

多振源激励下武汉站振动实测与舒适度研究*

张庆东¹, 吴巧云^{1,2}, 荆国强², 国巍³, 孙治国⁴

(1. 武汉工程大学土木工程与建筑学院 武汉, 430073)

(2. 桥梁结构健康与安全国家重点实验室 武汉, 430034)

(3. 中南大学土木工程学院 长沙, 410000)

(4. 防灾科技学院土木工程学院 北京, 101601)

摘要 为了研究综合交通枢纽中地铁、高铁和行人等振源单独作用和共同作用下楼板的振动响应问题,以武汉站为例,对其站厅层开展现场振动实验测试,并结合标准 JGJ/T 170—2009 对站厅层进行了振动舒适度评价。时域分析结果表明:列车产生的振动传递到站厅层,会在各个结构柱处产生一定的放大;振源数目对水平方向加速度的影响大于对竖向加速度的影响;站厅层一跨内的振动传递特性可近似用二次函数递减推算。频域分析结果表明:站厅层的振动频率均集中在 0~100 Hz;随着测点距离的变化,高频成分发生明显衰减,但 10~20 Hz 处的低频成分并没有随着距离的增加而出现明显的衰减。振动舒适度评价表明:武汉站站厅层的振动舒适度符合规范要求,但长期处在振动的环境中,会对工作人员的身心产生一些影响。该研究对新建综合交通枢纽的设计和在役交通枢纽的正常运行维护具有一定的指导意义。

关键词 综合交通枢纽;现场实测;多振源;振动传播特性;振动舒适度

中图分类号 TU19;U115;TH7

引言

综合交通枢纽将城市中各种交通方式连接在一起,极大地方便了人们的出行,但其组成复杂,通常由地下层、地面层(站厅层)、站台层及候车层组成。各种振源产生的振动通过结构和大地以复杂的形式传播,单一振源的影响已不在适用于综合交通枢纽。

目前,针对综合交通枢纽高架车站振动特性的研究已取得一些成果。冉汶民等^[1]以重庆沙坪坝综合交通枢纽为例,建立了车辆-轨道耦合模型、轨道有限元模型和车站结构有限元模型,结果表明,列车通过车站时,车站一层的振动响应最大。朱志辉等^[2]以天津西站为例,利用自主开发的分析软件建立列车-轨道-客站耦合系统空间整体动力学数值模型,结果表明,客站以竖向振动为主,沿着与线路垂直方向和楼层高度方向,车致振动在传播的过程中快速衰减。马莉^[3]以长沙南站为例,应用车辆-无砟轨道-站房结构耦合振动分析程序对高架车站站房结构模型进行了仿真计算,并与现场实测结果进行了比较,验证了理论模型和程序。文献[4-7]以南昌

西站综合交通枢纽为例,测试了候车层等区域的振动加速度,并对实测信号进行分析,发现候车层竖向振动垂轨方向的传递特性为加速度振级(vibration level,简称 VL)以线路正上方位置为中心向两侧近似线性衰减,平均衰减量为 0.34 dB/s。刘涛^[8]以郑州机场城际铁路为研究背景,研究轨道交通振动的地表特性,发现实测结果与模拟结果的差异主要在于高频振动的损失,数值模拟中对低频振动的模拟符合检测结果,高频振动在土层中衰减很快,到达地表后影响很小。陈勤^[9]以杭州火车站为工程背景,利用 SAP2000 软件建立杭州火车站“列车-站房结构”系统动力分析模型,对高速列车经过车站过程进行数值模拟,采用瞬态分析法得到了结构的前 50 阶振动频率。王国波等^[10]实测了高速列车通过时武汉站的楼板振动响应,对其进行舒适度评估,结果表明,武汉站各层的楼板均满足舒适度的要求。以上研究主要为单一振源影响下列车引起的振动作用在综合交通枢纽上。米仓^[11]以天津西站为背景,以人行、列车行驶和设备运行 3 种激励为例,提出了一种基于均方根加速度(root mean square,简称 RMS)、

* 国家自然科学基金资助项目(52078395);桥梁结构健康与安全国家重点实验室开放课题资助项目(BHS-KL19-07-GF);湖北省首届青年拔尖人才计划资助项目

收稿日期:2022-04-15;修回日期:2022-06-23

考虑加功率相干叠加的多振源激励下站房结构振动响应分析方法,并对该方法的合理性和适用性进行了论证。

笔者以武汉站为例,针对人行、高铁和地铁 3 种振源开展了振动实测:①列车单独作用产生振动;②多股列车(包括高铁与地铁)共同作用产生振动;③列车与行人共同作用产生的振动。

1 武汉站简介

武汉站是我国第 1 个“桥建合一”的新型结构火车站,地面高度为 18~27 m,设计轨顶标高为 31.86 m。武汉站分为地下层、地面层、站台层和候车层,总建筑面积为 33.2 万 m²,共有 10 条轨道轴。图 1 为武汉站轨道示意图,除 4 轴、9 轴为正线列车直通车道外,其余均为到发线。其中:第 4 轴为京广高速铁路上下行正线,第 9 轴为滬武铁路上下行正线。

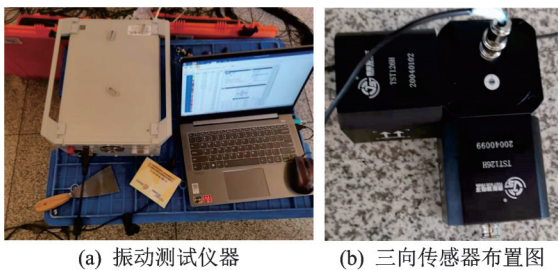


图 1 武汉站轨道示意图
Fig.1 Track diagram of Wuhan Station

2 测试实验

2.1 测试仪器

图 2 为振动测试设备。现场振动测试仪器采用 DH5922D 动态信号测试分析仪(32 通道),传感器采用江苏泰斯特磁电式速度传感器进行数据采集,采样频率为 1 kHz。



(a) 振动测试仪器 (b) 三向传感器布置图
(a) Vibration testing instrument (b) Three way sensor layout

图 2 振动测试设备

Fig.2 Instruments and equipment for vibration testing

2.2 测试方案

为了反映枢纽结构在车辆进出站时武汉站站厅层的振动特性,在武汉站高铁站厅层布置测点。测点及传感器布置如图 3 所示。测试时间为 10:00~

22:00,采用不间断测量的方式进行数据采集。将传感器 A₁ 布置在高铁线路与地铁线路相交处的柱子处,距离高铁 3 股道中心 0 m、地铁股道中心 5 m 处;传感器 A₂ 距离高铁 3 股道中心 0 m;A₂ 与 A₁,A₂ 与 A₃,A₃ 与 A₄,A₄ 与 A₅ 之间距离约为 7.2 m,A₅ 距离高铁 4 股道中心 0 m。A₁,A₂,A₃ 为三向测点,A₄,A₅ 为单向测点。其中:A₁ 为高铁(地铁)引起的振动经由结构柱传递到站厅层时最不利的位置;A₂~A₅ 横跨并平分 3,4 股道。

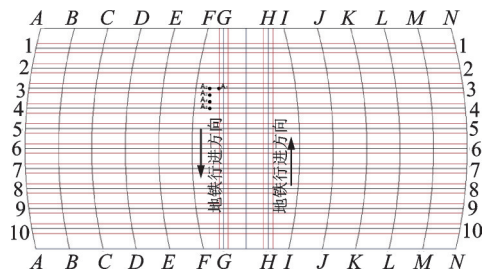


图 3 测点及传感器布置

Fig.3 Measuring point layout and sensor layout

3 测试结果与振动特性分析

3.1 时域分析

经前期现场调查,将站厅层分为 5 种测试工况,各工况对应的测试内容如表 1 所示。

表 1 各工况对应的测试内容

Tab.1 Test contents corresponding to each working condition

工况	实测内容
1	背景振动测试
2	地铁单独作用下的振动实测分析
3	高铁单独作用下的振动实测分析
4	高铁与地铁共同作用下的振动实测分析
5	高铁与地铁与随机人群共同作用下的振动实测分析

参照测试当天高铁列车时刻表及相关人员记录地铁列车到站时刻表,对所得数据按表 1 所示工况进行整合,同时利用拉依达准则对各组数据进行错点剔除,得到工况 1~3 的有效数据各 5 组,工况 4,5 的有效数据各 3 组。取算数平均值减小误差,得到各工况下各测点的时域曲线如图 4 所示。

由图 4(a)可以看出,武汉站站厅层环境振动出现小范围波动,说明环境振动易受外界微小刺激而发生变化。由图 4(b~e)可以看出,各工况下产生的振动经结构柱传递到站厅层时,在其结构柱处振动达到最大,随着距离结构柱位置越来越远,振动迅速衰减。各工况在测点 5 处振动产生了放大,这是由于 3 股道高铁列车(或地铁列车)产生的振动在高铁站台层(地铁站台层)传递,经由 4 股道结构柱传递

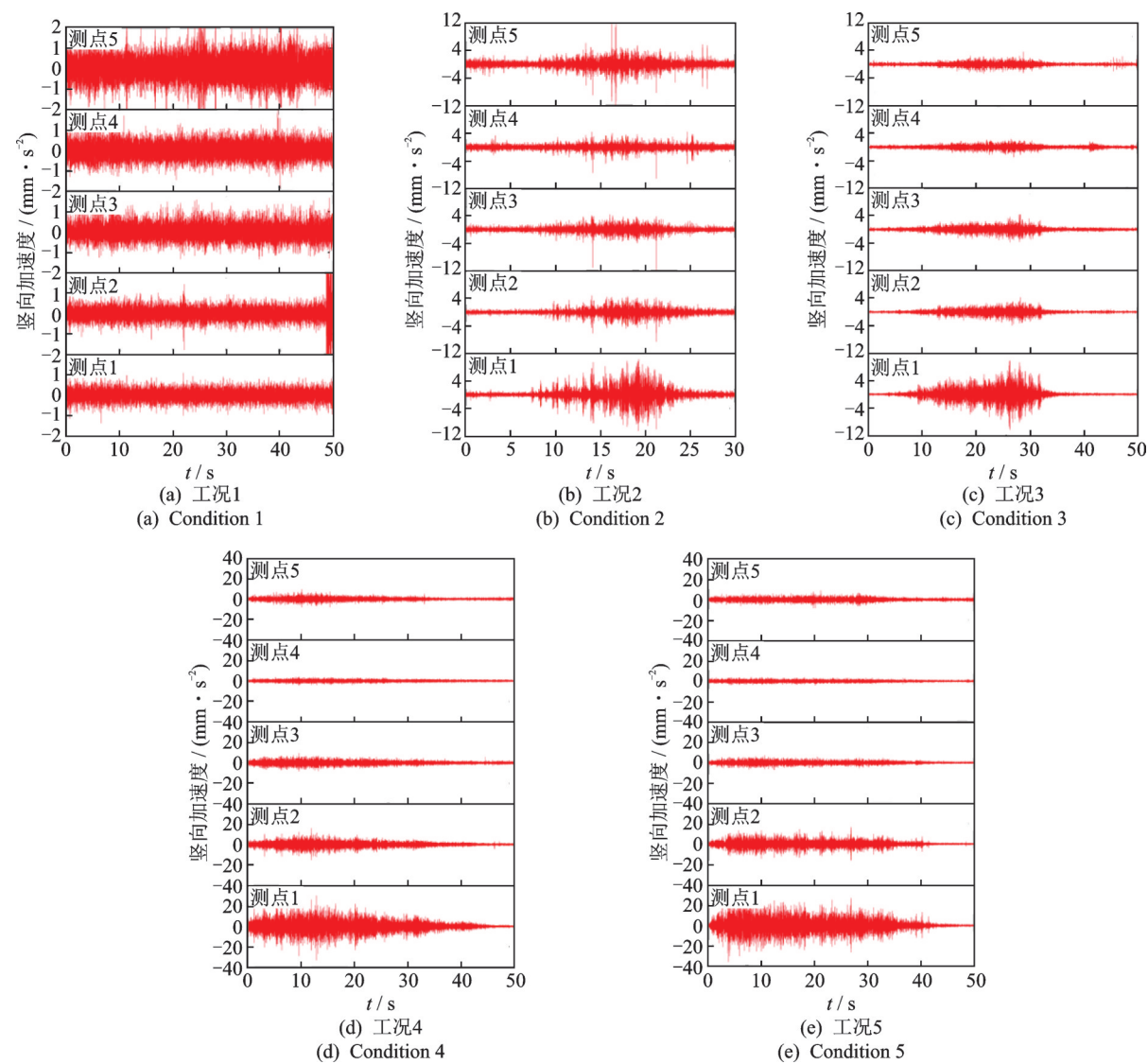


图4 各工况下各测点的时域曲线

Fig.4 Time domain curve of each measuring point under each working condition

到地面,随后传递到测点 5,因此测点 5 处的振动产生了放大。对比图 4(b,c) 可以看出,地铁引起的振动持续时间比高铁引起的振动持续时间少了约 7s,高铁与地铁引起的振动传递到站厅层时数值相差并不大。由图 4(d,e)可以看出,随着振源数目的增多,振动随时间衰减的速率明显变缓,即结构和行人暴露在振动环境中的时间变长,久而久之,会对结构的安全性及行人的舒适性产生一定的隐患。

取测点 A_1 在各工况下竖向与水平向加速度进行分析,并对其峰值加速度取均方根 (root mean square, 简称 RMS),即

$$a_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^N x^2(n)} \tag{1}$$

其中: N 为样本总数,其值为振动时间 T 和采样频率 f 的比值; $x(n)$ 为样本对应的加速度值。

各工况下测点 1 峰值加速度有效值如表 2 所示。

表 2 各工况下测点 1 峰值加速度有效值

Tab.2 Effective value of peak acceleration at measuring point 1 under various working conditions						
工况	竖向加速度有效值/ (mm·s ⁻²)	增长率/%	顺轨加速度有效值/ (mm·s ⁻²)	增长率/%	垂轨加速度有效值/ (mm·s ⁻²)	增长率/%
1	0.331 7	—	0.257 7	—	0.261 7	—
2	1.305 2	2.934 9	0.545 0	1.115 6	0.600 7	1.295 4
3	1.749 6	4.274 7	0.644 6	1.501 4	0.836 6	2.196 8
4	4.818 7	13.527 3	2.431 5	8.435 4	3.781 7	13.450 5
5	5.813 1	16.525 2	2.962 8	10.497 1	4.139 8	14.818 9

引入加速度增长率 S ,可看出各工况相较于工况1的加速度增大量为

$$S = \frac{a_i - a_0}{a_0} \quad (2)$$

其中: a_i 为各工况下各向加速度有效值; a_0 为环境振动下加速度有效值; $i=1,2,\dots,5$ 。

观察表2,从数值上可以看出,竖向加速度>垂轨向加速度>顺轨向加速度。以工况2,3,4为例,相较于单独作用时,竖向加速度分别增大了72.9%和63.7%,顺轨向加速度分别增大了77.6%和73.5%,垂轨向加速度分别增大了84.1%和77.9%,即振源数目对水平向加速度的影响大于对竖向加速度的影响。可见,对于综合交通枢纽,水平向隔振支座的设置是必要的。

为进一步得到站厅层相邻股道间振动的传递特性,对工况2~5各竖向测点RMS值作二元回归分析,得到的加速度有效值及拟合曲线如图5所示。可以看出,站厅层相邻股道间振动传递特性呈现出非线性衰减趋势。

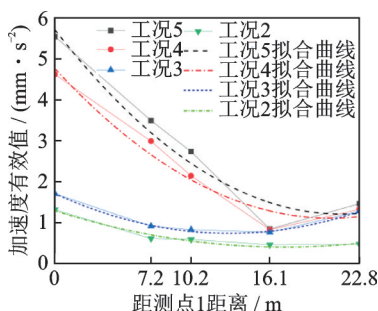


图5 加速度有效值及拟合曲线

Fig.5 Acceleration effective value and fitting curve

表3为二次多项式拟合公式。由拟合系数 R^2 看出,拟合结果和实测值吻合良好,即站厅层相邻股道间的振动传递特性可近似用二次函数递减推算。

表3 二次多项式拟合公式

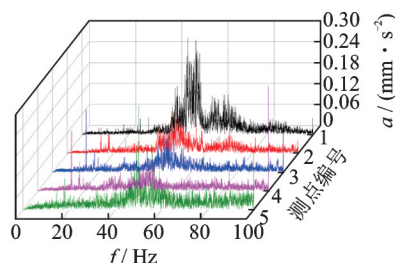
Tab.3 Quadratic polynomial fitting formula

工况	拟合系数 R^2	二次多项式拟合公式
5	0.901	$Y_2 = 0.01x^2 - 0.420x + 5.707$
4	0.915	$Y_3 = 0.009x^2 - 0.354x + 4.757$
3	0.995	$Y_4 = 0.006x^2 - 0.148x + 1.696$
2	0.946	$Y_5 = 0.003x^2 - 0.103x + 1.278$

3.2 频域分析

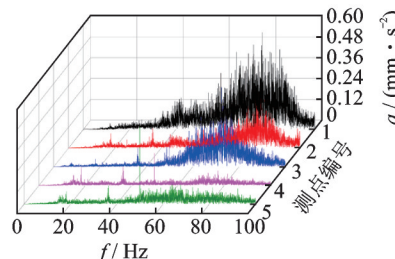
对测点1各工况下的振动加速度进行频域分析,由于篇幅限值,以工况3,5为例,各测点的频谱曲线如图6所示。可以看出,站厅层的振动频率均

集中在0~100 Hz,随着测点位置的变化,高频成分衰减明显,但10~20 Hz处的低频成分并没有随着距离的增加而出现明显的衰减,这说明随着距离的增大,振动逐渐向低频过度。



(a) 工况3的频谱曲线

(a) Spectrum curve of working condition 3



(b) 工况5的频谱曲线

(b) Spectrum curve of working condition 5

图6 工况3,5各测点的频谱曲线

Fig.6 Spectrum curve of working conditions 3 and 5

张向东等^[12]研究发现,人体对1~80 Hz的振动特别敏感,人体各主要器官的共振频率集中在这个范围内。人体各部位固有频率如图7所示。

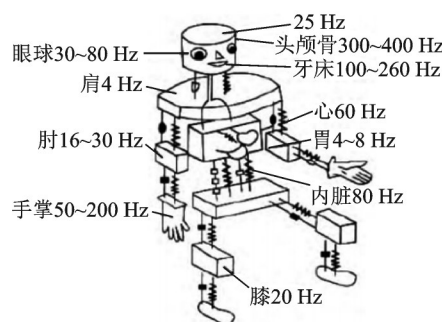


图7 人体各部位固有频率

Fig.7 Natural frequencies of various parts of human body

分析图6,7发现:单一振源的振动主频集中在40~60 Hz,耦合后振动主频集中在60~80 Hz,与人体眼球、心和内脏等器官的共振频率均有交集,长期处于振动的环境中,会对这些器官造成一定影响。如何避免各振源引起的振动与人体重要器官振动主频的共振,是综合交通枢纽结构在建设中考

3.3 振动舒适度分析

振动舒适度分析是综合交通枢纽的一个重要分析指标,影响舒适度的因素既有主观因素,又有客观因素。笔者基于文献[13]对武汉站站厅层进行舒适

度分析,通过各 1/3 倍频程中心频率上的分频最大振级对行人舒适度进行评价。1/3 倍频程是将 1 个倍频程带划分为 3 个等比宽度的频带,采用以 10 为基数的方法,相邻 2 个 1/3 倍频程中心频率(f_c)之比为 $2^{1/3}$ 。1/3 倍频程中心频率如表 4 所示。

表 4 1/3 倍频程中心频率
Tab.4 1/3 octave center frequency

1/3 倍频程中心频率/Hz	4	5	6.3	8	10	12.5	16	20	25	31.5
计权因子/dB	0	0	0	0	0	-1	-2	-4	-6	-8
1/3 倍频程中心频率/Hz	40	50	63	80	100	125	160	200	250	
计权因子/dB	-10	-12	-14	-17	-21	-25	-30	-36	-42	

对于大型综合交通枢纽结构,现有标准常以振级为评价指标对其舒适度进行评价,为了实现加速度向振级的转变,参考文献[14],得到振级的表达式为

$$VL = 20\lg(a/a_0) \tag{3}$$

其中: a 为加速度有效值(m/s^2); a_0 为基准加速度, $a_0 = 10^{-6} \text{m/s}^2$ 。

计算出各工况下的 1/3 倍频程中心频率所对应加速度的振动加速度级,根据表 4 中每个 1/3 倍频程中心频率所对应的计权因子,修正后得到各个 1/3 倍频程中心频率上的振级。工况 3,5 各测点振级曲线如图 8 所示。

由图 8 可以看出:单一振源振级在 1~6.3 Hz 的低频范围增长缓慢,随后开始迅速增大,并在 50 Hz 处第 1 次出现峰值;多振源振级在 1~10 Hz 的低频范围增长缓慢,随后开始迅速增大,在 80 Hz 处第 1 次出现峰值。经过分析,站厅层各工况下各测点的最大 Z 振级均小于 JGJ/T《城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准》中交通干线两侧区域规定的 75 dB 振动限值。建筑物室内振动限值如表 5 所示。可见,武汉站各层满足振动舒适度要求。

表 5 建筑物室内振动限值
Tab.5 Indoor vibration limits of buildings dB

区域	昼间	夜间
特殊住宅区	65	62
居住、文教区	65	62
居住、商业混合区、商业中心区	70	67
工业集中区	75	72
交通干线两侧	75	72

虽然武汉站站厅层的振动舒适度符合规范要求,但对于工作人员而言,长期暴露在振动环境中,还是有一定影响。因此,如何减小振动的影响,是未来综合交通枢纽建设应考虑的重要因素之一。

4 结 论

1) 通过时域分析发现:列车产生的振动传递到站厅层时,会在各个结构柱附近产生一定的放大;振源数目对水平向加速度的影响大于对竖向加速度的影响;对于相邻股道的振动传递特性可近似用二次函数递减推算。

2) 通过频域分析发现,武汉站站厅层的振动主频均集中在 100 Hz 以内,随着与振源距离的增大,振动逐渐向低频过度。

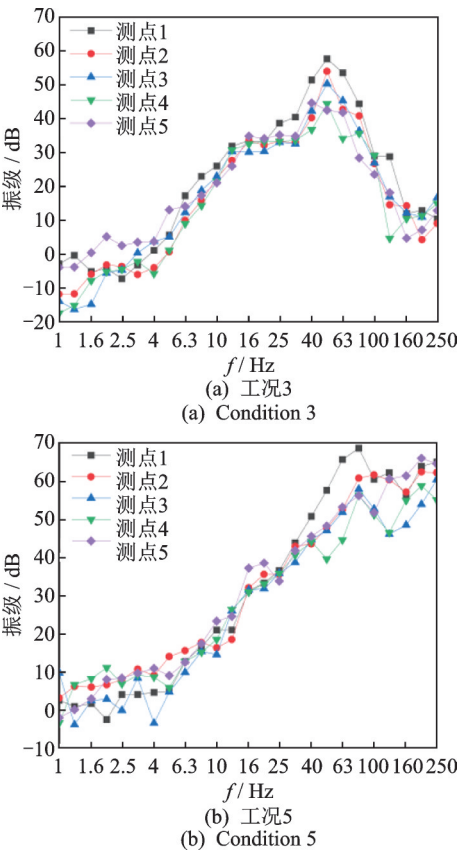


图 8 工况 3,5 各测点振级曲线
Fig.8 Vibration level curve of each measuring point under working conditions 3 and 5

3) 通过振动舒适度评价发现:单一振源振级在1~6.3 Hz的低频范围增长缓慢,多振级在1~10 Hz的低频部分增长比较缓慢;在50 Hz处单一振源振级第1次出现峰值,在80 Hz处多振源振级第1次出现峰值;尽管武汉站站厅层的振动舒适度符合规范要求,但长期暴露在振动的环境中,会对人体一些重要器官造成一定影响。

参 考 文 献

- [1] 冉汶民,李青良,李小珍,等.列车荷载激励下站房结构振动响应频域分析方法[J].振动与冲击,2018,37(17): 218-224.
RAN Wenmin, LI Qingliang, LI Xiaozhen, et al. Frequency-domain analysis method for vibration responses of a high-speed railway station structure under train load excitation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(17): 218-224. (in Chinese)
- [2] 朱志辉,王力东,官斌,等.车致"站桥合一"大型客站的振动响应[J].中南大学学报(自然科学版),2016(1): 176-186.
ZHU Zhihui, WANG Lidong, GUAN Bin, et al. Dynamic responses of "building-bridge integration" railway station induced by high-speed train[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016(1): 176-186. (in Chinese)
- [3] 马莉.大型复杂高架车站动力学响应与减振优化研究[D].北京:中国铁道科学研究院,2011.
- [4] 张凌,雷晓燕,刘全民,等.地铁环境振动源强测试与评价标准分析[J].振动、测试与诊断,2020,40(1): 89-94.
ZHANG Ling, LEI Xiaoyan, LIU Quanmin, et al. Measurement and evaluation of environmental vibration source strength of the subway[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(1): 89-94. (in Chinese)
- [5] 崔聪聪,雷晓燕,张凌,等.综合交通枢纽的振动特性与舒适度研究[J].噪声与振动控制,2018,38(1): 164-170.
CUI Congcong, LEI Xiaoyan, ZHANG Ling, et al. Study on vibration characteristics and comfort of integrated transportation hub[J]. Noise and Vibration Control, 2018, 38(1): 164-170. (in Chinese)
- [6] 雷晓燕,崔聪聪,张凌.地铁列车荷载激励下综合交通枢纽车站站房结构的振动响应[J].中国铁道科学,2019,40(3): 119-128.
LEI Xiaoyan, CUI Congcong, ZHANG Ling. Vibration response of structure of comprehensive transportation hub station under subway train load excitations[J]. China Railway Science, 2019, 40(3): 119-128. (in Chinese)
- [7] 张凌,雷晓燕,冯青松,等.高铁综合交通枢纽车站结构振动传播的测试分析[J].中国科学(技术科学),2019,49(9): 1107-1116.
ZHANG Ling, LEI Xiaoyan, FENG Qingsong, et al. An experimental study on the vibration propagation of high-speed railway integrated transportation hub station structure[J]. Scientia Sinica (Technological), 2019, 49(9): 1107-1116. (in Chinese)
- [8] 刘涛.地下轨道交通影响的地表振动实测分析与数值模拟[D].郑州:华北水利水电大学,2019.
- [9] 陈勤.高架车站的振动影响及变形监测研究[D].杭州:浙江大学,2018.
- [10] 王国波,谢伟平,于艳丽,等.高速列车引起的武汉站楼板振动舒适度研究[J].振动与冲击,2010,29(12): 110-113.
WANG Guobo, XIE Weiping, YU Yanli, et al. Study on floor vibration comfort of Wuhan railway station under the running condition of high speed train[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(12): 110-113. (in Chinese)
- [11] 米仓.多振源激励下铁路枢纽站房结构振动响应分析与实测[D].天津:天津大学,2013.
- [12] 张向东,高捷,闫维明.环境振动对人体健康的影响[J].环境与健康杂志,2008,25(1): 74-76.
ZHANG Xiangdong, GAO Jie, YAN Weiming. Effects of environmental vibration on human health[J]. Journal of Environment and Health, 2008, 25(1): 74-76. (in Chinese)
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ/T 170—2009 城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限值及其测量方法标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [14] 国家环境保护局. GB 10071—1988 城市区域环境振动测量方法[S].北京:中国标准出版社,1988.



第一作者简介:张庆东,男,1998年8月生,硕士生。主要研究方向为结构振动控制。

E-mail:1156784500@qq.com

通信作者简介:吴巧云,女,1985年2月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为结构振动控制。

E-mail:wuqiaoyun@wit.edu.cn