[J].岩石力学与工程学报,2018,37(11):2425-2444.

[3] 张顶立.隧道及地下工程智慧化建造技术研究进展[J].中国公路学报,2021,34(1):1-15.

[4] 李术才.复杂地质条件下隧道施工地质灾害预警与控制技术[J].岩石力学与工程学报,2019,38(6):1081-1101.

[5] 何川.山岭隧道智能建造关键技术研究与应用[J].土木工程学报,2022,55(3):1-16.

[6] 重庆市交通局.重庆市“十四五”综合交通运输发展规划[Z].重庆:重庆市“十四五”综合交通运输发展规划,2021.

[7] 中铁二院工程集团.重庆曾家岩隧道工程BIM技术应用报告[R].重庆:中铁二院工程集团,2019.

[8] GB/T 51212—2016,建筑信息模型(BIM)应用统一标准[S].

[9] 周创兵.岩土工程监测与信息化施工[M].北京:科学出版社,2018.

[10] 李利平.隧道工程智能化监测预警方法与应用[M].北京:人民交通出版社,2020.

[11] JTG H12—2015,公路隧道养护技术规范[S].

[12] 重庆市设计院.重庆市山地城市隧道建设技术指南[Z].重庆:重庆市山地城市隧道建设技术指南,2020.

[13] 刘泉声.数字孪生技术在隧道工程中的应用研究[J].岩土力学,2021,42(5):1201-1212.

[14] 王明年.智慧隧道系统架构与关键技术[J].现代隧道技术,2020,57(4):1-10.

[15] 黄宏伟.基于物联网的隧道结构健康监测系统研究[J].同济大学学报(自然科学版),2019,47(5):601-610.

《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

官方网址:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:roadbridgeflood@163.com

