

城市轨道交通线路折返形式及其影响因素 对折返能力的影响*

曾小二

(西南交通大学信息科学与技术学院, 611756, 成都)

摘要 [目的]折返能力作为衡量城市轨道交通线路运载效率的关键指标,其提升是当前面临的重要课题。因此,深入分析城市轨道交通的折返形式及相关因素对折返能力的影响显得尤为重要。[方法]采用实验室自主研发的一套城市轨道交通列车运行仿真系统,以实际运营的城市轨道交通线路为例,对多种折返形式下的折返能力进行计算与分析。根据折返作业的具体流程,定性分析影响折返间隔的各种因素,并研究相关因素对折返能力的影响。在此基础上提出优化措施,并代入具体的站型中进行定量验算,计算各优化措施在不同折返形式下的提升能力和限制条件。[结果及结论]通常情况下,站后折返的折返能力强于站前折返。所提的缩短停站时间,提高道岔侧向限速,降低控车舒适度和停车准确性要求,缩短列车换端时间等优化措施,在不同折返形式下的提升效果存在差异,需根据实际情况进行灵活选择。基于车车通信的列车折返形式相比于传统的基于车地通信的折返形式,在折返能力上有显著提升。

关键词 城市轨道交通线路;折返形式;折返能力;影响因素

中图分类号 U292.5⁺1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.01.012

Influence of Urban Rail Transit Lines Turn-back Forms and Influencing Factors on the Turn-back Capacity

ZENG Xiao'er

(School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, 611756, Chengdu, China)

Abstract [Objective] Improving the turn-back capacity, a key indicator for evaluating the transportation efficiency of urban rail transit lines, is an important issue currently being faced. Therefore, it is of particular importance to conduct an in-depth analysis of the influence of urban rail transit turn-back forms and the related factors on turn-back capacity. [Method] In the case study of an actual operating urban rail transit line, a set of urban rail transit train operation simulation systems inde-

pently developed by the laboratory is adopted to calculate and analyze the turn-back capacity under various turn-back forms. According to the detailed process of turn-back operations, various factors affecting the turn-back interval are qualitatively analyzed, and the influence of the related factors on the turn-back capacity is studied. On this basis, optimization measures are put forward and quantitatively verified in specific types of station. The improvement capabilities and limiting conditions of each optimization measure are calculated under different turn-back forms. [Result & Conclusion] Under normal circumstances, the turn-back capacity of the train turning back behind the station is stronger than that in front of the station. The proposed optimization measures such as shortening the stop time, increasing the turnout lateral speed limit, lowering the requirements for train control comfort and parking accuracy, and shortening the train end-switching time have different improvement effects under different turn-back forms, and need to be flexibly selected according to the actual situation. The turn-back capacity is significantly improved with the train turn-back form based on vehicle-to-vehicle communication compared with the traditional one based on vehicle-to-ground communication.

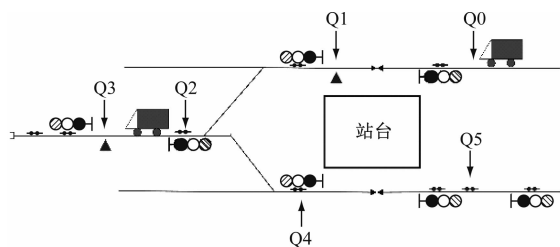
Key words urban rail transit lines; turn-back capacity; turn-back form; influencing factor

列车折返是限制城市轨道交通线路通过能力的主要瓶颈^[1]。目前,大多数研究通过定性分析各折返方式的特点、各环节折返时间分配等,提出折返能力的提升方式^[2-4]。但在不同的条件下,折返能力最佳的折返方式不尽相同,同时各优化策略也具有不同的提升特点。鉴于此,本文分析了多种折返形式的特点,并分析影响折返能力的相关因素,通过仿真进行定量计算和分析,研究其对折返能力的影响。

* 西南交通大学重点研发计划项目(Q110321S01004)

1 城市轨道交通列车折返间隔分析

列车折返过程分析最主要的是找到关键时间点位置。以图 1 典型折返站为例,关键时间点主要为:Q0 代表进站干扰点;Q1 代表到达站台停车点;Q2 代表折返区域的道岔防护点;Q3 代表折返区域停车点;Q4 代表折返区域的防护点;Q5 代表 CBTC (基于通信的列车控制) 模式下列车完成折返作业的关键时间点。



注: $\bullet\bullet$ 计轴器; $\bullet\bullet$ 信号机; \triangle 道岔; \blacktriangle 停车点; 图 2—图 4 等同。

图 1 典型折返站

Fig. 1 Typical turn-back station

构建如下列车折返间隔:接车间隔为邻车办理接车进路的间隔;进折返线间隔为邻车办理进折返进路的间隔;出折返线间隔为邻车准备驶出折返进路的间隔;发车间隔为邻车准备驶离站台的间隔。将上述间隔的最大值作为折返间隔。

本文使用的仿真系统为实验室自主研发的 1 套功能较为完善的城市轨道交通列车运行仿真系统。该系统以牵引计算工具为主体,采用改进单质点算法,使用混合可变步长计算列车的防护曲线,采用多叉树模型,并基于冲击率限制^[5]进行仿真运算。该系统基于实际线路、车辆、信号数据等,实现对不同信号制式下的正线运行、折返,以及出入车辆基地的能力的计算和性能分析。仿真参数如下:站前折返正线最高运行速度 87 km/h,停站时间 30 s,采用 9 号道岔,道岔的侧向允许速度 30 km/h;站后折返正线最高运行速度 107 km/h,停站时间 30 s,采用 12 号道岔,道岔的侧向允许速度 50 km/h;采用 CBTC 模式,站台限速 60 km/h,停车制动减速度 0.56 m/s^2 ,列车启动延时 4 s,车载移动授权更新时间 0.6 s,区段解锁时间 1 s,信息上传 ATS (列车自动监控) 系统时间 1 s,ATS 系统处理时间 0.5 s,ATS 系统信息下发时间 0.5 s,道岔转换时间 7.0 s,折返线换向时间 10 s。

1.1 站前折返能力分析

站前折返包括顺序折返和交替折返,顺序折返有直进弯出和弯进直出两种方式。选用天津地铁 9 号线天津站站型的站型及线路数据进行分析。天津站站前折返示意图如图 2 所示。图 2 中:带箭头的虚线和实线分别代表站前折返直进弯出方式和弯进直出方式下的折返列车走行路径;P 代表道岔,X 代表信号机,JZ 代表计轴器。

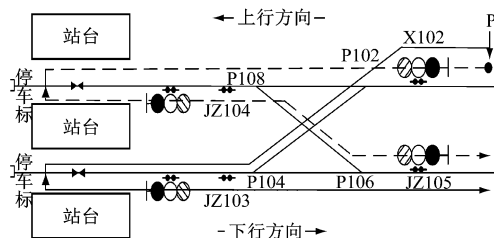


图 2 天津站站前折返示意图

Fig. 2 Schematic diagram of turn-back in front of Tianjin Station

通过仿真分析得到:站前弯进直出的折返间隔为 137.45 s,站前直进弯出的折返间隔为 141.75 s,站前交替折返的间隔为 114.70 s。结果表明站前交替折返能明显提高站前折返的折返能力。

1.2 站后折返能力分析

站后折返包括顺序折返和交替折返,顺序折返有直进弯出和弯进直出两种方式。选用天津地铁 9 号线东海路站的站型及线路数据进行分析。东海路站站后折返示意图如图 3 所示。图 3 中:带箭头的虚线和实线分别代表站后折返直进弯出方式和弯进直出方式下的折返列车走行路径,SP 代表停车终点。

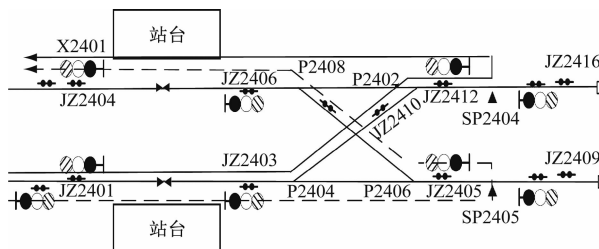


图 3 东海路站站后折返示意图

Fig. 3 Schematic diagram of turn-back behind Donghai Road Station

1.2.1 出站信号机到岔心距离不满足保护区段长度

修改后的东海路站站后折返示意图见图 4。以

图4为例,将出站信号机至折返轨的道岔岔心的距离无法满足保护区段长度的场景称为“场景1”。信号机保护区段终点可以设置为计轴器 JZ2412 位置(以下简称“情况1”)以及计轴器 JZ2405 或计轴器 JZ2410 位置(以下简称“情况2”)。情况1下,保护区段占用了折返区域道岔资源;情况2下,后车的接车作业不会影响前车办理出折返线进路。

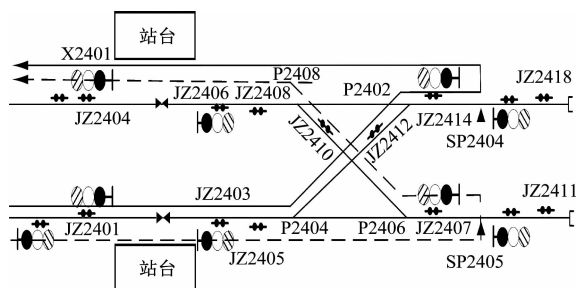


图4 修改后的东海路站站后折返示意图

Fig.4 Schematic diagram of turn-back behind modified Donghai Road Station

结合上述两种情况的差异进行分析。情况 2 下,折返过程中的接车间隔和进折返线间隔相较情况 1 要小。采用情况 2 进行仿真分析,结果显示,站后弯进直出方式的折返间隔为 116.23 s;采用情况 1 进行仿真,结果显示,站后弯进直出方式的折返间隔为 132.93 s。情况 2 下,站后直进弯出折返间隔为 135.93 s,站后交替折返间隔为 148.62 s。

1.2.2 出站信号机到岔心距离满足保护区段长度

将天津地铁 9 号线东海路站的出站信号机与进折返线的道岔尖距离延长 300 m, 出站信号机到岔心距离满足保护区段长度(以下简称“场景 2”)。仿真结果表明:站后直进弯出折返间隔为 123.86 s, 站后弯进直出折返间隔为 120.82 s, 站后交替折返间隔为 120.70 s。

图5是修改后的东海路站站后交替折返作业流程图(部分截取),其包含了站后顺序折返流程,本文对顺序折返流程不进行过多论述。

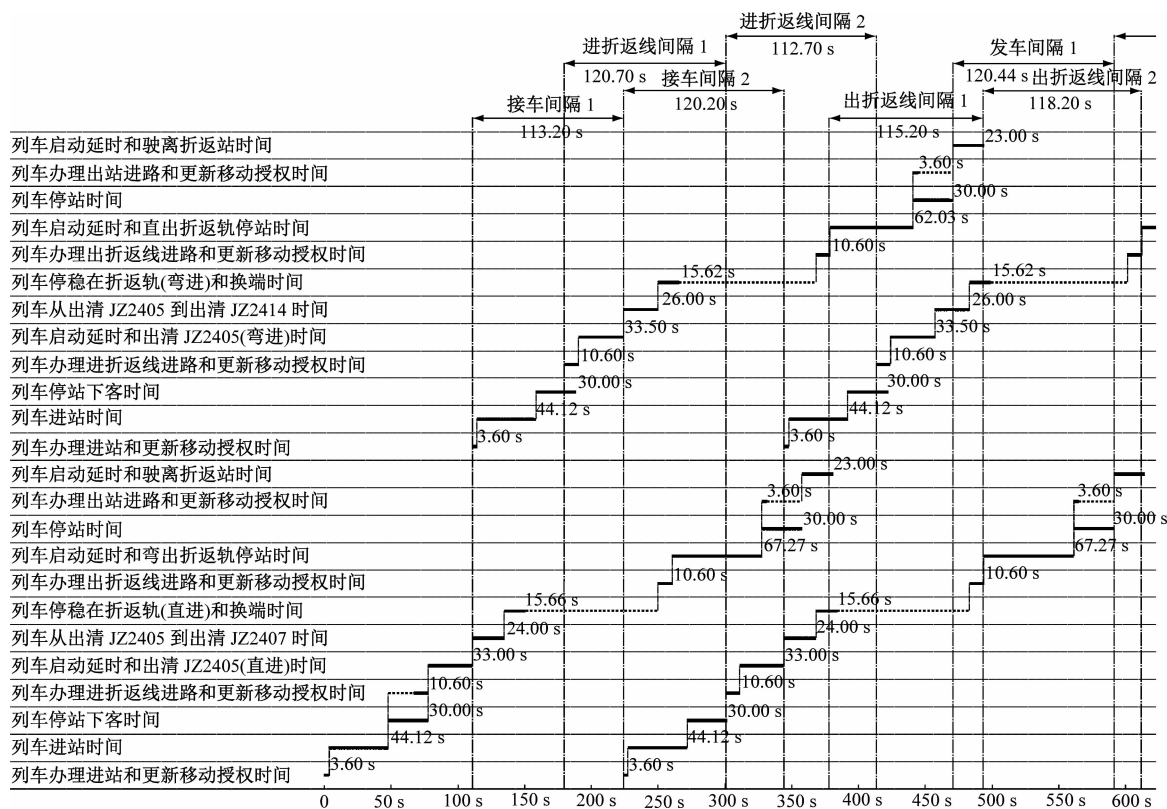


图5 修改后的东海路站站后交替折返作业流程图(部分截取)

Fig. 5 Flow chart of alternating turn-back operation behind modified Donghai Road Station (partial excerpt)

1.3 站前、站后交替折返能力分析

按照一定的参数,构建一个测试站,对站前、站后交替折返进行仿真。若其中站后折返部分采用

情况1的布置,相邻两组折返之间的折返间隔为238.76 s,比相同情况下站前弯进直出折返和站后弯进直出折返的折返能力强。

2 折返能力优化分析与验证

文献[6]从停站时间、限速等方面提出了很多折返能力优化措施。本文提出以下措施:

1) 选用合适的折返方式:通常情况下站后折返能力强于站前折返能力;站前交替折返能提高站前折返能力;场景 2 下,站后交替折返能力最强,场景 1 下,站后弯进直出折返能力最强;对于只有单渡线且站后折返线较短的情况,信号机保护区段终点采用情况 1 的布置。由此可见,站前、站后交替折返能提高折返能力。

2) 缩短停站时间:如优化客运作业减小上下客作业客流的冲突,以及缩短车门开关时间等。

3) 提高道岔侧向限速:以道岔类型的不可突破速度作为控车的输入,甚至采用限速更高的道岔。

4) 缩短列车换端时间:无人自动折返相比双司机人工换端可缩短换端时间 8 s 左右^[7]。

5) 对于站后折返,清客后,降低控车舒适度和停车准确性要求,如提高牵引级位和制动率等。

2.1 停站时间影响因素验证

对于本文站型,在一定范围内缩短停站时间 10 s,可增加站前两种顺序折返方式的折返能力 1.5 ~ 2.0 对/h。站前交替折返在一定程度上可以改变停站时间,但不影响折返能力。不同停站时间下的站前折返间隔如表 1 所示。

表 1 不同停站时间下的站前折返间隔

Tab. 1 Turn-back intervals in front of station under different dwell time

停站时间/s	不同折返方式下的折返间隔/s		
	直进弯出	弯进直出	交替折返
21	132.75	128.45	114.70
24	135.75	131.45	114.70
27	138.75	134.45	114.70
33	144.75	140.45	114.70

针对本文站型的站后折返,场景 1 一定程度上可以改变上客作业的停站时间,但不影响折返能力;在一定范围内缩短下客作业的停站时间 10 s,站后弯进直出的折返能力大约可增加 2.7 ~ 3.4 对/h,对站后直进弯出和交替折返无影响。场景 2 一定程度上可以缩短停站时间,但不影响折返能力。

2.2 道岔侧向限速与换端时间影响因素验证

表 2 为不同道岔侧向限速下的站前折返间隔。

表 2 不同道岔侧向限速下的站前折返间隔

Tab. 2 Turn-back intervals in front of station under different turnout lateral speed limit

道岔侧向限速/ (km/h)	不同折返方式下的折返间隔/s		
	直进弯出	弯进直出	交替折返
24	155.25	150.83	141.70
30	141.75	137.45	114.70
35	135.25	130.81	102.20

本文仿真结果表明,提高道岔侧向限速对站前折返的折返能力提升较大。将本文站前折返站型的道岔侧向限速从 30 km/h 提升到 35 km/h,站前直进弯出、弯进直出、交替折返的折返能力可分别提高约 1.2 对/h、1.3 对/h、3.8 对/h。将本文站后折返站型的道岔侧向限速从 40 km/h 提升到 50 km/h;场景 2 下,站后折返的折返能力提升约为 0.6 对/h;场景 1 下,站后顺序折返和交替折返的折返能力分别提升约为 1.20 对/h、2.38 对/h。

一定范围内,缩短列车换端时间,对站前折返的折返能力无影响。针对本文站后折返站型,场景 2 下,缩短换端时间,可以提高站后顺序折返的折返能力,不能提高交替折返的折返能力。如将换端时间从 10 s 提升到 5 s,站后直进弯出和弯进直出的折返间隔分别缩短 2.99 s 和 5.00 s。

2.3 清客后控车舒适度和停车准确性影响因素验证

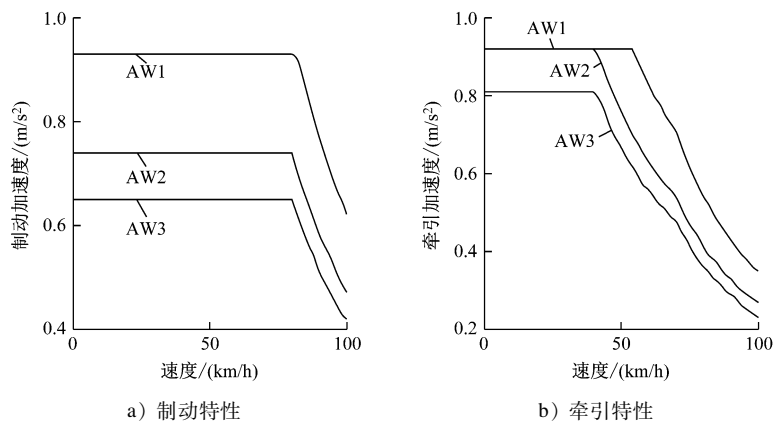
以场景 2 出站信号机至折返道岔长度满足保护区段长度时的站后顺序折返为例,不同级位下的列车特性曲线图如图 6 所示。列车折返时采用的牵引和制动特性曲线从 AW3(超常载荷)提升到 AW1(满座)时,站后顺序折返的折返能力提升约 1 对/h。

2.4 基于车车通信的列车折返能力优化分析与验证

天津站站基于车车通信的站前顺序折返作业流程如图 7 所示。由图 7 可见:该模式下,站前弯进直出的折返间隔从 137.45 s 提升至 129.85 s,折返能力提升约 1.5 对/h,折返能力有较大提升。以其他折返方式进行验证,同样提升较大。

3 结语

城市轨道交通系统中,各类站点因其结构差异而能采用的列车折返方式各不相同,进而导致折返效率有所区别。本文针对性地提出了一系列旨在



注:AW2 为额定载荷。
图 6 不同级位下的列车特性曲线图

Fig. 6 Train characteristic curves at different levels

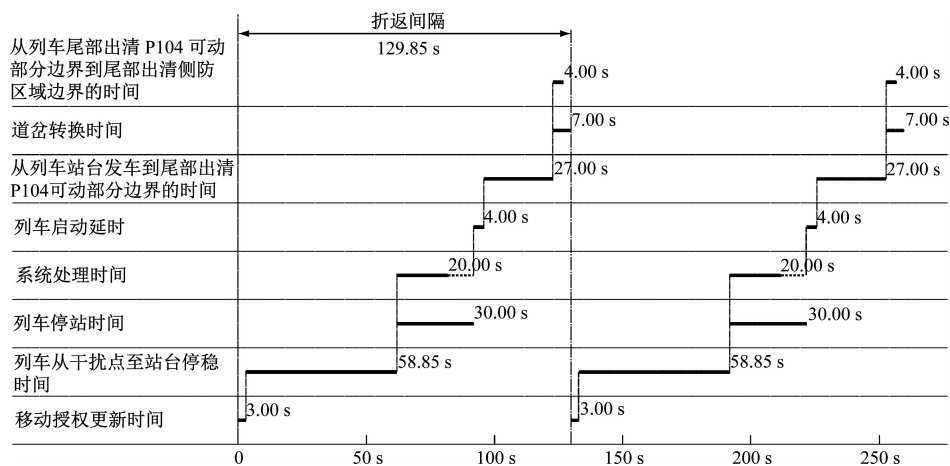


图 7 天津站站基于车车通信的站前顺序折返作业流程图

Fig. 7 Flow chart of sequential turn-back operation in front of Tianjin Station based on vehicle-to-vehicle communication

提升折返能力的优化措施,并通过具体站型实例进行了效果验证。值得注意的是,不同的优化措施对于不同折返方式的改善程度亦不同,因此在实施时需根据实际情况灵活选择。本文的仿真分析成果为后续的站点改造工作提供了有价值的参考,特别是在评估改造方案的可行性、成本效益等方面具有重要意义。

参考文献

- [1] 王俊锋. 城市轨道交通车站后折返间隔的研究[J]. 铁道运输与经济, 2019, 41(6): 100.
WANG Junfeng. A study of behind-station turn-back headway in urban rail transit[J]. Railway Transport and Economy, 2019, 41(6): 100.
- [2] 徐意. 城市轨道交通线路折返能力分析及优化措施[J]. 铁道运输与经济, 2017, 39(3): 96.
XU Yi. Analysis on turnaround capacity of urban rail transit line and its optimization measures[J]. Railway Transport and Economy, 2017, 39(3): 96.
- [3] 张江, 李健, 刘志钢. 城市轨道交通列车站后折返时间分配研究[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(3): 47.
ZHANG Jiang, LI Jian, LIU Zhigang. Research on time allocation of turn-back after station in urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(3): 47.
- [4] 吴殿华, 范永华, 李聪. 基于车车通信的城市轨道交通列车控制系统折返能力分析[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(4): 50.
WU Dianhua, FAN Yonghua, LI Cong. Turn-back performance analysis of train-to-train based urban rail transit train control system[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(4): 50.
- [5] 曲健伟. 考虑冲击限制的地铁列车牵引计算算法[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(5): 59.
QU Jianwei. Traction calculation algorithm of metro trains considering jerk limitation[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(5): 59.
- [6] 唐玉川. 提高城市轨道交通车站折返能力的技术措施研究[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(3): 77.

(下转第 78 页)

表 4 抗浮方案对比
Tab.4 Comparison of anti-floating schemes

方案	增加桩数/根	抗压改抗拔桩数/根	压重砾石/万 m ³	造价增量/万元	是否影响层高	顶板需额外增加的承载力/kPa	分步引起的工后沉降/mm
方案一	640	3 417	0	6 302	否		10
方案二	0	0	31.40	1 256	是	30	19
方案三	56	2 253	12.45	2 561	否		16

限元分析,温度应力与结构抗侧向刚度强弱相关。根据应力结果相应配置抗裂钢筋,从理论上限制了混凝土裂缝,避免自防水混凝土开裂漏水。

2) 针对由施工质量、养护、合拢等条件与设计的差异导致可能漏水的情况,在地下车辆基地中,设计方从构造方面提出侧壁和底板的防漏水备用解决方案。

3) 地下车辆基地中,上盖物业开发不同步实施时,临时抗浮是关键问题。本文分析了多种临时抗浮方案优缺点,提出临时抗浮措施与盖板施工荷载预留相结合的最优方案。

参考文献

- [1] 黄波. 地下双层地铁停车场站场设计研究[J]. 都市轨道交通, 2019, 32(1): 43.
HUANG Bo. Study on the design of double-layer underground station and yard at metro parking yard project site[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2019, 32(1): 43.
- [2] 刘京, 王宇彤, 刘健红. 城市轨道交通地下车辆基地的实践[J]. 都市轨道交通, 2016, 29(6): 31.
LIU Jing, WANG Yutong, LIU Jianhong. Practice of underground vehicle base for urban rail transit[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2016, 29(6): 31.
- [3] 深圳市住房和建设局. 轨道交通车辆基地上盖建筑结构设计标准: SJG 121—2022[S]. 深圳: 中国建筑工业出版社, 2022.

- Housing and Construction Bureau of Shenzhen Municipality. Standard for design of rail transit depot superstructure: SJG 121—2022 [S]. Shenzhen: China Architecture Publishing & Media Co., Ltd., 2022.
- [4] 梁传浩, 袁渊, 王珂昊. 深圳国际会展中心超长地下室裂缝控制技术[J]. 工程建设与设计, 2020(17): 16.
LIANG Chuanhao, YUAN Yuan, WANG Kehao. Crack control technology for super-long basement of Shenzhen international convention and exhibition center[J]. Construction & Design for Engineering, 2020(17): 16.
- [5] 王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
WANG Tiemeng. Crack control of engineering structures [M]. Beijing: China Architecture Publishing & Media Co., Ltd., 1997.
- [6] 蒋方新, 陈尚志, 邵兴宇, 等. 超长混凝土结构在使用阶段温度应力下的裂缝控制[J]. 建筑结构, 2021, 51(14): 107.
JIANG Fangxin, CHEN Shangzhi, SHAO Xingyu, et al. Crack control of super-long concrete structures under temperature stress in use stage[J]. Building Structure, 2021, 51(14): 107.

· 收稿日期: 2024-02-23 修回日期: 2024-05-11 出版日期: 2025-01-10
Received: 2024-02-23 Revised: 2024-05-11 Published: 2025-01-10
· 通信作者: 谭奇峰, 高级工程师, tanqifeng@sty.sh.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

(上接第 72 页)

- TANG Yuchuan. Technical measures for urban rail transit station turn back capacity improvement[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(3): 77.
- [7] 马冲. 城市轨道交通列车折返能力优化方案研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(6): 76.
MA Chong. Optimization scheme of train turn-back capacity of urban rail transit[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(6): 76.

· 收稿日期: 2022-10-26 修回日期: 2022-12-10 出版日期: 2025-01-10
Received: 2022-10-26 Revised: 2022-12-10 Published: 2025-01-10
· 通信作者: 曾小二, 硕士研究生, 156324712@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

欢迎访问《城市轨道交通研究》网站

www.umt 1998.tongji.edu.cn