

高速磁浮维修基地轨道梁连接螺栓松动对轨道结构 振动影响的试验研究*

薛懿铭^{1,2} 叶丰² 彭龙^{1,2}

(1. 同济大学铁道与城市轨道交通研究院, 201804, 上海; 2. 同济大学磁浮交通工程技术研究中心, 201804, 上海)

摘要 [目的] 在列车调试过程中, 高速磁浮维修基地钢制轨道梁可能因其特有的构造特性而产生较大振动, 进而引发螺栓松动问题。此现象可能会导致轨道梁振动特性发生变化, 而车轨耦合系统参数的变动又可能诱发列车和轨道的共振, 进而对轨道结构造成潜在伤害。因此, 需要探究螺栓松动对轨道梁结构振动的影响。[方法] 在阐述试验设计方案及原理的基础上, 深入探讨了螺栓松动对轨道梁轨道结构模态和动力响应特性的影响。在结构模态方面, 分别采用脉冲激励和自然激励方式, 对无载状态(即轨道空闲)及有载状态(即轨道被列车占用)下的轨道模态进行测试, 利用随机子空间法进行模态辨识, 最后通过稳定图分析了螺栓松动对两种状态下轨道模态的影响。在动力响应特性方面, 在轨道上施加悬浮激励, 螺栓在列车多次悬浮过程中逐渐松动, 采集轨道梁的加速度响应信号, 并在时域和频域两个方面对其进行了详细分析。[结果及结论] 有载状态及无载状态下, 螺栓松动均引起了模态频率的下降和振型的变化。在有载状态下, 螺栓松动后阻尼比有较明显的增加。在静悬过程中, 轨道梁与列车发生了共振, 螺栓松动不仅影响了轨道梁的振幅, 还改变了轨道梁振动的对称性。

关键词 高速磁浮交通; 轨道梁; 螺栓松动; 轨道结构振动; 模态试验

中图分类号 U231.2⁺13

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.04.004

Experimental Study of Rail Beam Joint Bolt Loosening Impact on Rail Structure Vibration in High-Speed Maglev Maintenance Base

XUE Yiming^{1,2}, YE Feng², PENG Long^{1,2}

(1. Institute of Rail Transit, Tongji University, 201804, Shanghai, China; 2. Maglev Transportation Engineering R & D Center, Tongji University, 201804, Shanghai, China)

Abstract [Objective] During the train debugging process, significant vibrations may occur in the steel rail beams of high-speed maglev maintenance bases due to their unique structural characteristics, potentially leading to bolt loosening issues.

This phenomenon could alter the vibration characteristics of the rail beams, and changes in the parameters of the vehicle-track coupling system might induce vehicle-track resonance, posing potential harm to rail structure. Therefore, it is essential to investigate the impact of bolt loosening on the vibration of rail structures. [Method] After expounding the experimental design scheme and principles, the impact of bolt loosening on the modal and dynamic response characteristics of the rail beam and structure are investigated. For structural modal analysis, pulse and ambient excitations are employed to test the track modal properties under both unloaded (the rail is unoccupied) and loaded (the rail is occupied by a train) conditions. Modal identification is carried out using the method of Stochastic Subspace Identification (SSI). Finally, the impact of loose bolt on rail modal properties under both conditions are analyzed through stability diagrams. In terms of dynamic response characteristics, levitation excitation is applied to the rail, and the bolt is gradually loosened during multiple times of static levitation process. Acceleration response signals of the steel beams are collected and a detailed analysis is conducted in both time and frequency domains. [Result & Conclusion] Bolt loosening, under both loaded and unloaded conditions, caused a decrease in modal frequencies and a change in mode shapes. But under the loaded condition, a considerable increase in the damping ratio is observed after bolt loosening. In the static levitation process, resonance occurred between the rail beam and the train, where bolt loosening not only affected the amplitude of the rail beam vibrations but also altered the symmetry of rail beam vibrations.

Key words high-speed maglev transit; rail beam; bolt loosening; rail structure vibration; modal test

第四次工业革命推动轨道交通领域的飞速发展。目前, 常导磁浮已经实现了商业化运营。常导磁浮维修基地的轨道梁是磁浮列车安装、维修和调

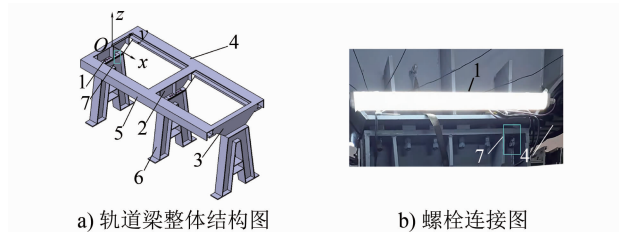
*“十四五”国家重点研发计划课题(2023YFB4302502-05); 上海市多网多模式轨道交通协同创新中心项目

试的基准。轨道梁为框架式结构,具有质量轻、阻尼低的特点,其结构特性和应用场景与磁浮线路道岔类似。在磁浮技术发展过程中,多条线路出现了剧烈的车岔耦合振动现象^[1]。文献[2]指出了维修基地轨道梁存在耦合振动强烈的问题,在强烈的振动作用下螺栓松动情况较为频发。从宏观角度看,螺栓松动改变了轨道梁的局部刚度,从而改变了轨道梁结构的固有特性(如频率、阻尼比、振型等),进而影响了轨道梁的动力响应^[3-4]。

目前对耦合振动的研究主要以仿真为主,缺乏实测数据分析,且大多应用于中低速磁浮道岔,而对高速磁浮维修基地内钢制轨道梁振动及其引起的局部部件失效等方面的研究非常少。文献[5]初步探究了同济大学嘉定校区高速磁浮试验线(以下简称“嘉定试验线”)上螺栓松动对钢制轨道梁整体动力响应特性的外在影响,以及对有载状态(即轨道被列车占用)的影响。在此基础上,本文通过试验,从时域和频域两个角度,深入探究高速磁浮维修基地轨道梁螺栓松动对其振动特性,以及对无载状态(即轨道空闲)、有载状态的影响。

1 试验设计

图1为嘉定试验线维修基地内轨道梁的典型结构。该轨道梁由钢梁、钢立柱两部分组成,其中钢梁是一种由功能件纵梁和鱼腹板梁构成的对称框架式结构。钢梁和钢立柱之间通过均匀间隔的螺栓进行固定。



注:1—1[#]鱼腹板梁;2—2[#]鱼腹板梁;3—3[#]鱼腹板梁;4—功能件纵梁 A;5—功能件纵梁 B;6—钢立柱;7—试验螺栓。

图1 高速磁浮维修基地轨道梁结构示意图

Fig. 1 Diagram of rail beam structure at high-speed maglev maintenance base

图1 b)中,1[#]鱼腹板梁靠近功能件纵梁 A 位置处的螺栓即为试验螺栓。为了测试螺栓松动对轨道梁振动造成的影响,在嘉定试验线进行了钢梁动力响应特性试验及模态试验,试验测点布置如图2所示。

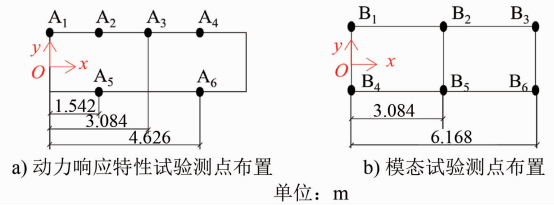


图2 轨道梁动力响应特性试验及模态试验的测点位置
Fig. 2 Position of measuring points for dynamic response characteristic test and modal test of the rail beam

在动力响应特性试验中,先卸下原始螺栓,对新安装的试验螺栓进行手动预紧,使其具备无松动的初始状态。将试验用车悬浮在轨道梁上约 2 min,停止悬浮后将列车落下,即完成一次悬浮试验。采用单轴加速度传感器,采集轨道梁在列车静悬状态下的垂向加速度响应信号。在悬浮过程中,观察发现试验螺栓有自行松动迹象。

在模态试验中,当轨道梁处于无载状态时,使用力锤对测点 B₄ 进行垂向激励,采集螺栓未松动及完全松动两种情况下的轨道梁脉冲响应信号。当钢梁处于有载状态时,因列车占据轨面导致没有试验操作空间,无法使用力锤进行激励,为此,在完成动力响应测试后,采集螺栓未松动及完全松动两种情况下自然激励引起的垂向加速度响应信号。

2 轨道结构模态试验及结果分析

2.1 模态识别方法

本文用 RDT(随机减量法)算法与 DATA-SSI(数据驱动随机子空间识别)算法相结合的方式进行的模态识别,并通过稳定图对模态识别结果进行判断。

RDT 算法通过系统响应来分析系统特征,其基本思想是将原始数据分段平均,去掉随机成分,构造自由衰减信号。其特点是不会改变数据的频率信息,同时能够降低一部分随机噪声,有利于提高计算速度。DATA-SSI 算法是一种基于线性离散状态空间的模态识别算法,将输入项和噪声项合并,利用白噪声统计特性得到卡尔曼滤波状态序列,估算系统矩阵进而进行模态参数识别,其相关计算见文献[6]。

模态试验得到的数据首先通过 RDT 算法进行处理,以降低噪声和缩短数据长度,然后对处理后的数据进行模态识别,最后通过稳定图判定模态识别结果。稳定图是一种避免虚假模态影响的有效手段,其计算方式如文献[7]所述。稳定图可逐渐提高识别阶数,若相邻两阶参数的相对误差不超过设定阈值,则将该频率点判定为稳定点。以频率为横

坐标,阶数为纵坐标,将稳定点绘制在一张图上,即可得到稳定图。

2.2 有载状态下轨道结构模态试验结果分析

设定稳定图的频率阈值为 1%,阻尼比阈值为 5%,MAC(模态置信准则)阈值为 98%,可得到有载状态下的轨道结构模态稳定图,如图 3 所示。由图 3 可知:①螺栓未松动时的一阶频率为 14.9 Hz,二阶为 17.1 Hz;螺栓完全松动后,计算得到的一阶频率为 13.8 Hz,二阶频率为 16.2 Hz。②螺栓完全松动导致前两阶频率较未松动时均降低了 1.0 Hz 左右。

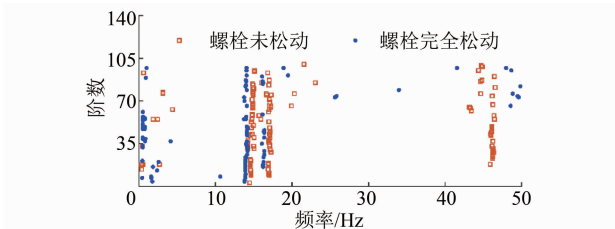


图 3 有载状态下的轨道结构模态稳定图
Fig. 3 Modal stability diagram of rail structure under loaded condition

有载状态下轨道结构模态试验得到阻尼比随频率的分布情况如图 4 所示。由图 4 可知:①螺栓未松动时,轨道梁阻尼比约为 0.020;螺栓完全松动后,轨道梁阻尼比约为 0.055。②与未松动状态相比,螺栓完全松动后的一阶阻尼比分布区间更高,离散性更大。

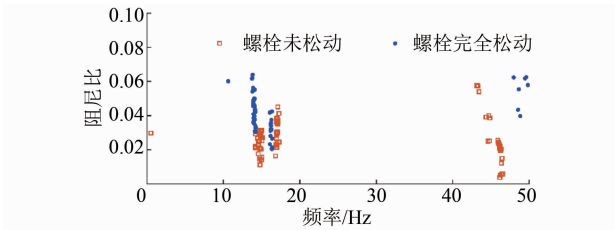
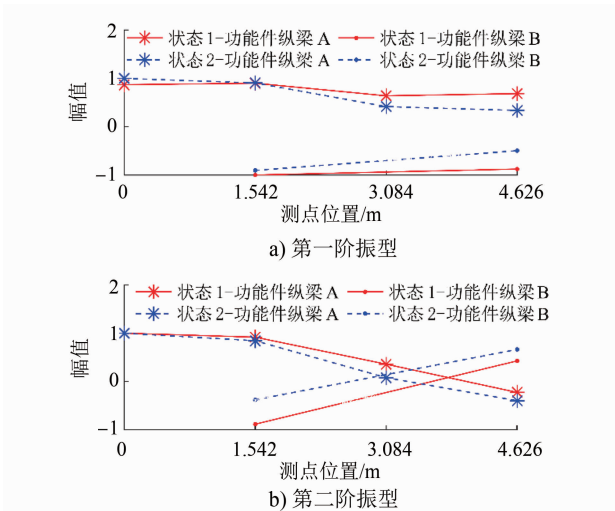


图 4 有载状态下轨道结构模态试验得到的阻尼比随频率分布情况
Fig. 4 Distribution diagram of damping ratio with frequency obtained from rail structure modal tests under loaded condition

有载状态下,对比螺栓未松动与螺栓完全松动两种状态的振型,其振型变化如图 5 所示。由图 5 可知:第一阶振型下,两根功能性纵梁的平行度均发生改变;第二阶振型下,两根梁振型的波节位置向螺栓松动区域方向移动。

2.3 无载状态下轨道结构模态试验结果分析

无载状态下的稳定图阈值设置与有载状态下保持一致,由此可得到无载状态下的轨道结构模态稳



注:横轴测点位置等于 0 处为图 2 坐标原点 O 所处位置;状态 1 为螺栓未松动状态;状态 2 为螺栓完全松动状态。
图 5 有载状态下螺栓未松动与螺栓完全松动两种状态的振型对比
Fig. 5 Comparison of two modal types between non-loosened bolt state and completely loosened bolt state under loaded condition

定图,如图 6 所示。由图 6 可知:①螺栓松动前后的差异主要体现在 26.0 Hz 与 35.0 Hz 附近;螺栓未松动时,一阶频率和二阶频率分别为 26.6 Hz 和 36.7 Hz;螺栓完全松动后,一阶频率和二阶频率分别为 26.0 Hz 和 34.1 Hz。②螺栓完全松动后,轨道梁的部分固有频率向低频处移动约 1.0~2.0 Hz。

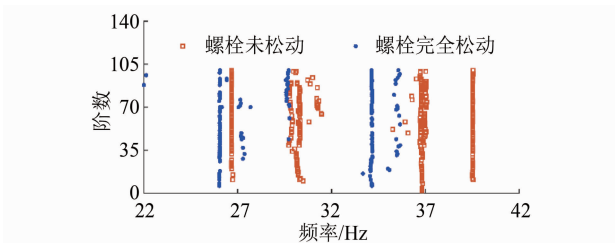


图 6 无载状态下的轨道结构模态稳定图
Fig. 6 Modal stability diagram of rail structure under unloaded condition

无载状态下轨道结构模态试验得到阻尼比随频率的分布情况如图 7 所示。由图 7 可知:在 26.0 Hz 与 35.0 Hz 附近,一阶模态和二阶模态的阻尼比均小于 1%,且螺栓松动对其没有太大影响。

无载状态下,对比螺栓未松动与螺栓完全松动两种状态的振型,其振型变化如图 8 所示。由图 8 可知:26.0 Hz 附近的振型波节位置明显向远离松动区域方向移动;35.0 Hz 附近的振型波节位置无明显变化。

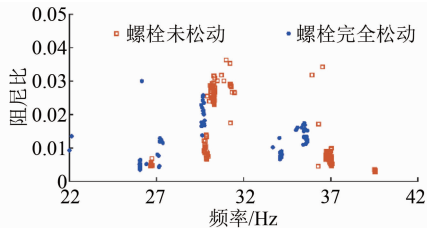


图7 无载状态下轨道结构模式试验得到的阻尼比随频率分布情况

Fig. 7 Distribution diagram of damping ratio with frequency obtained from rail structure modal tests under unloaded condition

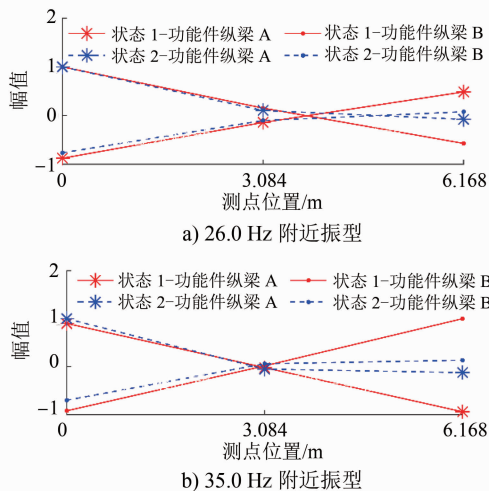


图8 无载状态下螺栓未松动与螺栓完全松动两种状态的振型对比

Fig. 8 Comparison of two modal types between non-loosened bolt state and completely loosened bolt state under unloaded condition

3 动力响应试验及结果分析

3.1 时域分析

图9为测点 A_2 在列车静悬工况下的加速度响应信号。由图9数据进一步计算可得:伴随螺栓松动, A_2 的振动幅值逐渐降低, A_2 第一次静悬、第三次静悬时的加速度有效值分别为 27 m/s^2 、 13 m/s^2 ,相较于第一次静悬,第三次静悬的降幅约为52%。同理,测点 A_4 第一次静悬、第三次静悬时的加速度有效值分别为 38 m/s^2 、 26 m/s^2 ,相较于第一次静悬,第三次静悬的降幅约为32%。由此可见,螺栓松动对整联轨道梁的动力响应特性均有较为明显的影响,且距离松动区域越近,其影响越大。

随着螺栓松动,轨道梁振动有效值也发生了改变。以1 s为间隔将信号分段,计算每一段的加速

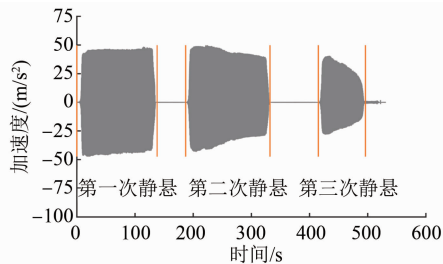


图9 测点 A_2 在列车静悬工况下的加速度响应信号

Fig. 9 Acceleration response signals of measuring point A_2 under train static levitation working condition

度有效值,可以得到每个测点加速度有效值随时间的变化规律。选取关于 x 轴(见图1)对称的两组测点(A_2 和 A_5 、 A_4 和 A_6),其中: A_4 和 A_6 离试验螺栓较远,受到的影响较小,用以表征螺栓未松动的情况; A_2 和 A_5 则用以表征螺栓完全松动的情况。用每组测点内两个测点的加速度有效值相对差异来评价这两个测点振动强度的差异。对比其振动强度差异随时间的变化规律,其结果如图10所示。

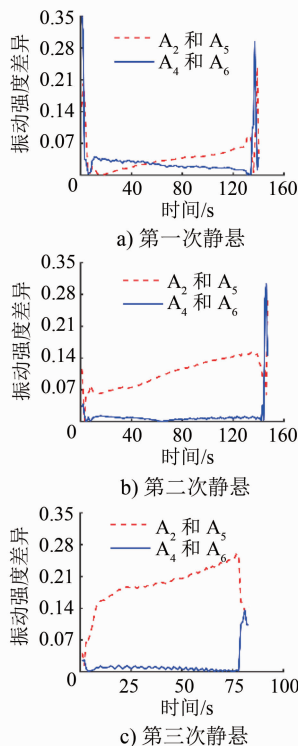


图10 两组测点振动强度差异随时间的变化规律

Fig. 10 Change law in vibration intensity difference for both sets of measuring points over time

由图10可知:螺栓尚未松动时,两组测点振动强度差异较小,这说明关于 x 轴呈现振动对称特性,这可能与高速磁浮轨道的结构及列车上电磁铁的对称性布置有关。随着螺栓松动程度增加, A_2 和 A_5

之间的振动强度差异逐渐增加,且增速明显比 A_4 和 A_6 之间振动强度差异的增速大。由此可认为,螺栓松动改变了约束分布,使得轨道结构的对称性发生了改变,轨道梁振动的对称性也随之发生改变。

3.2 频域分析

在测点 A_2 的三个静悬工况下,对其响应信号进行傅里叶变换,得到 A_2 的加速度频谱,如图 11 所示。由图 11 可知:轨道梁振动主频为 36.0 Hz,这说明在螺栓松动过程中,其优势频率并未发生改变。由上文可知,轨道梁的固有频率为 36.7 Hz,由此推测静悬激励下钢梁与列车发生了共振现象。如上文 2.3 节所述,螺栓松动会造成模态频率从 36.7 Hz 向 34.1 Hz 迁移。鉴于高速磁浮控制系统是主动控制模式,螺栓松动导致轨道结构动力特性改变的同时,可能间接引起外加激励的改变,两者相互作用可能是导致轨道梁振动幅度降低的主要原因。

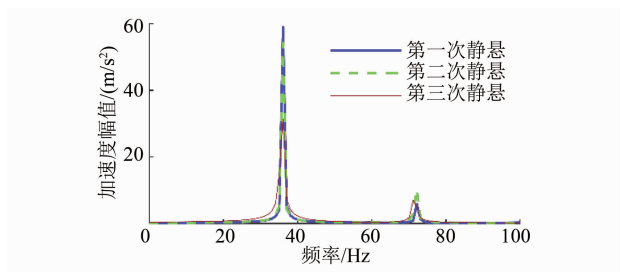


图 11 测点 A_2 的加速度频谱

Fig. 11 Acceleration spectrum of measuring point A_2

4 结语

本文通过试验,探究了高速磁浮维修基地轨道梁连接螺栓松动对其振动的影响,得到如下结论:

1) 在列车静悬过程中,轨道与列车发生了共振,而螺栓松动导致轨道结构固有特性发生改变,可能间接引起外加激励的改变。这两个改变相结合,导致振动峰值发生变化。

2) 螺栓松动改变了轨道结构的对称性,使得两侧功能件纵梁振动有效值的相对差异发生变化。

3) 有载状态下螺栓完全松动后,钢梁前两阶模态频率降低,第一阶模态的阻尼比加大且离散性增加,第一阶和第二阶的振型均发生改变。

4) 无载状态下螺栓完全松动后,钢梁在 26.0 Hz 与 36.0 Hz 附近的前两阶模态频率均降低了 1.0~2.0 Hz,阻尼比较小且无明显改变,但振型有较为明显的变化。

参考文献

- [1] 李忠继, 陈志贤, 董浩. 磁浮车辆道岔梁耦合系统悬浮稳定性研究[J]. 动力学与控制学报, 2022, 20(6): 33.
LI Zhongji, CHEN Zhixian, DONG Hao. Study on levitation stability of maglev vehicle turnout beam coupling system[J]. Journal of Dynamics and Control, 2022, 20(6): 33.
- [2] 马卫华, 罗世辉, 张敏, 等. 中低速磁浮车辆研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(1): 199.
MA Weihua, LUO Shihui, ZHANG Min, et al. Research review on medium and low speed maglev vehicle[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(1): 199.
- [3] YOU J M, HONG Y C, JEON S H, et al. Behavior of bolt-connected steel plate girder attributable to bolt loosening failure in the lower flange[J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 107: 104208.
- [4] ADAMS R D, BREARLEY T, NEHAMMER E, et al. Frictional damping in hollow beam structures joined by bolts, rivets, and adhesive[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2021, 235(6): 1477.
- [5] 薛懿铭, 叶丰, 曾国锋, 等. 螺栓损伤对磁浮维修钢梁动力特性影响研究[C]//中国振动工程学会磁悬浮技术与振动控制专业委员会. 第十届全国磁悬浮技术与振动控制学术会议 (CSMLTVC10)论文集. 沈阳: 中国振动工程学会磁悬浮技术与振动控制专业委员会, 2022: 35.
XUE Yiming, YE Feng, ZENG Guofeng, et al. Study on the influence of bolt damage on the dynamic characteristics of maglev maintenance steel beam[C]//Professional Committee on Maglev Technology and Vibration Control of Chinese Society for Vibration Engineering. The 10th National Conference on Maglev Technology and Vibration Control (CSMLTVC10). Shenyang: Professional Committee on Maglev Technology and Vibration Control of Chinese Society for Vibration Engineering, 2022: 35.
- [6] 王树青, 田晓洁. 结构振动测试与模态识别[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2021.
WANG Shuqing, TIAN Xiaojie. Structural vibration testing and modal identification [M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2021.
- [7] SU L, ZHANG J Q, HUANG X, et al. Automatic operational modal analysis of structures based on image recognition of stabilization diagrams with uncertainty quantification[J]. Multidimensional Systems and Signal Processing, 2021, 32(1): 335.

· 收稿日期: 2023-05-05 修回日期: 2023-06-16 出版日期: 2024-04-10

Received: 2023-05-05 Revised: 2023-06-16 Published: 2024-04-10

· 第一作者: 薛懿铭, 硕士研究生, 2133463@tongji.edu.cn

通信作者: 叶丰, 副研究员, yefeng@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