

轨道随机不平顺对地铁振动源强时-频特性影响的仿真研究^{*}

高文杰¹ 谭诗磊¹ 杨 艺^{2,3} 高 鑫^{2,3} 赵才友^{2,3}

(1. 成都地铁运营有限公司, 610031, 成都; 2. 西南交通大学土木工程学院, 610031, 成都;
3. 西南交通大学高速铁路线路工程教育部重点实验室, 610031, 成都//第一作者, 工程师)

摘 要 目的: 为了探究轨道的多种随机不平顺(高低、水平、轨距和轨向)在不同列车速度下对地铁隧道壁垂向振动加速度和轮轨力的影响, 以提升行车品质, 特进行本研究。方法: 以地铁 A 型车为例, 运用动力学分析软件建立考虑柔性轮对的车辆刚柔耦合系统动力学模型。将轨道和轮对视为柔性体, 其余部件视为刚体, 通过施加多种随机不平顺和改变车辆速度并考虑波磨来模拟不同工况, 进行仿真计算。同时采用快速傅里叶变换方法对仿真计算结果进行时域和频域分析, 研究隧道壁和轮轨力的振动特性。结果及结论: 研究表明: 随着车辆运行速度的增大, 隧道壁垂向振动加速度的峰值有所提高, 优势频率分布范围会有稍许扩大, 高频成分增多; 车轮间相互作用加剧, 垂向轮轨力有所增大; 隧道壁在 4~200 Hz 范围内的振动主频为 63 Hz, 不随速度变化而变化, 但加速度级峰值会有所增大。

关键词 地铁隧道; 轮轨力; 轨道随机不平顺; 时域分析

中图分类号 U270.1⁺1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.07.007

Influence Simulation of Track Random Irregularity on Metro Vibration Source Intensity Time-Frequency Characteristics

GAO Wenjie, TAN Shilei, YANG Yi, GAO Xin, ZHAO Caiyou

Abstract **Objective:** The impact of various track random irregularities (height, level, track gauge and track direction) on metro tunnel wall vertical vibration acceleration and wheel-rail force at different train speeds is explored for improving operation quality. **Method:** Taking metro A-type vehicle as example, the dynamics analysis software is used to establish a vehicle rigid-flexible coupling system dynamics model considering flexible wheelsets. By treating the track and wheelsets as flexible bodies and the rest of the components as rigid bodies, different working conditions are simulated through applying vari-

ous random irregularities and changing the vehicle speed while considering corrugation for different working condition simulation to get calculation results. At the same time, the fast Fourier transform method is used to analyze the simulation results in time-domain and frequency-domain and study the vibration characteristics of tunnel wall and wheel-rail force. **Result & Conclusion:** Research results show that with the increase of vehicle operating speed, the peak value of tunnel wall vertical vibration acceleration will increase, the distribution range of dominant frequency will be slightly expanded with increased high-frequency components; as the interaction between wheels intensifies, the vertical wheel-rail force increases. The main vibration frequency of tunnel wall in the range of 4-200 Hz is 63 Hz, which does not change with the speed, but the acceleration peak value will increase.

Key words metro tunnel; wheel-rail force; track random irregularity; time-domain analysis

First-author's address Chengdu Metro Operation Co., Ltd., 610031, Chengdu, China

近年来,我国城市轨道交通的迅速发展,极大地缓解了城市交通拥堵问题。地铁以其行车密度和载客能力上的显著优势逐渐成为城市交通的主要出行选择。但地铁在快捷便利的同时,其运营过程中会对其本身和周围环境产生振动影响。其中轨道随机不平顺是引起轮轨作用力和列车振动的主要激励源,是决定行车品质的重要因素^[1],因此研究轨道随机不平顺在不同列车速度下对周围环境的影响具有重要意义。

针对轨道随机不平顺的问题,文献[2]分析了轨道 4 种随机不平顺对高速铁路列车直线运行和曲线运行性能的影响。文献[3]用 MATLAB 软件的

^{*} 高速铁路基础研究联合基金(U1734207);国家自然科学基金面上项目(51978585);四川省应用基础研究项目(2020YJ0214)

编程方法求解无砟轨道高低不平顺激励下高速列车的垂向时域响应。文献[4]利用轨道随机不平顺作为仿真计算激励,通过对轨道不平顺与车辆动力响应的相干性分析,得出轨道随机不平顺影响轮轨作用力和车辆运行品质的最不利波长。文献[5]等通过建立有限元-无限元耦合模型分析地铁运营引起的环境振动响应。文献[6]从理论上探讨轨道不平顺的空间相干性对二维车辆动力学行为的影响,证明了当不规则波的波长小于临界波长时,相干激励和非相干激励下响应的差异变得很小。文献[7]利用 SIMPACK 多体动力学分析软件建立了某 300 km/h 速度级别的高速动车组拖车模型,研究不同轨道随机激励下的车辆动力学性能。文献[8]基于随机轨道不平顺性,对实际结构中常见阻尼、轨道质量等参数化的铁路桥梁进行了参数响应检验,研究了加速度响应影响的动力放大因子。

综上所述,国内学者对轨道随机不平顺的研究主要集中在高速铁路上,且对车体及周围环境的影响研究较多,但是针对地铁隧道的动力响应的研究还较少。因此,本文以地铁 A 型车为例,运用动力学分析软件建立考虑柔性轮对的车辆刚-柔耦合系统动力学模型;将轨道和轮对视为柔性体,其余部件视为刚体,通过施加多种随机不平顺和改变车辆速度,同时考虑钢轨波磨来模拟不同工况进行仿真计算;采用快速傅里叶变换对结果进行时域和频域分析,研究隧道壁和轮轨力的振动特性。

1 刚-柔耦合的车辆-轨道-隧道系统动力学模型

基于多体动力学理论,利用 UM 仿真分析软件,建立完整的车辆系统动力学模型。根据车辆构造特征和悬挂系统,将列车视为由车体、构架、轮对和轴箱等组成的多刚体系统。该模型中轮对为柔性体,其余部件均为刚性体,系统的惯性参数、悬挂参数及结构参数按照实际参数选取。车辆的主要技术参数参照 A 型车相关参数^[9-10]。

利用 ANSYS 软件按照轮对和隧道实际尺寸建立模型,并通过 Solid45 单元类型进行模拟。其中建模使用的材料为 C50 混凝土,弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.3,体积质量为 2 500 kg/m³。

轮轨接触的理论基础采用 Kalker 滚动接触理论中的 Kalker 简化理论。由于本文考虑了轮对的柔性,需要对轮轨接触关系进行特殊处理。假定轮

毂由于弹性变形而移动,引入一个无质量的刚体作为踏面外形,在无质量刚体和钢轨之间生成轮轨接触关系。因此,刚体通过车轮踏面上的一点与弹性轮对固定连接,通过连接点传递运动学关系、力和力矩^[11]。

最后,将隧道模型导入 UM 仿真分析软件中,并采用 Bushing 力元将隧道固定于地基基础,形成车辆-轨道-隧道动力学仿真模型(见图 1)。

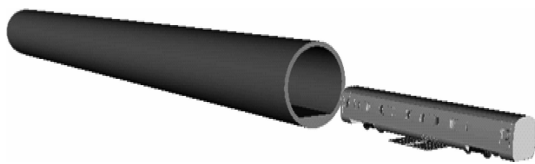


图 1 车辆-轨道-隧道动力学仿真模型

Fig. 1 Vehicle-track-tunnel dynamics simulation model

2 多体动力学模型验证

为验证仿真模型的准确性,将工况相近的隧道壁实测数据与仿真模型输出结果进行倍频程对比。用 UM 仿真分析软件模拟列车在平直轨道上以 70 km/h 的速度行驶,设置轨道随机不平顺(高低、水平、轨向、轨距)。仿真模拟隧道壁 1/3 倍频程图如图 2 所示。

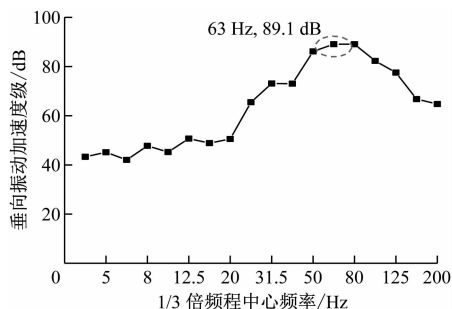


图 2 仿真模拟隧道壁 1/3 倍频程图

Fig. 2 Diagram simulation of tunnel wall 1/3 octave

选取某地铁线路与数值模拟工况条件相近地段,并根据 2018 年版的《环境影响评价技术导则与标准》,在单线隧道的隧道壁处(远离另一线隧道一侧),高于轨顶面 1.25 m 处布置测点得到实测数据,采集时域振动信号,并对此进行筛选。实测隧道壁 1/3 倍频程图如图 3 所示。

对比实测和数值模拟数据,分析可得测点的实测和数值模拟数据较为相近,振动加速度级随中心频率增大呈升高的趋势,高频部分吻合较好,垂向振动加速度级峰值相差不大,两者整体趋势较为相近,所以数值模拟较为真实。

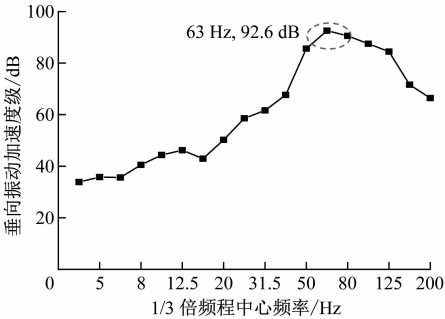


图3 实测隧道壁1/3倍频程图

Fig.3 Field measurement diagram of tunnel wall 1/3 octave

3 计算工况

本文主要研究轨道随机不平顺,其主要包括钢轨前后高低不平顺、轨向不平顺、钢轨左右水平不平顺

平顺以及轨距不平顺。
轨道随机不平顺的生成采用中国三大干线谱的同一解析表达式^[11],其理论公式为:

$$S(f) = \frac{A(f^2 + Bf + C)}{f^4 + Df^3 + Ef^2 + Ff + G}$$
 (1)

式中:
S(f)——轨道不平顺功率谱密度函数;
f——空间频率;
A、B、C、D、E、F、G——轨道不平顺功率谱密度的拟合参数。

表1 为轨道不平顺功率谱密度拟合参数。将表1的参数代入式(1)得到轨道不平顺功率谱密度函数,并在UM仿真分析软件中转化各自生成对应的时域,如图4所示。

表1 轨道不平顺功率谱密度拟合参数

Tab.1 Fitting parameters of track irregularity power spectrum density

不平顺类别	功率谱密度拟合参数						
	A	B	C	D	E	F	G
高低不平顺	0.000 072 47	12.630	0.036 54	-0.168 5	0.013 79	-0.000 540	-0.000 010 890
轨向不平顺	0.000 025 16	30.200	1.792 00	-0.254 6	0.029 66	-0.001 540	-0.000 036 630
轨距不平顺	0.000 144 60	43.780	-0.002 07	-0.007 0	0.011 45	-0.001 000	-0.000 005 936
水平不平顺	0.003 774 00	1.217	0.013 56	0.692 0	-0.038 30	0.000 744	-0.000 003 590

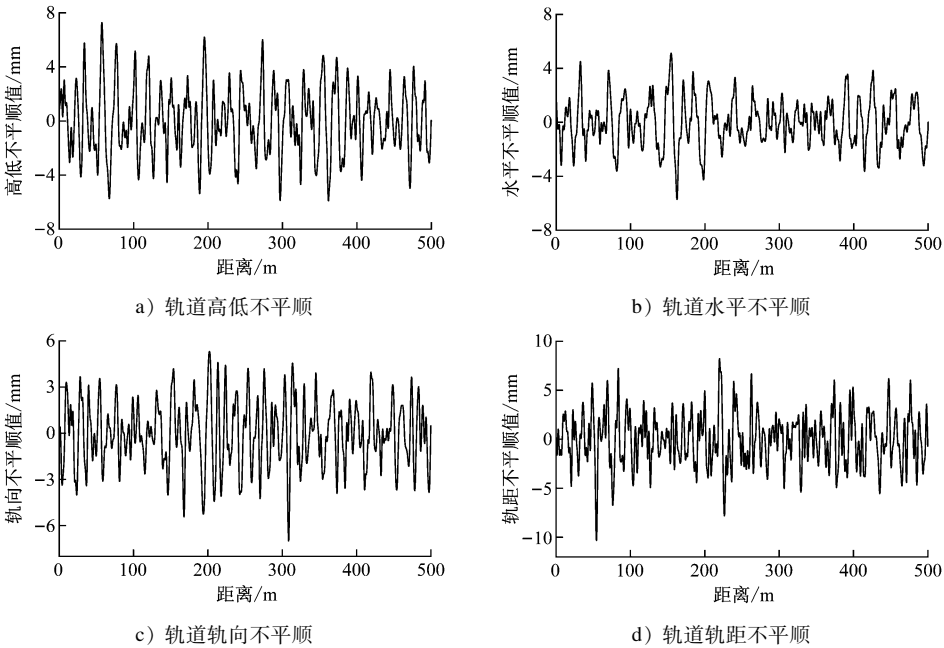


图4 轨道几何不平顺功率谱密度图

Fig.4 Power spectrum density diagram of track geometric irregularity

本文在仿真分析钢轨的波磨问题时,采取单一的正弦函数来描述波磨区段的轨面不平顺

$Z_0(x)$,即:

$$Z_0(x) = \frac{a}{2}\sin\left(\frac{2\pi x}{L}\right)$$

式中:

- a ——钢轨波磨波深,单位 m;
- L ——钢轨波磨波长,单位 m;
- x ——钢轨纵向位置,单位 m。

4 动力仿真结果及分析

根据 2018 年版的《环境影响评价技术导则与标准》,在单线隧道的隧道壁处(远离另一线隧道一

侧),高于轨顶面 1.25 m 处布置测点得到实测数据,采用傅里叶变换,得到隧道壁垂向振动加速度的时-频图和轮轨力。

4.1 隧道壁振动加速度时-频分析

为对比研究柔性轮对车体在不同速度下通过隧道时对隧道垂向振动加速度的影响,设置采样频率为 2 000 Hz,列车速度根据成都地铁实际运行速度分别设置为 60 km/h、80 km/h 和 100 km/h,添加车轮轮周多边形,分别施加各种随机不平顺得到动力响应结果如图 5 所示。

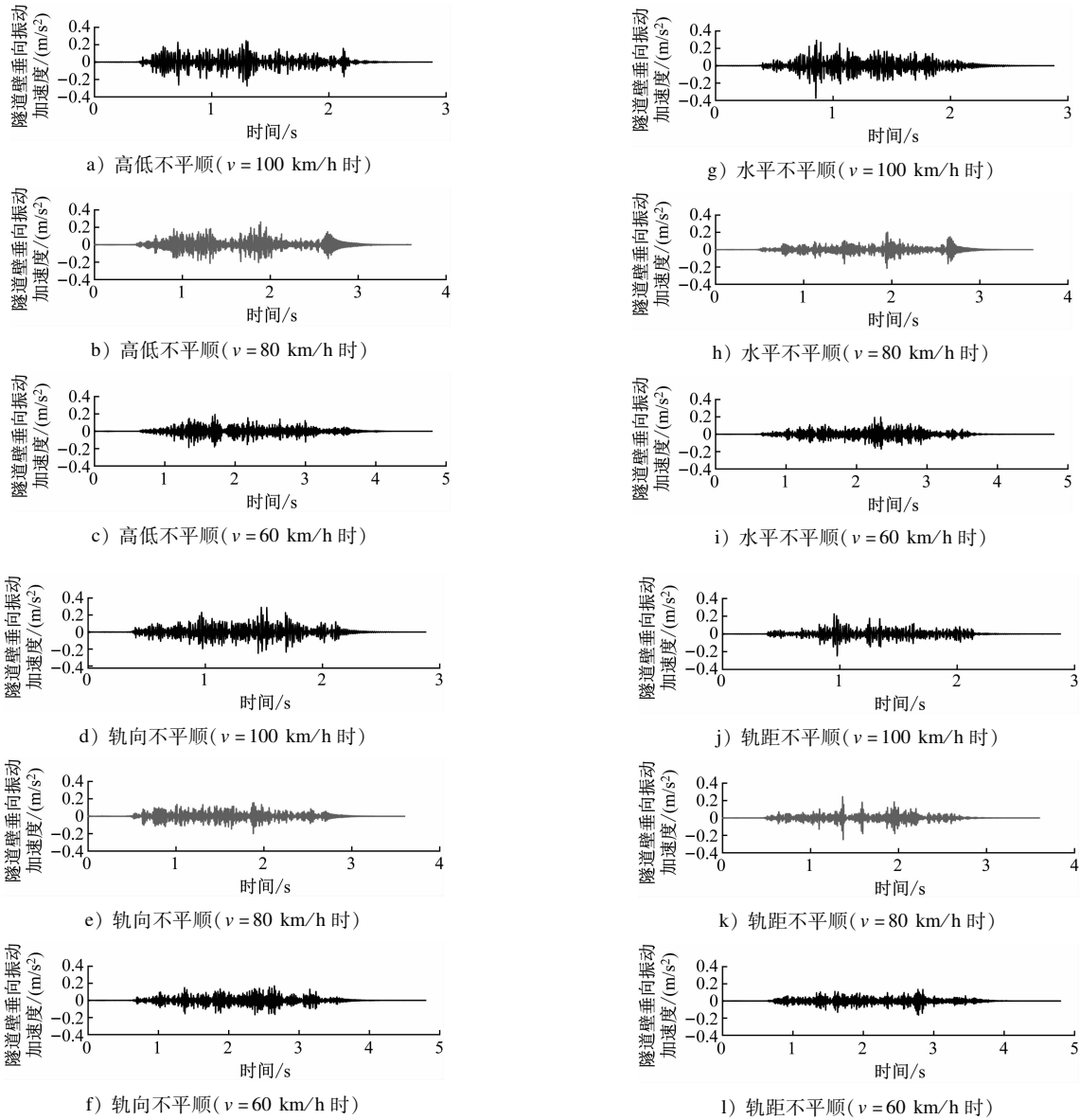


图5 隧道壁垂向振动加速度的时域图

Fig. 5 Time-domain diagram of tunnel wall vertical vibration acceleration

由图 5 可知,在不同列车速度下的加速度时程曲线中,列车转向架对应的隧道壁垂向振动加速度峰值较为模糊,隧道壁振动加速度峰值如表 2 所示。

表 2 不同列车速度下的隧道壁垂向振动加速度峰值
Tab.2 Peak value of tunnel wall vertical vibration acceleration at different train speeds

速度/(km/h)	隧道壁垂向振动加速度峰值/(m/s ²)		
	A	B	C
60	0.19	0.20	0.18
80	0.23	0.21	0.20
100	0.27	0.28	0.37

注:A、B、C 分别为 3 种不同的轨道不平顺情况。

由表 2 可看出,随着列车速度的不断提升,隧道壁垂向振动加速度也在不断增大;纵向对比,高低不平顺和轨向不平顺对隧道壁垂向振动加速度影响最大。

图 6 为不同列车速度下的隧道壁垂向振动加速

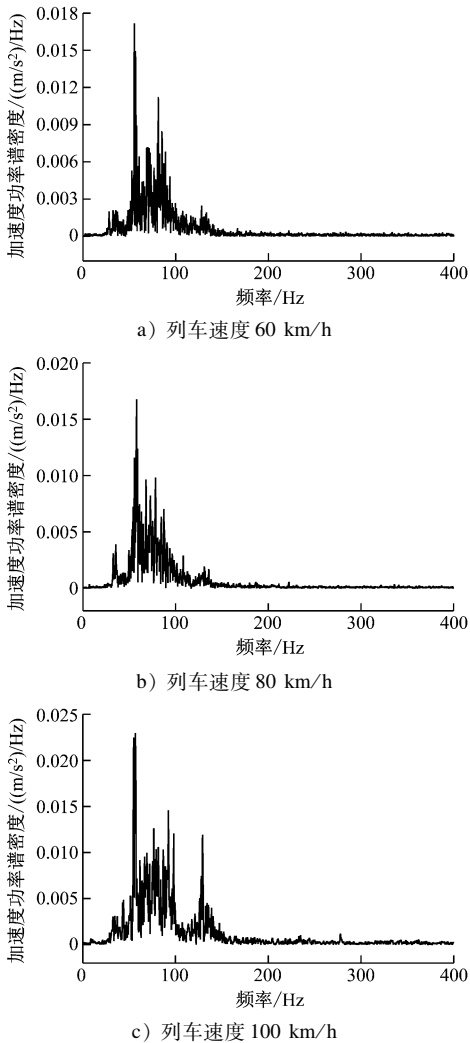


图 6 不同列车速度下的隧道壁垂向振动加速度频域分析
Fig.6 Frequency-domain analysis of tunnel wall vertical vibration acceleration at different train speeds

度频域分析,设置速度分别为 60 km/h、80 km/h 和 100 km/h。在图 6 中:速度 60 km/h 下最大峰值频率为 55 Hz,优势频率集中分布在 50 ~ 95 Hz;速度 80 km/h 下最大峰值频率为 58 Hz,优势频率集中分布在 55 ~ 90 Hz;速度 100 km/h 下最大峰值频率为 57 Hz,优势频率集中分布在 50 ~ 100 Hz 和 130 ~ 140 Hz,分布较广,高频较多。

P_2 力^[9]是簧下质量和轨道质量在轨道弹性系统中振动引起的中低频响应力,一般在 30 ~ 100 Hz 之间,持续时间较长。结合轮轨力和频域图分析,轨道几何不平顺的主要波长为 0.31 m,隧道壁在列车移动荷载的作用和 P_2 力共振作用下,不同速度等级下激励起的频率主要在 50 ~ 100 Hz 之间,与频域图大致对应。

4.2 轮轨力分析

图 7 是列车速度分别为 60 km/h、80 km/h、100 km/h 时在直线工况上运行的前轮对右轮的垂向轮轨力的分析。

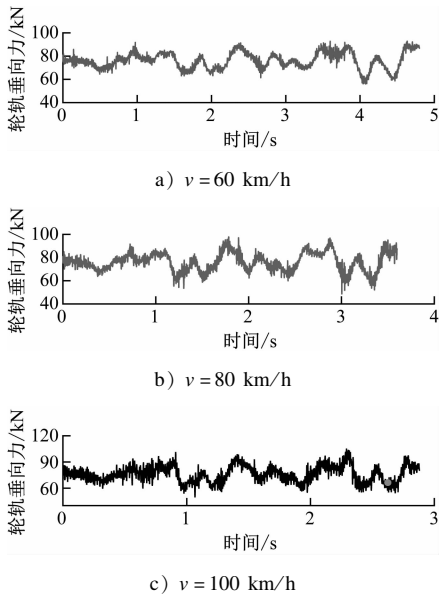


图 7 前轮对右轮的垂向轮轨力
Fig.7 Right wheel vertical wheel-rail force of the front wheelset

由图 7 可知,列车速度在 60 km/h、80 km/h 和 100 km/h 时,轮轨垂向力在 70 kN、75 kN 和 80 kN 附近波动,列车速度增大,轮轨垂向力也逐渐增大。

以 60 km/h 为例(见图 8),轮轨力优势频率集中分布在 50 ~ 150 Hz,由波动理论可知,低频振动传递到车辆下部部件,进而传递到隧道,因此,隧道壁频谱图峰值与轮轨力频谱图峰值应大致对应。

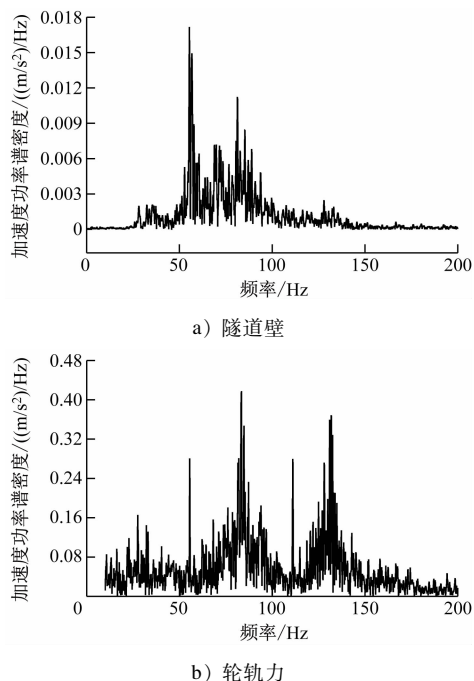


图8 速度 60 km/h 时隧道壁和轮轨力频谱图

Fig. 8 Spectrum diagram of tunnel wall and wheel-rail force at train speed of 60 km/h

4.3 振动加速度级分析

本文只讨论隧道壁的振动,不涉及振动环评,因此采用不计权的振动加速度级进行分析。图9是隧道壁振动在不同速度下加速度级的1/3倍频程图,隧道壁在4~200 Hz范围内的振动主频为63 Hz,60 km/h、80 km/h、100 km/h、120 km/h下的加速度级分别为89.1 dB、90.3 dB、91.7 dB、92.5 dB,加速度级有稍许增大的趋势。

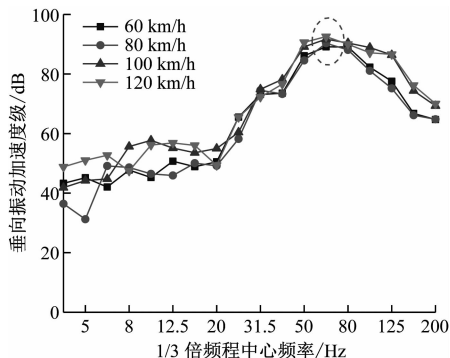


图9 不同速度下隧道壁振动1/3倍频程图

Fig. 9 Diagram of tunnel wall vibration 1/3 octave at different train speeds

由图9可知,当列车以60 km/h的速度通过时,响应点的加速度级总体上随着频率的增大均呈现先增大再减小的趋势,响应点的加速度级峰值大致集中在50~120 Hz范围内的中心频率处。

当列车以80 km/h、100 km/h和120 km/h的

速度等级通过时,响应点的加速度级总体上与车速为60 km/h时相似,相对于车速为60 km/h的工况,大部分中心频率上加速度级都有所增加,说明随着列车速度的增加,车轮间相互作用加剧,作用在轨道上的荷载增加,传递到隧道的振动加大。

5 结语

利用多体动力学仿真软件UM,以及有限元通用软件建立了车辆轨道-隧道耦合模型,分析了多种随机不平顺在不同速度下对隧道壁振动加速度的影响。

1) 在高低、水平、轨向和轨距不平顺下,随着列车运行速度的提高,隧道壁垂向振动加速度的峰值有所提高,对应的加速度功率谱密度的峰值频率大致不变,在56 Hz上下波动,优势频率分布范围会有稍许扩大,高频成分增多,轮轨间相互作用加剧,横向和垂向轮轨力都有所增大。

2) 分析不同速度下隧道壁的1/3倍频程图,在4~200 Hz范围内的振动主频为63 Hz,不随速度变化而变化,加速度级峰值大致集中在50~120 Hz。

参考文献

- [1] 卢炜,马帅,高亮,等.北京地铁线路轨道不平顺谱分析[J].铁道工程学报,2020,37(3):101.
LU Wei, MA Shuai, GAO Liang, et al. Analysis of track irregularity spectrum of the Beijing subway lines[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(3): 101.
- [2] 张坤,段晓峰,韩峰,等.轨道随机不平顺对高速铁路列车运行性能影响分析[J].铁道标准设计,2019,63(4):28.
ZHANG Kun, DUAN Xiaofeng, HAN Feng, et al. Analysis of the influence of random irregularity on high-speed railway train's operation performance[J]. Railway Standard Design, 2019, 63(4): 28.
- [3] 李晓静.轨道不平顺激励下高速列车振动特性分析[D].兰州:兰州交通大学,2016.
LI Xiaojing. Analysis on vibration characteristics of high-speed train under track irregularity excitation[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2016.
- [4] 黄俊飞,练松良,宗德明,等.轨道随机不平顺与车辆动力响应的相干分析[J].同济大学学报(自然科学版),2003,31(1):16.
HUANG Junfei, LIAN Songliang, ZONG Deming, et al. Analysis of coherence between track random irregularity and vehicle dynamic response[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2003, 31(1): 16.
- [5] 马龙祥,刘维宁,蒋雅君,等.基于薄片有限元-无限元耦合模型的地铁列车振动环境影响分析[J].振动与冲击,2017,36(15):111.

(下转第49页)

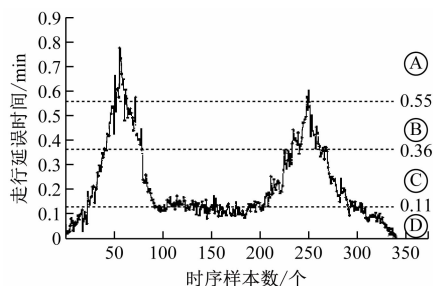


图 10 江苏路站换乘通道乘客行走延误时间聚类结果

Fig. 10 Clustering results for interchange passage passenger walk delay time in Jiangsu Road Station

4 结语

本文分析了 Wi-Fi 探针客流采集原理和原始数据清洗方法,在 Wi-Fi 探针测得的实时客流量的基础上研究了基于 BPR 函数的地铁车站通道乘客行走时间实时估计模型,并且对车站通道客流做出预警等级划分,并利用上海轨道交通 11 号线江苏路站的 Wi-Fi 数据进行了实例验证与分析。研究成果可为地铁车站通道行人流交通建模、车站通道人流仿真等提供方法参考。在后期的研究中,对 Wi-Fi 数据的清洗挖掘还应做更进一步的深入研究,以便为人流特性研究以及客流组织提供更有效的依据。

参考文献

- [1] HANKIN B D, WRIGHT R A. Passenger flow in subways[J]. Journal of the Operational Research Society, 1958, 9(2): 81.
- [2] 娄永梅,张炳森,张宁,等. 轨道交通车站内通道设施的行人流特性研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2018, 15(9): 55.
- [3] LOU Yongmei, ZHANG Bingsen, ZHANG Ning, et al. Study on characteristics of pedestrian flow on passageway of rail transit stations[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2018, 15(9): 55.
- [4] MA Longxiang, LIU Weining, JIANG Yajun, et al. Metro train-induced vibration influences on surrounding environments based on sliced finite element-infinite element coupled model[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(15): 111.
- [5] LEI S, GE Y, LI Q. Effect and its mechanism of spatial coherence of track irregularity on dynamic responses of railway vehicles[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 145: 106957.
- [6] 郑培治,祖炳洁,杨建福,等. 不同轨道随机激励下的车辆动力学性能仿真研究[J]. 价值工程, 2015, 34(36): 217.
- [7] ZHENG Peizhi, ZU Bingjie, YANG Jianfu, et al. Study of the vehicle dynamics performance under different rail stochastic excitations[J]. Value Engineering, 2015, 34(36): 217.
- [8] SALCHER P, ADAM C, KUISLE A. A stochastic view on the effect of random rail irregularities on railway bridge vibrations[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2019, 15

2018, 15(9): 55.

- [3] 史建港. 大型活动行人交通特性研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2007.
- [4] SHI Jian'gang. Study on traffic characteristics of large-scale activity pedestrians [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2007.
- [5] 单庆超. 城市轨道交通行人运动建模及仿真[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- [6] SHAN Qingchao. Modeling and simulation of pedestrian movement in urban rail transit [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.
- [7] 陈菁菁, 江志彬. 基于 WiFi 嗅探数据的地铁网络客流分析技术[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(5): 153.
- [8] CHEN Jingjing, JIANG Zhibin. Passenger flow analysis technology in metro network based on Wi-Fi probing data[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(5): 153.
- [9] 彭海. 皮尔逊相关系数应用于医学信号相关度测量[J]. 电子世界, 2017(7): 163.
- [10] PENG Hai. Application of Pearson correlation coefficient in correlation measurement of medical signals[J]. Electronics World, 2017(7): 163.
- [11] 王玺铭. 基于时空相关性分析的短时交通流量预测方法研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2020.
- [12] WANG Ximing. Research on short-term traffic flow forecasting method based on spatial-temporal correlation analysis[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2020.
- [13] Transportation Research Board Business Office. Highway capacity manual 2008[M]. Washington, D. C: National Research Council, 2009.
- [14] 周继彪, 赵鹏飞, 董升, 等. 基于蚁群算法的地铁车站行人拥挤等级划分方法[J]. 城市交通, 2019, 17(4): 105.
- [15] ZHOU Jibiao, ZHAO Pengfei, DONG Sheng, et al. Pedestrian congestion levels at subway stations with ant colony algorithm[J]. Urban Transport of China, 2019, 17(4): 105.

(收稿日期:2021-02-09)

(上接第 43 页)

(12): 1649.

- [9] 万鹏, 崔婉明, 王开云. 考虑轮对弹性时车辆运动稳定性分析[J]. 铁道车辆, 2008, 46(6): 8.
- [10] WAN Peng, ZHAI Wanming, WANG Kaiyun. Analysis of running stability of vehicles with the consideration of wheelset elasticity[J]. Rolling Stock, 2008, 46(6): 8.
- [11] 杨晓璇. A 型地铁车辆车轮多边形形成机理初步研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [12] YANG Xiaoxuan. Preliminary study on mechanism of wheel polygon of type A metro vehicle[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [13] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学:上册[M]. 4 版. 北京: 科学出版社, 2015.
- [14] ZHAI Wanming. Vehicle-track coupled dynamics: Volume 1 [M]. 4th ed. Beijing: Science Press, 2015.

(收稿日期:2021-01-18)