

大直径盾构切穿地下连续墙对既有地铁车站变形影响的仿真分析

袁 啸¹ 李章林² 何国军² 张孟喜¹ 赵慧玲¹

(1. 上海大学力学与工程科学学院, 200444, 上海; 2. 上海隧道工程有限公司, 200032, 上海)

摘 要 [目的] 盾构隧道掘进过程中切削穿越既有地下结构会对结构产生不利影响, 需要对盾构穿越引起的结构及地层变形进行研究。[方法] 依托南京建宁西路过江通道的超大直径盾构隧道切穿既有地铁车站地下连续墙实际工程, 建立隧道-车站-地层的三维数值模型, 研究隧道切穿车站地下连续墙与桩基时地面的沉降与车站结构的变形。[结果及结论] 仿真研究结果表明, 车站桩基对沉降控制作用明显, 盾构掘进切除桩下部后, 切口上方地表产生较大沉降; 切穿地下连续墙后, 墙体形成以被切处为中心的沉降槽, 产生不均匀沉降; 盾构切穿车站地下连续墙引起运营地铁线两股钢轨的差异沉降, 但在安全控制指标范围内。该仿真预测性分析结果可为该工程后期施工与监测, 也为同类盾构隧道切穿既有地下工程的施工优化提供参考。

关键词 盾构掘进; 地铁车站; 地下连续墙; 切削穿越

中图分类号 U455.43; U231.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.01.044

Simulation Analysis of Large Diameter Shield Cutting through Diaphragm Wall Impact on Metro Station Deformation

YUAN Xiao¹, LI Zhanglin², HE Guojun², ZHANG Mengxi¹, ZHAO Huiling¹

(1. School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, 200444, Shanghai, China; 2. Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., 200032, Shanghai, China)

Abstract [Objective] Cutting through the existing underground structure in the process of shield tunneling will cause adverse effects on the structure. Therefore, it is necessary to study the consequent deformation of the structure and the stratum caused by shield tunneling. [Method] Based on the actual project of the super-large diameter shield tunnel of Nanjing Jianning West Road river-crossing passage that cuts through the diaphragm wall of the existing metro station, a three-dimensional numerical model of tunnel-station-stratum is established, to study the ground settlement and the deformation of the station structure when the tunnel cuts through the diaphragm wall and pile foundation of the station. [Result & Conclusion]

The simulation research results show that the station pile foundation has a significant effect on settlement control. After the shield tunneling cuts off the lower part of the pile, a large settlement occurs on the ground surface above the incision. After the diaphragm wall being cut through, a settlement trough forms centered on the cut place of the wall, resulting in uneven settlement. The shield cutting through the underground diaphragm wall of the station causes differential settlement of two rails on the operating metro line, but still within the range of safety control index. The predictive results of this simulation analysis can provide a reference for the following construction and monitoring of this project, as well as for the construction optimization of similar shield tunnels cutting through existing underground engineering.

Key words shield tunneling; metro station; underground diaphragm wall; cutting through

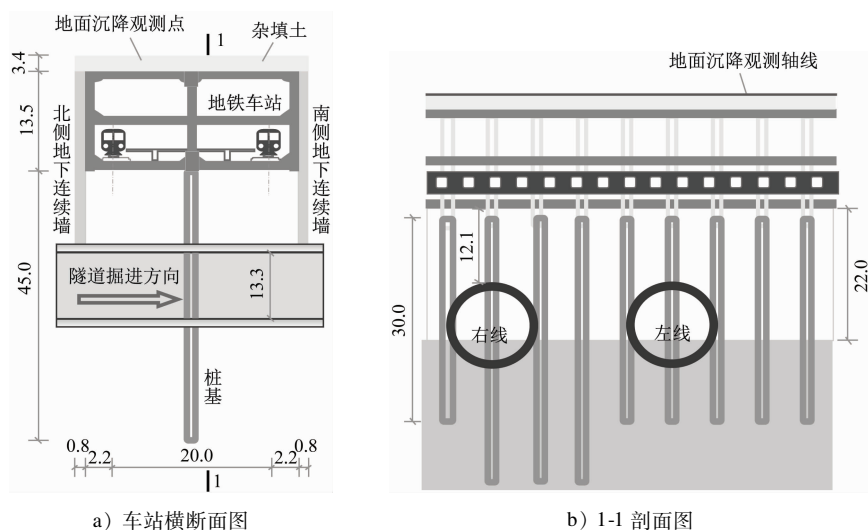
大直径盾构隧道掘进施工易对土体与建筑物造成扰动^[1]。目前, 针对盾构下穿地下建筑的研究成果较丰富, 包括土体位移场分布规律、预测建筑沉降范围与沉降量^[2]、下穿各参数对施工及结构影响^[3]等方面。隧道穿越的形式与靠近距离是影响扰动程度的关键参数^[4-5], 其中隧道直接切穿结构基础对结构与周围岩土体的扰动最大。文献[6]基于实测数据分析发现, 盾构切穿桩基时周围土体迅速沉降, 沉降量达最终沉降的70%。文献[7]指出, 盾构切割玻璃纤维筋桩体时的过大定力易使地面隆起, 还可能导致桩体发生脆性整体破坏。盾构切穿地下建筑对土层、结构的影响机制复杂, 尚需深入研究。本文研究依托南京建宁西路过江通道大直径隧道工程, 该隧道掘进过程中需切削穿越建宁西路地铁车站部分基础, 切穿会引起多次应力重分布, 导致既有地铁车站受力变形及土体沉降, 影响地铁运营与周边环境安全。仿真预测分析盾构切穿全过程车站与周围土体的变形规律, 对隧道安全

施工具有重要参考意义。

1 工程概况

南京建宁西路过江通道大直径盾构隧道在穿越过程中先后切穿已建地铁车站的北侧地下连续墙、车站底板下桩基、南侧地下连续墙。隧道与地铁车站相对位置关系见图 1, 切穿过程示意图见图 2。本文以右线隧道为分析对象。隧道穿越土层主要为淤泥质粉质黏土、粉土、粉砂地层。隧道衬砌内径 13.3 m, 外径 14.5 m, 埋深为 28.9 m。车站顶板

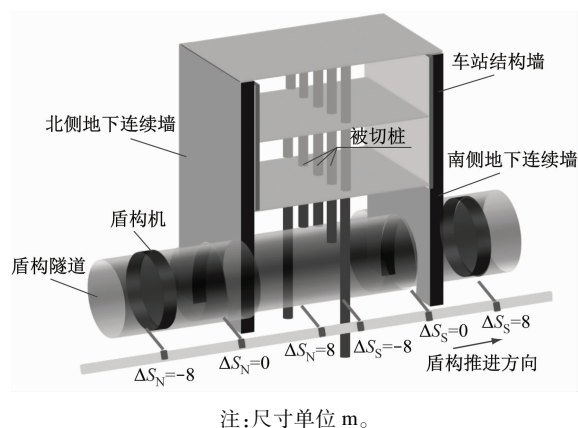
埋深 3.4 m, 结构尺寸为 120 m × 20 m × 13.5 m, 上层为站厅层, 下层为站台层, 地铁轨道中线距墙体 2.2 m; 车站采用 0.8 m 厚地下连续墙, 地下连续墙与结构墙叠合形成整体, 嵌入土体深度为 22.0 m。桩基沿车站纵向布置, 与上部结构柱相连, 共 14 根桩基, 分别为 3 根 45 m 长桩, 11 根 30 m 短桩。盾构下穿位置在车站底板下方 12.1 m, 两者平面交角约为 89°。盾构切穿地下连续墙和桩基 3 根 (分别为 2 根长桩与 1 根短桩)。



注: 尺寸单位 m。

图 1 隧道与地铁车站相对位置关系

Fig. 1 Relative position relationship of tunnel and station



注: 尺寸单位 m。

图 2 隧道切穿地铁车站结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the tunnel cutting through metro station

为便于表示隧道盾构掘进切穿进程, 用 ΔS_N 与 ΔS_S 分别表示盾构刀盘距车站北侧、南侧地下连续墙的距离, 见图 2。车站宽度为 20 m, 故 $\Delta S_N = 20$ m

与 $\Delta S_S = 0$ m 表示为同一个工况。盾构切穿北侧地下连续墙、桩基、南侧地下连续墙时 $\Delta S_N = 0$ m、 $\Delta S_N = 12$ m、 $\Delta S_N = 20$ m。

2 盾构切穿车站基础有限元模拟

2.1 计算模型及参数

采用有限元软件建立盾构隧道-地铁车站-地层三维模型, 考虑到边界效应, 模型尺寸为 180 m × 140 m × 81 m, 见图 3。车站为板柱墙结构, 结构柱与桩相连, 地下连续墙与结构墙相连。有限元模型中车站板采用壳单元, 桩基采用梁单元, 其余部分均采用实体单元。设置模型底部边界为固定, 四周边界面为法向约束, 顶部为自由边界。

隧道管片与车站钢筋混凝土结构采用线弹性模型, 弹性模量为 36.5 GPa, 泊松比为 0.17, 土体本构采用 Mohr-Columb 模型。土层物理力学参数见表 1。

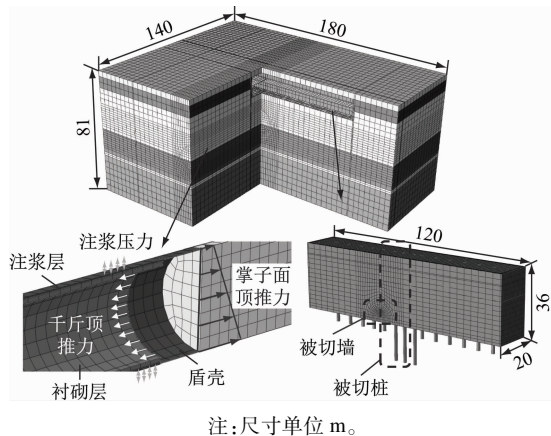


图3 盾构隧道-地铁车站-地层有限元网格

Fig. 3 Finite element grid of shield tunnel-metro station-stratum

表1 地层物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of stratum

岩土层编号	深度/m	重度/(kN/m ³)	弹性模量/MPa	泊松比	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa
① ₂	3.6	19.1	13.4	0.30	15.0	13.9
② _{2b4}	7.3	18.3	16.5	0.40	15.4	17.4
② _{2b3-4}	27.3	18.0	15.4	0.41	15.2	18.7
② _{3b3-4}	15.8	18.3	18.6	0.36	14.8	21.2
④ _{dl1}	2.4	19.7	10.1	0.28	33.2	3.8
⑧ ₁	25.0	19.3	24 510.0	0.22	28.0	32.0

2.2 盾构开挖工况模拟

盾构法施工主要包括刀盘切削土体、盾构机推进、管片拼装与壁后注浆4个步骤。土层-结构模型的应力平衡后,采用生死单元法模拟土体开挖与衬砌施工。开挖面压力呈线性分布(见图3),数值取0.7倍土层竖向静止土压力,为400~550 kPa;注浆压力取为上覆土层压力的1.2倍^[8],取为620 kPa;千斤顶推力依据工程实际与文献^[9]设置为3 MPa。

2.3 盾构推进引起的地表沉降数值模拟验证

基于盾构隧道已开挖里程的地表沉降监测对数值模拟进行验证,验证结果见图4。由图4可见:模拟结果与实测数据规律吻合,证明本数值模拟可较好地反映隧道掘进引起的土体位移场,可基于该模拟方法对下一步隧道切穿车站进行预测性分析。

3 盾构切穿车站地下连续墙仿真结果分析

3.1 切穿过程地表沉降分析

取车站正上方地表沉降进行分析,在车站纵轴

上方设观测点。图5为盾构掘进至车站正下方的地表沉降曲线。盾构切桩前,短桩正上方地表沉降较大且增长较快,长桩正上方地表沉降较小且增长较慢,沉降槽向短桩处偏移。盾构切穿桩基时,被切桩正上方地表位移出现突变,最大变化量5.23 mm。切桩后地表整体沉降变大,形成以切口为中心的沉降槽。盾构至 ΔS_N 为16 m时,地表沉降达到峰值11.14 mm。盾构切穿南侧地下连续墙时($\Delta S_N = 20$ m),地表沉降在盾构衬砌支撑与注浆压力作用下略减小。

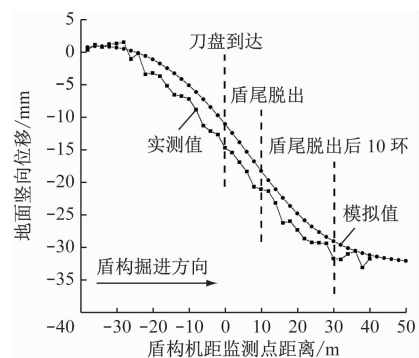


图4 地表沉降现场实测与数值模拟对比

Fig. 4 Comparison between on-site measurement and numerical simulation of ground settlement

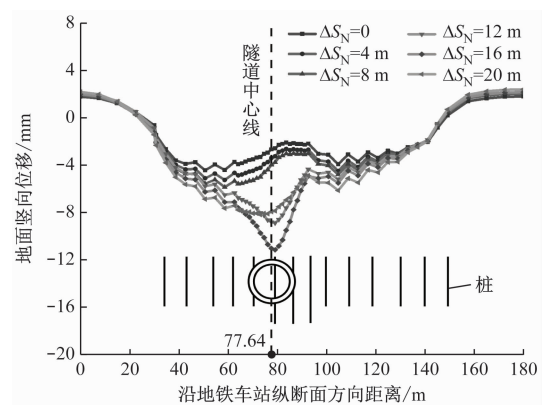


图5 盾构掘进至车站正下方时地表沉降曲线

Fig. 5 Ground settlement curve during shield tunneling right beneath the station

3.2 切穿过程车站变形分析

3.2.1 车站地下连续墙变形分析

盾构切穿地下连续墙时,墙体形成以切口为中心的沉降槽。切穿北侧地下连续墙过程墙顶竖向位移见图6,切北墙时($\Delta S_N = 0$ m)墙身位移增量最大,为2.2 mm。切南侧地下连续墙时墙体位移规律与切北墙类似。

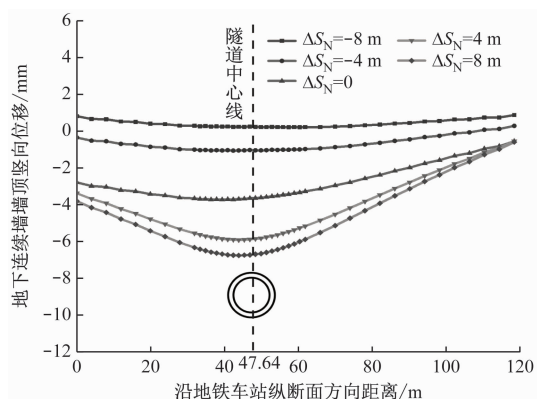


图6 盾构切穿北侧地下连续墙过程墙顶竖向位移

Fig. 6 Vertical displacement of the diaphragm wall top during shield tunnel cutting through the north wall

车站南北侧地下连续墙墙身的差异沉降见图7。盾构切穿北侧地下连续墙时($\Delta S_N = 0$ m),北侧墙产生沉降较大,车站结构整体向北侧倾斜。随着盾构掘进,南北侧墙差异沉降先增大后减小,差异沉降切桩前增大,切桩后明显减小。盾构切桩前 $\Delta S_N = 8$ m时,南北墙差异沉降达到7.0 mm,倾斜率为0.035%。

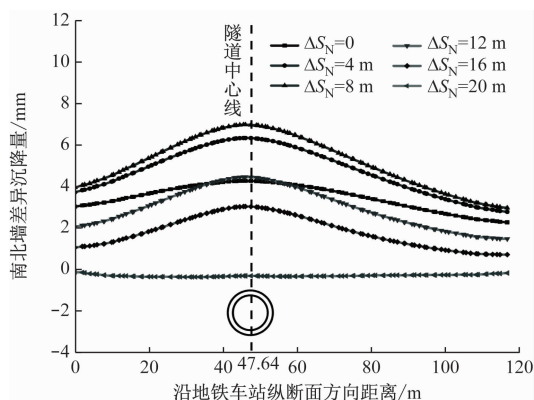


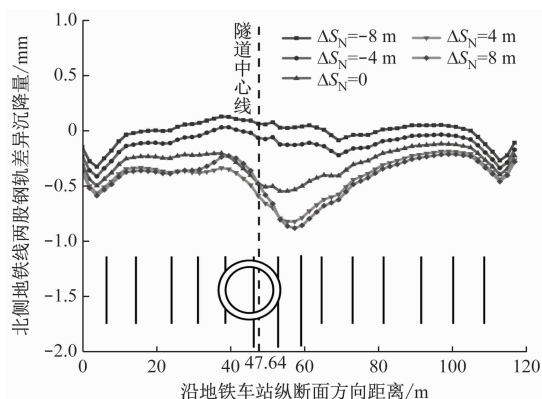
图7 盾构穿越车站过程南北侧地下连续墙差异沉降

Fig. 7 Differential settlement between the south and north diaphragm walls during shield tunnel cutting through the station

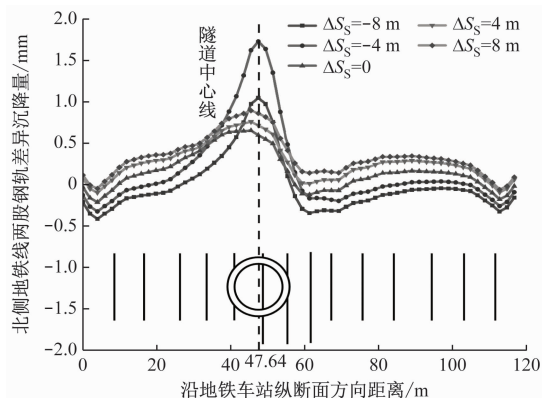
3.2.2 地铁线两股钢轨差异沉降分析

盾构切穿引起车站结构竖向位移分布不均,导致车站地铁线两股钢轨间差异沉降,且随盾构掘进不断变化,从而引起地铁列车轮毂振动,影响运营安全。图8为盾构穿越车站过程北侧地铁线两股钢轨差异沉降曲线。

盾构切穿北侧地下连续墙时($\Delta S_N = 0$ m),北侧地铁线两股钢轨向北侧倾斜;当盾构至 $\Delta S_N = 8$ m



a) 切穿北侧地下连续墙



b) 切穿南侧地下连续墙

图8 盾构穿越车站过程中北侧地铁线两股钢轨差异沉降
Fig. 8 Differential settlement of the two rails on the northern metro line during shield tunnel cutting through the station

(桩前2 m)时,两股钢轨差异沉降达到0.88 mm;当盾构切桩后,两股钢轨差异沉降迅速变化,当盾构至 $\Delta S_S = -8$ m(桩后2 m)时,两股钢轨已改变为向南侧倾斜,差异沉降达到1 mm;当盾构至 $\Delta S_S = -4$ m(桩后6 m)时,两股钢轨向南倾斜加剧,差异沉降达到峰值1.73 mm,倾斜率为0.12%,盾构切穿南侧地下连续墙时 $\Delta S_S = 0$ m,差异沉降减小为0.63 mm,随后两股钢轨差异沉降略增。

对于南侧地铁线路,当盾构机切穿北侧地下连续墙与桩基时,轨道的北端沉降大,南端沉降小,整体向北侧倾斜;在切穿桩基后迅速变化,整体变为向南侧倾斜,南侧地铁线两股钢轨间最大差异沉降达1.57 mm;当盾构切穿南侧地下连续墙时,两股钢轨差异沉降为0.70 mm。

根据CJJ/T 202—2013《城市轨道交通结构安全保护技术规范》^[10],南、北侧地铁线的两股钢轨间差异沉降(横向高差)以及车站纵向变形曲率需满足相应限值,见表2。经分析,盾构下穿引起的沉降

符合安全控制指标范围。

表 2 地铁轨道安全控制指标

Tab.2 Metro track safety control index

项目	两股钢轨横向高差/mm			车站纵向变形曲率半径/m		
	模拟值	预警值	控制值	模拟值	预警值	控制值
北侧轨道	1.73	<2	<4	19 231		
南侧轨道	1.57			18 519		>15 000

4 结语

基于实际监测验证的数值模拟对南京建宁西路过江通道大直径盾构隧道切穿地铁车站地下连续墙与桩基时的结构变形规律开展仿真预测分析,结论如下:

1) 盾构隧道穿越车站过程中切桩前长桩处地表沉降较短桩处小;切桩时被切桩上方地表沉降产生突变,形成以切口处为中心的沉降槽;切桩后地表沉降持续增加,在盾尾抽离切口前达到峰值。

2) 盾构切穿地下连续墙时墙体迅速沉降,并形成以切口处为中心的沉降槽。切穿北侧墙时,北侧墙产生沉降较南侧墙大,车站整体向北倾斜,随后南北侧墙差异沉降先增大后减小,切桩影响较大。

3) 盾构切穿引起车站结构竖向位移分布不均,导致地铁线两股钢轨倾斜,产生差异沉降,切穿地下连续墙与桩基加剧了倾斜程度与差异沉降,切穿桩基后达到峰值,但均在安全控制指标范围内。

参考文献

- [1] 王忠凯,徐光黎.盾构掘进、离开施工阶段对地表变形的影响范围及量化预测[J].岩土力学,2020,41(1):285.
WANG Zhongkai, XU Guangli. Influence range and quantitative prediction of surface deformation during shield tunnelling and exiting stages[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(1): 285.
- [2] 张运涛.地铁盾构隧道下穿既有地铁车站变形控制标准探讨[J].铁道标准设计,2022,66(9):123.
ZHANG Yuntao. Discussion on deformation control standard of shield tunnel passing under existing station[J]. Railway Standard Design, 2022, 66(9): 123.
- [3] 江华,张晋勋,江玉生,等.新建盾构隧道近距离下穿既有车站诱发结构变形特征研究[J].现代隧道技术,2016,53(1):159.
JIANG Hua, ZHANG Jinxun, JIANG Yusheng, et al. Characteristics of existing station deformation induced by the approaching construction of a new underlying shield tunnel[J]. Modern Tunneling Technology, 2016, 53(1): 159.
- [4] 马振超.北京既有线下穿工程的特点及影响规律研究[D].北京:北京交通大学,2012.
MA Zhenchao. Research on the characteristics and influence law of the project underpassing existing line in Beijing[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [5] 张琼方,夏唐代,丁智,等.盾构近距离下穿对已建地铁隧道的位移影响及施工控制[J].岩土力学,2016,37(12):3561.
ZHANG Qiongfang, XIA Tangdai, DING Zhi, et al. Effect of nearby undercrossing tunneling on the deformation of existing metro tunnel and construction control[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(12): 3561.
- [6] 王禹棕,李继超,廖少明.深圳地铁9号线盾构切削群桩数值模拟与实测分析[J].隧道建设,2017,37(2):192.
WANG Yuliang, LI Jichao, LIAO Shaoming. Numerical simulation and measured data analysis of pile group cutting by shield: a case study of running tunnel on line No. 9 of Shenzhen metro[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(2): 192.
- [7] 刘军,苟桂富,王芳,等.盾构始发与接收时顶力的数值模拟研究:以北京地铁15号线某盾构直接切削玻璃纤维筋桩工程为例[J].隧道建设,2016,36(3):264.
LIU Jun, XUN Guifu, WANG Fang, et al. Study on numerical simulation of thrusting force of shield launching and receiving: a case study on glassfiber reinforced plastic(GFRP) pile cut directly by shield machine used in line No. 15 of Beijing metro[J]. Tunnel Construction, 2016, 36(3): 264.
- [8] NINIĆ J, MESCHKE G. Simulation based evaluation of time-variant loadings acting on tunnel linings during mechanized tunnel construction[J]. Engineering Structures, 2017, 135: 21.
- [9] ZHANG M, LI S, LI P. Numerical analysis of ground displacement and segmental stress and influence of yaw excavation loadings for a curved shield tunnel[J]. Computers and Geotechnics, 2020, 118: 103325.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部.城市轨道交通结构安全保护技术规范:CJJ/T 202—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for protection structures of urban rail transit: CJJ/T 202—2013[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2013.

· 收稿日期:2022-09-22 修回日期:2022-10-28 出版日期:2025-01-10
Received:2022-09-22 Revised:2022-10-28 Published:2025-01-10
· 第一作者:袁啸,硕士研究生,542737042@qq.com
通信作者:赵慧玲,副教授,hzhao@shu.edu.cn
· ©《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