

文章编号: 1673-9469 (2018) 02-0080-06

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.02.018

城市轨道交通高架桥影响下的多层建筑振动特性分析

唐吉意¹, 林平²

(1. 同济大学铁道与城市轨道交通研究院, 上海 201804; 2. 宁波市轨道交通集团有限公司, 浙江 宁波 315101)

摘要: 为探究城市轨道交通沿线的多层建筑在列车通过时的振动特性, 以某一城市轨道交通高架桥旁的一栋4层楼建筑为研究对象, 通过对每一楼层同时进行振动测试, 然后采用线性计权及Z计权方式对各楼层的振动特性进行分析, 并分析了分别采用两种计权方式时, 特征频率下振动的传递特性, 最后, 利用有限元分析软件ABAQUS建立模型, 进行了模态分析, 找出了建筑物振动峰值出现在4楼的原因。结果表明, 在线性计权及Z计权下, 4个楼层的全局峰值均出现在50~63 Hz频率范围内; 振动从1楼至4楼的传递过程中, 中心频率为50 Hz和63 Hz频率段的振动加速度级均呈现先减小后增大的趋势, 在2楼处达到最小, 在4楼处达到最大; 模态分析表明, 在列车经过时, 在频率为63 Hz时, 4楼发生了共振现象, 故其振动最为明显。

关键词: 城市轨道交通; 振动特性; 1/3倍频程; 特征频率; 振动传递; 模态分析

中图分类号: U239.5

文献标志码: A

Analysis of vibration characteristics of multistory buildings under the influence of viaduct of urban rail transit

TANG Jiyi¹, LIN Ping²

(1. Institute of Rail Transit, Tongji University, Shanghai, 201804, China 2. Ningbo Rail Transportation Group Co., Ltd., Ningbo, 315101, China)

Abstract: In order to explore the vibration characteristics of multi storied buildings along the urban rail transit, a 4 story building beside the urban rail transit viaduct of a city is taken as the research object, and vibration tests are performed on each floor simultaneously. Then the vibration characteristics of each floor are analyzed by using linear weighting and Z weighting method, and the two weighting modes are analyzed respectively for the transmission characteristics of vibration under characteristic frequency. Finally, the finite element analysis software ABAQUS is used to establish the model and modal analysis is carried out and the cause of building vibration peak appearing on the 4th floor is found out. The results show that under the linear weighting and Z weighting, the global peak values of the 4 floors all appear in the 50~63Hz frequency range; during the propagation of vibration from the 1st floor to the 4th floor, the vibration acceleration levels of the center frequency of 50Hz and 63Hz frequency decreases at first and then increases and it reaches the minimum at the 2nd floor and reaches the maximum at the 4 floor. Modal analysis shows that when the train passes and when the frequency is 63Hz, the 4th floor resonance occurs, so the vibration is the most obvious.

Key words: urban rail transit; vibration characteristics; 1/3 octave; characteristic frequency; vibration transmission; modal analysis

近年来, 城市轨道交通的迅速发展, 大大缓解了城市的交通压力, 方便了人们的出行, 对城市轨道交通的研究, 长期主要集中于结构方面及施工方面^[1-2]。随着人们对生活品质要求的逐渐提高, 城市

收稿日期: 2017-10-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51678446)

作者简介: 唐吉意 (1992-), 男, 湖南永州人, 硕士研究生, 研究方向为城市轨道交通与铁道工程。

轨道交通高架桥给沿线区域所带来的振动及噪声问题,逐渐成为制约其发展的主要原因之一,日益引起国内外专家学者的关注与研究^[3-13]。其中,振动是噪声产生的根源,沿线建筑物在城市轨道交通高架桥的长期影响下产生受迫振动,不仅会降低建筑物的结构使用性能,而且还会引发建筑物内的结构二次噪声,影响沿线建筑物内人们正常的工作及生活^[14-19]。本文以某城市轨道交通高架桥为例,对其沿线一栋4层建筑物的室内振动进行了现场测试,采用了两种计权方式对其振动特性进行了分析,分析了特征频率下振动传递特性,并利用有限元分析软件 ABAQUS 建立模型,进行模态分析,找出了建筑物振动峰值出现在第4楼层的原因,本文的研究对城市轨道交通沿线建筑物的振动特性研究及振动控制具有一定参考。

1 试验设计

测试断面示意图如图1所示。该城市轨道交通高架桥采用30 m双线简支箱型梁,单柱整体式桥墩,桩基础,轨道线路类型为无缝线路。试验采用实际运营的城市轨道交通B型车,6辆编组,转向架中心距12.6 m,转向架轴距2.3 m,带司机室拖车长19.65 m,动车长19 m,宽2.89 m,接触网供电。敏感建筑物离箱型梁中心线水平距离25 m,建筑物高25 m,为砖混结构,共有4层。

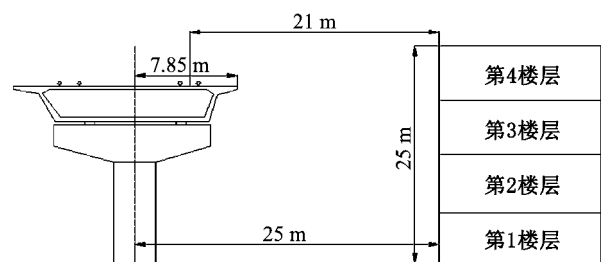


图1 测试断面示意图

Fig.1 Sketch map of test section

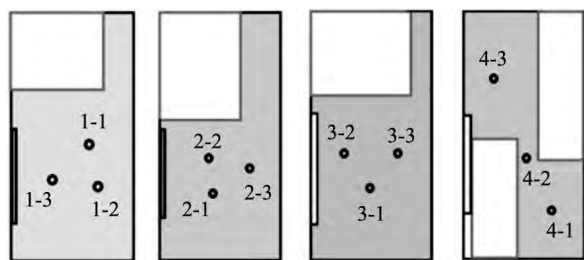


图2 测点布置示意图

Fig.2 Sketch map of layout of measuring points

测点布置如图2所示。每个楼层分别有三个振动测点,一共有12个测点,测点布置在每层楼的几何中心位置。

采用东华压阻式加速度传感器(0~250 Hz),秦皇岛朗斯压电式加速度传感器(50、100、500 g),东方所振动噪声采集仪,笔记本电脑,为防止信号干扰,使用了屏蔽信号线。试验过程中,关闭冰箱、热水器等振动干扰源,避免人为走动及其他振动对测量信号的干扰。列车经过时,进行振动数据采集,每经过一列车次,采集1组数据。为减小测试误差,采集多组数据,并进行有效数据筛选,对有效数据进行不同计权方式下的1/3倍频程分析。

2 线性计权

表1为线性计权下各楼层的1/3倍频程分频率振动加速度级。4个楼层的全局峰值出现在50~63 Hz频率范围内;1楼的振动加速度级最大值在中心频率为50 Hz处取得,为71.21 dB;2楼的振动加速度级最大值在中心频率为63 Hz处取得,为65.24 dB;3楼的振动加速度级最大值在中心频率为63 Hz处取得,为71.45 dB;4楼的振动加速度级最大值在中心频率为63 Hz处取得,为77.07 dB。

图3为线性计权下各楼层的1/3倍频程振动加

表1 1/3倍频程分频率振动加速度级(线性计权)

Tab.1 1/3 octave vibration acceleration level

(linear weighting)

(单位: dB)

中心频率 /Hz	1楼	2楼	3楼	4楼
8	48.03	46.81	45.04	46.68
10	49.03	47.81	46.04	47.68
12.5	50.03	48.81	47.04	48.68
16	51.03	49.81	48.04	49.68
20	56.87	54.42	53.36	55.40
25	58.58	56.03	55.03	57.10
31.5	64.59	58.68	60.48	65.06
40	67.72	61.13	63.93	69.52
50	71.21	64.96	68.90	76.09
63	69.57	65.24	71.45	77.07
80	66.29	58.74	65.53	69.97
100	60.93	55.13	59.52	60.19
125	56.25	58.92	63.40	64.22
160	52.15	55.53	60.74	60.98
200	49.93	55.58	57.94	57.27

速度级曲线图。由图可知,在8~63 Hz范围内,2~4楼的振动加速度级随频率的增大而逐渐增大;在63~100 Hz范围内,2~4楼的振动加速度级随频率的增大而逐渐减小;在100~125 Hz范围内,2~4楼的振动加速度级随频率的增大而逐渐增大;在125~200 Hz范围内,2~4楼的振动加速度级随频率的增大而逐渐减小。在8~50 Hz范围内,1楼的振动加速度级随频率的增大而逐渐增大;在50~200 Hz范围内,1楼的振动加速度级随频率的增大而逐渐减小。

4个楼层中,4楼的振动加速度级最大;2~4楼的局部峰值出现在中心频率为125 Hz处,2~4楼的振动加速度级局部峰值分别为58.92、63.40及64.22 dB,一楼没有出现局部峰值。

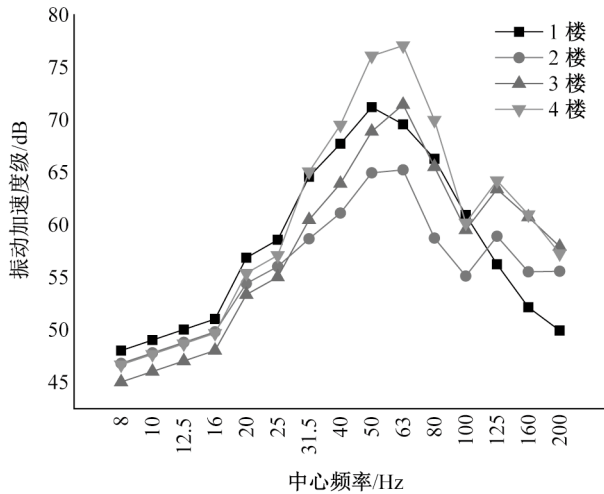


图3 1/3倍频程振动加速度级(线性计权)

Fig.3 1/3 octave vibration acceleration level (linear weighting)

3 Z计权

表2为Z计权下各楼层的1/3倍频程分频率振动加速度级。4个楼层的全局峰值出现在50~63 Hz频率范围内;1楼的振动加速度级最大值在中心频率为50 Hz处取得,为59.02 dB;2楼的振动加速度级最大值在中心频率为50 Hz处取得,为52.77 dB;3楼的振动加速度级最大值在中心频率为63 Hz处取得,为56.84 dB;4楼的振动加速度级最大值在中心频率为50 Hz处取得,为63.90 dB。

图4为Z计权下各楼层的1/3倍频程振动加速度级曲线图。由图可知,在16~50 Hz范围内,1楼、2楼及4楼的振动加速度级随频率的增大而逐渐增大,在50 Hz处达到峰值;在50~200 Hz范围

表2 1/3倍频程分频率振动加速度级(Z计权)

Tab.2 1/3 octave vibration acceleration level /dB

中心频率 /Hz	(Z weighting)			
	(单位: dB)			
1楼	2楼	3楼	4楼	
16	48.75	47.53	45.76	47.40
20	52.94	50.49	49.43	51.47
25	52.78	50.23	49.23	51.30
31.5	56.73	50.82	52.62	57.20
40	57.67	51.08	53.88	59.47
50	59.02	52.77	56.71	63.90
63	54.96	50.63	56.84	62.46
80	48.73	41.18	47.97	52.41
100	39.89	34.09	38.48	39.15
125	30.90	33.57	38.05	38.87
160	21.24	24.62	29.83	30.07
200	13.55	19.20	21.55	20.89

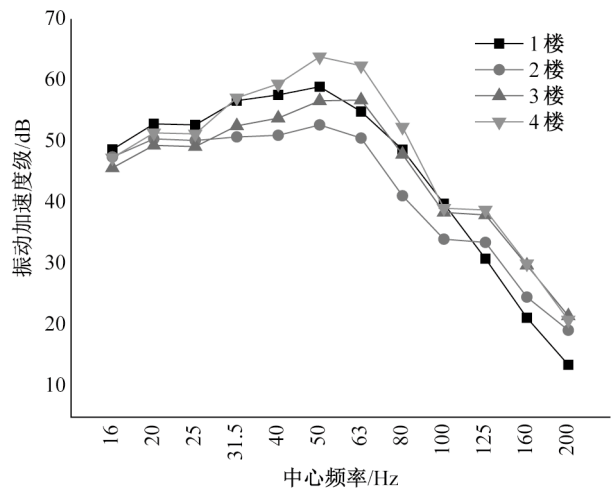


图4 1/3倍频程振动加速度级(Z计权)

Fig.4 1/3 octave vibration acceleration level (Z weighting)

内,2~4楼的振动加速度级随频率的增大而逐渐减小。在16~63 Hz范围内,3楼的振动加速度级随频率的增大而逐渐增大,在63 Hz处达到峰值;在63~200 Hz范围内,3楼的振动加速度级随频率的增大而逐渐减小。4个楼层中,4楼的振动加速度级最大;4个楼层都没有出现局部峰值。

4 振动的传递特性

特征频率下振动传递特性如图5—图6所示,其中图5为特征频率下(线性计权)振动传递特性,图6为特征频率下(Z计权)振动传递特性。由图5—图6可知,在线性计权和Z计权下,振动从1楼至4楼的传播过程中,中心频率为50 Hz和63 Hz

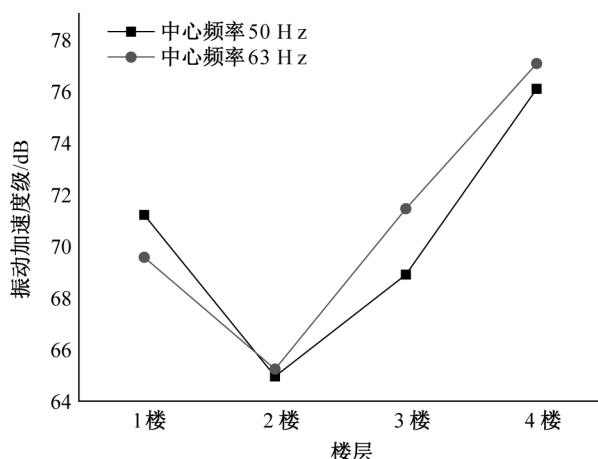


图5 特征频率下振动的传递特性（线性计权）

Fig.5 Transmission characteristics of vibration at characteristic frequency (linear weighting)

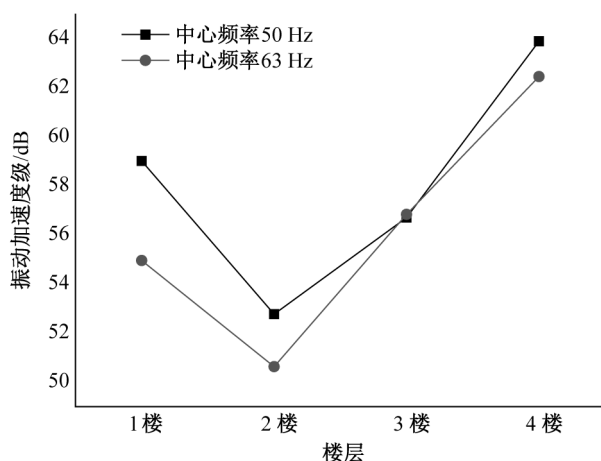


图6 特征频率下振动的传递特性（Z计权）

Fig.6 Transmission characteristics of vibration at characteristic frequency (Z weighting)

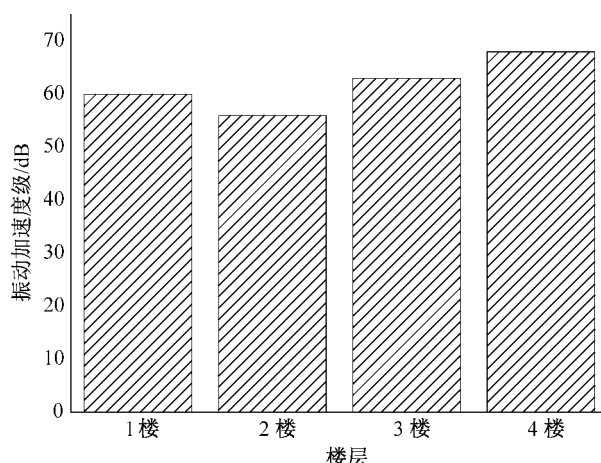


图7 等效连续Z振级传递特性

Fig.7 Transmission characteristics of equivalent continuous Z vibration level

频率段的振动加速度级均呈现先减小后增大的趋势，在2楼处达到最小，在4楼处达到最大。

图7为等效连续Z振级传递特性。由图可知，振动从1楼至4楼的传播过程中，等效连续Z振级也呈现先减小后增大的趋势，在2楼处达到最小，在4楼处达到最大。

表3—表4为不同车次列车通过时4~200 Hz范围内，分别在线性计权及Z计权下每一楼层3个测点的振动加速度总极值。表3—表4所呈现出的4个楼层的振动加速度级的变化规律与图5—图7一致，均呈现随着楼层高度的增加，振动加速度级先减小再增加的趋势，且振动加速度级的最小值出现在2楼，最大值出现在4楼。

表3 振动加速度级总极值（线性计权）

Tab.3 Total vibration level extremum

(linear weighting)

(单位: dB)

车次	1楼	2楼	3楼	4楼
1	70.72	64.98	74.86	81.07
2	70.42	66.52	76.62	80.28
3	72.10	67.07	77.62	81.29
4	70.63	65.68	75.45	82.54
5	69.03	63.96	74.48	80.45
6	70.01	65.65	78.03	81.10
平均值	70.49	65.64	76.18	81.12

表4 振动加速度级总极值（Z计权）

Tab.4 Total vibration level extremum

(Z weighting)

(单位: dB)

车次	1楼	2楼	3楼	4楼
1	60.17	55.71	62.33	68.47
2	60.15	56.78	64.10	67.54
3	60.00	56.12	64.43	68.20
4	60.37	56.37	63.18	69.72
5	58.74	54.68	62.27	67.77
6	59.58	56.07	64.86	68.07
平均值	59.83	55.95	63.53	68.30

5 模态分析

利用软件 ABAQUS 建立如图8所示的建筑物有限元模型。建筑物采用砖混结构，具体参数如下：墙体密度为 1900 kg/m^3 ，弹性模量为 2.4×10^9 ，泊松比 0.18；楼板密度为 2500 kg/m^3 ，弹性模量为 3.25×10^{10} ，泊松比 0.2。边界条件为楼底板完全约束。

对建筑结构易受影响的频率范围进行模态分析，可以预测结构在指定频段内受到外部激励时的振动响应。本文采用分块 Lanczos 法对建筑结构进行模

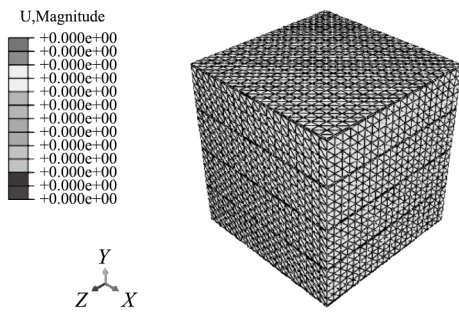


图8 建筑物基态模态

Fig.8 Ground state modes of the building

态分析, 其前 10 阶模态的频率汇总于表 5, 其中, 偶数阶模态图如图 9—图 13 所示。

图 14 为第六阶模态剖面图。由图 11 和图 14 可知, 在第六阶模态即频率为 62.09 Hz 时, 模态表现为 4 楼的垂向振动最大, 说明在 63 Hz 左右处, 建筑物 4 楼发生了共振现象, 这一规律正好与上文中图 5—图 7 和表 1—表 4 所得结论相一致, 即 4 楼的全局峰值出现在频率为 63 Hz 处, 且四个楼层的振动加速度级峰值中, 4 楼的振动加速度级峰值最大。

表 5 前十阶模态的频率汇总

Tab.5 The sum of frequencies of the 1~10 modes

模态阶数	1	2	3	4	5
频率 /Hz	15.62	15.86	27.93	59.16	61.31
模态阶数	6	7	8	9	10
频率 /Hz	62.09	64.63	65.24	71.61	72.01

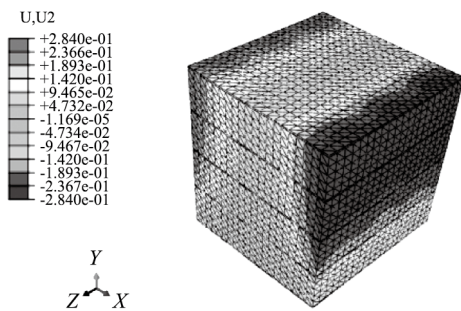


图9 第二阶模态 (频率 15.86 Hz)

Fig.9 The second order modes (frequency 15.86 Hz)

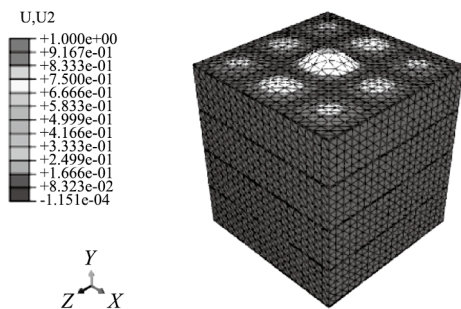


图10 第四阶模态 (频率 59.12 Hz)

Fig.10 The fourth order modes (frequency 59.12 Hz)

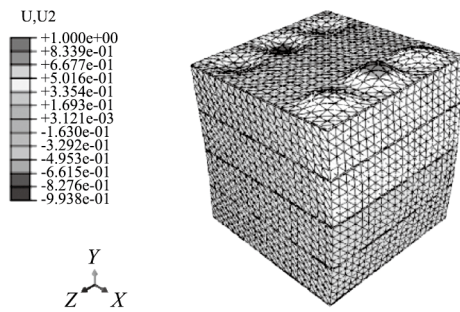


图11 第六阶模态 (频率 62.09 Hz)

Fig.11 The sixth order modes (frequency 62.09 Hz)

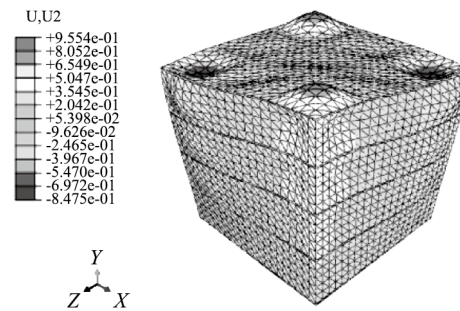


图12 第八阶模态 (频率 65.24 Hz)

Fig.12 The eighth order modes (frequency 65.24 Hz)

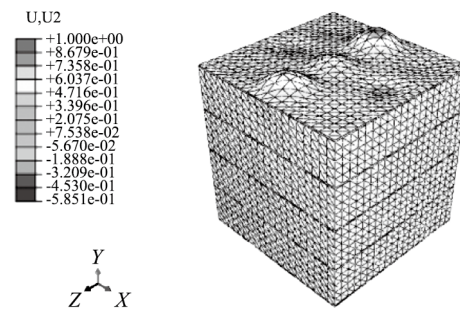


图13 第十阶模态 (频率 72.01 Hz)

Fig.13 The tenth order modes (frequency 72.01 Hz)

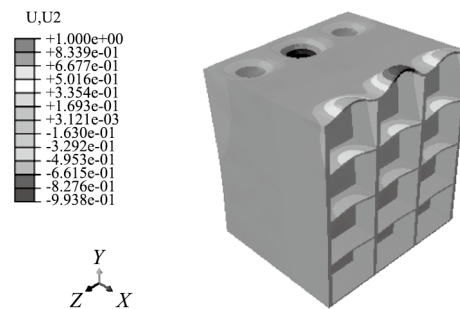


图14 第六阶模态剖面图

Fig.14 The sixth order modal section

6 结论

1) 在线性计权下, 4 个楼层的全局峰值均出现在 50~63 Hz 频率范围内, 2~4 楼的局部峰值出现在中心频率为 125 Hz 处, 一楼没有出现局部峰值。在 Z 计权下, 4 个楼层的全局峰值也均出现在 50~63 Hz

频率范围内,但4个楼层都没有出现局部峰值。

2) 振动从1楼至4楼的传递过程中,中心频率为50 Hz和63 Hz频率段的振动加速度级均呈现先减小后增大的趋势,在2楼处达到最小,在4楼处达到最大;等效连续Z振级也呈现先减小后增大的趋势,在2楼处达到最小,在4楼处达到最大。

3) 模态分析表明,在列车经过时,在频率为63 Hz时,4楼发生了共振现象,所以4楼的全局峰值出现在频率为63 Hz处,且四个楼层的振动加速度级峰值中,4楼的振动加速度级峰值最大。

4) 在对该栋建筑采取减振措施时,要重点减小50~63 Hz频率范围内的振动,在列车经过时,由于4楼在63 Hz频率附近容易发生共振,所以4楼是该栋建筑采取减振措施的重点楼层。

参考文献:

- [1] 扈士琰. 地铁暗挖车站近接既有结构施工响应分析[J]. 河北工程大学学报:自然科学版, 2015, 32(1): 19-22.
- [2] 王萍. 地铁基坑开挖中建筑物差异沉降影响分析[J]. 河北工程大学学报:自然科学版, 2014, 31(1): 25-28.
- [3] KOSTLI K P, JONES C J C, THOMPSON D J. Experimental and theoretical analysis of railway bridge noise reduction using resilient rail fasteners in Burgdorf, Switzerland[A]. Noise and Vibration Mitigation, NNFM 99, 2008: 208-214.
- [4] DAVID THOMPSON. Sound and vibration of rail transit[M]. Southampton: Southampton University Press, 2008: 50-320.
- [5] 唐吉意, 林平. 城市轨道交通全封闭声屏障近地面降噪性能分析[J]. 齐齐哈尔大学学报:自然科学版, 2017, 33(5): 40-44.
- [6] BEWES O G, THOMPSON D J, JONES C J C, et al, Calculation of Noise from Railway Bridges and Validation of a Rapid Calculation Model[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 293(3-5): 933-943.
- [7] 唐吉意, 林平. 宁波地铁1号线高架桥近远场噪声辐射研究[J]. 机械设计与制造工程, 2017, 46(8): 114-118.
- [8] MORITOH Y, ZENDA Y, NAGAKURA K. Noise Control of High Speed Shinkansen[J]. Journal of Sound and Vibration, 1996, 193(1): 319-334.
- [9] 唐吉意, 罗雁云, 林平. 地铁高架桥上部结构及整体道床振动特性研究[J]. 河南科学, 2017, 35(7): 1090-1095.
- [10] LI Q, XU Y L, WU D J. Concrete bridge-borne low-frequency noise simulation based on train-track-bridge dynamic interaction[J]. Journal of Sound and Vibration, 2012, 331(10): 2457-2470.
- [11] 罗雁云, 唐吉意, 林平. 地铁高架箱型梁正下方噪声辐射特性试验分析[J]. 四川环境, 2017, 36(3): 101-105.
- [12] THOMPSON D. But are the trains getting any quieter[C]// ICSV14, Cairns, Australia, 2007: 1-20.
- [13] HANSAKA M, MAMADA S, SATO D, et al. Development of rail noise isolating material (RNIM) [M]. Noise and vibration mitigation for rail transportation systems. Springer Japan, 2012: 215-220.
- [14] 陈海滨. 地铁振动引起的建筑物内二次结构噪声影响实例分析[J]. 资源节约与环保, 2015(8): 78-83.
- [15] 赵才友. 高架轨道交通环境振动与噪声关键技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [16] 唐吉意, 林平, 罗雁云. 城市轨道交通对建筑物室内噪声辐射试验研究[J]. 青岛理工大学学报, 2017, 38(4): 95-101.
- [17] 谷爱军, 张宏亮, 李文会, 等. 城市轨道交通高架线噪声控制问题分析[J]. 都市快轨交通, 2013, 26(4): 6-9.
- [18] 潘晓岩. 城市轨道交通二次结构噪声执行标准及验收监测中几点问题的探讨[J]. 铁道标准设计, 2012(11): 114-117.
- [19] 康波. 地铁上方建筑物振动及二次噪声辐射分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.

(责任编辑 王利君)