

谐振式浮轨扣件与单趾弹簧扣件减振效果对比研究

刘 博¹ 姜 杉² 董 慧¹

(1. 北京市地铁运营有限公司运营三分公司, 102208, 北京;

2. 北京市地铁运营有限公司, 100044, 北京//第一作者, 高级工程师)

摘 要 为了比较谐振式浮轨扣件与单趾弹簧扣件在轨道减振中的应用效果, 采用有限元分析方法, 对比这两种扣件的减振效果优劣。基于现场实测数据, 分析了广州地铁5号线鱼珠站—大沙地站区间上、下行线路以谐振式浮轨扣件取代原有单趾弹簧扣件前后, 在同一测点处的轨道动态变形及振动情况。此外, 还对敏感建筑物振动及二次辐射噪声变化水平进行了测试分析。研究结果表明: 谐振式浮轨扣件对轮轨振动的减弱效果显著, 其对周围环境中二次结构噪声的降低效果也优于单趾弹簧扣件。

关键词 城市轨道交通; 钢轨; 谐振式浮轨扣件; 减振效果
中图分类号 U213.5⁺3

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2023.01.021

Comparative Study on Damping Effect of Resonant Floating Rail Fastener and Single Toe Spring Fastener

LIU Bo, JIANG Shan, DONG Hui

Abstract To compare the application effect of resonant floating rail fastener and single toe spring fastener in track vibration reduction, finite element analysis is adopted to compare the merits and demerits of their dumping effect. Based on field measured data, in the case of Guangzhou Metro Line 5 interval up and down lines between Yuzhu Station and Dashadi Station, the track dynamic deformation and vibration condition at the same measuring point before and after replacing resonant floating rail fastener with single toe spring fastener is analyzed. In addition, test analysis is carried out on sensitive building vibration and the change level of secondary radiation noise level. Research results show that resonant floating rail fastener has a significant effect on reducing wheel-rail vibration, and the effect on reducing secondary structural noise in surrounding environment is also better than that of single toe spring fastener.

Key words urban rail transit; rail; resonant floating rail fastener; damping effect

First-author's address No.3 Branch of Beijing Subway Co., Ltd., 102208, Beijing, China

为解决轨道交通带来的环境振动、车内噪声等问题, 科研人员已经研发了橡胶隔振垫、钢弹浮置板、梯形轨枕、减振扣件等轨道。不同的减振轨道结构及轨下基础状态会影响列车-轨道系统的振动响应, 进而影响列车的安全运营。文献[1]研究了GJ-Ⅲ减振扣件轨道对轨道交通高架段环境噪声的影响。文献[2]研究了地铁轨道减振技术的分类及发展趋势。文献[3]分析了地铁多种减振轨道结构的振动特征。文献[4]分析了轴向温度力影响下, 周期离散支承钢轨的竖向振动特性。文献[5]通过实测研究了长大坡道上弹性支承块式无砟轨道的稳定性。

目前, 针对减振轨道结构的研究大多集中于减振性能和轮轨动力学性能, 少有对扣件及轨道同时建模的力学分析与实证研究。本文采用有限元分析方法, 对比单趾弹簧扣件与谐振式浮轨扣件的受力、振动模态及其减振特性。基于现场实测数据, 采用折线图的方式分析广州地铁5号线鱼珠站—大沙地站区间上、下行线路谐振式浮轨扣件取代原有单趾弹簧扣件前后, 在同一测点处的轨道振动情况。同时, 通过周边建筑结构内的监测数据, 分析敏感建筑物振动及二次辐射噪声变化水平, 验证了谐振式浮轨扣件的减振效果。本文研究可为日后轨道的维护改造提供技术支持。

1 两种扣件轨道的有限元分析

为了满足环境振动的相关标准要求, 地铁的某些区段需要采取减振措施, 目前广州地铁广泛应用的是谐振式浮轨扣件和单趾弹簧扣件。为了更好地分析不同扣件的减振原理, 先对上述两种扣件进行有限元建模分析。

1.1 单趾弹簧扣件轨道模态分析

单趾弹簧扣件是目前轨道交通行业中的常用部件, 主要由弹条、胶垫、螺栓、螺母及套管等部件

组成,常用于采用 60 kg/m 钢轨的线路,但随着对轨道减振降噪要求的不断提升,其已不能完全满足使用要求。一般而言,轨枕与轨道间不存在减振结构,故为了简化计算,将单趾弹簧扣件、钢轨、轨枕看作一个计算整体。单趾弹簧扣件轨道有限元模型如图 1 所示。模型设置轨道长度为 15 m,扣件单元为 25 个,单元间距为 0.725 m。

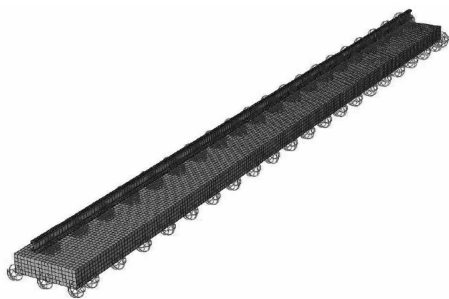


图 1 单趾弹簧扣件轨道有限元模型

Fig. 1 Finite element model of single toe spring fastener track

由于单趾弹簧扣件轨道结构具有对称性,为了简化计算,选取整体结构的一半进行三维建模。以道床中心为对称轴,设计道床、钢轨的正反对称约束,选取 9 个节点建立线性减缩积分单元。单趾弹簧扣件轨道有限元模型中含有 32 876 个实体单元,216 个阻尼单元,216 个弹簧单元,406 020 个节点,其模型纵剖面图如图 2 所示。

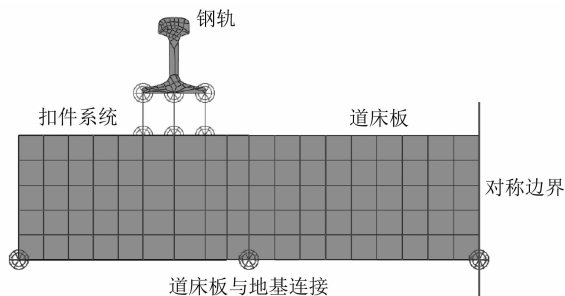


图 2 单趾弹簧扣件轨道有限元模型纵剖面图

Fig. 2 Longitudinal section diagram of finite element model of single toe spring fastener track

为进一步分析不同状态下轨道与扣件的整体结构振动情况,根据单趾弹簧扣件轨道参数,以 1 500.00 Hz 为截止频率进行模态分析,并选取典型模态进行研究。在低频区间(30.00~150.00 Hz 频段),单趾弹簧扣件轨道结构整体表现为弯曲振动,当典型模态所处频率为 77.39 Hz 时,其振动模态是波长为 20 个轨距的振动波,当典型模态所处频率为 145.65 Hz 时,其振动模态是波长为 4 个轨距的振动

波;在中频区间(150.00~500.00 Hz 频段),当典型模态所处频率为 192.74 Hz 时,其振动模态是波长为 2 个轨距的振动波;在中高频区间(500.00~5 000.00 Hz 频段),当典型模态所处频率为 1 020.40 Hz 时,其振动模态是波长为 2 个轨距的振动波。

1.2 谐振式浮轨扣件轨道的模态分析

谐振式浮轨扣件主要由弹性楔块、紧锁楔块、紧锁弹条及支撑板等结构组成,为与单趾弹簧扣件轨道进行对比分析,同样选择将谐振式浮轨扣件、钢轨、轨枕看作一个计算整体。由于谐振式浮轨扣件轨道结构具有对称性,为了简化计算,选取整体结构的一半进行三维建模。以道床中心为对称轴,设计道床、钢轨的正反对称约束,选取 9 个节点建立线性减缩积分单元。谐振式浮轨扣件轨道有限元模型中含有 196 728 个实体单元,76 个阻尼单元,76 个弹簧单元,290 600 个节点,其模型纵剖面图如图 3 所示。

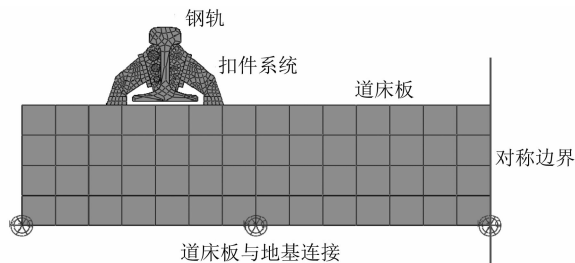


图 3 谐振式浮轨扣件轨道有限元模型纵剖面图

Fig. 3 Longitudinal section diagram of finite element model of resonant floating rail fastener track

为进一步分析不同状态下轨道与扣件的整体结构振动情况,根据谐振式浮轨扣件轨道参数,以 600.00 Hz 为截止频率进行模态分析,并选取典型模态进行研究。在低频区间(30.00~150.00 Hz 频段),谐振式浮轨扣件轨道结构整体表现为弯曲振动;在中频区间(150.00~500.00 Hz 频段),谐振式浮轨扣件轨道结构整体表现为轨道或道床自身弯曲振动;在中高频区间(500.00~5 000.00 Hz 频段),当固有频率为 554.31 Hz 时,其振动模态是波长为 2 个轨距的小波振动,其振幅相较于单趾弹簧扣件轨道而言显著减小。

综上所述,谐振式浮轨扣件轨道在中频、中高频的抗振效果均优于单趾弹簧扣件轨道。相较于单趾弹簧扣件轨道,谐振式浮轨扣件轨道结构振型的波峰、波谷更加平缓,是一种较优的扣件轨道减振结构。

2 两种扣件轨道的应用效果分析

为准确评估实际两种扣件轨道的振动情况,选取广州地铁交通5号线鱼珠站—大沙地站区间上、下行线路的整体道床进行现场实测,该路段改造前采用单趾弹簧扣件轨道,改造后采用谐振式浮轨扣件轨道。

2.1 测点布设

依据 GB 10071—1988《城市区域环境振动测量方法》和 JGJ/T 170—2009《城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准》选择测点。当列车经过时,获取钢轨、道床、隧道壁垂直方向的振动加速度及其上方建筑物的环境振动数据进行分析。测点布设位置选取为广州地铁5号线鱼珠站—大沙地站区间上、下行线路,道床类型为单趾弹簧扣件普通整体道床及谐振式浮轨扣件普通整体道床,上行地段埋深均为15.3 m,下行地段埋深均为14.6 m。建筑二次噪声测点选取为珠江村大沙西一街9栋1单元101,建筑形式为6层楼房,测试地面环境为室内瓷砖地面。在2015年5月,分别对两个测试断面进行了现场测试,测点布设位置分别为内侧钢轨垂向位置、外侧钢轨垂向位置、直线电机感应板外侧道床(道心)及隧道壁。

2.2 测点数据分析

为了提升数据准确性、减小畸变数据带来的误差,选取10列车通过时的实测数据进行平均计算。上行线路段和下行线路段,单趾弹簧扣件轨道与谐振式浮轨扣件轨道的振动加速度级在不加权下的1/3倍频程中心频率对比情况分别如图4和图5所示。

隧道壁的振动数据能直接反映轨道隔振器的隔振效果,依据 GB 10071—1988《城市区域环境振动测量方法》及铅垂向最大Z振级对隧道壁振动实测数据进行分析。最大Z振级指列车经过测试断面时,测得的Z振级最大值,是目前最为常用的一个评价指标。当列车通过测试断面时,上行和下行隧道壁垂向测点单趾弹簧扣件普通整体道床及谐振式浮轨扣件普通整体道床的最大Z振级如表1所示。

根据 JGJ/T 170—2009《城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准》,列车通过上行和下行线路时,整体道床振动取1/3倍频程中心频率的均值进行分析。上行线路段和下行线路段,单趾弹簧扣件普通整体道床1/3倍频程中心频率处对应的振级如图6所示。由图

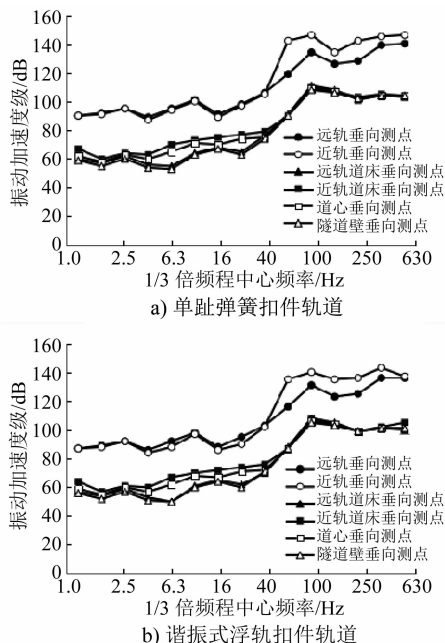


图4 上行线路段单趾弹簧扣件轨道与谐振式浮轨扣件轨道的振动加速度级

Fig. 4 Vibration acceleration levels of single toe spring fastener track and resonant floating rail fastener track in up line section

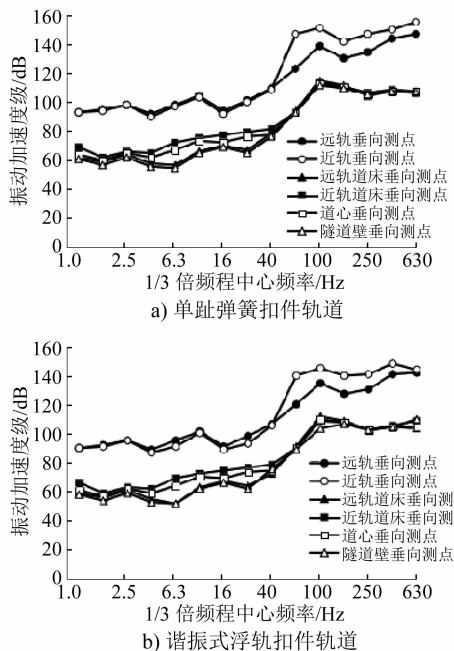


图5 下行线路段单趾弹簧扣件轨道与谐振式浮轨扣件轨道的振动加速度级

Fig. 5 Vibration acceleration levels of single toe spring fastener track and resonant floating rail fastener track in down line section

6 a)可知,单趾弹簧扣件普通整体道床1/3倍频程中心频率处对应的最大振级为76.8 dB,出现在

表 1 隧道壁垂向测点处两种扣件道床的最大 Z 振级
Tab.1 Maximum Z-level vibration of two fastener track beds at vertical measurement points on tunnel wall

测点位置	扣件形式	最大 Z 振级/dB
上行隧道壁	单趾弹簧扣件普通整体道床	74.5
下行隧道壁	单趾弹簧扣件普通整体道床	74.6
上行隧道壁	谐振式浮轨扣件普通整体道床	66.3
下行隧道壁	谐振式浮轨扣件普通整体道床	67.0

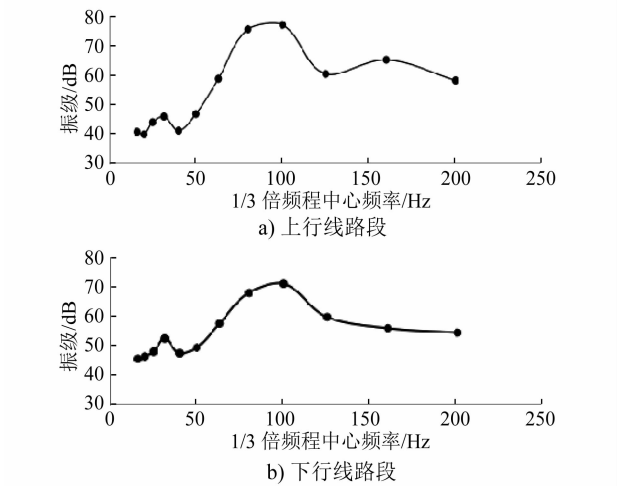


图 6 单趾弹簧扣件普通整体道床 1/3 倍频程中心频率处对应的振级

Fig. 6 Vibration level corresponding to the 1/3 octave center frequency of common monolithic track bed with single toe spring fastener

100.00 Hz 频段。上行线路段和下行线路段,谐振式浮轨扣件普通整体道床 1/3 倍频程中心频率处对应的振级如图 7 所示。由图 7 a)可知,谐振式浮轨扣

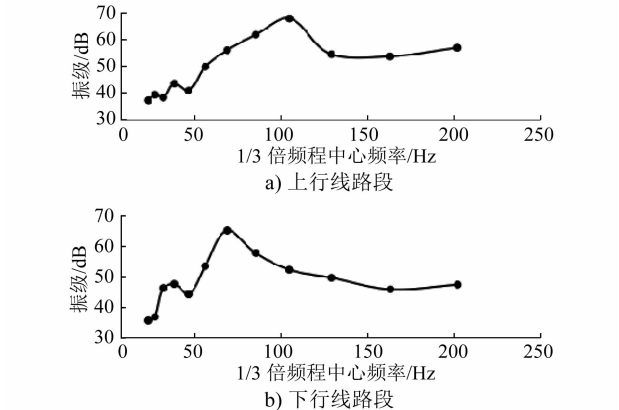


图 7 谐振式浮轨扣件普通整体道床 1/3 倍频程中心频率处对应的振级

Fig. 7 Vibration level corresponding to the 1/3 octave center frequency of common monolithic track bed with resonant floating rail fastener

件普通整体道床 1/3 倍频程中心频率处对应的最大振级为 68.2 dB,出现在 100.00 Hz 频段。

除上述两种不同评价方法外,使用 1.00~80.00 Hz 总振级评价,即列车通过时,在 1.00~80.00 Hz 频率范围内隧道结构振动能量的总振级(Z 计权),也是常用的评价方法之一。隧道壁垂向测点处,两种扣件道床的总振级如表 2 所示。

表 2 隧道壁垂向测点处两种扣件道床的总振级
Tab.2 Total vibration level of two fastener track beds at vertical measurement points on tunnel wall

测点位置	扣件形式	总振级/dB
上行隧道壁	单趾弹簧扣件普通整体道床	72.9
下行隧道壁	单趾弹簧扣件普通整体道床	69.1
上行隧道壁	谐振式浮轨扣件普通整体道床	62.6
下行隧道壁	谐振式浮轨扣件普通整体道床	63.0

依据 JGJ/T 170—2009《城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准》,对地面环境振动测点实测数据进行计算分析。在珠江村大沙西一街 9 栋 1 单元 101 测点处,单趾弹簧扣件普通整体道床的分频最大振级为 72.6 dB,二次结构噪声为 47.6 dB(A);谐振式浮轨扣件普通整体道床分频最大振级为 67.0 dB,二次结构噪声 44.3 dB(A)。

综上所述,在上行线路段,谐振式浮轨扣件普通整体道床隧道壁测点的垂向振动加速度比单趾弹簧扣件普通整体道床隧道壁测点的垂向振动加速度小 8.2 dB;在下行线路段,二者的差值减小了 7.6 dB。依据 1.00~80.00 Hz 总振级评价,在上行线路段,谐振式浮轨扣件普通整体道床隧道壁测点的垂向振动加速度比单趾弹簧扣件普通整体道床隧道壁测点的垂向振动加速度小 10.3 dB;在下行线路段,二者的差值减小了 6.1 dB。同时,在单趾弹簧扣件替换为谐振式浮轨扣件后,地铁周围环境振动降低了 5.6 dB,二次结构噪声降低了 3.3 dB(A)。以上试验结果证明,谐振式浮轨扣件对减小轮轨振动、降低地铁周围环境振动及二次结构噪声效果显著。

3 结语

采用有限元分析方法,对比单趾弹簧扣件与谐振式浮轨扣件的受力、振动模态及其减振特性。以广州地铁 5 号线鱼珠站—大沙地站区间上、下行线路为例,基于现场实测数据,采用折线图的方式,对两种扣件的减振效果进行对比分析。本文主要获得以下几个结论:

1) 从受力结构看,谐振式浮轨扣件轨道在中频、中高频的抗振效果均优于单趾弹簧扣件轨道。相较于单趾弹簧扣件轨道,其振动波形的波峰、波谷更加平缓,是一种优于单趾弹簧扣件轨道的减振结构。

2) 通过广州地铁现场测试,进一步验证了谐振式浮轨扣件普通整体道床在抗振性能上优于单趾弹簧扣件普通整体道床。上行线路段,谐振式浮轨扣件普通整体道床隧道壁测点的垂向振动加速度比单趾弹簧扣件普通整体道床隧道壁测点的垂向振动加速度小 8.2 dB;下行线路段,二者差值减小了 7.6 dB。在 1.00~80.00 Hz 总振级评价中,上行线路段,谐振式浮轨扣件普通整体道床隧道壁测点的垂向振动加速度比单趾弹簧扣件普通整体道床隧道壁测点的垂向振动加速度小 10.3 dB;下行线路段,二者差值减小了 6.1 dB。证明了谐振式浮轨扣件对轮轨振动的减弱效果显著,具备应用替代潜质。

3) 将单趾弹簧扣件替换为谐振式浮轨扣件后,周围环境振动降低了 5.6 dB,二次结构噪声降低了 3.3 dB(A),这证明谐振式浮轨扣件可以有效降低地铁周围环境振动,以及施工过程中由噪声带来的建筑结构损害与扰民等负面社会影响。

参考文献

- [1] 王平,唐剑,杨鹏,等. GJ-III 减振扣件轨道对轨道交通高架段

(上接第 104 页)

间的壁垒,改变“接力式”的设计协作方式,使工程性、功能性与形式感相结合,追求有构造逻辑和造型秩序的建筑内在美。这样做既能有效降低建设和运维成本,又能获得更舒适怡人的空间效果,实现降本增效。

希冀本文能启发建设者从人性化的角度思考乘客的需求、思考人和空间的关系,进而思考地铁站空间和城市开发之间的关系。

参考文献

- [1] 肯尼斯·鲍威尔. 伦敦地铁——银禧延长线[M]. 吴晨,译. 北京:中国建筑工业出版社,2008:98.
POWELL Kenneth. The Jubilee Line extension[M]. (WU C Trans). Beijing: China Architecture and Building Press, 2008:98.
- [2] 毛媛媛,李文超,朱梦梦,等. 国内地下空间环境对行为心理影响研究进展[J]. 西部人居环境学刊,2020,35(4):58.
MAO Yuanyuan, LI Wenchao, ZHU Mengmeng, et al. Influ-

环境噪声的影响分析[J]. 铁道标准设计,2017,61(3):4.

WANG Ping, TANG Jian, YANG Peng, et al. Analysis of the influence of GJ-III fastener vibration damping track on environment noise of metro viaduct section[J]. Railway Standard Design,2017,61(3):4.

- [2] 张晓娟. 地铁轨道减振技术综述[J]. 市政技术,2014,32(2):90.
ZHANG Xiaojuan. Overview of metro rail vibration reduction technology[J]. Municipal Engineering Technology, 2014, 32(2):90.
- [3] 杨麒陆,李翔,豆银玲,等. 时速 120 km/h 地铁多种减振轨道结构振动特征分析[J]. 铁道建筑,2017,57(7):139.
YANG Qilu, LI Xiang, DOU Yinling, et al. Analysis on vibration characteristics of various types of metro vibration-reducing track structures at speed of 120 km/h[J]. Railway Engineering, 2017,57(7):139.
- [4] 冯青松,汪玮,刘庆杰,等. 轴向温度力影响下周期离散支承钢轨竖向振动特性分析[J]. 铁道学报,2018,40(8):122.
FENG Qingsong, WANG Wei, LIU Qingjie, et al. Analysis of vertical vibration characteristics of periodic discrete supported rail under axial temperature force[J]. Journal of the China Railway Society,2018,40(8):122.
- [5] 巫江,任娟娟,苏乾坤. 长大坡道上弹性支承块式无砟轨道稳定性研究[J]. 高速铁路技术,2018,9(6):75.
WU Jiang, REN Juanjuan, SU Qiankun. Study on stability of ballastless track with elastic support block on long slope[J]. High Speed Railway Technology,2018,9(6):75.

(收稿日期:2020-09-25)

ence of underground space environments on human behavior and psychology: research progress in China[J]. Journal of Human Settlements in West China,2020,35(4):58.

- [3] 潘天波,胡玉康. 建筑感性工学:来自美学与设计的阐释[J]. 文化艺术研究,2011,4(4):183.
PAN Tianbo, HU Yukang. Kansei engineering of architecture: interpretation of aesthetics and designs[J]. Studies in Culture & Art,2011,4(4):183.
- [4] 李志阳,余乐,朱云飞. 地铁站室内界面“空间规划”理念在北京地铁中的实践[J]. 都市快轨交通,2017,30(6):14.
LI Zhiyang, YU Le, ZHU Yunfei. Practical application of 'space planning' concept of interior interface to Beijing Metro stations[J]. Urban Rapid Rail Transit,2017,30(6):14.
- [5] 李宇辰,韩永伟. 京张高铁客站清水混凝土站台雨棚创新设计[J]. 铁道标准设计,2022,66(2):123.
LI Yuchen, HAN Yongwei. Innovative design of canopies on bare concrete platforms of Beijing-Zhangjiakou high-speed railway passenger stations[J]. Railway Standard Design,2022,66(2):123.

(收稿日期:2021-12-22)