

# 基于轮轴蠕滑率检测的列车测速方法

赵旻杰<sup>1</sup> 郭子明<sup>2</sup> 沈 喆<sup>1</sup> 吕新军<sup>2</sup> 方 兴<sup>2</sup>

(1. 上海申通地铁集团有限公司, 200232, 上海; 2. 卡斯柯信号有限公司, 200072, 上海)

**摘 要** [目的]城市轨道交通系统中,列车测速定位技术可为列车自动驾驶、避撞、调度指挥等众多应用提供信息支撑。目前列车控制系统结构功能日趋复杂,随着城市轨道交通运营效率、服务等级的持续提升,对列车测速定位的性能要求越来越高,需进一步提升 ATP(列车自动防护)系统在不同场景下的测速定位能力。[方法]提出了基于轮轴蠕滑率检测的列车测速方法,首先介绍了列车测速定位系统的结构,阐述了基于轮轴蠕滑率的列车测速技术流程。然后对轮轴蠕滑理论进行了阐述,对多普勒雷达的测速误差进行建模,得到雷达最大参考速度,以此为基准计算轮轴的蠕滑率,针对不同的蠕滑率对里程计速度施加不同程度的补偿。最后利用现场试验数据,对所提的测速方法进行验证。[结果及结论]试验结果表明,列车制动阶段的大部分时间内轮轴均处于小蠕滑状态,对里程计速度施加较小补偿后的列车最大速度低于既有 ATP 计算的最大速度。在列车最小速度不变的情况下,该方法在保证安全的前提下,显著提高了列车运行速度的测量精度。

**关键词** 城市轨道交通; 列车自动防护; 列车测速; 里程计; 多普勒雷达; 轮轴蠕滑检测

**中图分类号** U284.48; U270.33

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2024.04.042

## Train Speed Measurement Approach Based on Wheel-axle Creep Rate Detection

ZHAO Minjie<sup>1</sup>, GUO Ziming<sup>2</sup>, SHEN Zhe<sup>1</sup>, LYU Xinjun<sup>2</sup>, FANG Xing<sup>2</sup>

(1. Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd., 200232, Shanghai, China; 2. CASCO Signal Co., Ltd., 200072, Shanghai, China)

**Abstract** [Objective] In urban rail transit systems, train velocity measuring and positioning technology offers critical information to many applications such as train autonomous driving, collision avoidance, dispatching and directing. The architecture and function of the train control systems are increasingly complex, and the continuous level-up of the operation efficiency and the services requires higher performance for train velocity measuring and positioning, so that the ability of the ATP (automatic train protection) measuring velocity and positioning in different scenarios needs to be improved. [Method] A train velocity

measurement approach based on wheel-axle creep rate detection is proposed. First, the architecture of the train velocity measurement and localization system is introduced and the technical process of train velocity measurement based on wheel-axle creep rate is explained. Then the wheel-axle creep theory is explained and the velocity measurement error of the Doppler radar sensor is modeled to obtain the radar maximum reference velocity, which is used to calculate the wheel-axle creep. Different compensation for the odometer velocity is applied based on different wheel-axle creep status. Finally, the velocity measurement approach proposed is verified using the experimental data sets.

[Result & Conclusion] The experimental results show that most of the time the wheel-axle is in a low creep state during the train braking stage. The velocity obtained by less compensation for the odometer velocity is much lower than the maximum velocity calculated by the existing ATP. This approach remarkably improves the velocity measurement accuracy under the premise of safety when the train minimal velocity is identical.

**Key words** urban rail transit; automatic train protection; train velocity measurement; odometer; Doppler radar; wheel-axle creep detection

ATP(列车自动防护)系统需维护一个以列车车头最大位置和车尾最小位置为边界的安全定位包络<sup>[1]</sup>,进而确定列车的速度置信区间。能否准确感知列车位置状态,对列车运行效率与安全有着重要影响。传统的“应答器+里程计”组合模式已经难以满足列车控制系统车载中心化的发展需求,因而产生了基于卫星定位、惯性传感器、多普勒雷达(以下简称“雷达”)及涡流传感器的多种测速定位方案<sup>[2]</sup>。由于安全性较高,里程计目前依然是实现列车测速定位功能的主流传感器,但该装置存在车轮空转、打滑、轮径磨损等问题,严重制约了其测速性能,尤其在轮轴空滑阶段,列车的测速精度明显下降。城市轨道交通中存在大量卫星信号被遮挡的场景,多径效应严重<sup>[3]</sup>,因此卫星定位技术暂不适合引入到城市轨道交通列车测速定位系统中。惯性传

传感器在 ATP 中多用于轮轴空滑检测,因其采样误差及随机噪声的存在,不能直接应用于列车速度计算<sup>[4]</sup>。雷达在列车低速运行状态下的测速精度不佳<sup>[5]</sup>,通常与安装于轮轴的里程计组合使用,以提高整体测速性能。

本文根据轮轴蠕滑原理,基于雷达测量速度对里程计测得的轮轴速度进行蠕滑率检测,在此基础上对轮轴速度施加不同程度的补偿,并利用现场实验数据对该方法的性能进行验证。

## 1 列车测速定位系统

### 1.1 系统结构

列车测速定位系统结构如图 1 所示,主要包括车载控制器、雷达、里程计及信标天线等。列车两端的设备配置相同、互为热备。里程计安装于列车轮轴上,通过检测列车轮轴转动引起的脉冲变化实现对列车运行速度的测量;雷达利用一个结实防抖、与轨面平行的支架固定在车体下,安装时需保证信号反射强度良好,根据多普勒效应对列车运行速度进行测量;信标天线安装在车体上,当列车经过地面信标时激活并接收来自信标的准确位置信息,完成列车定位初始化并对定位累积误差进行修正。本文重点关注基于里程计和雷达的 ATP 最大速度测量,不考虑地面信标对系统误差的校正。

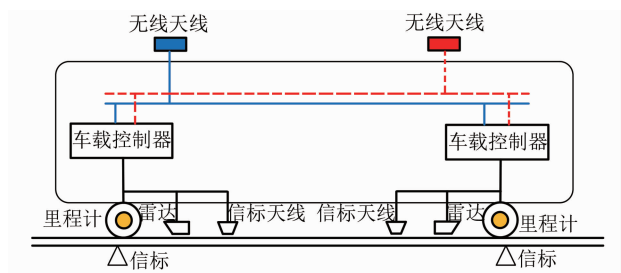


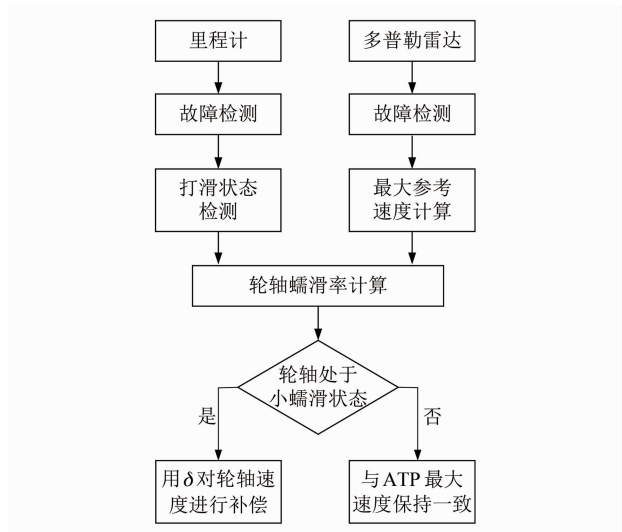
图 1 列车测速定位系统结构

Fig. 1 Architecture of train velocity measurement and localization system

### 1.2 列车测速的技术流程

基于里程计安装在列车制动轴的情况,可以认为只有列车制动或轮轴打滑会对里程计测速造成影响。由于轮轴打滑在实际列车运行过程中发生的概率很低,因此,提升制动阶段的测速精度对于列车测速定位系统整体性能的优化至关重要。对 ATP 而言,列车的真实速度是无法获取的,其测速精度以速度测量置信区间的大小来表示,置信区间越小,则测速精度越高。在上文所述列车测速定位系统结构及

技术原理的基础上,本文提出的列车测速方法以雷达最大参考速度为依据来计算轮轴蠕滑率,以实现轮轴速度补偿,其技术流程如图 2 所示。



注: $\delta$ ——轮轴速度补偿系数。

图 2 基于轮轴蠕滑率的列车测速技术流程

Fig. 2 Process of train velocity measurement based on wheel-axle creep rate

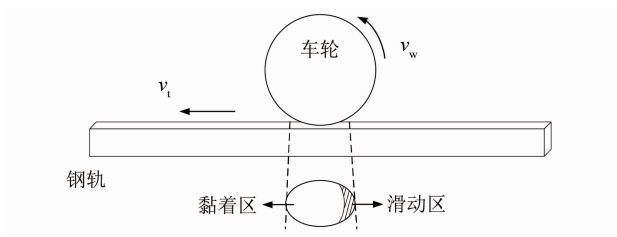
基于轮轴蠕滑率检测的列车测速方法具体为:①对里程计和雷达的速度测量数据进行预处理,根据传感器特性并结合相应的故障诊断机制,判断传感器是否正常工作;②采用加速度阈值法判断轮轴是否进入制动状态,并根据雷达误差参数计算得到最大参考速度;③以雷达最大参考速度为基准,计算轮轴蠕滑率,若轮轴处于小蠕滑状态,则采取较小的轮轴速度补偿系数  $\delta$  对轮轴速度进行补偿,以获得列车最大速度,否则应使列车最大速度与既有 ATP 计算的列车最大速度保持一致。

本文所提的方法只针对 ATP 计算的列车最大速度进行优化,列车最小速度保持不变。

## 2 列车制动阶段的速度测量

### 2.1 轮轴蠕滑理论

在列车运行过程中,由于车轮和钢轨都是弹性体,在车轮施加压力的作用下,轮轨接触处会产生弹性形变,进而形成一个椭圆形的接触区,如图 3 所示。将列车车轮在该椭圆形接触区内产生的微观弹性滑动现象称为蠕滑<sup>[1]</sup>。椭圆形接触区可分为 2 个部分:一部分为黏着区,该区域内车轮与钢轨的相对速度为 0;另一部分为滑动区,轮轨发生微观滑动,二者的相对速度不为 0。



注： $v_l$ —列车运行速度； $v_w$ —轮轴速度（其值等于里程计速度）。

图3 轮轴蠕滑示意图

Fig. 3 Illustration of wheel-axle creep

蠕滑是列车牵引力及制动力发生作用的重要前提。对车轮施加一个力矩，车轮将发生转动。伴随着蠕滑现象，力矩被不断转化为轮轨间的黏着力。当施加的力矩较小时，滑动区被限制在接触面后沿极小的范围内；若施加的力矩增大，滑动区面积及蠕滑速度将随之增大。当所施加的力矩超过一定数值时，滑动区会占据整个接触面，蠕滑发展为宏观滑动，车轮产生的黏着力迅速减小，列车将发生空转或打滑。

蠕滑现象的发生，导致列车运行速度与轮轴速度间存在一定偏差。蠕滑速度总是与施加力矩的方向相反，即与列车的加速度方向相反。在列车牵引加速运行过程中，列车运行速度小于轮轴速度；在列车制动减速运行过程中，列车运行速度大于轮轴速度。设制动状态下的轮轴蠕滑率为 $\lambda$ ，其计算式为：

$$\lambda = (v_l - v_w) / v_l \quad (1)$$

根据蠕滑率的计算结果，将列车的制动状态分为小蠕滑和大蠕滑两种。当蠕滑率小于设定的阈值 $\mu$ 时，认为轮轴处于小蠕滑状态，反之则认为轮轴处于大蠕滑状态。

## 2.2 雷达速度误差模型分析

本文所采用的雷达传感器型号为德意达的DRS05/1a，传感器自身的测速误差及传感器的安装误差均会影响列车速度的测量精度。因此，为了将雷达速度引入ATP速度补偿逻辑中，需要准确建立雷达测速误差模型。

雷达的测速误差可分为系统误差与随机误差两部分。其中：系统误差可分解为比例因子误差与常值误差。雷达在正常工作状态下有高精度、低精度两种模式，不同工作模式下的系统比例因子误差不同，高精度模式下的系统比例因子误差为1%，低精度模式下的系统比例因子误差为3%。根据每帧雷达数据中的状态位可得知当前雷达的工作状态，进而确定其所对应的系统比例因子误差。

雷达信号的传输与处理存在180 ms的延时，即雷达输出的是当前时刻前180 ms的速度测量值。该延时在列车惰行时对速度测量的影响不大，但在列车加减速过程中，会导致雷达速度存在一个与加速度相关的偏差。假设列车当前加速度为 $1 \text{ m/s}^2$ ，则延时造成的雷达速度与真实速度的偏差约为 $-0.65 \text{ km/h}$ 。此误差可以利用列车的加速度信息予以补偿。

雷达的随机误差是在专门的实验室环境下测得的，可看作均值为0的高斯白噪声。雷达的工作模式不同，速度范围不同，其对应的随机误差也有所差异，两种工作模式下不同列车运行速度 $v_l$ 范围所对应的雷达随机误差标准差如表1所示。理论上可以通过求均值的方法来减小雷达的随机误差。

表1 两种工作模式下不同 $v_l$ 范围所对应的雷达随机误差标准差

Tab. 1 Standard deviation of radar stochastic error corresponding to different  $v_l$  ranges under two working modes

模式	$v_l$ 的范围/(km/h)	雷达随机误差标准差/(km/h)
高精度	0~100	<0.4
	>100	<0.004 $v_l$
低精度	0~100	<0.8
	>100	<0.008 $v_l$

雷达的安装角度（偏航角、俯仰角、横滚角）误差会引起雷达的测速误差。其中：偏航角误差引起的测速误差相对较小，表现为非线性的比例因子误差，当偏航角误差为 $1^\circ$ 、 $2^\circ$ 、 $3^\circ$ 时，其测速相对误差分别为0.02%、0.06%、0.14%；俯仰角误差对速度测量的影响可近似为线性的比例因子误差，俯仰角误差每增加 $1^\circ$ ，其测速误差将增加1.8%；横滚角误差对测速的影响与雷达安装位置有关，当雷达安装于列车一侧时， $\pm 10^\circ$ 内的横滚角误差至多会导致-2%的测速误差。这些安装角度误差均可通过安装校准方式进行补偿。此外，温度变化、光速变化等因素也会引起雷达的测速偏差，但这些因素的影响因子极小，可忽略不计。

综上所述，雷达的测速误差 $e_v$ 可以表示为比例因子误差、常值误差及高斯白噪声的组合：

$$e_v = kv_{\text{real}} + b + w \quad (2)$$

式中：

$k$ ——比例因子误差系数，等于所有比例因子误



差系数之和;

$v_{\text{real}}$ ——列车真实速度;

$b$ ——延时导致的常值误差;

$w$ ——高斯白噪声。

## 2.3 基于轮轴蠕滑率的测速补偿机制

根据 2.1 节的描述,轮轴蠕滑率为轮轴速度与列车真实速度的相对偏差。然而列车真实速度是无法获得的,因此考虑采用雷达最大参考速度作为依据来计算轮轴蠕滑率  $\lambda_r$ :

$$\lambda_r = (v_{\text{radar,max}} - v_w) / v_{\text{radar,max}} \quad (3)$$

$$v_{\text{radar,max}} = (1+k)v_{\text{radar}} + b + 3\sigma \quad (4)$$

式中:

$v_{\text{radar,max}}$ ——考虑了系统误差与随机误差的雷达最大参考速度;

$v_{\text{radar}}$ ——雷达输出速度;

$\sigma$ ——雷达随机误差标准差。

$v_{\text{real}}$  满足均值为  $(1+k)v_{\text{radar}} + b$ 、标准差为  $\sigma$  的高斯分布。根据概率分布,  $v_{\text{real}} > v_{\text{radar,max}}$  的概率不大于 0.001 35。如果  $\lambda_r < \mu$ , 则轮轴真实蠕滑率大于  $\mu$  的概率

$$P\left(\frac{v_{\text{real}} - v_w}{v_{\text{real}}} > \mu\right) < P\left(\frac{v_{\text{real}} - v_w}{v_{\text{real}}} > \frac{v_{\text{radar,max}} - v_w}{v_{\text{radar,max}}}\right) \quad (5)$$

而

$$P\left(\frac{v_{\text{real}} - v_w}{v_{\text{real}}} > \frac{v_{\text{radar,max}} - v_w}{v_{\text{radar,max}}}\right) = P(v_{\text{real}} > v_{\text{radar,max}}) \leq 0.001 \ 35 \quad (6)$$

因此,轮轴真实蠕滑率大于  $\mu$  的概率小于 0.001 35。为了满足 ATP 测速功能的安全需求,只有当连续 3 次根据式(3)计算得到的  $\lambda_r$  均小于  $\mu$  时,才判定轮轴处于小蠕滑状态(即大蠕滑误判为小蠕滑的概率小于 0.001 35<sup>3</sup>),采用  $\delta$  对里程计速度进行补偿( $\delta \geq \mu$ ),此时  $v_{\text{train,max}}$  的计算式为:

$$v_{\text{train,max}} = (1+\delta)v_w \quad (7)$$

## 3 试验结果分析

在试验车上安装里程计和雷达传感器,二者与车载控制器共同构成列车测速定位系统。该系统能够通过数据接口从既有 ATP 中获得列车测速信息。此外,试验车还安装了一套高精度的 GNSS(全球导航卫星系统)/INS(惯性导航系统)组合导航设备(设备型号为 SPAN-CPT),用于提供列车真实速度。利用实际地铁线路上采集得到的数据,对本文提出的列车测速方法进行验证。

图 4 为基于 SPAN-CPT 型设备采集到的速度计算得到的  $\lambda_r$ ,图 5 为计算所得的  $\lambda_r$  占比情况。当列车启动或停止时,列车运行速度很小,且 SPAN-CPT 较里程计测速分辨率更高,导致对应时刻的轮轴蠕滑率较大。如图 5 所示,里程计测速结果中  $\lambda_r$  小于 0.02 的占比为 94.6%,小于 0.04 的占比为 97.0%。

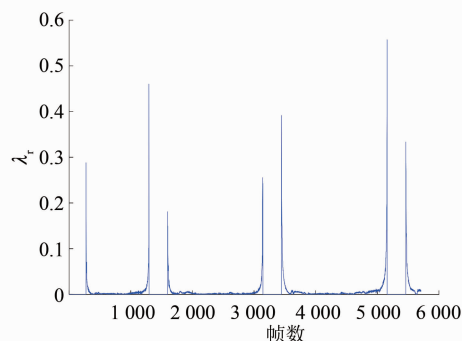


图 4 基于 SPAN-CPT 型设备计算得到的轮轴蠕滑率

Fig. 4 Wheel-axis creep rate calculated based on SPAN-CPT

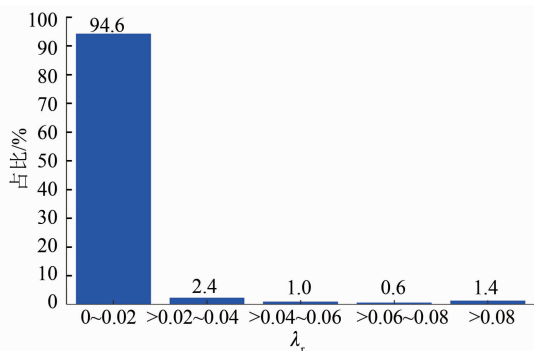


图 5 基于 SPAN-CPT 型设备计算得到的轮轴蠕滑率占比情况

Fig. 5 Proportion of the wheel-axis creep rates calculated based on SPAN-CPT

选取两组制动阶段数据做进一步分析。将本文基于轮轴蠕滑率计算得到的  $v_{\text{train,max}}$  与既有 ATP 计算的列车最大速度进行对比,其结果如图 6 所示。由图 6 可看出:根据  $v_{\text{radar,max}}$  对  $\lambda_r$  的检测,在列车制动阶段的大部分时间内,轮轴均处于小蠕滑状态;采用  $\delta$  对里程计速度进行补偿后得到的最大速度远小于既有 ATP 计算的列车最大速度。因此,在 ATP 计算的列车最小速度保持不变的情况下,本文所提方法在考虑列车运行安全的前提下,可显著提高 ATP 的测速精度。

## 4 结语

本文提出了一种基于轮轴蠕滑率检测的列车测速补偿方法,在充分考虑雷达测速误差的基础上,利

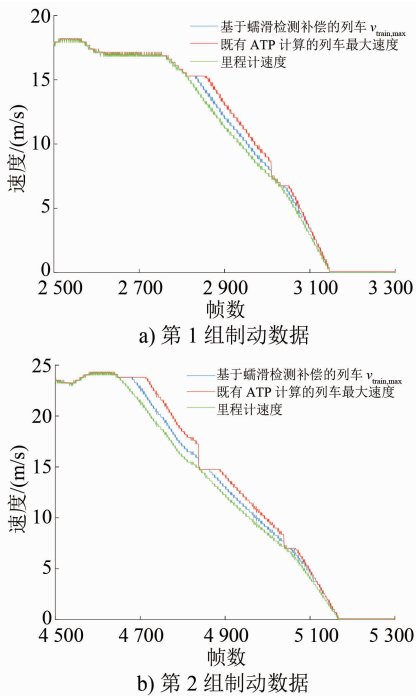


图 6 两组制动数据的速度补偿结果对比

Fig. 6 Comparison of velocity compensation results of two braking data sets

用雷达最大参考速度判断轮轴蠕滑状态,对小蠕滑状态下的里程计速度采取较小的补偿策略。对现场试验数据的验证结果证明,该列车测速方法可提高 ATP 在制动阶段的速度测量精度。

## 参考文献

- [1] 张梁. 列车组合测速定位方法及其安全评估研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.

(上接第 219 页)

## 参考文献

- [1] 王群伟. 城市轨道交通车辆制动系统制动不缓解故障分析[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(6): 116.  
WANG Qunwei. Analysis of brake relief fault in metro vehicle controlled brake system[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(6): 116.
- [2] 吴萌岭, 陶再坤, 田春, 等. 中继阀泄漏引起常用制动不缓解故障特征分析[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(8): 1864.  
WU Mengling, TAO Zaikun, TIAN Chun, et al. Fault characteristic analysis of service brake not releasing caused by relay valve leakage[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34

ZHANG Liang. Research on multi-sensor fusion algorithm for train positioning and safety assessment[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2018.

- [2] 王义惠, 罗仁士, 曹芳, 等. 铁路防撞系统 RCAS 的关键问题研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(6): 46.  
WANG Yihui, LUO Renshi, CAO Fang, et al. Research on the key issues of railway collision avoidance system[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(6): 46.
- [3] 刘江, 蔡伯根, 王剑. 基于卫星导航系统的列车定位技术现状与发展[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(11): 4033.  
LIU Jiang, CAI Baigen, WANG Jian. Status and development of satellite navigation system based train positioning technology[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(11): 4033.
- [4] 周达天. 基于多传感器信息融合的列车定位方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.  
ZHOU Datian. Research on multi-sensor information fusion based train location method[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007.
- [5] 崔科, 董德存. 列车组合测速系统安全完整性分析[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(7): 56.  
CUI Ke, DONG Decun. Analysis of the safety integrity in integrated train speed measurement system[J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(7): 56.
- 收稿日期:2022-09-29 修回日期:2022-12-30 出版日期:2024-04-10  
Received:2022-09-29 Revised:2022-12-30 Published:2024-04-10  
· 第一作者:赵旻杰,高级工程师,zminjie@metro.sh.cn  
通信作者:郭子明,工程师,ilysunying@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

(8): 1864.

- [3] 魏灿刚, 安震, 郭宗斌. 城市轨道交通车辆用紧急阀故障分析及改进措施[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(4): 94.  
WEI Can'gang, AN Zhen, GUO Zongbin. Fault analysis of urban rail vehicle emergency valve and improvement measures[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(4): 94.

- 收稿日期:2021-12-23 修回日期:2022-03-22 出版日期:2024-04-10  
Received:2021-12-23 Revised:2022-03-22 Published:2024-04-10  
· 通信作者:罗铁军,高级工程师,j18731585960@163.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