

地铁列车振动源强离散机理测试分析*

李明航¹, 马蒙¹, 刘维宁¹, 吴宗臻², 张厚贵³

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院 北京, 100044)

(2. 中国铁道科学研究院集团有限公司城市轨道交通中心 北京, 100081)

(3. 北京市劳动保护科学研究所 北京, 100054)

摘要 为了分析地铁列车振动源强离散特征以及不同频段的控制因素,对某地铁线路的同一区间内 2 个断面进行现场原位测试。从时域、频域多角度出发,统计分析全天测试样本。结果表明:测试断面振动源强离散超过 15 dB,且呈现与列车编组相关的周期性;早、晚高峰时段振动源强并没有显著增大;同一列车多次通过固定测试断面引起的振动响应差异主要受 6.3 Hz 以下频段的离散性影响,该频段主要源于列车的准静态激励,与列车的载重直接相关;不同列车间 8~250 Hz 频段内的振动响应由车轮不圆顺状态的差异性控制,该频段内分频振动加速度级差异最大接近 20 dB,直接导致全天内实测振动源强样本的显著离散。

关键词 地铁;原位测试;环境振动;振动源强;离散特征

中图分类号 TB533⁺.2; X827

引言

我国城市轨道交通事业蓬勃发展,地铁列车运行带来的环境振动问题也越发凸显。为满足城市环境对交通振动控制的需要,在地铁线路上应用了大量不同等级的减振措施,且减振轨道的铺轨里程不断上升。在北上广深城市轨道交通线路中,减振措施占全线比例大多在 40% 以上,个别线路超过 50%^[1]。此外,传播路径隔振^[2-3]及敏感目标被动隔振^[4]等措施的应用也越来越广泛。目前,国内部分地铁新线开通运行后,会产生振动及噪声环境影响超标的实际案例^[5],造成这一现象的原因与在线路规划建设初期环境振动影响评价预测准确性和合理性有关。

振动源强的合理选取是整个预测评估环节的核心。目前,地下线列车振动源强的取值方法一般分为 3 种:引用已公开发表的文献^[6]、执行已颁布标准^[7]和采用现场类比测试^[8]。通过已有的 3 种方法均可获得某一确定的源强取值,然而振动源强的实际大小与车辆状态、线路类型、钢轨状态以及运营状态等因素有关,即使是在车速、车型和线路条件固定的情况下,由于运量波动和车轮不圆顺差异等也会导致短时间内的振动源强在一定范围内波动,且离

散明显。户文成等^[9]通过实测对比分析,发现同一车辆在车速微小波动及不同运量条件下,振动源强差距超过 5dB。李宪同等^[10]对北京地铁 4 种轨道形式一天内 200 多趟列车的振动源强进行了统计分析,发现隧道壁测点各趟车之间的振动水平差异达到 5~7dB。温士明等^[11]分析了不同车轮不圆顺对振动响应的影响。刘力等^[5]测试得到建筑物前 0.5 m 处一天内左、右线 20 趟车的最大 Z 振级差距分别达到 16.3 dB 和 15.4 dB,该测试结果也反映了振动源强的差异性。

大量的现场测试结果表明,即使在一天时间内振动源强仍呈现较强的离散性。然而,针对该现象的机理分析仍停留在不同测试样本隧道壁测点最大 Z 振级单一指标的统计分析,对其时域振动特征及分频振动响应的多角度分析仍然匮乏。笔者通过现场测试,从时域、频域多角度出发,分析了振动源强的离散特征以及不同频段的控制因素。

1 地下线振动源强测试

1.1 测试概况

笔者选择北京地铁某线路相同区间、同一曲线

* 国家自然科学基金资助项目(51978043);北京市自然科学基金资助项目(3184047);中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(2019YJS115)

收稿日期:2019-09-20;修回日期:2019-12-23

段、同步测量的 2 个测试断面进行分析。列车为 8 节编组、B 型车,分别为普通整体道床轨道及钢弹簧浮置板轨道,均为 DTVI₂ 扣件。各个测试断面信息如表 1 所示。

表 1 测试断面信息

Tab. 1 Test section information

测试断面	轨道类型	线路半径/m	扣件类型	隧道类型	车速/(km·h ⁻¹)
断面 1	普通整体道床	650	DTVI ₂	盾构隧道	≈70
断面 2	钢弹簧浮置板	650	DTVI ₂	盾构隧道	≈70

1.2 测点布置与采集设备

图 1 为隧道壁振动测点示意图。2 个测试断面测点均布置在轨面以上 1.5 m 的隧道洞壁处,为了避免测试工装固有频率影响测试结果^[12],本次测试选择使用实心铝合金立方块作为传感器固定基座,以浮置板轨道断面为例,如图 1 所示。测试过程中,数据自动采集设备使用 INV3060V 型 24 位高精度数据采集仪,隧道壁振动加速度测试采用 Lance LC0106 型高精度压电式加速度传感器,量程为 5g,灵敏度为 1 000 mV/g,采样频率为 2 048 Hz。

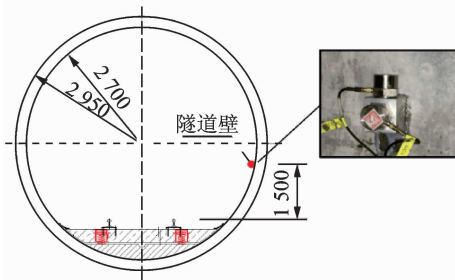


图 1 隧道壁振动测点示意图(单位:mm)

Fig. 1 Measuring point on the tunnel wall (unit:mm)

2 时域分析

振动均方根值(root mean square,简称 RMS)能客观反映一定时间内的振动能量大小。离散时间序列的有效值定义为

$$a_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{n=1}^m [a(n)]^2} \quad (1)$$

其中: a_{RMS} 为振动加速度时程的有效值; $a(n)$ 为每一个离散采样点加速度值; m 为采样点数。

运行有效值 $a_{RMS}(t)$ 可以体现列车通过时间内振动水平的变化趋势,由多个连续固定时间步内的有效值 $a_{RMS}(t_i)$ 组成。笔者选取计算时间积分步长

为 1s,分析窗间重叠系数为 3/4。 $a_{RMS,max}$ 为列车通过时间内运行有效值的最大值; $a_{RMS,mean}$ 为列车通过时间内运行有效值的算数平均值。马蒙等^[13]给出了具体列车通过时间的判定方法。列车通过时段加速度时程如图 2 所示。

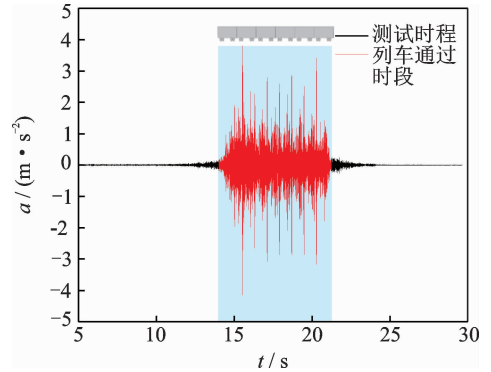


图 2 列车通过时段加速度时程

Fig. 2 Acceleration time history of train passing time

2.1 时域有效值

图 3 为测试断面全天通过列车的振动加速度有效值

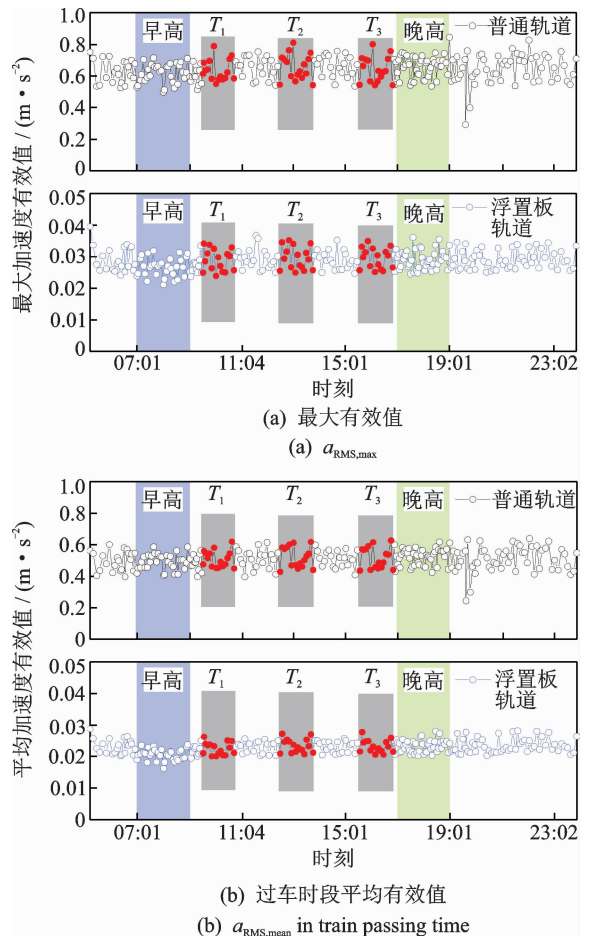


图 3 测试断面全天通过列车的振动加速度有效值散点图
Fig. 3 a_{RMS} of train passing through the test section in whole day

效值散点图。可以看出,浮置板轨道具有良好的减振性能,对于两种轨道形式不同列车通过引起的隧道壁 a_{RMS} 相差超过 1 个数量级;早高峰(7:00~9:00)、晚高峰(17:00~19:00)时段的通过列车的 $a_{\text{RMS,max}}$ 及 $a_{\text{RMS,mean}}$ 均未出现明显增加。

对于某一特定线路,投入运营的列车固定且每天内列车编组运营为固定列车的循环。图 3 中, T_1, T_2 及 T_3 时间段内不同列车通过引起的 $a_{\text{RMS,max}}$ 及 $a_{\text{RMS,mean}}$ 均表现为相同的波动规律。因此,判定这 3 个时间段内的振动信号为同一编组内 16 列列车连续 3 次通过测试断面触发的。3 个时间段内不同列车的振动加速度有效值如图 4 所示。

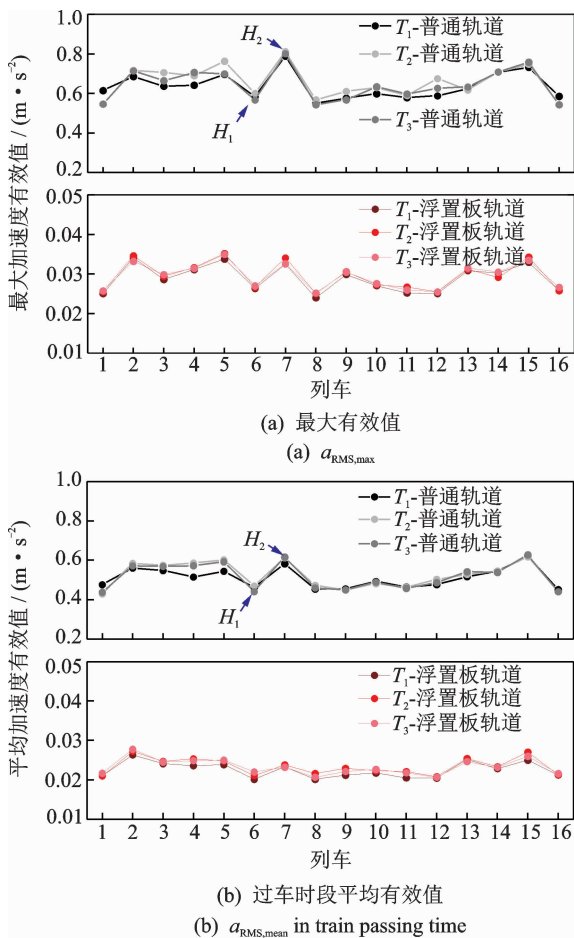


图 4 3 个时段内不同列车的振动加速度有效值

Fig. 4 a_{RMS} of different trains during typical cycle period

假设测试时间内(24 h)钢轨表面粗糙状态一致,固定测试断面的振动离散主要源于车辆载重不同和不同列车、不同车轮的不圆顺差异。图 4 为不同列车振动加速有效值对比。可见,同一列车触发的多次振动 $a_{\text{RMS,max}}$ 及 $a_{\text{RMS,mean}}$ 均基本一致,且离散程度远低于全天所有列车引起振动响应。由于短时间内车轮不圆顺固定,这种较小的离散由运量变化引起。不同列车运量及车轮不圆顺的综合差异导致

不同列车引起的振动能量显著离散。

2.2 典型时程

图 5 为图 4 中 a_{RMS} 差异显著的 H_1, H_2 两列车在 T_1 时间段内通过测试断面的振动加速度时程曲线。分析两个测试断面的列车 H_1, H_2 通过引起的振动加速度时程发现, H_2 车基本可以包络 H_1 车, H_2 车对应的 $a_{\text{RMS,mean}}$ 明显大于 H_1 车,这可能是由于 H_2 车全部车轮的整体不圆顺较大;同时,在 5~6 s 时间内, H_2 车振动加速度时程具有明显的振动峰值,这可能是由于 H_2 车个别车轮局部伤损(如车轮扁疤)与钢轨表面接触时产生的冲击振动。

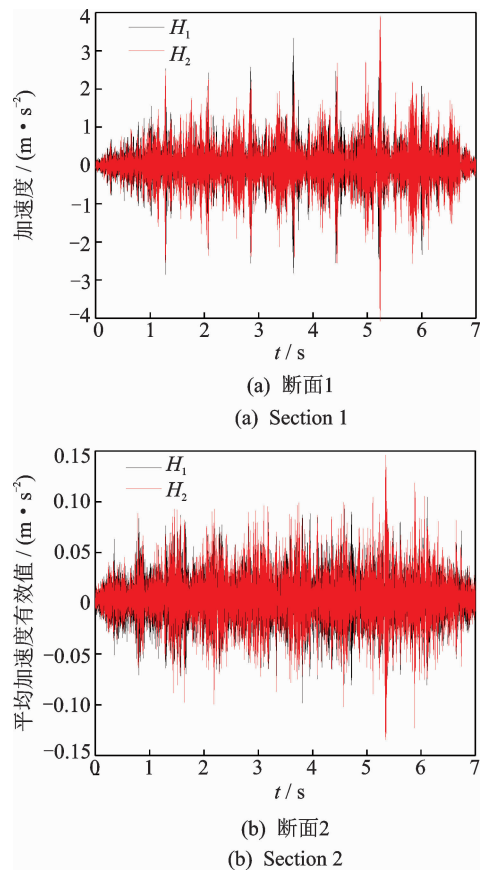


图 5 典型列车 H_1, H_2 通过引起的振动加速度时程

Fig. 5 Acceleration time history induced by typical trains of H_1, H_2

3 频域分析

3.1 频域统计指标——Z 振级

在环境评价中,通常采用垂向计权加速度级作为单值评价指标,即 Z 振级(VL_Z)。它可以反映 1~80 Hz 范围内计权后的振动能量。测量列车通过时的 Z 振级,时间积分常数为 1 s,重叠系数为

3/4。据此依次计算可获得 Z 振级随时间的变化过程,即运行 Z 振级 $VL_Z(t)$,最大 Z 振级即为列车通过时间内多个时段的 Z 振级最大值 $VL_{Z,max} = \max[VL_Z(t)]$, $VL_{Z,mean}$ 为车辆通过时间内 Z 振级的算数平均值。

$$VL_Z = 10 \log(\sum 10^{(VL_i + \alpha_i) / 10}) \quad (2)$$

其中: VL_i 为第 i 个频带的振动加速度级(dB); α_i 为第 i 个频带的计权因子(dB),本研究统一采用 ISO2631/1—1997 中规定的计权因子。

3.1.1 Z 振级测试结果

图 6 为 2 个测试断面全天通过列车 Z 振级。可见,所有断面的 $VL_{Z,max}$ 均表现为较强的离散性,断面 1 的最大与最小值之间相差甚至超过了 15 dB,所有断面的源强波动范围远超过初级减振措施的控制范围(<5 dB)^[9]; 2 个测试断面全天数据的显著离散,且钢弹簧浮置板轨道表现出优秀的减振性能;此外,各个测试断面的数据均表明早、晚高峰时段,振动源强并没有显著的增加,因此列车载重的变化对振动源强的影响并不明显。

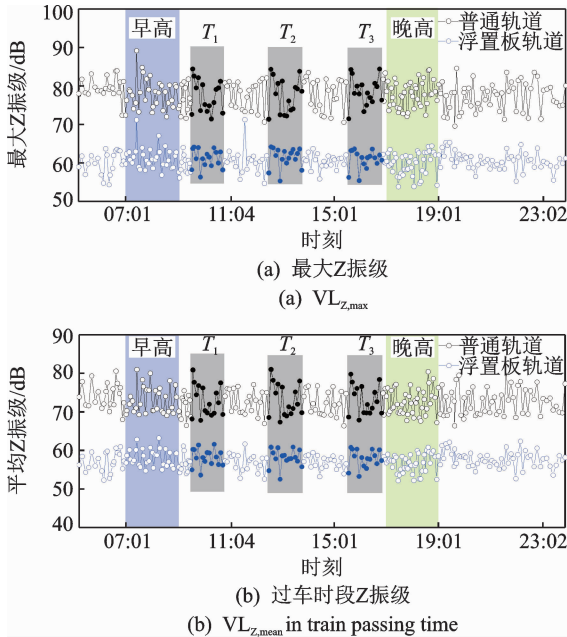


图 6 测试断面全天通过列车 Z 振级

Fig. 6 VL_Z of all the trains passing through the test section in whole day

与振动加速度有效值相似, T_1, T_2 及 T_3 时间段内不同列车通过引起振动加速度的 VL_Z 也表现出明显的周期性。图 7 为典型循环时段内不同列车 Z 振级。相同列车连续 3 次通过同一断面的 VL_Z 离散程度远低于不同列车间的差异。

3.1.2 源强离散性对类比测试源强取值影响分析

在经验预测模型中,我国现行的相关标准、规范

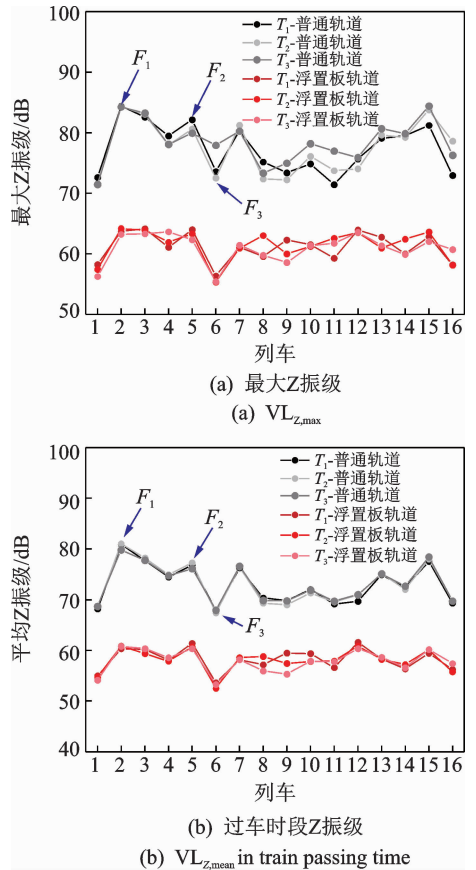


图 7 典型循环时段内不同列车 Z 振级

Fig. 7 VL_Z of different trains during typical cycle period

对类比测试时振动源强的计算方法并不统一。文献[7]规定采用不少于 100 次列车通过规定测点的 $VL_{Z,max}$ 的算数平均值作为振动源强参考值。文献[8]规定现场实测类比时,须采用高峰运营时段内不少于 5 列列车通过时段的规定振源测试点处 $VL_{Z,max}$ 算数平均值作为参考源强取值。然而,文献[14]中只规定选取不少于 5 次测量列车,对于选取时段无明确规定。笔者采用蒙特卡洛法分别模拟不同标准中源强计算方法。蒙特卡洛法应用的一般步骤为:①构造或描述概率过程;②实现从已知概率分布抽样;③建立目标估计量。

通过类比测试确定源强时,其计算结果依赖于短时间内的连续多次测试样本。本研究假设每次过车的 $VL_{Z,max}$ 为随机变量。模拟计算过程中,文献[7]规定的计算方法以各断面全天的测试结果为样本总体。文献[8]则以早晚高峰时段的测试结果为样本总体。按照不同的计算方法,分别应用蒙特卡洛法模拟 200 次类比源强计算。图 8 为不同方法振动源强取值对比。图中,“Mean”为样本均值;“SD”为标准差。

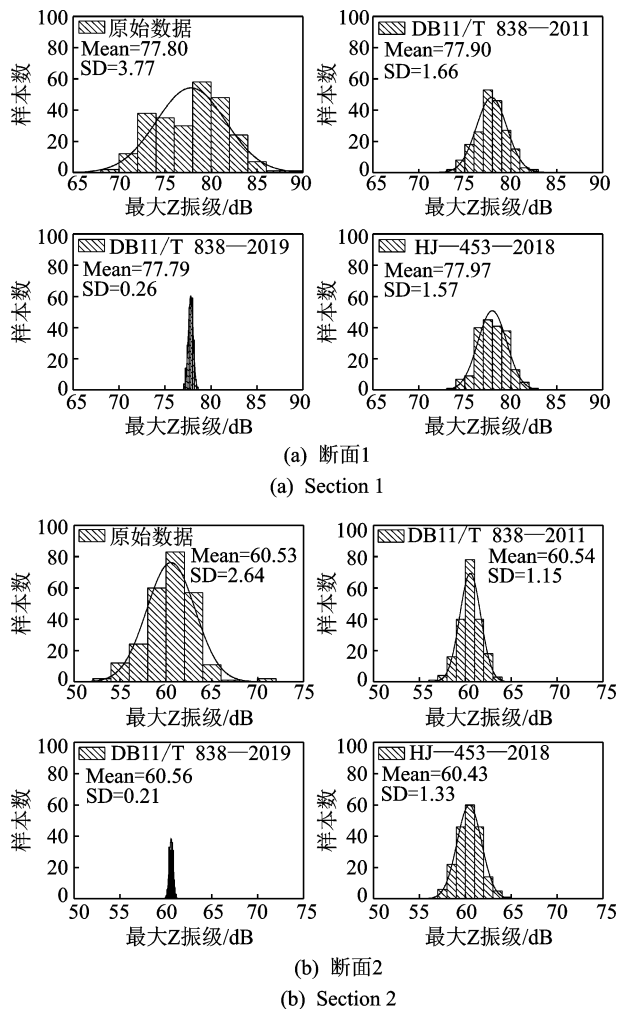


图8 不同方法振动源强取值对比

Fig. 8 Comparison of vibration source in different methods

图8显示,各断面现场测试结果及模拟计算结果均呈现为单峰分布,并接近服从正态分布特征。通过与测试全天的原始数据对比发现,各测试断面通过蒙特卡洛法模拟3种不同振动源强的计算方法获得的源强样本平均值与样本总体的平均值基本一致,且随着抽取样本数量的增加,计算获得的源强样本标准差降低,振动源强的计算结果越来越接近全天测试数据的平均值。

由于车轮不平顺等随机因素,测试结果本身具有较强的离散性。随着计算选取样本数的增加,若采用测试样本总体的平均值代表振动源强,会导致源强取值结果低于真实源强水平的概率接近50%,且在2个测试断面样本均值与测试样本总体的最大值相差达到8~10dB,甚至更高。若以此计算结果作为输入条件进行环境振动响应预测,将无法体现真实的振动源强。

结合图6,8可知,由于早、晚高峰时段与平常时

段的振动源强并无明显放大,因此文献[8]中规定高峰时段测试数据作为样本总体与全天作为测试数据作为样本总体得到的模拟计算结果并无明显差异。

3.2 1/3倍频程谱

VL_z 的离散性与振动加速度级(vibration acceleration level, 简称VAL)1/3倍频程谱各个中心频率处的分频振级直接相关。图9分别给出了2个测试断面全天所有测试样本的振动加速度级1/3倍频程谱。各中心频率处的统计指标为平均值与标准差。由于不同频段的控制因素不同,因此体现出不同的离散状态,31.5~160 Hz频段内部分中心频率处,不同测试样本加速度级相差甚至超过20 dB。

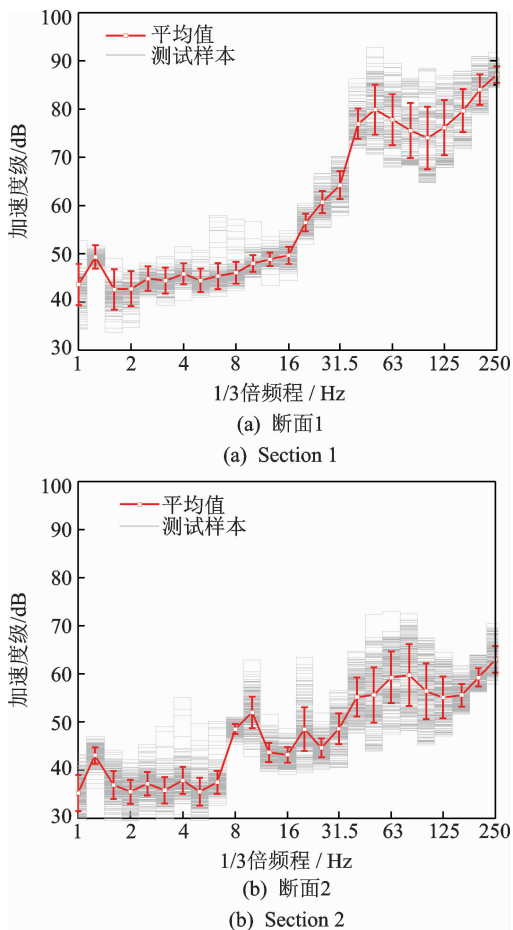


图9 测试断面全天通过列车振动加速度级1/3倍频程谱
Fig. 9 VAL of all the trains passing through the test section in whole day of 1/3 octave spectrum

结合图7,选择 $T_1 \sim T_3$ 3个典型循环内可以反映 VL_z 离散范围的3列典型列车($F_1 \sim F_3$)的1/3倍频程谱进行对比分析,如图10所示。

测试区间内运营车速约为70 km/h,车轮半径约为0.42 m,即不同列车车轮不圆顺的差异会对

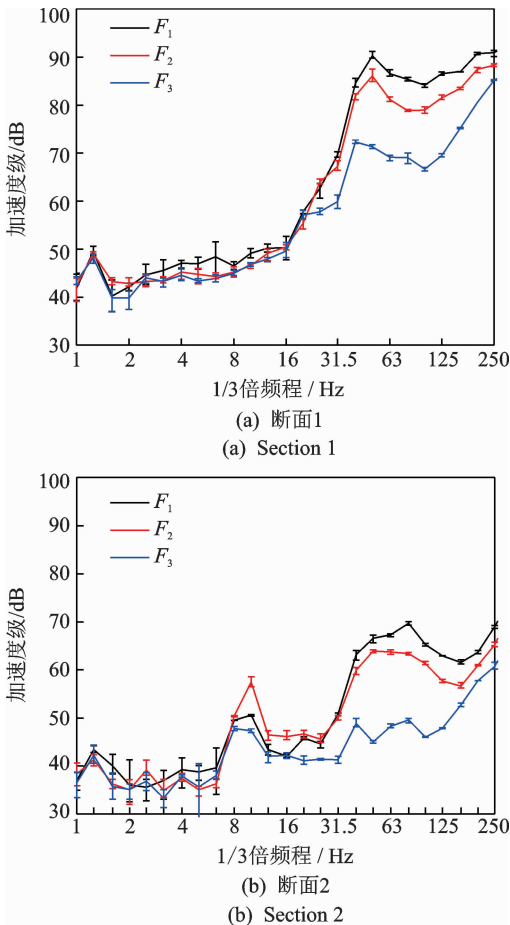


图 10 3 列典型列车对应的 1/3 倍频程谱
Fig. 10 1/3 octave spectrum of 3 typical trains

8 Hz 以上频段的振动产生影响。如图 10 所示,同一列车 8~250 Hz 频段内各中心频率处的加速度级均离散较小,分频最大与最小加速度级差值不超过 2 dB,该频段的振动响应与该运营速度下,车轮 1~34 阶多边形磨耗直接相关;6.3 Hz 以下频段,各中心频率处的离散较为明显,分频最大与最小加速度级差值超过 5 dB。

在 16~250 Hz 频段内,不同列车引起的振动离散程度先增加后减小,该频段的振动会引发建筑物楼板和墙体振动进而引发二次辐射噪声^[15]。在 31.5 Hz 以上频段,3 列典型列车的分频振动加速度级 $VAL(f_i, F_1) < VAL(f_i, F_2) < VAL(f_i, F_3)$,与 VL_z 的大小规律相同。在小于 6.3 Hz 的各个中心频率处,3 列列车的加速度级离散程度基本一致。

可见,对于同一列车多次通过引起的振动响应,其 VL_z 的差异主要源于 6.3 Hz 以下各个中心频率处的振动离散,该频段的振动响应由列车的准静态激励控制^[15]。准静态激励是由移动的车辆轮轴荷

载引起的,与车辆的总载重成比例,不同的载重会导致振动响应相差较大。此外,车体的整体“沉浮”及“点头”模态与垂向振动响应直接相关。增加载重相当于增加了车体质量,使得自振频率降低,同样也会导致振动响应的改变。不同车辆间 VL_z 的差异由 20~80 Hz 频段内的振动响应控制,该频段内分频振动加速度级差异最大接近 20 dB。因此,车轮不圆顺的差异直接导致了全天内不同列车通过的振动源强显著离散。

4 结 论

1) 所有断面的振动源强均表现为较强的离散性,离散最大的甚至超过 15 dB,同时各个测试断面的数据均表明在早高峰(7:00~9:00)、晚高峰(17:00~19:00)时段,振动源强并没有显著增大,因此列车运量的变化对振动源强的影响并不明显。

2) 3 种不同振动源强的计算方法获得的源强样本的平均值与全天所有测试数据的平均值基本一致,且随着计算抽取样本数量的增加,计算获得的源强样本的标准差显著减小。

3) 同一列车多次通过引起的振动响应的差异主要受 6.3 Hz 以下频段的离散性影响,该频段的振动响应主要源于列车的准静态激励,与列车的载重直接相关。

4) 不同列车在 8~250 Hz 频段内的振动响应由车轮不圆顺状态差异性控制,该频段内分频振动加速度级差异最大接近 20 dB,直接导致全天内不同列车通过的振动源强显著离散。

参 考 文 献

[1] 孙晓静. 地铁列车振动对环境影响的预测研究及减振措施分析[D]. 北京:北京交通大学, 2008.
 [2] 姜博龙, 刘维宁, 马蒙, 等. 基于带隙性能评价函数的特征频段隔振周期排桩选型[J]. 中国铁道科学, 2018, 39(6):31-38.
 JIANG Bolong, LIU Weining, MA Meng, et al. Selection of periodic piles for vibration isolation of characteristic frequency based on performance evaluation function of band gap [J]. China Railway Science, 2018, 39(6):31-38. (in Chinese)
 [3] 姜博龙, 刘维宁, 马蒙, 等. 基于 Bloch-Floquet 理论的周期性波屏障在轨道交通传播路径隔振中的应用研究[J]. 铁道学报, 2018, 40(3):146-152.

- JIANG Bolong, LIU Weining, MA Meng, et al. Study on the application of periodic pile in vibration isolation of rail transit based on Bloch-Floquet theory[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(3): 146-152. (in Chinese)
- [4] TALBOT J P, HUNT H. A generic model for evaluating the performance of base-isolated buildings [J]. Noise Notes, 2003, 22(4):13-24.
- [5] 刘力, 王文斌, 陈曦, 等. 城市轨道交通运营引起建筑物内振动超标治理研究[J]. 铁道标准设计, 2015, 59(8):150-155.
- LIU Li, WANG Wenbin, CHEN Xi, et al. Study on excessive vibration in buildings caused by urban rail transit[J]. Railway Standard Design, 2015, 59(8): 150-155. (in Chinese)
- [6] 孙家麒. 城市轨道交通振动和噪声控制简明手册[M]. 北京:中国科学出版社, 2002:54-56.
- [7] 北京市质量技术监督局. DB11/T 838—2019 地铁噪声与振动控制规范[S].
- [8] 生态环境部. HJ453-2018 环境影响评价技术导则—城市轨道交通[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2018.
- [9] 户文成, 俞泉瑜, 王另的, 等. 轴重与速度对地铁洞壁振级的影响分析[C]//全国声学设计与噪声振动控制工程暨配套装备学术会议. 上海:《噪声与振动控制》编辑部, 2010:169-171.
- [10] 李宪同, 张斌, 户文成, 等. 北京地铁环境振动预测中源强选取的研究[J]. 城市轨道交通研究, 2012, 15(8):80-83.
- LI Xiantong, ZHANG Bin, HU Wencheng, et al. Selection of vibration source position in environment vibration forecast of Beijing metro [J]. Urban Mass Transit Urban Mass Trans, 2012, 15(8): 80-83. (in Chinese)
- [11] 温士明, 李伟, 朱强强, 等. 地铁车轮多边形磨损对浮置板轨道振动特性的影响[J]. 噪声与振动控制, 2018, 38(4):122-128.
- WEN Shiming, LI Wei, ZHU Qiangqiang, et al. Influence of polygonal wear of metro wheels on vibration characteristics of floating slab tracks [J]. Noise and Vibration Control, 2018, 38(4): 122-128. (in Chinese)
- [12] 李磊, 张斌, 户文成, 等. 地铁振动测试中谱图异常现象的力学根源分析[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(5):802-805.
- LI Lei, ZHANG Bin, HU Wencheng, et al. Mechanics analysis on abnormal phenomenon of power spectral in situ experiments [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(5):802-805. (in Chinese)
- [13] 马蒙, 刘维宁, 王文斌, 等. 考虑持续时间因素的铁路环境振动影响评价[J]. 振动与冲击, 2016, 35(10):207-211.
- MA Meng, LIU Weining, WANG Wenbin, et al. Evaluation of train-induced environmental vibrations considering the factor of exposure time [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(10):207-211. (in Chinese)
- [14] 北京市质量技术监督局. DB11/T 838—2011 地铁噪声与振动控制规范[S].
- [15] THOMPSON D. Railway noise and vibration: mechanisms, modelling, and means of control[M]. Oxford: Elsevier, 2009:416-417.



第一作者简介:李明航,男,1991年12月生,博士生。主要研究方向为地铁列车引起的环境振动预测。曾发表《Influence of static preload on vibration reduction effect of floating slab tracks》(《Journal of Vibration and Control》2019, Vol. 25, No. 6)等论文。
E-mail:17115295@bjtu.edu.cn

通信作者简介:马蒙,男,1983年5月生,副教授。主要研究方向为轨道交通环境振动。
E-mail:mameng_02231250@163.com

