

顶管穿越与并行对既有地铁盾构隧道的影响分析*

黄建华¹ 袁晓玉² 张建昆¹

(1. 福建理工大学土木工程学院, 350118, 福州; 2. 安阳学院建筑工程学院, 455002, 安阳)

摘要 [目的] 地下暗挖工程中, 隧道相互穿越工况越来越多且复杂, 因此迫切需要探究其相互作用和影响机制, 旨在把隧道变形控制在合理范围内。[方法] 结合顶管穿越既有盾构隧道工程实例, 模拟分析顶管穿越与并行施工对既有地铁盾构隧道的影响规律并与实测成果验证。[结果及结论] 既有隧道变形随着与顶管的距离增大而减小; 顶管垂直穿越施工, 既有地铁隧道最大变形位于顶管中轴线处; 顶管开挖面在距离地铁盾构隧道中轴线 12 m 范围内, 地铁盾构隧道变形最大; 顶管并行穿越施工的影响区域主要在顶管开挖面前方 20 m 和后 10 m 范围内。

关键词 地铁盾构隧道; 顶管; 穿越; 并行; 影响分析

中图分类号 U455.43; U231

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2025.03.006

Impact Analysis of Pipe Jacking Crossing and Parallel Construction on Existing Metro Shield Tunnels

HUANG Jianhua¹, YUAN Xiaoyu², ZHANG Jiankun¹

(1. Department of Civil Engineering, Fujian University of Technology, 350118, Fuzhou, China; 2. School of Architectural Engineering, Anyang University, 455002, Anyang, China)

Abstract [Objective] In underground excavation projects, the working conditions of tunnels crossing each other are becoming increasingly frequent and complex. It is therefore imperative to investigate their interactions and mutual impact mechanisms to control tunnel deformation within a reasonable range. [Method] Based on an engineering case of pipe jacking crossing an existing shield tunnel, a simulation analysis is conducted to study the impact patterns of pipe jacking and parallel construction on the existing metro shield tunnel, and the results are validated against actual measurement data. [Result & Conclusion] The deformation of existing tunnel decreases as the distance from the pipe jacking expands. During the pipe jacking vertical crossing, the maximum deformation of the existing metro tunnel occurs at the central axis of the pipe jack-

ing. Within 12 meters of the pipe jacking excavation face from the central axis of the metro shield tunnel, the deformation of the metro shield tunnel reaches its maximum. For pipe jacking parallel crossing construction, the influence zone primarily extends 20 meters ahead of and 10 meters behind the pipe jacking excavation face.

Key words metro shield tunnel; parallel; pass through; pipe jacking; impact analysis

随着城市地下空间开发利用的持续深入, 新建管道穿越现有地铁盾构隧道的情况日益增多。此过程中, 土层的扰动常诱发隧道产生一系列位移与变形, 进而威胁地铁列车的正常运行。因此, 探究顶管穿越施工对既有地铁盾构隧道变形的影响具有极其重要的价值^[1-2]。针对顶管施工引发的扰动问题, 已有学者对顶管作业对周边土体及邻近隧道的扰动机制进行了剖析, 实施了扰动区域划分, 并深入研究了正面推力、地层损失、摩擦力及注浆压力等因素对周边土体应力和位移的作用机制^[3-5]。随着穿越工况频现, 众多学者针对顶管穿越施工对土体及邻近隧道的影响规律展开了研究, 发现既有隧道的变形随注浆压力、周边土体弹性模量及交叠角度的增加而减小, 而随覆土厚度及顶管管径的增大而加剧^[6-9]; 此外, 先行施工的下层顶管所引发的地面最大沉降量占比高达总沉降的 80%, 且先上后下的施工顺序导致的地面沉降量大于先下后上的顺序^[10-11]。

上述研究主要聚焦于单一穿越形式下顶管施工对邻近隧道的扰动, 而未能全面考虑不同穿越形式施工对既有隧道的影响。本研究基于顶管穿越既有盾构隧道的工程实例, 系统分析了不同穿越形式及不同距离条件下顶管施工对既有地铁盾构隧道变形的影响规律, 旨在为未来的顶管穿越既有隧道工程提供科学参考。

* 国家自然科学基金项目(51678153); 福建省自然科学基金项目(2021J011064)

1 模型的建立与验证

1.1 参数选取

本研究基于污水顶管上穿既有地铁盾构隧道的工程实例,如图 1 所示。污水管道采用 DN1400 的Ⅲ级钢筋混凝土管,自北向南顶进,依次穿越既有盾构隧道的左线和右线。地铁盾构隧道覆土厚度约为 26.7~27.3 m。

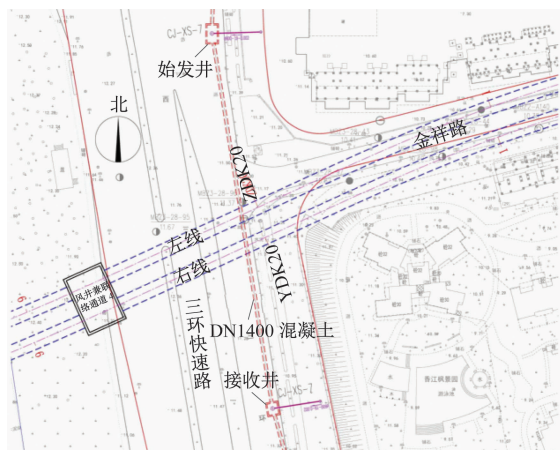


图 1 工程总平面图

Fig. 1 General engineering layout

顶管主要穿越的土层为粗中砂(中密),各土层物理力学性质见表 1。地铁盾构隧道采用混凝土强度等级为 C50 高强混凝土,衬砌圆环管片内径为 5.50 m,管片厚度为 0.35 m,管片长度为 1.20 m。由于环向螺栓降低了管片整体刚度,管片结构弹性模量按混凝土弹性模量的 0.8 倍计算。钢筋混凝土顶管每节长为 2 m,其结构物理力学性质见表 2。

表 1 土层物理力学性质

Tab. 1 Physical and mechanical properties of soil layers

土层名称	厚度/ m	重度 γ / (kN/m^3)	黏聚力 C / kPa	内摩擦 角 Φ / ($^\circ$)	变形 模量 E_0 /MPa	卸载 模量 E /MPa
杂填土	2.9	18.0	6	12	4	12
粗中砂(稍密)	7.8	18.5	4	22	10	30
粗中砂(中密)	26.5	18.8	4	25	12	36
卵石	12.8	21.0	5	35	40	120

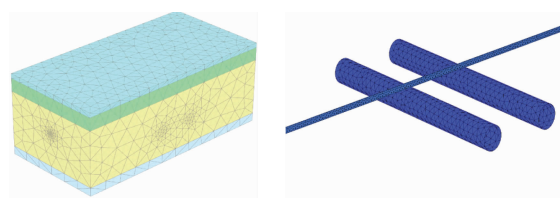
表 2 结构物理力学性质

Tab. 2 Structural physical and mechanical properties

名称	混凝土 等级	重度 γ / (kN/m^3)	弹性模量 E /MPa	泊松 比 ν	备注
盾构管片	C50	26	27 600	0.2	折减 0.8
顶管管片	C30	26	30 000	0.2	
盾构外壳	钢	76	210 000	0.2	

1.2 模型建立

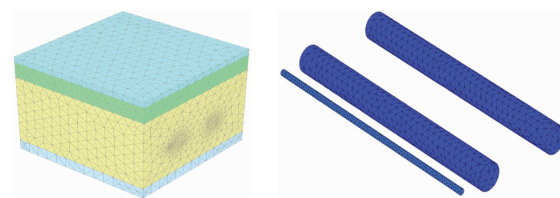
为模拟污水顶管在不同距离下垂直上穿和下穿对地铁盾构隧道的影响,建立了三维有限元模型。土体采用 HS(土体硬化)模型。地铁盾构隧道和顶管结构采用板单元模拟。模型尺寸为 120 m(X 轴,平行于顶管) \times 60 m(Y 轴,平行于地铁盾构隧道) \times 50 m(Z 轴,土层厚度),如图 2 所示。地铁盾构隧道中轴线分别位于 X 轴 50 m 和 70 m 处。顶管与地铁盾构隧道之间的距离 H 选取 1.4 m、4.2 m、7.0 m 三种工况,分别建立上穿和下穿模型。



a) 整体模型网格划分 b) 顶管垂直穿越盾构隧道
图 2 顶管垂直穿越施工有限元网格划分

Fig. 2 Finite element meshing for pipe jacking vertical crossing construction

为模拟顶管并行穿越施工的影响,另建模型尺寸为 60 m(X 轴,垂直于污水顶管) \times 60 m(Y 轴,平行于地铁盾构隧道) \times 50 m(Z 轴,土层厚度),如图 3 所示。地铁盾构隧道中轴线分别位于 X 轴 20 m 和 40 m 处。研究顶管与地铁盾构隧道间距 L 分别为 0.7 m、1.4 m、2.1 m、2.8 m、4.2 m 时,顶管施工对既有隧道位移的影响。



a) 整体模型网格划分 b) 顶管并行盾构隧道
图 3 顶管并行穿越施工有限元网格划分

Fig. 3 Finite element mesh division for pipe jacking parallel crossing construction

1.3 模型验证

通过对比既有地铁隧道右线拱顶实测数据与数值分析结果,验证了数值模拟的正确性。顶管开挖完成后,地铁隧道右线拱顶的最终竖向位移如图 4 所示。数值模拟结果与现场实测在曲线形状和趋势上基本一致,但现场实测结果略大于数值计算结果。数值模拟的最大变形值为 0.378 mm,而现场

实测为0.500 mm。初步分析认为,施工现场环境复杂、地铁列车运营过程中的动荷载、顶管施工的顶进速度、顶推力大小及纠偏等因素均可能对既有隧道变形产生影响,而这些因素在数值模拟中未完全考虑,导致模拟结果与实测数据存在微小差异。实际施工中应严格控制施工速度和方向,合理控制顶推力和注浆压力,以减小施工扰动。

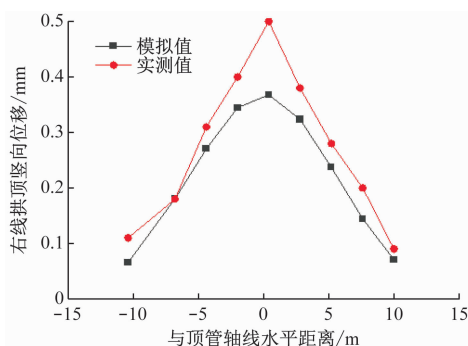


图4 右线拱顶变形模拟值与实测结果对比

Fig. 4 Comparison between the simulated and field-measured results of right-line vault deformation

2 数值模拟结果分析

2.1 顶管上穿下穿施工对盾构隧道的影

顶管垂直穿越施工后,左、右线地铁盾构隧道的变形大致相同。选取左线地铁盾构隧道拱底竖向位移数据,分析3种不同距离下隧道底部竖向位移变化情况。图5为顶管上穿完成时左线地铁盾构隧道的竖向位移情况。图6为顶管下穿完成时左线地铁盾构隧道的竖向位移情况。

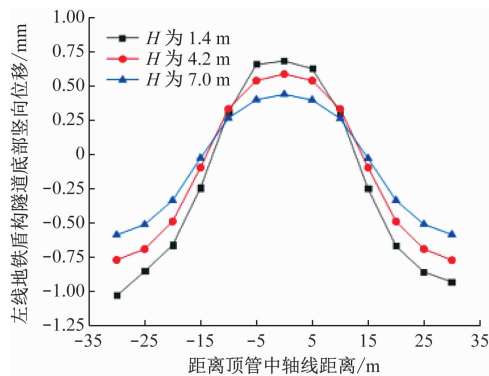


图5 顶管上穿完成时左线地铁盾构隧道的竖向位移情况

Fig. 5 Vertical displacement of the left-line metro shield tunnel upon pipe jacking top-crossing completion

由图5可知:当顶管上穿地铁盾构隧道时,由于卸荷作用,隧道在顶管中轴线附近发生隆起变形,

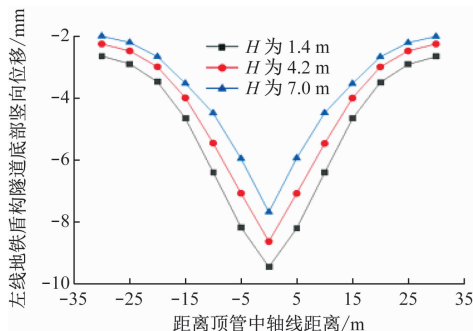


图6 顶管下穿完成时左线地铁盾构隧道的竖向位移情况

Fig. 6 Vertical displacement of the left-line metro shield tunnel upon pipe jacking bottom-crossing completion

而远离顶管轴线的区域主要发生沉降变形。隧道竖向变形随与顶管距离增大而减小。

由图6可知:顶管下穿地铁盾构隧道时,隧道整体主要发生沉降变形,且变形关于顶管中轴线对称。顶管距离隧道越近,施工对隧道的影响越大,变形幅度也越大。

对比发现,相同距离下顶管下穿施工对既有盾构隧道的影响比上穿更大。当顶管与既有隧道间距分别为1.4 m、4.2 m、7.0 m时,下穿施工导致的左线盾构隧道最大竖向变形分别是上穿的14.1倍、14.8倍和19.5倍。因此,顶管穿越施工应优先选择上穿方式。

2.2 顶管上下穿越盾构隧道动态变形

为研究顶管施工过程中地铁盾构隧道的竖向动态变形,选取数据点进行分析。由于隧道变形关于顶管中轴线对称,故选取隧道底部1/2处数据点。每开挖4 m记录一次数据点变形情况,分析顶管在1.4 m、4.2 m、7.0 m三种垂直距离下穿越过程中对隧道竖向变形的影响。

图7和图8为顶管上穿左、右线盾构隧道1/2处竖向变形与开挖进度的关系。由图7和图8可知:左线隧道在顶管开挖进度为0~38 m时发生一定沉降;当开挖面距离隧道中轴线约12 m(即开挖至38 m处)时,隧道变形急剧增加;开挖至62~100 m时,由于开挖面远离左线隧道,扰动减小,隧道整体缓慢沉降;开挖至100~120 m时,隧道变形保持稳定。右线隧道在开挖进度为0~20 m时几乎不变形;开挖至20~58 m时发生一定沉降;开挖至58~82 m时整体向上移动;开挖至82~120 m时整体缓慢沉降。

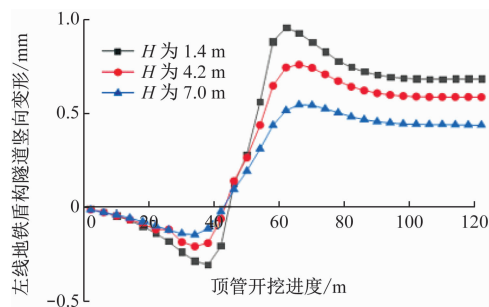


图7 上穿左线盾构隧道1/2处竖向变形与开挖进度的关系

Fig. 7 Relationship between vertical deformation and excavation progress at 1/2 of top-crossing left-line shield tunnel

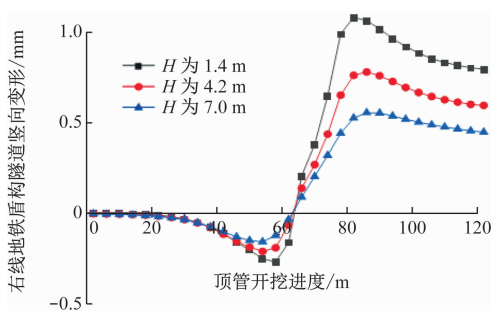


图8 上穿右线盾构隧道1/2处竖向变形与开挖进度的关系

Fig. 8 Relationship between vertical deformation and excavation progress at 1/2 of top-crossing right-line shield tunnel

图9和图10为顶管下穿左、右线盾构隧道1/2处竖向变形与开挖进度的关系。左线隧道在开挖进度为0~38 m时发生缓慢沉降;开挖至38~62 m时变形急剧增加;开挖至62~100 m时整体缓慢沉降;开挖至100~120 m时变形保持稳定。右线隧道

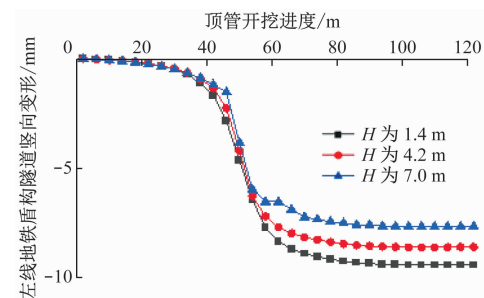


图9 下穿左线盾构隧道1/2处竖向变形与开挖进度的关系

Fig. 9 Relationship between vertical deformation and excavation progress at 1/2 of bottom-crossing left-line shield tunnel

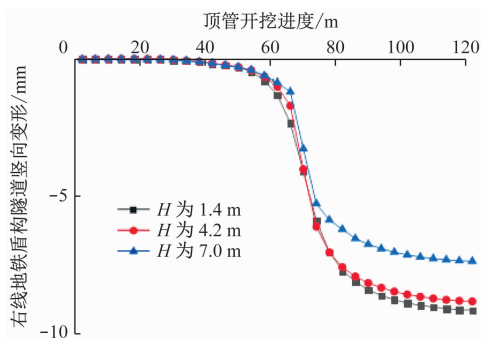


图10 下穿右线盾构隧道1/2处竖向变形与开挖进度的关系

Fig. 10 Relationship between vertical deformation and excavation progress at 1/2 of bottom-crossing right-line shield tunnel

在开挖进度为0~20 m时几乎不变形;开挖至20~58 m时发生一定沉降;开挖至58~82 m时快速沉降;开挖至82~120 m时整体缓慢沉降。

因此,顶管垂直穿越施工时,隧道的变形与开挖面的距离有关。当开挖面距离隧道中轴线约12 m时,隧道变形急剧增加;当开挖面距离隧道中轴线约50 m时,隧道开始发生变形;当距离超过50 m后,顶管施工对隧道的影响几乎可以忽略不计。

2.3 顶管并行盾构隧道时的动态变形

图11—图14为顶管并行施工时地铁盾构隧道的动态水平变形情况。顶管开挖顶进对隧道的的影响区域主要在开挖面前方20 m和后方10 m范围内。

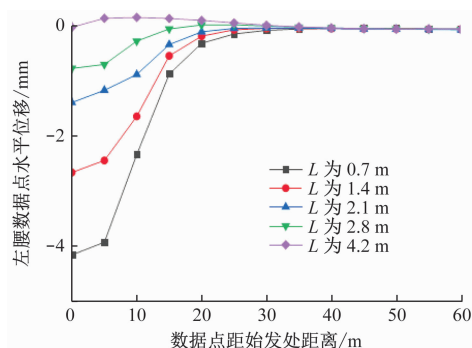


图11 开挖进度10 m时盾构隧道左腰的水平位移

Fig. 11 Horizontal displacement of shield tunnel left waist at excavation progress of 10 m

隧道的水平变形与顶管与隧道的水平距离密切相关。在顶管与隧道水平距离为0.7 m、1.4 m和2.1 m时,隧道左腰产生向外凸出变形,且变形随水平间距增大而减小;在水平距离为2.8 m和4.2

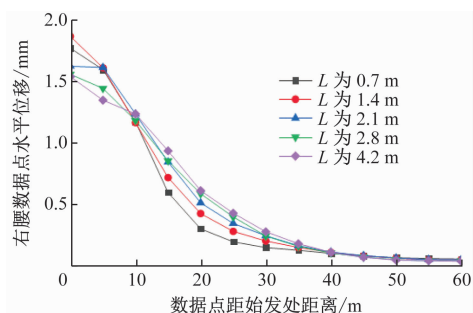


图12 开挖进度10 m时盾构隧道右腰的水平位移

Fig. 12 Horizontal displacement of shield tunnel right waist at excavation progress of 10 m

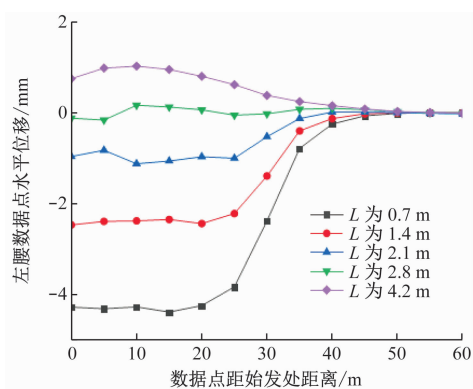


图13 开挖进度30 m时盾构隧道左腰的水平位移

Fig. 13 Horizontal displacement of shield tunnel left waist at excavation progress of 30 m

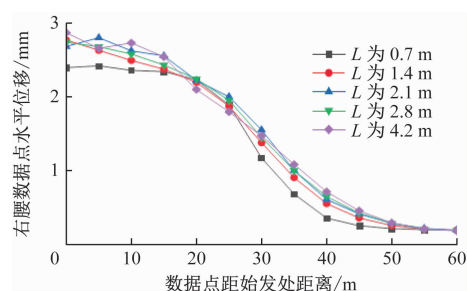


图14 开挖进度30 m时盾构隧道右腰的水平位移

Fig. 14 Horizontal displacement of shield tunnel right waist at excavation progress of 30 m

m时,由于顶管距离隧道较远,隧道左腰发生凹陷变形。隧道右腰主要产生向外水平变形;在开挖面前方一段距离内,右腰水平变形随水平距离增大而增大;但在开挖面后方已开挖区域,五种工况下右腰水平位移相差不大。

3 结论

1) 顶管在上穿和下穿施工时,地铁盾构隧道的最大变形值均出现在顶管中轴线处,距顶管中轴线

位置越远,地铁盾构隧道的变形越小,且地铁盾构隧道的变形关于顶管中轴线对称。

2) 顶管在不同距离下垂直上穿和下穿地铁盾构隧道,随着垂直距离的增大,地铁盾构隧道的变形变小。顶管与地铁盾构隧道在相同距离下,顶管下穿施工比上穿对地铁隧道的变形影响更大。

3) 顶管从上方和下方垂直穿越地铁盾构隧道,当开挖面距地铁隧道中轴线50 m范围内会对地铁竖向变形产生影响;当开挖面距地铁隧道中轴线12 m范围内,地铁盾构隧道发生的变形最大,是最危险的施工阶段。

4) 顶管并行盾构隧道时,顶管顶进过程对地铁盾构隧道的主要影响区为顶管开挖面前方20 m和开挖面后方10 m。顶管与既有盾构隧道水平距离在0.7 m、1.4 m和2.1 m三种工况下,地铁盾构隧道左腰发生外凸变形,且变形随着水平间距增大而减小;水平距离为2.8 m和4.2 m工况下,地铁盾构隧道左腰发生凹陷变形,右腰在5种工况下始终发生外凸变形,且水平变形相差不大。

参考文献

- [1] 刘波,章定文,刘松玉,等. 大断面顶管通道近接穿越下覆既有地铁隧道数值模拟与现场试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(11): 2850.
LIU Bo, ZHANG Dingwen, LIU Songyu, et al. Numerical simulation and field monitoring on a large cross-section pipe-jacking underpass traversing existing metro tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(11): 2850.
- [2] 张文瀚,谢雄耀,李攀. 浅层顶管隧道施工对路基变形影响数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(增刊2): 1619.
ZHANG Wenhan, XIE Xiongyao, LI Pan. Numerical analysis of influence of shallow pipe jacking tunnel construction on subgrade deformation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(S2): 1619.
- [3] 房营光,莫海鸿,张传英. 顶管施工扰动区土体变形的理论与实测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 601.
FANG Yingguang, MO Haihong, ZHANG Chuanying. Theoretic and testing analysis of soil deformation in the area of disturbance caused by pipe-jacking[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(4): 601.
- [4] 黄宏伟,胡昕. 顶管施工力学效应的数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003(3): 400.
HUANG Hongwei, HU Xin. 3D numerical analysis of construction mechanics effect of pipe-jacking[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003(3): 400.
- [5] 马险峰,邹宇翔,李向红,等. 顶管注浆压力变化对地层沉

- 降影响机理的离心模型试验[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(5): 110.
- MA Xianfeng, ZOU Yuxiang, LI Xianghong, et al. Centrifugal model test on the influence mechanism of pipe jacking grouting pressure on formation settlement[J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(5): 110.
- [6] 房明, 刘镇, 周翠英, 等. 新建隧道盾构下穿施工对既有隧道影响的三维数值模拟[J]. 铁道科学与工程学报, 2011, 8(1): 67.
- FANG Ming, LIU Zhen, ZHOU Cuiying, et al. 3-D numerical simulation of influence of undercrossing shield construction on existing tunnel[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2011, 8(1): 67.
- [7] 杨果岳, 刘浩航, 尹志政, 等. 顶管上穿施工对既有地铁隧道的影响[J]. 吉首大学学报(自然科学版), 2014, 35(2): 57.
- YANG Guoyue, LIU Haohang, YIN Zhizheng, et al. Influence analysis of perpendicular crossing pipe jacking constructed above existing shield tunnel[J]. Journal of Jishou University (Natural Sciences Edition), 2014, 35(2): 57.
- [8] 杨荟斯, 刘涛, 缪红彬, 等. 盾构隧道近距离下穿对既有运营隧道影响[J]. 大连理工大学学报, 2022, 62(3): 263.
- YANG Huisi, LIU Tao, MIAO Hongbin, et al. Influence of shield tunnel undercrossing in close distance on existing operating tunnel[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2022, 62(3): 263.
- [9] LIN X T, CHEN R P, WU H N, et al. Deformation behaviors of existing tunnels caused by shield tunneling undercrossing with oblique angle[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 89: 78.
- [10] ZANG Y, GAN P, YAN J J, et al. Effects of construction sequences and volume loss on perpendicularly crossing tunnels[J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019(1): 1.
- [11] 安关峰, 王谭, 司海峰, 等. 施工顺序及不同管材对双层顶管隧道施工引起地面沉降的影响研究[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(4): 119.
- AN Guanfeng, WANG Tan, SI Haifeng, et al. Influence of construction sequence and different types of pipes on ground surface settlement caused by the construction of two-layer jacking-pipes[J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(4): 119.
- 收稿日期:2022-12-06 修回日期:2023-01-14 出版日期:2025-03-10
Received:2022-12-06 Revised:2023-01-14 Published:2025-03-10
· 第一作者:黄建华,教授,huangjh@fjut.edu.cn
通信作者:袁晓玉,硕士研究生,2498483929@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 28 页)

- [16] LIU Y, QUAN W, LU X, et al. A novel arcing detection model of pantograph-catenary for high-speed train in complex scenes[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 5012013.
- [17] 顾桂梅, 吴俊明, 全甄, 等. 基于融合图像连通区域提取的弓网燃弧自动检测方法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54(5): 461.
- GU Guimei, WU Junming, TONG Zhen, et al. Automatic detection method of pantograph-catenary burning arc based on fusion image connected region extraction[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2021, 54(5): 461.
- [18] 吴琛, 伍川辉, 杨恒, 等. 基于 LabVIEW 图像处理的弓网拉弧在线监测研究[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(9): 145.
- WU Chen, WU Chuanhui, YANG Heng, et al. Pantograph-catenary arc online monitoring research based on image processing technology of LabVIEW[J]. Railway Standard Design, 2018, 62(9): 145.
- [19] FAN F, WANK A, SEFERI Y, et al. Pantograph arc location estimation using resonant frequencies in DC railway power systems[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7(4): 3083.
- [20] 李斌, 阎君宇. 基于 GAF-CNN 的弓网电弧识别方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(1): 188.
- LI Bin, YAN Junyu. Research on recognition method of pantograph arc based on GAF-CNN[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(1): 188.
- [21] GAO G, YAN X, YANG Z, et al. Pantograph - catenary arcing detection based on electromagnetic radiation[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2019, 61(4): 983.
- [22] 张明志, 杨铁轩, 金梦哲, 等. 弓网分离时刻牵引电流相位对弓网离线电磁骚扰影响研究[J]. 中国铁道科学, 2023, 44(2): 151.
- ZHANG Mingzhi, YANG Yixuan, JIN Mengzhe, et al. Study on the influence of traction current phase on the off-line electromagnetic disturbance of pantograph-catenary at the time of pantograph-catenary separation[J]. China Railway Science, 2023, 44(2): 151.
- 收稿日期:2024-04-29 修回日期:2024-07-08 出版日期:2025-03-10
Received:2024-04-29 Revised:2024-07-08 Published:2025-03-10
· 第一作者:张昱航,硕士研究生,2137088920@qq.com
通信作者:魏志恒,助理研究员,17801071916@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license