

预留上盖物业开发条件的市域铁路 地下车辆基地结构设计

谭奇峰

(中铁上海设计院集团有限公司, 200070, 上海)

摘要 [目的] 为进一步提高土地利用效率,减少城市空间分割,提升区域城市形象,避免区域交通立体化以及对人行系统的影响,需对预留上盖物业开发条件的市域铁路地下车辆基地结构设计的关键技术进行研究。[方法] 以上海市域铁路机场联络线申昆路停车场项目为例,基于预留上盖物业开发条件的地下车辆基地与地面车辆基地在结构设计方面的差异,研究了预留上盖物业开发条件的地下车辆基地结构的设计难点,并针对性分析了地下车辆基地施工过程中的超长结构温度裂缝、结构防水、不连续施工结构等的关键技术。[结果及结论] 根据不设缝的超长盖板温度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;针对由施工质量、养护、合拢等条件与设计差异导致可能漏水的情况,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;地下车辆基地结构与上盖物业开发结构不同步实施时,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。

关键词 市域铁路;地下车辆基地结构;预留上盖物业开发条件

中图分类号 U279.1:U239.5

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.01.013

Structural Design of City Railway Underground Depot with Reserved Conditions for Overlying Property Development

TAN Qifeng

(China Railway Shanghai Design Institute Group Co., Ltd., 200070, Shanghai, China)

Abstract [Objective] To further improve land use efficiency, reduce the fragmentation of urban space, enhance the regional urban image, and avoid the impact of regional transportation three-dimensional development and pedestrian system, it is necessary to conduct research on the key technologies for city railway underground depot structural design with reserved conditions for the overlying property development. [Method] In a case study of Shenkun Road Parking Lot Project of Shanghai City Railway Airport Link Line, based on the differences in structural design between the underground vehicle depot with

reserved conditions for the overlying property development and the ground vehicle depot, the structural design challenges of the above-mentioned underground vehicle depot are studied, and the key technologies, such as the temperature cracks of super-long structures, structural waterproofing, and discontinuous construction structures in the construction process of the underground vehicle depot, are specifically analyzed. [Result & Conclusion] The anti-cracking reinforcing bars are configured according to the temperature stress results of the super-long cover plate without joints, theoretically restricting the concrete cracks and avoiding cracking and water leakage of the self-waterproof concrete. Alternative waterproofing solutions for the side walls and bottom plates from the structural aspect are proposed by the designer, against the possible water leakage caused by the construction quality, maintenance, closure conditions and the design differences. The optimal solution combining temporary anti-floating measures and the reservation of the construction load in the cover plate is proposed for the asynchronous construction of the underground vehicle depot structure and the overlying property development structure.

Key words city railway; underground vehicle depot structure; reserved conditions for overlying property development

随着城市土地资源日益紧张,以及城市轨道交通建设资金的反哺需要,经济发达地区的市区车辆基地在其设计阶段大多需预留上盖物业开发条件。T/CECS 1035—2022《城市轨道交通上盖结构设计标准》的颁布,标志着相关研究已较为成熟。但对于城市核心区,城市轨道交通方面,目前仅有成都地铁7号线崔家店停车场^[1]和北京焦化厂车辆段^[2]等少量车辆基地设置于地下;市域铁路方面,上海市域铁路机场联络线(以下简称“机场联络线”)申昆路停车场是国内第一例预留上盖物业开发条件的地下车辆基地。目前与车辆基地相关的结构研究并不多,特别是针对上海等沿海地下水位较高的地区,需要深入研究。

1 工程概况

机场联络线在虹桥商务区设申昆路停车场。该停车场位于申昆路片区控规单元,主要规划商务办公、商业服务,整体规划定位为生态智慧型综合配套服务区。

机场联络线申昆路停车场位于虹桥片区申昆路、高虹路、文澜路、迎宾三路围合区域,距虹桥枢纽南侧约 2 km。受航空限高控制,相较于传统的地面停车场,将车辆基地置于地下,可以腾出更多的竖向空间进行盖上海业开发,提高盖上海业开发强度和开发价值;将车辆基地置于地下可以使区域交通在地面平接通过,避免地面车辆基地带来的区域交通立体化,提升区域城市形象;将车辆基地置于地下时,行人不需要上跨匝道或下穿地道,可以解决地面车辆基地带来的人行系统割裂。总之,申昆路停车场采用地下方式,适量增加投资,可以提高土地利用效率,同时提升地块城市形象,响应虹桥国际中央商务区的门户定位。

1.1 车辆基地总平面布置

机场联络线申昆路停车场承担机场联络线和嘉闵线动车组的运用和存放作业,处于嘉闵线和机场联络线的交叉节点,也是将来近沪地区接入市域铁路网的重要节点,其主要功能定位为存车和综合维修。申昆路停车场共设置存车线 20 条,其中:14 条存车线(1 线 1 列位)用于存放嘉闵线 8 辆编组动车组,6 条存车线(1 线 2 列位)用于存放机场联络线 4 辆编组动车组。申昆路停车场总建筑面积约 125 400 m²,东西长约 729 m,南北宽约 197 m。申昆路地下停车场总平面布置剖视图如图 1 所示。



图 1 申昆路地下停车场总平面布置剖视图

Fig. 1 Sectional view of the general layout for Shenkun Road Underground Parking Lot

机场联络线申昆路停车场设置于地下一层,以

自然地面为 ± 0.00 m,轨顶标高为 -12.33 m,总用地面积为 125 000 m²。停车场结构底板底标高为 -14.88 m,结构层高为 11.60 m。

1.2 上盖物业开发方案

车辆基地建筑总开发面积约为 400 000 m²,可开发经营面积约为 259 000 m²。上盖平台拟根据建筑功能采用钢筋混凝土框架结构或钢框架结构。盖下结构柱位置根据站场及建筑布置确定,结构柱跨度以 9.0 m 和 12.0 m 为主,局部为 15.0 m;出入段咽喉区的柱网有 11.0 m、12.6 m、14.0 m、17.0 m 等多种跨度,跨度最大处约为 28.0 m。跨度较大处框架梁采用型钢混凝土结构。

建立申昆路地下停车场上盖物业开发项目整体计算模型(见图 2),梁柱采用杆单元,墙板采用壳单元分析模拟。申昆路地下停车场上盖物业开发项目鸟瞰图见图 3。

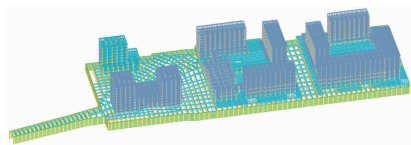


图 2 申昆路地下停车场上盖物业开发项目整体计算模型

Fig. 2 Overall calculation model of the overlying property development project for Shenkun Road Underground Parking Lot



图 3 申昆路地下停车场上盖物业开发项目鸟瞰图

Fig. 3 Aerial view of the overlying property development project for Shenkun Road Underground Parking Lot

2 地下车辆基地上盖物业开发结构的特点与设计难点

2.1 上盖物业开发结构的特点

在车辆基地的上盖物业开发项目中,由于工艺上的特定需求,底层需要设计成大开间与大层高的形式,然而这种设计对结构的抗震性能构成了不利影响,往往成为结构设计的难点。相对传统的设置于地面的车辆基地,在地震作用下,地下车辆基地的底层受周边土壤约束,抗震性能有所提升。

地下车辆基地最主要的特征是引入了地下水和土的影响,在结构设计中应重点关注,除常规的地面车辆段上盖物业开发的抗震性能外,还需要关注地下防水。特别是在沿海软土地区,地下水位较

高,保证车辆基地内非潮湿的使用环境和整体抗浮安全是特定挑战。地面车辆基地和地下车辆基地的主要结构差异见表 1。

表 1 地面和地下车辆基地的结构差异

Tab.1 Structural differences between ground and underground vehicle depots

| 项目 | 地面车辆基地 | 地下车辆基地 |
|------------|------------------------|------------------------|
| 设计工作年限/年 | 50 | 100 |
| 地震作用年限调整系数 | 1.0 | 1.4 |
| 活荷载年限调整系数 | 1.0 | 1.1 |
| 结构分缝 | 结合上盖物业设缝,结构单元长度约 200 m | 不具备设缝条件,结构单元长度约 729 m |
| 不同步建设影响 | 预留上盖物业开发项目的施工条件 | 预留上盖物业开发项目的施工条件,存在抗浮影响 |
| 工程防水 | 临时屋面防水 | 地下室防水 |
| 盖板层数 | 大多为两层盖板 | 单层盖板 |
| 首层盖板 | 一般非结构转换层 | 结构转换层 |
| 超大深基坑设计 | 无 | 有 |

2.2 上盖物业开发结构的设计难点

地下车辆基地重点在于引入地下水的因素,既要经济合理地解决地下水的上浮问题,又要严防地下水的渗入影响车辆基地的正常使用。预留开发条件的地下车辆基地结构设计难点主要体现在:

为满足地下车辆基地防水需要,结构不具备设置结构缝的条件,地下基地东西长约 729 m。地面车辆基地盖板不设缝结构单元长度一般在 200 ~ 250 m^[3]。参考目前研究较多的大型民用建筑地下空间,其超长不设缝结构单元大部分控制在 500 m 以内,不设缝最长结构单元为深圳国际会展中心地下室,达到 1 250 m^[4]。结构单元加长后,受温度应力影响,易产生收缩裂缝,因此车辆基地相对民用建筑地下空间对渗水等环境要求更高。

地下车辆基地结构层高达 11.6 m,高于常规地下空间层高 5.0 ~ 6.0 m,埋深大,抗浮是其结构设计的重要内容。因地下车辆基地结构刚度偏柔,上部结构对地下结构抗浮的整体刚度贡献减小,对抗浮更加不利。普通地下空间,顶板上的永久荷载为一次性加载完成,如深圳地铁龙岗线中心公园停车场,顶板上公园覆土一次性完成,设计时不需要考虑不连续施工的工况。对于预留上盖物业开发条件的地下车辆基地,上盖物业开发同步实施时,上盖物业自重成为有效压重,不需要额外增加工程投资抗浮;不同步实施时,需要额外增加工程措施保证地下车辆基地的整体抗浮安全,且具体而适量

的抗浮工程措施需要针对性研究。

地下车辆基地基坑支护采用地下连续墙,其施工工艺决定外贴式防水卷材无法实施,需依靠结构本身刚性防水。受施工质量可靠性和材料离散性等的影响,地下车辆基地基坑支护漏水风险也是工程难点。

3 关键技术研究与应用

3.1 超长结构温度裂缝

混凝土构件环境温度变化来源于两类:一是混凝土收缩当量温度变化,二是使用阶段的季节温差。

混凝土收缩当量温度变化同后浇带的设置和闭合时间相关。申昆路停车场采用跳仓法施工,后浇带的浇筑时间相对整板浇筑时间滞后 90 d 以上,在后浇带未封闭前,大部分混凝土结构收缩已经得到释放。根据王铁梦收缩模型^[5],计算标准状态下混凝土的最大收缩量,其他状态下混凝土的最大收缩量采用不同系数加以修正。

$$\Delta T_1 = 3.24 \times 10^{-4} M_1 \cdot M_2 \cdot \dots \cdot M_{12} \cdot (1 - e^{-0.01t}) / \alpha_c \quad (1)$$

式中:

ΔT_1 ——混凝土收缩当量温差;

t ——混凝土浇筑成型时间;

α_c ——混凝土线膨胀系数,取 $1.0 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$;

M_i ——各类非标准状态修正系数, $i = 1, 2, \dots, 12$ 。

根据工程实际情况,计算得到 M_i 为 1.022。浇筑 90 d 后封闭后浇带,计算得到混凝土收缩当量温差为 13.48 ℃。

一般来说,降温作用下混凝土的收缩和变形使混凝土受拉而容易开裂,因此研究温度裂缝时一般只考虑最大温降作用。上海气象统计数据,见表 2。

表 2 上海气象统计数据

Tab. 2 Shanghai Meteorological Statistical Data

| 月份 | 月平均温度/℃ | 月均最高温度/℃ | 月均最低温度/℃ |
|----|---------|----------|----------|
| 1 | 7.0 | 16.6 | -3.4 |
| 2 | 7.7 | 21.2 | 0.6 |
| 3 | 13.4 | 25.8 | 2.8 |
| 4 | 16.5 | 30.4 | 5.6 |
| 5 | 21.4 | 33.8 | 14.4 |
| 6 | 25.1 | 35.0 | 18.4 |
| 7 | 28.6 | 37.6 | 21.8 |
| 8 | 29.5 | 36.8 | 22.4 |
| 9 | 25.1 | 33.8 | 17.4 |
| 10 | 19.7 | 30.6 | 12.0 |
| 11 | 14.4 | 25.4 | 4.6 |
| 12 | 7.1 | 18.0 | -2.8 |

$$\Delta T_k = T_{s,avr} - T_{0,min} \quad (2)$$

式中:

ΔT_k ——混凝土使用阶段最大温降;

$T_{s,avr}$ ——混凝土浇筑成型时的平均温度;

$T_{0,min}$ ——结构最低月平均温度。

申昆路停车场底板于 11 月合拢,顶板 12 月合拢,合拢时上海地区月均最低气温 4.60 ℃,结构合拢温度按不利情况考虑取 20.00 ℃。考虑地下室影响温度变化折减系数 0.7,故 $\Delta T_k = 10.78$ ℃。上海 1 月月均最低温度 -3.40 ℃,从合拢时间至 1 月的季节温降为 8.00 ℃,与合拢温降叠加后温降为 18.78 ℃。

结合本工程实际,按照文献[6],混凝土结构的徐变应力折减系数 0.34,温差为 6.39 ℃。采用 SAP 2000 软件,梁柱采用框架单元,墙板采用壳元模拟,进行温度应力计算。温降工况下顶板温度应力如图 4 和图 5 所示。

根据计算结果,在温降作用下,混凝土楼板整体收缩受拉。 X 向的顶板温度应力分布较为均匀,其范围为 0.85 ~ 2.38 MPa,在局部楼板楼梯开洞

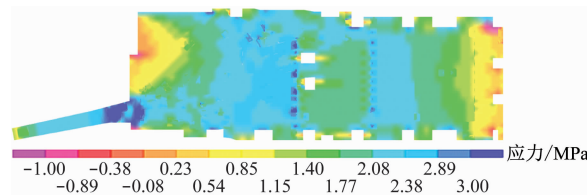


图 4 温降工况下顶板 X 向温度应力

Fig. 4 Temperature stress in the top plate X direction under cooling conditions

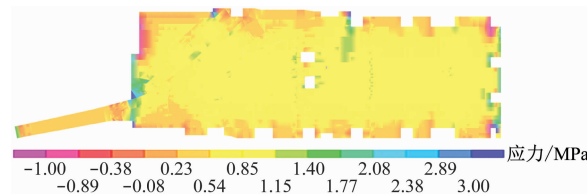


图 5 温降工况下顶板 Y 向温度应力

Fig. 5 Temperature stress in the top plate Y direction under cooling conditions

处、外墙转角,以及竖向构件与楼板交接处,由于竖向刚度以及水平约束增大等原因,温度应力也相应增大。 Y 向相对 X 向为短边,由于温度应力对混凝土的影响特性, Y 向的整体温度应力比 X 向的整体温度应力小,为 0.23 ~ 1.46 MPa。

顶板 C35 混凝土抗拉强度为 1.57 N/mm²,楼板钢筋需增加 282 mm²/m,梁需适当增加腰筋含钢率。同时施工阶段,要求后浇带尽可能保留较长时间,以利于水化热的温度释放。同时选择温度较低时合拢,并加强养护。

3.2 结构防水方案

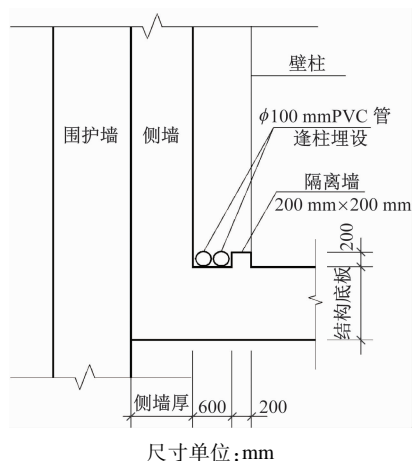
在进行温度应力的理论计算时,采用了理想的计算模型作为基本假设。当实际施工条件,如合拢温度、材料离散性等存在差异时,可能出现漏水裂缝。

地下车辆基地深度较大,软土地区基坑支护采用地下连续墙,挡土墙与地下连续墙采用复合墙,受工艺限制,无条件设置完整的外贴式防水卷材,防水设计条件并不理想。同时地下车辆基地结构超长,规模庞大,容易产生漏水点。

车辆基地对防水要求较高,在设计阶段除理论分析计算外,从防水构造上适当考虑经济适用的备用排水措施是必要的,从而真正实现以防为主、防排结合的防水理念。

在上海市域铁路申昆路停车场设计中,综合权衡可维修性和方便实施性,主要针对侧壁和底板备份了 1 套备用的防水措施。在复合墙内侧设置 1 道

地面排水沟和离壁墙。侧壁防渗水构造如图 6 所示。在底板上设置滤水层,轨行区埋置钢制过水管,轨行区外采用排水板,上方采用泡沫混凝土等覆盖。底板防渗水构造如图 7 所示。



注:PVC为聚氯乙烯。

图 6 侧壁防渗水构造

Fig. 6 Anti-seepage structure of side walls

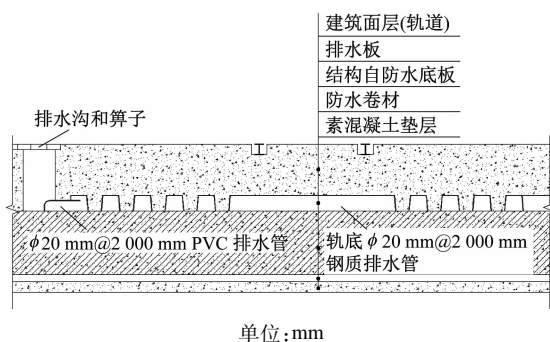


图 7 底板防渗水构造

Fig. 7 Anti-seepage structure of bottom plates

3.3 不连续施工结构方案

受土地出让条件和轨道交通开通时间限制,车辆基地上盖物业开发项目往往难以做到连续施工,地下车辆基地因埋深大,需要增加临时工程抗浮措施。

从设计角度来看,盖上物业与盖下车辆基地同步实施是最经济合理的,尤其是地下车辆基地,可以最大限度地减少施工期间结构抗浮的临时工程措施。同时,车辆基地对竖向变形要求严格,车辆基地铺轨后的加载会引起进一步的沉降,因此在方案阶段需提前考虑不同步施工引起的工后沉降。

以申昆路停车场上盖物业开发项目为例,考虑上盖不连续施工后,提出三种抗浮方案。

方案一:充分发挥工程桩周土抗拔力作用,增

加抗压桩钢筋,基桩变为抗压兼抗拔桩。抗压桩与抗压兼抗拔桩基参数对比如表 3 所示。

表 3 抗压桩与抗压兼抗拔桩基参数对比

Tab. 3 Comparison of foundation parameters between compression piles and piles with both compression and uplift resistance

| 项目 | 抗压桩 | 抗压兼抗拔桩 |
|------------|-------------------|-------------------|
| 桩侧摩阻特征值/kN | 2 400 | 2 400 |
| 桩钢筋 | 20 根 ϕ 25 mm | 24 根 ϕ 28 mm |
| 单桩受压特征值/kN | 4 400 | 4 400 |
| 单桩抗拔特征值/kN | 1 900 | 2 400 |
| 桩长/m | 40 | 40 |
| 桩径/m | 1 | 1 |
| 单桩造价/元 | 72 220 | 79 955 |

方案二:在首层盖板上增加临时压重,理论上可以采用蓄水、堆载等多种形式。当采用蓄水作为临时压重时,面积超过 100 000 m^2 的水体缺少自洁净能力;在车辆基地屋顶蓄水,对顶板防水和水面安全管理要求高,虽然成本最低,但实施效果差难以采用。当采用袋装砾石堆载作为压重时,需增加 2.5 m 厚的砾石,压重过大,需要加强盖板的承载能力,对结构梁高、层高及配筋等都有较大影响。

方案三:上盖物业开发施工时,盖板预留施工荷载 20 kPa。采用 1 m 厚的袋装砾石压重,剩余抗浮能力由桩基承担。此种方案在不需额外增加盖板承载能力的同时,尽量节省临时抗拔工程措施费用。

申昆路停车场上部开发受航空限高控制,整体层数不高,同时受装配率要求限制,上部塔楼采用的钢结构自重较轻。因此,铺轨后增加的上部荷载较小,导致竖向变形也较小,相对较容易满足规范要求。采用上述三种方案抗浮,分析结果如表 4 所示。

由表 4 可见:三种抗浮方案下停车场结构竖向位移均能满足结构安全要求。对于地下车辆基地,方案二额外的承载能力需增加顶板的投资,还需增大盖板梁截面高度,影响层高,难以接受。在本工程设计阶段,采用方案三可以充分利用盖板的后续施工堆载能力,并有效节省临时抗拔桩的工程费用。

4 结论

1) 本文对不设缝的超长盖板进行温度应力有

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