

文章编号:1005-0523(2025)06-0001-16



钻爆法隧道无人工地相关技术研究现状与展望

朱碧堂¹,罗文俊¹,王希云²,施浪³

(1. 华东交通大学土木建筑工程学院,江西 南昌 330013; 2. 国能包神铁路集团有限责任公司,内蒙古 包头 014014;
3. 中国铁建重工集团股份有限公司,湖南 长沙 410100)

摘要:在铁路工程建设不断“由丘陵走向深山、由内地走向边疆”的背景下,作为铁路关键基础设施的钻爆法隧道施工日益面临极端地质条件与极端建造环境的挑战。随着人工智能、机器人、物联网等新一代信息技术的快速发展,钻爆法隧道施工正由全工序机械化向智能化、少人化方向演进。文章系统梳理了钻爆法隧道无人工地相关技术的研究进展,重点分析智能施工装备、数字孪生模型、集群装备远程集控与协同作业等关键无人化技术的研究现状,并总结当前取得的成效及在装备智能化、技术集成与标准体系建设等方面面临的挑战。最后,对未来钻爆法隧道无人工地技术集成应用的发展趋势进行了展望,以期为推动铁路基础设施智能化建设提供参考。

关键词:钻爆法隧道;无人工地;智能施工装备;数字孪生;人工智能;远程集控与协同作业

中图分类号:U455

文献标志码:A

本文引用格式:朱碧堂,罗文俊,王希云,等.钻爆法隧道无人工地相关技术研究现状与展望[J].华东交通大学学报,2025,42(6):1-16.

Research Status and Prospect of Unmanned Construction Technology in Drill-and-Blast Tunnels

Zhu Bitang¹, Luo Wenjun¹, Wang Xiyun², Shi Lang³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;
2. Guoneng Baoshen Railway Group Co., Ltd., Baotou 014014, China;
3. China Railway Construction Heavy Industry Co., Ltd., Changsha 410100, China)

Abstract: As the construction of Chinese railway expands from hills to deep mountains and from the inland to the frontier, drill-and-blast tunnels are critical components increasingly confronted with extreme geological conditions and demanding environments. With the rapid development of information and communication technologies such as artificial intelligence, robots, and the Internet of Things, the construction of drill-and-blast tunnels is evolving from full-process mechanization toward greater intelligence and less manpower. This paper systematically reviews the research progress of unmanned construction technology in drill-and-blast tunnels. It focuses on the research status concerning key unmanned technologies, including intelligent construction equipment, digital twin modeling, remote centralized control and collaborative operation of equipment group. The paper also summarizes current achievements and identifies challenges related to equipment intelligence, technology integration, and the establishment of standard systems. Finally, the development trend of integrated application of unmanned

收稿日期:2025-10-27

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFB2603900)

construction technology in drill-and-blast tunnels in the future is prospected, in order to provide a reference for promoting the intelligent construction of railway infrastructure.

Key words: drill-and-blast tunnels; unmanned construction; intelligent construction equipment; digital twins; artificial intelligence; remote centralized control and collaborative operation

Citation format: ZHU B T, LUO W J, WANG X Y, et al. Research status and prospect of unmanned construction technology in drill-and-blast tunnels[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(6): 1-16.

铁路作为国家重要的交通基础设施,其建设质量与效率直接关系到国民经济发展与社会运行效率,而钻爆法隧道是铁路建设中的关键控制性工程。随着川藏铁路、新藏铁路等国家重大工程的陆续推进,我国铁路工程建设逐步“由丘陵走向深山、由内地走向边疆”,面临的地形与地质条件日趋复杂,隧道工程普遍面临极端地质条件与极端建造环境带来的挑战^[1-3]。面对高寒、活动断层密集、生态敏感等特殊建设环境,传统的劳动密集型施工模式已难以适应高质量发展要求。加快推进铁路隧道施工向“自动化、数字化、智能化”转型,不仅关乎工程效率,更是提升整体建设质量、应对未来行业挑战的战略选择。

近年来,以机器人、人工智能、物联网、大数据、北斗导航等为代表的新一代信息技术与铁路基础设施建设深度融合,催生了以无人工地为特征的智能建造新模式。无人工地施工技术旨在通过智能技术集群替代传统人工作业,实现施工过程的自动化、智能化和无人化,正成为铁路工程建设技术变革的重要方向。在这一转型过程中,数据驱动和人工智能正逐步取代传统依赖经验的工程质量管控方式,推动施工过程向可量化、可追溯、可优化的方向演进。同时,智能化施工也有助于降低对熟练技术工人的过度依赖,缓解因人口老龄化带来的劳动力结构性短缺与人力成本持续上涨的双重压力,为铁路建设的可持续发展提供有力支撑。

无人工地施工技术早期实践可追溯至1969年,当时日本成功研制出遥控推土机并应用于实际作业,此后逐步推广至地震等危险环境下的灾后恢复工作^[4]。在我国,无人化施工作业较早应用于农业领域,主要着眼于提升播种和移栽精度、提高作业效率^[5-6],随后延伸至采矿、土石坝建设等安全风险较高、劳动条件苛刻或质量控制要求高的行业^[7-9]。

总体来看,无人工地的基本特征可概括为5个方面。

1) 高度自动化施工装备:使用无人驾驶工程机械、机器人、无人机、远程遥控装备等替代传统人工操作,装备具备智能控制和远程操控能力。

2) 全流程实时智能管控:基于物联网、视频监控与5G通信等技术,实时采集环境、设备、进度与质量数据,借助BIM、GIS和数字孪生技术实现施工全过程的可视化、数字化管理。

3) 数据驱动的决策优化:利用人工智能和大数据分析对施工进度、质量、安全进行智能决策,降低施工风险,提升施工精度与效率,实现施工方案仿真优化与资源自动调度。

4) 远程控制与协同作业:通过远程集控系统实时操控设备,支持多机协同作业,降低现场人员配置需求。

5) 安全与可持续性增强:有效减少高危环境下的人工暴露和人为失误,同时优化资源利用,降低能耗与材料浪费。

在铁路钻爆法隧道方面,我国在郑万高铁、西渝高铁全工序机械化推行的基础上,也逐渐向智能化、少人化施工方向发展。随着无人工地施工技术在钻爆法隧道施工中的落地,不仅意味着单机智能装备的应用,更代表着整个施工管理体系的重构与革新。通过智能感知、数据分析、自主决策和自动化执行的闭环,实现隧道场景下少人化甚至无人化的高效安全作业,最终达到提升工程质量、保障施工安全、降低建设成本、减少环境影响等多重目标。本文从智能施工装备、多源数据采集与处理、智能装备远程集控和智能决策等方面,系统梳理与无人工地相关技术在铁路钻爆法隧道施工中的研究现状,分析关键技术体系与发展瓶颈,并对未来发展趋势进行展望,以期为铁路工程智能化转型提供理论参考与实践指引。

1 钻爆法隧道智能施工装备

钻爆法隧道无人工地首先依赖于智能装备的发展,主要体现在:①智能化装备的整体机械性能、信息化水平、决策能力较传统施工装备有着显著的提升,可有效提高工作效率,降低劳动强度,改善作业环境,是单工序智能的重要基础;②成套智能化装备具有数据共享、功能协同、决策优化等功能,是实现多工序甚至全工序智能化、少人化的前提条件。

为了开展隧道内无人化施工,一般需要研发无人驾驶和远程操控两类智能装备,前者可在复杂隧道场景内自主行走,后者则通过远程操控系统进行远程遥控。在无人驾驶方面,由于隧道内复杂的施工环境,现有装备主要基于轮式机器人的辅助施工设备。例如,秦承帅^[10]研发的隧道掌子面勘察测量机器人(图1),通过搭载三维激光扫描仪、相机和红外高清球机等,可实现快速地质编录与围岩分级、自动化超欠挖测量与智能化岩体质量评价;山东大学研发了基于影像及激光测振系统的掌子面围岩坍塌预警激光(图2),可实现基于数字影像的掌子面危险区域等级划分、掌子面落石实时监测、掌子面动力特征实时监测以及融合数字影像和激光测振监测数据的掌子面稳定状态监测预警^[3]。



图1 隧道掌子面勘察测量机器人

Fig. 1 Tunnel face survey and measurement robot



图2 激光测振设备与软件系统

Fig. 2 Laser vibration measuring equipment and software system

在钻爆法隧道钻孔、初支和二衬浇筑等关键工序方面,大型装备近年来通过集成传感器、机器视觉、机器人控制、大数据分析等技术和AI算法,实现了施工过程的精确控制和实时监控,极大地提升了钻爆法的效率和安全性,如智能型凿岩台车、智能锚杆台车、智能混凝土喷射台车等^[11-13]。典型的智能化施工装备及其具体功能特点如表1所示^[11]。

尽管上述大型智能施工装备在郑渝高铁、川藏铁路、西延高铁等重大工程中得到了成功应用,提高了施工效率,减少了施工人员,但要实现真正的无人工地,还必须在4个层面取得突破性进展。

1) 环境感知与自主导航的局限性。钻爆法隧道钻孔、钻锚注一体机等装备体积大、吨位高,线盘改造困难、定位精度低、姿态控制难,导致现有大型智能装备仍严重依赖人工视距内遥控,缺乏在隧道复杂、动态环境下的“自我定位-环境理解-主动避障”能力。

2) 关键工序施工装备的智能化水平不足,亟待攻克工艺级的精细化、自适应控制难题。例如,凿岩台车如何实现基于岩体识别的自适应智能布孔与毫米级精准钻进,从根本上控制超欠挖问题;湿喷台车如何通过喷射轨迹与工艺参数的实时协同优化,将混凝土回弹率降至最低;拱架台车如何实现重型构件的毫米级快速定位与平顺安装,从而大幅提升支护效率与质量。

3) 极端地质条件的适应性与鲁棒性缺失。现有装备的智能功能多在理想或常规工况下开发,面对高地热、高压富水、强岩爆、大变形等极端条件时,其传感系统、执行机构和控制算法的可靠性、耐久性与智能响应能力可能难以满足无人化作业要求。

4) 多机协同与信息融合壁垒。当前各智能装备仅是“信息孤岛”式的单机智能化,缺乏统一的“集群智能”管控平台,导致数据割裂(围岩、设备、人员之间的信息流无法打通)、调度僵化(无法实现跨工序的动态任务规划与实时协同调度)和管理滞后(难以对项目进度、质量、安全进行前瞻性、全局性的闭环管控)。

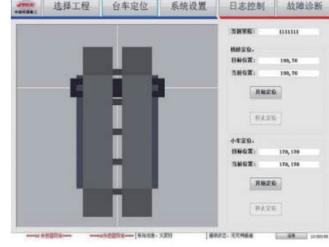
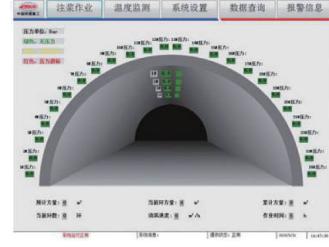
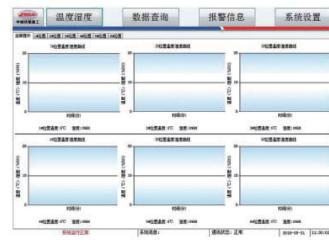
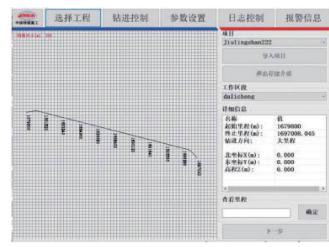
为解决上述挑战,需要构建一个层次化的技术体系,推动隧道施工从“装备智能化”向“施工体系智能化”的转型。

表1 钻爆法隧道主要智能设备及其功能

Tab.1 Intelligent functions and main equipment for drill-and-blast tunnels

作业线	智能施工装备	主要功能特点	智能装备图示	智能控制软件
超前支护	多功能钻机	用于150 m级超前钻探作业,具备自动地质取芯、随钻测距、自动生成工作日志等功能,可对掌子面前方不良地质进行提前预报		
全挖	智能注浆台车	自动注浆、注浆方量自动计量、基于MWD参数自动生成注浆参数、自动生成注浆日志、数据交互,具有“自动化、可视化、信息化”特征,可实现注浆施工过程的自感知、自决策、自执行功能		
初期支护	全电脑型凿岩台车	具备隧道设计与钻爆参数导入、智能定位、自动钻孔、锚孔施工、3D轮廓扫描、自动生成凿岩日志、数据交互等功能,可通过数字化精准控制,优化超欠挖控制,提高钻孔精度与效率		
	智能锚杆台车	具备隧道及锚杆设计参数导入、智能定位、3D轮廓扫描、自动钻孔、自动锚杆安装、自动施加预应力、自动识别锚杆、自动生成锚杆日志(包括钻孔数量、钻孔深度、钻孔时长、锚杆数量、锚杆长度、注浆参数等),实现了钻孔、注浆、锚固连续、协同作业,大幅提升锚杆施工效率与注浆密实度		
	智能拱架台车	具备隧道及拱架设计参数导入、智能定位及轮廓扫描、三维轮廓重建、超欠挖判别、自动生成拱架日志等功能,可实现多榀拱架同时拼装、拱锚一体、铰接式拱架安装等		
	智能混凝土喷射台车	具备隧道设计参数导入、智能定位、3D轮廓扫描、自动喷射方量统计、自动生成隧道湿喷日志功能。采用湿喷工艺,改善作业环境、降低回弹率,可实时调节喷射角度和喷射距离,实现模板内混凝土分层喷射		

续表1

作业线	智能施工装备	主要功能特点	智能装备图示	智能控制软件
初期支护	大跨度伸缩式仰拱栈桥	可自行走定位、仰拱分区作业,实现了掌子面开挖过程与仰拱施工分离平行作业,大幅提高施工效率、缩短工期,为无人驾驶装备作业创造了条件		
	数字化防水板台车	具备防水板用量计算、土工布与防水板自动铺设、铺设日志自动生成等功能		
	数字化衬砌台车	具有双浇筑、带压入模、高频振捣、软搭接以及信息集成传输系统和数字化控制功能,可解决传统衬砌台车在隧道衬砌施工中存在的跑模、振捣强度大、搭接部易损坏等问题		
	数字化养护台车	具备恒温恒湿养护、温湿度实时监控、养护日志自动生成等功能		
二衬	数字化衬砌检测车	具备多自由度、全断面检测,病害识别定位,以及衬砌空洞、衬厚等检测功能		

2 无人工地多源数据与孪生模型

根据无人化施工发展需求,钻爆法隧道无人工地应由智能装备、集控系统与数字孪生模型共同构成协同体系(图3)。智能装备是执行主体,负责执行集控系统下发的施工控制指令,并借助激光雷达、应力计等传感器采集地质、设备与环境数据,通

过集控系统动态优化作业参数、同步更新隧道施工孪生模型;集控系统为“智能中枢”,是装备协同与资源调度的集成平台,具备施工态势识别、工序进度管理与装备故障诊断等功能,能够对装备位姿、人员与施工过程进行全方位实时监控与调度;数字孪生模型作为“决策大脑”,是隧道施工的虚拟镜像,支持实景展示、施工过程仿真与科学决策,完成

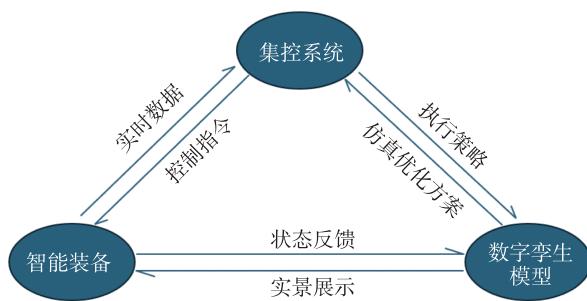


图3 由智能装备、集控系统与数字孪生模型共同构建的无人工地协同体系

Fig. 3 An unmanned construction system with intelligent equipment, centralized control system and digital twin model

对地质、装备、人员与工艺的可视化监控,对集控系统生成的施工策略进行仿真模拟和效果推演,为方案优化提供依据。

针对钻爆法隧道无人工地多源、多模态数据,

在采集、传输和处理过程中面临着诸多挑战,汇总于表2,诸如数据同步、数据融合、带宽限制以及实时性要求等。

2.1 多源数据的采集

隧道施工过程的数字化和信息化是隧道智能建造的核心组成部分,主要涵盖隧道工程勘察、设计、施工过程的数字化与信息化服务^[14]。在钻爆法隧道无人工地中,人、机、料、法、环等施工要素的全面数字化是实现无人工地施工的基础。数据从采集、传输、接入、存储到分发至应用模块计算后台,进而支撑无人工地决策分析与遥控指令下发,形成持续流动、更新系统状态的闭环。根据数据来源,无人工地数据大体上可分为装备运行和工作参数数据、人员和物料数据、施工环境和后台计算分析数据,主要数据如表3所示。针对不同的数据来源和类型,一般采取不同的采集和传输方式。

表2 多源数据处理的主要阶段与关键技术

Tab.2 The main stages and key technologies of multi-source data processing

序号	处理阶段	核心任务	关键技术	主要挑战
1	数据采集	原始数据准确、实时采集	传感器、PLC、激光点云、视频等	接口多样性、环境干扰、实时性保障
2	数据传输	低时延、高可靠	5G MEC、WiFi 6/7、无线网桥、TSN	带宽限制、延迟敏感、信号稳定性
3	数据集成	数据清洗、转换、存储	数据清洗、格式转换、数据库构建	数据异构性、不一致性、质量不一
4	数据分析	价值挖掘与决策支持	关联分析、分类聚类、深度学习	多模态融合、特征提取、模型优化

表3 钻爆法隧道无人工地多源数据

Tab.3 Multi-source data of unmanned construction site for drill-and-blast tunnels

序号	数据名称	采集方式
1	施工任务信息	项目施工组织设计下发
2	环境监测	温度、湿度, CO ₂ 、O ₂ 、CH ₄ 等自动化采集
3	围岩信息和等级	从施工组织管控平台共享获取
4	设备运行数据	温度、油压等传感器自动化采集
5	设备工作参数	压力传感器自动化采集
6	设备故障监测	温度或振动传感器自动化采集
7	人员和设备定位	超宽带 (UWB) 技术
8	结构内力变形监测	全站仪、应力和应变传感器采集
9	质量检测 (超欠挖分析)	车载或人工激光雷达扫描
10	监控视频	摄像机
11	数字孪生模型	3D引擎
12	后台计算 (如路径规划)	计算输出

针对隧道内施工装备(如二衬台车、仰拱栈桥、凿岩台车等)与车辆,通过厂家提供的几何模型或激光点云轻量化处理,建立数字化几何模型;实时状态数据(如力学监测数据、视频流等)通过第三方接口上传至系统,并预先锚定于隧道相应位置;智能装备运行数据由车载数据传输模块进行采集和上传,以支撑高精度动态三维模型的构建。针对隧道内的作业人员、装备和物料等资产,一般采用沿超宽带隧道侧壁部署的UWB定位系统^[15],获得实时位置数据;对需定位导航的智能装备,采用融合UWB、惯导单位(IMU)与激光雷达的同步定位与建图(SLAM)技术^[16],实现低延迟位姿感知与导航。

隧道环境数据主要采用接触式和非接触式两种方式进行采集,接触式测量包括现场地应力测试、随钻测量等手段获取岩石物理力学信息,非接触式测量包括使用激光扫描、数字照相、全站仪测量等手段获取隧道轴线、轮廓、掌子面、隧道变形等信息^[14]。随钻测量技术通过在钻进施工过程中实时获取地质参数,高效指导施工方案的调整和优化^[17-18],

为隧道工程的高质量建设提供了强有力的支持和保障。在非接触式测量方面,激光扫描技术能够快速、准确地获取隧道结构和围岩的三维点云数据,实现隧道结构和围岩的高精度三维建模,为隧道设计和施工提供结构和地质基础数据^[19-20]。

数字照相技术利用高分辨率影像数据,可以直接获取隧道掌子面的表观岩体结构特征,被逐步应用到隧道现场的数据采集中^[21-22]。传统视频监控系统存在视角有限、信息孤立等问题,难以满足大范围施工现场的全局感知需求。当前的研究重点已从单纯的全景成像转向视频传感器网络的优化布局^[23],通过建立三维感知模型,并运用节点贡献度置换迭代算法、粒子群与梯度下降混合算法等智能优化方法,研究在钻爆法隧道场景下以最少摄像机实现最大覆盖率的最优布点方案,提升监控系统的经济性和有效性。

2.2 多源数据传输

在数据传输方面,面对复杂的隧道场景,研究人员开发并适配了多种数据传输技术,形成了有线与无线互补、近距离与远距离结合的混合传输方案,包括5G MEC专网、WiFi 6/7、WiFi 6无线网桥、专用无线通信技术(如MESH自组网通信)等。不同传输技术对比的优缺点如表4所示。其中,5G MEC专网可根据覆盖范围需求,对用户面与控制面板进行不同层级的下沉,可显著降低延迟;WiFi 6/7采用高增益WiFi AP设备配合定向天线能有效增强信号覆盖;WiFi 6无线网桥可提供不低于900 Mbps的传输容量,传输延迟可控制在10 ms以内,满足大多数设备的通信需求;无线通信技术如ZigBee、WiFi和LoRa可克服有线传输布线困难、限制传感器布置范围、线缆使用寿命有限和能耗大等缺点,使传感器的布局范围更加广泛且布局更加自由。

表4 多源数据传输技术对比分析
Tab.4 Comparative analysis of multi-source data transmission technology

传输技术	优势	局限性	适用场景
5G MEC	低延迟、高可靠性、大带宽	基础设施要求高、成本较高	设备远程控制、实时监控
WiFi 6/7	高吞吐量、易于部署	覆盖范围有限、易受干扰	局部区域覆盖、移动设备接入
无线网桥	定向传输、部署灵活	受遮挡影响、需直视距传输	固定点间骨干链路
ZigBee/LoRa	低功耗、远距离、穿透性强	数据速率低、延迟较高	传感器数据采集、监测
MESH网络	自组织、自愈合	延迟较高、容量有限	应急通信、移动节点
微波通信	极高容量、微秒级延迟	部署复杂、成本高、功率大	骨干网络、点对点传输

考虑不同数据传输方式的优点和局限性,刘洪涛^[24]针对高粉尘、高冲击、高振动的钻爆法隧道作业环境以及网络具有承载多样、性能需求高、数据链路稳定性要求高、迁移频次高等需求,提出采用有线光纤+无线网桥局域网设计方案,方案基本性能参数如表5所示。该方案通过光纤将远程操控室局域网引入隧道内,实现大流量数据长距离、高效快速传输;在衬砌台车与防水板台车间通过无线网桥实现装备接入网络,在防水板台车近掌子面侧部署模块化无线网桥(AP)。

2.3 多源数据处理

在钻爆法隧道无人化施工场景中,来自超前地质预报、智能装备、环境监测与视频监控等环节的多源异构数据构成了现场感知的“神经末梢”。这些数据在格式、时序与语义上高度异构,其高效处理与深度融合是实现施工状态精准认知、施工作业

表5 钻爆法隧道专业通信网络系统基本性能参数

Tab.5 Basic requirements for professional communication network system for drill-and-blast tunnels

指标	基本性能参数
带宽	千兆骨干有线传输网络,车载端上行不低于250 Mbps,下行不低于150 Mbps。 操作台端下行不低于900 Mbps,上行不低于900 Mbps
时延	有线传输理论平均时延≤5 ms,无线传输理论平均时延≤30 ms
无线网络覆盖范围	≥400 m
丢包率	不高于1%
信号强度	不低于85 dBm
稳定性	网络抖动可控,满足上述网络带宽和网络传输时延要求

参数自主优化与集群装备协同控制的关键核心技术,直接决定了无人工地的智能化水平。

数据集成与预处理主要包括数据清洗和对齐、格式标准化和降维以及关联数据库构建。针对多源数据的异构性、分布性与自治性,通过数据清洗与对齐处理数据缺失、异常及噪声,并基于统一时间戳(如NTP、PTP协议)解决因采样频率、传输延迟导致的时序不一致问题;通过格式标准化与降维,将非结构化的点云、图像数据与结构化的传感器读数统一转换为适于分析的标准化格式,并采用主成分分析(PCA)等方法进行数据降维,提升后续处理效率;通过关联数据库构建,建立融合地质、装备、环境的时空关联数据库,为深度分析提供高质量数据底座。为解决数据异构难题,需采用层次化的融合策略,包括特征级融合、决策级融合、模型级融合和混合融合^[25]。

随着人工智能技术的发展,深度学习方法在多源异构数据处理方面的应用,极大地提升了多源数据处理的自动化与智能化水平。例如,Zhang等^[26]采用深度学习方法从隧道掌子面点云数据中提取粗糙度、迹线、圆盘模型和间距四种岩体结构面的关键信息;Chen等^[27-29]采用深度学习方法用于隧道掌子面图像数据的处理,以及对迹线、围岩结构面、软弱夹层等信息的提取;贾连辉等^[12]利用机器视觉和无线射频识别等智能化监测手段,通过对钻孔、装药、出渣、支护等工序进行智能识别与统计,开发了智能工序调度管理系统,从而优化掘进工序衔接设计,减少非正常停机以及工序衔接的时间浪费,提高施工循环率。

2.4 钻爆法隧道数字孪生模型

计算机图形学与建模技术的进步为隧道工程数据的智能化表达与可视化提供了坚实的技术基础。在此背景下,建筑信息模型(BIM)作为一种集成设施物理与功能特性的数字化表达方法,已在隧道工程设计、施工与运维全生命周期中得到了广泛应用。例如,李晓军等^[30]提出了基于细节等级(如LOD100/200/300)划分隧道结构,并采用离散化轴线进行单元模型自动拼接的方法,有效提升了隧道BIM的建模效率。然而,研究表明,传统BIM模型本质上是基于设计图纸构建的静态几何模型,其在动态反馈无人化施工过程中的围岩变形、装备运行状态与实时作业进度等信息方面存在明显局限,难以满足智能化施工对数据实时性的高阶需求。

为克服静态模型的不足,数字孪生技术应运而生,其核心在于构建一个与物理工地双向联通、虚实映射并可持续动态演进的虚拟模型^[31]。在技术实现路径上,当前研究普遍侧重于通过集成三维激光扫描与BIM来构建高保真几何场景,并融合物联网传感器、边缘计算等技术,将现场采集的多源、多模态数据(如环境参数、装备位姿、人员与物料信息)通过实时数据库与接口动态驱动虚拟模型更新,最终实现物理实体与数字模型的实时同步与交互。一个完整的隧道施工数字孪生体通常综合利用BIM(提供设计基准)、3D GIS(提供宏观地理环境)与物联网传感数据(提供实时状态),形成覆盖从宏观到微观、从静态到动态的全要素信息集成。

在铁路基础设施无人工地中,数字孪生的价值主要集中于施工方案仿真、智能装备与人员的实时管控以及施工质量控制3个方面。在物理实体施工前,于数字孪生体中预先模拟隧道开挖、支护等关键工序,通过“数字先行”的预演机制,能够有效识别施工组织设计中的潜在冲突与风险,从而优化方案,提升施工效率与安全性。例如,梁策等^[32]通过建立实体构件及施工工序的虚实映射机制,设计了多场景、多类型模型的融合与数据一体化模式,形成了一套钻爆法施工隧道数字孪生系统的构建方法,并成功应用于锚杆与拱架安装的仿真模拟以及初期支护超欠挖的质量诊断。然而,目前基于数字孪生模型实现钻爆法隧道全工序仿真模拟以及对智能装备与人员的实时精准管控,仍存在明显的研究空白。主要原因在于:①数据采集维度不足,难以构建完整的施工过程画像;②模型保真度随施工推进而下降,导致虚拟与实体逐渐失配;③数据实时性差,影响动态决策的时效性;④决策依据不够精确,制约了管控的可靠性;⑤技术实施成本较高,也限制了该技术在实际工程中的规模化应用。

3 智能装备远程集控与智能决策

钻爆法隧道无人化施工的智能体系可划分为执行层、协调层与管控层3个层次^[12]。执行层对应单工序智能,要求单个施工装备具备感知、评价、决策、执行与反馈的完整闭环能力,实现高度自主化。协调层对应多工序智能,核心在于工序间与装

备间的协同,通过数据通信与计算分析,实现多源信息的评价、决策与指令分发,确保智能装备集群的协同作业。管控层对应项目级智能,负责项目层面的整体统筹,基于数据分析结果下发协调指令,形成以数据为核心、以平台为载体的项目级高效安全运营模式。多工序智能作为一种协同智能,其关键在于实现各工序与各台车之间的无缝衔接与整体联动。

3.1 智能装备远程集控系统与调度平台

远程集控系统是钻爆法隧道无人工地施工的“智能中枢”,承担着装备协同指挥与资源统一调度的核心职能。该系统通过集成现代信息技术,构建从现场感知到智能决策的完整技术体系,其架构主要由感知层、网络层、平台层和应用层4个关键层级构成,各层级的功能定位如表6所示。

表6 远程集控系统架构与功能

Tab.6 Architecture and functions of remote centralized control system

层名	核心功能	关键技术/设备
感知层	多源数据实时采集	激光雷达、视觉传感器、智能终端、设备控制器等
网络层	可靠数据传输与共享	有线光纤、5G MEC、无线网桥等混合通信网络
平台层	数据存储、集成、分析与处理	大数据分析、边缘计算、AI 算法、数字孪生
应用层	施工过程优化与闭环控制	质量管理、风险预警、进度监控、设备调度等智能模块

随着物联网、BIM与智能施工技术的快速发展,钻爆法隧道智能化施工管理平台的研究取得了显著进展。朱合华等^[33]基于GIS+BIM+地质模型的一体化框架,研发了基础设施智慧决策服务系统iS3(图4),该系统具备二维/三维图形处理、GIS地图、数据管理与集成分析、工程对象管理和工程全寿命数据管理等核心功能,可通过高精度采集岩体和节理裂隙的几何信息,对岩体表征信息进行三维重构和稳定性分析。

在工程实践方面,郑万高速铁路项目成为技术创新的重要典范。刘飞香^[34]针对超前支护、钻爆开挖、初期支护、二次衬砌等关键工序研发了系列化智能装备集群,并通过集成运动和环境感知、3D激光扫描与定位、信号采集、处理与传输及机器人运动与动力学控制等技术,构建了钻爆法隧道智能建造的4大支撑技术体系:围岩参数识别与处理系统、



图4 iS3系统功能模块
Fig. 4 Functional modules of iS3 system

三维空间定位与量测系统、大数据处理与共享系统和智能控制决策系统。王志坚^[34]则通过集成多源异构数据,开发了“隧道智能建造协同管理平台”。该平台集成了围岩智能分级、设计参数智能优选、开挖及支护智能施工与施工质量智能管控等系统(图5),通过高效的数据流动实现了隧道智能建造的全流程协同。

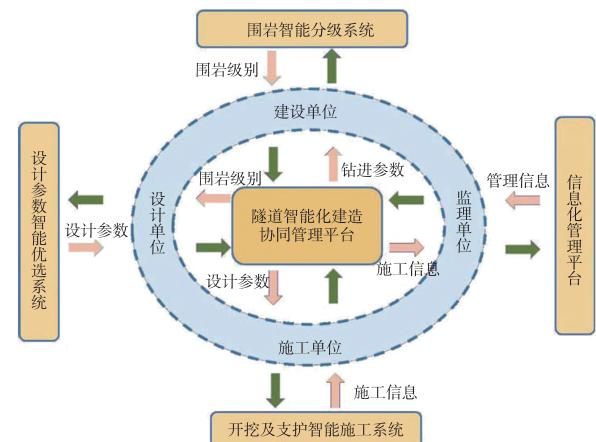


图5 郑万高铁隧道智能建造协同管理平台子系统间数据流动关系
Fig. 5 Data flow relationship between subsystems of platform for Zhengzhou-Wanzhou high-speed railway

尽管现有施工管理平台初步实现了“装备-装备”“装备-环境”“装备-围岩”的互联互通,但主要聚焦于围岩识别与施工协同管理,缺乏无人化施工必需的核心智能化功能,如智能装备任务调度和路径规划、远程精准控制、工序智能识别与多机协同调度等。同时,系统间接口不兼容、数据互通壁垒以及关键信息依赖人工录入等问题,制约了实时反

馈与优化闭环的形成。未来隧道无人化施工管控平台应重点从以下3个方面进行突破。

1) 推进系统集成与接口标准化,建立统一的数据标准与交互协议,实现多系统间的无缝集成与数据自动流动。

2) 深化数字孪生、BIM与GIS等技术的融合应用,增强平台的可视化表达与精细化管理能力。

3) 全面提升平台智能化水平,构建装备智能路径规划、远程精准控制、多工序机群协同调度的施工管控体系,为隧道无人化施工提供智能决策支持。

3.2 集群装备智能调度与路径规划

铁路钻爆法隧道施工工序繁多、作业空间受限且地质复杂多变。在全工序大型机械化配套施工

模式下,施工过程按工区可划分为洞身上台阶开挖支护、仰拱施工和二衬浇筑。其中,上台阶开挖支护施工环境恶劣、安全风险高,是推行无人化施工技术的重点环节。上台阶施工包含施工准备(地质超前预报与测量放样)、钻孔、装药(含炮孔堵塞)、爆破、通风、清危出渣、超欠挖质量评估、初期支护(初喷、立架、锚杆施作与复喷)及断面质量检测等多项工序,涉及设备众多,工艺复杂(图6)。

在钻爆法隧道施工场景中,由于工程机械体型庞大、装备密集、作业环境复杂,设备定位精度低,碰撞风险突出,目前除了小型勘察测量和预警机器人外,针对大型智能装备的任务调度与自动驾驶路径规划的研究尚显不足,是亟待突破的关键领域。

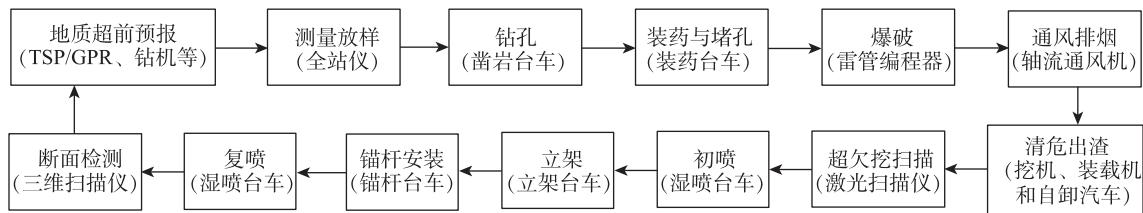


图6 隧道洞身上台阶施工工序与主要装备
Fig. 6 The excavation cycle and main process of tunnel construction

3.3 智能装备自主定位导航

隧道内部属于典型的GNSS拒止环境,传统卫星定位技术无法使用,使得智能装备的自主定位导航成为保障施工安全与效率的核心技术。目前主要采用3种定位导航技术及其融合方案,即SLAM、UWB和IMU^[16]。SLAM通过发射激光束并接收反射信号,利用点云数据实时构建高精度环境地图,适应隧道内的弱光环境,具备厘米级定位精度,但面临隧道特征点稀少、施工粉尘和水雾干扰严重等问题,易产生位置漂移且计算量大。UWB在隧道环境中可提供厘米级定位精度(远超传统WiFi或蓝牙技术),具有优异的穿透能力,适应隧道复杂结构环境,同时可支持多设备协同定位,但受多径效应和环境影响较大,定位稳定性有待提升。IMU通过集成加速度计和陀螺仪,实时测量物体的运动参数,可提供连续的运动姿态信息,不受外部环境干扰,但IMU存在固有的误差累积效应,需要其他定位技术进行定期校正。

为克服单一技术的局限,当前研究重点转向多源融合定位方案。通过UWB、IMU与SLAM的协

同,形成优势互补:UWB提供绝对位置基准以校正IMU的累积误差;IMU提供连续运动估计以弥补UWB更新频率不足;SLAM则构建精细环境地图以提升系统环境感知能力。采用这种融合方案,在GPS完全失效环境下可保持稳定工作,满足隧道动态变化场景下的精确定位需求。

在障碍识别和自主避障方面,隧道具有环境封闭、光线多变、粉尘浓度高、地质条件复杂、移动设备多等特点,对智能装备的环境感知与自主导航能力提出了极高要求。传统依赖人工观察和操作的避障方式已无法满足无人化工地的需要,而城市道路自动驾驶技术又难以直接适用于GNSS信号完全失效的隧道环境。隧道智能装备常用障碍识别传感器如表7所示。考虑到单一传感器的局限性,多传感器融合是克服隧道环境感知挑战的核心策略,通过优势互补提高系统在复杂工况下的鲁棒性。多传感器融合算法通常采用级联架构,包括前端数据级融合、特征级融合和决策级融合3个层次,基于D-S证据理论的决策级融合方法能够有效整合各传感器的识别结果,提高系统在部分传感器失效情况下的可靠性。

表7 隧道智能装备障碍识别传感器性能对比

Tab.7 Comparison of the performance of commonly used object detection sensors in tunnel intelligent equipment

传感器类型	优势	局限性	适用场景
激光雷达	高精度三维信息、不受光照影响	受粉尘干扰大、成本高	环境建模、障碍物检测
视觉传感器	纹理信息丰富、成本低	受光照和粉尘影响大	障碍物分类、语义理解
毫米波雷达	穿透能力强、抗干扰性好	分辨率低、噪声大	运动障碍物检测
超声波传感器	近距离精度高、成本低	作用距离短、易受振动干扰	近距离防碰撞

障碍物识别与路径规划是智能装备自主避障的核心环节,各类路径优化算法在不同场景下展现出各自的优势和局限性(表8)。在实际应用中,通常采用分层规划策略,结合多种算法的优势。全局

规划层使用算法生成最优路径,局部规划层则采用人工势场法或速度障碍法实现实时避障^[12]。随着人工智能的发展,神经网络和深度学习的引入进一步提升了避障决策的智能化水平。例如,基于Transformer架构的专用识别算法能够同步完成目标检测、语义分割和深度估计,为路径规划提供全面的环境信息^[10]。ByteTrack多目标跟踪算法则能够在遮挡情况下保持跟踪连续性,结合卡尔曼滤波预测运动轨迹,提前预判潜在碰撞风险^[35]。

值得说明的是,尽管上述障碍识别和避障策略已较为成熟,但目前主要在小型机器人中得到应用,针对隧道大型施工装备,相关报道极少。随着GNSS拒止环境下定位精度的提高以及自主定位导航技术的持续发展和完善,多源融合定位导航系统将为钻爆法隧道无人化施工提供更加可靠、高效的技术支撑,有力推动隧道工程建设向全面智能化、无人化方向转型升级。

表8 主要避障算法在隧道环境中的适用性分析

Tab.8 Applicability analysis of main obstacle avoidance algorithms in tunnel environment

算法类型	原理特点	优势	局限性	隧道适用性
A*算法	在静态地图中寻找最优路径	全局最优、计算效率高	动态环境适应性差	适用于全局路径规划
人工势场法	利用虚拟势场生成引力和斥力	实时性好、路径平滑	易陷入局部最小值问题	适用于局部实时避障
速度障碍法	将障碍物映射到速度空间	动态避障效果好	复杂环境计算量大	适用于移动障碍物避让
RRT算法	基于采样的随机搜索	高维空间有效、避免局部最小	路径不是最优、随机性	适用于复杂狭窄空间
神经网络	基于深度学习的端到端决策	适应复杂环境、无需精确建模	需要大量训练数据	适用于经验学习避障

3.4 智能装备远程操控

施工装备远程操控系统旨在基于云边协同架构,融合无线通信、传感器网络、视频图像与智能控制算法,构建“人远危境”的作业模式。远程操控系统由通信网络系统和远程控制系统两大核心部分组成。通信网络作为远程操控的基础设施,承担着数据传输的关键任务。遥控通信网络必须具备高可靠性、强抗干扰能力和低延迟特性,可与多源数据上传网络采用同一系统,但需赋予控制指令最高的传输优先级。

施工装备远程控制系统采用“台车端-远程控制端”的双向控制架构。台车端为智能控制器,集成数据采集传感器模块(包括传感器、高清网络摄像头等)、数据通信模块和专用控制软件,负责实时采集装备运行状态及环境数据。远程控制端驾驶舱,配

备专业控制台、中央处理器及通信模块,实现对现场装备的远程监控与操作。数据采集传感器模块用于检测机械设备的各种参数和作业环境,如位置、速度、压力等;数据通信模块负责将传感器采集的数据传输到中央处理器;中央处理器则根据接收到的信息对设备进行实时监控和控制;智能控制器则按照中央处理器的指令对机械设备进行动作控制。

刘洪涛^[24]开发了钻爆法隧道大型智能装备(包括三臂凿岩台车、湿喷台车和锚杆台车)远程控制系统,台车端控制系统如图7所示^[27];远程控制端通过操作面板、手柄完成操作,操作台完全映射装备本地操作情况,操作习惯与本地操作一致。在数据传输过程中,台车端和远程控制端的信号主要包括CAN总线的控制信号和模拟音视频信号,采用模块化的网络设备进行无线中远距离传输。装备端控



图7 三臂凿岩台车端主要硬件安装

Fig. 7 The main hardware installation on the three-arm rock drilling trolley

制器通过CAN-TCP/IP转换器转换为以太网信号,装备上搭载的网络摄像头,经由交换机将视频信号转换成TCP/IP协议信号,然后,转换后的控制信号和视频信号通过交换机以不同的IP地址传输到远程控制端。远程控制端以同样元件进行信号转换,将控制信号最终转换为CAN协议格式发送到装备侧的CAN网络中,实现远程控制装备。上述方案和智能装备远程操控系统,在某高铁隧道项目中进行了示范应用(图8),成功实现了对2台凿岩台车和1台湿喷台车的远程操控作业,网络平均时延≤30 ms^[24]。为满足无人工地更高时延要求,仍需进一步优化网络布局以降低抖动。



图8 智能装备远程操控应用

Fig. 8 Application of remote control of tunnel intelligent equipment

3.5 装备态势和施工工序识别

实现从单工序智能化向多工序协同与全流程智能化的演进,是钻爆法隧道无人工地的核心目标。当前,多工序智能化仍面临严峻挑战:传统依赖人工记录的方式不仅工作量大、自动化程度低,且数据的可靠性与价值有限。因此,实现对钻孔、装药、爆破出渣、支护等关键工序的自动识别与统计分析,对于优化工序衔接、减少非正常停机、提升施工循环率至关重要。

在此背景下,融合计算机视觉与多模态数据融合的智能感知技术,为施工装备态势识别与工序状

态判断提供了新的解决路径,以YOLO系列和Faster R-CNN为代表的目标检测算法已成为工序智能识别的研究基础。Paneru等^[35]通过系统性文献综述,指出计算机视觉已广泛应用于建筑领域的物体识别与跟踪、实例分割、行为分析、施工进度监测和质量控制等任务。然而,在钻爆法隧道特定场景的研究仍相当匮乏。Jeong等^[36]提出了融合计算机视觉与音频信息的钻爆法隧道施工工序识别方法,针对多设备协同作业的出渣工序,识别准确率高达96.3%;田四明等^[37]则运用视频切片及图像分析技术,基于YOLOv8-seg锚杆图像分割模型、孔位分析算法和基于LSTM方法的锚杆运动预测模型,实现了锚杆位置、锚杆角度和施工时间的自动识别。然而,隧道内存在空间狭小、光照不均、设备眩光等复杂工况,严重影响现有视觉方法的可靠性与鲁棒性。

为克服上述挑战,注意力机制模块(CBAM)通过聚焦关键特征,能有效提升模型在恶劣条件下的感知能力;并可通过将装备传感器数据、运行参数与视频监控等信息流映射至统一语义空间,实现信息互补,从而提升了钻爆法隧道施工工序的识别精度。

在数据融合基础上,知识图谱与推理技术为工序识别与预测提供了决策智能。知识图谱将施工要素构建为结构化语义网络,而推理技术则在此基础上发掘新知识。当前,方法已从基于规则的逻辑推理,发展为基于分布式表示(如TransE)和图神经网络(GNN)的方法。GNN能有效捕捉实体间复杂关联。更进一步,时间知识图谱技术通过引入时间维度,刻画施工态势的动态演化。例如,Xu等^[38]提出的CENET模型,通过学习历史与非历史依赖关系来预测未来事件,为开发能够识别当前工序并预测下一步施工内容的智能决策系统奠定了技术基础。

综上,钻爆法隧道施工的装备态势与工序识别研究,正沿着“视觉感知→多模态融合→知识推理”的技术路径持续深化。通过集成先进的计算机视觉模型、有效的数据融合策略以及动态的知识推理机制,有望最终突破隧道复杂环境下多工序智能协同的瓶颈,实现施工管理从被动监控到主动决策的跨越。

3.6 围岩智能识别与设计施工动态调整

在铁路隧道工程中,钻爆法施工常面临地质条件复杂多变带来的挑战。传统围岩分级与爆破

设计方法主要依赖人工经验,存在主观性强、效率低、难以实时响应地质变化等局限,容易引发超欠挖、支护成本增加及施工安全隐患。随着隧道施工向无人化方向发展,实现围岩智能识别与施工参数的动态调控,已成为提升隧道工程质量与效率的核心课题。

传统围岩评价方法依赖人工判断,精度低、一致性差。近年来,大数据与人工智能技术的进步推动了该领域的快速发展。钻进参数、数字图像及三维激光点云等新型数据源被引入围岩质量评价中,提高了识别精度和工作效率,为隧道动态设计提供了有力支撑。李利平等^[3]与王志坚^[34]曾系统评述了基于超前地质预报、钻进参数、数字图像及点云数据的围岩识别方法。然而,现有方法仍存在局限:钻进等接触式探测仅能反映岩性特征,而图像与点云等非接触手段虽可获取结构面几何信息,却难以准确捕捉其力学特性,且易受光照、粉尘、爆破干扰等因素影响,围岩等级的精确识别仍面临挑战。此外,为实现无人化施工,数据采集需借助机器人或自动化设备,以达成少人或无人化目标。

在实现围岩精准识别的基础上,可结合岩体信息、支护数据、钻孔记录及施工组织信息等多源数据,对钻爆法隧道的开挖与支护方案进行动态调整。王志坚^[34]在郑万高铁湖北段项目中,构建了涵盖超前支护、洞身支护与爆破设计等环节的参数化数据库,通过围岩等级、埋深、岩性及施工条件等多维参数的智能匹配,实现了设计参数的自动推荐与优化选择。方昱^[39]和赵高峰等^[40]则系统采集并结构化存储了施工过程中的岩体信息、支护数据、钻孔记录等,构建了可持续优化的“岩体-开挖”“岩体-支护”专业数据库,结合人工智能算法,实现了开挖与支护参数的智能分析、炮孔布局与爆破参数的动态调整,形成了融合专家经验与数据驱动分析能力的钻爆法隧道智能决策系统,为无人工地施工提供了重要参考。

4 结论与展望

4.1 结论

本文系统梳理了铁路钻爆法隧道施工中有关无人工地技术的研究现状,分析了关键技术体系与发展瓶颈,得出如下主要结论。

1) 在智能装备层面,钻孔、支护、仰拱施工和二

衬浇筑等关键工序已初步实现了从智能感知、数据分析、智能决策到自动化执行的单机智能化闭环。然而,面向全工序无人施工场景,装备在GNSS拒止环境下的精准定位、自主导航、多机数据共享与协同决策能力仍显不足。未来,信息互通与功能协同是提升工效的关键,而装备的自检测、故障自诊断和应急处置能力,则是施工安全的核心保障。此外,系统在极端工况下的可靠性、多设备并行作业的信号干扰等问题,仍需重点攻克。

2) 在数据采集和传输层面,依托激光点云、机器视觉、UWB、传感器等传感技术,已初步实现施工要素的多维实时感知;基于有线光纤、5G、无线AP与TSN网络,构建了低时延、高可靠的“有线+无线”混合通信架构。同时,借助数据库与深度学习技术,形成了多模态数据的融合处理能力,为智能分析提供了数据基础。当前主要挑战在于:GNSS拒止环境下人员和装备的定位精度,高粉尘、低照度和爆破干扰条件下的围岩等级判定,大流量多模态数据的实时稳定传输,以及施工全过程的高保真数字孪生模型构建。

3) 在装备远程集控和智能决策层面,已具备UWB/IMU/SLAM融合定位、多传感器障碍识别与围岩智能识别等基础技术。然而,现有施工管控平台仍偏重进度与安全管理,在装备协同调度与工艺参数动态优化方面功能薄弱。系统接口不一、数据壁垒林立、关键信息依赖人工录入等问题,严重制约了闭环优化的实现。此外,现有智能装备远程控制时延(平均不超过30 ms)偏高、系统集成度不足、专业集控人员匮乏及标准规程缺失,均是当前推行无人化施工的现实瓶颈。

4.2 展望

针对当前无人工地技术发展的瓶颈和面临的挑战,随着人工智能、机器人、物联网与大数据技术的深度融合,钻爆法隧道无人化施工技术有望在以下方向实现突破。

1) 研发具备多维度环境感知和故障容错能力的智能施工装备,建立感知作业参数闭环调控机制,提升自检测、故障自诊断与应急处置水平,并通过强化学习、深度学习等人工智能算法实现智能装备从“自动化”向“自主化”的跨越。

2) 进一步探索UWB/IMU/SLAM等多源融合定位技术,实现隧道内人员和装备的二维/三维精准

定位;结合5G-A/6G、人工智能大模型与边缘计算,实现大型隧道装备集群的协同调度与自主导航。

3) 引入6G/WiFi7和TSN等新一代通信技术,优化隧道环境网络架构,抑制传输抖动,降低时延,全面提升系统响应实时性。

4) 基于高精度三维扫描、倾斜摄影和3D图形引擎技术,构建高保真的施工数字孪生体,实现施工过程的精准仿真模拟、实时监测和预测性控制。

5) 深化BIM+GIS+数字孪生技术融合,提升平台可视化与精细化管理能力,构建“感知-决策-控制”一体化技术链;推动远程集控系统智能化升级与接口标准化,建立统一的数据管理流程,实现多系统无缝集成与数据自动流动,构建涵盖路径规划、精准控制与机群调度的多工序智能管控体系。

6) 推进人工智能技术在超前地质预报、围岩识别、装备协同、动态设计、质量检测等环节的全面嵌入与深度集成应用。

7) 加快制订无人化施工相关技术标准与规程,培育跨学科、懂技术的复合型专业人才,为无人工地技术推广提供制度与人力支撑。

参考文献:

- [1] 谢和平,张茹,任利,等.复杂艰险山区深埋隧道围岩灾变分析与思考[J].工程科学与技术,2022,54(2): 1-20.
XIE H P, ZHANG R, REN L, et al. Analysis and thoughts on surrounding rock mass catastrophe of deep-buried tunnels in extremely complex high mountain areas[J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(2):1-20.
- [2] 刘飞香,姬海东,肖正航.川藏铁路隧道钻爆法施工成套装备技术体系研究[J].隧道建设(中英文),2021(8): 1281-1289.
LIU F X, JI H D, XIAO Z H. Complete set of equipment technology system for drill-and-blast tunnel construction in Sichuan-Xizang railway[J]. Tunnel Construction, 2021 (8): 1281-1289.
- [3] 李利平,邹浩,刘洪亮,等.钻爆法隧道智能建造研究现状与发展趋势[J].中国公路学报,2024,37(7): 1-21.
LI L P, ZOU H, LIU H L, et al. Research status and development trends in intelligent construction of drill-and-blast tunnels[J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(7): 1-21.
- [4] CHAYAMA K, FUJIOKA A, KAWASHIMA K, et al. Technology of unmanned construction system in Japan[J]. Journal of Robotics and Mechatronics, 2014, 26(4): 403-417.
- [5] 罗锡文,张智刚,赵祚喜,等.东方红X-804拖拉机的DGPS自动导航控制系统[J].农业工程学报,2009, 25 (11): 139-145.
LUO X W, ZHANG Z G, ZHAO Z X, et al. Design of DGPS navigation control system for Dongfanghong X-804 tractor[J]. Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(11): 139-145.
- [6] 伟利国,张权,颜华,等.XDNZ630型水稻插秧机GPS自动导航系统[J].农业机械学报,2011, 42(7): 186-190.
WEI L G, ZHANG Q, YAN H, et al. GPS automatic navigation system design for XDNZ630 rice transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 186-190.
- [7] ZHONG D H, CUI B, LIU D H, et al. Theoretical research on construction quality real-time monitoring and system integration of core rockfill dam[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 52(11): 3406-3412.
- [8] LIU D H, SUN J, ZHONG D H, et al. Compaction quality control of earth-rock dam construction using real-time field operation data[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2012, 138(9): 1085-1094.
- [9] ZHANG Q L, LIU T Y, ZHANG Z S, et al. Unmanned rolling compaction system for rockfill materials[J]. Automation in Construction, 2019, 100: 103-117.
- [10] 秦承帅.隧道揭露围岩岩体结构探测与分析方法及工程应用[D].济南:山东大学,2019.
QIN C S. Detection and analysis method of exposed rock mass structure and its application in tunnel engineering[D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [11] 刘飞香.铁路隧道智能化建造装备技术创新与施工协同管理展望[J].隧道建设(中英文),2019, 39(4): 545-555.
LIU F X. Prospects for intelligent construction equipment technology innovation and collaborative construction management of railway tunnel[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(4): 545-555.
- [12] 贾连辉,陈帅,贾正文,等.钻爆法隧道智能建造体系及关键技术研究[J].隧道建设(中英文),2023, 43(3): 392-407.
JIA L H, CHEN S, JIA Z W, et al. Research on intelligent construction systems and key technologies for drilling-and-blasting tunnels[J]. Tunnel Construction, 2023, 43(3): 392-407.
- [13] 刘飞香.钻爆法隧道施工装备技术进展与展望[J].现代隧道技术,2024, 61(2): 190-202.

- LIU F X. Technological advancements and prospects of drill and blast tunnel construction equipment[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2024, 61(2): 190-202.
- [14] 朱合华, 凌加鑫, 朱梦琦, 等. 钻爆法隧道智能建造: 最新技术与未来展望[J]. *现代隧道技术*, 2024, 61(2): 18-27.
- ZHU H H, LING J X, ZHU M Q, et al. Intelligent construction for drill-and-blast tunnels: latest technologies and future prospects[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2024, 61(2): 18-27.
- [15] 杨艳, 邓岩. 隧道内基于全程无线数据传输的高精度人员定位系统[J]. *施工技术*, 2020, 49(6): 92-95, 113.
- YANG Y, DENG Y. High precision personnel positioning system based on whole-process wireless data transmission inside the tunnel[J]. *Construction Technology*, 2020, 49(6): 92-95, 113.
- [16] HU Y, LI X, KONG D, et al. An enhanced-LiDAR/UWB/INS integrated positioning methodology for unmanned ground vehicle in sparse environments[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2024, 20(7): 9404-9415.
- [17] VAN ELDERT J, FUNEHAG J, SAIANG D, et al. Rock support prediction based on measurement while drilling technology[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80(2): 1449-1465.
- [18] BABAIEI KHOZROOGLI M, HALL R. Processing of measurement while drilling data for rock mass characterization[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2016, 26(6): 989-994.
- [19] CHEN S W, WALSKE M L, DAVIES I J. Rapid mapping and analysing rock mass discontinuities with 3D terrestrial laser scanning in the underground excavation[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 110: 28-35.
- [20] GHABRAIE B, REN G, SMITH J, et al. Application of 3D laser scanner, optical transducers and digital image processing techniques in physical modelling of mining-related strata movement[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, 80: 219-230.
- [21] 黄宏伟, 陈佳耀. 基于机器视觉的隧道围岩智能识别分级与开挖安全风险研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2023, 31(6): 1382-1409.
- HUANG H W, CHEN J Y. Machine vision-based study on intelligent rating and excavation safety risk assessment of rock tunnel[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2023, 31(6): 1382-1409.
- [22] 秦尚友, 陈佳耀, 张东明, 等. 基于深度学习的隧道工作面岩石结构自动化判别[J]. *现代隧道技术*, 2021, 58(4): 29-36.
- QIN S Y, CHEN J Y, ZHANG D M, et al. Automatic identification of rock structure at tunnel working face based on deep learning[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2021, 58(4): 29-36.
- [23] 祝志恒, 傅金阳, 阳军生. 隧道开挖支护质量3DZI检测技术及应用研究[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(12): 176-189.
- ZHU Z H, FU J Y, YANG J S. Quality detection for tunnel excavation and support based on 3DZI[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(12): 176-189.
- [24] 刘洪涛. 钻爆法隧道施工装备远程操控系统研究[J]. *中国地名*, 2025(2): 16-18.
- LIU H T. Research on remote control system of tunnel construction equipment by drilling and blasting method[J]. *China Place Name*, 2025(2): 16-18.
- [25] 张虎成, 李雷孝, 刘东江. 多模态数据融合研究综述[J]. *计算机科学与探索*, 2024, 18(10): 2501-2520.
- ZHANG H C, LI L X, LIU D J. Survey of multimodal data fusion research[J]. *Journal of Frontiers of Computer Science and Technology*, 2024, 18(10): 2501-2520.
- [26] ZHANG K S, WU W, LIU Y S, et al. OCM: an intelligent recognition method of rock discontinuity based on optimal color mapping of 3D Point cloud via deep learning[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2024, 57(7): 4873-4905.
- [27] CHEN J Y, ZHANG D M, HUANG H W, et al. Image-based segmentation and quantification of weak interlayers in rock tunnel face via deep learning[J]. *Automation in Construction*, 2020, 120: 103371.
- [28] CHEN J Y, ZHOU M L, HUANG H W, et al. Automated extraction and evaluation of fracture trace maps from rock tunnel face images via deep learning[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 142: 104745.
- [29] CHEN J Y, YANG T J, ZHANG D M, et al. Deep learning based classification of rock structure of tunnel face[J]. *Geoscience Frontiers*, 2021, 12(1): 395-404.
- [30] 李晓军, 田吟雪, 唐立, 等. 山岭隧道结构BIM多尺度建模与自适应拼接方法及工程应用[J]. *中国公路学报*, 2019, 32(2): 126-134.
- LI X J, TIAN Y X, TANG L, et al. Multiscale BIM modeling and adaptive splicing method of mountain tunnel structure for engineering application[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32(2): 126-134.
- [31] GLATT M, SINNWELL C, YI L, et al. Modeling and implementation of a digital twin of material flows based on

- physics simulation[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 58: 231-245.
- [32] 梁策, 马娟, 朱军, 等. 钻爆法施工隧道数字孪生系统构建方法[J]. 铁道标准设计, 2025, 69(6): 116-122.
- LIANG C, MA J, ZHU J, et al. Digital twin system development method for tunnel construction using drill and blast method[J]. Railway Standard Design, 2025, 69(6): 116-122.
- [33] 朱合华, 武威, 李晓军, 等. 基于iS3平台的岩体隧道信息精细化采集、分析与服务[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(10): 2350-2364.
- ZHU H H, WU W, LI X J, et al. High-precision acquisition, analysis and service of rock tunnel information based on iS3 platform[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(10): 2350-2364.
- [34] 王志坚. 高速铁路山岭隧道智能化建造技术研究: 以郑万高速铁路湖北段为例[J]. 铁道学报, 2020, 42(2): 86-95.
- WANG Z J. Research on intelligent construction technology for high-speed railway mountain tunnel: a case study of Hubei section of Zhengzhou-Wanzhou high-speed railway[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42 (2): 86-95.
- [35] PANERU S, JEELANI I. Computer vision applications in construction: current state, opportunities & challenges[J]. Automation in Construction, 2021, 132: 103940.
- [36] JEONG G, JUNG M, PARK S, et al. Contextual multimodal approach for recognizing concurrent activities of equipment in tunnel construction projects[J]. Automation in Construction, 2024, 158: 105195.
- [37] 田四明, 连捷, 黎旭, 等. 隧道掌子面施工区域全过程多元信息智能感知技术研究与实践[J]. 隧道建设(中英文), 2024, 44(12): 2316-2331.
- TIAN S M, LIAN J, LI X, et al. Research and practice on intelligent perception technology of multifaceted information in whole process of tunnel face construction area[J]. Tunnel Construction, 2024, 44(12): 2316-2331.
- [38] XU Y, OU J J, XU H, et al. Temporal knowledge graph reasoning with historical contrastive learning[J]. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2023, 37(4): 4765-4773.
- [39] 方昱. 山岭隧道动态设计与施工智能辅助决策系统研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- FANG Y. Study on dynamic design and construction intelligent decision support system for mountain tunnels[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [40] 赵高峰, 殷超凡, 扈晓冬, 等. 岩石隧道光面爆破的自动化布孔设计[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2020, 2(3): 48-57.
- ZHAO G F, YIN C F, HU X D, et al. Automatic design of blast-hole pattern for smooth blasting of rock tunnel[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2020, 2(3): 48-57.



第一作者:朱碧堂(1974—),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为智能岩土、隧道工程、桩基工程和基坑工程。E-mail:btangzh@ecjtu.edu.cn。



通信作者:罗文俊(1979—),女,教授,博士,博士生导师,国务院政府特殊津贴专家、江西省主要学科学术及技术带头人、江西省青年井冈学者、江西省杰出青年人才,研究方向为铁路基础设施建造、运维及防灾减灾。E-mail:lwj06051979@163.com。