

地铁车站轨行区迂回隧道对其通风和热环境的影响

田婷婷¹ 高伟² 王方敏² 余涛¹

(1. 西南交通大学机械工程学院, 610031, 成都; 2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 311122, 杭州)

摘要 [目的] 部分地铁车站由于周围空间限制无法将活塞风井设置在轨行区外侧, 为满足通风需求可将活塞风井设置在车站轨行区内, 并设置迂回隧道将活塞风井与轨行区外侧正线隧道相连。目前暂未有将迂回隧道应用于改善隧道通风和热环境的相关研究, 因此有必要对类似工程进行分析。[方法] 以包含迂回隧道的某条地铁线路为例, 采用一维数值模拟方法, 对某车站轨行区内设置活塞风井并增设迂回隧道的情况进行模拟计算, 分析了车站轨行区设置迂回隧道对全线隧道活塞风量、活塞风井风量及隧道空气温度分布的影响。[结果及结论] 迂回隧道位于车站出站端时, 出站端的区间隧道活塞风量变化最大, 最大增加了 $38.1 \text{ m}^3/\text{s}$; 距迂回隧道最近的活塞风井风量变化最大; 隧道空气温度变化最大区域主要在迂回隧道所在车站的轨行区, 轨行区内活塞风井的进风作用导致该车站出站端轨行区空气温度快速下降, 最大降低了 1.8°C ; 迂回隧道的存在使轨行区车头停靠区域降温更多, 且车站出站端迂回隧道对热环境的控制效果优于车站进站端迂回隧道。

关键词 地铁车站; 轨行区; 迂回隧道; 隧道通风; 隧道热环境

中图分类号 U231.96:U231.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.01.033

Impact of Detour Tunnels in Metro Station Track Area on Ventilation and Thermal Environment of the Line Tunnel

TIAN Tingting¹, GAO Wei², WANG Fangmin², YU Tao¹

(1. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China; 2. Power China Huadong Engineering Corporation Limited, 311122, Hangzhou, China)

Abstract [Objective] Due to the space limitation around some metro stations, the piston air shafts can not be installed outside the track area. To meet the ventilation requirements, the piston air shafts can be arranged within the station track area through a detour tunnel connecting with the main line tunnels outside the track area. At present, there are no relevant studies on the application of detour tunnel in improving the ventilation and thermal environment of tunnels. Therefore, it is necessary

to analyze similar projects. [Method] In the case study of a metro line with a detour tunnel, a one-dimensional numerical simulation method is used to simulate and calculate the situation where piston air shafts are set in the station track area and a detour tunnel is constructed. The impact of setting the detour tunnel in station track area on the tunnel piston air volume of the entire line, the air volume of the piston air shafts, and the air temperature distribution in the tunnel is analyzed. [Result & Conclusion] When the detour tunnel is located at the outbound end of the station, the piston air volume in the section tunnel at the outbound end changes the most, with a maximum increase of $38.1 \text{ m}^3/\text{s}$. Same is the air volume of the piston air shaft closest to the detour tunnel. The tunnel air temperature changes the most mainly in the station track area where the detour tunnel is located. The incoming air of the piston air shaft in the track area causes rapid drop of the air temperature at the outbound end in the station track area, with a maximum decrease of 1.8°C . The detour tunnel leads to more temperature drop in the track area where the train head stops, and the detour tunnel at the outbound end of the station has better control effect on the thermal environment than that at the inbound end of the station.

Key words metro station; track area; detour tunnel; tunnel ventilation; tunnel thermal environment

在地铁隧道通风系统中, 活塞风井常设置在车站两端的轨行区外侧, 用于排出隧道废热并引入室外冷风, 达到控制地铁隧道热环境的目的。部分地铁车站由于周围空间的限制, 活塞风井无法设置在轨行区外侧, 为实现通风排热可将活塞风井设置在轨行区内, 并在活塞风井下设置迂回隧道将风井与轨行区外正线隧道相连。地铁车站轨行区迂回隧道设置示意如图1所示。下行线中迂回隧道位于进站端, 列车行驶带来的区间隧道活塞风从正线隧道和进站端迂回隧道经过, 由进站端活塞风井排出; 上行线中迂回隧道位于出站端, 列车行驶带来的活塞风和出站端活塞风井进风, 通过正线隧道和出站端迂回隧道流向前方区间隧道。因活塞风井设置

在轨行区外和轨行区内,且线路的阻力不同,各风井的进排风量和各隧道段的活塞风量都有较大差别,而活塞风量的变化将导致隧道温度分布的改变。由此可见,活塞风井位置和迂回隧道的设置会为全线隧道通风的有效性和隧道热环境带来不确定性,因此掌握其影响规律能为此类工程设计提供参考。

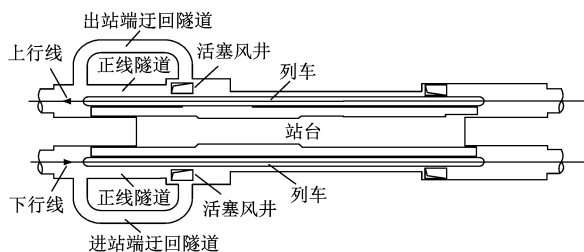


图1 地铁车站轨行区迂回隧道设置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the detour tunnel layout in the track area of the metro station

目前,对于迂回隧道这种结构仅在导坑隧道的施工中见到,它用于处理长距离不良地质段多工作面施工和工期延误风险^[1],暂时还未将迂回隧道应用于改善隧道通风和热环境的研究。国内外学者在活塞风井对地铁隧道通风和热环境的影响方面做了大量研究工作。文献[2]采用试验和数值模拟方法研究了无通风竖井下列车运行时隧道内的压力和速度场随时间的变化规律。文献[3-4]采用SES(地铁环控模拟)软件研究了风井位置对地铁系统活塞风井通风特性和复合式站台门空气流动特性的影响。文献[5]分析了活塞风井数量对区间隧道温度的影响。目前,国内外大多数研究都集中在活塞风井设置在轨行区外部的情况,而对于因周围空间限制导致活塞风井无法设置在轨行区外的情况,相关研究却较为缺乏。

本文以某地铁线路为例,采用一维数值模拟方法,对某车站轨行区内设置活塞风井并增设迂回隧道的方案进行模拟计算,分析其对全线隧道通风和隧道热环境的影响。

1 计算模型的建立

1.1 线路概况

以成都某轨道交通线路为研究对象,该线路各车站采用站台门和双活塞模式,在车站进出站端分别设置两个活塞风井。站台有效长度为186 m,轨行区断面积均为 31.0 m^2 ;区间隧道长度为1 km,断

面积为 40.6 m^2 ;活塞风井长度为40 m,横截面积为 21.0 m^2 ;车站轨行区设置有排风量为 $80\text{ m}^3/\text{s}$ 的轨道排热系统,仅在远期运行时开启。

该线路某车站由于地面空间的限制,无法在车站端设置活塞风井,考虑在活塞风井下设置迂回隧道,将风井与轨行区外的正线隧道连通。迂回隧道长度为18.1 m,断面积为 20.3 m^2 。

1.2 一维数值模拟方法验证

本文选用SES软件,并采用一维数值模拟方法开展研究。为验证一维数值模拟方法的准确性,建立了活塞风井设置在轨行区内侧并增设迂回隧道的典型车站的一维和三维数值计算模型,对计算结果进行对比分析。典型车站模型示意图如图2所示。三维模型中将隧道洞口和风井出口都设置为压力出口,采用动网格分析法计算了列车在隧道中行驶时的隧道活塞风量。

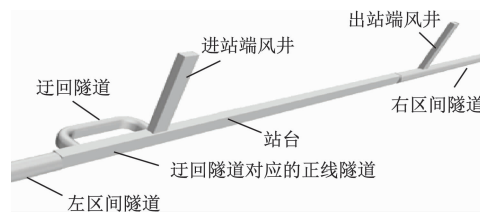


图2 典型车站模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of typical station model

不同隧道段风量的一维、三维结果对比如图3所示。车头和车尾经过某隧道断面产生的三维效应无法在一维模拟中体现,这是一维模拟存在的局限性,但列车实际运行时通过该隧道断面的时间占比较小。除此之外,其余时间段的风量在一维和三维结果中都能较好对应,说明一维数值模拟方法能模拟活塞风井设置在轨行区内并增设迂回隧道工况的空气流动。

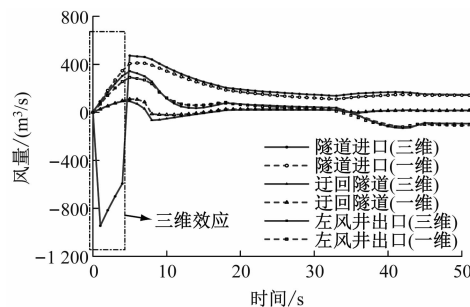


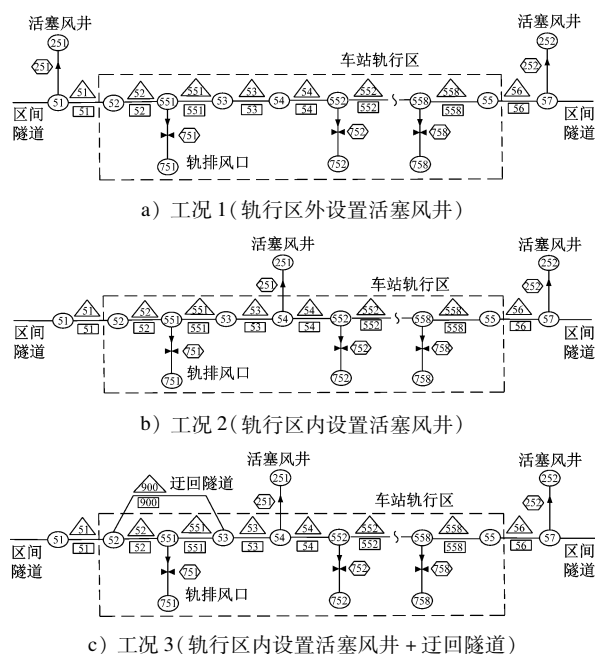
图3 隧道活塞风量对比图

Fig.3 Comparison graph of tunnel piston air volume

1.3 通风网络模型的建立

建立了包含1个设有迂回隧道的典型车站及其

前后各 5 个标准车站,以及这 11 个车站之间的区间隧道的一维通风网络模型。为研究活塞风井和迂回隧道对隧道通风和热环境产生的影响,设置三种工况进行比较分析。基准工况 1 为传统模式,即在轨行区外设置活塞风井;工况 2,直接将活塞风井设置在轨行区内,未设迂回隧道;工况 3,在工况 2 的基础上增设 1 条迂回隧道将风井与轨行区外正线隧道连通。三种工况下迂回隧道所在车站的隧道通风网络模型如图 4 所示。



注:图中数字代表车站及隧道段编号。

图 4 三种工况下的迂回隧道所在车站的隧道通风网络模型

Fig. 4 Ventilation network models of the station tunnel with detour tunnel being located under three working conditions

为了方便对结果进行描述,以 S1 到 S11 指代全线从左至右的各个车站,以 Q1 到 Q12 指代上下行线的各个区间隧道,以 1[#]到 22[#]指代各车站的进出站端活塞风井,其示意如图 5。

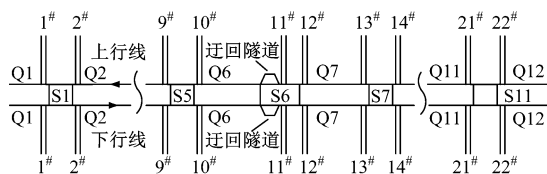


图 5 成都某轨道交通线路各段命名示意图

Fig. 5 Schematic diagram of each section name for a rail transit line in Chengdu

2 计算结果与分析

根据 GB 50157—2013《地铁设计规范》,选择成都最热月平均温度 25.6℃作为室外空气计算温度。对以上三种工况选取该线路远期最不利工况进行分析,行车对数为 30 对/h。采用一维数值模拟方法,对比分析了不同工况下的隧道活塞风量、活塞风井风量和隧道空气温度,得到迂回隧道对隧道通风和热环境的影响。

2.1 隧道活塞风量

定义隧道活塞风量变化量 ΔL_{s12} 、 ΔL_{s13} 分别为工况 2、工况 3 同基准工况 1 的隧道活塞风量的差值,可按式(1)、式(2)计算。

$$\Delta L_{s12} = L_{s2} - L_{s1} \quad (1)$$

$$\Delta L_{s13} = L_{s3} - L_{s1} \quad (2)$$

式中:

L_{s1} 、 L_{s2} 、 L_{s3} ——工况 1、工况 2、工况 3 的隧道平均活塞风量。

由于车站某一端受空间限制,该端存在下行线列车进站、上行线列车出站,即存在活塞风井设置于下行线进站端和上行线出站端两种情况。不同工况下隧道活塞风量变化量-里程关系曲线如图 6 所示。图 6 仅列出了隧道活塞风量变化量较大的区域。

从图 6 a) 可见:隧道活塞风量发生变化的区域包含迂回隧道所在车站 S6 在内的前后两个区间隧道和两个车站隧道。同工况 1 相比:工况 2 和工况 3 设置在车站 S6 轨行区内的活塞风井 11[#]使线路阻力变大,Q5、S5 和 Q6 隧道活塞风量均减小;工况 3 车站 S6 进站端轨行区隧道活塞风量急剧减小 45.7 m³/s,这是由迂回隧道的分流作用所致;车尾经过车站 S6 轨行区内的 11[#]风井,通过风井吸入室外空气,车站 S6 车头端轨行区的风量增加,工况 2 和工况 3 风量分别增加了 9.1 m³/s 和 10.3 m³/s。

从图 6 b) 可见:隧道活塞风量发生变化的主要区域为车站 S6 以及前后 1 个区间隧道。由于工况 2 和工况 3 将活塞风井 11[#]设置在轨行区内,轨排排风导致 11[#]风井进风增加,因此 12[#]和 13[#]风井的进风量减少,Q7 和车站 S6 车尾端的风量减小。当车尾经过工况 2、工况 3 的 11[#]风井时,车尾处的负压将外界空气吸入隧道,使车站 S6 出站端的隧道活塞风量增加至最大值,工况 2 和工况 3 风量分别增加了 36.6 m³/s、38.1 m³/s。

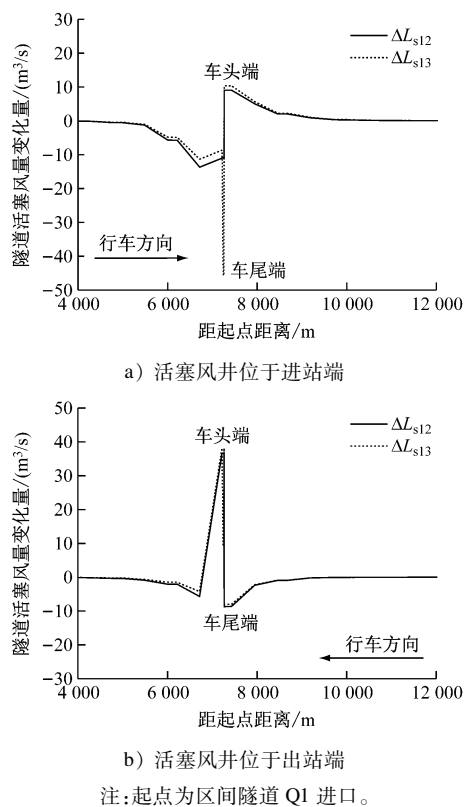


图 6 不同工况下隧道活塞风量变化量-里程关系曲线

Fig. 6 Relationship curve between the variation of tunnel piston air volume and mileage under different working conditions

2.2 活塞风井风量

由本文计算结果可知,工况 2 和工况 3 下承担主要风量变化的风井均为 9[#]—14[#]风井。不同工况下的活塞风井进排风量如图 7 所示。

由图 7 可见:活塞风量变化最为明显的风井是距离迂回隧道最近的 11[#]活塞风井,表现为排风减小,进风增加;工况 3 由于迂回隧道的分流作用,11[#]风井的进风量增量略大于工况 2。

2.3 隧道空气温度

定义 ΔT_{s12} 和 ΔT_{s13} 分别为工况 2 和工况 3 同工况 1 的隧道空气温度变化量,按式(3)和式(4)计算。

$$\Delta T_{s12} = T_{s2} - T_{s1} \quad (3)$$

$$\Delta T_{s13} = T_{s3} - T_{s1} \quad (4)$$

式中:

T_{s1} 、 T_{s2} 、 T_{s3} ——工况 1、工况 2、工况 3 在同一隧道段空气温度。

定义 $\Delta T_{\max,12}$ 和 $\Delta T_{\max,13}$ 分别为工况 2 和工况 3 下车站 S6 轨行区隧道最高空气温度的变化量,按

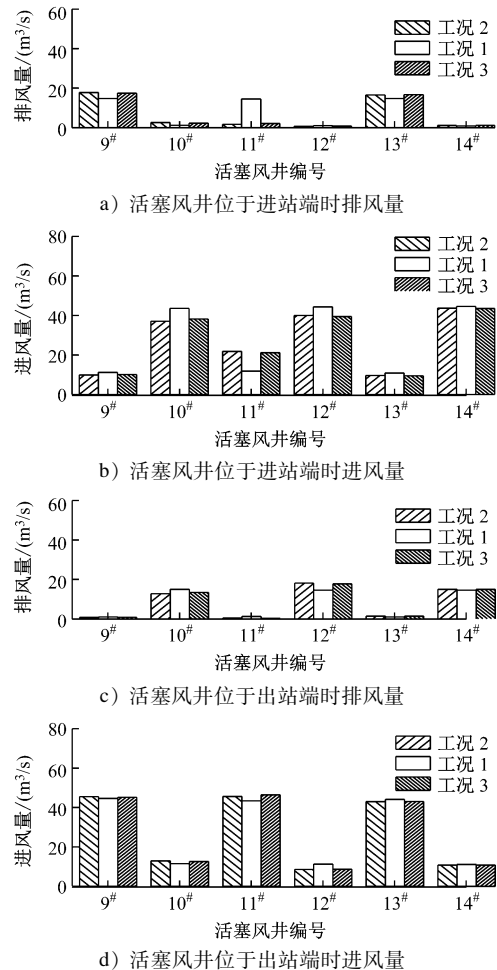


图 7 不同工况下的活塞风井进排风量

Fig. 7 Inlet and outlet air volumes of piston air shafts under different working conditions

式(5)、式(6)计算。

$$\Delta T_{\max,12} = T_{\max,2} - T_{\max,1} \quad (5)$$

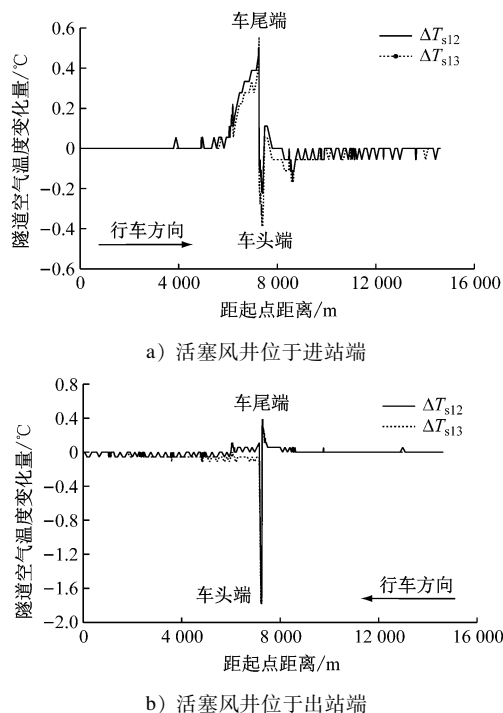
$$\Delta T_{\max,13} = T_{\max,3} - T_{\max,1} \quad (6)$$

式中:

$T_{\max,1}$ 、 $T_{\max,2}$ 、 $T_{\max,3}$ ——工况 1、工况 2、工况 3 下车站 S6 轨行区隧道最高空气温度。

不同工况下隧道空气温度变化量-里程关系曲线如图 8 所示。

由图 8 a)可知:工况 2、工况 3 隧道空气温度变化的范围主要在迂回隧道所在车站 S6 前后 1 个区间隧道内。结合风量图可知:Q6 的隧道活塞风量减小,隧道空气温度随之增高,从整体温升趋势来看工况 3 低于工况 2。车站 S6 最高空气温度的出现位置是车头,计算得到 $\Delta T_{\max,12}$ 和 $\Delta T_{\max,13}$ 分别为 $-0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,因为工况 3 中经过迂回隧道且温度变化小的风量到达车站 S6 车头端,使车站 S6 车头端及其后方车站的降温效果优于工况 2。



注:起点为区间隧道 Q1 进口。

图 8 不同工况下隧道空气温度变化量-里程关系曲线
Fig. 8 Relationship curve between tunnel air temperature variation and mileage under different working conditions

由图 8 b) 可知:隧道空气温度的变化主要在迂回隧道所在车站 S6 轨行区。工况 2 和工况 3 的车站 S6 进站端隧道活塞风量减小,隧道空气温度随之增高,温升最大值均位于 11# 风井前的隧道内。随着两种工况下 11# 风井的进风量增加,隧道空气温度降低,工况 2 和工况 3 的隧道空气温度降低均位于迂回隧道所对应的轨行区隧道内,最大降低了 1.8 °C。车站 S6 最高空气温度的出现位置是车头,计算得到 $\Delta T_{\max,12}$ 和 $\Delta T_{\max,13}$ 分别为 -0.5 °C 和 -0.6 °C。工况 3 中车站 S6 车头端后方车站的空气温度降低效果明显优于工况 2。

3 结语

本文对采用迂回隧道将轨行区内活塞风井与轨行区外正线隧道相连接方案进行了隧道活塞风量、活塞风井风量、隧道空气温度的模拟分析,得出以下结论:

1) 车站进站端设置迂回隧道时,主要影响迂回隧道所在车站及其前后两个区间隧道和两个车站的隧道活塞风量,该车站进站端隧道活塞风量变化最大,最大减小了 45.7 m³/s;车站出站端设置迂回隧道时,主要影响该车站及其前后 1 个区间隧道的

活塞风量,迂回隧道所在车站出站端的隧道活塞风量变化最大,最大增加了 38.1 m³/s。

2) 不论迂回隧道位于进站端还是出站端,活塞风量变化最为明显的风井均为距离迂回隧道最近的活塞风井,具体表现为排风量减小,进风量增加。

3) 车站设置迂回隧道时,所在车站轨行区的隧道空气温度变化最大,进站端设置迂回隧道使车头处隧道空气温度最大降低 0.4 °C,出站端设迂回隧道使轨行区隧道空气温度最大降低 1.8 °C,即迂回隧道位置的不同带来的降温效果也有差异,出站端设置迂回隧道带来的降温作用明显优于进站端设置迂回隧道。

4) 本文研究存在一定的局限性,即研究结果受所采用的轨道交通线路、行车参数及环境参数等的影响,后续将进一步对影响因素开展研究。

参考文献

- [1] 陈志南,贾儒龙,赖正树,等. 迂回隧道开挖对导坑隧道之影响探讨[J]. 隧道建设, 2007, 27(增刊2): 150.
CHEN Zhinan, JIA Rulong, LAI Zhengshu, et al. Studies of the influence of pilot tunnel due to by-pass tunneling[J]. Tunnel Construction, 2007, 27(S2): 150.
- [2] KIM J Y, KIM K Y. Experimental and numerical analyses of train-induced unsteady tunnel flow in subway[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2007, 22(2): 166.
- [3] 闫春利,雷波. 行车对数和位置对活塞风井通风特性的影响[J]. 制冷与空调(四川), 2018, 32(1): 1.
YAN Chunli, LEI Bo. Effects of train pairs and location on the ventilation performance of vent shaft[J]. Refrigeration & Air Conditioning, 2018, 32(1): 1.
- [4] 袁中原,雷波. 地铁复合式屏蔽门系统的通风优化研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(5): 105.
YUAN Zhongyuan, LEI Bo. The optimization of ventilation in subway station using composite platform screen doors system[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(5): 105.
- [5] 彭博,吴喜平,郑懿. 地铁区间热环境影响因素分析研究[J]. 建筑热能通风空调, 2010, 29(4): 14.
PENG Bo, WU Xiping, ZHENG Yi. Analysis and research on influencing factors of thermal environment in metro running tunnel[J]. Building Energy & Environment, 2010, 29(4): 14.

· 收稿日期:2022-10-26 修回日期:2022-12-20 出版日期:2025-01-10

Received:2022-10-26 Revised:2022-12-20 Published:2025-01-10

· 第一作者:田婷婷,硕士研究生,2461176979@qq.com

通信作者:余涛,副教授,yutao073@swjtu.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