

既有运营枢纽下深惠城际深圳北站增层改扩建关键技术

葛帅¹, 彭博^{2,3}, 李冲⁴, 周宏亮¹, 郑建¹, 高越^{2,3}, 付艳斌^{2,3}

¹中国水利水电第十四工程局有限公司, 云南 昆明

²深圳大学土木与交通工程学院, 广东 深圳

³深圳大学滨海城市韧性基础设施教育部重点实验室, 广东 深圳

⁴深圳铁路投资建设集团有限公司, 广东 深圳

收稿日期: 2024年11月16日; 录用日期: 2024年12月12日; 发布日期: 2024年12月18日

摘要

深圳北站是深圳铁路枢纽“三主四辅”中的“三主”之一, 衔接有国铁、深惠城际和城市轨道交通4、5、6号线, 是深圳市的重要综合交通枢纽。深惠城际深圳北站的客流需求大, 远期车站旅客乘降量达到15.4万人次/日, 基于既有车站对其进行向下增层改扩建, 使其实现国铁、城际和城市轨道交通“零换乘”具有极大的社会效益。文章从改扩建工程中施工空间有限、开挖改变既有桩基受力平衡以及施工需要保护周边建筑物安全等施工难题出发, 结合深惠城际深圳北站工程总结了窄小空间增层下挖关键技术, 并通过数值方法优化施工流程, 保证了施工安全、合理、高效进行, 为未来运营枢纽下既有车站改造扩建项目提供技术支撑。

关键词

综合交通枢纽, 地下增层扩建, 结构改造, 低净空开挖, 微扰动拓建

Key Technologies for Underground Layer Addition and Structural Expansion of Shenzhen North Station of Shenzhen-Huizhou Intercity Railway under the Existing Operating Hub

Shuai Ge¹, Bo Peng^{2,3}, Chong Li⁴, Hongliang Zhou¹, Jian Zheng¹, Yue Gao^{2,3}, Yanbin Fu^{2,3}

文章引用: 葛帅, 彭博, 李冲, 周宏亮, 郑建, 高越, 付艳斌. 既有运营枢纽下深惠城际深圳北站增层改扩建关键技术[J]. 土木工程, 2024, 13(12): 2240-2247. DOI: 10.12677/hjce.2024.1312246

¹Sinohydro Bureau 14 Co., Ltd., Kunming Yunnan

²College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen Guangdong

³Key Laboratory of Coastal Urban Resilient Infrastructures (MOE), Shenzhen University, Shenzhen Guangdong

⁴Shenzhen Railway Investment and Construction Group Co., Ltd., Shenzhen Guangdong

Received: Nov. 16th, 2024; accepted: Dec. 12th, 2024; published: Dec. 18th, 2024

Abstract

Shenzhen North Railway Station is one of the “three main” hubs in the “three main, four auxiliary” structure of the Shenzhen railway network. It connects the national railway, the Shenzhen-Huizhou intercity railway, and urban rail transit lines 4, 5, and 6, making it an important comprehensive transportation hub in Shenzhen. With a significant passenger demand at Shenzhen North Station for the Shenzhen-Huizhou intercity line, the future passenger flow at the station is expected to reach 154,000 passengers per day. Expanding and reconstructing the existing station by adding underground levels to achieve seamless transfers between national rail, intercity rail, and urban rail transit brings immense socio-economic benefits. This paper addresses the key construction challenges posed by limited construction space, excavation impacting the load balance of existing foundations, and the need to ensure the safety of surrounding buildings. It summarizes the critical technologies for adding levels and excavation in confined spaces in the Shenzhen North Station project for the Shenzhen-Huizhou intercity line. Through numerical methods, the construction process was optimized to ensure safe, efficient, and reasonable execution, providing technical support for future reconstruction and expansion projects of stations under operational hubs.

Keywords

Comprehensive Transportation Hub, Underground Floor Addition and Expansion, Structural Renovation, Excavation in Constrained Vertical Space, Minimally Disruptive Expansion

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着地铁、高铁、城际铁路等多种轨道交通并行发展，大型高铁站逐渐发展成为集高铁、市域、城市轨道交通、高速公路等多种交通方式于一体的综合交通枢纽。例如京沪高铁滁州站枢纽[1]、京张铁路清河站综合交通枢纽[2][3]、西安站铁路综合交通枢纽[4]等。完善的城市轨道交通系统不仅是满足旅客快速出发和便捷离场的基础设施，也是连接高铁站与各大城区的骨干交通系统和重要载体[5]。然而随着旅客对不同交通方式之间便捷换乘的要求越来越高，早期车站及其配套的客运枢纽因前期规划的前瞻性不足已无法满足现在及将来的交通需求，亟需升级改造来提升高铁枢纽的综合效率。为了提高高铁与地铁、城际之间换乘效率，完善既有的高铁站及综合枢纽的配套设施，打造“零换乘”的综合交通一体化枢纽，对既有运营枢纽下高铁站的改造扩建迫在眉睫。

在已运营的高铁站修建大型轨道交通车站，不可避免会改造既有结构，施工过程中影响现有的运行组织[6]。导致既有运营枢纽下高铁站的扩建、改造面临空间受限、交通融合、空间互通等多方面的难题[7][8]。目前国内对运营枢纽下车站的改造扩建研究已有一些成果：改扩建涉及既有结构拆除改造，如佛山地铁 2

号线绿岛湖站扩宽改造工程,车站改造区域整体长度为 102.66 m,其中有 87 m 侧墙需要拆除,原车站结构为框架结构,侧墙拆除后,其受力体系发生转变,为尽量减少车站改造对地铁主体受力结构的影响,减少顶板悬臂长度,在底板与顶板之间施作 500 mm 厚的钢筋混凝土隔墙减少了改造过程对车站结构内力和结构变形的影响[9];改扩建涉及既有车站保护,如北京地铁 6 号线苹果园站工程两层三跨框架结构下穿地铁 1 号线苹果园站,采用超前注浆加固范围 1.5 m 的 PBA 工法施工,减小了开挖阶段引起的既有车站沉降,在整个施工过程中,起到了控制沉降的效果[10][11];改扩建涉及特殊施工工艺,如深圳地铁 3 号线老街换乘综合体工程在与既有结构“零距离接触”、与列车行驶界限仅有 0.75 m 的高风险条件下,通过合理科学的组织、灵活运用金刚石绳锯与金刚石水钻相结合的一种静力切割工艺,很好地解决了工程作业环境复杂、技术要求高、风险大等难题,安全、高效地完成了新建结构与运营地铁车站接驳工程[12]。

深圳北站作为衔接国铁、深惠城际和城市轨道交通的重要综合交通枢纽,基于既有车站对其进行改扩建,使其实现国铁、城际和城市轨道交通“零换乘”具有极大的社会经济效益。本文以既有运营枢纽下深惠城际深圳北站改扩建工程为例,针对改扩建工程中施工空间有限、开挖改变既有桩基受力平衡以及施工需要保护周边建筑物安全等施工难题,介绍项目采取的关键技术,采用数值模拟手段对施工工序进行模拟,合理安排施工工序,以期运营枢纽下既有车站改造扩建提供参考与借鉴。

2. 立体交通枢纽改扩建关键技术

深圳北站是深圳铁路枢纽“三主四辅”中的“三主”之一,衔接有国铁、深惠城际和城市轨道交通 4、5、6 号线,是深圳市的重要综合交通枢纽。深惠城际深圳北站的客流需求大,远期车站旅客乘降量达到 15.4 万人次/日,是深惠城际车站中旅客乘降量最大的车站。为提升城际及枢纽的服务水平,利用位于高铁深圳北站下方的平南铁路隧道设置深惠城际深圳北站车站,使高铁站、城际站实现“零换乘”。

2.1. 周边环境

车站周边环境复杂,主要建构筑物有国铁深圳北站站房、地铁 4、6 号线高架车站及区间、地铁 5 号线深圳北站(地下一层)、枢纽东广场综合体(地上两层)、消防车道、平南铁路龙华隧道等,如图 1 所示。一层轨道交通联系国铁、公交、出租及周边客流组织;二层承担国铁客流疏散到公交、出租、轨道交通,本层公交、出租均为上客;屋面层为国铁、公交及出租落客、联系轨道交通进出站。



Figure 1. Station surrounding environment
图 1. 车站周边环境

2.2. 工程地质及水文地质条件

深圳至惠州城际铁路前海保税区至坪地段所经地貌单元主要包括冲海积平原、冲洪积平原、台地、剥蚀丘陵等,受后期人为改造成建筑用地和公园,高程大约 66.17~73.85 m。场地地层岩性复杂,覆盖层主要为第四系全新统人工填土层、第四系全新统冲洪积层、第四系上更新统冲洪积层、第四系残积层。基岩为燕山四期花岗岩。场地地下水按赋存条件主要分为松散岩类孔隙水及基岩裂隙水,孔隙水主要赋存在冲洪积砾砂层、坡积层、残积层、全风化花岗岩中,基岩裂隙水主要赋存在花岗岩强和中风化层,略具承压性,地下水位埋深 4.60~5.20 m。

3. 改扩建总体设计

深惠城际深圳北站既有综合体一层及二层部分区域作为站厅层,下挖一层半地下车站作为站台层。下挖车站长约 215 m,宽 15.0~44.5 m,基坑深度 10~12 m,平面布置如图 2 所示。下挖空间内既有平南铁路隧道,施工前期平南铁路还未停运,平南铁路的位置关系图见图 3。

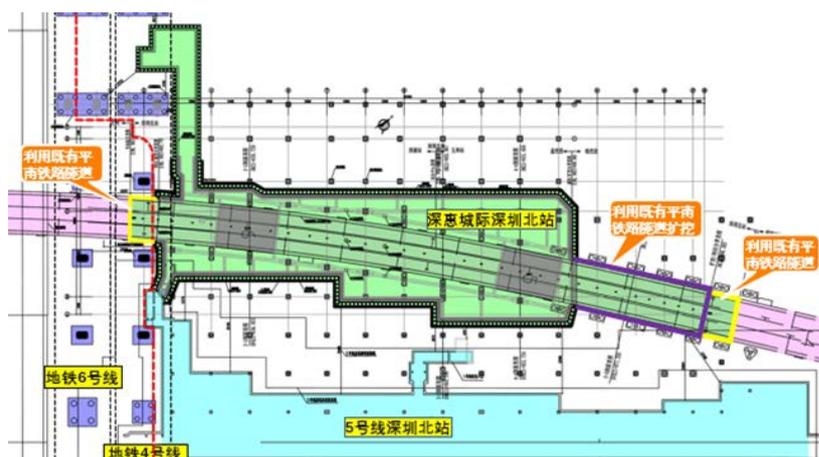


Figure 2. Plan layout of foundation pit

图 2. 基坑平面布置图

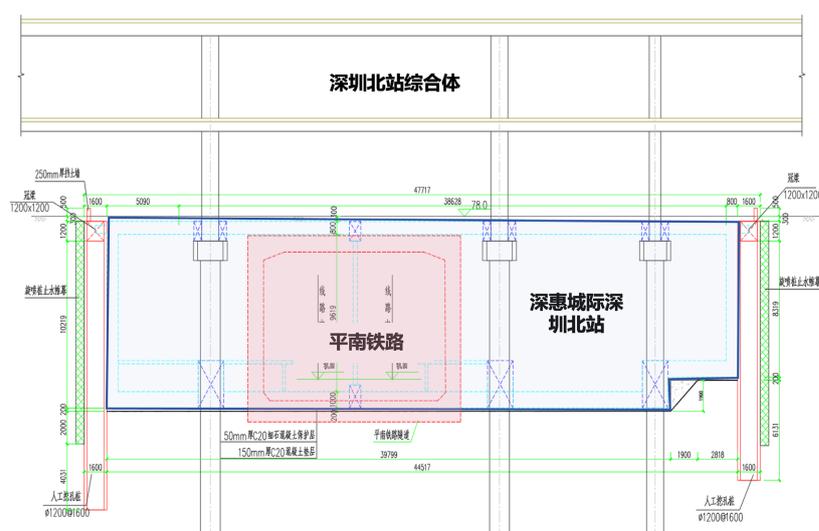


Figure 3. Cross-section diagram of foundation pit

图 3. 基坑横断面图

综合体下由于施工净空低、桩底入岩,采用 $\phi 1.2\text{m}@1.6\text{m}$ 人工挖孔桩 + 止水帷幕, 200 mm 钢筋混凝土护壁, 综合体外采用 $\phi 1.2\text{m}@1.35\text{m}$ 钻孔灌注桩 + 双管旋喷止水。基坑开挖方法为盖挖顺作法施工, 入岩围护桩采用水钻 + 静爆成孔, 对高岩面段基坑采用静爆及机械辅助开挖。降水方式主要采用坑内降水, 坑外止水措施, 止水帷幕主要为旋喷桩, 盖挖段大小里程处与平南铁路咬合, 底板袖阀管注浆止水。

4. 窄小空间增量层下挖关键技术

在既有深圳北站下增量层扩建施工难点如下: (1) 低净空空间开挖, 有限的作业空间限制了设备和工程施工的灵活性, 以往在一般空间使用的工法、工艺会表现出局限性[13]-[16]; (2) 增量层扩挖改变既有桩基受力模型, 施工过程中需保证桩基安全; (3) 深圳北站主体结构及周边建筑物沉降变形须严格控制, [17] [18]。针对这些难点, 本项目采用了一系列特殊工艺。

4.1. 盖挖顺作工艺

深惠城际深圳北站开挖范围内共有 48 根工程桩, 33 个承台。在开挖过程中工程桩由低承台桩基转化为高承台桩基, 虽然桩基的承载力经验算满足要求, 但桩基稳定性及抗压刚度降低。为解决此问题, 同时保障施工的操作空间, 选用“以板代撑”的盖挖顺作支护方案, 施工流程如表 1 所示。

Table 1. Top-down construction method

表 1. 盖挖顺作施工工艺

工序	施工说明
1	施工准备(场坪及场地布置)
2	施工围护结构、施工降水井
3	顶板以上(表层土)土方开挖, 施作冠梁同步破除综合体内地梁及平南铁路顶板
4	搭设顶板矮支架, 施作顶板
5	拆除脚手架; 待顶板混凝土达到设计强度的 100%时, 施作顶板以下土方开挖
6	开挖至基坑底面, 施做接地, 垫层, 防水; 浇筑底板及侧墙混凝土

为研究盖挖顺作顶板施工深度对基坑围护结构、深圳北站结构和周边建筑的影响, 采用 Midas GTS 三维建模模拟施工工况。整体模型图如图 4 所示。

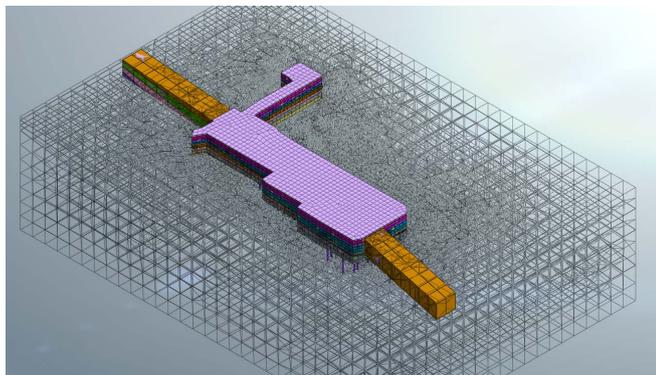


Figure 4. Model diagram of Shenzhen North Station on the Shenzhen-Huizhou Intercity Railway
图 4. 深惠城际深圳北站建模图

分别模拟开挖至-1 m, -3 m, -5 m 时施工顶板再施工至坑底三种工况, 并记录基坑围护桩最大水平位移, 基坑坑顶最大沉降、工程桩最大水平位移三个指标的变化情况, 结果如图 5 所示。

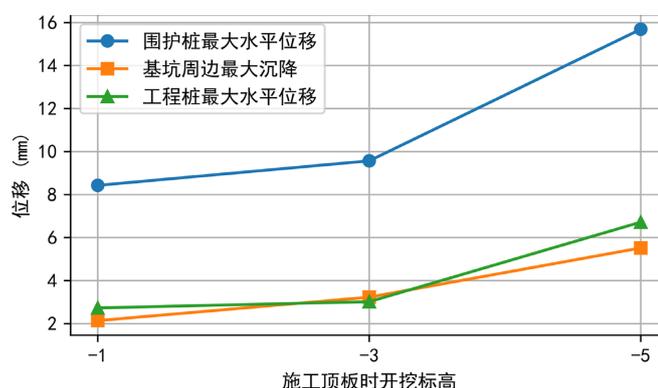


Figure 5. Deformation index variation chart
图 5. 变形指标变化图

说明提前施工顶板会提升整个支护体系的刚度, 减少对基坑开挖范围内桩基和土层的影响, 在建筑密集的枢纽空间内进行盖挖顺作施工是科学合理的。综合考虑变形指标和施工组织的实际情况, 选择在开挖至-3 m 时施工顶板, 目前顶板已经施工完毕, 基坑各监测指标稳定安全。

4.2. 人工挖孔桩工艺

由于深圳北站枢纽下净空约 5 米, 且为了保证深圳北站枢纽的正常运营, 施工需要控制振动和噪声, 围护桩施工过程中无法采用大型机械设备, 因此采用了人工挖孔桩工艺。如何保证桩体质量和施工安全是该工艺施工中的关键, 尤其在桩体穿越复杂地质或岩石时需要设计合理的静爆工艺。

1) 袖阀管注浆

人工挖孔桩施工前需先对桩基范围土体进行袖阀管注浆加固, 待加固完成后组织人工挖孔桩开挖。注浆浆液采用水泥浆液, 灌注 R42.5 号普通硅酸盐水泥, 水泥浆水灰比: $W:C=0.8:1\sim 1.5:1$ 。注浆压力为 0.1 MPa, 以加固后的土体无侧限抗压强度应大于 1.0 MPa 为标准。当注浆效果不能满足上述要求时调整注浆参数或进行补注浆。

2) 跳打桩孔开挖

挖空采用跳三打一的方式施工, 首先施工第一节护壁, 第一节护壁高出地面 15 cm, 采用 C25 混凝土浇筑, 内放 $\Phi 10$ 钢筋网, 采用定型钢模板立模。第一节护壁完成后, 安装定型井架, 井架上安装滑轮, 与卷扬机组成提升系统。接着边开挖边施工下节护壁, 上下节护壁的搭接长度为 75 mm, 护壁上段的竖向钢筋应全部伸入下段护壁内, 长度不小于 300 mm。

3) 气体检测及通风

每桩位下井施工前必须采用空气检测仪检测有害气体是否满足作业指标, 每桩增设鼓风机进行换风作业, 先通风、再探测, 后作业。当挖孔深度超过 5 m 时, 应开始用压力风管引至井底进行送风, 作业深度超过 10 m 时, 地面应配备向孔内送风的专用设备, 风量不宜小于 25 L/s, 孔底凿岩时应加大送风量。作业中不得间断送风。

4) 水钻 + 静爆法开挖

针对桩基入岩部分, 采用水钻 + 静爆施工, 静态剂采用 SCA 型静态爆破剂, 先使用水磨钻进行周边眼取芯, 后在桩芯岩体钻孔、填充静爆剂进行爆破, 爆破一段, 破碎、清运一段, 水钻 + 静爆成孔示

意图如图 6 所示。



Figure 6. Water drilling and static blasting hole formation diagram
图 6. 水钻 + 静爆成孔示意图

静态爆破施工技术参数如表 2 所示。

Table 2. Technical parameters of static blasting construction
表 2. 静态爆破施工技术参数

破裂体	孔径 d/mm	孔距 a/cm	孔深 L
中风化岩石	40~50	20~30	1.0 H
微风化岩石	40~65	20~30	1.05 H

5) 钢筋笼绑扎和混凝土浇筑

考虑到净空，人工挖孔桩钢筋主筋每节下放 5 m，根据不同桩长分 4~5 节下放，钢筋笼主筋采用套筒连接。混凝土采用现场集中搅拌站供应，运输采用罐车运输，混凝土浇筑采用地泵，浇筑采用干孔浇筑作业。

4.3. 开挖功效分析与优化

基坑开挖方式结合工程特点和实际施工条件，采取纵向分段，竖向分层施工。为合理划分开挖段，科学安排施工顺序，采用 Midas GTS 三维建模模拟施工工况，按照 20 m 分台和 30 m 分台分别模拟，20 m 分台和 30 m 分台围护桩最大水平位移和桩基最大水平位移值见表 3。

Table 3. Segmental step distance parameter analysis
表 3. 分台步距参数分析

	围护桩最大水平位移	桩基最大水平位移
20 米步距	8.47 mm	2.33 mm
30 米步距	14.32 mm	5.67 mm

结合场地土层分析，围护结构和桩基变形比较大的区域集中在岩面较深段，综合选择在岩面较高的范围以 30 米步距开挖，在岩面较低的范围以 20 米步距开挖，模拟得到围护桩最大水平位移为 9.52 mm，桩基最大水平位移为 2.64 mm，满足安全要求。

5. 结论与建议

深惠城际深圳北站工程是利用增层技术对既有枢纽进行地下空间改扩建的典型实例, 车站周边环境复杂, 为解决既有综合枢纽窄小空间下增层改扩建面临的施工空间不足、对既有结构扰动大等问题, 深惠城际深圳北站结合工程实际开发了如下改扩建关键技术:

1) 盖挖顺作工艺: 盖挖段基坑采用“以板代撑”的设计思路, 结构顶板作为基坑支撑体系, 既可以提高围护结构刚度, 又可以提升桩基的整体刚度, 适用于在建筑密集的枢纽空间内进行增层扩挖。

2) 人工挖孔桩工艺: 在机械难以进入的情况下, 可以选用人工挖孔桩工艺, 但需要通过采取相应措施保证施工安全, 本文提出袖阀管注浆、跳打桩孔开挖、气体检测及通风、水钻 + 静爆法开挖等工艺的细节参数, 保证人工挖孔桩的安全施工, 同时解决嵌岩桩施工噪声、振动大的问题。

在施工过程中采用数值模拟方法对多种施工方案及施工流程进行模拟, 指导施工安全、合理、高效进行。相应研究成果可以为运营枢纽下既有车站改造扩建提供参考与借鉴。

参考文献

- [1] 亢轩. 基于既有高铁车站改扩建的交通枢纽规划设计探析——以京沪高铁滁州站改扩建为例[J]. 铁道标准设计, 2023, 67(6): 167-171.
- [2] 田涵文, 贾玉洁, 冯小学. 站城融合视角下的京张高铁清河站东广场设计研究[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(4): 134-138, 164.
- [3] 王欣睿. 新建京张铁路清河站综合交通枢纽规划方案分析[J]. 铁道运输与经济, 2019, 41(3): 58-62.
- [4] 曾凤梅. 大型铁路综合交通枢纽旅客流线重构研究[J]. 铁道运输与经济, 2021, 43(12): 93-100.
- [5] 张景娥. 西安地铁站与新建铁路北客站的结合设计研究[J]. 铁道工程学报, 2014, 31(10): 84-88.
- [6] 李储军, 王立新, 胡瑞青, 等. 黄土地区地铁车站换乘改造施工力学行为研究[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(9): 101-109.
- [7] 张景娥. 西安火车站改造与地铁车站结合形式探讨[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(6): 87-91.
- [8] 安东辉, 邵文. 地铁车站扩建改造工程对原有结构受力影响分析[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(11): 129-135.
- [9] 李聪, 王飞, 张晨晨. 富水地层既有地铁车站扩宽改造关键技术研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(z2): 172-177.
- [10] 尤强. 北京地铁六号线苹果园站明挖增层施工技术[J]. 建筑结构, 2021, 51(S2): 1765-1768.
- [11] Han, J., Wang, J., Cheng, C., Zhang, C., Liang, E., Wang, Z., et al. (2023) Mechanical Response and Parametric Analysis of a Deep Excavation Structure Overlying an Existing Subway Station: A Case Study of the Beijing Subway Station Expansion. *Frontiers in Earth Science*, 10, Article 1079837. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.1079837>
- [12] 陈进山, 李海龙. 新建结构与运营地铁车站接驳关键技术[J]. 隧道建设, 2011, 31(5): 598-604.
- [13] 崔光耀, 麻建飞, 宁茂权, 等. 超大矩形顶管盾构隧道近接下穿高铁施工加固方案对比分析[J]. 岩土力学, 2022, 43(S2): 414-424.
- [14] 崔光耀, 田宇航, 肖毅, 等. 高风险城市环境地铁小净距隧道近接隧道群施工方案优选[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(3): 156-161.
- [15] 董立朋, 杨陕南, 刘志伟. 超浅埋棚盖法暗挖地铁车站管幕支护技术研究与应用——以北京地铁 19 号线平安里站为例[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(2): 305-315.
- [16] 黄祚琼. 地铁车站暗挖隧道穿越既有线的施工技术研究[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(2): 133-139.
- [17] 周诗俊. 盾构隧道下穿立交桩基托换方案设计[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(z1): 162-169.
- [18] 孙祥惠, 董子龙, 赵小龙, 等. 既有地铁枢纽车站大规模节点换乘改造关键施工技术[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(z2): 523-534.