

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.03.003



高速铁路周边建筑物环境振动现场测试与分析

王祥秋, 张火军, 谢文玺

(佛山科学技术学院 交通与土木建筑学院, 广东 佛山 528000)

摘要:对高速铁路列车引起的周边建筑物与地面环境振动响应进行现场测试,利用频谱分析方法研究高速列车引起的周边地面与建筑物环境振动特性,结合城市铁路振动控制标准对高铁环境振动影响进行分析与评价。研究表明:时速 270 km/h 的高速列车产生的环境振动频率主要集中在 25~60 Hz 范围内;建筑物垂直振动大于水平振动,建筑物铅垂 Z 振级最高可达 70.62 dB,建筑物二次振动具有明显的高度放大效应,建筑物顶层铅垂 Z 振级约为室内地面的 1.094 倍;周边地面振动明显大于建筑物振动,但两者表现出相似的变化规律,周边地面分频振级最高可达 92.0 dB,而建筑物分频振级最大值仅为 80 dB;高速铁路环境噪声值高达 92.8 dB,超过城市环境噪声重度污染标准。高速铁路产生的环境噪声污染远大于环境振动影响,须采取相应的隔声降噪措施,以重点控制高速铁路环境噪声污染。

关键词:高速铁路;现场测试;环境振动;频谱分析

中图分类号:U213.313 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2018)03-0016-07

Field test and analysis of the environmental vibration characteristics of building nearby the high speed railway

Wang Xiangqiu, Zhang Huojun, Xie Wenxi

(School of Transportation and Civil Engineering & Architecture, Foshan University, Foshan 528000, Guangdong, P. R. China)

Abstract: The in-situ test was carried out for the environmental vibration response of the surrounding buildings and the ground caused by high speed railway trains, the spectrum analysis method was used to study vibration characteristics of the surrounding buildings and ground. The environmental vibration levels of high speed railway was analyzed and evaluated in combination with the vibration control standard of urban railway. The results of study show that the environmental vibration frequency caused by the 270 km/h high-speed trains is mainly concentrated on the range of 25~60 Hz. The vertical vibration of building is larger than the horizontal vibration, the maximum of Z-level of vertical vibration is 70.62 dB. The second vibration in the building has a obvious height amplification effect, the maximum Z-level of vertical vibration on the top floor of the building is about 1.094 times of that on the first layer. The ground vibration is obviously larger than that of the surrounding buildings, but the similar changing law is shown between the ground and the building, the maximum of vibration level of division frequency on the ground can up to 92 dB, but the maximum of vibration level of division frequency on the buildings can only up to 80 dB. The

收稿日期:2017-02-15

基金项目:国家自然科学基金(51278121);广东省特色创新重点项目(2014KTSCX155)

作者简介:王祥秋(1968-),男,教授,博士,主要从事岩土工程与地下结构研究,E-mail:tongji_wxq@163.com.

Received:2017-02-15

Foundation item:National Natural Science Foundation of China (No. 51278121); Key Project of Characteristic Innovation of Guangdong Province(No. 2014KTSCX155)

Author brief:Wang Xiangqiu (1968-), professor, PhD, main research interests: geotechnical and underground structures, E-mail: tongji_wxq@163.com.

environmental noise of high speed railway is up to 92.8 dB, more than the severe pollution standards of city environmental noise. Environmental noise pollution caused by high speed railway is greater than the impact of environmental vibration, the corresponding noise reduction and sound insulation measures should be adopted to effectively control the level of environmental noise.

Keywords: high speed railway; in-situ test; environmental vibration; spectrum analysis

中国高速铁路发展速度与应用技术水平已处于世界领先地位,相关领域的专家学者针对普通铁路或地铁振动问题开展过较为深入的研究,积累了较丰富的研究工作经验^[1-3],但针对高速铁路(时速达到250 km以上)环境振动影响特性,特别是基于高速铁路现场测试成果对城区周边建筑物环境影响的研究还比较少。

瑞典和比利时铁路部门^[4-5],通过现场实测着重分析了列车高速行驶对铁路振动的影响,并观测到高速列车以临界速度行驶时引起的轨道和大地强振动现象。美国联邦铁路运输部门^[6]综合考虑铁路环境振动源、振动传播路径和被振动体等各方面影响因素,提出了高速铁路噪声和振动预测评估方法。Connolly等^[7-8]、Marshall等^[9]通过对德国柏林以及横跨欧洲7国的高速铁路环境振动进行现场测试与分析,基于频谱分析获得了高速铁路环境振动响应特性。Okamoto等^[10]通过现场测试得出时速350与250 km/h高速铁路的环境振动频率主要集中在40和25 Hz左右的结论。高广运等^[11]对秦沈客运专线、马利衡等^[12]对沪宁高速铁路,贺玉龙等^[13]、张光明等^[14]、马莉等^[15]、郑亚玮等^[16]对京津城际铁路、武广高速铁路等的环境振动做了探索性研究工作,取得了一定的研究成果。但目前针对高速铁路环境振动对周边建筑物影响的现场测试研究与理论研究还比较少,尚须进一步深入开展相关研究。为此,以武广高速铁路位于广州市区某沿线建筑物为研究对象,通过现场测试分析高速铁路诱发周边地面及建筑物环境的振动特性。

1 现场测试

1.1 测试地点概况

现场测试地点位于广州市区金沙洲隧道往广州南站方向的出口处,被测建筑物为3层框架结构住宅楼,建筑物平面如图1所示。被测建筑物属现浇混凝土框架结构,墙体厚度200 mm,采用高强混凝土管桩基础,建筑物平面尺寸为11.66 m×11.63 m,建筑高度14.05 m,房屋结构状况良好,未发现结构性裂缝;建筑物室外地坪为水泥硬化地面,建筑物外墙至高速铁路轨道边缘直线距离约为18.2 m,测试段高速铁路线路底部采用整体式无砟轨道结构,建筑物与高速铁路线路之间用一道混凝土围墙和一

道安全铁丝网分隔。

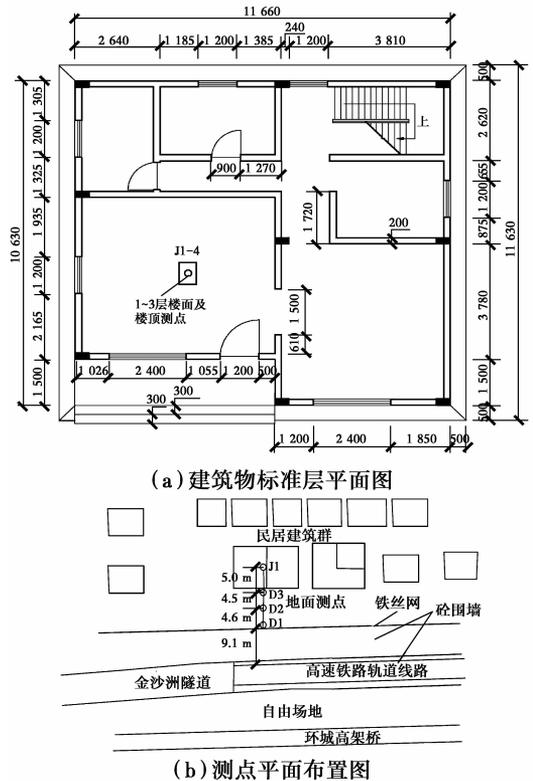


图1 建筑物与测点位置图

Fig. 1 Position of building and measuring points

根据现场测试条件确定测点的具体布设方案如图1所示,其中:J1~J4号测点分别布置于建筑物室内1层地面以及2层、3层与顶层平面开间尺寸最大房间的正中央,每个测点布设3个传感器,分别沿高铁线路行进方向(y方向)、垂直于高铁线路行进方向(x方向)以及垂直于楼面方向(z方向);D1~D3号测点布置于建筑物与高速铁路之间的水泥地面上,每个测点布设2个传感器,分别垂直于高铁线路行进方向(x方向)和垂直于地面水平方向(z方向)布设,埋设过程中采用牙膏作为传感器与地面之间的耦合剂,测试试验结果证明,其耦合效果良好。

1.2 测试仪器与设备

现场测试采用DH5922N型动态信号测试分析系统,拾振器选用专门用于环境微振动测试的DH610H磁电式三向多功能传感器,该类传感器采用无源闭环伺服技术,具有良好的超低频特性。测试之前,确保建筑物室外地面所有传感器与动态信号采集

系统良好连接,并将全部传感器调试至加速度档;测试采用连续采样方式,同步采集建筑物以及地面 7 个测点的振动信号,采样频率为 1 000 Hz;加速度传感器现场布设及测试试验情况如图 2 所示。

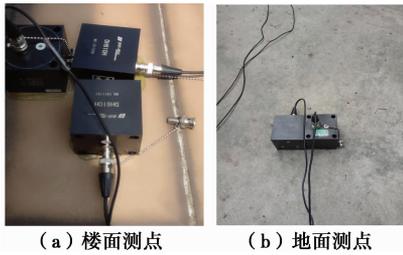


图 2 传感器布设

Fig. 2 Placement of sensor

2 时频特征分析

现场测试试验共采集了 10 趟高速列车振动信号(加速度统计信息如表 1 所示),通过对比分析发现,各次列车通过测试区间所产生的振动信号具有很高的相似性。仅选取其中一趟列车的振动测试数据分析研究高速列车环境振动特性,该趟列车由广州南站开往武汉,运行速度 $v=265.8$ km/h,车辆型号为 CRH3 型,编组为 8 节车厢,平均轴距 12.5 m,通过分析得到建筑物与地面各测点加速度时程曲线及对应的频域能量谱密度如图 3~图 4 所示。

表 1 高速铁路环境振动加速度幅值统计表

Table 1 acceleration amplitude of environmental vibration for high speed railway

第 1 趟($v=256.7$ km/h)					第 2 趟($v=260.2$ km/h)				
测点号	水平加速度/($m \cdot s^{-2}$)		竖直加速度/($m \cdot s^{-2}$)		测点号	水平加速度/($m \cdot s^{-2}$)		竖直加速度/($m \cdot s^{-2}$)	
	均值	方差/ 10^{-6}	均值	方差/ 10^{-6}		均值	方差/ 10^{-6}	均值	方差/ 10^{-6}
1	0.008 4	4.12	0.024 0	36.2	1	0.006 6	4.20	0.030 0	36.2
2	0.006 6	4.10	0.021 6	81.2	2	0.007 8	4.20	0.019 2	81.0
3	0.002 4	1.30	0.008 4	16.1	3	0.002 4	1.30	0.011 4	16.0
4	0.001 8	1.20	0.002 4	1.30	4	0.001 8	1.40	0.003 0	1.00
5	0.004 2	1.00	0.003 0	4.00	5	0.003 0	1.30	0.004 2	4.30
6	0.001 8	1.40	0.004 2	4.30	6	0.003 0	1.40	0.004 8	4.00
7	0.004 2	4.00	0.007 8	9.00	7	0.004 2	4.30	0.006 6	9.30
第 3 趟($v=258.5$ km/h)					第 4 趟($v=260.6$ km/h)				
测点号	水平加速度/($m \cdot s^{-2}$)		竖直加速度/($m \cdot s^{-2}$)		测点号	水平加速度/($m \cdot s^{-2}$)		竖直加速度/($m \cdot s^{-2}$)	
	均值	方差/ 10^{-6}	均值	方差/ 10^{-6}		均值	方差/ 10^{-6}	均值	方差/ 10^{-6}
1	0.006 0	4.23	0.018 0	36.4	1	0.006 0	4.00	0.024 0	36.3
2	0.006 0	4.00	0.020 4	81.4	2	0.006 6	4.30	0.024 6	81.0
3	0.003 0	1.00	0.008 4	16.4	3	0.003 0	1.20	0.007 8	16.0
4	0.001 8	1.30	0.001 8	1.00	4	0.001 8	1.20	0.002 4	1.00
5	0.003 0	1.30	0.003 0	4.20	5	0.001 8	1.30	0.003 0	4.00
6	0.003 0	1.30	0.004 8	4.30	6	0.001 8	1.30	0.005 4	4.00
7	0.004 2	4.00	0.005 4	9.00	7	0.004 2	4.10	0.005 4	9.20
第 5 趟($v=256.9$ km/h)					第 6 趟($v=268.6$ km/h)				
测点号	水平加速度/($m \cdot s^{-2}$)		竖直加速度/($m \cdot s^{-2}$)		测点号	水平加速度/($m \cdot s^{-2}$)		竖直加速度/($m \cdot s^{-2}$)	
	均值	方差/ 10^{-6}	均值	方差/ 10^{-6}		均值	方差/ 10^{-6}	均值	方差/ 10^{-6}
1	0.006 0	4.10	0.024 0	36.1	1	0.006 6	4.10	0.024 0	36.2
2	0.006 6	4.00	0.018 6	81.1	2	0.006 6	4.20	0.021 6	81.0
3	0.003 0	1.10	0.006 6	16.2	3	0.003 6	1.20	0.008 4	16.1
4	0.001 2	1.20	0.002 4	1.10	4	0.002 4	1.20	0.002 4	1.10
5	0.001 2	1.00	0.003 0	4.20	5	0.003 6	1.10	0.003 0	4.20
6	0.001 8	1.10	0.005 4	4.00	6	0.003 6	1.00	0.004 8	4.20
7	0.004 2	4.10	0.005 4	9.00	7	0.004 8	4.00	0.005 4	9.10

续表 1

第7趟(v=257.3 km/h)					第8趟(v=270.5 km/h)				
测点号	水平加速度/(m·s ⁻²)		竖直加速度/(m·s ⁻²)		测点号	水平加速度/(m·s ⁻²)		竖直加速度/(m·s ⁻²)	
	均值	方差/10 ⁻⁶	均值	方差/10 ⁻⁶		均值	方差/10 ⁻⁶	均值	方差/10 ⁻⁶
1	0.006 0	4.10	0.030 0	36.1	1	0.006 0	4.20	0.030 0	36.1
2	0.007 2	4.20	0.021 6	81.3	2	0.009 0	4.30	0.019 2	81.0
3	0.003 0	1.30	0.008 4	16.1	3	0.003 0	1.30	0.007 8	16.1
4	0.001 8	1.00	0.003 0	1.10	4	0.001 8	1.10	0.003 0	1.20
5	0.003 0	1.20	0.003 0	4.20	5	0.002 4	1.30	0.003 0	4.30
6	0.002 4	1.20	0.005 4	4.20	6	0.002 4	1.10	0.004 8	4.10
7	0.004 2	4.00	0.005 4	9.10	7	0.004 8	4.20	0.005 4	9.30

第9趟(v=253.6 km/h)					第10趟(v=265.8 km/h)				
测点号	水平加速度/(m·s ⁻²)		竖直加速度/(m·s ⁻²)		测点号	水平加速度/(m·s ⁻²)		竖直加速度/(m·s ⁻²)	
	均值	方差/10 ⁻⁶	均值	方差/10 ⁻⁶		均值	方差/10 ⁻⁶	均值	方差/10 ⁻⁶
1	0.006 0	4.00	0.024 0	36.0	1	0.007 8	4.50	0.030 0	36.5
2	0.006 6	4.00	0.022 8	81.0	2	0.006 6	4.50	0.022 8	81.6
3	0.003 0	1.00	0.009 0	16.0	3	0.003 6	1.30	0.009 6	16.2
4	0.001 2	1.00	0.002 4	1.00	4	0.001 8	1.30	0.003 0	1.00
5	0.002 4	1.00	0.003 6	4.00	5	0.002 4	1.40	0.003 6	4.20
6	0.002 4	1.00	0.004 8	4.00	6	0.002 4	1.00	0.005 4	4.00
7	0.004 8	4.00	0.006 6	9.00	7	0.005 4	4.30	0.007 2	9.20

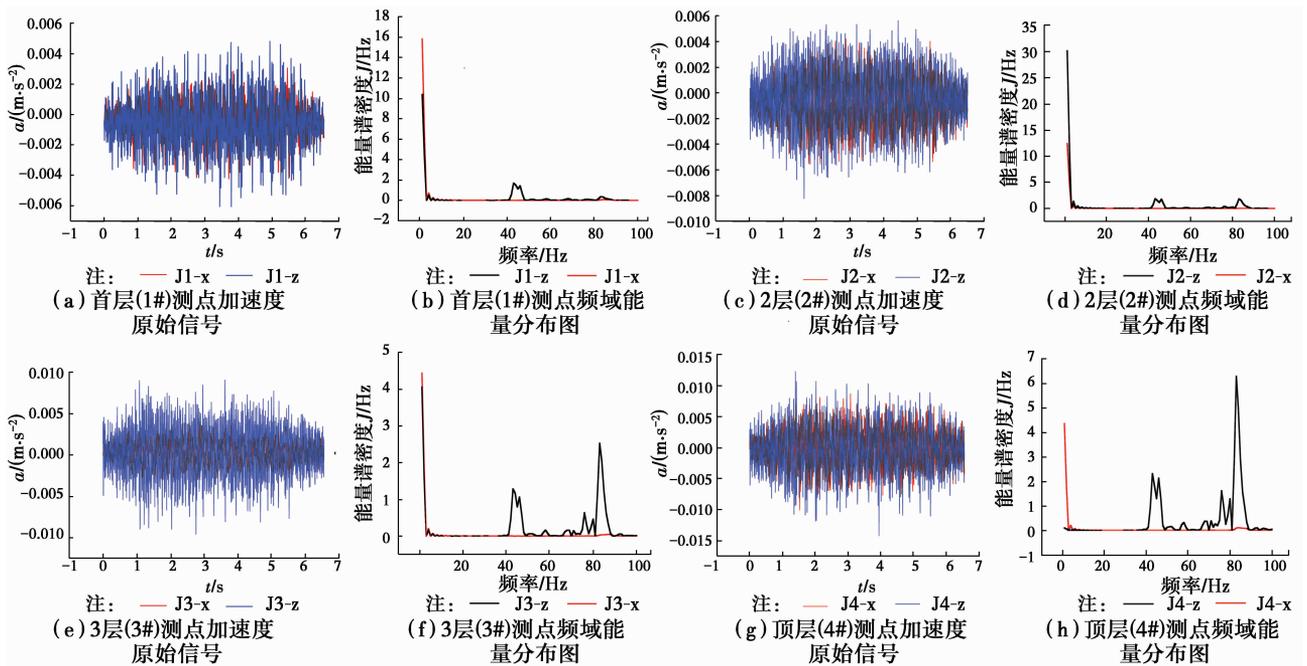


图3 建筑物振动加速度时程与能量分布图

Fig. 3 Acceleration time history and energy distribution of building

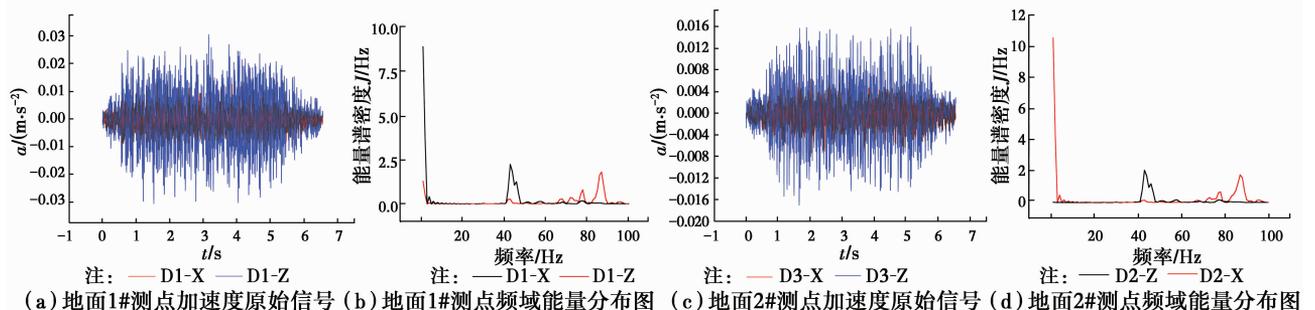


图4 地面环境振动加速度时程与能量分布图

Fig. 4 Acceleration time history energy distribution of ground

由图 3、图 4 可知,高速铁路列车运行所产生的地面环境振动加速度最大幅值约为 $0.74 \sim 1.71 \text{ cm/s}^2$,相对于地铁列车环境振动有较大幅度提高,其环境振动响应规律表现为地面振动随离开高速铁路线路水平距离的增大逐步衰减;当高速列车运行产生的振动波到达邻近建筑物之后,由此产生的建筑物二次振动则由建筑物首层向顶层逐步放大,具有明显的放大效应。与此同时,由建筑物各楼层频域能量分布图可知,高速列车诱发周边建筑物二次振动以竖直振动为主,各楼层竖直振动(z 方向)能量随建筑高度的增加(即由底层向顶层)逐步增大,且能量分布由低频($40 \sim 50 \text{ Hz}$)向高频($80 \sim 90 \text{ Hz}$)扩展,而水平振动(x 方向)放大效应不明显。

为了进一步分析建筑物与地面二次振动能量传播规律,根据《城市区域环境振动标准》(GB 10070—1988),采用铅垂 Z 振级描述高速铁路环境振动响应特性,由测试数据可得建筑物与地面各测点铅垂 Z 振级如表 2、表 3 所示,由表列数据可绘制环境振动 Z 振级变化趋势,如图 5 所示。

表 2 建筑物内各测点振动特性

Table 2 Vibration characteristics of building

测点号	离地面高度/m	Z 振级/dB	放大系数
J1	0.00	64.60	1.000
J2	4.50	66.27	1.026
J3	9.00	68.63	1.063
J4	14.05	70.62	1.094

表 3 周边地面各测点振动特性

Table 3 Vibration characteristics of ground

测点号	至轨道边距/m	Z 振级/dB	衰减系数
D1	9.1	83.18	1.000
D2	13.7	79.83	0.959
D3	18.2	74.07	0.890
J1	23.2	64.60	0.776

由表 2、表 3 及图 5 可知,高速列车运行诱发周边地面与建筑物二次振动铅垂 Z 振级最大值分别可达 $83.18, 70.62 \text{ dB}$,周边地面 Z 振级随距离高铁轨道边线距离的增大呈幂函数衰减,最大衰减系数可达 0.776 。全部 10 趟高速列车通行引起的周边环境振动现场测试结果表明,周边建筑物二次振动随建筑物高度增大呈线增长关系,对于被测 3 层建筑物,顶层铅垂 Z 振级约为室内地面铅垂 Z 振级的 1.094 。这可能与建筑物二次振动效应随楼层高度

的增大受建筑物地基基础约束作用降低,以及振动波随着楼层的增加反射与叠加效应更明显等因素有关。除此之外,二次振级的放大效应也取决于建筑物与地基基础整体刚度与自振频率,当环境振动频率与建筑结构体系自振频率一致时,其放大效应愈明显。因此,在研究高速列车运营诱发建筑物二次振动影响时,应更多关注建筑物屋顶的振动安全与稳定性。

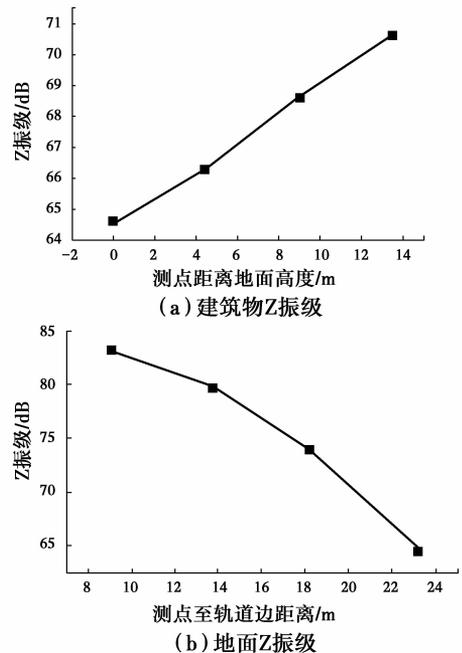


图 5 环境振动 Z 振级变化曲线

Fig. 5 Z-vibration level of environmental vibration

3 分频振级分析

为了定量分析高速铁路列车诱发的周边环境与建筑物三向振动与分频振级响应特性,依据《城市区域环境振动标准》(GB 10070—1988),借鉴城市地铁列车运行对周边环境影响评价方法,采用振动加速度级作为高速铁路列车运行对周边建筑物环境振动影响的衡量标准,具体振动加速度级 VL (dB)可按式(1)计算。

$$VL = 20 \lg(a_m/a_0) \quad (1)$$

式中: a_m 为振动加速度有效值, m/s^2 ; a_0 为基准加速度,取为 10^{-6} m/s^2 。振动加速度有效值 a_m 可基于现场测试数据,通过 $1/3$ 倍频程分析获得,具体可利用 Matlab 软件编制分析程序进行计算。

通过对建筑物及周边地面各测点 x, y, z 3 个方向加速度时程数据进行频谱分析,可得高速铁路列车运行诱发的周边地面与建筑物二次振动 $1/3$ 倍频程振级频谱曲线(如图 6 所示)。

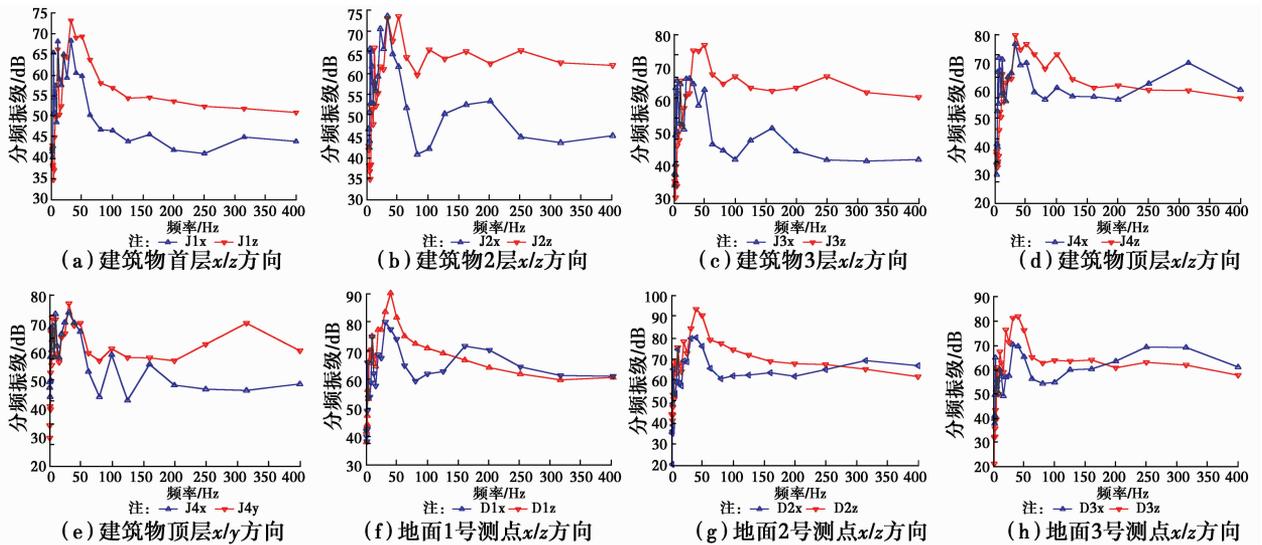


图6 测点1/3倍频程振级曲线

Fig. 6 Curves of 1/3 doubling frequency process

由图6可知:在高速列车振动荷载作用下,周边建筑物二次振动分频振级在建筑物首层至3层垂直与水平向表现出相似的变化规律,即在0~20 Hz范围内,垂直与水平向振动加速度级基本相等,约为35~65 dB;随着振动频率不断增大,两者之间的振动加速度级差逐步增大,最大差值约为10~32 dB。总体而言,高速列车振动诱发的建筑物二次振动以垂直方向为主、水平方向为辅,且垂直方向与水平方向振级均在建筑物顶层达到最大值80和78 dB。

高速列车运行诱发建筑物二次振动在建筑物同一楼层沿水平面不同方向的振级变化规律也不一样,即在0~50 Hz范围内,垂直于高铁线路行进方向的水平振动加速度级与沿高铁线路行进方向的水平振动加速度级基本相等,而当频率大于50 Hz时,则以垂直于高铁线路行进方向的振动为主。

高速列车运行诱发周边地面二次振动在不同测点处呈现出相似的变化规律,垂直方向地面振动大于水平方向地面振动,地面垂直方向分频振级最大值出现在地面2号测点,具体数值为92.0 dB,对应的水平方向分频振级最大值为80.0 dB,相应的振动频率均为41.2 Hz。

4 环境噪声分析

为了分析高速列车运行引起的环境噪声对沿线居民的影响程度,通过噪声采集仪同步测量了10趟列车所产生的环境噪声(噪声采集点位于室外地面D2号测点处,至高速铁路轨道边缘距离约13.6 m),噪声测试结果如表4所示。由表4可知,高速列车运行产生的环境噪声量值大致与列车运行速度成正比,其最高可达92.8 dB,最小值也可达88.1 dB,根

据《中华人民共和国城市区域环境噪声标准》,已经远远超过了噪声重度污染(>74 dB)的控制值。

表4 高速铁路环境噪声测量值

Table 4 Measuring values of environmental noise

测试序号	列车速度/ (km·h ⁻¹)	噪声值/dB	行车状态
1	256.7	91.2	上行
2	260.2	91.2	上行
3	258.5	91.2	下行
4	260.6	91.2	下行
5	256.9	90.7	上行
6	268.6	92.8	下行
7	257.3	90.2	上行
8	270.5	92.8	下行
9	253.6	88.1	下行
10	265.8	91.1	下行

5 结论

1)高速列车振动诱发的建筑物二次振动以垂直方向为主、水平方向为辅,垂直方向Z振级在建筑物顶层达到最大值,周边建筑物二次振动从低层至高层存在明显放大效应,建筑物顶层振动放大系数可达1.094倍,对周边建筑物抗振设防时,应重点关注建筑物顶层抗振安全措施。

2)时速为250~270 km/h的高速铁路列车运行诱发的周边地面以及建筑物二次振动频率主要集中在25~60 Hz之间,其中:建筑物二次振动加速度级约为75~80 dB,周边地面振动加速度级约为82~92 dB。

3)高速铁路列车运行产生的环境噪声级别高达92.8 dB,已超过铁路干线环境振动80 dB的控制标准,高速列车运行产生的环境噪声对居民生活的影响大于周边建筑物环境振动,有必要加强城区高速

铁路线路两侧噪声隔离措施,以确保高速铁路周边居民生活区的噪声安全。

参考文献:

- [1] 盛涛,张善莉,单伽程. 地铁振动的传递及对建筑物的影响实测与分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015,43(1):54-59.
SHENG T, ZHANG S L, SHAN J Z. In-situ measurement and analysis of subway vibration's transmission and the influence to nearby buildings [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(1): 54-59. (in Chinese)
- [2] 肖桂元,韦红亮,王志驹. 地铁列车引起与地铁合建建筑结构环境振动特性现场测试分析[J]. 铁道学报, 2015, 37(5): 88-93.
XIAO G Y, WEI H L, WANG Z J. In-situ experiment and analysis of train-induced vibration characteristics of jointly-built structure of subway and buildings [J]. Journal of the China Railway Society, 2015,37(5):88-93. (in Chinese)
- [3] 涂勤明,雷晓燕,毛顺茂. 交叠线路地铁列车引起的环境振动分析[J]. 城市轨道交通研究,2016,19(2):14-20.
TU Q M, LEI X Y, MAO S M. Analysis of environmental vibration induced by subway trains on overlapping lines [J]. Urban Mass Transit, 2016, 19 (2): 14-20. (in Chinese)
- [4] MADSHUS C, KAYNIA A M. High-speed railway lines on soft ground dynamic behaviour at critical train speed [J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 231 (3): 689-701.
- [5] DEGRANDE G, SCHILLEMANS L. Free field vibrations during the passage of a thalys high-speed train at variable speed [J]. Journal of Sound and Vibration, 2001, 247(1): 131-144.
- [6] U.S. Federal Railroad Administration. High-speed ground transportation noise and vibration impact assessment [R]. Washington D.C.; U.S. Department of Transportation, 2005.
- [7] CONNOLLY D P, KOUROUSSIS G, WOODWARD P K, et al. Field testing and analysis of high speed rail vibrations [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014, 67(12): 102-118.
- [8] CONNOLLY D P, COSTA P A, KOUROUSSIS G, et al. Large scale international testing of railway ground vibrations across Europe [J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2015, 71: 1-12.
- [9] MARSHALL T, FENECH B A, GREER R. Derivation of sound emission source terms for high speed trains running at speeds in excess of 300 km/h [M] // Noise and vibration mitigation for rail transportation systems, Springer Berlin Heidelberg, 2015:497-504.
- [10] OKAMOTO Y, YOSHIDA H. Study of the environmental vibration characteristic of high-speed railroad [J]. Railway Occupational Safety Health & Environmental Protection, 2010, 113: 789-794.
- [11] 高广运,李志毅,冯世进,等. 秦沈铁路列车运行引起的地面振动实测与分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1817-1071.
GAO G Y, LI Z Y, FENG S J. Experimental results and numerical predictions of ground vibration induced by high-speed train running on Qin-Shen Railway [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(9): 1817-1071. (in Chinese)
- [12] 马利衡,梁青槐,谷爱军,等. 沪宁城际铁路振动对周围环境及邻近铁路地基沉降的影响研究[J]. 铁道学报, 2015,37(2):98-105.
MA L H, LIANG Q H, GU A J, et al. Research on impact of Shanghai-Nanjing intercity high-speed railway induced vibration on ambient environment and foundation settlement of adjacent railway [J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(2): 98-105. (in Chinese)
- [13] 贺玉龙,周青,董海山,等. 350 km/h 高速铁路不同线路形式处环境振动测试分析[J]. 工业安全与环保, 2013,39(4):56-58.
HE Y L, ZHOU Q, DONG H S, et al. Environmental vibration test and analysis of different line forms of 350 km/h high-speed railway [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2013, 39 (4): 56-58. (in Chinese)
- [14] 张光明,贺玉龙,杨立中. 高速铁路路堤对地面环境振动的影响分析[J]. 工业安全与环保, 2014, 40(4): 54-57.
ZHANG G M, HE Y L, YANG L Z. Analysis on the influence of high-speed railway embankment on ground environmental vibration [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2014, 40 (4): 54-57. (in Chinese)
- [15] 马莉,张伟. 高速铁路大型高架车站的振动研究[J]. 中国铁路, 2014(5): 63-66.
MA L, ZHANG W. Research on vibration of large overhead railway station in high speed railway [J]. Chinese Railways, 2014(5): 63-66. (in Chinese)
- [16] 郑亚玮,陈俊岭. 高速铁路引起的地面振动实测及分析[J]. 特种结构, 2015, 32(3): 76-79.
ZHEN Y W, CHEN J L. Measurement and analysis of ground vibration induced by high speed railway [J]. Special Structure, 2015, 32(3): 76-79. (in Chinese)