

文章编号: 1674—8247(2020)03—0101—07  
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2020.03.021

## 软弱围岩隧道智能机械化配套施工技术探讨与展望

郭光旭 王恩选

(西成铁路客运专线陕西有限责任公司, 西安 710043)

**摘要:**为提升隧道智能机械化配套施工水平,本文依托西延高速铁路,在现有隧道单机机械化、信息化设备的基础上,探索人工智能、机器人技术与隧道装备、矿山法施工技术的高度融合。通过探讨隧道关键工序的主要智能机械化设备,实时采集建造过程数据,利用大数据、云计算进行数据分析、整理、存储、挖掘和反馈,实现智能化机群的自监控、自学习、自管理,建立智慧隧道云平台,形成智能调度指挥系统,实现“机群协同”,进而对隧道智能机械化构想进行诠释,分析阐明依托工程推进隧道智能机械化发展的阶段,并展望隧道智能化建造的前景。

**关键词:**软弱围岩;隧道;施工技术;智能机械化;机群协同

中图分类号:U456.3 文献标志码:A

### Discussion and Prospect of Intelligent Mechanized Construction Technology for Soft Surrounding Rock Tunnel

GUO Guangxu WANG Enxuan

(Shaanxi Co., Ltd. of Xi'an-Chengdu Passenger Dedicated Railway, Xi'an 710043, China)

**Abstract:** To enhance the auxiliary construction level of intelligent machine for tunnel, relaying on the Xi'an-Yan'an high-speed railway project, this paper researches the high integration between artificial intelligence, robot technology and tunneling equipment, mining construction technology on the basis of the existing tunnel single machine and information equipment. By discussing the main intelligent mechanized equipment for the key process of the tunnel, collecting the data of construction process in real time, and analyzing, sorting, storing, mining and feeding back the data with big data and cloud computing, the self-monitoring, self-learning, and self-management of intelligent machine group are realized. An intelligent tunnel cloud platform is established to form an intelligent dispatching command system and achieve “machine group collaboration”. The paper interprets the concept of tunnel intelligent mechanization, analyzes the stages of promoting the intelligent mechanized development of tunnel based on engineering, and looks forward to the prospect of intelligent tunnel construction.

**Key words:** soft surrounding rock; tunnel; construction technology; intelligent mechanization; machine group collaboration

自第一届交通运输工程国际学术会议提出智能化 铁路模型以来,全世界掀起了一场人工智能的风潮,智

收稿日期:2020-04-13

作者简介:郭光旭(1964-),男,高级工程师。

引文格式:郭光旭,王恩选. 软弱围岩隧道智能机械化配套施工技术探讨与展望[J]. 高速铁路技术,2020,11(2): 101-107.

GUO Guangxu, WANG Enxuan. Discussion and Prospect of Intelligent Mechanized Construction Technology for Soft Surrounding Rock Tunnel[J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(2): 101-107.

能掘进、自动化施工等相关信息持续受到关注<sup>[1-2]</sup>。随着计算机技术、通信技术、物联网、云计算技术、3D打印和智能计算技术的快速发展,大数据、信息化和智能化的时代已经到来,机械化逐步转型为智能化将成为工程机械的发展方向,有效提高工作效率的同时,还可大幅度降低生产成本。国内外学者在智能机械化建造技术方面进行了积极的探索研究,其中具有代表性的有:高文学等人<sup>[3]</sup>提出隧道施工多元信息智能化监测系统 TIS (tunnel intelligentized monitoring system); Kotenko等人<sup>[4]</sup>建立了用于铁路运输自动化系统信息保护的多级智能信息安全系统的体系结构;王迎超等人<sup>[5]</sup>开发了一种模拟隧道分部开挖的多功能智能掘进装置,操作易行、自动化、智能化程度高;邓铭江等人<sup>[6]</sup>通过对 TBM 长距离隧洞(道)试掘进阶段工作的总结与分析,对智能化掘进技术进行阐述与展望;刘飞香<sup>[7]</sup>提出借助通信网络和智能建造施工协同管理平台,为隧道智能建造提供装备保障。

基于前人的研究成果可推测,高速铁路隧道智能机械化配套施工,乃至无人化施工,是铁路工程建设的发展趋势。本文借鉴京张高速铁路首次采用智能技术建造的成功经验和郑万高速铁路大断面隧道机械化施工的研究成果,依托西延高速铁路建设项目,在已有机械化、数字化、信息化施工技术基础上,探索人工智能、机器人技术与隧道装备、矿山法施工技术的高度融合,减少人为主观因素引起的偏差,提升隧道施工安全性,保证隧道施工质量。同时,探索 5G 技术与智能机械化的融合,在 5G 基础上研究“机群协同、人机协同”智能调度指挥系统<sup>[8]</sup>,实现西延高速铁路软弱围岩隧道智能机械化配套施工,以期提升软弱围岩隧道工程建设质量安全管控水平,进而推动我国铁路隧道工程智能建造步伐。

## 1 隧道智能化施工现状及关键问题

### 1.1 智能机械化施工现状

#### 1.1.1 单工序智能机械设备研发现状

目前国内隧道施工工序(矿山法)可笼统分为钻爆、挖装、运卸、初支、喷锚、仰拱和二衬。针对各工序的单机智能机械化,诸多学者一直在探索研发,部分工序已实现了单工序机械化施工,单机操作数控化、自动化为多机信息互联协作提供了设备支撑条件。

##### (1) 凿岩机器人

自 19 世纪 40 年代第一台气动凿岩机问世,凿岩

机经历人工半机械化到机械化再到数控化的发展历程。我国在 2000 年前后成功研发了首台由电脑控制的隧道凿岩钻车样机,使隧道不必要开采量减少 10% 以上,单次爆破深度能提高 10% 以上,设备寿命尤其是钻头使用寿命提高 20% 以上,总生产效率提高约 20%<sup>[9]</sup>。2016 年,国产全电脑三臂凿岩台车(隧道凿岩机器人)研发成功,可缩短 90% 以上的施工准备时间,节约物料成本 50% 以上。

##### (2) 喷射混凝土机器人

混凝土湿喷机现今基本实现自动化喷射,国外隧道已开始使用 2~3 臂喷射混凝土机械手,实现遥控操作<sup>[10]</sup>。我国湿喷机在整体化、自动化方面也取得建设性突破,在设备操作、控制混凝土反弹、安全环保、行走控制等方面都得到了很大的提升<sup>[11]</sup>。为提高隧道施工中混凝土喷射的效率与质量,在机械化操作的基础上,研发喷射机械手智能化控制系统,根据不同区域的超欠挖情况动态控制喷射参量<sup>[12]</sup>。

##### (3) 数字化衬砌台车

二衬施工经历了人工立模、简易模板台架、网架式衬砌台车、全液压自动行走衬砌台车等阶段<sup>[13]</sup>,衬砌台车的自动化、信息化、智能化也在逐步探索研发之中,各种新型隧道数字化衬砌台车开始投入使用。张吉怀铁路研发了一套新型智能衬砌台车施工自动控制系统,实现了对衬砌浇筑过程中混凝土浇筑量、温度和压力等的自动化监测和信息化控制,提高了隧道衬砌施工效率,确保了衬砌施工质量<sup>[14]</sup>。

#### 1.1.2 多工序智能机械配套施工技术发展现状

实现施工机械化,特别是隧道施工机械化,不是简单地用机械代替人工,也不是简单地在人力难以操作的环境使用机械。它是通过整体有序、合理、安全地实现各种机械的最优化配置,来达到施工过程中一种最高效、最合理、最经济、最安全的施工状态。

2016 年,郑万铁路硬岩隧道推广大断面机械化配套施工技术<sup>[15]</sup>,结合矿山法、挪威法、新意法及中国长期施工以来施工经验,首次在隧道大断面施工中采用大型机械化配套施工,总结出大型机械化配套施工工法。蒙华铁路隧道工程形成了涵盖湿喷机械手、自行式仰拱长栈桥、新型二次衬砌台车工装、马蹄形盾构、预切槽设备、悬臂式掘进机等一系列多工序隧道施工机械化配套技术<sup>[16]</sup>。京张高速铁路工程数字化是智能京张的先导工程,其本质是以 BIM、GIS 以及现代信息技术为基础,实现京张高速铁路建设过程的全面数

字化,即工程实体的数字化、过程管理的数字化、参与要素的数字化<sup>[17]</sup>。

国内隧道机械化施工,已由局部机械化施工发展到综合机械化施工,体现了我国隧道机械化施工技术的大幅提高,但仍然存在以下问题:

(1)国外机械设备已开始向智能化、单机机器人化方向发展,国内对智能装备的研究还处于初级阶段,相关的研究也较少。

(2)国内隧道多机种机械化作业模式的理论体系仍有待完善。在隧道施工研究方面,国内对隧道施工技术的研究较多,而对隧道多机种机械化作业模式的研究较少。多机种机械设备配套只能在围岩稳定性好的情况下进行机械化作业,且机械设备配套的关键技术难题有待解决,从而导致隧道施工机械化程度低。长期以来,我国软弱围岩隧道施工主要以人工钻爆的矿山法为主,IV级围岩采用三台阶法,V级围岩采用CD法、CRD法和双侧壁导洞开挖。软弱围岩(土质)隧道采用分部开挖工法,施工过程中支护强度和刚度很难控制,施工步骤复杂不易把握,不利于机械化配套施工的发展。

(3)国内隧道综合信息智能监控技术研究尚处于起步阶段,还未在机械化、信息化的基础上形成系统完善的智能化体系。利用信息化技术以及人工智能对隧道的智能安全监控、隧道灾害预警以及救援措施实施等相关技术进行研究,可作为该领域的一个发展方向。

针对以上问题,有必要通过具体工程案例,试行多机种机械化协同作业模式,结合现场施工监控反馈信息对模式理论体系进行研究。对大量采用分部开挖法的软岩隧道,应研发小型机械化设备,形成完善的隧道机械化作业模式理论体系和综合信息智能监控系统,以提高隧道施工进度。

## 1.2 软弱围岩隧道智能机械化研究的关键问题

结合西延高速铁路的地质特性,在机械化、信息化、单机智能化施工技术的基础上,以5G技术为媒介,深度融合物联网技术,开展软弱围岩隧道关键工序智能机械化施工研究,实现智能机械化施工装备协同作业,确保施工安全、环保、快速。通过对现有施工技术与工法的分析,软弱围岩隧道智能机械化研究的关键问题有:

(1)软弱围岩隧道智能机械化施工工法及其地质适应性

智能机械化施工工法在工法设计中充分考虑了智

能机械协同施工的需要,根据机械作业半径优化开挖断面划分,根据围岩地质特性进行设计。充分利用智能机械化设备的优势对支护工艺进行优化。

(2)软弱围岩隧道智能机械化施工装备数据采集、分析与自主决策等系统开发

基于智能凿岩台车钻进参数、地质素描、TSP和地质雷达超前预报等信息,得到隧道围岩的坚硬程度、完整程度和地下水发育情况等数据,采用数量化理论,建立现场多信息综合评价模型。运用专家知识系统,比较分析现场多信息综合评价模型,快速进行预判,辅助隧道围岩级别判释。建立围岩级别及处理措施对应关系的数据库,根据判释隧道围岩级别,设备自助决策,调整支护措施参数。

(3)软弱围岩隧道智能机械化施工装备数据高效处理、交互与上传技术

基于建筑信息模型(BIM)、大数据、移动互联网、云计算、物联网(IOT)等技术,结合隧道施工工法,实现智能机械化施工装备的信息交互上传,建立隧道智能机械化管理云平台,实现各类施工装备的有序衔接和高效作业。

(4)软弱围岩隧道智能机械化施工装备协同控制作业智能调度系统开发

在智能机械化施工装备数据高效处理、交互基础上,运用专家知识系统,建立现场多信息综合评价模型,建立触发条件与协同命令对应数据库,从而实现智能多方协同施工调度。

## 2 隧道智能配套施工技术开发

### 2.1 依托工程概况

新建西安至延安高速铁路位于陕西关中及陕北地区,是国家《中长期铁路网规划》(2016年)中规划“八纵八横”高速铁路主通道包(银)海通道的重要组成部分,速度目标值350 km/h。新建正线全长287.1 km,其中隧道43座,总长165.751 km,占新建线路长度的58.8%。

线路主要位于渭河冲积平原区、黄土台塬区、黄土梁峁沟壑区及子午岭低中山区,属中朝准地台一级构造单元,跨越汾渭断陷及陕甘宁台坳两个二级构造单元。其中,西安至铜川段位于汾渭断陷的三级构造单元渭河断陷。共跨越11条断层破裂段,隧道工程均以大角度通过。

区域内隧道工程围岩岩性主要以第四系黄土、第

三系泥岩、侏罗系、三叠系页岩、泥岩为主。隧道最大埋深250 m,其中IV级围岩占比61.8%,V级围岩占比12.7%。本文选择太康隧道作为科研试验依托工点,隧道长13 600.70 m,为单洞双线隧道,隧道最大埋深237 m,最小埋深29.6 m,隧道洞身主要地层为IV~V级的第四系全新统滑坡堆积、冲积层、洪积层及坡积层,上更新统冲积层、坡积层及风积层,下伏三叠系上统页岩、砂岩,属于I级高风险隧道,共设3座斜井辅助施工。洞身穿越区围岩变形量大,速度快,持续时间长,围岩破坏范围大,压力增长快,变形破坏形式多样,

且受工程扰动极其敏感,在受拉或受压条件下将产生塑性区,使围岩和支护发生变形,极易发生初期支护变形侵限和隧道坍塌等工程灾害。修建如此软弱围岩的高风险隧道,有必要提升工程的智能机械化水平。太康隧道进口、1号斜井工区、出口工区拟采用智能机械化配套施工,亟待开展软弱围岩隧道智能机械化施工技术研究。

## 2.2 隧道智能机械化施工配套技术

太康隧道计划工期为33.8个月,2号斜井~3号斜井之间为关键线路,如图1所示。

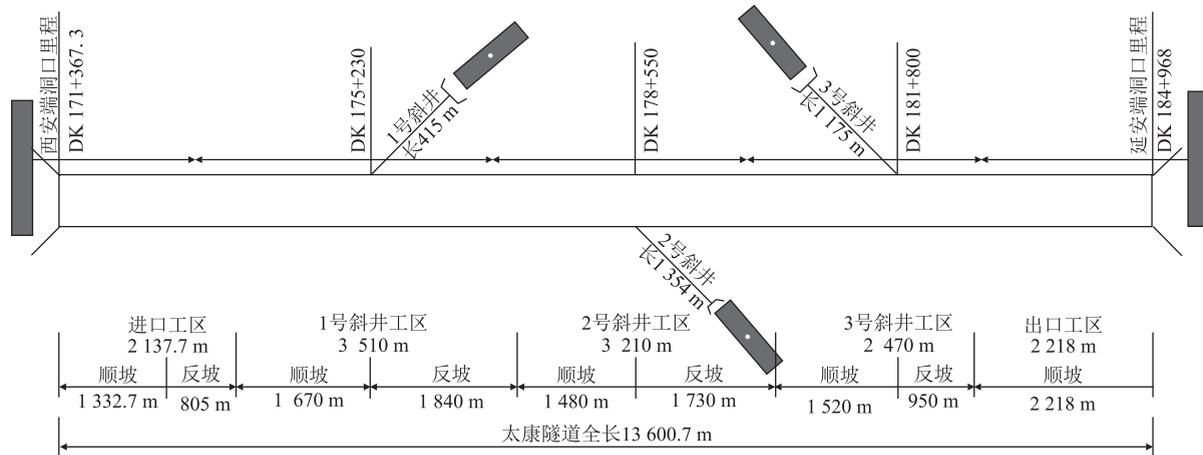


图1 太康隧道施工工期计划图

针对太康隧道工程特点,结合高速铁路隧道施工的机械设备现状、工艺工法水平和安全质量要求,在机械化、数字化、信息化的基础上,对“超前探测、注浆加固、开挖、初期支护、衬砌”等五大关键工序,利用(研发)单工序智能机械装备,开发智能调度指挥系统,提升“机群协同”功能。通过智能凿岩台车、注浆装备、台车等设备的信息交互、反馈、智能决策与控制,逐步实现软弱围岩隧道智能机械化配套施工技术。研究内容包括隧道软弱围岩智能机械化装备及配套技术研究、隧道围岩智能判别及BIM技术、隧道关键工序智能机械化施工综合技术研究、隧道智能机械化管理平台、隧道智能机械化施工工效及定额测定和软弱围岩隧道非爆智能机械化配套研究。选取太康隧道进、出口工区作为试验研究区段,关键线路外1号斜井往进、出口区段作为科研成果验证区段。

无论是试验研究区段还是科研成果验证区段,在研究过程中,都应注意以下几点:

### (1) 智能机械化与围岩地质配套

西延高速铁路陕北地区以砂岩、页岩和黄土为主,岩石含水量偏低。白垩系砂岩岩层倾角平缓。区域内

黄土滑坡、溜塌、堆塌较发育,且受降雨量影响较大。因此,西延高速铁路隧道机械化配套方案的制定原则为:基于设计要求,对土质、石质两大类围岩,分别按照围岩级别确定隧道机械化作业线机械设备配置方案。确定岩石隧道III、IV、V级围岩和土质隧道IV、V级围岩机械化配套设备配置方案和配套施工技术。

利用新技术、新材料,同步研发高速铁路大断面软弱围岩隧道(矿山法)分部开挖施工的小型自动机械化设备,使设备能够同时满足超前小导管支护、隧道开挖及立拱机械的作业要求。并针对超前探测、注浆加固、开挖、初期支护、二次衬砌五大关键工序,提升智能机械化配套施工技术。

### (2) 智能机械化与施工工法配套

西延高速铁路隧道施工工法主要有双侧壁导坑法、交叉中隔壁(CRD)法、三台阶临时仰拱法、三台阶预留核心土法、三台阶法。基于工程施工工法的隧道作业线的机械配置方案,形成对应工法的机械化配套施工作业标准、管理体系等,并研制适应于隧道分部开挖施工工法的开挖、初支等工序的小型工装设备。

### (3) 智能机械化与施工装备配套

研究制定主要智能装备的单机技术条件,按照技术条件进行选择或研发完善主要智能机械工装,在广泛调研的基础上,选择与主要智能装备相匹配的配套机械装备。机械化施工装备配套应考虑以下要求:

①机械化配套应对隧道围岩地质条件具有针对性,达到快速施工的目的。

②充分发挥单机功效,减少设备闲置及窝工现象。

③多工序平行作业,实现工序“零”衔接,加快作业循环。

④满足安全质量管控要求,探索机械化配套施工的安全质量体系标准。

(4)智能机械化与数据结构传输及协同作业

将现有单机设备数据进行规范、统一,建立一套规范化的作业机械数据结构规范,主要智能机械装备搭载5G收发端子,引进5G移动网络,通过无线发射接

收技术,对设备数据进行收集、交互。以智能化单机装备和多机协同化为依托,实时采集建造过程数据,通过互联网和物联网实时传输,利用大数据、云计算进行数据分析、整理、存储、挖掘和反馈,实现智能化机群的自监控、自学习、自管理,建立智慧隧道云平台,形成智能调度指挥系统,完成各智能工装设备之间的“协同作业”,进而实现“机群协同”,达到隧道智能化建造与管理的目的。

通过设备(凿岩台车、悬臂掘进机、湿喷台车)钻进技术、扫描技术、成像技术实现围岩信息实时采集,预期结果自动比对,设备状态及时调整,监测数据及时传输。智能机械化在隧道掘进各工序信息收集、交互联系示意如图2所示。通过岩机互动,提升设备自适应能力,同时超前掌握更多地层信息。

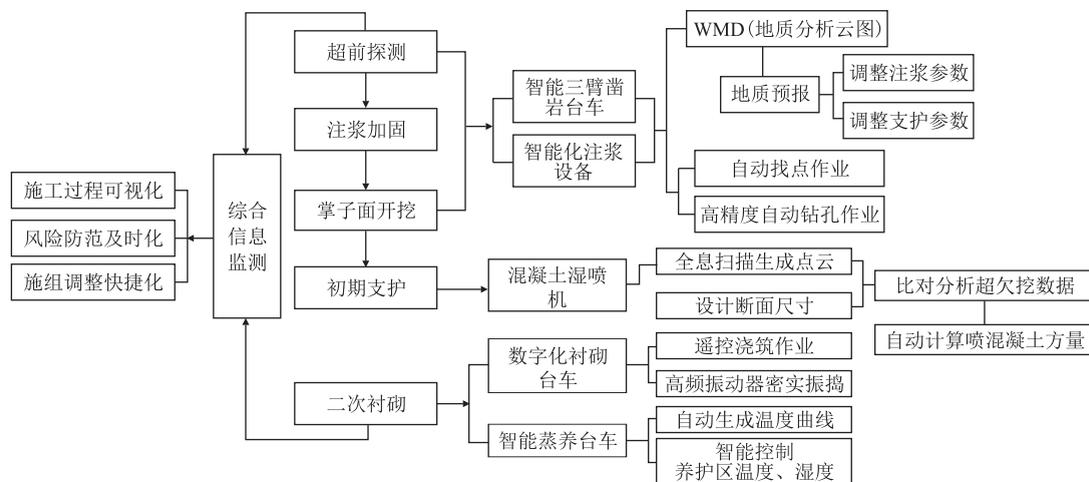


图2 智能机械化在隧道掘进各工序信息收集、交互联系示意图

### 3 隧道智能机械化应用前景

#### 3.1 隧道智能机械化构想

隧道智能机械化将人工智能、机器人和视觉识别技术与高速铁路隧道矿山法施工技术深度融合,施工机械通过主动感知、分析,自主操控完成工序作业,利用物联网、云计算、5G等先进技术,信息实时传输共享,机群协同,人机协同,远程智能监控,实现高速铁路隧道(矿山法)施工由数字化、信息化再升级改造为智能化施工机械,到软弱围岩隧道施工综合智能机械化配套作业,从而达到智能建造的目的。

#### 3.2 隧道智能机械化阶段分析

铁道工程智能建设分为三个发展阶段,即初级(知觉),中级(替代)和高级(智能)。为促进隧道智

能机械化的实现,进一步将其细化。

##### (1)初级阶段

关键工序,施工装备单机主动感知、分析,自主操控作业;信息实时传输,机群协同,信息共享,辅助人工决策;全工序、全过程机械化配套施工。

##### (2)中级阶段

在初级阶段基础之上,通过互联网和物联网实时传输,利用大数据、云计算进行数据分析、整理、存储、挖掘和反馈,建立智慧隧道云平台,形成智能调度指挥系统,完成各智能工装设备之间的“协同作业”,进而实现“机群协同”作业。

##### (3)高级阶段

在中级阶段基础之上,实现智能化机群的自监控、自学习;设计信息纳入智能控制系统,机群协同,人机

协同,深度学习,设计与施工深度融合,根据地质情况,从设计层面根据大数据分析、挖掘,系统智能决策开挖支护、衬砌参数,并驱动智能设备按照系统的决策自主作业,实现从设计到施工的全工序、全过程无人化施工,实现隧道智能建造与管理。

### 3.3 隧道智能机械化施工预期目标

(1)以西延高速铁路工程隧道设计及矿山法为理论基础,结合智能机械化配套施工,对软弱水平层围岩隧道施工工法、支护体系、技术参数进行优化。通过变形监测、内力监测等手段,收集试验数据及相关资料,对试验结果进行总结,形成软弱水平围岩隧道智能机械化配套施工工法、隧道支护体系、技术参数等。

(2)通过智能机械化施工及协同管理技术,对各工序施工质量进行管控,目标实现情况如下:

#### ①超欠挖质量控制

施工过程中通过钻孔参数和MWD地质云图采集,对爆破设计图进行自动动态优化,对超欠挖进行控制,进一步提升隧道爆破开挖质量。

#### ②喷混凝土施工质量控制

实现喷混凝土方量的自动计算,喷混凝土厚度、喷混凝土平整度的精准控制,保证喷混凝土效果与质量。

#### ③拱架安装质量控制

实现初期支护拱架安装的数量、位置、间距的精准控制,保证隧道钢拱架施工的效果与质量。

#### ④锚杆施工质量控制

实现锚杆钻进深度控制、预应力标准化控制、注浆过程参数控制,保证锚杆施工的效果与质量。

#### ⑤注浆施工质量控制

实现注浆参数的动态匹配和精准控制,并通过注浆设备的浆液自动拌合、注浆方量、注浆时间、注浆压力监测等功能,保证注浆效果与质量。

#### ⑥混凝土施工质量控制

实现二次衬砌360°无死角的混凝土密实控制;实现灌筑方量、入模温度、灌筑压力的实时监控;避免了拱顶脱空、整体密实性差等常见质量问题;通过采用智能养护,实现对封闭式养护空间温度、湿度、养护周期的精准控制和养护过程中状态的闭环监控,保证衬砌的养护质量;最大程度地保证混凝土施工质量,减少或杜绝衬砌裂纹、掉块等病害。

(3)建设投资可控,工程施工成本大幅降低。

(4)研究提炼一系列与智能机械化施工相适应的安全、质量、进度、投资、环保等建设管理方面具有可推

广价值的经验。

## 4 结论与展望

本文对智能机械化配套施工技术的探讨,将人工智能、图像识别、机器人技术与铁路隧道工程装备、施工技术深度融合,利用云计算、物联网、5G等先进技术,实现智能设备自主操控、自动学习修复、机群协同、人机协同、智能决策,全面实现铁路隧道智能机械化配套施工,推动高速铁路隧道建设“去人化”、“少人化”、“无人化”的进程,通过对西延高速铁路软弱围岩隧道全工序全过程智能机械化配套施工技术的分析,得出结论如下:

(1)采用智能化技术,隧道工期预期缩短,大幅减少劳动力和劳动强度,工序衔接和工序作业质量得以精准控制,实现了西延高速铁路隧道安全、快速、高效施工。

(2)实现西延高速铁路软弱围岩隧道预支护等关键工序自动化、智能化,多工序、多机种机群协同作业,辅助人工决策的预期效果。

随着计算机技术、数据库技术、GIS技术、空间信息技术、BIM、三维仿真与模拟技术和数控技术等高新技术在铁路工程研究与应用中的不断深入,以及物联网技术和云计算技术的逐步引入,“BIM+”融合趋势明显。利用信息化手段对高速铁路建设过程中的勘察、设计、施工和监测等方面的数据进行集中、高效管理,借助于虚拟现实、地理信息空间分析等技术手段为高速铁路建设、管理、运营和维护等提供信息共享方式,将高速铁路建设和运营的全生命周期运用信息化、数字化、智能化手段进行管理是必然发展趋势。

## 参考文献:

- [1] 日本隧道智能技术大合集[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(7): 1174.  
Japan Tunnel Intelligent Technology Collection [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(7): 1174.
- [2] LU Chunfang, LIU Junfei, LIU Yanhong, et al. Intelligent Construction Technology of Railway Engineering in China [J]. Frontiers of Engineering Management, 2019, 6(4): 503-516.
- [3] 高文学,侯炳晖,孙西蒙,等. 隧道掘进综合信息智能监控系统研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(S2): 408-412.  
GAO Wenxue, HOU Binghui, SUN Ximeng, et al. Research on Comprehensive Information Intelligent Monitoring System for Tunnel Excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(S2): 408-412.

- [4] KOTENKO I V, SAENKO I B, CHERNOV A V, et al. The Construction of a Multi-level Intelligent Information Security System for Automated Systems of Railway Transport [J]. SPIIRAS Proceedings, 2014, 7(30): 7.
- [5] 王迎超,李朝阳,杨圣奇,等. 模拟隧道分部开挖的多功能智能掘进装置及方法;中国, 108343445A[P]. 2018-07-31.  
WANG Yingchao, LI Chaoyang, YANG Shengqi, et al. Multi-functional Intelligent Driving Device and Method for Simulating Partial Tunnel Excavation; China, 108343445A[P]. 2018-07-31.
- [6] 邓铭江,谭忠盛. 超特长隧洞集群TBM试掘进阶段存在的问题与施工技术发展方向[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(5): 1-12.  
DENG Mingjiang, TAN Zhongsheng. Some Issues during TBM Trial Advance of Super-long Tunnel Group and Development Direction of Construction Technology [J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(5): 1-12.
- [7] 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 Feixiang. Prospects for Intelligent Construction Equipment Technology Innovation and Collaborative Construction Management of Railway Tunnel [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(4): 545-555.
- [8] 中国人工智能产业发展联盟. 人工智能浪潮[M]. 北京:人民邮电出版社, 2018.  
AIIA, The Wave of Artificial Intelligence [M]. Beijing: The People's Posts and Telecommunications Press, 2018.
- [9] 范子正. 计算机控制凿岩台车(隧道凿岩机器人)简介[J]. 中国设备工程, 2018(1): 165-167.  
FAN Zizheng. Introduction to computer-controlled rock drilling jumbo (Tunnel Drilling Robot) [J]. China Plant Engineering, 2018(1): 165-167.
- [10] 梁金桥. 车载式混凝土湿喷机械手在隧道工程中的应用[J]. 中外建筑, 2015(12): 142-143.  
LIANG Jinqiao. The Application of Wet Shotcrete Machine Hand in the Tunnel Engineering [J]. Chinese & Overseas Architecture, 2015(12): 142-143.
- [11] 刘金书. HPS3016S混凝土湿喷机的研制和应用[J]. 铁道建筑技术, 2016(10): 87-89.  
LIU Jinshu. Development and Application of HPS3016S Wet Spraying Machine [J]. Railway Construction Technology, 2016(10): 87-89.
- [12] 刘在政,秦念稳,邹今检,等. 喷射机械手智能控制系统与喷射路径规划设计研究[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(8): 1391-1396.  
LIU Zaizheng, QIN Nianwen, ZOU Jinjian, et al. Research on Intelligent Control System and Path Planning of Spraying Manipulator [J]. Tunnel Construction, 2018, 38(8): 1391-1396.
- [13] 梁爽. 隧道衬砌台车轻型化研究与应用[D]. 昆明:昆明理工大学, 2017.  
LIANG Shuang. Research and Application of Lightning of Tunnel Lining [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017.
- [14] 王百泉. 新型智能衬砌台车施工自动控制系统研究与应用[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(10): 1728-1735.  
WANG Baiquan. Research and Application of Automatic Control System of New Intelligent Lining Trolley Construction [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(10): 1728-1735.
- [15] 王志坚. 郑万高铁隧道大断面机械化施工关键技术研究[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(8): 1257-1270.  
WANG Zhijian. Research on Key Technology of Large Cross-sectional Mechanized Construction of Zhengzhou-Wanzhou High-speed Railway Tunnel [J]. Tunnel Construction, 2018, 38(8): 1257-1270.
- [16] 韩贺庚,申志军,皮圣. 蒙华铁路隧道工程施工技术要点及机械化配套[J]. 隧道建设(中英文), 2017, 37(12): 1564-1570.  
HAN Hegeng, SHEN Zhijun, PI Sheng. Technical Key Points and Mechanization Matching of Menghua Railway Tunnel Construction [J]. Tunnel Construction, 2017, 37(12): 1564-1570.
- [17] 解亚龙,王万齐. 京张高铁工程数字化的探索与实践[J]. 中国铁路, 2019(9): 22-28.  
XIE Yalong, WANG Wanqi. Exploration and Practices of Digitalization of Beijing-Zhangjiakou HSR Project [J]. China Railway, 2019(9): 22-28.

(编辑:刘会娟 张红英)