

DOI: 10.7672/sgjs2023170001

盾构智能建造新技术与展望*

王俊英¹, 陈 馈^{2,3}, 张 兵¹

(1. 中铁(广州)投资发展有限公司, 广东 广州 510000; 2. 中铁隧道局集团有限公司, 广东 广州 511458;
3. 陕西铁路工程职业技术学院, 陕西 渭南 714000)

[摘要] 从盾构施工技术目前存在的问题和智能盾构研究进展出发,重点阐述盾构智能化技术的研究现状,剖析盾构智能化关键技术存在的问题,指明盾构智能化发展亟需突破的技术瓶颈,并为盾构智能化技术发展指明方向。基于智能化设计、施工智能化感知、施工过程科学决策、自动化执行和智能运维平台等方面,分析国内外智能化的研究现状。最后,从全面感知、平台整合和智能决策等角度展望智慧施工技术,指明盾构智能建造技术的发展方向,为开展盾构智能化技术研究提供依据。

[关键词] 隧道;盾构;智能化;大数据;运维;施工技术

[中图分类号] U455

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2023)17-0001-06

New Technologies and Prospects for Shield Intelligent Construction

WANG Junying¹, CHEN Kui^{2,3}, ZHANG Bing¹

(1. China Railway (Guangzhou) Investment and Development Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000, China;
2. China Railway Tunnel Group Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 511458, China;
3. Shaanxi Railway Institute, Weinan, Shaanxi 714000, China)

Abstract: Starting from aspects of shield construction technology issues and research progress on intelligent shield tunneling, this article focuses on the current status of research on intelligent shield tunneling technology, analyzes the problems of intelligent shield tunneling, points out the technical bottlenecks that need to be overcome in the development of intelligent shield tunneling, and points out the direction for future intelligent shield tunneling technology development. Based on intelligent design, intelligent perception of construction, scientific decision-making of construction process, automatic execution and artificial intelligence for IT operations platform, the research status of intelligent technology at home and abroad is analyzed. Finally, from multiple perspectives such as comprehensive perception, platform integration, intelligent decision-making, looking forward to intelligent construction technology, indicating the development direction of new technologies for intelligent shield tunneling construction, and providing a basis for subsequent research on intelligent shield tunneling technology.

Keywords: tunnels; shield; intelligent; big data; operation and maintenance; construction

1 智能化技术研究现状

1.1 盾构施工技术存在的问题

虽然盾构自动化施工技术水平不断提高,但在盾构掘进信息化、智能化方面缺乏深入研究与工程实践,盾构掘进过程中,地质与设备状态信息获取滞后,缺少有效的数据挖掘方法,且决策控制依赖

人为经验,存在盾构掘进与地层条件不适应、掘进效率低、人工劳动强度大、施工作业调度不及时、施工安全事故时有发生等问题。

1) 盾构掘进地质与设备信息感知不足 智能感知技术包括信息收集、识别、分析等,是盾构智能化链的重要组成部分。目前盾构施工过程中的设备状态感知在多项工程中得到成功应用,如刀具智能诊断系统、盾尾密封安全预警系统、超前地质预报系统。但随着开挖地质复杂多变,需及时调整施工过程,设备数据共享、多系统协调、多目标优化及

* 国家重点研发计划(2020YFF0218001)

[作者简介] 王俊英,高级工程师,E-mail:wjy270@vip.qq.com

[收稿日期] 2023-06-24

施工参数自适应动态调控等还未成熟应用,需开发智能采集终端及配套软件自动采集数据,并结合多系统异构数据,进行多源信息融合的安全预警,及时获得客观合理的评价。

2)盾构掘进数据挖掘分析不到位 在盾构掘进过程中,会产生大量施工数据,同时也积累与盾构施工相关的知识和经验,但由于缺乏合适的信息管理平台,无法对海量、参差不齐的施工数据进行分类和管理,应从海量数据中寻找规律,对可量化的盾构掘进参数指标进行统计分析和监测预警,从而减少盾构施工事故,确保施工安全推进。基于目前存在的运维监测困难问题,建立集自动化技术、感知技术和人工智能技术于一体的智能运维系统,通过盾构大数据平台进行数据整理、查询、分组、聚合和计算分析,实现对盾构施工全过程的智能化监测和管理。

3)盾构掘进决策控制不科学 目前各系统的状态感知功能提升数据采集、展示和信息共享等方面的效率,但在数据采集方面还存在数据标准不统一、难以自动处理分析数据等问题。在数据应用方面存在人工处理分析效率低下,决策定性分析较多、定量较少,决策过程与现场数据结合不紧密,决策过程效率低、难以抓准管控重点、分析准确度不高等问题。为解决上述问题通过自动化数据采集、大数据分析,制定标准的安全管控分析与决策标准流程,并同步开发安全管理平台,实现数据采集、分析和预警自动化,为安全管控高效、准确决策提供理论依据^[1]。

4)盾构高质量施工的影响因素复杂多变 影响盾构高质量施工的因素主要有复杂的施工工艺流程、较多的外部施工因素,如艰苦的作业条件、复杂的地质环境、劳务作业人员老龄化、较高的操作经验和素质要求、施工标准不一等。上述因素可造成地面隆起、沉降、隧道渗漏和管片破损、非正常停机、设备损坏等事故,从而降低施工效率、增加建设成本。因此,鉴于以上问题,提高隧道安全性、加快施工进度、节约人力成本,高效提高隧道施工智能化,是盾构隧道行业一直探索研究的主要方向。

盾构掘进不仅要适应大直径、大深度和长距离的施工要求,具备解决复杂工况的能力,还要实现盾构施工信息化和智能化,确保得到施工更合理、空间利用率更高的断面。因此,适应复杂地质条件的复合盾构和断面尺寸多样化的超大型和微小型盾构是发展趋势。此外,采用遥感技术、人工智能、机器人控制技术等智能盾构对隧道掘进智能化变

革也是重要发展方向^[2]。

1.2 智能盾构研究进展

随着机器人、传感器、云计算、大数据、人工智能、物联网等技术的迅速发展,地下工程领域迎来变革,其中盾构隧道的智能化施工是隧道建设的必然趋势和未来发展方向。如日本、法国等在盾构智能化研究领域比国内起步较早,目前部分知名盾构生产企业在盾构智能化方面建树颇多^[3]。

1)智能感知与检测 法国布依格在 2015 年将 Mobydic 刀具监测、蛇形机器人、Telemach 换刀机器人等技术应用于香港屯门隧道盾构中。Mobydic 刀具监测系统安装于盾构刀盘上,可记录刀具受力、转速、温度等,并可通过数据计算反映掘进过程中遇到的孤石、桩基等障碍物,而且能够分析出地层环境并绘制模拟图,制定相应的施工措施,最终反馈给盾构施工方。蛇形机器人的机械臂末端装有切割设备、摄像设备、照明设备等,用于清理刀盘、消除堵塞。Telemach 换刀机器人专门用于更换刀具,可在盾构开挖仓内部拆卸已磨损的刀头,并更换安装新刀具。之外,开挖舱还配备视频系统,工人进入时可提供实时监控画面。

我国在盾构智能感知方面,冯欢欢等在 2013 年对盾构排渣量进行研究,采用分格量化的方法对出渣量进行统计,并通过调节螺旋输送机转速控制出渣。夏俭^[4]于 2017 年总结研制土压平衡盾构出土计量装置的经验。玖瑞科技于 2019 年研发盾构刀盘状态检测系统,可在线实时测量盾构刀盘滚刀的磨损、转速及刀盘温度。中铁装备于 2012 年以来研制刀具智能诊断系统,通过磁传感器测量滚刀转速,计算转速比间接得出刀具磨损量,同时具有温度检测功能,可实现刀具状态的智能诊断。

2)盾构智能控制 日本在 20 世纪 90 年代初开发盾构自动掘进系统。由佐藤工业公司研制开发的盾构专家系统,采用人工智能技术进行盾构选型和施工。采用模糊理论和人工智能技术开发盾构自动掘进系统,通过控制出土量、线流纠偏量等实现盾构自动操纵管理。2019 年,清水建设与名古屋工业大学联合研制盾构操作 AI,基于深度学习技术模拟人脑建立模型化工作流程,实现管片自动配置和盾构自主运行控制的最优辅助。马来西亚的 MMC Gamuda 公司研发自主运行 TBM 系统(autonomous TBM,简称 A-TBM),可实现盾构自主推进、转向与控制,通过 PLC 的反馈信息实现盾构轴线自动转向控制和盾构参数自动控制推进,并成功应用于吉隆坡 KV 地铁 2 号线隧道建设中。

3)智能导向 日本 Gyro 系统运用陀螺仪对盾构进行方位检测,能自动测量方位角和倾斜角,实现盾构位姿管理。德国 VTM 自动导向系统通过引入带自动锁定棱镜功能的全站仪和激光标靶,结合仿真技术,可将土层中向前掘进的盾构模拟成清晰可见的图形,并辅以文字标识,实时展示在盾构司机面前^[5]。并研发 TUnIS 地面监控系统、SLuM 自动盾尾间隙测量系统、RCMS 自动管环收敛测量系统、VDMS 数据管理系统、管环平整度检测系统、管模和管片三维激光扫描检测系统等,对盾构施工起辅助作用,大大提高施工质量。

4)管片自动拼装技术 1995 年,日本日立公司采用光学图像、激光与传感器检测技术,研制 7 自由度管片自动拼装机器人,实现全自动化管片拼装。德国海瑞克公司研发管片自动拼装系统,采用比例控制的回转型真空吸盘,使管片拼装过程更精确、安全、快速。法国布依格于 2015 年研发 Atlas 管片拼装机器人,能够自动抓取运输车上的管片,将其定位至拼装位置,准确插入完成拼装,拼装区内无须工人,且成功应用于巴黎地铁的盾构施工。

5)盾构信息化平台建设 周文波等^[6]指出上海隧道工程股份有限公司开发盾构隧道信息化施工智能管理系统,并于 2002 年应用在上海轨道交通明珠线 2 期和南京地铁 1 号线工程中。杨志勇^[7]指出中国矿业大学于 2003 年研发具有施工进度显示、掘进参数显示、沉降数据分析等功能的盾构施工实时管理信息系统,并于 2008 年应用在北京地铁工程项目中。随后,国内部分施工企业相继开发功能相近的盾构信息管理系统,如中铁工程服务公司的盾构云、中铁十八局的地铁项目盾构施工三维信息管理系统^[8]、济南轨道交通的盾构施工多源信息实时移动交互平台^[9]、中铁装备盾构远程指挥中心、盾构及掘进技术国家重点实验室盾构 TBM 工程大数据中心、基于 BIM 的盾构隧道施工管理三维可视化辅助系统^[10]、中交一公局的盾构集群化监控与异地决策管理系统^[11]等盾构信息管理系统,具有盾构参数采集与存储、姿态管控、沉降数据监测、进度、质量、安全与风险管理、掘进历史数据存储与查询等功能。移动交互平台设计总体框架如图 1 所示。

6)智能决策 杨宏燕^[12]于 2006 年建立具有自主知识产权的盾构控制模型,并应用在掘进施工中。李惠平等^[13]于 2006 年分析盾构掘进的运行特性,并建立盾构推进时的运动数学模型。李守巨等^[14]于 2011 年基于现场观测数据,提出盾构掘进决策支持系统模型,实现复杂地层特征在线辨识、

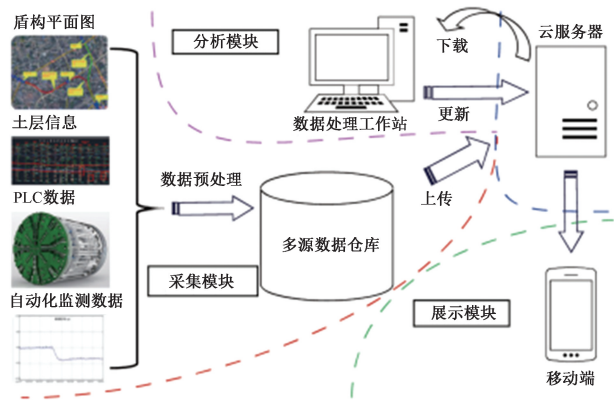


图 1 移动交互平台设计总体框架

Fig.1 Overall framework of mobile interactive platform design

土仓压力自适应预测、盾构姿态调整、掘进参数优化等功能。龚国芳等^[15]于 2014 年采用双闭环反馈自动控制方法对液压缸速度进行控制。周奇才等^[16]于 2018 年依据盾构施工排土量与注浆量数据对地表沉降进行预测。

7)智能控制技术 上海隧道股份公司基于大数据监测平台、5G 移动通信技术、AI 智能学习技术、传感技术研发的盾构自动巡航多元化管控平台,实现盾构一键启动、沉降控制、姿态控制、油脂与浆液的控制,进而达到自动巡航掘进功能。杨华勇等^[17]于 2018 年针对全断面隧道掘进装备智能化提出无人值守的具体概念,张雪^[18]于 2019 年提出盾构无人化,王同军^[19]于 2020 年指出无人化或少人化是铁路隧道智能建造核心,赵洪岩等^[20]于 2021 年将盾构智能化分为辅助巡航、间歇性自动巡航、常态化自动巡航、自动控制和智能掘进阶段。李建斌等^[21]提出智能盾构总体设计的技术架构。

综上所述,国内外盾构智能化仍处于初期探索阶段。国外盾构智能化大多针对单个系统、单个部件的智能检测、智能诊断及智能运行,自主控制系统仍以特定工程数据样本为主,未能推广应用。受限于机器人技术、传感技术、人工智能、物联网技术等发展水平,与国外同类企业相比,我国盾构生产企业智能化技术储备与产品整体自动化、智能化水平仍处于劣势。国内盾构主要依靠人工操控进行掘进,只有极少部分功能,如同步注浆、管片拼装等实现少人化,因此还需继续研究自动巡航、智能掘进等技术。

2 智慧施工技术展望

国内外各大城市都在推进基础设施智能建设,这是规划全面建立智慧城市的重要环节。将人工智能为代表的信息技术应用于传统建筑业是必然

发展趋势。盾构机因施工进度快、对地面影响小的特点成为隧道开挖的重要设备。面对城市空间密集、施工范围狭小、邻近结构敏感、生态环保要求高等难题,为提高盾构机全生命周期过程中的智能化水平,减少各阶段对人员的依赖,降低施工风险,应在施工过程中充分利用可视化、人工智能、5G 通信、数字孪生等技术,解决盾构施工过程中的设计、感知、决策、运维等难题,分别从以下方面展开阐述。

2.1 智能化设计

1) 刀盘智能化设计 开发刀盘荷载智能预测系统,构建刀盘综合性能评价体系,建立刀盘刀具数字化分析与参数化智能设计系统,以实现刀盘刀具数字化智能设计。

2) 盾构隧道施工模拟 由于盾构隧道施工环境复杂,容错成本高,因此通过智能化手段模拟施工环境,降低施工风险,同时提高施工效率。目前通过盾构大数据平台采集施工实时数据,采用人工智能相关技术,构建地质条件与盾构施工间的关系模型,开发三维可视化模拟软件,实现盾构隧道施工模拟。

2.2 施工状态智能感知

1) 超前地质探测 为实现盾构掘进过程中对掌子面前方地质的智能预报与综合预警,需通过不同类型的超前物探技术、基于掘进参数的地质分析技术、基于刀盘刀具的感知技术和出渣量监测地质分析技术,对多源数据进行融合分析,弥补单一方法存在的缺陷,最终实现掌子面前方地质从远到近、从定性到定量的精细化探测。未来超前地质预报技术还可结合新型传感技术、BIM 技术、5G 技术、大数据、三维激光扫描等做出更多尝试,集成管理多源异构空间数据和非空间数据,形成基于数据中心的三维一体化管理策略,从而提高超前地质预报的准确性。刀具智能诊断通过传感检测、无线传输、数据深度挖掘等技术,突破刀具状态检测及诊断难题,为指导司机在复杂地质下掘进操作提供依据。未来刀具的智能管理可通过将刀具状态诊断结果输出给换刀机器人,换刀机器人根据需更换的刀具位置,自动控制掘进参数,顺利完成换刀操作。

2) 盾构密封安全预警 通过传感器检测集成技术,多点连续实时监测密封腔内压力、温度、含水率等状态参数,旨在解决盾构施工过程中无法预判密封泄漏的难题。结合关联系统相关参数,建立人工智能算法模型,及时进行密封系统综合安全预警。未来,结合不同地质下密封多参数的采集与数据融合深度分析,指导盾构密封系统的智慧化设

计,保障盾构密封系统安全运行。

3) 地面沉降安全预警 为保障盾构顺利掘进及地表建构(筑)物安全,施工过程中需进行精细化管理,通过采集关键运行参数,同时扩大数据采集范围并进行深度分析,建立基于 BP 神经网络在复杂地质条件下盾构隧道施工诱发地表土体变形沉降的预测模型,实现盾构沉降预测。未来,可通过数字孪生技术实时可视化监测盾构施工地面沉降,将传感器监测数据返回设计阶段的 BIM 模型,对次模型进行更新,并将模型与施工计划进行融合集成,进而可预见施工质量与进度,实现模型与现场实时交互,形成盾构掘进智能闭环。

4) 关键设备故障诊断 通过 LoRa 无线通讯技术搭建无线传感网络采集盾构机关键零部件振动信号,结合频域信号处理方法和神经网络对盾构机关键零部件进行状态分析、故障诊断。

2.3 施工过程科学决策

1) 掘进速度预测 通过机器学习找到影响因素和盾构机掘进速度间的映射关系,建立智能预测模型,可较好预测盾构机掘进速度。

2) 压力平衡智能控制 建立多个子模型模拟盾构在复杂地质环境下的动态特性,通过多模型非线性系统的控制策略选择最优土压控制器,输出最优控制参数,进而控制土压平衡盾构在掘进过程中的压力。

3) 姿态智能纠偏 通过数学模型、模糊理论、轨迹规划和机构学分析姿态控制技术,建立盾构推进机构工作空间的约束方程,提出推进机构工作空间与盾构最小转弯半径的关系,设计以跟踪隧道轴线和以分区液压缸目标位移为目标的智能控制盾构推进姿态系统。

2.4 自动化执行

1) 管片自动吊运 通过机器学习、3D 激光扫描、运行机构定位、PLC 自动控制、无线通信等技术,研究管片自动抓取与释放技术、起重机自动定位运行控制技术、吊运安全监控与防护技术,突破管片堆垛精准定位和精准抓取、吊具防抖自动控制技术,实现管片起重机智能吊运。

2) 管片自动拼装 基于图像识别、机器视觉、轮廓测量和闭环控制等原理和方法,研究待抓接管片信息识别、管片智能定位抓取、管片智能拼装定位等技术,设计管片自动拼装控制系统,利用机械臂技术设计管片拼装机器人,结合运动控制系统,实现管片自动快速精准拼装,提高管片拼装的安全性及效率。

3)后配套自动运输 研究盾构施工后配套智能运输技术,实现后配套运输系统的信息化和智能化,从而提高安全性和自动化程度。通过无人驾驶控制技术,实现后配套运输系统机车自动驾驶。通过远程操作控制技术,实现后配套运输系统远程驾驶控制,进行近场遥控作业和执行标准工作指令。通过自动安全防护技术,实现后配套运输系统3D环境感知和安全自动防护。通过行车调度指挥技术,实现后配套运输系统自动调度和运行控制。通过环境与设备动态监控技术,实现后配套运输系统软硬件设备状态监测和故障报警。通过智能管理技术,实现后配套运输系统全生命周期管理。

2.5 智能运维平台

1)盾构机智能化管控平台 通过聚焦设计、生产、施工、运维等过程的智能化管理,从下到上解决盾构施工过程中的全面感知、平台整合、智能决策问题。在边缘感知层,通过为盾构机加装智能终端从而增强对人、设备和环境的监测,实时将各类数据传输到信息化平台进行处理和展示。在平台整合层,通过信息化平台实现对人、机、料、法、环的全流程业务覆盖,各业务要素均对应信息化应用,并提供丰富的 API 和统一数据池,实现多业务平台间的数据贯通与共享。在智能决策层,通过大数据、人工智能、数字孪生等技术,对各阶段采集的数据进行多维度分析挖掘,实现数据可视、可管,构建丰富的智能应用,为隧道建造过程提供信息化工具。

2)盾构远程指挥中心 为用户提供管理盾构施工的重要平台,用户可根据自身权限访问平台,随时随地了解盾构施工状态,使项目业主方、监理方、施工方和设计方均能实时、系统、安全地获取施工全部信息,并能够满足跟踪施工进度、实现质量管控、安全管控等需求。

3 结语

随着信息化快速发展,智能化逐渐融入地下空间,特别是盾构施工领域。机器人、传感技术、人工智能、5G 技术、物联网等技术正逐步与盾构装备和施工技术相结合,虽实现部分系统的状态感知、管片少人拼装、自动掘进辅助决策等功能,但在自主掘进、智能决策、智能感知方面仍有待提高。

为实现盾构从设计、施工、运维等全生命周期的数字化与智能化转变,地下空间开发从经验性、定型化向科学性、量化转变,需从以下方面进行实施:①全面感知 采用轨道机器人、激光雷达、电子传感器、智能图像、光纤技术、三维激光扫描仪等提高盾构机智能化检测水平;②平台整合 通过平

台实现对人、机、料、法、环、测全流程的业务覆盖与全要素数据管理,通过丰富的 API 和统一数据池,实现多业务平台间的数据贯通与共享;③智能决策

经过人工智能、大数据分析、物联网等技术,开发基于数据分析的掘进状态识别系统与智能操控平台,具有对所在地层进行自动识别并自主决策的功能。

参考文献:

[1] 苗圩巍, 颜世钊, 李纪强, 等. 我国全断面隧道掘进机的发展现状及发展趋势[J]. 内燃机与配件, 2021 (2): 203-205. MIAO Y W, YAN S D, LI J Q, et al. Present situation and trend of the development of our country's full-section tunnel boring machine [J]. Internal combustion engine & parts, 2021 (2): 203-205.

[2] 李云山, 刘放. 盾构机发展趋势分析[J]. 一重技术, 2018, (1): 35-38, 23. LI Y S, LIU F. Development trend analysis of shield machine [J]. CFHI technology, 2018(1): 35-38, 23.

[3] 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.

[4] 夏俭. 土压平衡盾构出土计量装置研制与应用[J]. 城市道桥与防洪, 2017(4): 222-225. XIA J. Development and application of soil pressure balance shield tunneling measurement device [J]. Urban roads bridges & flood control, 2017(4): 222-225.

[5] 潘明华. 盾构自动导向系统的研究与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005. PAN M H. Research and implementation of automatic guidance system for shield tunneling[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.

[6] 周文波, 胡珉. 盾构隧道信息化施工智能管理系统设计及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(S2): 5122-5127. ZHOU W B, HU M. Design and application of intelligent management system for shield tunnel informatization construction [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2004, 23(S2): 5122-5127.

[7] 杨志勇. “盾构施工实时管理系统”助力地铁隧道建设[J]. 市政技术, 2012, 30(7): 4-5. YANG Z Y. “ Real time management system for shield construction” assists the construction of subway tunnels [J]. Municipal technology, 2012, 30(7): 4-5.

[8] 李金锁, 吴涛, 王荣平, 等. 地铁项目盾构施工三维信息管理系统研究[J]. 项目技术管理, 2012, 10(9): 112-114. LI J S, WU T, WANG R P, et al. Research on three-dimensional information management system for shield tunneling construction in subway projects [J]. Project technical management, 2012, 10(9): 112-114.

[9] 喻钢, 胡珉, 高新闻, 等. 基于 BIM 的盾构隧道施工管理的三维可视化辅助系统[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(1): 1-5. YU G, HU M, GAO X W, et al. A 3D visualization assistant

- system for shield tunnel construction management based on BIM [J]. Modern tunnelling technology, 2016, 53(1): 1-5.
- [10] 华振. 盾构集群化监控与异地决策管理系统的开发与应用[J]. 工程技术研究, 2018(12): 97-98.
- HUA Z. Development and application of shield tunnel cluster monitoring and remote decision management system [J]. Engineering technology research, 2018(12): 97-98.
- [11] 刘凤洲, 谢雄耀, 王强, 等. 盾构施工沉降多源数据实时交互平台开发[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(S1): 82-89.
- LIU F Z, XIE X Y, WANG Q, et al. Development of real-time interaction platform of multi-source data for shield tunneling settlement[J]. Tunnel construction, 2020, 40(S1): 82-89.
- [12] 杨宏燕. 盾构掘进方向计算机辅助控制技术研究[J]. 隧道建设, 2007, 27(1): 91-94.
- YANG H Y. Study on computer-aided shield driving direction control technology [J]. Tunnel construction, 2007, 27(1): 91-94.
- [13] 李惠平, 夏明耀. 盾构运动过程的数值分析[J]. 上海理工大学学报, 2008(1): 95-98.
- LI H P, XIA M Y. Numerical analysis of shield tunneling motion process[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2008(1): 95-98.
- [14] 李守巨, 曹丽娟. 盾构机掘进过程中的决策支持系统[J]. 信息技术, 2011, 35(10): 39-42, 46.
- LI S J, CAO L J. Decision support system for shield machine excavation process[J]. Information technology, 2011, 35(10): 39-42, 46.
- [15] 龚国芳, 洪开荣, 周天宇, 等. 基于模糊PID方法的盾构掘进姿态控制研究[J]. 隧道建设, 2014, 34(7): 608-613.
- GONG G F, HONG K R, ZHOU T Y, et al. Research on shield boring attitude control based on Fuzzy PID algorithm[J]. Tunnel construction, 2014, 34(7): 608-613.
- [16] 周奇才, 沈鹤鸿, 赵炯, 等. 基于排土量与注浆量的盾构施工地表沉降预测[J]. 中国工程机械学报, 2018, 16(5): 457-461.
- ZHOU Q C, SHEN H H, ZHAO J, et al. Prediction of surface settlement during shield tunneling based on soil discharge and grouting volume[J]. Chinese journal of construction machinery, 2018, 16(5): 457-461.
- [17] 杨华勇, 周星海, 龚国芳. 对全断面隧道掘进装备智能化的一些思考[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(12): 1919-1926.
- YANG H Y, ZHOU X H, GONG G F. Perspectives in intelligentization of tunnel boring machine (TBM) [J]. Tunnel construction, 2018, 38(12): 1919-1926.
- [18] 张雪. 盾构机自动控制技术现状与展望[J]. 科技资讯, 2019, 17(16): 73-74.
- ZHANG X. Current status and prospects of automatic control technology for shield tunnelling machines [J]. Science & technology information, 2019, 17(16): 73-74.
- [19] 王同军. 我国铁路隧道建造方法沿革及职能建造技术体系与展望[J]. 中国铁路, 2020, (3): 1-11.
- WANG T J. Evolution of railway tunnel construction methods and functional construction technology system and prospects in China [J]. China railway, 2020(3): 1-11.
- [20] 赵洪岩, 王利民, 王浩, 等. 盾构智能化施工的发展历程和研究方向[J]. 建筑技术, 2021, 52(8): 900-903.
- ZHAO H Y, WANG L M, WANG H, et al. Development course and research direction of intelligent shield construction [J]. Architecture technology, 2021, 52(8): 900-903.
- [21] 李建斌, 荆留杰, 杨晨, 等. 智能盾构技术特征和实现路径探讨[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(3): 355-368.
- LI J B, JING L J, YANG C, et al. Discussion on technical characteristics and realization path of intelligent TBMs [J]. Tunnel construction, 2023, 43(3): 355-368.