

制动装置推出刚度对轨道交通车辆振动性能的影响

刘寅虎¹ 唐永明² 杨震寰³ 高浩³ 李文豪³ 曹云丽¹

(1. 南京中车浦镇海泰制动设备有限公司, 210031, 南京; 2. 北京交通大学机械与电子控制学院, 100044, 北京;
3. 西南交通大学轨道交通运载系统全国重点实验室, 610031, 成都)

摘要 [目的] 电机械制动是采用电机控制丝杆驱动, 实现推杆的推出动作使闸瓦与车轮接触, 完成制动力传递与摩擦制动的一种制动方式。需要研究这种新型制动方式对轨道交通车辆振动性能的影响。[方法] 介绍了电机械制动器和空气制动器的基本结构组成, 并对两种制动器进行了推出刚度测试和线路振动试验测试, 分析了制动器推出刚度对车辆颤振的影响。[结果及结论] 刚度测试发现, 因电机械制动器采用了电机驱动方式, 未采用空气制动器的气孔活塞, 故电机械制动器的推出刚度在常工作区内远大于空气制动器且存在非线性特征。在制动器装车后的线路试验中发现, 与装用空气制动器相比, 装用具有大推出刚度的电机械制动器会加剧车辆的制动颤振现象, 其关键部件的振动加速度也会增大。综合各项研究结果, 建议降低电机械制动器的推出刚度, 保证车辆实现平稳安全的制动过程。

关键词 轨道交通车辆; 振动性能; 推出刚度; 振动传递

中图分类号 U270.1⁺1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.06.009

Influence of Brake Device Push-out Stiffness on Vibration Performance of Rail Transit Vehicle

LIU Yinhu¹, TANG Yongming², YANG Zhenhuan³, GAO Hao³, LI Wenhao³, CAO Yunli¹

(1. CRRC Nanjing Puzhen Haitai Brake Equipment Co., Ltd., 210031, Nanjing, China; 2. School of Mechanical and Electronic Control Engineering, Beijing Jiaotong University, 100044, Beijing, China; 3. State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China)

Abstract [Objective] As a braking mode, electromechanical brake adopts the motor controlled screw rod drive to implement the pushing action, making the brake shoe to contact with the wheel and complete the transmission of brake force and friction brake. It is necessary to study the influence of the new brake mode on the vibration performance of rail transit vehicle.

[Method] The basic structure and the composition of the electromechanical brake and air brake are introduced. The push-out

stiffness test and track vibration test of the above two brakes are carried out and the influence of the brake push-out stiffness on vehicle vibration is analyzed. [Result & Conclusion] The stiffness test shows that the push-out stiffness of the electromechanical brake is much higher than that of the air brake in the normal working area and shows nonlinear characteristics, because it is driven by the motor and not equipped with stomatal piston as the air brake does. In line testing when the electromechanical brake is installed on the vehicle, it is found that compared with the air brake, the electromechanical brake will aggravate the vehicle brake vibration due to the large push-out stiffness, and the vibration acceleration of key components of the vehicle will also increase. Based on the research results, it is suggested that the push-out stiffness of the electromechanical brake shall be reduced to ensure smooth and safe brake processes for vehicles.

Key words railway vehicle; vibration performance; push-out stiffness; vibration transmission

在轨道交通列车制动中, 振动和噪声的产生机理主要包括黏滑运动机理、摩擦力-相对滑动速度负斜率机理、自锁-滑动机理、模态耦合机理等。既有研究发现, 车辆振动及噪声的影响因素有闸瓦和车轮间的摩擦因数, 以及负斜率特性、接触角、制动力、初始制动速度、温度等, 且较大的摩擦因数、明显的摩擦因数负斜率特征、过大的制动力会加剧摩擦振动^[1-2]。文献[3-8]研究发现改变夹钳摩擦块的结构和形状、改变制动器的压力曲线、改变闸片的弹性模量等方法可以改善列车制动时产生的振动和噪声现象。由此可知, 制动时闸瓦和车轮间的摩擦因数和闸瓦的弹性模量是产生振动的主要因素, 闸瓦的弹性模量会影响车轮与闸瓦间的接触刚度, 从而对制动时的车辆振动造成影响。

制动装置的闸瓦推出机构不同会使接触刚度出现差异, 从而造成车辆的振动性能出现差异。本文针对电机械制动器和空气制动器带来的不同推

出刚度进行刚度测试,并采用整车线路测试的方法,基于主要部件振动加速度特征,详细研究不同制动装置推出刚度下的轨道交通车辆制动时的轨道交通车辆振动性能,以期列车制动时出现摩擦振动的原因提供新的思路。

1 制动器的基本结构组成

1.1 电机械制动器

电机械制动技术是一种利用电能直接驱动摩擦副产生摩擦力实现制动作用的技术。该系统中的电动机可由电信号直接控制,可将电能转化为驱动摩擦副机构的机械能。电机械制动器主要包括驱动电机、传动机构、箱体及闸瓦,具有机械结构精度要求高,机械传递效率受结构影响较大,传递刚度响应度较小的特点。其机械结构如图 1 所示。施加制动时,驱动电机驱动传动机构将电机的旋转运动转换为推杆的直线运动,实现闸瓦的推出动作,使闸瓦与车轮贴合产生摩擦制动力,实现车辆的制动过程。这种制动器采用了电机驱动方式,其机构的推出刚度较高,因此这种驱动方式也称作“硬驱动”。

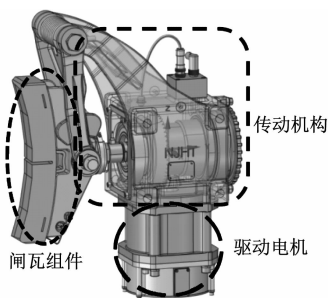


图 1 电机械制动器结构示意图

Fig. 1 Schematic drawing of electromechanical brake structure

1.2 空气制动器

空气制动器通过压缩空气推动非自锁丝杆-螺母传递机构动作,使闸瓦与车辆踏面贴合产生摩擦实现制动,具有结构可靠的特点。如图 2 所示,其机构主要包括气动缸(含活塞)、传动机构、箱体及闸瓦。制动时,压缩空气驱动活塞带动丝杆转动,从而将旋转运动转换为直线运动,推动闸瓦与车轮接触,产生摩擦制动力。这种推杆驱动方式为气动活塞缸,驱动介质存在较好的可压缩性,其推出刚度小于电机械制动,故其驱动方式可称作“软制动”。

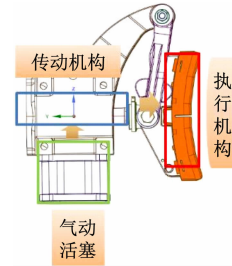


图 2 空气制动器结构示意图

Fig. 2 Schematic drawing of air brake structure

2 制动器推出刚度测试

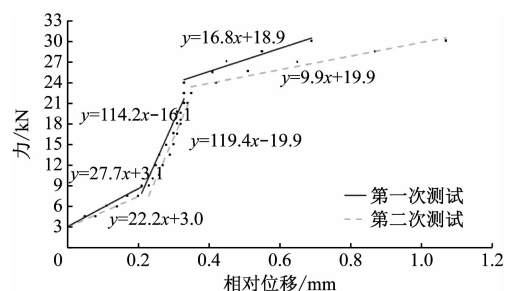
制动器主要有电机械制动器和空气制动器。本文对这两种制动器的推出刚度分别进行测试。

2.1 电机械制动器

对电机械制动器纵向推出刚度测试现场实景图如图 3 a) 所示。首先,使用千斤顶对电机械制动器施加纵向力,并通过千分表和力传感器记录,得到施加不同纵向力时的位移-力散点图,进行线性拟合得到位移-力拟合线,结果如图 3 b) 所示;然后,分析 2 次试验结果,得到电机械制动器在常工作区(推出力 12 kN)内的推出刚度。由测试结果知:电机械制动器的推出刚度存在明显的非线性特征;不同的推出力范围存在不同的推出刚度;在常工作区内电机械制动器推出刚度最大,其平均值可达 103.4 MN/m。



a) 测试现场实景图



b) 测试及位移-力拟合结果

注:拟合线表达式中, x 为相对位移, y 为力。下同。

图 3 电机械制动器纵向刚度测试

Fig. 3 Longitudinal stiffness test of electromechanical brake

2.2 空气制动器

采用相同的测试方法对空气制动器进行推出刚度测试。测试实景图如图4 a)所示,测试及拟合结果见图4 b)。由测试结果可知:空气制动器的位移-力曲线基本呈线性;3次测试所得刚度较为接近;空气制动器推出刚度均值为41.5 MN/m,远小于电机械制动器在常用工作区内的推出刚度,说明电机械制动器的闸瓦与车轮间接刚度更大,对车辆制动颤振的影响也可能更大。

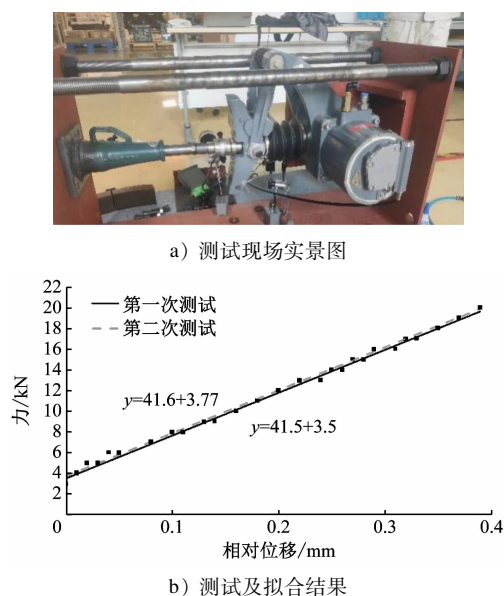


图4 空气制动器纵向刚度测试

Fig. 4 Longitudinal stiffness test of air brake

3 整车线路振动试验

为详细分析制动器推出刚度对车辆制动颤振的影响,本研究分别采用电机械制动器和空气制动器,进行整车线路振动试验。

3.1 试验测点及工况

整车线路振动试验的测点主要布设于制动器闸瓦托、制动器吊臂、轴箱体和构架端部等关键车辆部件。通过分析各测点的振动数据,即可得到制动时的车辆振动传递路径。

按照线路运行要求,试验工况为列车在直线线路上,以60 km/h设计速度,按加速、匀速、制动3个阶段采集整车振动数据。其中制动阶段仅施加常用制动。

3.2 制动器推出刚度对车辆颤振的影响

3.2.1 时域测试结果

各测点的时域测试结果见图5及图6。由图5

及图6知:车辆制动时,装用电机械制动器车辆的闸瓦托垂向振动加速度最大值约为3.0 g(g 为重力加速度),电机垂向振动加速度最大值约为1.8 g,构架端部振动加速度最大约3 g,且均在停车前有垂向振动放大的现象。装用空气制动器车辆的闸瓦托垂向振动加速度最大值约为1.7 g,电机垂向振动加速度最大值约为0.6 g,构架端部振动加速度最大约1.2 g在停车前有垂向振动未出现明显的放大。两种制动器下的轴箱垂向振动加速度随车速的增大而增大,均未在停车前出现放大现象。

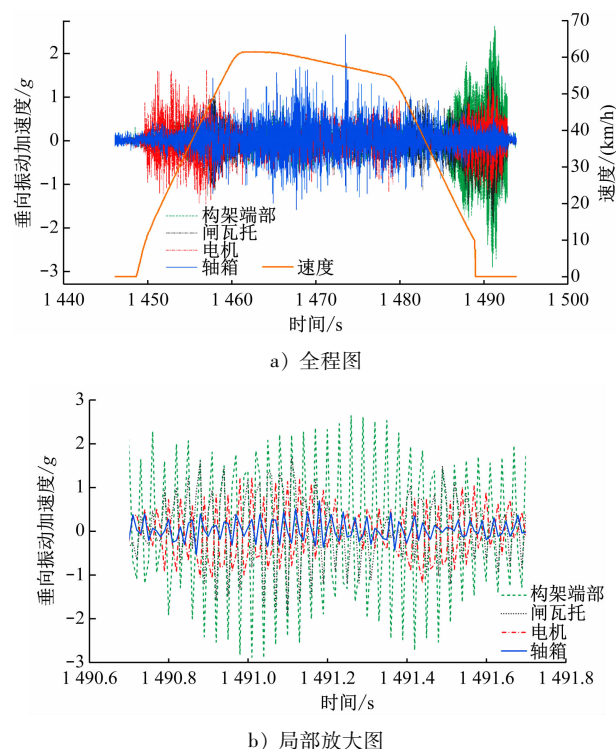
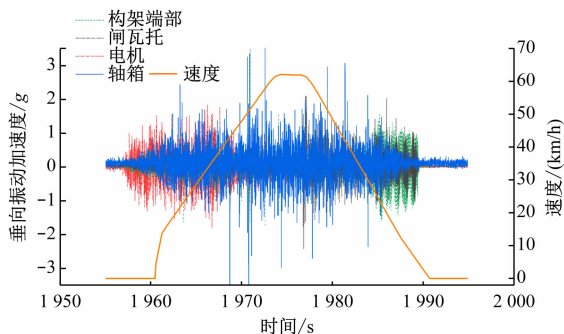


图5 采用电机械制动器时的振动时域测试结果

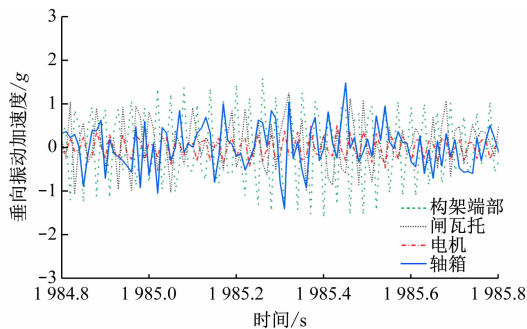
Fig. 5 Results of vibration time domain test with electromechanical brake

3.2.2 频域测试结果

从频域的角度,对比分析采用电机械制动器与空气制动器时闸瓦托测点和构架测点垂向振动加速度频率的差异。频域测试结果如图7和图8所示。由图7及图8可知:采用电机械制动器时,在100 Hz以内,闸瓦托唯一的垂向振动主频率为66 Hz;采用空气制动工况时,在100 Hz以内,闸瓦托唯一的垂向振动主频率为67 Hz;闸瓦托的垂向振动会传递到电机和构架端部。结合时域图进行分析可知,闸瓦托的振动会在构架端部放大,这可能与构架的弹性模态相关。



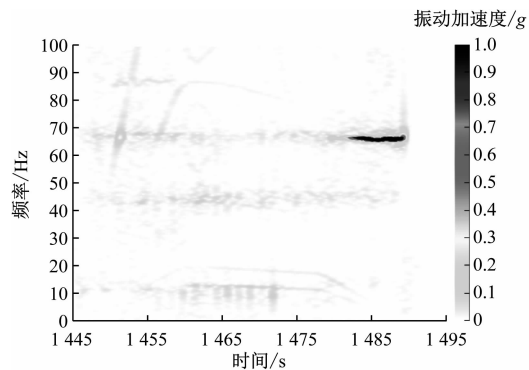
a) 全程图



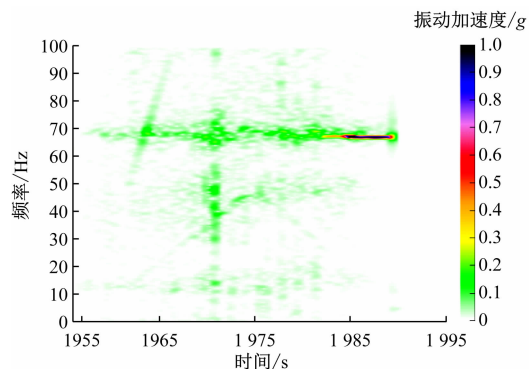
b) 局部放大图

图6 采用空气制动时的振动时域测试结果

Fig. 6 Results of vibration time domain test with air brake



a) 采用电机械制动器



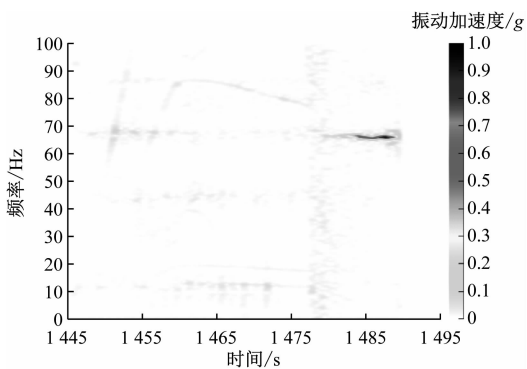
b) 采用空气制动器

图8 构架测点的振动频率

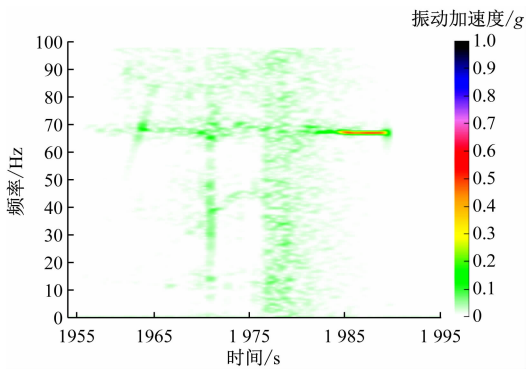
Fig. 8 Vibration frequencies of strutual measurement points

波,统计采用不同制动器时各测点垂向振动加速度均方根值 a_R ,统计柱状图如图9所示。

由图9可知:与采用空气制动器相比,采用电机械制动器时,闸瓦托测点的 a_R 增幅为 240%,构架侧梁电机测点的 a_R 增幅为 279%,轴箱体测点的 a_R 增幅为 107%,构架端部测点的 a_R 增幅为 262%。由此可见,采用电机械制动器加剧了闸瓦托、电机、轴箱和构架端部的垂向振动。



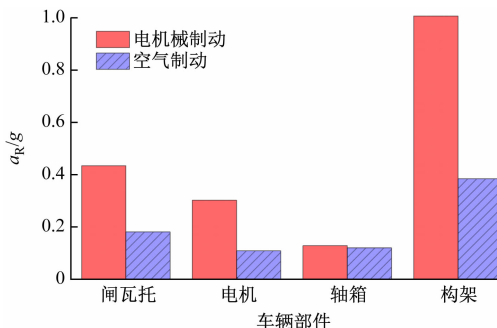
a) 采用电机械制动器



b) 采用空气制动器

图7 闸瓦托测点的振动频率分布

Fig. 7 Vibration frequency distribution of brake shoe

图9 采用不同制动器时各测点 a_R Fig. 9 Vertical vibration a_R at each testing point with different brakes

4 结语

本文通过刚度测试和整车线路振动试验,研究

3.2.3 统计值对比

截取制动施加阶段数据,以 60 ~ 75 Hz 带通滤

了制动器推出刚度对车辆振动性能的影响,主要研究结论如下:

1) 电机械制动器的推出刚度存在非线性特征,在常工作区内的推出刚度显著大于空气制动器。

2) 过大的制动器推出刚度易加剧制动时的车辆振动。

由此,建议降低电机械制动器的推出刚度,从而改善制动过程中的车辆振动性能。

本文测试得到的制动器推出刚度为准静态推出刚度,因闸瓦与车轮在接触过程中存在振动,因此建议对制动器的动态推出刚度进行详细的测试,从而更好地分析制动器推出刚度对车辆振动的影响。制动器推出刚度的降低可通过在推出机构串联小刚度结构实现,其具体结构设计及对车辆振动的影响有待进一步详细研究。

参考文献

- [1] ZHU Q, XIE J, ZHANG W, et al. Effect of the braking parameter on disc brake squeal of a railway vehicle [J]. *Wear*, 2023, 522: 204884.
 - [2] 李小彭, 李加胜, 李木岩, 等. 盘式制动系统参数对制动颤振的影响分析[J]. *振动、测试与诊断*, 2017, 37(1): 102.
LI Xiaopeng, LI Jiasheng, LI Muyan, et al. Analysis of the effect of disc brake system parameters on brake chatter[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2017, 37(1): 102.
 - [3] TANG B, MO J L, XU J W, et al. Effect of perforated structure of friction block on the wear, thermal distribution and noise characteristics of railway brake systems [J]. *Wear*, 2019 (426/427): 1176.
 - [4] TANG B, MO J L, WU Y K, et al. Effect of the friction block shape of railway brakes on the vibration and noise under dry and wet conditions[J]. *Tribology Transactions*, 2019, 62(2): 262.
 - [5] 唐斌. 摩擦块界面特征对列车制动尖叫噪声及磨损行为的影响[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
TANG Bin. Effect of interfacial features of friction blocks on the squeal noise and wear behaviors of train railway brake[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
 - [6] CASCETTA F, CAPUTO F, DE LUCA A. Squeal frequency of a railway disc brake evaluation by FE analyses[J]. *Advances in Acoustics and Vibration*, 2018: 4692570.
 - [7] CHEN G X, LV J Z, ZHU Q, et al. Effect of the braking pressure variation on disc brake squeal of a railway vehicle: test measurement and finite element analysis [J]. *Wear*, 2019 (426/427): 1788.
 - [8] 乔青峰, 杨伟东, 朱琪, 等. 铁路盘型制动噪声机理及其控制方法[J]. *西南交通大学学报*, 2021, 56(1): 62.
QIAO Qingfeng, YANG Weidong, ZHU Qi, et al. Generation mechanism of railway disc brake squeal and its suppression method [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2021, 56(1): 62.
- 收稿日期:2023-12-07 修回日期:2024-03-20 出版日期:2024-06-10
Received:2023-12-07 Revised:2024-03-20 Published:2024-06-10
• 第一作者:刘寅虎,正高级工程师,liuyinhu@njhtzd.com
通信作者:杨震寰,博士研究生,yagznhenhuan10@foxmail.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48页)
- [2] 张明锐, 李俊江, 林永乐, 等. 基于免疫退火遗传算法的城市轨道交通列车节能运行策略[J]. *城市轨道交通研究*, 2021, 24(12): 28.
ZHANG Mingrui, LI Junjiang, LIN Yongle, et al. Research on energy-saving operation strategy of urban rail transit train based on immune annealing genetic algorithm [J]. *Urban Mass Transit*, 2021, 24(12): 28.
 - [3] 聂莹莹, 谢刚, 郭彦宏, 等. 基于改进 DE 的城轨列车节能速度曲线研究[J]. *铁路计算机应用*, 2020, 29(11): 30.
NIE Yingying, XIE Gang, GUO Yanhong, et al. Research on energy saving speed curve of urban rail train based on improved differential evolution algorithm [J]. *Railway Computer Application*, 2020, 29(11): 30.
 - [4] HE Z, YANG Z, LV J. An energy-efficient operation strategy for high-speed trains[C]//2018 Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Shenyang, China. New York: IEEE, 2018: 3771.
 - [5] 丁文君. 基于多目标决策的轨道交通 ATO 运行模式曲线优化研究[J]. *电子测量技术*, 2020, 43(12): 65.
DING Wenjun. Research on rail traffic ATO running mode curve optimization based on multiple targets decision [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2020, 43(12): 65.
 - [6] XIAO Z, WANG Q, SUN P, et al. Real-time energy-efficient driver advisory system for high-speed trains [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2021, 7(4): 3163.
 - [7] 蔺嘉树. 基于改进萤火虫算法的 ATO 运行曲线优化研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
LIN Jiashu. Research on optimization of ATO curve based on improved firefly algorithm [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2021.
 - [8] 黄畅, 姜辰宇, 邢昕铨. 基于强化学习的列车驾驶曲线节能优化算法[J]. *数字通信世界*, 2022(1): 19.
HUANG Chang, JIANG Chenyu, XING Xinquan. An energy-efficient train control approach based on deep Q-network methodology [J]. *Digital Communication World*, 2022(1): 19.
 - [9] LI Z, CHEN L, ROBERTS C, et al. Dynamic trajectory optimization design for railway driver advisory system [J]. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2018, 10(1): 121.
- 收稿日期:2023-08-13 修回日期:2023-10-12 出版日期:2024-06-10
Received:2023-08-13 Revised:2023-10-12 Published:2024-06-10
• 第一作者:王凯,工程师,kkw1207@163.com
通信作者:朱琴跃,教授,zqymelisa@tongji.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