

立体交通枢纽改扩建关键技术

余 淦¹, 彭 博^{2,3}, 宋超群⁴, 刘洪帅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17日; 录用日期: 2024年12月13日; 发布日期: 2024年12月19日

摘 要

截至2023年底, 我国轨道交通运营里程已超过11,232 km。随着干线铁路、城际铁路、市域郊铁路和轨道交通四网融合的发展, 高效便捷的立体交通枢纽改扩建建设迫在眉睫。然而, 枢纽改扩建常面临着近接敏感性建筑物、特殊富水地层不易加固、枢纽内建造拆除工序复杂等问题, 这些问题难以采用传统工法施工, 制约立体枢纽的改造开发。文章从既有枢纽改扩建面临的地层多次扰动、结构变形协同、复杂立体力系转换三大技术难题出发, 总结了精细化主动控制、空间复杂力系转换及补偿、自动伺服系统及智能化监测三大创新性技术。随着大数据和机器学习算法的不断发展, 立体交通枢纽改扩建施工中需要朝着更加信息化、智能化、数字化、自动化的方向发展。

关键词

立体交通枢纽, 枢纽改扩建, 力系转换, 主动控制, 智能化监测, 变形协同

Key Technologies for the Reconstruction and Expansion of Stereoscopic Transportation Hubs

Gan Yu¹, Bo Peng^{2,3}, Chaoqun Song⁴, Hongshuai Liu¹, Yue Gao^{2,3}, Yanbin Fu^{2,3}

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. 17th, 2024; accepted: Dec. 13th, 2024; published: Dec. 19th, 2024

文章引用: 余淦, 彭博, 宋超群, 刘洪帅, 高越, 付艳斌. 立体交通枢纽改扩建关键技术[J]. 土木工程, 2024, 13(12): 2248-2255. DOI: 10.12677/hjce.2024.1312247

Abstract

By the end of 2023, the operational mileage of China's rail transit system has surpassed 11,232 km. With the integration of mainline railways, intercity railways, suburban railways, and urban transit networks, the demand for efficient and convenient multi-layered transportation hub reconstruction and expansion has become urgent. However, hub reconstruction often faces challenges, such as the proximity to sensitive structures, difficulty in reinforcing complex water-rich geological formations, and the complexity of construction and demolition sequences within the hub. These challenges limit the feasibility of traditional construction methods and constrain the redevelopment of multi-layered transportation hubs. This paper addresses three technical challenges encountered in the reconstruction of existing hubs: repeated geological disturbances, structural deformation coordination, and complex multi-dimensional force system conversion. It summarizes three innovative technologies: refined active control, complex spatial force system conversion and compensation, and automatic servo systems with intelligent monitoring. As big data and machine learning algorithms continue to evolve, there is a need to incorporate more information-based, intelligent, digital, and automated developments into the construction of multi-layered transportation hub projects.

Keywords

Stereoscopic Transportation Hub, Hub Renovation and Expansion, Force Conversion, Active Control, Intelligent Monitoring, Deformation Coordination

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

截至 2023 年 12 月 31 日,中国内地累计有 59 个城市投运城轨道交通线路 11232.65 公里[1][2]。然而,随着地铁、高铁、城际铁路等多种轨道交通并行的发展,旅客需要不同交通方式之间可以便捷换乘,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,需要升级改造来提高交通枢纽的综合效率[3]。另一方面,随着城市化进程的加深,有限的城市空间制约着交通枢纽的改扩建,传统的地面更新改造已经无法满足城市可持续发展的要求[4][5]。

2022 年《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划纲要》提出,要建设现代化综合交通运输体系,推进城市群都市圈交通一体化,加快城际铁路、市域(郊)铁路建设,构建多层次、一体化综合交通枢纽体系[6]。以此为背景,近年来,我国已经顺利完成一些交通枢纽改造建设项目,并总结了一些经验。安东辉[7]提出广州地铁 3 号线华师站改扩建时,原有车站顶部主梁、顶板和侧墙内力均有不同程度增大,虽然改造后各力学指标满足规范要求,但对重要构件需加强构造措施,并做好防水与监测工作;石树稳[8]提出国内某软土地区地铁车站在改扩建时,其支护结构最大位移达到 39 mm,超过规范限制值,在软土地区进行车站改扩建工程需要注重对土层的加固。总的来说,枢纽改扩建常面临着近接敏感性建构筑物、特殊富水地层不易加固、枢纽内建造拆除工序复杂等问题,这些问题难以用传统工法施工,制约立体枢纽的改造开发[9]-[11]。

本文从既有枢纽改扩建面临的地层多次扰动、结构变形协同、复杂立体力系转换三大技术难题出发,总结了近年来复杂条件下立体枢纽改扩建工程在地层加固变形控制、立体空间力系转换及控制、监测及

自动化控制等方面突破的关键性技术，并提出了立体枢纽改扩建未来的发展趋势，为我国未来立体枢纽改扩建工程提供借鉴。

2. 立体交通枢纽改扩建关键技术

城市立体交通枢纽改扩建项目需要承担城际铁路、城市轨道交通、出入境口岸、道路公交、出租、旅游大巴等交通设施无缝换乘的功能需求；而且交通枢纽在升级改造过程中需要保证枢纽周边车站、商业、办公、酒店、公寓等公共设施的正常运营状态。因此枢纽改扩建需要面临工程安全等级高、改造时间及空间有限等困难[12]，导致立体交通枢纽改扩建工程在设计 and 施工的过程中往往无法参照常规的设计规范和施工标准进行。收集借鉴既有的车站及枢纽改造项目的施工工艺，并对工艺背后的核心技术难题进行归类分析，对未来枢纽改扩建建设的标准化、流程化、规范化施工有关键意义，具体技术如下。

2.1. 地层加固变形控制技术

2.1.1. 超前深孔注浆地层加固技术

对开挖区域周围土体进行注浆预加固是增加地层抵抗变形能力、减少地表沉降和周围建(构)筑物变形的有效方法[13]。参考济南地铁 4 号线车站暗挖通道下穿立交桥，采用超前深孔注浆地层加固技术，如图 1 所示，施工过程中地表、地下管线、建(构)筑物最大累计变形绝对值分别为 9.87 mm、9.83 mm、5.73 mm，有效控制了地层沉降，保障了施工顺利进行[14]。

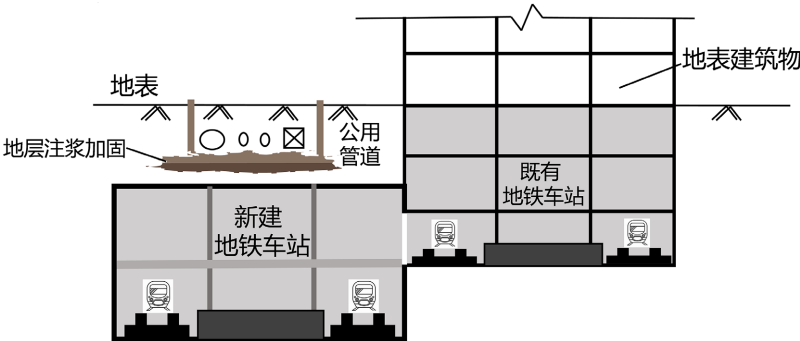


Figure 1. Ground reinforcement grouting technology
图 1. 地层注浆加固技术

2.1.2. 既有车站底部土体卸载回弹变形控制技术

枢纽改造拆除对整体结构来说是一个减重过程，打破了原有结构与地下土层的力学平衡。抗浮板可以有效隔离既有结构与上盖开发之间的相互影响，抗拔桩则是利用桩身与土体之间的摩擦力抵抗地下结构上浮的一种有效的抗浮措施。杭州地铁 6 号线上盖物业开发工程为解决施工期间可能引起既有 6 号线车站结构上浮及变形过大问题，采用抗浮板和抗拔桩加固体系，如图 2 所示，在工程施工期间，既有 6 号线车站结构内部道床差异沉降、水平位移、管片水平收敛等变形监测均未超过地铁保护控制值，应用效果良好[15]。

2.2. 空间力系转换及控制技术

2.2.1. 桩基托换及节点改造技术

枢纽改扩建施工中，为避免影响既有建(构)筑物，常采用主动桩基托换技术，即在拟进行下挖增层改造工程土层开挖之前，施工一定数量的托换桩，并通过浇筑承台或筏板将既有桩和托换桩连成整体，共

铁东四十条地铁站改扩建工程, 新建 3 号线密贴下穿长久运营车站工程采用丝杠预支顶工法, 运营 2 号线车站竖向最大变形 1.28 mm, 横向变形 0.5 mm, 所有监测指标均在安全阈值内, 在保证长久运营结构稳定的前提下, 保障了新建施工的安全稳定[19], 如图 4 所示。

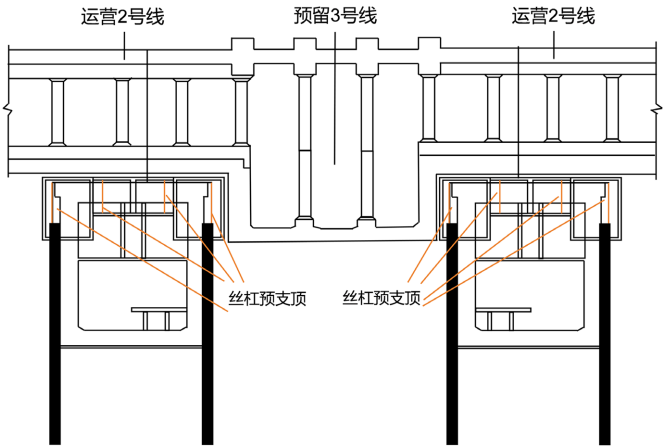


Figure 4. Construction of pre-supporting structure for subway station
图 4. 地铁车站预支顶结构施作

2.2.3. 既有车站拆除及结构力系补偿技术

为实现零距离换乘, 在打造立体交通枢纽的过程中需要临时拆除既有建筑墙柱等结构以实现新旧结构联通。在施工过程中一方面需严格控制既有结构的变形, 另一方面要考虑新建结构的施工, 因此要开发既有车站结构拆除及结构力系补偿技术, 具体应包括: (1) 分析待拆除结构的受力模式; (2) 结合新建结构的功能需求设计力系补偿构件; (3) 考虑既有结构拆除、新建结构施工、新旧结构连接工况下的受力机制, 对受力薄弱部位进行预加固结构设计[20] [21]。

参考佛山地铁 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结构受力结构的影响, 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[22], 如图 5 所示。

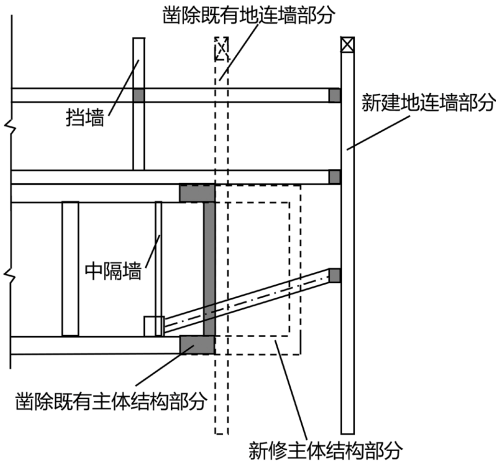


Figure 5. Cross-sectional diagram of Green Island Lake Station reconstruction project
图 5. 绿岛湖站扩宽改造工程横断面图

2.3. 监测及自动控制技术

2.3.1. 伺服系统变形控制技术

立体交通枢纽改扩建过程中, 保证既有结构、新建结构和周边环境安全是至关重要的, 常规钢筋混凝土结构在施工过程中不可避免地产生变形, 而自动伺服系统可以在施工过程中对于结构变形进行全天候不间断监测, 并根据高精度传感器所测参数值, 利用伺服千斤顶对结构进行轴力的自动补偿来达到控制变形目的, 确保结构安全。参考长春地铁 1 号线卫星广场站下穿轻轨 3 号线工程, 下穿段负一层顶板与轻轨隧道底板密贴接触, 形成“叠合板结构”。施工中, 先注浆加固下穿段土体, 然后采用六导洞 PBA 法配合伺服千斤顶顶升支撑修建下穿段, 然后逐步移除伺服千斤顶、拆除导洞初支、浇筑负一层顶板, 实现上下层板密贴, 最后修建剩余下穿段结构[23], 如图 6 所示。

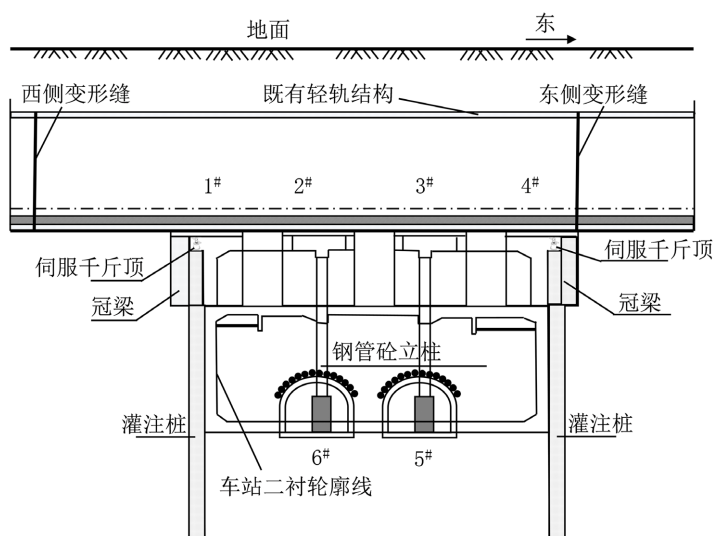


Figure 6. Station pilot tunnel layout
图 6. 车站导洞布置

2.3.2. 全天候监测技术

针对枢纽内的复杂情况, 为不影响枢纽的正常运营, 采用自动化监测系统, 对改扩建区域的既有车站、轨道、设备等进行监测, 通过对监测数据的相关分析和信息反馈, 掌握施工过程中受力与变形的关系。一方面, 能及时修正设计和指导施工, 实现对施工过程有效的预测和控制, 优化施工工序和调整施工措施; 另一方面, 能为及时判断枢纽内既有车站运营安全状况提供依据, 对可能发生的安全事故提供及时准确的预报, 使有关各方有时间做出反应, 避免恶性事故的发生, 进而确保改扩建工程期间枢纽安全运营。

参考西安地铁 4 号线右线下穿西安火车站内的 14 股道及 4 组道岔, 左线下穿西安火车站内的 15 股道及 8 组道岔, 并与陇海铁路正线斜交约 40 度, 在 4 号线施工过程中, 施工方根据监测预警, 及时对施工影响范围内的铁路股道采取了增加垫片及补充道砟等措施, 有力保证了既有铁路的正常运行[24] [25]。

3. 立体枢纽改扩建技术展望

随着大数据和机器学习算法的不断发展, 立体交通枢纽改扩建施工中需要朝着更加信息化、智能化、数字化、自动化的方向发展[26]。

(1) 向智能化方向发展

随着人工智能技术的进步, 伺服系统在数据处理和控制策略上取得了显著提升, 在立体枢纽改扩建

工程中,经常涉及对原有力系的转换。利用深度学习算法和实时传感数据的结合,建立智能化伺服系统,能够对结构变形、应力分布等参数进行动态调整,从而有效降低力系转换过程中的变形风险。

(2) 向数字化方向发展

立体枢纽改扩建工序复杂,管理难度大。随着 BIM (建筑信息模型)技术的深入应用,工程各方可以利用三维模型实现施工规划和管理全面数字化。BIM 技术在项目的各个阶段中实现了数据共享与协同工作,使得施工过程中的空间布局、进度控制以及资源分配更为精确。通过对施工流程进行数字化,不仅可以大幅提升施工效率和资源利用率,还可以为复杂施工环境下的空间协调提供精细化管理的支持,有利于立体枢纽改扩建的发展。

(3) 向自动化方向发展

随着监测和检测系统向更高精度、全天候的自动化方向发展。利用大数据和物联网技术,自动化监测系统能够对变形、应力等结构状态进行实时监控,通过机器学习算法分析监测数据,能够提前预警异常情况,防止潜在事故发生。自动化监测系统不仅可以提高施工的安全性和施工过程的可控性,也大大减少了人工巡检的成本,在未来可以应用在更多立体枢纽改扩建项目中。

4. 结论

随着干线铁路、城际铁路、市域郊铁路和轨道交通四网融合的发展,高效便捷的立体交通枢纽建设迫在眉睫。然而,立体交通枢纽改扩建过程中面临着地层多次扰动、结构变形协同、复杂立体力系转换等困难,由此带来的一系列施工难题且没有成熟的设计规范和施工标准可以参考。近年来,国内在复杂条件下立体枢纽改扩建工程上取得了较大的突破,积累了非常丰富的工程经验,在地层加固变形控制技术、立体空间力系转换及控制技术、监测及自动化控制技术等方面有了一定的技术突破。

1) 精细化主动控制。针对施工影响范围内的敏感、薄弱工程(部位),如施工下穿段、邻近结构变形缝等,采用超前注浆、超前小导管、管棚、管幕等措施进行加固,并结合工程现场需求进行既有结构变形精细化主动控制。

2) 空间复杂力系转换及补偿。枢纽扩建需要对既有车站顶板及侧墙破除改造,需完成受力体系的转换,为确保改造过程中既有车站运营安全,通过设置临时钢管支撑体系和轴力自动补偿伺服系统确保改造过程中的受力体系转换,待新建结构体系达到强度后,拆除站内临时支护体系,完成永久受力体系转换。

3) 自动伺服系统及智能化监测。对于施工影响控制和变形控制严苛部位,采用自动伺服系统减小新建施工的影响,并依据结构变形控制标准和施工进度,将人工监测和自动化监测的优势相结合进行“疏-密-粗-精”组合的全覆盖车站变形智能感知监测技术,通过施工时对既有结构的实时量测和及时调整,从而主动控制既有结构的变形。

随着大数据和机器学习算法的不断发展,立体交通枢纽改建工程将向着智能化、数字化、自动化的方向不断发展,保证改扩建工程安全、节能、高效地完成。

参考文献

- [1] 国务院关于印发“十四五”现代综合交通运输体系发展规划的通知[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2022(4): 8-28. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=Ahl6SgmbxDto5_zq-LUwePW08AxiNkrppxETdPUvqMIhaO-AnCv7J0QP1urAJ4LaJRx-ThQcSlOr6CAU5s-fMV0a29SnD5jBOLxS92aCHQfH-3M36QJtlgn9QJAnV-uHbeuSy-K7TEwY7L5x5Y4E9pYhXAbYV8yA3zUZ53MGCHw=&uniplatform=NZKPT
- [2] 王福文, 梁帅文, 冯爱军. 2023年我国城市轨道交通数据统计与发展分析[J]. 隧道建设(中英文), 2024, 44(2): 393-400.
- [3] 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.
- [4] 李子玉, 乔永康, 吴晓雷, 等. 城市更新地区地下空间开发利用规划策略研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(S1): 143-151.
- [5] 陈湘生, 徐志豪, 包小华, 等. 中国隧道建设面临的若干挑战与技术突破[J]. 中国公路学报, 2020, 33(12): 1-14.
- [6] Li, L. and Loo, B.P.Y. (2016) Towards People-Centered Integrated Transport: A Case Study of Shanghai Hongqiao Comprehensive Transport Hub. *Cities*, **58**, 50-58. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2016.05.003>
- [7] 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.
- [8] 石树稳. 软土地区地铁车站改扩建浅析[J]. 中国水运(下半月), 2013, 13(6): 283-284.
- [9] 雷升祥, 刘志春, 黄双林, 等. 城市地下空间网络化拓建相关研究进展[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(5): 1424-1440.
- [10] Yang, W., Ye, X., Li, R. and Yang, J. (2022) Effect of Stray Current on Corrosion and Calcium Ion Corrosion of Concrete Reinforcement. *Materials*, **15**, Article No. 7287. <https://doi.org/10.3390/ma15207287>
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 周晓军, 刘建国. 地铁车站明挖深基坑近接既有建筑物基础的预应力锚索施工技术[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(1): 77-84.
- [14] 邢雨蒙. 暗挖通道下穿立交桥地层加固施工关键技术及监测分析[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(7): 50-54.
- [15] 李旭东, 李崇旦, 张向军, 等. 抗浮板加固体在地铁上盖物业开发中的应用及改进建议[J]. 建筑结构, 2022, 52(S1): 2282-2288.
- [16] 张子新, 李佳宇, 周湘, 等. 近距离开挖卸荷条件下运营地铁高架桥墩响应研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(12): 3531-3540.
- [17] Shan, H., Yu, F., Xia, T., Lin, C. and Pan, J. (2017) Performance of the Underpinning Piles for Basement-Supplementing Retrofit of a Constructed Building. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, **31**, Article ID: 04017017. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cf.1943-5509.0001008](https://doi.org/10.1061/(asce)cf.1943-5509.0001008)
- [18] 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(S1): 162-169.
- [19] 麻建飞, 贺少辉, 李益铭, 等. 新建地铁车站密贴下穿长久运营车站预支顶开挖构筑技术[J]. 铁道标准设计, 2024, 68(8): 115-122.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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(S2): 172-177.
- [23] 杜文, 王永红, 李利, 等. 双层车站密贴下穿既有隧道案例分析及隧道沉降变形特征[J]. 岩土力学, 2019, 40(7): 2765-2773.
- [24] 翁木生. 西安火车站咽喉区下地铁车站设计与优化研究[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(6): 139-145.
- [25] 陈湘生, 付艳斌, 陈曦, 等. 地下空间施工技术进展及数智化技术现状[J]. 中国公路学报, 2022, 35(1): 1-12.
- [26] 翁木生. 地铁车站下穿既有铁路站场咽喉区的施工方案及防护措施[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(5): 123-127.