

# 城市轨道交通钢轨波磨诱发的轮轨噪声特性研究

王蕊

(成都轨道建设管理有限公司, 610031, 成都//高级工程师)

**摘要** 城市轨道交通中钢轨的波磨问题不仅会影响钢轨的使用寿命,还会诱发轰鸣噪声,影响乘车环境。为探究钢轨波磨诱发轮轨轰鸣噪声的特性,开展现场波磨测试,获取真实的波磨状态下轨道不平顺数据。基于列车-轨道耦合动力学,对比常采用的美国 6 级轨道高低不平顺谱,分析了在实测的波磨短波不平顺激励条件下的轮轨相互作用力。将轮轨相互作用作为激励条件,分别输入考虑了详细约束条件的轮轨有限元模型中,结合边界元方法预测并分析了波磨条件下的轮轨噪声辐射特性。结果表明,钢轨波磨会显著增加轮轨振动频率在 200 Hz 以上的相互作用,使得轮轨振动加剧,从而导致轰鸣噪声产生。

**关键词** 城市轨道交通;轨道;轮轨噪声;钢轨波磨

**中图分类号** U213.4<sup>+</sup>2;TB533<sup>+</sup>.2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.10.006

## Study on the Characteristics of Wheel/Rail Noise Caused by Rail Corrugation in Urban Rail Transit

WANG Rui

**Abstract** The problem of rail corrugation in urban rail transit not only affects the rail service life, but also causes large booming noise, influencing the traveling environment. To study the characteristics of wheel/rail booming noise caused by rail corrugation, a corrugation field test is carried out to obtain track irregularity data under real corrugation condition. Based on the train-track coupling dynamics, compared with the commonly used Grade VI track irregularity of the United States, the wheel/rail interactive force under condition of measured corrugation short wave irregularity excitation is analyzed. Wheel/rail interactive force is taken as excitation condition and input into wheel/rail finite element model with detailed constraints respectively, combined with boundary element method, the wheel/rail noise radioactive characteristics under corrugation condition are predicted and analyzed. Results show that the rail corrugation will significantly increase the wheel/rail interactive force in the range above 200 Hz frequency, intensifying wheel/rail vibration, resulting in the generation of booming noise.

**Key words** urban rail transit; track; wheel/rail noise; rail corrugation

**Author's address** Chengdu Railway Construction Management Co., Ltd., 610031, Chengdu, China

地铁列车在运行过程中产生的振动和噪声问题不仅影响了乘客的舒适性,还对线路周边居民的生活产生了干扰。研究表明,地铁列车运行过程中,由轨道不平顺激励引发的轮轨辐射噪声是主要的噪声来源<sup>[1]</sup>。而地铁线路中小半径曲线较多、列车运行速度较快、制起动频繁,导致了钢轨波磨问题在地铁运营过程中日益突出<sup>[2]</sup>。这使得列车通过波磨路段时,常常会听到强烈的轰鸣噪声<sup>[3]</sup>,对旅客的乘坐舒适性和乘务人员的健康带来影响。

轮轨噪声分为滚动噪声、冲击噪声和摩擦尖啸声<sup>[4]</sup>。钢轨波磨是指钢轨轨头的轨面或侧面出现波浪状的磨损或塑性变形,是一种波长较短的轨道不平顺。由波磨引起的轮轨噪声属于滚动噪声。文献[5-6]提出了一种轮轨滚动噪声计算软件 Twins,其利用有限元法来计算车轮模态的振动频率和振型,以轮轨联合粗糙度为激励,计算轮轨滚动的振动响应和辐射声功率。在遇到严重波磨时,轮轨接触会表现出明显的非线性特征。由于该模型中轮轨接触考虑线性 Hertz 接触的假设,因此在波磨条件下会产生较大的误差。

文献[7]利用基于隐式-显式有限元法的瞬态滚动接触模型,将轮轨接触的非线性考虑在内,建立了基于有限元和边界元方法的滚动噪声预测模型。虽然瞬态滚动接触模型可以考虑真实的轮轨几何,然而计算速度较慢,且波磨不平顺施加过于理想,难以真实反映实际钢轨的粗糙表面。

随着车轨耦合多体动力学的发展,轮轨相互作用有了更多的计算模型<sup>[8-9]</sup>。文献[10]建立了时域的轮轨耦合模型,包含柔性轮对和柔性轨道,可以较好地预测 3.5 kHz 频域范围内的轮轨滚动噪声。

目前国内城市轨道交通不平顺谱的编制仍存在空缺,因此这类车轨耦合模型常常采用美国5级或6级轨道高低不平顺谱来代替国内城市轨道交通的不平顺条件。然而美国谱的最小波长为1 m,忽略了短波不平顺的影响<sup>[11]</sup>。

本文以成都地铁实际运营线路为研究对象,测试了小曲线半径地段的钢轨波磨。基于多体动力学软件UM,建立了车轨耦合模型,通过自定义不平顺设置工具,导入了现场实测的钢轨轨面短波不平顺,计算了波磨条件下的轮轨相互作用。将轮轨相互作用力导入基于有限元和边界元方法的轮轨噪声辐射模型,进而分析了地铁钢轨波磨条件下轮轨噪声辐射。

## 1 试验概况

试验线路选取了成都某实际运营的地铁线路曲线区段,该区段曲线半径为500 m,位于圆形盾构隧道内。试验设备采用德国Müller-BBM(米勒贝姆)公司高精度钢轨表面粗糙度测试仪ml trolley,其纵向扫描间距为1 mm,传感器精度为0.1 μm。现场测试的钢轨波磨照片如图1所示。



图1 现场钢轨波磨照片

Fig.1 Picture of rail corrugation on-site

试验区段长度为100 m。测试时将钢轨轨面光带横向分为间距为5 mm的3段,采用粗糙度测试仪分别对每段钢轨测试1次。

对测试结果进行异常值剔除及接触滤波等预处理,取测试结果的平均值,通过傅里叶变换将钢轨轨面粗糙度信号进行波长域的分析,得到的结果见图2。由图2可知,曲线内、外侧钢轨波磨在波长为58 mm、80 mm和180 mm处均出现峰值。其中曲线内侧钢轨波磨在波长为180 mm时出现最大峰值,且曲线内侧波磨要比外侧严重很多。

## 2 计算模型介绍

对钢轨波磨诱发的轮轨噪声特性进行研究。本

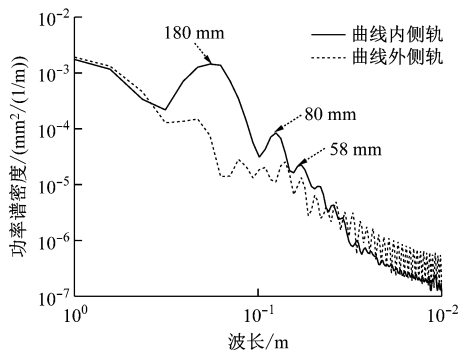


图2 钢轨轨面粗糙度波长谱

Fig.2 Wave length spectrum of rail surface roughness

文基于多体动力学软件UM,建立车轨耦合模型,计算波磨条件下的轮轨相互作用。将UM软件中计算所得的轮轨相互作用力导入基于有限元和边界元方法的轮轨噪声辐射模型,进而计算钢轨波磨条件下的轮轨噪声辐射。

### 2.1 列车-轨道耦合动力学模型

建立了如图3所示的列车-轨道耦合动力学模型,并在模型中导入实际测量的钢轨波磨作为轨道不平顺,计算了时域内钢轨波磨条件下的轮轨相互作用。轮轨接触采用基于虚拟穿透原理推导的Kik-Piotrowski方法<sup>[12]</sup>。

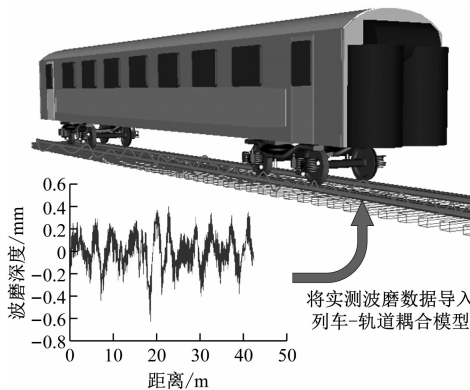


图3 列车-轨道耦合模型示意

Fig.3 Diagram of train-track coupling model

列车模型包含1个车体和2个转向架,单个转向架子系统包括1个构架、2个轮对和4个轴箱。列车模型共有50个自由度,其中,42个为独立自由度,8个为非独立自由度。车体和构架通过二系阻尼弹簧连接,构架和轮对通过一系阻尼弹簧连接。钢轨采用铁木辛柯梁单元模拟。模型中车辆和轨道的计算参数如表1所示。

### 2.2 轮轨噪声辐射计算模型

列车-轨道系统中车轮、钢轨的振动频率较高,

表 1 车轨耦合模型计算参数

Tab.1 Train-track coupling model calculation parameters

结构名称	参数	取值	结构名称	参数	取值
车体	质量/t	41.860	扣件	垂向刚度/(N/m)	$4.0 \times 10^7$
	全长/m	22.500		垂向阻尼/(N·s/m)	$9.8 \times 10^4$
	定距/m	15.600	一系弹簧	垂向刚度/(N/m)	$1.6 \times 10^6$
	轴距/m	2.500		垂向阻尼/(N·s/m)	1 300
转向架	质量/t	7.358	二系弹簧	垂向刚度/(N/m)	$3.6 \times 10^5$
轮对	质量/t	1.780		垂向阻尼/(N·s/m)	2 300

轨枕次之,其他部件则更低。基于此原因,轮轨噪声仅研究车轮及钢轨的声辐射问题。图 4 给出了轮轨噪声预测流程图。

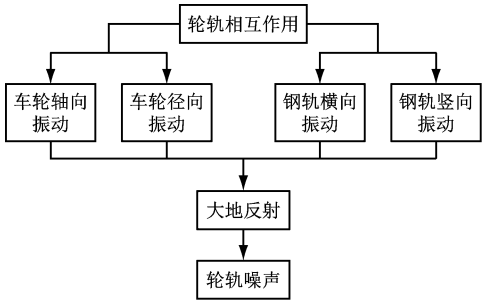


图 4 轮轨噪声预测流程图

Fig.4 Flow chart of wheel/rail noise prediction

上述车轨耦合动力学模型用于求解钢轨波磨激励下的轮轨动态相互作用。将得到的时域轮轨力作为力边界条件,分别施加在如图 5 所示的轮轨有限元模型上,进而求得车轮和钢轨的振动响应。通过傅里叶变换,将时域的振动响应转化为频域结果。提取车轮和轨面的频域振动响应作为边界元声学计算的边界条件,即可进一步预测车轮和钢轨的声辐射。

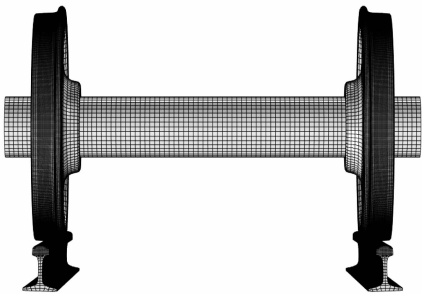


图 5 轮轨有限元模型示意

Fig.5 Diagram of wheel/rail finite element model

3 计算结果与分析

3.1 轮轨相互作用

由于钢轨波磨常常发生在曲线以及减振扣件地段,因此本文设计工况时考虑了扣件刚度的变

化。目前,对地铁列车动力学问题进行研究时,常采用美国 6 级轨道高低不平顺谱模拟国内地铁的不平顺条件。因此本文将实测的钢轨波磨与美国 6 级轨道高低不平顺谱进行对比,研究短波波磨对轮轨相互作用的影响。详细工况设置如表 2 所示。

表 2 工况设置

Tab.2 Setting of working conditions

工况	列车运行速度/(km/h)	线路曲线半径/m	扣件刚度/(kN/mm)	不平顺类型
工况 1	62	500	40	美国 6 级轨道高低不平顺谱
工况 2	62	500	120	美国 6 级轨道高低不平顺谱
工况 3	62	500	40	实测轨面短波不平顺
工况 4	62	500	120	实测轨面短波不平顺

对上述 4 种工况进行模拟时,采用的轨道模型总长为 310 m,该轨道由长度为 10 m 的直线轨道和长度为 300 m 的曲线轨道所组成(曲线轨道两端的缓和曲线长度均为 50 m,中间圆曲线半径为 500 m、长度为 200 m)。当列车由直线进入缓和曲线时,由于曲率与超高的不断变化,列车会出现偏压,且偏压的状态一直在变化;横向、垂向轮轨力皆会出现明显的重分布现象。当列车进入圆曲线区段时,由于曲率与超高为定值,偏压状态稳定,曲线内、外两侧横向、垂向轮轨力亦相对稳定,如图 6 和图 7 所示。对比图 6 和图 7 可以明显看到,添加实测的短波波磨不平顺后,轮轨的波动显著加剧,这就是产生巨大轰鸣噪声的激励来源。

图 8 是 4 种工况下垂向轮轨相互作用的功率谱图。由图 8 可见,添加实测波磨的轮轨力在 200 Hz 以上的频段,均高于添加美国 6 级轨道高低不平顺谱的轮轨力,说明短波波磨主要会引发高频振动的轮轨相互作用。当扣件刚度从 40 kN/mm 升高到 120 kN/mm 时,对比美国 6 级轨道高低不平顺谱和实测波磨的不平顺条件,可以发现扣件刚度升高主要会引起振动频率 600 Hz 以上轮轨力增大。以往

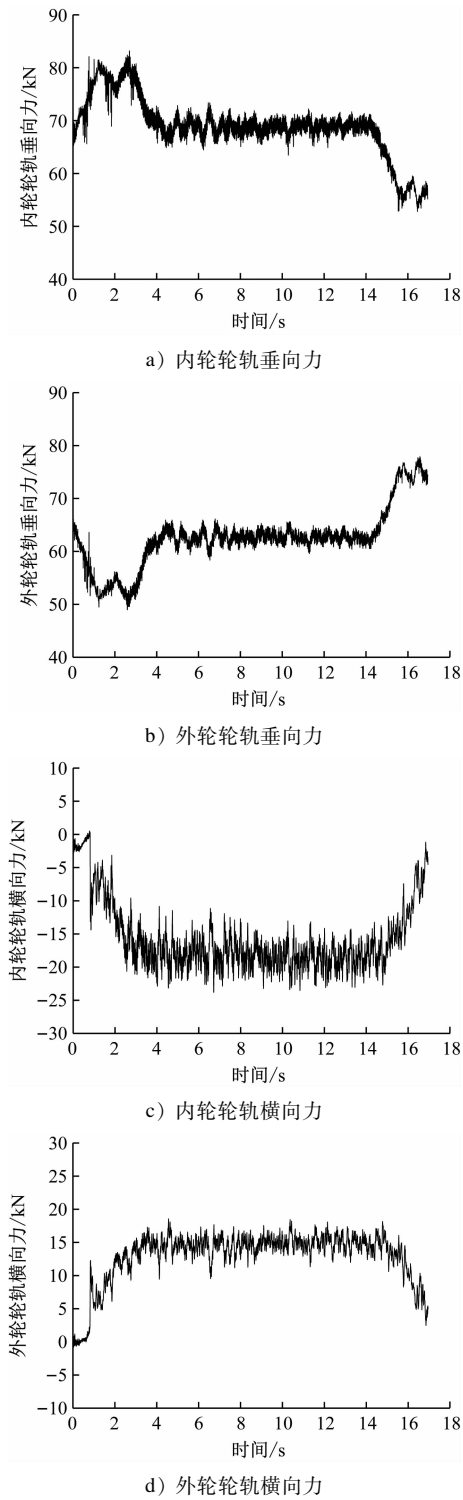


图 6 轮轨力时域图(工况 1)

Fig. 6 Diagram of wheel/rail force time domain (working condition 1)

研究表明,增加扣件垂向刚度会使钢轨与轨下结构耦合作用增强。虽然轮轨力增大,但钢轨的振动响应反而会有所减小。因此,提高扣件刚度导致的轮轨力增大主要会引起车轮辐射噪声增大。

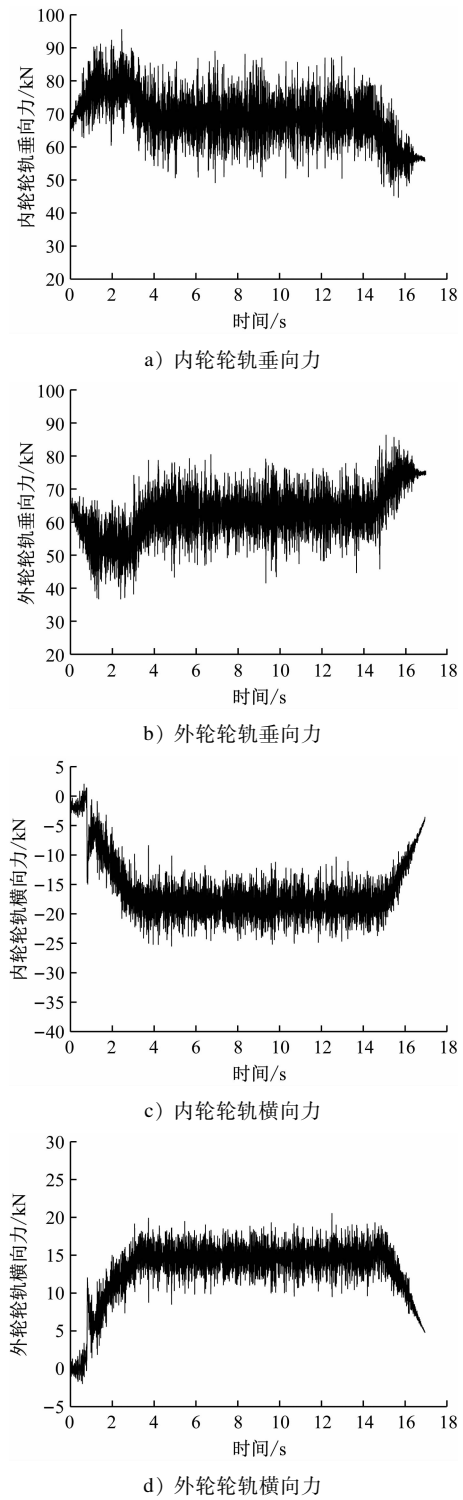


图 7 轮轨力时域图(工况 3)

Fig. 7 Diagram of wheel/rail force time domain (working condition 3)

### 3.2 轮轨噪声辐射

为了提高计算的速度,模型采用了对称边界条件。在半空间中研究轮轨的噪声辐射问题,将钢轨下部结构考虑为可以完全反射噪声的声学硬边界,

如图 9 所示。

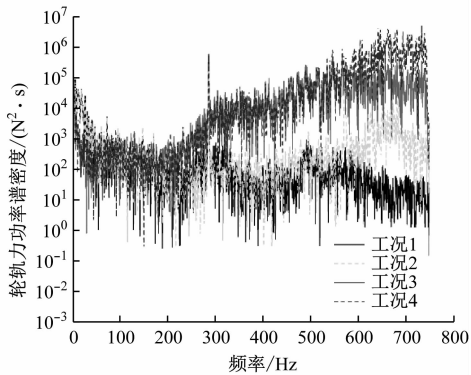


图 8 4 种工况下的轮轨垂向力功率谱密度

Fig. 8 Frequency spectrum density of wheel/rail vertical force under four working conditions

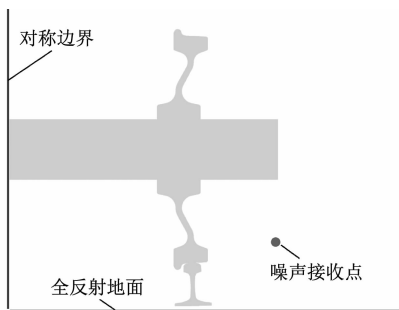


图 9 轮轨噪声辐射模型

Fig. 9 Wheel/rail noise radiation model

通过计算得到的噪声频域分布如图 10 所示。由图 10 可见,在轮轨噪声中,钢轨辐射噪声占主导地位。在考虑了实测钢轨波磨条件的轮轨相互作用激励下,轮轨噪声在高频范围内显著增加,主要表现在 630 Hz 和 2 000 Hz 两个中心频带范围。采用美国 6 级轨道高低不平顺谱的轮轨辐射噪声总声压级为 89.1 dB,而在波磨条件下的轮轨辐射噪声总声压级为 97.3 dB,相比提高了 8.2 dB 的声压级。

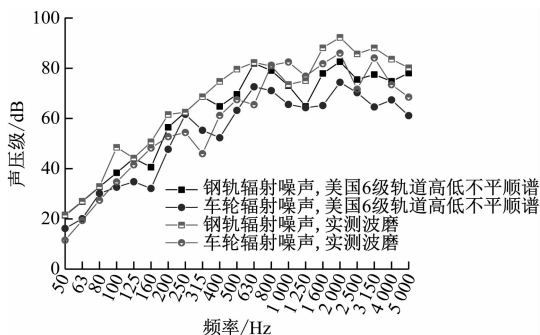
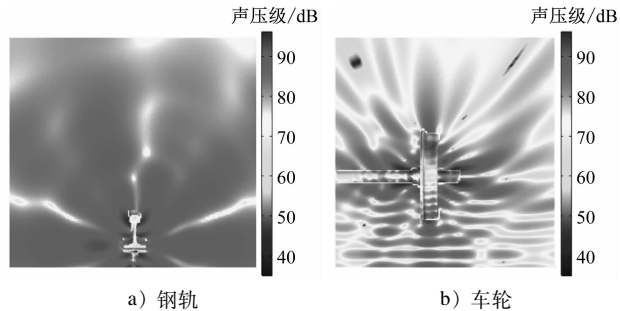


图 10 轮轨噪声 1/3 倍频程分布

Fig. 10 1/3 times of frequency range distribution of wheel/rail noise

钢轨和车轮在 2 000 Hz 振动频率时的辐射噪声声压级分布云图如图 11 所示。由图 11 可见,钢轨噪声空间分布普遍高于车轮噪声,且其主要向两侧指向性辐射。



注:振动频率为 2 000 Hz。

图 11 钢轨和车轮辐射噪声声压级分布云图

Fig. 11 Distribution nephogram of rail and wheel radioactive noise sound pressure level

## 4 结论

1) 通过现场实测发现测试区段钢轨波磨波长主要为 58 mm、80 mm 和 180 mm,且曲线内侧钢轨波磨要比外侧钢轨严重。

2) 钢轨波磨对轮轨动态相互作用影响明显,导致 200 Hz 振动频率以上的轮轨相互作用力增大,从而产生轮轨轰鸣噪声;通过增加扣件刚度来进行减振的同时,会增加 600 Hz 以上振动频率范围的轮轨相互作用,从而引起该振动频率范围内的轮轨辐射噪声增大。

3) 波磨激励下的轮轨噪声在高频范围内显著增加,主要表现在 630 Hz 和 2 000 Hz 两个中心频带范围,其总声压级比美国 6 级轨道高低不平顺谱条件下的轮轨噪声提高了 8.2 dB。

## 参考文献

- [1] 楚永萍. 钢轨波浪型磨耗对地铁车辆振动性能的影响[J]. 城市轨道交通研究, 2009(8):17.  
CHU Yongping. Effects of rail undulation wear on vehicle vibrations[J]. Urban Mass Transit, 2009(8):17.
- [2] 徐志胜. 轨道交通轮轨噪声预测与控制的研究[D]. 成都:西南交通大学, 2004.  
XU Zhisheng. Prediction and control of wheel/rail noise for rail transit[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2004.
- [3] 郭建强, 朱雷威, 刘晓龙, 等. 地铁司机室噪声与钢轨波磨关系的试验与仿真研究[J]. 机械工程学报, 2019(16):141.  
GUO Jianqiang, ZHU Leiwei, LIU Xiaolong, et al. Experimental and simulation study on the relationship between interior noise of

- metro cab and rail corrugation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019(16):141.
- [4] 赵才友. 高架轨道交通环境振动与噪声关键技术研究[D]. 成都:西南交通大学,2014.
- ZHAO Caiyou. Research on key technology of environment vibration and noise caused by viaduct rail traffic [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [5] THOMPSON D J. Wheel-rail noise generation, part V: inclusion of wheel rotation[J]. Journal of Sound & Vibration, 1993, 161(3):467.
- [6] THOMPSON D J, JONES C J C. A review of the modelling of wheel/rail noise generation[J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 231(3): 519.
- [7] 周信,赵鑫,韩健,等. 波磨条件下地铁车轮瞬态滚动噪声特性研究[J]. 机械工程学报, 2018(4):196.
- ZHOU Xin, ZHAO Xin, HAN Jian, et al. Study on transient rolling noise characteristics of subway wheel with rail corrugation [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018(4):196.
- [8] 张凯轩,宫岛,周劲松. 钢轨波磨对地铁车内噪声影响的试验研究[J]. 机械设计与制造工程, 2018(5):119.
- ZHANG Kaixuan, GONG Dao, ZHOU Jingsong. The experiment study on the influence to metro vehicle interior noise caused by rail corrugation [J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2018(5):119.
- [9] 翟婉明,王其昌. 轮轨动力分析模型研究[J]. 铁道学报,1994(1):64.
- ZHAI Wanming, WANG Qichang. A study on the analytical models for wheel/rail dynamics[J]. Journal of the China Railway Society, 1994(1):64.
- [10] HAN J, ZHONG S Q, ZHOU X, et al. Time-domain model for wheel-rail noise analysis at high operation speed[J]. Journal of Zhejiang University-Science A, 2017(8): 593.
- [11] 陈果,翟婉明. 铁路轨道不平顺随机过程的数值模拟[J]. 西南交通大学学报,1999(2):13.
- CHEN Guo, ZHAI Wanming. Numerical simulation of the stochastic process of railway track irregularities [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1999(2):13.
- [12] PIOTROWSKI J, KIK W. A simplified model of wheel/rail contact mechanics for non-Hertzian problems and its application in rail vehicle dynamic simulations[J]. International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, 2008, 46(1-2):27.

(收稿日期:2020-07-26)

## (上接第23页)

- [3] 胡向东,肖朝昀,毛良根. 双层越江隧道联络通道冻结法温度场影响因素[J]. 地下空间与工程学报,2009(1):7.
- HU Xiangdong, XIAO Zhaoyun, MAO Lianggen. The influencing factor of the temperature field of cross passage construction by freezing method in double deck road tunnels[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009(1):7.
- [4] 王晖,竺维彬,李大勇. 富水砂层中联络通道施工工法及其控制措施[J]. 铁道工程学报,2010(9):82.
- WANG Hui, ZHU Weibin, LI Dayong. Construction method and control measure for connecting passage in water-enriched sand bed [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010(9):82.
- [5] 李攀,谢雄耀,季倩倩. 上海长江隧道冻土帷幕温度场动态演化机理[J]. 同济大学学报(自然科学版),2013(4):515.
- LI Pan, XIE Xiongyao, JI Qianqian. Dynamic evolution analysis on frozen wall temperature of cross passage of Shanghai Yangtze River tunnel[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013(4):515.
- [6] 杨平,陈瑾,张尚贵,等. 软弱地层联络通道冻结法施工温度及位移场全程实测研究[J]. 岩土工程学报,2017(12):2226.
- YANG Ping, CHEN Jin, ZHANG Shanggui, et al. Whole range monitoring for temperature and displacement fields of cross passage in soft soils by AGF[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017(12):2226.
- [7] 张松. 地铁联络通道冻结法施工中冷冻排管布置形式分析[J]. 城市轨道交通研究,2018(11):108.
- ZHANG Song. Analysis on the freezing row tube layout in freezing construction for metro tunnel bypass [J]. Urban Mass Transit, 2018(11):108.
- [8] 汪仁和,王伟. 冻结孔偏斜下冻结壁温度场的形成特征与分析[J]. 岩土工程学报,2003(6):658.
- WANG Renhe, WANG Wei. Analysis for features of the freezing temperature field under deflective pipes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003(6):658.
- [9] 陈军浩,夏红兵,李栋伟. 多圈管冻结壁温度场发展及冻结管偏斜影响[J]. 中山大学学报,2016(4):56.
- CHEN Junhao, XIA Hongbing, LI Dongwei. Multi-circle-tube frozen wall temperature field development and deviation pipes influence[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2016(4):56.

(收稿日期:2020-04-12)

欢迎访问《城市轨道交通研究》网站

www.umt.1998.tongji.edu.cn