

引用格式: 陈丹, 刘喆, 刘建友, 等. 铁路盾构隧道智能建造技术现状与展望[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(6): 923.  
CHEN Dan, LIU Zhe, LIU Jianyou, et al. State-of-art and prospects for intelligent construction technology for railway shield tunneling[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(6): 923.

## 铁路盾构隧道智能建造技术现状与展望

陈丹<sup>1</sup>, 刘喆<sup>2</sup>, 刘建友<sup>1</sup>, 房倩<sup>3</sup>, 海路<sup>3</sup>

(1. 中铁工程设计咨询集团有限公司, 北京 100055; 2. 中国铁路经济规划研究院有限公司, 北京 100035;  
3. 北京交通大学, 北京 100044)

**摘要:** 我国铁路盾构隧道智能化理论方法还不成熟, 智能技术较落后, 大部分理论研究成果缺乏实用性; 盾构隧道各环节未建立起有效信息交换渠道, 没有形成盾构隧道全生命周期系统的完整体系。为了推动智能化建造在我国铁路盾构隧道中的发展应用, 通过对铁路盾构隧道智能化建造在地质勘察、设计、施工、运维全生命周期过程中的研究现状、存在问题进行总结分析, 提出建立完善的盾构隧道智能建造技术体系, 完善铁路盾构隧道智能建造理论创新, 启动铁路盾构隧道智能建造相关规程的编制, 完备标准体系, 是铁路盾构隧道智能化建造技术发展的方向。

**关键词:** 铁路盾构隧道; 智能建造; 全生命周期; BIM; 信息化

DOI: 10.3973/j.issn.2096-4498.2021.06.004

文章编号: 2096-4498(2021)06-0923-10

中图分类号: U 45

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## State-of-Art and Prospects for Intelligent Construction Technology for Railway Shield Tunneling

CHEN Dan<sup>1</sup>, LIU Zhe<sup>2</sup>, LIU Jianyou<sup>1</sup>, FANG Qian<sup>3</sup>, HAI Lu<sup>3</sup>

(1. China Railway Engineering Consulting Group Co., Ltd., Beijing 100055, China; 2. China Railway Economic and Planning Research Institute, Beijing 100035, China; 3. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Currently, intellectualized theory and methods of railway shield tunneling in China are not mature. Much of the existing research on shield tunneling intelligence has not been practical. There is not effective information exchange channel between tunneling nodes and an integral whole life cycle system for shield tunnel. To promote the application of intellectualized construction in railway shield tunnel in China, summary and analysis are conducted on intelligent shield tunneling construction through the life cycle of geological survey, design, construction, operation, and maintenance, and it is proposed that the development directions of intelligent railway shield tunneling construction technology are as follows: establishing an ideal technology system, improving theoretical innovations, promoting the compilation of relevant regulations, and setting standards.

**Keywords:** railway shield tunneling; intelligent construction; life cycle; building information modeling; informatization

### 0 引言

随着中国铁路的快速发展, 高铁、城际铁路进入市区范围越来越多。为了综合利用地下空间, 集约化利用土地, 倡导绿色环保理念, 需要修建越来越多的地下隧

道, 而盾构作为隧道施工最为先进的施工装备, 使隧道施工的机械化水平大幅提高。盾构工法具有施工进度快、作业安全、对地面环境影响小等优点, 越来越多地应用到铁路隧道施工中来。伴随着科技的发展, 机械化、

收稿日期: 2020-11-12; 修回日期: 2021-03-20

基金项目: 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划重大课题(2014G004-C, 2017G007-A, 2017G007-B)

第一作者简介: 陈丹(1978—), 女, 河南上蔡人, 2006年毕业于北京交通大学, 桥梁与隧道工程专业, 硕士, 高级工程师, 现从事地下工程设计与研究工作。E-mail: 42263182@qq.com。

信息化、智能化必然是未来铁路隧道发展的方向,中国铁路隧道工程将由高速发展向着高质量发展行进。

为了提高铁路盾构隧道在勘察、设计、施工、运维全生命周期过程中的智能化水平,在建造过程中充分利用BIM技术、可视化技术、数字孪生、人工智能技术、5G通信技术等先进技术与盾构相结合,可减少各阶段对人员的依赖,减少人身财产损失,降低盾构隧道自身施工风险以及对周边环境的影响的风险,使盾构隧道符合安全可靠、技术先进、绿色环保、经济合理等要求。

由于我国盾构工程起步较晚,相较于日本、欧美等发达国家,我国在铁路盾构隧道智能化建设方面刚刚开始,国内大量学者对盾构隧道智能建造各个环节开展了大量的研究。

闫强刚等<sup>[1]</sup>、黄勇<sup>[2]</sup>、刘勇飞<sup>[3]</sup>以实际隧道工程为例,研究了多种物探手段在勘察工作中的应用,并结合钻探验证及原位试验测试等手段相互验证。结果表明,综合物探及勘察技术不仅可以提高勘探的工作效率,也能保证勘探成果的准确性。

陈奇良<sup>[4]</sup>基于BIM技术,编写了通用管片创建程序及基于管片模型的隧道模型创建程序,通过在工程案例中的应用,验证程序编写的正确性与可行性,同时论证了BIM技术在工程中的延续性及其在工程中服务全生命周期的特点。

何然<sup>[5]</sup>选取盾构施工多种参数的历史数据样本,通过研究得出泥水盾构施工过程中多种关键掘进参数的关联性,并建立了包含预测与控制功能的泥水盾构参数智能系统。

张勇<sup>[6]</sup>通过工程实例,结合盾构掘进历史数据并结合大数据分析流程,对盾构掘进参数进行研究,设计盾构掘进参数辅助分析系统,确定了各个参数之间的关系、量化盾构掘进参数的控制。

杨斌<sup>[7]</sup>借助智能测控与计算机数据处理等信息化手段,在盾构管片原有加热方式基础上,实现了盾构管片生产过程中电加热蒸汽养护的智能化与程序化,对于提高盾构管片养护的精确性与科学性有很大的作用。

田管凤等<sup>[8]</sup>提出了通过大数据技术的应用,对盾构施工引起的地面沉降进行分析预测,并探索地层参数、掘进参数与地面沉降量的关系。

林盼达等<sup>[9]</sup>以模糊综合评级法为基础,同时考虑复杂环境下各因素之间的关联性,以及结构病害对结构造成的不可逆的影响,建立修正的模糊综合评价方法,实现盾构隧道结构状态的合理评价。

目前,我国铁路盾构隧道智能化建造尚在起步阶段,理论方法不成熟,智能技术较落后,智能化程度低、不成系统。本文通过对铁路盾构隧道智能化建设在勘察、设计、施工、运维全生命周期过程的研

究现状进行总结分析,提出铁路盾构隧道智能化建造的发展方向,旨在推动智能化建造在铁路盾构隧道中的应用。

## 1 铁路盾构隧道智能建造技术特点

### 1.1 铁路盾构隧道特点

随着我国铁路工程的大规模建设,在城市密集区修建盾构隧道的工程越来越多。相较于一般的城市轨道交通盾构隧道,铁路车辆运行时速快,站间距大。在综合考虑隧道内救援通道设置、接触网悬挂、空气动力学、轨下构筑物布置等情况下,铁路盾构隧道断面大、隧道长、耐久性要求高、运维工作量大。由于隧道断面大,对于活动断裂、软弱地层、岩溶等地层情况,隧道自身变形更难控制,下穿(或上跨)控制点的情况下,对周边环境的沉降控制更为不利。

### 1.2 隧道智能建造的概念

隧道智能建造是基于信息化技术,通过对“地-隧-机-信-人”及内外部环境的全面感知、泛在互联、融合处理、主动学习和科学决策,高效综合利用铁路隧道的移动、固定、空间、时间和人力资源,实现隧道建设、运维全生命周期的高度信息化、自动化、智能化,打造更安全可靠、经济高效的新一代隧道建造技术体系<sup>[10]</sup>。

### 1.3 铁路盾构隧道智能建造技术特点

传统的铁路隧道建造在勘察、设计、施工、运维等环节之间关联甚少,甚至是相互独立的,而盾构隧道智能建造的各个环节其实是相互作用、相互影响的。

1) 根据铁路隧道盾构法特点和智能建造的要求,地质勘察阶段要提供设计和施工阶段的详细地质资料,并为预测工程活动对周边环境的影响提供信息支撑。因铁路盾构隧道断面大,对地层变形控制更加困难,所以针对强透水松散砂层、软硬不均地层、含漂石(块石)或卵石(碎石)的地层、断层破碎带、岩溶地层等要尤其重视。

2) 基于BIM技术,可实现高精度、全信息的整体模型的设计,因此可为施工过程中智能放样、智能制造、智能拼装提供技术支持。盾构隧道智能建造设计宜采用BIM正向设计,BIM正向设计是项目从方案构思、初步设计、施工图全部过程均采用三维信息化模型模拟构建工程实体的设计过程,尽可能提高铁路盾构隧道的设计质量。

3) 盾构隧道智能建造施工应配置满足智能建造要求的盾构设备,并配备智能化建造软件和相关人员,根据智能建造实施方案和实施细则,从盾构管片的运输与吊装、掘进施工、智能拼装等方面完成隧道施工的智能建造。

4) 因为铁路盾构隧道里程长,运营维护工作量大,运维阶段应根据铁路盾构隧道的特点,充分利用智

能建造形成的三维可视化信息模型,根据施工过程中留存的围岩地质信息、周边环境信息、监测和检测信息,针对隧道缺陷段落,制定差异化的养护维护方案。

1.4 智能管理平台

随着大数据分析和人工智能技术逐渐发展成熟,信息化和智能化已成为盾构隧道建造发展的必然方向。盾构隧道智能建造涵盖各专业、全寿命周期的可视化智能管理平台可实现将地层信息、周边环境信息、加固措施信息、监控量测信息等进行数字化,同时录入管理平台。智能管理平台(见图1)的建立,实现了隧道勘察、设计、施工、运维环节远程统一在线实时监控和管理。通过各种功能的组合形成一套智能、高效的铁路盾构隧道工程智能管控系统,通过这一系列举措能够降低铁路盾构隧道自身施工风险以及对周边环境影响的

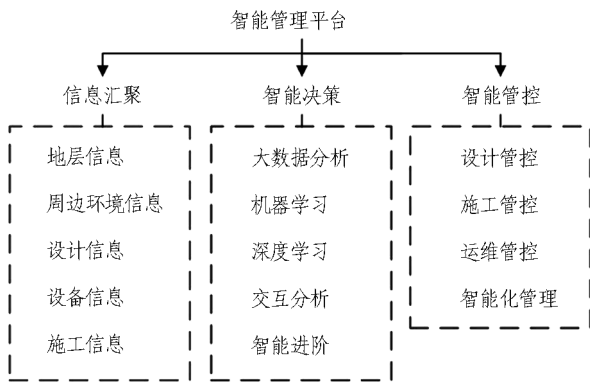


图1 智能管理平台

Fig. 1 Intelligent management platform

2 智能建造关键技术

2.1 地质勘察

隧道建设,地勘先行。勘察阶段对于隧道工程有着至关重要的作用,当前地质勘察多依赖人工,可靠性差、效率低、周期长。

盾构隧道智能建造的工程地质勘察是结合场地、周边环境、工程特点及智能建造方案制定勘察方案和实施细则,建立全面反映场地工程地质和岩土工程相关信息的勘察模型。盾构隧道智能建造的勘察成果为智能建造提供基础数据,并形成三维可视化的信息模型,满足各阶段设计、施工及建管的要求。勘察设备一般可采用无人机航拍设备、智能钻探设备、智能原位测试设备、智能视频监控设备等,形成空天地一体化的测绘多技术融合勘测方案。勘察手段可采用综合地质勘察方法,查明工程地质与水文地质条件,进行综合工程地质分析,提供设计施工所需的地质参数和工程措施建议。综合勘探技术如表1所示。

综上所述,在既有地质资料的基础上,采用遥感技术指导大面积地质调绘,进而开展物探工作,最后进行钻探及综合测试、试验工作,每一环节勘察成果为下一环节提供了基础,而且各环节之间还可相互对各自的结果数据进行验证。以上方法结合智能设备即可提供完整合理的地质勘察信息,又可减少人员介入,同时智能设备高强的存储、计算、数据传输能力大大提高了工作效率。

表1 综合勘探技术

Table 1 Integrated exploration technology

| 流程     | 技术名称                    | 作业内容  |
|--------|-------------------------|---|
| 遥感测绘   | 遥感技术                    | 遥感技术是将作业区调研的地质地形信息反馈到可视系统中,从而对数据信息进行客观性分析 <sup>[11]</sup>   |
| 工程地质调绘 |                         | 基于遥感技术所获得的地质信息,可对隧道进行大面积地质调绘工作,主要调绘内容应包括地层岩性、地形地貌、工程地质、地下水、特殊性岩土、隧道施工影响范围内地表建(构)筑分布及使用情况等信息 <sup>[12]</sup> |
| 综合物探   | 地震折射波法 <sup>[13]</sup>  | 在详勘阶段可对初勘成果异常地段采用钻探进行进一步验证,并充分利用钻探成果,获取岩土体其他信息,为隧道后期隧道结构设计提供参数  |
|        | 地震反射波法                  |   |
|        | 直流电测深法                  |   |
|        | 联合剖面法                   |   |
|        | 高密度电法 <sup>[13]</sup>   |   |
| 综合钻孔探测 | 大地电磁测深法 <sup>[14]</sup> | 在隧道地质测绘与物探结果的基础上对重点区域进行钻探,可选取隧道进出口、构造带、岩层破碎区、富水区域、物探结果异常区域、重要岩性接触区域等重点区域进行钻孔布置                              |
|        | 钻孔摄像技术                  |   |
|        | 钻孔雷达技术                  |   |
|        | 钻孔声呐技术                  |   |
| 测试及试验  | 孔内声波测试                  | 取得钻探结果后,应进行岩土体测试以及试验,把野外勘察和土工试验相结合,得到更为准确有效的地质勘察信息 <sup>[15]</sup>  |
|        | 地应力测试                   |   |
|        | 钻孔水位恢复试验                |   |
|        | 抽注水试验                   |   |
|        | 室内岩土试验                  |   |



在实际工程中,仅靠勘察阶段所得的地质资料不足以保障盾构正常顺利掘进。盾构施工过程中的超前地质预报工作也同样重要,尤其是铁路盾构隧道断面大,为特殊地层预报和工程施工提出预防措施,能使工程施工过程中的安全性大大提高。超前地质预报工作方法应用较多的有地质调查法、TSP 法、超前水平钻探法、地质雷达、物探法(弹性波反射法、电磁波反射法、红外探测)。隧道施工可采用综合超前地质预报,将多种预报手段相结合、定性与定量相结合、多频次相互印证,以提高勘察预报的可靠度。综合超前地质预报流程见图 2。

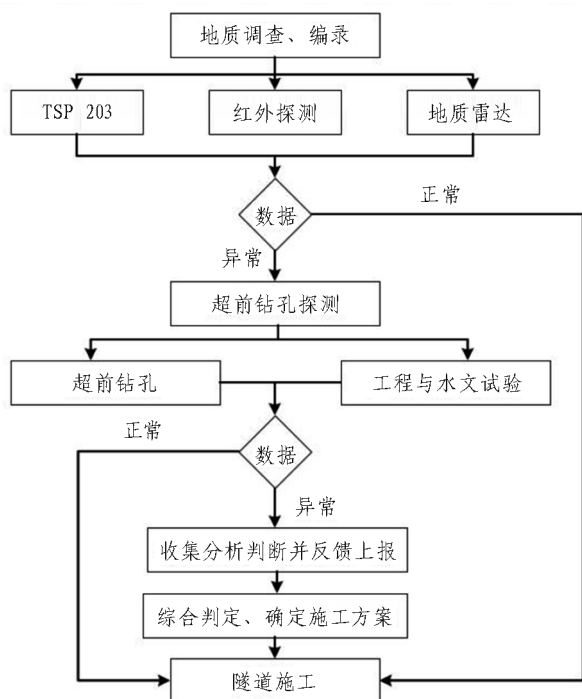


图 2 综合超前地质预报工作一般流程

Fig. 2 General process of comprehensive advanced geological prediction

## 2.2 建造设计

铁路盾构隧道作为重要的交通通道,由于复杂的地质地形条件以及工程规模巨大,导致其设计相对复杂,利用 BIM 技术以及其他智能技术或软件,可极大地降低设计难度、减少工作时间、提高工作效率。目前,盾构隧道的主体及附属结构设计均可采用基于 BIM 技术的隧道智能仿真设计技术,建立包含地质地形信息、结构信息、施工方案、施工机械、风险预警方案的 3D 可视化模型。BIM 技术的快速发展与广泛应用大大提升了隧道工程的设计效率和质量水平,基于 BIM 技术的隧道智能仿真设计正在逐步取代传统的设计方式。

### 2.2.1 基于 BIM 的隧道智能仿真设计流程

基于基础设计资料、规范要求及使用需求等,通

过知识库以及数据库的支持,智能仿真设计技术可以提供适合特定环境条件的基本方案和设计成果。智能仿真设计平台应包括 BIM 隧道智能设计、协同设计平台、仿真计算分析、全生命周期需求检验和 BIM 设计成果交付等内容。初步设定智能仿真设计流程如图 3 所示。BIM 模型就是信息的载体,智能仿真设计流程就是基于 BIM 技术融合其他智能技术的设计流程。

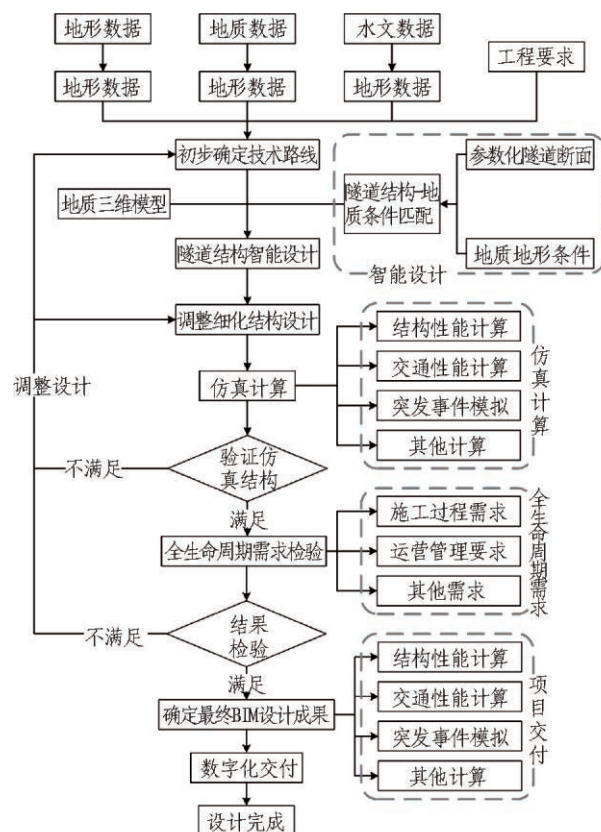


图 3 智能仿真设计流程

Fig. 3 Design process of intelligent simulation

### 2.2.2 基于 BIM 的隧道智能仿真设计内容

1) 智能设计基础资料准备。盾构隧道 BIM 设计的基础资料应包括三维地形信息、三维地质信息模型、水文地质信息、相关规范要求、业主使用需求等。

2) 铁路盾构隧道 BIM 设计路线初步确定。在既有设计资料基础上,初步确定路线走向,并进行路线的平、纵断面设计。

3) 隧道结构智能设计。对隧道 BIM 设计模型进行分类,根据不同参数,形成隧道结构模板;将每一类模板与相适应的地形地质条件进行匹配,形成结构-地质条件匹配数据库<sup>[16]</sup>;将实际工程的地质地形条件与数据库进行匹配,确定相应的隧道结构模板;最后结合路线数据,建立隧道 BIM 三维结构模型,完成盾构隧道结构智能设计。

4) 优化隧道结构设计。针对某些设计细节或特

殊区域,需要设计人员进行隧道结构设计的调整、细化,使隧道整体结构达到设计要求。

5)盾构隧道仿真计算。完成盾构隧道结构设计后,对BIM模型进行仿真模拟,部分需要通过数字孪生等技术实现。仿真计算内容包括结构力学计算、注浆计算、抗渗性能、地面沉降、突发事件仿真模拟等。若不满足要求,则需重新进行设计。

6)盾构隧道全生命周期需求检验。需要从盾构管片制作、施工过程、运维管理等角度对设计进行动态和静态检验。

7)数字化交付。在完成盾构隧道设计仿真计算验证和全生命周期需求检验后,可以确定最终的隧道BIM设计方案,将成果上传至云平台,实现设计成果的数字化交付,最终实现盾构隧道工程全生命周期数字化控制。参建各方可以通过BIM云平台远程使用BIM成果。

### 2.3 隧道施工

盾构隧道施工过程中会产生大量的数据资料,比如水文地质数据、结构信息数据、监测数据、施工进度数据等,这些数据如果没有得到科学、合理的使用,就

会成为无用数据,无法对盾构隧道施工过程起到指导作用。为解决盾构隧道施工中信息杂乱、集成化不足、信息传递差等问题,可基于BIM技术建立隧道地质、土建结构、机电设备全BIM模型解决这一问题<sup>[16]</sup>。可以以BIM模型为载体,将盾构隧道建设全过程的各类信息数据进行存储、关联,形成数据库,进而形成智能管理信息平台(见图4)。平台包括施工进度管理、掘进参数管理、监测信息管理、预测预警管理、风险管理等功能。

平台可实现将水文地质信息、周边环境信息、防护加固措施信息、监控量测信息等进行数字化处理,并纳入可视化智能管理平台,同时可实现远程数据上传、远程浏览查看、远程控制,这样各参建单位在可视化平台上可实现远程虚拟办公,大大提升了盾构隧道掘进的施工效率,同时也提高了智能化管理水平<sup>[17]</sup>。

盾构隧道施工涉及多个环节的相互作用,目前随着科技的发展,人工智能技术与大数据分析技术在管片预制与运输、盾构掘进、管片安装、监控量测、风险管理等领域发挥了巨大的作用,极大减少了人工操作的工作量,减小了施工误差,提高了工程建设质量。

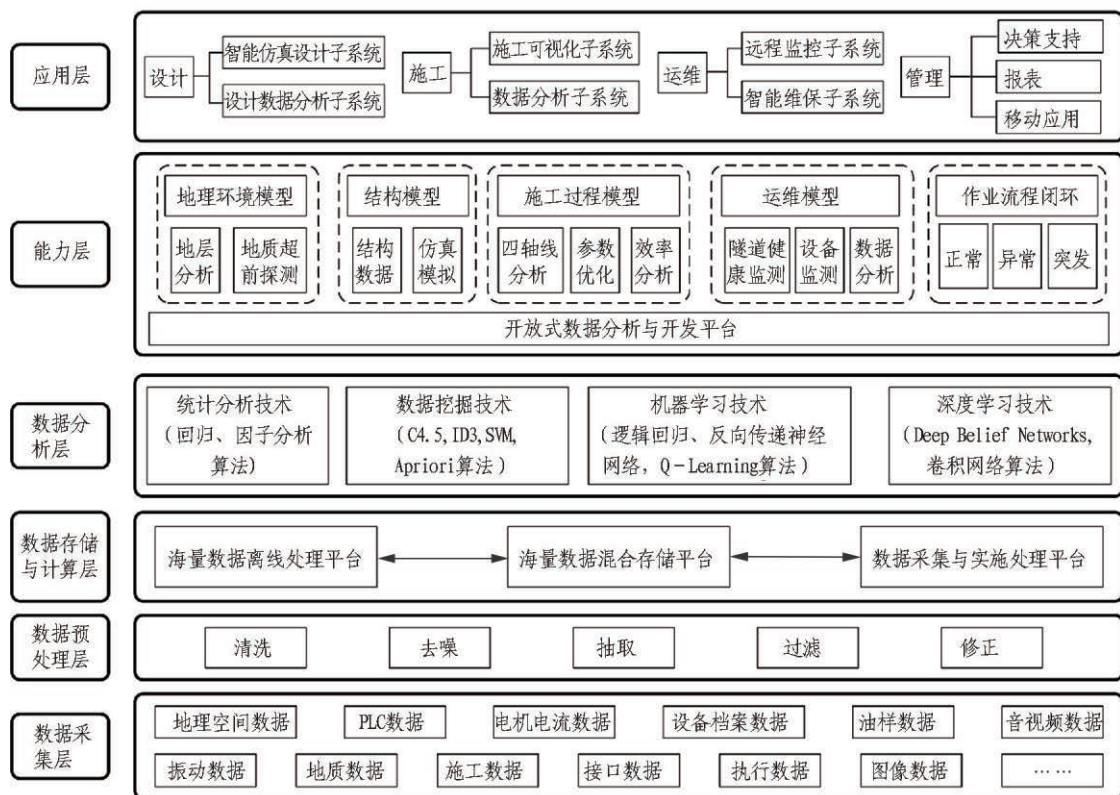


图4 信息平台

Fig. 4 Information platform

#### 2.3.1 盾构掘进

随着城市化的进展,地下空间被大量开发利用,铁路盾构隧道不可避免地受到障碍物、布局条件、地质因

素、周边建(构)筑物等的限制,隧道设计线形多为复杂的组合曲线,这对盾构的掘进施工、姿态控制提出了较高的要求。

随着科技的发展进步,盾构的掘进系统采用智能化控制,根据试掘进段施工参数的总结分析,确定了后续施工的掘进参数。基于前期调查资料、盾构始发等准备工作,根据施工测量和监测系统的反馈数据随时调整掘进参数,控制盾构的掘进姿态,以控制隧道和地层变形。随着智能化控制系统的不断优化发展,大量智能算法被用于优化、调整盾构的施工进程参数,盾构隧道的施工方案更加经济、高效、合理。

基于智能方法提出的盾构姿态预测与调整智能决

策系统,解决了人为调整精准度低、调整不及时的问题<sup>[18]</sup>。盾构智能姿态调整系统见图5,此系统是利用原有大量的施工数据,通过机器学习技术,建立智能决策系统。智能化一体注浆设备实现了对浆液的输送和存储、注浆泵的控制以及注浆过程的监控与记录,提高了注浆工作的效率与注浆质量。盾构的换刀作业流程复杂、周期长、作业环境恶劣,操作人员自身安全风险极大。换刀机器人的出现解决了以上问题,并且机器人换刀有着更高的操作精准度。

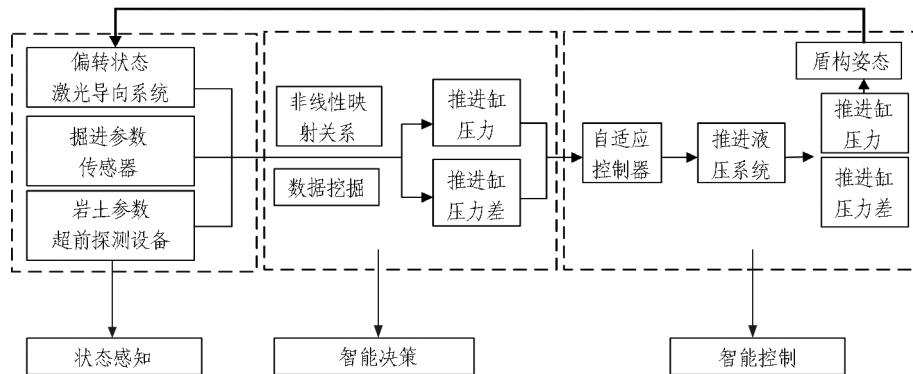


图5 盾构智能姿态调整系统

Fig. 5 Intelligent attitude adjustment system for shield

### 2.3.2 管片预制、抓取与拼装

管片的预制、运输、拼装可通过机械化手段配合人工智能完成。管片全寿命周期信息管理系统实现了管片的动态管理,针对预制管片从生产出厂、装卸转运、现场装配、后期维护监测等全过程进行跟踪式管理。

目前,盾构管片均采用工厂预制的方式,混凝土养护可通过智能监测技术对温度、湿度等要素进行控制。基于西门子 S7-200 smart PLC 和 Wincc 组态软件<sup>[19]</sup>建立的混凝土管片蒸养工序的智能控制系统如图6所示,实现了混凝土养护全程监控<sup>[20]</sup>。

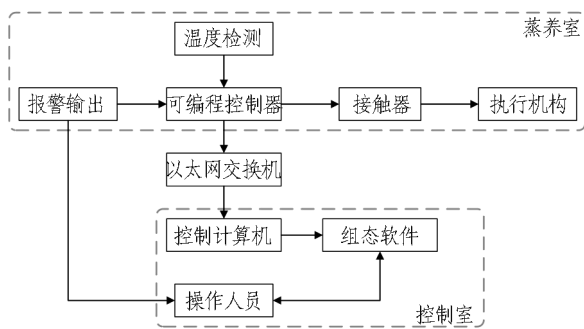


图6 养护智能控制系统

Fig. 6 Intelligent control system for maintenance

随着科技的进步发展,以及机械化的不断推进、人工智能的快速发展,实现管片自动拼装、减少人工操作是必然趋势。目前,在日本、欧洲等地基本上实

现了盾构管片的全自动拼装。德国 WIRTH 和海瑞克公司开发的真空吸盘式管片拼装机抓取装置提高了盾构管片的拼装效率和自动化水平,降低了工作人员的工作强度<sup>[21]</sup>。国内学者也提出了基于管片拼装机智能化抓取及拼装的算法<sup>[22]</sup>,并通过数值仿真验证了其准确性。管片拼装机智能化抓取及拼装算法如图7所示。

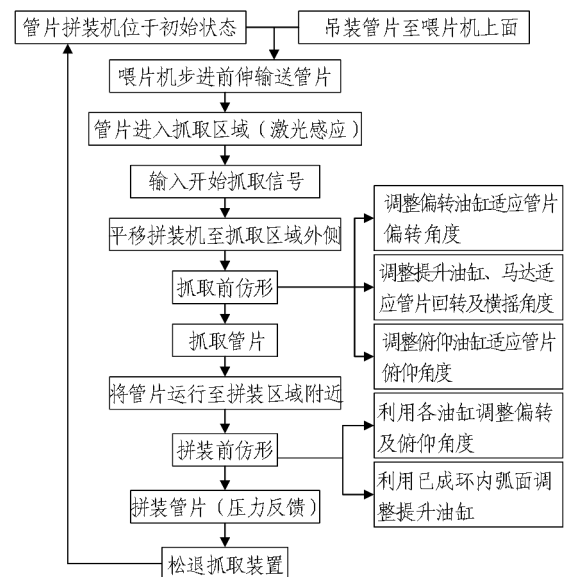


图7 管片拼装机智能化抓取及拼装算法

Fig. 7 Intelligent grabbing and assembling algorithm for segment erector



2.3.3 监控量测

监测数据的实时反馈是保证施工正常进行的基础,随着人工智能技术的快速发展,可以将盾构隧道施工过程中传统的监控量测技术与人工智能技术相结合,实现地面建(构)筑物、隧道围岩及结构等的自动化监测与智能化监测<sup>[23]</sup>。智能化监测作为目前监控量测最先进的手段,实现了监控量测数据采集实时化、处理自动化、分析智能化、输出标准化,并可通过将海量监测数据建立数据库上传至云平台的方式,供参建各方实时查询数据。

2.3.3.1 智能监测系统的功能

智能监测系统具有监测数据自动采集、分析及评价、预报警、查询管理、制作报表等功能以及监测设备管理功能、监测画面组态编辑功能。

2.3.3.2 智能监测系统原则

1)监测频率应根据施工进度、地质条件、监测对象的变形量和变形速率确定,监测频率应使监测信息及时、系统地反映施工工况及监测对象的动态变化。

2)对穿越重要建(构)筑物、铁路、桥梁、城市轨道交通、江河、重要管线等周边环境风险等级较高的工程,提高监测频率,并宜对关键监测项目进行实时监测。

3)监测数据达到或超过预警值时(或时态曲线出现异常),应立即采取相应措施。

2.3.3.3 智能监测系统的监测内容

盾构法隧道应结合工程、水文地质、环境条件、施工方法与进度计划等制定详细的监控量测实施方案。监测项目内容主要是隧道结构和周边环境,包括盾构隧道衬砌环的变形量测、地表沉降量测、临近建(构)筑物变形量测和地下管线变形量测等内容。

2.3.4 风险管理

盾构法隧道风险可分为地质风险、技术风险、自然风险和社会稳定风险,各阶段风险识别可采用核对表法、专家调查法、头脑风暴法和层次分析法等方法。

施工过程的风险管理过程包括风险因素识别、分级、动态分析、风险控制等。

2.3.4.1 风险源

在隧道施工过程中,风险的发生大部分归因于工程自身的复杂性、施工条件恶劣、人为因素、应急预案不合理、施工安全管理不到位等因素。盾构隧道施工风险源如表2所示。

2.3.4.2 风险评估方法

盾构隧道掘进施工过程中应对施工范围内的风险进行评估,包括辨识施工过程中的潜在风险因素、事故发生原因和机制等。现阶段应用较为广泛的风险评估方法如表3所示。

表2 盾构隧道施工风险源  
Table 2 Risk sources of shield tunneling

| 分类         | 风险源          |
|------------|--------------|
| 工程的复杂性     | 地形复杂性        |
|            | 地质复杂性        |
|            | 地表建(构)筑物复杂性  |
|            | 施工机械复杂性      |
|            | 施工方案复杂性      |
| 施工条件恶劣     | 施工环境恶劣       |
|            | 人员流动性大       |
|            | 车辆机械流动性大     |
| 人为因素       | 人员专业度差       |
|            | 施工操作不认真      |
|            | 施工操作不规范      |
| 应急预案不合理    | 未考虑某些风险源     |
|            | 应急物资准备不充分    |
|            | 人员调动失误       |
|            | 未开展充足的安全应急演练 |
| 施工安全管理力度不够 | 人员安全意识淡薄     |
|            | 安全教育工作不到位    |

表3 风险评估方法  
Table 3 Risk assessment methods

| 分类      | 名称              |
|---------|-----------------|
| 定性分析方法  | 专家评议法           |
|         | 专家调查法           |
|         | “如果…怎么办”法       |
|         | 失效模式和后果分析法      |
| 半定量分析方法 | 事件树法            |
|         | 影响图方法           |
|         | 原因-结果分析法        |
|         | 风险评价矩阵法         |
|         | 模糊综合评判法         |
|         | 层次分析法           |
|         | 蒙特卡罗模拟法         |
| 定量分析法   | 等风险图法           |
|         | 控制区间记忆模型        |
|         | 神经网络方法          |
|         | 主成分分析法          |
|         | 专家信心指数法         |
| 综合分析法   | 模糊层次综合评估方法      |
|         | 模糊事故树分析法        |
|         | 事故树与模糊综合评判组合分析法 |

基于人工智能技术以及大数据分析的智能风险评估方法使得上述风险评估方法实现了数字化与信息化,评估效率与评估结果精确度均大大提高。结合前期工作基础,利用人工智能以及大数据分析,分析关键风险源,提出风险动态分级评估方法,制定盾构隧道安全隐患排查清单并针对风险因素进行分级<sup>[24]</sup>。

#### 2.3.4.3 风险预测与控制

铁路盾构法隧道断面大、隧道长,施工中对地表变形(隆起、沉降)、周边建(构)筑物变形、管片结构损伤的预测与控制,是保证隧道正常施工、运营维护施工中周围环境土工安全的基础。人工智能技术与大数据分析等方法提高了盾构风险预测精度与准确度,智能风险预测方法包括人工神经网络、模糊控制理论、逻辑风险评估方法、改进克隆选择算法<sup>[25]</sup>、结构物风险评估理论<sup>[26]</sup>等。基于智能预测方法给出的结果,根据规范或既有工程经验,对风险控制方法进行合理选择。

#### 2.4 运营维护

铁路盾构隧道运营期一般长达50~100年,铁路盾构隧道的运营维护包括对隧道的翻新改造、加固维修、设备监控、备件管理等。

盾构隧道智能建造过程中的大量数据、模型、信息化管理软件等智能化成果应交付给运营维护单位,运营维护单位充分利用智能建造形成三维可视化信息模型,根据施工过程留存的围岩地质信息、周边环境信息、监测和检测信息等,针对隧道缺陷段落,制定差异化的养护和维护方案。

运维技术的提升需要大量盾构隧道病害、破坏等数据的积累,因此,运营维护方案及实施情况的相关资料应同步至可视化智能管理平台,实现信息共享。

### 3 存在问题及发展方向

#### 3.1 存在问题

随着我国铁路盾构隧道的建设,盾构隧道建设理念、勘察设计技术、施工设备及施工管理水平有了长足的进步,盾构隧道智能建造代表了未来隧道修建技术的发展方向,但是目前我国铁路盾构隧道智能化建造尚处于初步发展阶段,主要存在问题如下。

1) 人员依赖度高、理论方法不成熟、智能技术较为落后、智能化普及度低、智能化建造不成系统等,国内学者开展了大量盾构隧道智能化的研究,但大部分研究成果缺乏实用性。

2) 盾构隧道的勘察、设计、施工、运营维护等环节之间没有建立起一种便利的、有效的信息交换渠道,隧道全寿命周期系统没有形成完整的体系,导致大量工程数据无法得到正确合理的应用。

3) 勘察专业存在外业勘察数据库设计没有从整

个勘察项目管理高度来设计的问题,造成各个勘察环节的系统数据不能完全共享,降低了各系统的使用效率,造成数据资源浪费,未实现内外业一体化。

4) BIM技术在盾构隧道建设领域得到了充分的发展与应用,当前BIM技术发展遇到新瓶颈,主要表现为:虽然BIM具有完善的内部信息、精密的构件关系、注重细节技术,但缺乏大场景展示及地理空间分析等宏观功能,基于隧道模型的大数据开发应用不够。

5) 在管片运输、吊装、拼装、施工环节中换刀以及工程管理等过程需要大量工作人员参与,缺乏科学的施工管理以及可靠的监测手段,导致施工监测资料大量缺失,无法真正做到信息化施工,大数据理论没有可靠的数据基础。

6) 对于运营维护阶段盾构隧道结构的安全性评价,目前大多数的研究只针对管片脱落、裂缝、渗漏水、管片错台等进行单因素分析,未进行多因素分析。运维技术的提升需要大量隧道病害等资料的数据积累,但铁路盾构隧道资料繁杂,信息化、集成化不足,信息传递差,无法实现资源共享,影响运维管理。

#### 3.2 发展方向

基于既有铁路盾构隧道修建技术的基础上,实现隧道全生命周期信息化、自动化、智能管理是未来的发展趋势。随着通信技术、大数据及人工智能技术等的发展和完善,完全可以实现上述目标,而且还会向着高可靠性,适应复杂环境及多功能方向发展。

1) 地质勘察方面,针对实际问题具体分析,综合研究各种技术手段的优劣,力求以最少的工作量布置及最优的技术组合,取得最好的勘察效果。随着智能信息化发展,勘察四维时空信息可视化技术、云GIS技术、大数据智能感知挖掘技术、人工智能+视觉识别技术、互联网+虚拟现实技术等新技术的发展,工程勘察设备及作业管理信息化系统逐渐向一体化、智能化升级,内外业一体化智能化设备、内外业一体化智能作业系统是未来发展方向。

2) 盾构隧道设计建模流程可通过可视化编程软件提高建模效率和精度,实现成果的可复制性;CLOUD-BIM架构对于施工工点分散、技术环节复杂、涉及更多访问用户的大规模的铁路盾构隧道BIM模型,具有更好的适应性。BIM技术实施的最大收益在运维阶段,设计和建设阶段产生的大量数据信息在后期漫长的铁路盾构隧道运维阶段凸显价值,因此,基于盾构隧道模型的BIM大数据开发应用,是未来铁路盾构隧道设计的发展方向。

3) 人工智能技术的应用在管片养护、风险预测等环节中,能使结果更加精确,效率更高,也将在未来的



隧道建设中发挥重要作用。盾构隧道的施工过程更加趋向于智能化、无人化发展,盾构自身的高性能、高可靠性和高适应性仍然是盾构技术发展的主要方向,BIM+GIS 三维可视化技术、盾构姿态自动控制、机器人自动换刀、管片自动精准拼装将是未来盾构施工的主流方向。

4)铁路盾构隧道的运营里程长,运维工作量大,构建基于结构性能与成本的预测型运维体系,发展一体化运维技术、快速维修加固技术、开发智能运维管理系统是未来的发展方向。

5)在隧道全生命周期中,可以依赖 BIM 技术的发展,建立智能管理平台,让 BIM 技术发挥更大的作用。该平台应包括隧道地质环境信息存储、高精度隧道结构设计、施工进度管理、掘进参数管理、运营维护、结构检测管理、监测信息管理、预测预警管理、风险管理等,同时还可以实现将各个环节的数据、信息完整地收集起来,并运用大数据技术、应用软件等进行筛选、处理、整合、利用,实现勘察、设计、施工、运维等各环节之间的良好衔接。

目前急需利用先进的信息技术及工业装备制造资源,建立完善的盾构隧道智能建造技术体系,完善铁路盾构隧道智能建造理论创新,启动铁路盾构智能建造相关规程的编制,完备标准体系是目前的核心难题,也是我国铁路盾构隧道智能建造研究领域发展的趋势。

#### 4 结论与建议

科技的不断发展促进了铁路盾构建造智能化施工水平的提高,越来越多的智能技术与方法被应用到铁路盾构隧道的勘察、设计、施工、运维等阶段,智能建造极大地缩减了人工使用,大大提高了施工效率与工程建造质量,并且建造技术的创新又能助力于行业的发展。

我国是世界上隧道数量最多、建设规模最大、发展速度最快的隧道大国,利用智能建造技术促进铁路盾构隧道工程项目的一体化管理,提升铁路隧道工程品质是一项重要的工作。但是,目前我国铁路盾构隧道智能建造技术发展还不成熟,在很多方面不具有系统性与实用性,立足国情,构建适合我国国情的铁路盾构隧道智能建造技术体系及功能架构,在智能化建造方面还需要不断积累和提高。

#### 参考文献(References):

[1] 闫强刚,何寿迎,何松. 综合物探技术在城市山岭隧道勘察中的应用研究[J]. 城市勘测, 2019(6): 204.  
YAN Qianggang, HE Shouying, HE Song. Application of comprehensive survey in blue-silicon valley tunnel of

Qingdao intercity railway [J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2019(6): 204.  
[2] 黄勇. 综合勘察技术在木寨岭特长隧道中的应用[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2009, 28(6): 1011.  
HUANG Yong. Application of comprehensive investigation in Muzhailing super long tunnel [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2009, 28(6): 1011.  
[3] 刘勇飞. 综合勘察技术在岩土工程勘察中的应用[J]. 河南科技, 2018(16): 98.  
LIU Yongfei. Application of comprehensive survey technology in geotechnical investigation [J]. Journal of Henan Science and Technology, 2018(16): 98.  
[4] 陈奇良. 基于 BIM 的地铁盾构隧道管片参数化设计技术研究[D]. 广州: 广州大学, 2019.  
CHEN Qiliang. Research on parametric design technology of metro shield tunnel segments based on BIM [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2019.  
[5] 何然. 基于 Elman-PSO 耦合智能算法的泥水盾构参数预测控制[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.  
HE Ran. Elman-PSO based predictive control model for slurry shield tunneling in metro construction [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.  
[6] 张勇. 基于大数据的盾构机掘进参数研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2019.  
ZHANG Yong. Study on tunneling parameters of shield based on big data [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2019.  
[7] 杨斌. 地铁盾构混凝土预制管片智能蒸养控制系统的研究与应用[J]. 建材与装饰, 2020(18): 266.  
YANG Bin. Research and application of intelligent steam-curing control system for precast concrete segment of metro shield tunnel [J]. Construction Materials & Decoration, 2020(18): 266.  
[8] 田管风, 马宏伟, 吴起星, 等. 盾构施工地面沉降预测的大数据技术应用研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(1): 146.  
TIAN Guanfeng, MA Hongwei, WU Qixing, et al. Application of big data technology in ground settlement forecast in shield construction [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(1): 146.  
[9] 林盼达, 张冬梅, 闫静雅. 运营盾构隧道结构安全评估方法研究[J]. 隧道建设, 2015, 35(增刊2): 43.  
LIN Panda, ZHANG Dongmei, YAN Jingya. Study on assessment method for structural safety of operating shield-bored tunnels [J]. Tunnel Construction, 2015, 35(S2): 43.  
[10] 王同军. 我国铁路隧道建造方法沿革及智能建造技术

- 体系与展望[J]. 中国铁路, 2020(3): 1.
- WANG Tongjun. Railway tunnel construction methods evolution in China and intelligent construction technology system and prospects [J]. Chinese Railways, 2020(3): 1.
- [11] 张昭雷. 隧道工程地质勘察相关阶段的技术要点关键分析[J]. 中国标准化, 2019(24): 134.
- ZHANG Zhaolei. Key analysis of key technical points in relevant stages of tunnel engineering geological investigation [J]. China Standardization, 2019(24): 134.
- [12] 王旭. 盾构法施工隧道岩土工程勘察要点[J]. 辽宁省交通高等专科学校学报, 2015(4): 17.
- WANG Xu. Discussion on the geotechnical investigations main points for shield machine boring tunnel [J]. Journal of Liaoning Provincial College of Communications, 2015(4): 17.
- [13] 徐书兵, 张晓培, 蔡伟嘉. 地震折射层析和高密度电法在隧道勘察中的应用[J]. 路基工程, 2019(1): 163.
- XU Shubing, ZHANG Xiaopei, CAI Weijia. Application of seismic refraction tomography and high density resistivity method in tunnel exploration [J]. Subgrade Engineering, 2019(1): 163.
- [14] 曾东东. 音频大地电磁法在川藏铁路折多山隧道某斜井勘察中的应用[J]. 中国设备工程, 2020(17): 238.
- ZENG Dongdong. Application of audio frequency magnetotelluric method in the investigation of a inclined shaft in Zheduoshan tunnel of Sichuan-Tibet railway [J]. China Plant Engineering, 2020(17): 238.
- [15] 刘春晓. 岩土工程勘察土工试验及其有效处理分析[J]. 智能城市, 2017(1): 102.
- LIU Chunxiao. Geotechnical test and effective treatment analysis of geotechnical engineering investigation [J]. Intelligent City, 2017(1): 102.
- [16] 丁浩, 廖峻. 基于 BIM 技术的隧道工程信息平台设计与研究[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(增刊2): 60.
- DING Hao, LIAO Jun. Design and research of tunnel engineering information platform based on BIM technology [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(S2): 60.
- [17] 孙振川, 钱彤途, 任颖莹, 等. 隧道掘进机工程大数据管理平台关键技术及应用研究[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(6): 783.
- SUN Zhenchuan, QIAN Tongtu, REN Yingying, et al. Study on key technologies and application of engineering big data management platform of tunnel boring machine [J]. Tunnel Construction, 2020, 40(6): 783.
- [18] 刘建. 泥水盾构高精度智能姿态调整技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- LIU Jian. Research on high-accuracy automatic attitude control of slurry pressure balance shield [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [19] 何益, 胡姗姗, 刘增强. 基于 PLC 和 WinCC 的化工精馏塔控制系统设计[J]. 化工自动化及仪表, 2011, 38(6): 710.
- HE Yi, HU Shanshan, LIU Zengqiang. Control system design for chemical rectification column based on PLC and WinCC [J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2011, 38(6): 710.
- [20] 姜永涛, 郝永旺, 曹玉新, 等. 基于地铁盾构管片生产蒸养工序的智能控制系统设计[J]. 电子世界, 2017(23): 140.
- JIANG Yongtao, HAO Yongwang, CAO Yuxin, et al. Design of intelligent control system based on steam curing process of metro shield segment production [J]. Electronics World, 2017(23): 140.
- [21] 张碧, 赵海峰, 杨涛, 等. 盾构管片拼装机国内外研究现状[J]. 矿山机械, 2014(4): 1.
- ZHANG Bi, ZHAO Haifeng, YANG Tao, et al. Research status of segment erector in shield tunneling machine at home and abroad [J]. Mining & Processing Equipment, 2014(4): 1.
- [22] 刘飞香. 管片拼装机抓取和拼装智能化研究[J]. 铁道建筑, 2020, 60(8): 58.
- LIU Feixiang. Study on intelligent grab and assemble of tunnel segment erecting robot [J]. Railway Engineering, 2020, 60(8): 58.
- [23] 黄富禹, 刘春. 基于物联网技术的隧道自动化变形监测系统设计与研究[J]. 科学技术创新, 2020(26): 118.
- HUANG Fuyu, LIU Chun. Design of tunnel automatic deformation monitoring system based on internet of things technology [J]. Scientific and Technological Innovation, 2020(26): 118.
- [24] 桑运龙. 隧道施工安全风险动态评估与隐患排查及数字化技术应用[J]. 施工技术, 2019, 48(24): 64.
- SANG Yunlong. Dynamic assessment of safety risks and rapid hidden dangers investigation of tunnel construction and application of digital technology [J]. Construction Technology, 2019, 48(24): 64.
- [25] 滕丽. 智能风险管理系统在盾构法隧道工程中的应用[J]. 建筑施工, 2011, 33(8): 742.
- TENG Li. Application of smart risk management system to shield method for tunnel engineering [J]. Building Construction, 2011, 33(8): 742.
- [26] 梅源, 李雅丽, 张亮, 等. 结构物损伤预测模型及其在隧道施工中的应用[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(1): 31.
- MEI Yuan, LI Yali, ZHANG Liang, et al. Model for structural damage prediction and its application to the underground tunnel construction [J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(1): 31.