

苏州轨道交通1号线地面振动测试与分析

侯 晋¹ 李 双^{1#} 袁国清² 蒋伟康²

(1. 苏州大学城市轨道交通学院, 江苏 苏州 215131; 2. 上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240)

摘要 为分析苏州轨道交通1号线的开通运行对线路周边的振动环境产生的影响,采用高灵敏度加速度传感器,测试了各种工况下特征断面的地面振动响应。在时域和频域内,比较分析了列车速度、轨道埋深、距离及周边环境对轨道交通引起的地面振动的影响。结果表明,列车通过时传递到地面振动能量主要集中在50~80 Hz,在1/3倍频程分析中,63 Hz频段的振动最为明显;随着测点距轨道中心线距离的增加,列车通过引起的地面振动逐渐衰减,本次测试中,不同工况的测量断面下,地面振动平均振级均低于《城市区域环境振动标准》(GB 10070—88)规定的限值。

关键词 城市轨道交通 现场振动测试 频谱分析

The ground vibration measurement and analysis of Suzhou rail transit line one HOU Jin¹, LI Shuang¹, YUAN Guoqing², JIANG Weikang². (1. School of Urban Rail Transportation, Soochow University, Suzhou Jiangsu 215131; 2. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract: In order to study the effect of the operation of Suzhou rail transit line one on the environment vibration, high sensitivity acceleration sensors were used to test the ground vibration response of the characteristic sections in various working conditions. In the time and frequency domain, the influence of train speed, track depth, distance and surrounding environment on ground vibration were compared. The results showed that the ground vibration energy during the train pass-by was concentrated in the 50-80 Hz; 63 Hz center frequency range was the most obvious in one-third octave analysis. Ground vibration caused by train pass-by was attenuated gradually with the increasing of test distance. In this test, the ground average vibration level under different conditions of selected section was lower than the limited value of urban regional environmental vibration standard (GB 10070-88).

Keywords: urban rail transit; field vibration test; spectrum analysis

现场测试是研究地铁振动的重要方法之一,其测试成果可为地铁振动的理论分析提供根据、验证理论模型的正确性和评估地铁诱发的环境振动水平。近年来,国内学者针对各个城市地铁运营引起的隧道、地面、建筑物振动进行了测试分析,取得了一定的成果。

李克飞等^[1]通过对北京地铁5号线地下减振措施进行现场测试,在时域和频域内比较了各测试断面钢轨、道床和隧道壁的竖向振动加速度,分析了不同措施的减振效果。栗润德等^[2]采用高灵敏度加速度传感器,对北京地铁1号线东单—建国门区间的运营地铁进行了现场测试,得出了环境背景振动、公交车等地面车辆和地铁的地面振动响应规律。楼梦麟等^[3]通过对上海某地铁线路区段的振动实测,分析了地铁引起的地面振动特性和衰减规律,证明地铁列车运行引起的地面振动在衰减过程中存在回升区。徐忠根等^[4]通过对广州地铁1号线沿线地上66

个截面、地下10个截面的振动测试,针对不同的隧道截面形状提出地表振动传播公式。

虽然文献中已有大量有关地铁振动测量研究,但地铁引起的振动与工程本身和地质条件等当地情况密切相关,继续开展针对性的本地调查、测量等研究,对于指导路线两侧的环境管理、工程设计和采取影响防治措施以及复核原有环境影响评价的预测等仍然具有重要价值。

苏州轨道交通1号线已于2012年4月底试运营,全长25.739 km,全线共设24个车站,全部为地下车站;全线选用B型车,4节编组,最高速度80 km/h,运行速度60 km/h;轨道轨距1 435 mm,采用60 kg/m钢轨;正线采用DTⅢ型扣件,减振地段采用Ⅲ型减振器扣件;轨下基础一般地段采用长轨枕式整体道床,减振地段采用短轨枕式整体道床。

为评价苏州轨道交通1号线引起的地面环境振动对市民生活的影响,探索地面振动在列车不同工

第一作者:侯 晋,男,1985年生,硕士研究生,研究方向为噪声与振动控制。* 通讯作者。

况下的衰减规律,为今后的轨道减振设计提供准确的预测数据和经验依据,本研究对苏州轨道交通 1 号线地面典型断面进行了现场振动测试。在时域和频域内对比各测试断面的地面垂直振动加速度,考察垂直振动加速度随着轨道埋深、列车速度、距离等影响的衰减规律。

1 测试仪器和测点布置

试验仪器采用高灵敏度加速度传感器及 Müller BBM 振动噪声测试分析系统。该系统具有单通道 16/24 位精度,204.8 kHz 的采样率,50 M 时钟频率,1 000 k 脉冲采样率,测试时通过强力胶将传感器黏贴于测点表面。

分别对浅埋深路段(中央公园路段)以及深埋深路段(捷嘉电子路段)进行了现场振动测试,两个路段环境背景影响均较小,其中捷嘉电子路段为加速度路段。为比较环境背景对地铁振动的影响,另选择环境背景影响较大路段(滨河花苑路段和何山花园路段)进行现场振动测试。中央公园路段和捷嘉电子路段的测试断面示意图分别见图 1、图 2。

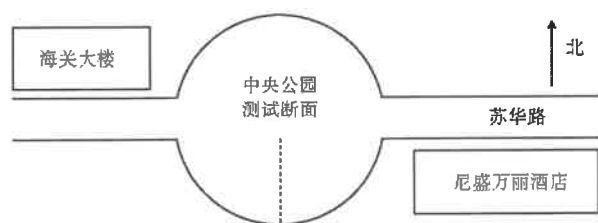


图 1 中央公园测试断面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the Central Park test section

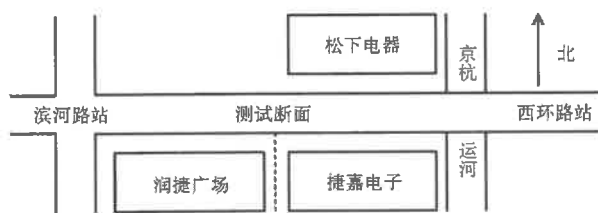


图 2 捷嘉电子测试断面示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Jiejiadianzi test section

2 测试结果分析

2.1 时域分析

现场测试中,采用连续采样的方式,在每个测试断面连续记录 1 600 s 的振动加速度信号。采集有效振动信号的同时,可以在两班列车通过之间的时段得到非轨道交通列车引起的环境背景振动信号。对其中环境干扰比较稳定的数据段进行分析。为消除采集数据中噪声及其他高频振动的干扰,数据处理前采用小波降噪滤波处理。

以中央公园测试断面为例,分析振动时域特性。现场测量时间为 16:30,同向列车通过的车次间隔在 6~9 min,测试中布置了 5 个测点进行同步采样,其中 0、10、40 m 测点的时域信号如图 3 所示,列车通过时间段记录见表 1。

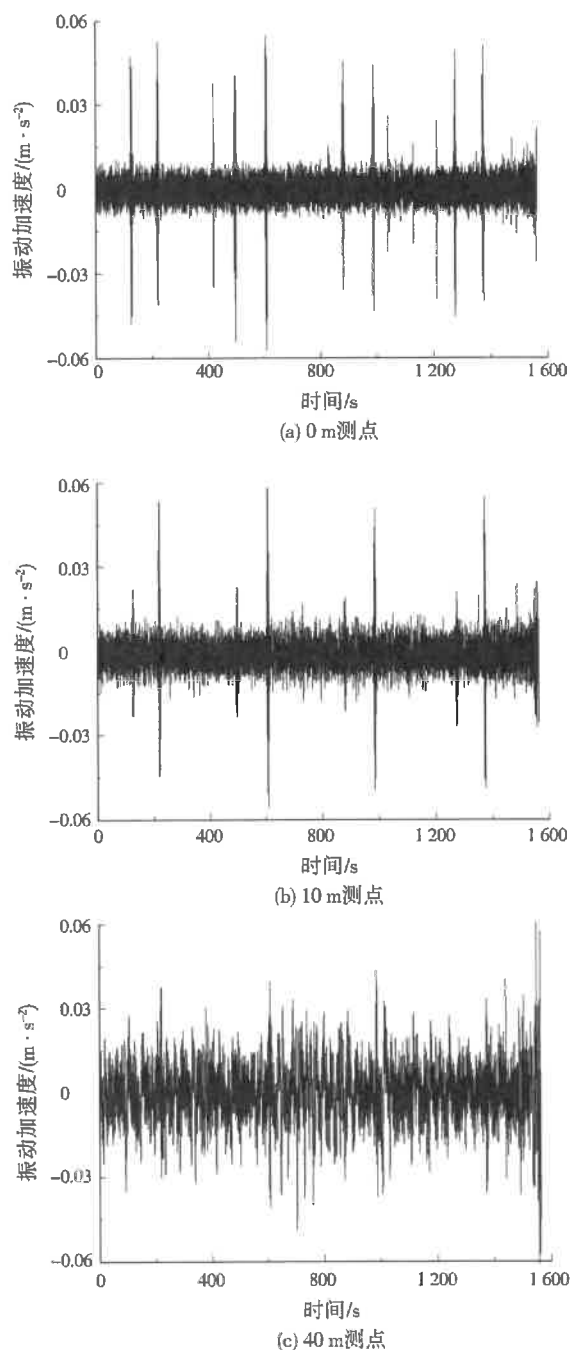


图 3 中央公园断面测点振动时域图

Fig. 3 The time-domain figure of vibration in Central Park test section

通过对时域信号的观察分析可以得到以下结论:

(1) 列车通过信号为双向,上行下行交替出现;结合苏州轨道交通公司提供的隧道走向图进行分析,单号车次是下行(距离测点较远),双号车次是上

表 1 中央公园列车通过时间段
Table 1 The time of train passed through Central Park test section

序号	1	2	3	4	5	6	7	8
时间/s	123~128	216~221	494~499	605~610	877~882	984~989	1 272~1 277	1 371~1 376

行(距离测点较近);上下行隧道间距为 10 m。

(2) 列车通过引起的地面振动随测点距离增加而衰减。在 40 m 测点处,列车通过时引发的地面振动已不明显,在数值上与环境振动同属于一数量级。

(3) 试验采取的是连续采样的方式,因此在采集有效振动信号的同时,也可以在两班列车通过之间的时段得到环境振动信号。从时域信号来看,在 250~400 s 时的加速度信号比较平稳,幅值均在 0.02 m/s^2 以内,远小于列车通过时的均值,可以作为环境振动噪声。

2.2 频域分析

对中央公园测试断面第 4 辆列车通过时 5 m 测点的时域数据进行分析。测试的采样频率为 2 048 Hz,有效分析频率为 800 Hz。为得到全面的频域特性,主要采用的分析方法有 pwelch 法功率谱密度估计、1/3 倍频程分析以及傅立叶变换(STFT)时频融合分析。

观察列车通过时的时程图(见图 4)、频域图(见图 5)可知:

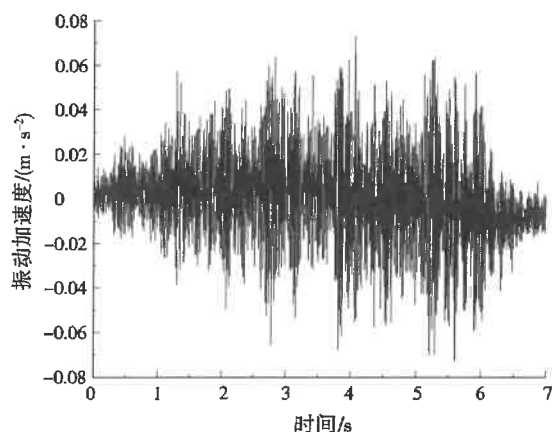


图 4 列车通过时的时程图

Fig. 4 The time-domain figure during the train pass-by

(1) 在测量时间段内,列车通过的时间为 6~7 s,地面振动能量主要集中在 200 Hz 以下,特别是在 50~80 Hz。

(2) 地面振动加速度数量级为 $0.01 \sim 0.10 \text{ m/s}^2$,最大振动加速度幅值为 0.071 m/s^2 。

从 1/3 倍频程图(见图 6)可以看出,63 Hz 频带的地面振动能量最强,与文献[2]中的研究结果相吻合。从 STFT 时频融合图(见图 7)中可以清晰地观察到列车通过时各个时间段内不同频域内的能量变

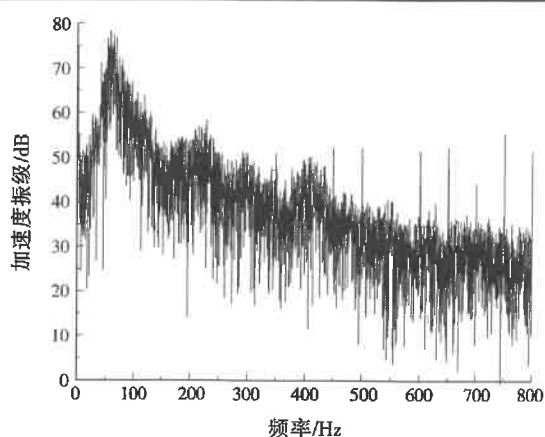


图 5 列车通过时的频域图

Fig. 5 The frequency-domain figure during the train pass-by

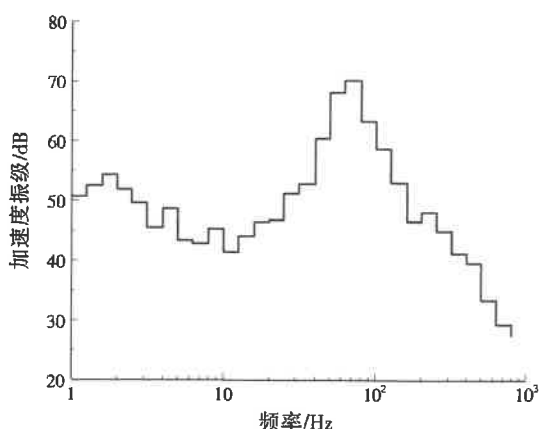


图 6 列车通过时的 1/3 倍频程图

Fig. 6 The figure of one-third octave analysis

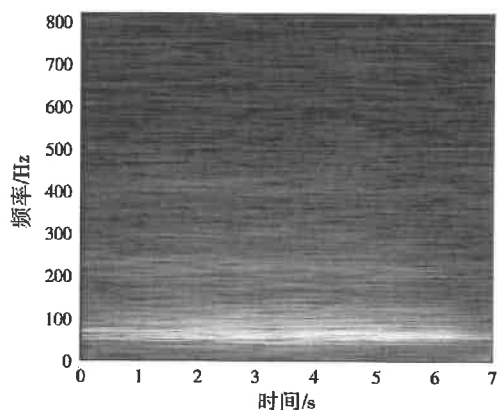


图 7 列车通过时的 STFT 时频融合图

Fig. 7 The STFT figure during the train pass-by

化,能量峰值位于 50~80 Hz,与频谱分析相同;时频融合图进一步证明了地面 50~80 Hz 振动确由列车通过所引起。

由图 8、图 9 可见,环境振动能量的分布较为平均,振动加速度的幅值总体在 0.02 m/s^2 以内,在

0~800 Hz 的分析频率段,加速度振级总体在 25~35 dB 波动。(注:图 9 中每个 50 Hz 的倍频上存在的尖峰,系由仪器的工作频率造成)。

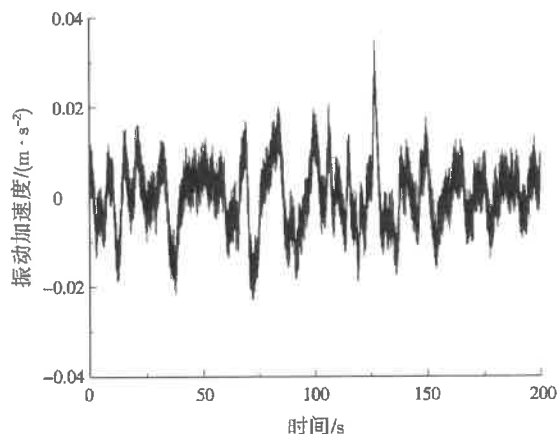


图 8 环境振动时程图

Fig. 8 The time-domain figure of environment vibration

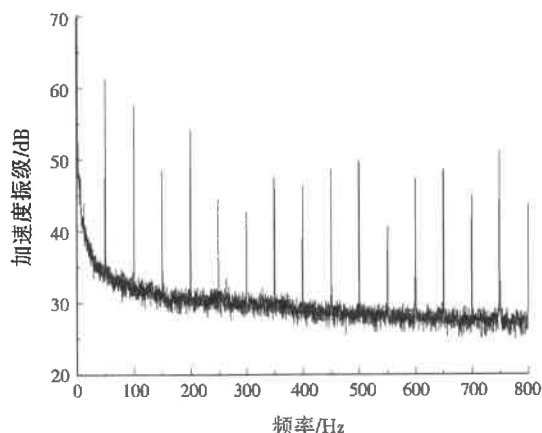


图 9 环境振动频域图

Fig. 9 The frequency-domain figure of environment vibration

3 Z 振级分析

根据国际《人体全身振动暴露的评价标准》(ISO 2631/1—1985),全身振动 Z 计权因子修正后得到的振动加速度级称为 Z 振级^[5],单位为分贝 (dB)。

在城市轨道交通与铁路振动评价量方面,主要是以 Z 计权最大振级 VL_{Zmax} 和累积百分比振级 VL_{Z10} 为主。环境振动采用线性平均振级 VL_Z 、最大振级 VL_{Zmax} 和无规振动中的累积百分比振级 VL_{Z10} 作为评价量,时间计权为 1 s。由于列车的车次间隔(约 6 min)远大于列车通过时间(低于 7 s),列车通过时段不适合采用累积百分比振级 VL_{Z10} 作为评价量,遂采用列车通过时段的最大振级 VL_{Zmax} 作为评价量。以中央公园路段为例,各测点环境振动及列车通过时段振动测试结果分别见表 2、表 3。

表 2 中央公园环境振动 Z 计权评价量

Table 2 The Z weighting evaluation environment vibration in the Central Park dB

测点距离轨道 中心距离/m	0	5	10	20	40
平均振级 VL_Z	61.0	58.9	61.0	60.4	61.3
最大振级 VL_{Zmax}	63.2	61.8	63.4	63.5	63.5
累积百分比振级 VL_{Z10}	62.3	60.3	62.3	61.9	62.5

表 3 中央公园路面列车通过时段各测点的
平均振级 VL_Z 和最大振级 VL_{Zmax}

Table 3 The average vibration level and max vibration level of Central Park section during the train pass-by dB

测点距离轨道 中心距离/m		0	5	10	20	40
平均振级 VL_Z	上行	71.0	70.6	66.6	62.2	64.3
	下行	70.1	74.3	71.0	64.2	67.8
最大振级 VL_{Zmax}	上行	72.7	72.6	67.9	63.1	65.0
	下行	72.1	76.3	73.1	66.5	70.5

由表 2 和表 3 可见:

(1) 各测点平均振级小于 75 dB,符合《城市区域环境振动标准》(GB 10070—88)^[6]中对于白天环境振动的要求。

(2) 列车通过时,0 m 测点上行振级比下行振级大,这主要是因为 0 m 测点并不在单侧列车轨道中心,而是偏向于另外一侧。

需要说明的是,40 m 测点的最大振级大于 20 m 测点,这是因为 40 m 测点布置在地面上,测试数据正常;而 20 m 测点布置在看台的台阶上,导致测试数据偏小。

4 对比分析

本次试验共选取 4 个断面进行测试分析,对 4 个断面的测试工况进行对比(见表 4),分析轨道埋深、列车速度等因素对地面振动的影响。

表 4 测试断面工况分析

Table 4 The conditions of test sections

项目	中央公园	捷嘉电子	何山花园	滨河花苑
轨道埋深	浅	深	深	深
列车速度	高速	加速	高速	加速
环境振动	小	小	大	大
载客量	多	少	多	少

4.1 环境振动

中央公园、捷嘉电子测试断面的环境振动较小,测试振动数据也较为准确;而何山花园和滨河花苑路段,因环境振动过大导致无法从测得信号中分辨出列车通过时的有效信号。由此得出结论,在人流、车流较大的环境下,环境振动过大,淹没了列车通过时带来的地面振动,列车给地面带来的振动影响较小。

4.2 测试距离

在不同测试距离下,中央公园、捷嘉电子测试断面的路面振级变化见图10。

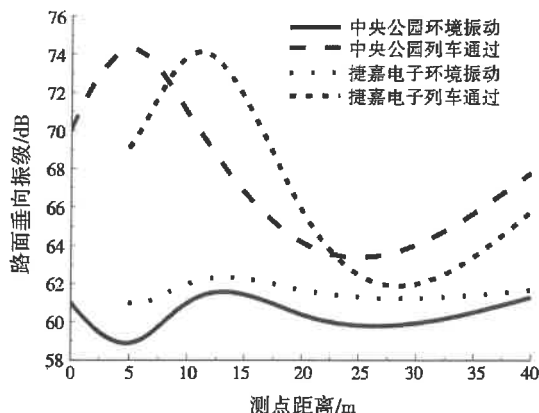


图10 中央公园、捷嘉电子路面振级衰减对比

Fig. 10 The compare figure of ground vibration attenuation of Central Park and Jiejiadianzi sections

由图10可见,中央公园、捷嘉电子的路面振动总体上随测试距离的延长而衰减,趋势也较为相似。在10 m测点内,列车通过时的平均振动级比环境振动高8~16 dB,在20 m测点与40 m测点之间,列车通过时的平均振动级仅比环境振动高1~6 dB,且在区段内存在一个振动回升区,这与文献[3]中的研究结论吻合。因此,在环境振动较小的情况下,列车通过时给地面带来的振动在20 m以内是较为明显的,但数值上仍然控制在GB 10070—88允许的环境振动范围内;而在40 m测点以外,列车通过给地面带来的振动几乎可以忽略不计。

4.3 轨道埋深、列车速度、载客量

中央公园、捷嘉电子测试断面在列车通过时的时域图及1/3倍频程图分别见图11、图12。

对比轨道埋深、列车速度及载客量对地面振动的综合影响,从时域信号来看(见图11),捷嘉电子断面轨道埋深较大,相对于中央公园断面振动信号更为清晰,尖峰更为明显,原因是更厚的土层衰减了更多的地面振动。中央公园断面更大的载客量和列车速度也激起了隧道-土壤耦合系统的高阶模态,引起了更为复杂的混合振动。同时,由于中央公园断面轨道埋深较小,总体振动加速度峰值则略高于捷嘉电子。

两个断面地面振动的1/3倍频程图(见图12)的趋势在100 Hz以内基本吻合;而在高于100 Hz的频段,捷嘉电子的加速度振级明显低于中央公园,反映了土层对高频信号的衰减作用。

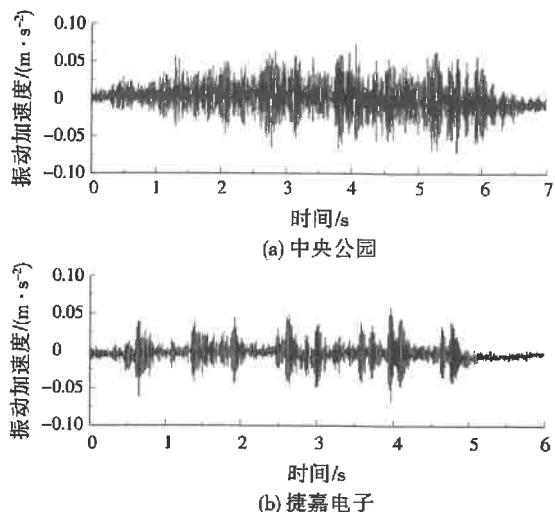


图11 中央公园、捷嘉电子列车通过时的时域图

Fig. 11 The time-domain figure of the Central Park and Jiejiadianzi sections during the train pass-by

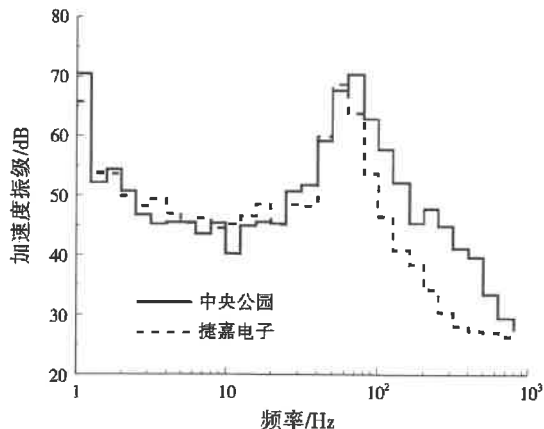


图12 中央公园、捷嘉电子列车通过时的1/3倍频程图

Fig. 12 The one-third octave analysis of Central Park and Jiejiadianzi sections

5 结论

(1) 环境振动对列车通过时的地面振动有一定影响。在人流、车流较大的环境下,环境振动过大,淹没了列车通过时带来的地面振动,列车给地面带来的振动影响较小。

(2) 通过观察频域图、1/3倍频程图和STFT时频融合图,列车通过时传递到地面振动能量主要集中在50~80 Hz。从列车通过时段Z振级计权1/3倍频程图中可以看出,高于80 Hz之后的频段幅值急剧减小。

(3) 随着测点距轨道中心线距离的增加,地面振动呈衰减趋势。在10 m测点以内,列车通过时的平均振动级比环境振动高8~16 dB;而20 m测点与40 m测点之间,列车通过时的平均振动级比环境振动只高出1~6 dB。

(下转第92页)

