

引文格式: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 Hehua, LING Jiaxin, ZHU Mengqi, et al. Intelligent Construction for Drill-and-Blast Tunnels: Latest Technologies and Future Prospects[J]. Modern Tunnelling Technology, 2024, 61(2): 18-27.

钻爆法隧道智能建造 最新技术与未来展望

朱合华^{1,2} 凌加鑫¹ 朱梦琦¹ 李晓军^{1,2} 武威^{1,2}

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 土木工程防灾减灾全国重点实验室, 上海 200092)

摘要:在隧道建造条件的极端化和新一代信息技术发展引起的产业变革的双重影响下,隧道智能建造成为了隧道建设发展的必然趋势。隧道智能建造是顺应第四次工业革命的需要,用信息技术的理论和方法改造和提升传统隧道建造模式,实现隧道建设的数字化赋能和数字化转型,从而成为推动隧道建设发展的核心驱动力。在这样的背景下,文章聚焦于钻爆法隧道智能建造的最新技术发展,对隧道智能建造必要性、整体解决方案、“采集-传输-处理-表达-分析-服务”信息流进行阐述,最后对隧道智能建造的未来进行展望。通过综述目前隧道智能建造领域数据采集、传输、处理、表达、分析和服务的最新技术和研究进展,提出了“数字-数值-数据一体化分析理论”、“人-机-环境全要素数字孪生”、“采集-设计-施工一体化建造模式”和“全工程设备自动化”四大关键难题,以期实现隧道智能建造,提高重大基础设施工程质量和建造效率。

关键词:钻爆法;智能建造;解决方案;智能设计和分析;智能施工

中图分类号:U45

文献标志码:A

1 引言

我国是世界上隧道规模最大、修建技术发展最快的国家,已建成和在建的隧道数量和总长度均居世界第一,已建成的铁路隧道总长度超过19 000 km、公路隧道总长超过2 600万延米^[1,2]。同时,我国在隧道建造技术上也取得巨大进步,从隧道“建造大国”逐步转变为“建造强国”,建成了一系列特长、深埋、大断面的标志性重大隧道工程项目,在高地应力、高水压等复杂条件下的隧道建造技术取得了新突破^[3]。

随着以高原铁路为代表的新一批世纪工程的建设,埋置更深、长度更大、地质条件更复杂等客观条件对隧道安全高效建造提出了更高的要求。例如,某高原铁路特长隧道面临的主要工程难题有高烈度、软岩大变形、岩爆、高地温和活动断裂,受这些难题耦合作用的隧道达12座^[4];在建的云南省雷波卡哈洛至永善隧道,软弱破碎围岩占比92.4%,塌方、大变形、突泥涌水等安全风险高;天山胜利特长隧道建设过程中面临高寒、高地应力、断裂破碎带等极端地质条件^[5]。极端地质条件下的隧道建造虽然挑战

重重,传统的隧道建造技术面临着安全隐患增加、施工效率降低、资源过量使用等问题,但也为隧道智能建造技术的发展提供了契机和应用实践的空间^[6]。

随着新一代信息技术的快速发展及在其他行业的不断深入研究与实践,第四次工业革命强调以信息技术、人工智能(Artificial Intelligence, AI)等先进技术为基础,通过实现生产过程的数字化和智能化来实现产业的转型升级^[7]。在这样的产业变革浪潮下,我国《“十四五”建筑业发展规划》中指出要以数字化、智能化升级为动力,加大智能建造在工程建设各环节的应用^[8];国家铁路局发布的《“十四五”铁路科技创新规划》中,也提出深化智能建造、智能装备、智能运营技术创新。隧道智能建造是顺应第四次工业革命的需要,用信息技术的理论和方法改造和提升传统隧道建造模式,实现隧道建设的数字化赋能和数字化转型,从而成为推动隧道建设发展的核心驱动力。以人工智能、图像识别、5G传输网络等技术为基础,以智能采集、智能分析和设计、智能施工为表现形式的隧道智能建造成为了隧道建设发展的

收稿日期:2024-04-01

修回日期:2024-04-12

作者简介:朱合华(1962-),男,博士,中国工程院院士,主要从事地下空间方面的研究工作,E-mail:zhuhehua@tongji.edu.cn.

通讯作者:凌加鑫(1997-),男,博士研究生,主要从事隧道智能建造方面的研究工作,E-mail:lingjiaxin@tongji.edu.cn.

必然趋势。

钻爆法施工是目前我国隧道建设最常用方法之一,具有高效快速、适用范围广、可控性强等特点,掌子面识别、超前地质探测、钻爆和出渣、支护等单工序的智能化以实现隧道建设少人化/无人化是钻爆法隧道智能建造的发展方向^[9]。为此,本文聚焦于钻爆法隧道智能建造的最新技术发展,对隧道智能建造必要性、整体解决方案、“采集-传输-处理-表达-分析-服务”信息流进行阐述,最后对隧道智能建造的未来进行展望。

2 隧道技术发展概况

如图1所示,我国隧道技术最早可追溯到公元

61年,此后直到1908年北京八达岭隧道的建设才系统地采用矿山法。1979年引入了新奥法(New Austrian Tunnelling Method, NATM)建造方法,并在皖赣铁路隧道建设中首次应用。我国钻爆法施工的机械化始于1996年建设南昆线米花岭隧道,采用大型机械化配套新技术施工,形成了当时长大隧道施工的基本模式^[10]。进入21世纪以来,钻爆法隧道建设逐渐向信息化转型,以现场信息为依据、反馈于开挖和支护参数调整中的建设模式应用于新七道梁隧道^[11]等隧道建设中,其中数字化“采集-传输-处理-表达-分析-服务”的信息流过程在四川大峡谷隧道的动态设计和施工中得到初步成功的应用。



图1 中国钻爆法隧道技术发展概况

Fig.1 Overview of drill-and-blast tunnel technology development in China

表1部分总结了目前国内外在钻爆法隧道智能建造方面的研究进展。从表1中可以看到,不同的机构对隧道智能建造的不同阶段进行了相应研究。图像、点云、随钻数据、超前地质探测等是目前主要

采集手段,通过采集现场的数据,利用数值模拟、机器学习等先进的分析手段,得到爆破、支护参数等设计信息,并反馈到施工中。铁建重工集团和中铁隧道局集团则通过研发凿岩台车、掘锚一体机等大型

表1 钻爆法隧道智能建造研究现状

Table 1 Current research status of intelligent construction in drill-and-blast tunnels

国家	单位/机构	研究类别	主要工作
中国	西南交通大学	钻爆参数和支护参数设计	基于大样本数值模拟和机器学习,建立钻爆参数智能计算程序、隧道断面开挖和支护参数设计方法
	山东大学	支护设计	建立了支护体系全过程信息化动态设计与智能决策方法
	香港大学	岩体信息反演	基于随钻信息开展大量岩体信息数字监测与反演工作
	铁建重工集团	数据采集与自动化施工	研发了智能凿岩台车、掘锚一体机等大型施工设备,并集成地质感知传感器
	中铁隧道局集团	自动化施工	研制了可适用于高铁单洞双线断面IV、V级围岩隧道的全工况凿岩台车
日本	Shimizu corporation, Yamaguchi University, Sato Koyo	掌子面识别	基于计算机视觉的掌子面裂纹快速识别、粉尘颗粒检测
法国	Center for Tunnel Studies	数据采集、处理、分析	集成摄影测量、激光扫描、热成像的裂纹检测系统
英国	University of Leeds	数据采集	基于点云数据定位断层
瑞士	Pini Group Ltd, Swiss Center of Applied Technologie	一体化系统	建立隧道建养-运维一体化管理系统
奥地利	VRVis, Systra-Sws	数据采集与表达	结合常规监测与头戴式VR数据构建隧道施工动态3D场景

施工设备来支撑隧道的智能施工。

3 智能建造整体解决方案

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。图2展示了隧道智能建造过程中“采集-传输-处理-表达-分析-服务”的信息流,通过自动化或半自动的数据采集手段,获取隧道施工现场的地质数据、掌子面数据和结构数据,通过5G传输网络等高速远程传输方式将数据上传到云端。在云端,通过大数据、人工智能等方式对数据进行处理,并建立隧道地质模型、结构模型等三维轻量化表达方法,对数据进行精细、高效分析。最后,将分析结果通过云服务的方式,反馈到施工现场。

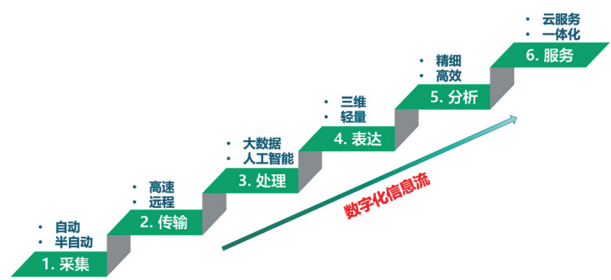


图2 “采集-传输-处理-表达-分析-服务”数字化信息流
Fig.2 "Acquisition-transmission-processing-expression-analysis-service" digital information flow

基于“采集-传输-处理-表达-分析-服务”的信息流,本文也给出了钻爆法隧道智能建造的整体解决方案,如图3所示。参考数字孪生的思想^[12],图3中分为物理空间和虚拟空间两个部分,物理空间中

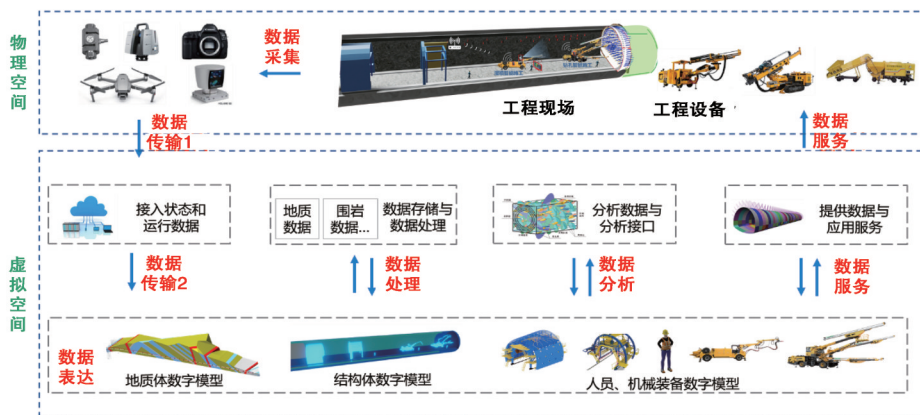


图3 基于信息流的隧道智能建造整体解决方案
Fig.3 Comprehensive solution for intelligent tunnel construction based on information flow

主要包括了隧道施工现场的地质体、工程设备以及智能采集的设备,虚拟空间中则包括了地质体、结构体、人员和机械装备的数字化模型,与物理空间中的实体是一一对应的。虚拟空间中,以数字模型为载体,接入机械设备运行和状态数据,在云端对数据进行存储和处理,并对数据进行分析,将结果以服务的形式反馈到现场施工中,从而完成数据“采集-传输-处理-表达-分析-服务”的一体化实施。

4 智能建造相关技术研究进展

4.1 智能采集与传输

目前钻爆法数据采集可以分为接触式和非接触式两种,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、数字照相等手段获取隧道轴线、轮廓、掌子面等信息。

在接触式测量方面,小型压力测试、回流辅助测试等地应力测试方法为隧道围岩应力的快速获取提供了极为便捷的途径^[13,14]。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^[15,16],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^[17-19]。数字照相技术利用高分辨的影像数据,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^[20,21]。



*部分图源: 中铁工程装备集团

图4 钻爆法数据智能采集常用方法

Fig.4 Common methods for intelligent data acquisition in drill-and-blast tunnel

现代通讯技术的发展使得钻爆法环境下隧道内部长距离、快速数据传输变得可行,具体为有线传输和无线传输相结合的方式。有线传输通过隧道内部的管道或者隧道壁面的设施布线,实现数据传输,优势在于稳定可靠、传输速度快;无线传输通过无线局域网、蓝牙、无线传感器网络等技术在隧道内实现数据传输,其不受地形和地质条件的限制,具有灵活性强的优点^[22, 23]。

4.2 智能处理

施工现场采集的原始数据需要通过处理来提取

所需的地质信息或结构信息。传统的数据处理方法包括人工对数据进行处理,如利用地质工程师的专业知识对掌子面素描成果进行解译。AI等信息技术的发展为数据处理提供了新的思路,在提高数据处理效率的同时减少由人工干预而可能引起的误差。图5展示了利用深度学习的方法从隧道掌子面点云数据中提取的粗糙度、迹线、圆盘模型和间距四种岩体结构面的关键信息。也有学者将深度学习的方法用于隧道掌子面图像数据的处理,对迹线、围岩结构面、软弱夹层等信息进行提取^[24-26]。

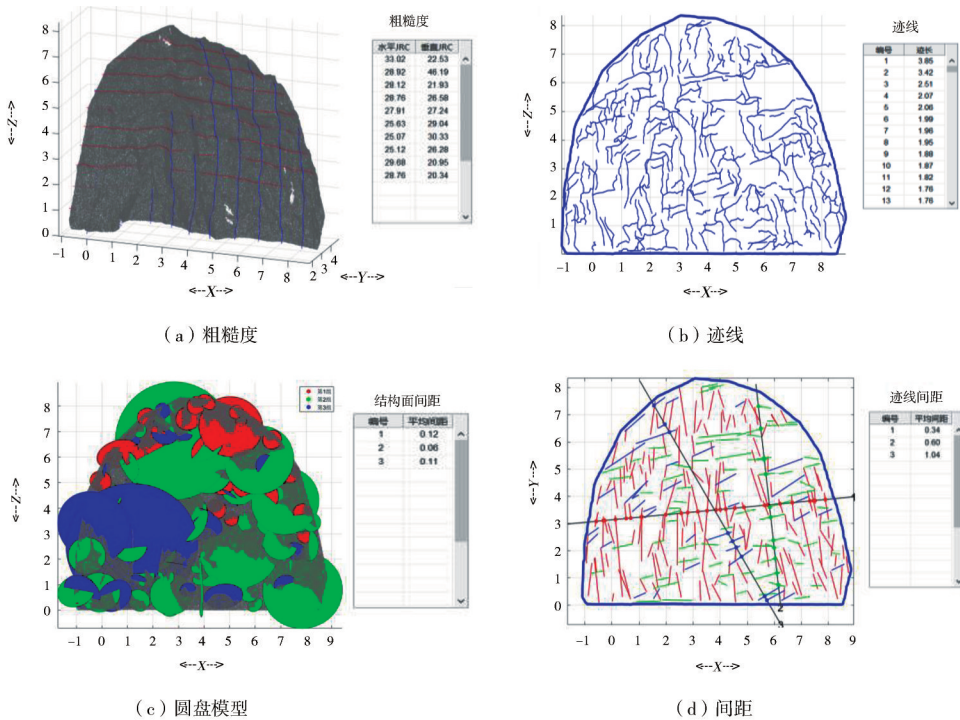


图5 岩体三维结构面信息提取^[29]

Fig.5 Extraction of 3D structural plane information from rock bodies^[29]

除了掌子面点云和图像数据外,超前地质探测数据和随钻测量数据的处理也是研究中的热点问题。Li等^[27]利用地质统计学的方法对超前地质探测数据进行融合处理,并最终得到掌子面前方围岩分级结果。刘华吉等^[28]采用基于机器学习的方法建立了随钻参数和地层岩体的关系,为隧道工程智能勘测提供了新的途径。

4.3 智能表达

隧道围岩地质体的智能表达是隧道工程智能建造数据表达的重要部分。三维地质建模为隧道工程提供了详细的地质信息,包括地层分布、岩性特征、特殊构造、地下水情况等,通过三维可视化技术来直观地展示隧道周围地质情况的立体模型,为地质信息自动提取、地质风险评估等工作提供基础。图6展

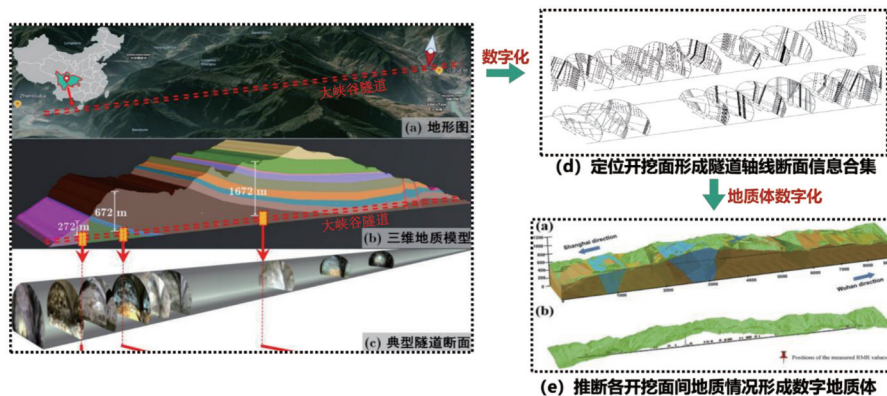


图6 三维地质建模及地质体数字化^[30,31]

Fig.6 3D geological modeling and digitalization of geological body^[30,31]

示了地质体的智能表达过程,通过结合地形图和开挖面轴线断面信息来形成三维地层模型并推断各开挖面间地质体情况。

计算机图形学和建模技术的发展为隧道数据智能表达提供了广阔的实践空间。建筑信息模型(Building Information Modelling, BIM)是设施的物理和功能特性的数字化表述^[32],其在隧道工程的设计、施工和运维中都已经得到较为广泛的应用,其中在设计阶段的应用最为成熟^[33]。李晓军等^[34]建立了隧道结构的BIM模型(图7),将模型分为LOD100、LOD200和LOD300三个层次,并将单元模型按照离散化的轴线自动拼接,提高了隧道结构三维模型的建模效率,对提高隧道结构数据智能表达具有重要意义。

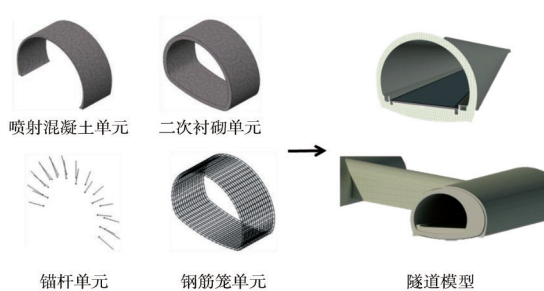


图7 隧道结构BIM模型^[34]

Fig.7 BIM model of tunnel structure^[34]

4.4 智能分析

经验法、数值法和解析法是隧道工程数据分析常用的方法,这3种方法通常也会结合使用,以达到更全面、准确的数据分析和工程设计目的^[12],如图8所示。岩体等效连续数值分析和非连续数值分析适用于复杂的地质条件问题,能够提供详细的数值结果,被广泛应用于不良地质预测、应力控制等方面。Cai等^[35]针对深部岩石隧道开挖的三维空间效应,基于广义GZZ (Generalized Zhang-Zhu)岩体三维强度准则,探讨了深部隧道开挖过程中主应力的主动控制机制,为深埋隧道的设计与施工提供理论支持。

基于岩体三维非连续分析的局部锚杆设计也是智能分析中的研究热点,主要流程包括:(1)基于岩体产状信息切割生成块体模型;(2)采用三维离心滑动锥法分析块体稳定性;(3)基于失稳块体位置与现行锚杆设计模式,以锚杆安装参数为输入参数,使用无监督机器学习算法对安装成本、复杂度等目标函数进行迭代寻优,获取锚杆最优安装方案及参数。图9展示了利用结构面识别信息建立地质体三维非连续模型的过程。

4.5 智能服务

隧道工程通常涉及到多个不同的利益相关方,包括设计、施工、监理、政府监管部门等单位。将数

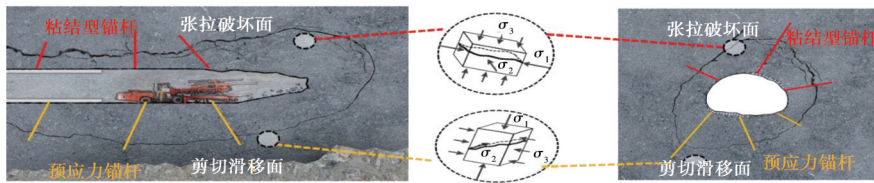


图8 深埋隧道应力控制方法^[35]

Fig.8 Stress control methods for deeply buried tunnels^[35]

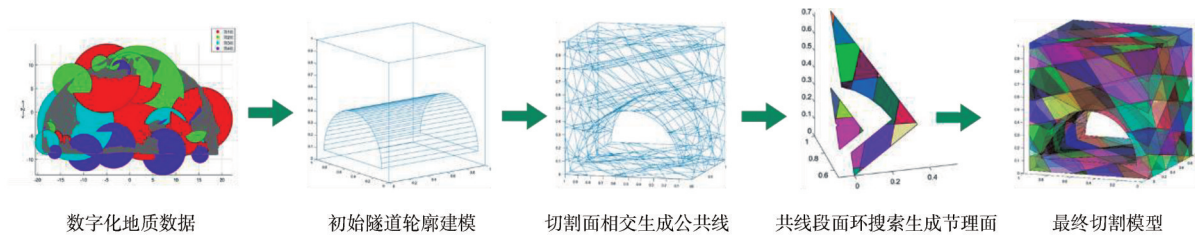


图9 三维非连续分析过程^[36]

Fig.9 3D discontinuous analysis process^[36]

据以服务的形式提供出来,可以实现信息共享和沟通,确保所有相关方都能够及时获取到所需的数据和信息,增强工程管理的透明度和效率。数据智能服务是与具体的工程应用需求相关,服务的对象影

响服务的决策内容。在已有研究中,掌子面节理点云识别^[37]、块体三维分析^[38]、开挖及支护参数选择^[39]、施工安全风险智能预警^[40]等服务以云平台或BIM模型的形式提供给相关者使用,如图10所示。

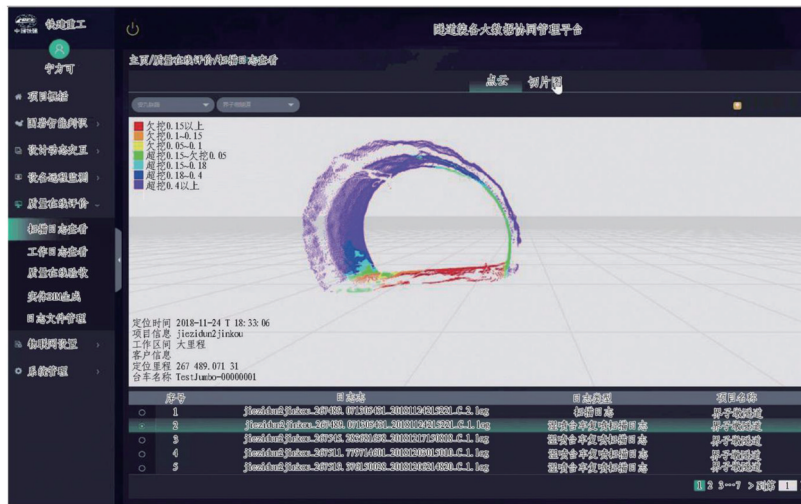


图10 开挖及支护服务智能施工软件示意^[39]

Fig.10 Schematic diagram of intelligent construction software for excavation and support services^[39]

5 未来展望

相比于传统的隧道建造模式,智能建造的优势在于增强复杂环境下的适应能力和个性化服务能力,提升生产安全水平,提高重大基础设施工程质量和建造效率。第4节对目前隧道智能建设中“采集-

传输-处理-表达-分析-服务”的最新技术和研究进展进行了综述,但是在“数字-数值-数据一体化分析理论”、“人-机-环境全要素数字孪生”、“采集-设计-施工一体化建造模式”和“全工程设备自动化”四个方面仍存在难题,如图11所示。



图11 隧道智能建造未来展望

Fig.11 Future outlook for intelligent tunnel construction

工程建造环境、实体、工艺工法等工程全要素的数字化是实现隧道智能建造的基础,以上文所述“采集-传输-处理-表达-分析-服务”信息流为纽带,从而建立工程建造全过程数字孪生模型。既有研究在隧道数字孪生建立方面取得了进步,但是对“人-机-环境”全要素的数字孪生考虑较少^[41-44],分析方法也较少考虑数字模型、数值模型和数据的一体化融合。

“采集-设计-施工一体化建造模式”能够为全要素数字孪生的建立提供数据保障,而全工程设备的自动化则为全要素数字孪生模型的建立提供物质保障。“采集-设计-施工”一体化的建造模式是在工程现场实现物理实体与数字孪生体间信息环向流动的具体方案和措施,通过建立数据智能采集和传输体系,对云端数据进行智能分析并反馈到施工^[12]。全工程设备的自动化通过引入自动化施工设备和机器人技术,实现对隧道开挖、支护、砌筑等工序的自动化操作^[45-47]。

6 结语

在隧道建造条件的极端化和新一代信息技术的发展引起的产业变革的双重影响下,隧道智能建造成为了隧道建设发展的必然趋势。在这样的背景下,本文聚焦于钻爆法隧道智能建造的最新技术发展,对隧道智能建造必要性、整体解决方案、“采集-传输-处理-表达-分析-服务”信息流进行阐述,最后

对隧道智能建造的未来进行展望。主要结论如下:

(1) 隧道智能建造是顺应第四次工业革命的需要,用信息技术的理论和方法改造和提升传统隧道建造模式,实现隧道建设的数字化赋能和数字化转型,从而成为推动隧道建设发展的核心驱动力。已有研究中,图像、点云、随钻数据、超前地质探测等是主要采集的数据,利用数值模拟、机器学习等先进的分析手段,得到爆破、支护参数等设计信息,并反馈到施工中。

(2) 本文提出了隧道智能建造过程中“采集-传输-处理-表达-分析-服务”的信息流,通过自动化或半自动的数据采集手段,采集隧道施工现场的地质数据、掌子面数据和结构数据,通过5G传输网络等高速远程传输方式将数据上传到云端。在云端,通过大数据、人工智能等方式对数据进行处理,并建立隧道地质模型、结构模型等三维轻量化表达方法,对数据进行精细、高效分析。最后,将分析结果通过云服务的方式,反馈到施工现场。

(3) 隧道智能建造在“数字-数值-数据一体化分析理论”、“人-机-环境全要素数字孪生”、“采集-设计-施工一体化建造模式”和“全工程设备自动化”四个方面仍待解决。通过克服这些关键问题,能够增强复杂环境下的适应能力和个性化服务能力,提升生产安全水平,提高重大基础设施工程质量和建造效率。

参考文献

References

- [1] 田四明, 王伟, 巩江峰. 中国铁路隧道发展与展望(含截至2020年底中国铁路隧道统计数据) [J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(2): 308-325.
TIAN Siming, WANG Wei, GONG Jiangfeng. Development and Prospect of Railway Tunnels in China (Including Statistics of Railway Tunnels in China by the end of 2020) [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(2): 308-325.
- [2] 中华人民共和国交通部. 2022年交通运输行业发展统计公报 [EB/OL] (2023)[2024-4-10]. https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202306/content_6887539.htm
Ministry of Communications of the People's Republic of China. Statistical Bulletin on Development of Transport Industry in 2022

- [EB/OL] (2023)[2024-4-10].https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202306/content_6887539.htm
- [3] 严金秀. 中国隧道工程技术发展40年 [J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(4): 537-544.
YAN Jinxiu. Achievements and Challenges of Tunneling Technology in China over Past 40 Years[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(4): 537-544.
- [4] 郑宗溪, 孙其清. 川藏铁路隧道工程 [J]. 隧道建设, 2017, 37(8): 1049-1054.
ZHENG Zongxi, SUN Qiqing. Tunnels on Sichuan Tibet Railway[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(8): 1049-1054.
- [5] 刘继国, 崔庆龙, 舒恒, 等. 天山胜利隧道穿越博-阿断裂段抗错断性能研究 [J]. 震灾防御技术, 2023, 18(2): 235-242.
LIU Jiguo, CUI Qinglong, SHU Heng, et al. Study on the Anti-dislocation Performance of Tianshan Shengli Tunnel Crossing Bo-A Fault Section[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2023, 18(2): 235-242.
- [6] 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/OL]. 中国公路学报: 1-27[2024-04-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1313.U.20231207.1324.002.html>.
LI Liping, ZOU Hao, LIU Hongliang, et al. Research Status and Development Trends on Intelligent Construction of Drill-and-Blast Tunnels[J/OL]. China Journal of Highway and Transport: 1-27[2024-04-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1313.U.20231207.1324.002.html>.
- [7] HERMANN M, PENTEK T, OTTO B. Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios[C]//Hawaii International Conference on System Sciences. IEEE., 2016:3928-3937.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 住房和城乡建设部关于印发“十四五”建筑业发展规划的通知 [EB/OL] (2022-01-19) [2024-04-10]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zhengce/zhengcefilelib/202201/20220125_764285.html.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development, People's Republic of China. Notice of the Ministry of Housing and Urban-Rural Development on Issuing the "14th Five-Year Plan" for the Development of the Construction Industry[EB/OL] (2022-01-19) [2024-04-10]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zhengce/zhengcefilelib/202201/20220125_764285.html.
- [9] 肖明清, 徐晨, 谢壁婷, 等. 高速铁路钻爆法隧道分序支护设计技术研究 [J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(3): 369-382.
XIAO Mingqing, XU Chen, XIE Biting, et al. Research on Design Technology of Sequential Supporting for High-speed Railway Tunnel Constructed by Drilling-and-blasting Method[J]. Tunnel Construction, 2023, 43(3): 369-382.
- [10] 南昆线米花岭隧道开挖全部结束 [J]. 世界隧道, 1996(4): 69.
The Mihualing Tunnel on Nanning-Kunming Railway Completed Excavation[J]. World Tunnelling, 1996(4): 69.
- [11] 杨会军, 胡春林, 谌文武, 等. 断层及其破碎带隧道信息化施工 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004(22): 3917-3922.
YANG Huijun, HU Chunlin, CHEN Wenwu, et al. Information Construction of the Tunnel in A Fault and Crush Zone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004(22): 3917-3922.
- [12] LING J, LI X, LI H, et al. Data Acquisition-interpretation-aggregation for Dynamic Design of Rock Tunnel Support [J]. Automation in Construction, 2022, 143.
- [13] 陈建钢, 刘汝明, 许乃岑, 等. 基于回流辅助的小型压裂地应力测试研究与应用 [J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(增2): 248-253.
CHEN Jiangan, LIU Ruming, XU Naicen, et al. Research and Application of Mini-frac In-situ stress Test Based on Flowback Assistance[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(S2): 248-253.
- [14] 徐斌, 刘汝明, 陈子扬, 等. 瞬态压力分析方法在小型压裂地应力测试中的应用 [J]. 长江科学院院报, 2020, 37(2): 81-86.
XU Bin, LIU Ruming, CHEN Ziyang, et al. Application of Pressure Transient Analysis Method in Mini-Frac Test[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(2): 81-86.
- [15] 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.
- [16] MOHAMMAD B K, ROBERT H. Processing of Measurement while Drilling Data for Rock Mass Characterization [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2016, 26(6): 989-994.
- [17] CHEN S, 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.
- [18] LI C Q, DENG H L, GE C, et al. Technology and Application of 3D Tunnel Information Monitoring [C]//Proceedings of the 6th International Conference on Electronics and Information Engineering (ICEIE). Dalian: 2015.
- [19] 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.
- [20] 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 Hongwei, CHEN Jiayao. 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.
- [21] 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 Shangyou, CHEN Jiayao, ZHANG Dongming, et al. Automatic Identification of Rock Structure at Tunnel Working Face Based on Deep Learning[J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(4): 29-36.
- [22] 张美莲, 宋晨星. 隧道智能监测系统的数据采集、提取与分发研究 [J]. 公路, 2023, 68(5): 407-411.
- ZHANG Meilian, SONG Chenxing. Research on Data Acquisition, Extraction and Distribution for Intelligent Tunnel Monitoring Systems [J]. Highway, 2023, 68(5): 407-411.
- [23] 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 Yan, DENG Yan. High Precision Personnel Positioning System Based on Whole-process Wireless Data Transmission Inside the Tunnel[J]. Construction Technology, 2020, 49(6): 92-95+113.
- [24] CHEN J, ZHANG D, HUANG H, et al. Image-based Segmentation and Quantification of Weak Interlayers in Rock Tunnel Face via Deep Learning [J]. Automation in Construction, 2020, 120.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] LI X, TANG L, LING J, et al. Digital-twin-enabled JIT Design of Rock Tunnel: Methodology and Application [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 140: 105307.
- [28] 刘华吉, 孙红林, 张占荣, 等. 基于随钻参数的砂岩与砂质泥岩地层分界面智能识别 [J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(增1): 304-312.
- LIU Huaji, SUN Honglin, ZHANG Zhanrong, et al. Intelligent Identification of Sandstone-sandy Mudstone Interface Based on Drilling Parameters[J]. Tunnel Construction, 2023, 43(S1): 304-312.
- [29] ZHANG K, WU W, LIU Y, 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.
- [30] CHEN J, LI X, ZHU H, et al. Geostatistical Method for Inferring RMR Ahead of Tunnel Face Excavation using Dynamically Exposed Geological Information [J]. Engineering Geology, 2017, 228: 214-223.
- [31] WANG J, LI P, ZHUANG X, et al. Multi-source Data Integration and Multi-scale Modeling Framework for Progressive Prediction of Complex Geological Interfaces in Tunneling [J]. Underground Space, 2024, 15: 1-25.
- [32] NIBS. United States National Building Information Modeling Standard [M]. Washington: INBS, 2007: 75-82.
- [33] 李晓军, 田吟雪, 陈树汪, 等. 建筑信息模型(BIM)技术在隧道工程中应用现状与分析 [J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(7): 953-963.
- LI Xiaojun, TIAN Yinxue, CHEN Shuwang, et al. Application Status and Analysis of Building Information Model (BIM) Technology in Tunnel Engineering[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(7): 953-963.
- [34] 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 Xiaojun, TIAN Yinxue, TANG Li, 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.
- [35] CAI W, ZHU H, LIANG W. Three-dimensional Stress Rotation and Control Mechanism of Deep Tunneling Incorporating Generalized Zhang-Zhu Strength-based Forward Analysis [J]. Engineering Geology, 2022, 308:106806-106826.
- [36] WU W, ZHU H, LIN J-S, et al. Tunnel Stability Assessment by 3D DDA-key Block Analysis [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 71: 210-214.
- [37] 于晓宇, 刘芳, 徐英楠, 等. 隧道掌子面节理点云识别及微服务模块开发 [J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(2): 586-593.
- YU Xiaoyu, LIU Fang, XU Yingnan, et al. Point Cloud Identification of Joints in Tunnel Faces and Its Implementation in a Microservice[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(2): 586-593.
- [38] 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 Hehua, WU Wei, LI Xiaojun, 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.

- [39] 王志坚. 郑万高铁隧道智能化建造技术研究及展望 [J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(11): 1877-1890.
WANG Zhijian. Status and Prospect of Intelligent Construction Technology of Tunnel of Zhengzhou-Wanzhou High-speed Railway [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(11): 1877-1890.
- [40] LIU Naifei, GUO Desai, SONG Zhanping, et al. BIM-based Digital Platform and Risk Management System for Mountain Tunnel Construction [J]. Scientific Reports, 2023, 13(1).
- [41] 刘学增, 杨子硕, 丁爽, 等. 数字隧道 [J]. 现代隧道技术, 2024, 61(1): 1-15.
LIU Xuezheng, YANG Zishuo, DING Shuang, et al. Digital Tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2024, 61(1): 1-15.
- [42] 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/OL]. 铁道标准设计: 1-8[2024-04-01].<https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202307060006>.
LIANG Ce, MA Juan, ZHU Jun, et al. Digital Twin System Construction Method of Tunnel Construction by Drilling and Blasting Method [J]. Railway Standard Design: 1-8[2024-03-30].<https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202307060006>.
- [43] LI T, LI X J, RUI Y, et al. Digital Twin for Intelligent Tunnel Construction [J]. Automation in Construction, 2024, 158:105210.
- [44] YE Z J, YE Y, ZHANG C P, et al. A Digital Twin Approach for Tunnel Construction Safety Early Warning and Management [J]. Computers in Industry, 2023, 144:103783.
- [45] 王志坚. 郑万铁路隧道智能化建造技术创新实践 [J]. 中国铁路, 2020(12): 10-19.
WANG Zhijian. Innovative Practices of intelligent Tunnel Construction Technology for Zhengzhou-Wanzhou Railway [J]. Chinese Railways, 2020(12): 10-19.
- [46] 王勇, 蒋松余, 吴吉云, 等. 智能台车机械化支护在隧道施工中的应用 [J]. 工程建设与设计, 2022 (21): 133-136.
WANG Yong, JIANG Songyu, WU Jiyun, et al. Application of Intelligent Trolley Mechanized Support in Tunnel Construction [J]. Construction & Design for Project, 2022(21): 133-136.
- [47] 李君馨, 朱合华, 沈奕. 隧道智能施工研究的可视化分析与展望 [J]. 土木工程学报, 2022, 55(增2): 1-11.
LI Junxin, ZHU Hehua, SHEN Yi. Visual analysis and prospect of tunnel intelligent construction research [J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(S2): 1-11.

Intelligent Construction for Drill-and-Blast Tunnels: Latest Technologies and Future Prospects

ZHU Hehua^{1,2} LING Jiaxin¹ ZHU Mengqi¹ LI Xiaojun^{1,2} WU Wei^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092;

2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract: Under the dual influences of extreme tunnel construction conditions and the industrial transformation driven by the development of new-generation information technology, intelligent construction has become an inevitable trend in tunnelling development. Intelligent tunnel construction aligns with the needs of the Fourth Industrial Revolution, using the theories and methods of information technology to transform and enhance traditional tunnel construction modes, achieving digital empowerment and transformation in tunnel construction. This transformation has become a core driving force in advancing tunnelling development. Against this backdrop, this paper focuses on the latest technological developments in intelligent construction of drill-and-blast tunnels, discussing the necessity of intelligent tunnel construction, comprehensive solutions, and the information flow of "acquisition - transmission - processing - expression - analysis - service". It concludes with a future outlook on intelligent tunnel construction. By reviewing the latest technologies and research progress in data acquisition, transmission, processing, expression, analysis, and services within the field of intelligent tunnel construction, this paper introduces key challenges such as "integrated digital-numerical data analysis theory", "full-element digital twins of human-machine-environment", "integrated construction mode of acquisition design-construction", and "automation of entire engineering equipment", aiming to realize the intelligent tunnel construction, enhance the quality and efficiency of major infrastructure projects.

Keywords: Drill-and-blast method; Intelligent construction; Solutions; Intelligent design and analysis; Intelligent tunnel construction