

文章编号: 1007-2993(2026)05-0657-07

智能机器人在复杂隧道施工环境中的应用现状及适应性研究

刘志锋¹ 何红瞳² 陈 臣¹ 王 旌² 张吉哲²

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 广东广州 510000; 2. 山东大学, 山东济南 250061)

【摘要】 隧道施工环境极为复杂, 传统的人工及机械施工方式效率低、主观性强, 智能机器人凭借其先进的感知、决策和执行能力, 极大提高了复杂环境下隧道工程的施工精度和可靠性。为了研究智能机器人对复杂隧道施工环境的适应性, 在总结国内外应用现状的基础上, 对复杂隧道施工环境特点进行了详细分析, 明确了地质条件复杂、空间受限以及环境恶劣等因素对智能机器人作业的影响。从工程案例出发, 展示了智能机器人在提高隧道施工效率、提升质量和保障安全等方面的优势, 探究了导航与定位精度、通信稳定性、能源供应与续航能力等影响智能机器人适应性的技术影响因素, 以及施工工艺匹配度和与其他设备协同作业能力等工程影响因素, 提出包括定制化设计和加强设备间协同作业标准化等策略, 确保智能机器人能够更好地适应复杂隧道施工环境和工艺要求, 提高隧道施工效率和安全性。

【关键词】 隧道; 智能机器人; 应用现状; 影响因素; 适应性

【中图分类号】 TU455.4; TU69

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0275

Current status and adaptability research of intelligent robots in complex tunnel construction environments

LIU Zhifeng¹ HE Hongtong² CHEN Chen¹ WANG Jing² ZHANG Jizhe²

(1. Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510000, Guangdong, China;

2. Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China)

【Abstract】 The tunnel construction environment exhibits extreme complexity and traditional manual and mechanical construction methods have low efficiency and strong subjectivity. With their advanced perception, decision-making, and execution capabilities, intelligent robots have significantly enhanced the precision and reliability of tunnel engineering construction in complex environments. This study systematically analyzes the distinctive characteristics of tunnel construction environments. On the basis of summarizing the current research status at home and abroad, it identifies three predominant factors - complex geological conditions, spatial constraints, and harsh working environments - that significantly impact the operational performance of intelligent robots. Starting from engineering cases, it demonstrates the advantages of intelligent robots in improving tunnel construction efficiency, quality, and safety. At the same time, the technical factors affecting the adaptability of intelligent robots, such as navigation and positioning accuracy, communication stability, energy supply and endurance, as well as engineering factors such as construction process matching and collaborative operation ability with other equipment, were explored. Finally, a series of practical and feasible strategies were proposed, including customized design and strengthening the standardization of collaborative operation between equipment, to ensure that intelligent robots can better adapt to complex tunnel construction environments and process requirements, and improve tunnel construction efficiency and safety.

【Key words】 tunnel; intelligent robot; current applications; influencing factors; adaptability

0 引言

2024 年底统计数据显示, 我国铁路隧道建设规

模持续扩大, 其中已投入运营的隧道数量达 18997 座, 运营里程总计 24246 km; 同时在建项目 2521 个,

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB2603303); 山东省交通运输厅科技计划项目(2021B101); 济南市“新高校 20 条”资助项目(20228054)

作者简介: 刘志锋, 男, 1991 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事城市轨道交通勘测方面的研究。E-mail: 690851999@qq.com

通信作者: 王 旌, 男, 1990 年生, 博士, 教授, 主要从事盾构隧道智能建造与灾害防控的研究。E-mail: wjingsdu@163.com

建设总长度约 6905 km^[1]。传统隧道施工主要依赖人力和常规机械,施工效率低下,且施工人员面临着较高安全风险,同时人工施工在精度控制、质量稳定性等方面也存在一定的局限性,难以满足现代隧道高质量、高标准的建设要求。智能机器人凭借其先进的感知、决策和执行能力,能够在复杂危险的隧道环境中高效、精准地完成各项施工任务,如隧道开挖、支护、衬砌、检测等。以隧道检测为例,传统的人工检测方式不仅效率低、主观性强,而且难以检测到隐蔽性的结构缺陷,而智能检测机器人可以搭载多种高精度传感器,对隧道结构进行全方位实时监测,及时发现潜在安全隐患,大大提高了复杂环境下隧道工程的施工精度和可靠性^[2]。

在此背景下,系统探究智能机器人在隧道施工中的适应性机制,对提升工程建设效能具有显著实践价值。一方面,通过对智能机器人在不同隧道施工场景下的适应性研究,可以优化机器人的设计和控制算法,提高其在复杂环境中的作业能力和可靠性,推动隧道施工技术智能化升级。另一方面,智能机器人的广泛应用有助于降低隧道施工成本、缩短工期、保障施工人员的生命安全,对提升我国交通基础设施建设整体水平具有促进作用。

1 智能机器人在复杂隧道施工中的研究现状

国外在隧道施工机器人技术方面处于领先水平,其研发的隧道挖掘机器人具备高度智能化和自主化的特点。这些机器人能够实现自主导向和三维作业,通过先进的传感器和控制系统,可实时感知周围的地质状况,并根据预设的程序和算法自动调整挖掘参数,从而实现高效、精准的挖掘作业^[3],同时也能够精确控制混凝土的浇筑量和浇筑位置,确保衬砌的质量和厚度均匀性,有效提高了隧道衬砌施工的效率和质量^[4]。隧道检测机器人可利用高精度的传感器对隧道内部的结构进行全面检测,快速、准确地发现裂缝、剥落等病害,为隧道的维护和修复提供了重要的数据支持^[5-6]。近年来,国内也加大了对智能机器人在隧道施工领域的研究投入,并取得了一定的成果^[7],有研究针对隧道智能建造探索实现路径^[8],也有研究结合工程实例,为复杂深埋长隧道实现少人、无人和智能化施工提供了新思路和技术手段^[9]。例如,国内某隧道施工中,引入了 AI 智能安全巡查机器人,如图 1 所示,该机器人通过融入 AI 智能分析技术,实现了隧道安全应急系统的快速预警、智能监测和集成管控,有力提升了隧道施工管理水平。

此外,国内还研发了多种类型的隧道施工机器

人,如隧道喷浆机器人^[10]、隧道锚杆安装机器人^[11]等,在实际工程中得到了应用,有效提高了施工效率和质量。



图 1 AI 智能安全巡查机器人

Fig. 1 AI-powered intelligent security inspection robot

虽然智能机器人在隧道施工领域取得了一定成果,但仍有一些问题需要改进。一方面,现有智能机器人对复杂地质条件的适应性有待提高。在面对断层、破碎带、岩溶等特殊地质情况时,机器人的感知能力和决策能力存在局限性,难以准确判断地质状况并做出相应的调整,导致施工效率低,甚至影响施工安全。另一方面,隧道施工环境对机器人的可靠性和稳定性提出了极高要求,但目前部分机器人在长时间运行过程中容易出现故障,通信系统也常受到隧道内复杂环境的干扰,导致信号不稳定,影响机器人与控制中心的实时通信和协同作业。针对这些问题,本文重点研究智能机器人在复杂隧道施工环境中的适应性,提高其对不同地质条件和施工环境的适应能力,为智能机器人在隧道施工中的广泛应用提供理论依据与技术实现路径。

2 复杂隧道施工环境剖析

2.1 复杂隧道施工环境的特点

2.1.1 地质条件复杂

地质条件的复杂性对隧道施工构成了首要挑战。从岩石特性来看,软岩具有强度低、变形大、易风化等特点,极易诱发事故。例如,九绵高速公路水牛家隧道在施工过程中,穿越了大面积的软岩地层,由于软岩的自稳能力差,在开挖后短时间内出现了严重的收敛变形,导致初期支护结构受损,施工进度被迫放缓^[12]。硬岩虽然强度较高,但在高地应力条件下,容易发生岩爆现象,对工人和设备安全构成严重威胁,在川藏铁路桑珠岭隧道施工时,频繁遭遇岩爆问题^[13]。此外,断层破碎带也是隧道施工中常见的复杂地质构造^[14]。

2.1.2 空间受限

隧道内部空间相对狭窄,对施工操作和设备施展造成了极大的限制。以常见的双车道公路隧道为例,其净空断面面积一般在 10 m² 左右,扣除衬砌厚

度、通风管道、排水设施等所占空间后,实际可供施工设备和人员活动的空间较为有限,大型施工设备的停放、掉头、组装和拆卸都面临诸多困难。空间受限还导致施工材料和设备的运输效率降低,在空间受限的隧道施工中,材料和设备的运输时间往往占总施工时间的 30% 以上,由于隧道空间狭窄,运输车辆频繁出现拥堵现象,导致混凝土等施工材料不能及时供应到掌子面,使得混凝土浇筑作业经常中断,严重影响施工效率和工程质量。此外,狭窄的空间也给施工人员的操作带来不便,增加了施工人员的劳动强度和安全风险。

2.1.3 环境恶劣

隧道施工环境恶劣。在一些深埋隧道中,洞内温度可达 60~70℃^[15]。同时,在隧道开挖、钻孔、爆破等施工过程中,会产生大量的粉尘,这些粉尘中含有二氧化硅等有害物质,施工人员长期吸入会导致尘肺病等职业病。据统计,在未采取有效防尘措施的隧道施工中,施工人员尘肺病的发病率高达 6.6%^[16]。有害气体也是隧道施工环境中的一大危害,这些有害气体主要包括施工过程中产生的一氧化碳、氮氧化物等,以及隧道内可能天然存在的天然气、硫化氢等有害气体^[17]。这些极端施工环境显著增加作业人员的安全风险,可能引发重大职业伤害事故。

3 智能机器人在复杂隧道施工中的应用案例

以川藏铁路某在建隧道为例,隧道全长 4050 m,施工中面临高地应力、断层、破碎带、高瓦斯、溶洞、暗河等复杂地质风险,施工难度大。在该隧道施工中,应用了多种智能机器人,取得了显著效果。

如图 2 所示,在隧道开挖环节,采用了凿岩机器人。由表 1 可知,传统凿岩方式,每个循环进尺约为 1.6 m,施工人员需在掌子面进行长时间高强度作业,且钻孔精度难以保证,容易导致超欠挖现象。凿岩机器人投入使用后,每个循环进尺可达 4 m 以上,钻孔精度控制在±15 mm 以内。由于机器人能够自动定位、自动移臂、自动钻孔,大大提高了钻孔效率和质量,减少了超欠挖,降低了后续的支护和衬砌成本。同时,凿岩机器人的使用减少了掌子面的施工人员数量,从原来的 8 人减少至 2 人。

在初期支护环节,引入了湿喷机器人和拱架机器人(见图 3)。由表 2 可知,传统的人工湿喷作业,每小时喷射混凝土量约为 10 m³,回弹率高达 25%,不仅浪费材料,喷射质量也不稳定,容易出现喷射厚度不均匀、混凝土密实度不足等问题。湿喷机器人投入使用后,每小时喷射混凝土量可达 30 m³,回弹

率降至 10% 以下。湿喷机器人能够根据隧道形状和施工要求自动规划喷射路径,确保喷射厚度均匀,混凝土密实度高,有效提高了初期支护的质量。



图 2 凿岩机器人
Fig. 2 Rock drilling robot

表 1 凿岩机器人前后施工效率
Tab. 1 Construction efficiency before and after using rock-drilling robots

对比项目	每个循环进尺/m	钻孔精度/mm	施工人员数量/人
人工凿岩	1.6	±50	8
凿岩机器人	4	±15	2
变化情况	提高150%	精度提高 700%	减少75%



图 3 喷浆机器人
Fig. 3 Shotcrete robot

表 2 湿喷机和拱架机器人前后施工质量对比
Tab. 2 Comparison of construction quality before and after using the wet shotcreting machine and the arch robot

对比项目	湿喷每小时喷射量/m ³	湿喷回弹率/%	每榀拱架安装时间/min	每榀拱架安装施工人员数量
人工作业	10	25	60	9
机器人作业	30	10	20	3
变化情况	提高200%	降低60%	缩短66%	减少66%

拱架安装方面,传统人工安装一榀拱架需 1 h,施工人员数量为 9 人,且安装精度难以保证,容易出现拱架间距不均匀、连接不牢固等问题。运用拱架机器人后,安装一榀拱架仅需 20 min,施工人员减少至 3 人。

在监控量测环节,采用了隧道围岩变形无人智能监控量测机器人(见图 4)。监控量测机器人系统由履带式行进装置、激光测距装置及三维激光扫描仪构成。履带式行进装置具备负载越障功能,在陡坡、

崎岖不平路况下仍然能够保障 6 km/h 速度行进。激光测距装置具备自动调平、智能找点功能,高精度测距达 0.01 mm。5 min 内通过三维激光扫描获取隧道围岩轮廓,三维可视化模型精度 <1 mm。通过三维可视化隧道模型面域监测与高精度点域联合监测,实现隧道围岩变形高精度量测。运用路径智能规划、数据无线传输、自动测量技术,实现了隧道围岩变形无人化测量。



图4 监控量测机器人

Fig. 4 Monitoring and measuring robot

在隧道检测环节,使用了隧道表面结构检测机器人和隧道内部结构检测机器人,如图5所示,采用模块化、轻量化设计,1~2人即可完成远途运输与检测。结构由4部分组成:①轨道平顺性检测装置;②移动式三维激光扫描仪;③行进载体;④分离式远程控制地面站。可实现 INS/LiDAR 远程操控、连续动态检测:速度最快达 40 km/h,单次检测里程 >40 km;实现区域全覆盖检测,识别精度 1 mm;搭载全景监测云台,实时远程监控检测区间异常。



图5 巡检机器人

Fig. 5 Inspection robot

4 影响智能机器人适应性的因素

4.1 技术层面

4.1.1 导航与定位精度

现有导航技术体系涵盖卫星导航(GNSS)、惯性导航(INS)、激光导航(LiDAR)及视觉导航(VSLAM)等多元方案。然而,在隧道施工场景下,任何单一导航模式均存在固有技术瓶颈,在隧道环境中,由于山体、隧道衬砌等对卫星信号的遮挡和干扰,卫星信号往往较弱甚至中断,惯性导航随着时间的推移,其定

位误差会逐渐累积,激光导航受隧道内灰尘、烟雾等环境因素的影响较大,视觉导航对光照条件要求较高。

这种情况下可应用融合定位技术。当隧道内卫星信号受阻时,通过惯性导航维持短时间的定位,激光导航在环境条件较好时提供高精度的距离信息,修正惯性导航的累积误差,视觉导航则利用丰富的图像信息辅助定位,识别隧道内的特征物,进一步提高定位的准确性。这种多源信息融合的方式,充分发挥各导航技术的优势,弥补了单一导航技术的不足,显著提升了智能机器人在隧道施工复杂环境中的定位精度和可靠性。

在应用前景方面,以隧道挖掘机器人为例,精准的导航定位能够确保挖掘路径严格按照设计要求进行,减少超欠挖现象,提高隧道成型质量,降低后续支护和衬砌成本。同时,隧道检测机器人可以实现对隧道结构的更精确检测,及时发现微小病害和缺陷,为隧道安全运营提供更可靠的保障。随着技术的不断成熟和成本的降低,新型导航与定位技术有望在各类隧道施工项目中得到广泛应用,推动隧道施工智能化水平的进一步提升。

4.1.2 通信稳定性

在隧道施工中,智能机器人需要与控制中心、其他施工设备以及工作人员进行实时通信,以接收作业指令、上传施工数据和状态信息。目前,隧道施工中最常用的是 5G 通信方式。5G 通信在信号强度和稳定性方面具有明显优势,然而,隧道内的特殊环境会导致 5G 信号严重衰减和多径传播,影响通信质量。因此,需要采用分布式基站和中继技术来增强信号覆盖。

4.1.3 能源供应与续航能力

目前,智能机器人常用的能源类型主要有电池、燃料电池以及外接电源等,隧道内的高温、潮湿等恶劣环境会对电池的性能产生不利影响,降低电池的容量和寿命,影响机器人的续航能力。

4.2 工程层面

4.2.1 施工工艺匹配度

不同的隧道施工工艺对智能机器人的功能和性能有着不同的要求。目前,常见的隧道施工工艺有钻爆法、盾构法、TBM 法等。为了优化智能机器人以适应不同施工工艺,需在机器人设计和研发阶段充分考虑施工工艺特点和要求。通过对施工工艺的深入分析,确定机器人的功能需求和性能指标,再进行针对性的设计和制造。例如,对于钻爆法施工的凿岩机

器人,可采用先进的液压系统和控制系统,提高钻孔精度和效率;对于盾构法施工的管片拼装机器人,可以采用高精度的定位传感器和智能控制算法,提高管片拼装质量和速度。同时,还可以通过模拟仿真等手段,对机器人在不同施工工艺下作业过程进行模拟分析,提前发现问题并进行优化改进。

由图6中可知,只有智能机器人与施工工艺高度匹配,才能充分发挥智能机器人的优势,提高隧道施工的效率和质量。

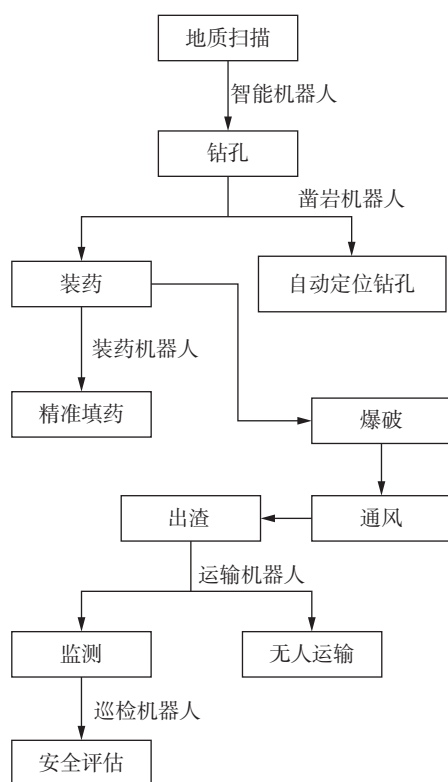


图6 钻爆法施工与智能机器人配合流程图

Fig. 6 Flowchart of drilling and blasting construction coordinated with intelligent robots

4.2.2 与其他设备协同作业能力

协同作业能够充分发挥各种设备的优势。例如,隧道开挖过程中挖掘机器人与装载机、运输车辆的协同作业,挖掘机器人负责挖掘岩石,装载机将挖掘出的岩石装载到运输车辆上,运输车辆将岩石运出隧道,三者间的高效协同能够确保隧道开挖连续作业。

然而,智能机器人与其他设备在协同作业中也存在一些问题。首先是通信和数据交互问题,不同设备可能采用不同的通信协议和数据格式,导致设备之间的通信不畅,影响协同作业的效果。其次是设备之间的动作协调问题,不同设备的运动速度、动作节奏等可能存在差异,在协同作业过程中,如果不能实现精确的动作协调,容易出现碰撞、卡顿等问题,影响

施工安全和效率。

5 提升智能机器人适应性的策略

5.1 定制化设计

定制化设计的要点在于深入了解项目需求,从机器人的功能、结构、尺寸等多个方面进行针对性设计。例如,在软土地层的隧道施工中,智能机器人需要具备良好的适应性和稳定性,以应对软土的变形和承载能力低的问题。可以采用特殊的行走机构,如履带式或多足式,增加机器人与地面的接触面积,提高其在软土地面上的通过性和稳定性;同时,加强机器人结构强度,采用高强度材料和合理的结构设计,确保在软土地层施工过程中机器人不会因受力不均而发生损坏。

在硬岩隧道施工中,智能机器人则须具备强大的破岩能力和高效作业性能。可以配备大功率凿岩设备和先进破岩工具,根据岩石硬度和特性自动调整破岩参数,提高破岩效率;优化机器人散热系统,以应对硬岩施工过程中设备产生的大量热量,确保设备稳定运行。同时,定制化设计还可以根据项目的特殊需求,集成特定的功能模块,如在含有有害气体的隧道施工中,配备高精度的气体检测传感器和通风设备,确保施工人员的安全。

5.2 加强设备间协同作业的标准化

在通信标准方面,建立通用的通信协议,确保智能机器人与其他施工设备之间能够准确、快速地进行数据传输和指令交互,同时将自身的作业数据及时反馈给其他设备,为协同作业提供准确的数据支持。在作业流程标准方面,明确智能机器人与其他设备在各个施工环节的作业顺序和协同方式。以隧道开挖为例,制定挖掘机器人、装载机和运输车辆之间的协同作业流程:挖掘机器人按照设计要求进行隧道挖掘,当挖掘出一定量的岩石后,向装载机发送作业信号,装载机接收到信号后,迅速移动到挖掘位置,将岩石装载到运输车辆上,运输车辆装载完成后,向挖掘机器人和装载机发送满载信号,然后将岩石运出隧道。通过这样明确的作业流程标准,避免了设备之间的冲突和等待时间,提高了施工效率(见表3)。

通过加强设备间协同作业的标准化,提高了智能机器人与其他设备协同作业的效率 and 安全性,减少了因沟通不畅和作业流程不规范导致的施工事故和延误,使隧道施工过程更加有序、高效,为隧道工程的建设提供保障。

6 结论

(1)通过对隧道施工环境特点的详细分析,明确

表 3 智能机器人与其他设备协同作业标准和规范

Tab. 3 Standards and specifications for collaborative operation between intelligent robots and other equipment

协同作业环节	通信要求	作业顺序	安全注意事项
隧道开挖	采用工业以太网通信,挖掘机器人实时向装载机和运输车辆发送挖掘进度和位置信息,装载机和运输车辆及时反馈自身状态信息	挖掘机器人先进行挖掘,达到一定量后,装载机进行装载,运输车辆等待装载,装载完成后运输车辆运出岩石	挖掘机器人作业时,周围严禁其他人员和设备靠近;装载机和运输车辆行驶过程中,保持安全距离,遵守交通规则
初期支护	通过 OPC UA 协议实现湿喷机器人、拱架机器人与其他支护设备的数据交互,实时调整作业参数	先进行拱架安装,拱架安装完成后,湿喷机器人进行喷射混凝土作业	湿喷机器人喷射作业时,确保喷头方向正确,避免混凝土飞溅伤人;拱架机器人作业时,注意防止拱架掉落
隧道检测	建立专用的无线通信网络,检测机器人与控制中心实时通信,上传检测数据	检测机器人按照预定路线进行检测,检测完成后将数据传输给控制中心进行分析处理	检测机器人在隧道内行驶时,设置警示标志,防止其他设备碰撞;控制中心及时对检测数据进行分析,发现问题及时通知相关人员处理

了地质条件复杂、空间受限以及环境恶劣等因素对智能机器人作业的影响,为后续针对性研究提供了坚实基础,并对常见的挖掘、喷浆、检测等多种类型智能机器人进行了详细介绍。

(2)通过工程案例分析,智能机器人在提高隧道施工循环进尺效率、钻孔精度、减少施工人员数量及提升质量和保障安全等方面优势明显。

(3)探究了影响智能机器人适应性的技术和工程层面因素。在技术层面,导航与定位精度、通信稳定性以及能源供应与续航能力等因素对智能机器人的作业性能和可靠性起着关键作用;在工程层面,施工工艺匹配度和与其他设备协同作业能力等因素也不容忽视。

(4)提出了一系列提升策略,通过定制化设计和加强设备间协同作业的标准化,使智能机器人能够更好地适应不同隧道施工环境和工艺的要求,提高了协同作业的效率 and 安全性。

参 考 文 献

[1] 巩江峰,王 伟,黎 旭,等.截至 2024 年底中国铁路隧道情况统计及 2024 年新开通项目隧道情况介绍 [J].隧道建设 (中英文),2025,45(3): 636-653. (GONG J F, WANG W, LI X, et al. Statistics of China's railway tunnels by the end of 2024 and overview of tunnels of new projects in 2024[J]. Tunnel Construction, 2025, 45(3): 636-653. (in Chinese))

[2] 甘淇匀,周 建.国内外隧道监控量测技术发展现状综述 [J].地下空间与工程学报,2019,15(S1): 400-415. (GAN Q Y, ZHOU J. Current research on tunnel monitoring and measurement technology[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(S1): 400-415. (in Chinese))

[3] HAUSWIRTH D, PUZRIN A M, CARRERA A, et al. Use of fibre-optic sensors for simple assessment of

ground surface displacements during tunnelling[J]. Géotechnique, 2014, 64(10): 837-842.

[4] BURSI O S, TONDINI N, FASSIN M, et al. Structural monitoring for the cyclic behaviour of concrete tunnel lining sections using FBG sensors[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2016, 23(4): 749-763.

[5] MOFFAT R, SOTOMAYOR J, BELTRÁN J F. Estimating tunnel wall displacements using a simple sensor based on a Brillouin optical time domain reflectometer apparatus[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 75: 233-243.

[6] QIN C S, MA C Y, LI L P, et al. Development and application of an intelligent robot for rock mass structure detection: a case study of Letuan tunnel in Shandong, China[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2023, 169: 105419.

[7] 郭卫社,洪开荣,高 攀,等.我国隧道智能建造技术发展展望 [J].隧道建设 (中英文),2023,43(4): 549-562. (GUO W S, HONG K R, GAO P, et al. Status quo and prospects of tunnel intelligent construction in China[J]. Tunnel Construction, 2023, 43(4): 549-562. (in Chinese))

[8] 田四明,吴克非,王志伟,等.中国铁路隧道智能化建造实现路径探讨 [J].铁道学报,2022,44(1): 134-142. (TIAN S M, WU K F, WANG Z W, et al. Development status and implementation path analysis on intelligent construction of mountain tunnels in China[J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(1): 134-142. (in Chinese))

[9] ZHANG Q L, ZHU Y W, MA R, et al. Intelligent tunnelling robot system for deep-buried long tunnels[J]. Frontiers in Earth Science, 2023, 11: 1135948.

[10] 徐剑安,贾连辉,荆留杰,等.喷浆机器人自适应喷涂路径规划研究 [J].隧道建设 (中英文),2022,42(11): 1963-1971. (Xu Jian'an, Jia Lianhui, Jing Liujie, et al. Adaptive spray path planning of shotcrete robot[J].

- Tunnel Construction, 2022, 42(11): 1963-1971. (in Chinese))
- [11] 毋焱磊, 陈鑫鑫, 石安政, 等. 锚杆台车工作臂设计及作业空间分析与验证 [J]. 机电工程技术, 2023, 52(4): 275-280,308. (WU Y L, CHEN X X, SHI A Z, et al. Working arm design and working space analysis and verification of tunnel anchor rig[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2023, 52(4): 275-280,308. (in Chinese))
- [12] 陈孔福, 申玉生, 赵何霖, 等. 基于破碎带围岩变形受力特征的偏压隧道控制措施研究 [J]. 工程地质学报, 2025, 33(2): 621-631. (CHEN K F, SHEN Y S, ZHAO H L, et al. Study on control measures in bias tunnel based on deformation and mechanics characteristics of surrounding rock in fracture zone[J]. Journal of Engineering Geology, 2025, 33(2): 621-631. (in Chinese))
- [13] 陈湘生, 全昭熹, 陈一凡, 等. 极端环境隧道建造面临的主要问题及发展趋势 [J]. 隧道建设 (中英文), 2024, 44(3): 401-432. (CHEN X S, QUAN Z X, CHEN Y F, et al. Primary challenges and developmental trends of tunnel construction in extreme environments[J]. Tunnel Construction, 2024, 44(3): 401-432. (in Chinese))
- [14] 许振浩, 邵瑞琦, 林 鹏, 等. 隧道不良地质识别: 方法、现状及智能化发展方向 [J]. 地球学报, 2024, 45(1): 5-24. (XU Z H, SHAO R Q, LIN P, et al. Adverse geology identification in tunnel: method, research status and intelligent development direction[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2024, 45(1): 5-24. (in Chinese))
- [15] 谷柏森. 隧道高地温应对措施及通风设计——高黎贡山铁路特长隧道可行性研究 [J]. 现代隧道技术, 2007, 44(2): 66-71. (GU B S. Countermeasures against high temperatures in a tunnel and the corresponding ventilation design——feasibility study for the super-long Gaoligongshan tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2007, 44(2): 66-71. (in Chinese))
- [16] 赵玉报, 陈寿根, 谭信荣. 长大隧道施工中干式除尘机理及应用 [J]. 现代隧道技术, 2014, 51(3): 200-205. (ZHAO Y B, CHEN S G, TAN X R. The mechanism and application of dry dust removal technology in long tunnel construction[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(3): 200-205. (in Chinese))
- [17] 张吉禄, 刘新荣, 周小涵, 等. 川西藏东地区隧道围岩有害气体孕育机制及逸出风险评价研究 [J]. 隧道建设 (中英文), 2024, 44(2): 296-307. (ZHANG J L, LIU X R, ZHOU X H, et al. Formation mechanism and releasing risk assessment of hazardous gas in tunnel surrounding rocks in western Sichuan and eastern Xizang, China[J]. Tunnel Construction, 2024, 44(2): 296-307. (in Chinese))

收稿日期: 2025-06-20