

引用本文:谢伟平,袁 葵,孙亮明. 地铁车辆段上盖建筑车致振动试验[J]. 建筑科学与工程学报,2020,37(3):99-107.

XIE Wei-ping, YUAN Kui, SUN Liang-ming. Train-induced Vibration Test of Metro Depot Over-track Buildings[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(3): 99-107.

DOI:10.19815/j.jace.2019.04038

地铁车辆段上盖建筑车致振动试验

谢伟平,袁 葵,孙亮明

(武汉理工大学 土木工程与建筑学院,湖北 武汉 430070)

摘要:为了研究地铁车辆段上盖建筑车致振动机理,对杭州某地铁车辆段试车线上盖建筑的振动进行了试验研究。基于环境激励分析了上盖建筑楼板的动力特性,研究了不同车速下地铁车辆段上盖建筑的车致振动特性和传播规律,结合中国环境振动评价标准对建筑物室内的振动舒适度进行了评价。结果表明:上盖建筑楼板一阶频率在 28~46 Hz 之间,阻尼比为 0.3%~1%;上盖建筑物的车致振动主要分布于 0~140 Hz 之间,10~25 Hz 以内的低频振动表现为结构的整体振动,沿层高有放大的趋势,不同车速下楼板振动频率分布类似,都主要集中在楼板的自振频率附近;随列车加载车速的降低,地铁上盖建筑中的整体振动强度呈下降趋势,部分楼板的最大 Z 振级及分频振级均出现“反弹”现象;试车线列车以超过 35 km·h⁻¹ 的车速运行时上盖建筑中楼板的实测最大 Z 振级超过了标准限值,为保证试车线列车功能同时提高上盖建筑的振动舒适度,有必要在已有轨道减振的基础上对上盖建筑物进一步采取减振隔振措施。

关键词:地铁车辆段上盖建筑;模态识别;车致振动;时频特性;振动加速度

中图分类号:TU311.3

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2020)03-0099-09

Train-induced Vibration Test of Metro Depot Over-track Buildings

XIE Wei-ping, YUAN Kui, SUN Liang-ming

(School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China)

Abstract: In order to study the vibration mechanics of metro depot over-track buildings caused by the train, the vibration test of the metro depot over-track building on the test line in Hangzhou was carried out. Based on the environmental excitation, the dynamic characteristics of the superstructure floor were analyzed, and the vibration characteristics and propagation laws of the subway superstructure floor at different train speeds were studied. The vibration comfort degree of building interior was evaluated according to the Chinese environmental vibration evaluation standard. The results show that the first-order frequency of the floor of the over-track building is between 28-46 Hz, and the damping ratio is 0.3%-1%. The train-induced vibration of the over-track building is mainly distributed between 0-140 Hz, and the low frequency vibration within 10-25 Hz is the overall vibration of the structure, and there is a trend of amplification along the floor

收稿日期:2019-06-08

基金项目:国家自然科学基金项目(51178365)

作者简介:谢伟平(1965-),男,江西赣州人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:wpxie@sina.com。

通信作者:孙亮明(1983-),男,湖南益阳人,副教授,工学博士,E-mail:sunliangming@126.com。

height. The distribution of floor vibration frequency is similar under different train speeds which is mainly concentrated near the floor vibration frequency. With the decrease of train loading speed, the overall vibration intensity of over-track building decreases, and the maximum Z vibration level and the frequency division vibration of some floors are rebounding. When the train on the test line runs at a speed of more than $35\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, the measured maximum Z vibration level of the floor in over-track building exceeds the standard limit value, so as to ensure the test function of the test line and improve the vibration comfort of the over-track building. It is necessary to take further vibration reduction and isolation measure for the metro depot over-track building on the basis of the existing track vibration reduction.

Key words: metro depot over-track building; modal identification; train-induced vibration; time-frequency characteristic; vibration acceleration

0 引言

城市轨道交通具有运载效率高、安全、便捷、环保等优点,近年来在中国得到快速发展。与此同时,地铁列车引起的振动问题日益严重,受到广泛关注。国内外学者通过实测与数值分析的方法对此进行了大量研究,相关的工作主要集中于地铁邻近建筑物振动及控制方面^[1-6]。

地铁车辆段是列车停放、维护的场所,利用地铁车辆段上部空间进行物业开发,可提高城市土地资源的利用效率,发挥地铁沿线的交通优势。由于地铁车辆段列车运行于上部结构的立柱之间,诱发的振动直接经过立柱传播到上盖建筑物中,传播过程中振动衰减较小而且包含了丰富的高频振动,由此带来的振动问题非常突出,成为制约地铁车辆段上盖物业发展的瓶颈之一。对于地铁上盖物业的振动舒适度问题,目前相关的研究较少。何卫等^[7]对地铁车辆段各区域的振源特性进行了研究,对比了车辆段咽喉区、运用库和试车线等区段的振源特性,结果表明,咽喉区和试车线的列车振动远大于运用库等区段。Zou 等^[8-9]通过实测研究了运用库上盖建筑和试车线地面与周边建筑物的振动衰减规律。谢伟平等^[10-12]从结构精细化模型建立、边界条件处理以及荷载输入等方面研究了地铁上盖物业车致振动数值分析方法,讨论上盖建筑中的振动传播规律与振动舒适度问题,并开发了一种新型厚层橡胶隔振支座对车辆段上盖建筑的振动进行控制,对其减振效果进行了分析。

上述对地铁上盖物业车致振动问题的研究已经取得一定成果,然而数值方法研究得出的规律和结论有必要通过实测进行对比验证,而相关的实测主要集中在车速较低的检修库、运用库等区段。地铁

试车线列车运行车速快,其上盖区域物业开发项目极少,本文通过现场试验的方法分析了不同车速下试车线上盖建筑物车致振动机理、传播规律以及振动舒适度问题。试车线列车加载车速可控,试验结果具有代表性,是对车辆段振动实测研究的补充和完善,试验结果可与数值模拟结果进行对比验证,试验结论可用于指导车辆段上盖建筑的设计及进一步减振降噪技术的研究。

1 试验概况

测试所在的地铁车辆段可分为咽喉区、试车线和运用库等主要区段,其中试车线轨道全长约 1.3 km ,全程铺设减振道床垫,道床构造如图 1 所示,试车线上运行杭州地铁一号线空载 B 型列车,6 辆编组,总长 120 m ,试车线列车最大设计时速为 $80\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,夜间最大运行车速度为 $60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

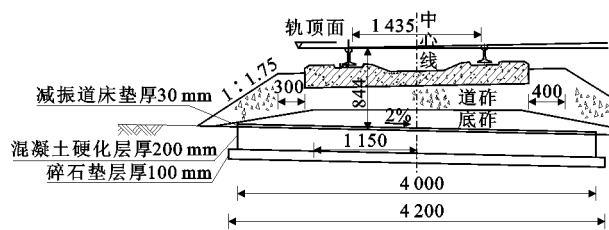


图 1 试车线减振道床垫预应力混凝土枕碎石道床
(单位:mm)

Fig.1 Prestressed Concrete Pillow Gravel Ballast with Cushion for Vibration Reduction Track of Test Line (Unit:mm)

地铁车辆段试车线上盖建筑测点布置如图 2 所示,环境激励下楼板 b5 竖向加速度时程曲线如图 3 所示。试车线以上 $8.3\sim13.5\text{ m}$ 的夹层为汽车停车场和商业区,楼板覆土夹层厚 1.2 m ,上盖 13.5 m 以上开发了多层商品住宅,平台层楼板含覆土夹

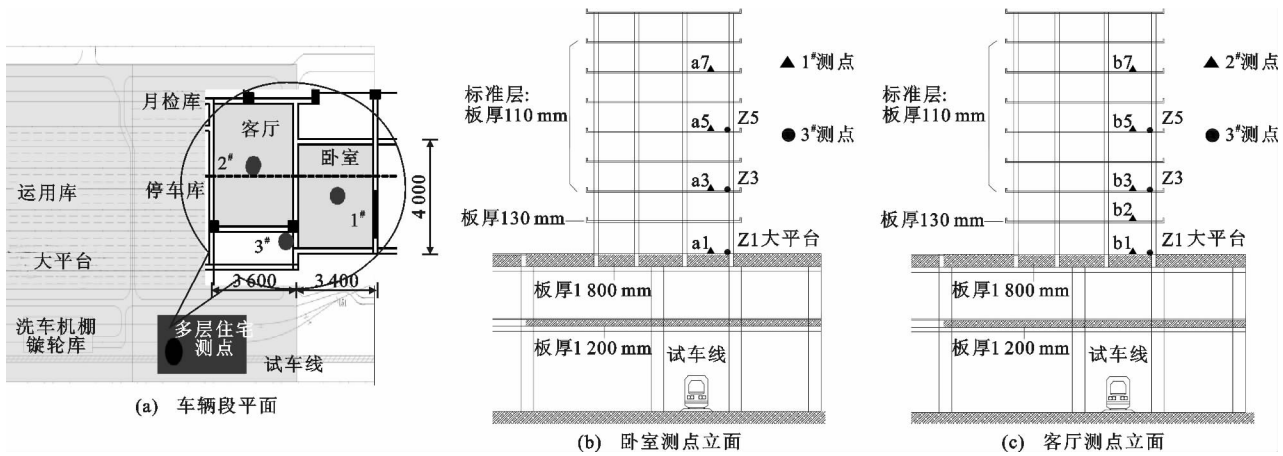


图 2 地铁车辆段试车线上盖建筑测点布置 (单位:mm)

Fig. 2 Layout of Measuring Points on Test Line of Metro Depot Over-track Buildings (Unit:mm)

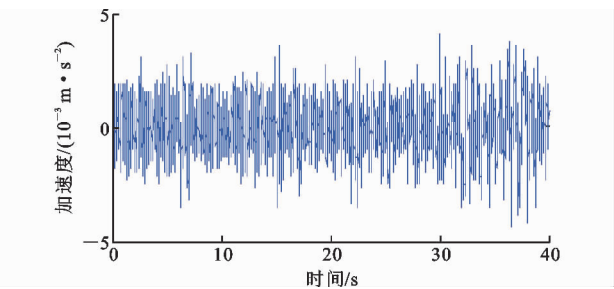


图 3 环境激励下楼板 b5 竖向加速度时程曲线

Fig. 3 Vertical Acceleration Time History Curve of Floor b5 Under Environmental Excitation

层总厚度 1.8 m。在试车线正上方多层建筑中进行测点布置,其中 1[#],2[#],3[#]考察点分别位于卧室、客厅以及柱边,用 b1 表示考察点 2[#]的 1 层,以此类推,在 b1,b2,b3,b4,b5,b7 层布置竖向加速度传感器,在考察点 1[#]的 a1,a3,a5,a7 层布置竖向、水平垂轨向加速度传感器,在考察点 3[#]的 Z1,Z3,Z5 层布置竖向加速度传感器。

本文采用的试验仪器为丹麦 B&K 3050-B-060 型土木工程振动与噪声测试系统,该系统的灵敏度为 100 V·s²·m⁻¹,测试频率范围为 0.4~6 000 Hz,为同时满足振动与噪声的测试要求,采样频率设置为 1.6 kHz。按表 1 工况进行列车加载试验,试验前采集各点的环境振动,加载时列车以设定车速来回匀速行驶,多次加载后选取干扰较小、波形完整、具有代表性的数据进行分析,列车诱发的振动主要集中在 0~200 Hz 之间,设置重采样频率为 400 Hz,B&K 测试系统易产生低频趋势项误差,采用文献[13]提出的方法去除楼板车致振动加速度信号的低频趋势项。

表 1 试验工况

Tab. 1 Test Conditions

试验工况	测点编号	加载车速/(km·h ⁻¹)
工况 1	1 [#]	60,55,50,45,40,35,30,25
工况 2	2 [#] ,3 [#]	

2 振动加速度评价指标

在环境振动分析中,振动强度一般以加速度级表示,因为振动对建筑物与人体影响实际为振动能量传递结果,加速度有效值能较好反映此特性,对于实测离散振动信号{a}在时域内的信号能量 a_{rms}为

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N a_n^2}$$
 (1)

式中:N 为离散信号的长度。

根据国家标准《城市区域环境振动标准》(GB 10070—88)[14]的规定,振动加速度振级 D_{VAL}为

$$D_{VAL} = 20 \lg(a_{rms}/a_0)$$
 (2)

式中:a₀为基准加速度,取 1×10⁻⁶ m·s⁻²。

人体对 Z 向振动最敏感,因此评价振动时采用 Z 振级 D_{VALZ},按全身振动 Z 计权因子计算 Z 计权振动加速度级。

3 试验结果分析

3.1 楼板模态参数分析

住宅楼板一般以墙、柱为边界,跨中无附加约束,自振频率与列车荷载的卓越频率相近,为分析楼板的车致振动特性,有必要先对楼板的动力特性进行识别与分析。

3.1.1 楼板自振频率的理论分析

通过解析的方法可以估算楼板的一阶自振频

率,根据《板壳振动理论》^[15],非自由边界 A 类板固有频率的计算公式为

$$\omega_{11}=\frac{\lambda_{11}^2}{a^2}\sqrt{\frac{D}{\rho h}} \tag{3}$$

$$\lambda_{11}=\sqrt{(ab)_1^4(\frac{a}{b})^4+2E_{11}F_{11}(\frac{a}{b})^2+(\alpha\alpha)_1^4} \tag{4}$$

式中: ω_{11} 为楼板一阶频率; λ_{11} 为基频系数; E_{11},F_{11} 为振型系数; $(\alpha\alpha)_1, (ab)_1$ 为一阶基频率系数, a 为楼板长边长度, b 为楼板短边长度; h 为楼板厚度; D 为板的弯曲刚度; ρ 为楼板密度。

由于墙体对楼板的约束作用较强,南北通透墙体较少,设边界为固定-自由板,根据《板壳振动理论》^[15],一阶基频率系数 $(\alpha\alpha)_1, (ab)_1$ 的取值均为 3.927, $E_{11}=F_{11}=-11.15$; 楼板混凝土强度为 C30,因此弹性模量 E 为 3×10^{10} Pa;泊松比为 0.25; 楼板密度 $\rho=2\,500\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。考虑楼板装修层的影响,楼板厚度 h 取 0.12 m,计算各层楼板的理论一阶频率如表 2 所示。

3.1.2 基于环境激励的结构模态参数识别

常用的结构模态识别方法有频域分解法、峰值拾取法、NEXT-ERA 法、随机子空间法 (SSI 法) 和时间序列法等^[16-19],其中随机子空间法 (SSI 法) 的抗噪性较强,能通过环境振动直接识别楼板的频率、阻尼比以及振型等参数。本文采用随机子空间法对测点环境振动数据进行处理,画出引入正则化功率谱的稳定图,在频域通过峰值拾取法对自功率谱函的峰值进行拾取,并结合稳定图得到楼板的自振频率,输出结构的阻尼比与振型向量等参数。

图 3 给出了楼板 b5 在环境激励下的振动加速度时程曲线,环境振动沿时间轴分布均匀,振动幅度小,表明测试场地环境条件较好且附近无明显干扰源。图 4 为楼板 b5 引入正则化功率谱的稳定图,虽然低频趋势项比较严重,但并不影响楼板的模态识别,b5 的一阶频率为 28.2 Hz,二阶频率为 48.2 Hz。计算得到其他楼板频率与阻尼比如表 2 所示。

从表 2 可以看出,楼板一阶频率理论计算值与实测值相差在 4 Hz 以内,测点所在楼板的自振频率在 28~46 Hz 之间,楼板自振频率受楼板跨度与楼板厚度的影响较大,标准层楼板受施工误差等因素的影响,一阶频率相差也在 2 Hz 以上;b5 所在楼板局部堆载了较重的装修材料,自重的增加降低了楼板的一阶频率,同时测得了二阶频率,说明楼板固定活荷载的分布对楼板动力特性的影响很大;由于环境激励下楼板的振动幅度较小,实测各层楼板的阻

表 2 地铁车辆段上盖建筑楼板模态参数
Tab. 2 Modal Parameters of Floor Slab of Metro Depot
Over-track Buildings

楼板 编号	a/mm	b/mm	板厚/mm	实测频率/ Hz	理论频率/ Hz	阻尼比/%
a1	4 500	3 600	1 800		126.70	
a3			110	46.29	42.83	0.67
a5			110	43.49	42.83	0.79
a7			110	40.54	42.83	0.55
b1	4 000	3 200	1 800		136.20	
b2			140	42.10	40.49	0.72
b3			110	34.58	32.39	0.63
b4			110	32.47	32.39	0.77
b5			110	28.20(一阶) 48.20(二阶)	32.39	0.42
b7			110	31.66	32.39	0.58

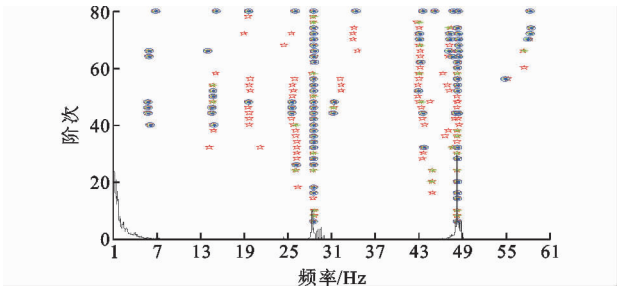


图 4 楼板 b5 引入正则化功率谱的稳定图
Fig. 4 Stability Diagram of Floor b5 with Regularized Power Spectrum

尼比在 1% 以下。

3.2 车致振动时频特性分析

列车以不同速度进行加载时各测点振动信号的时域、频域图类似,因此,选取典型测点的振动加速度信号为代表进行分析。

图 5 为列车速度 $v=60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时考察点 1[#] 各层振动加速度时程曲线。从图 5 可以看出,列车加载时各测点均有明显的加载卸载过程,上盖建筑标准层楼板的竖向振动加速度峰值为 25~30 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-2}$,平台层所在的 1 层板厚较大,竖向振动响应远小于其他楼层,各层水平垂轨向振动加速度较小,加速度峰值约为 7 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-2}$,且沿层高的衰减较小。试车线上盖区域车致振动以竖向为主,水平振动很小,因此主要对竖向振动进行分析。

图 6 为考察点 1[#] 3 层、5 层竖向和水平垂轨向加速度频谱曲线。图 7 为考察点 2[#] 3 层、5 层竖向振动加速度频谱曲线。由图 6 可以看出,楼板竖向振动频率分布非常集中,且在楼板自振频率附近出现峰值,与文献[11]采用数值分析方法得出的结论

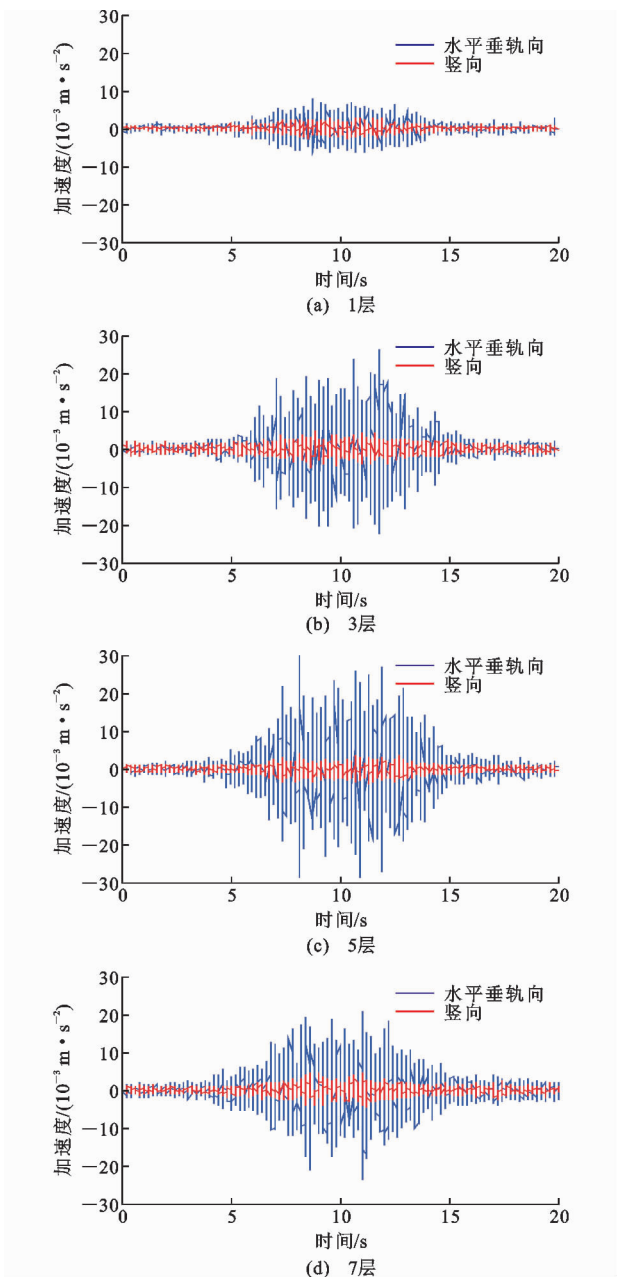


图 5 考察点 1# 加速度时程曲线 ($v=60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$)

Fig. 5 Acceleration Time History Curve of Inspection Point 1# ($v=60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$)

一致。图 8 给出了考察点 3# 3 层和 5 层竖向振动加速度频谱曲线,相比楼板,柱边测点的振动频率主要集中在低频段,在 $10\sim 20\text{ Hz}$ 出现峰值。图 9 为平台层楼板的频率分布曲线,相比标准层楼板,平台层楼板的自振频率较高,振动频率分布在 $0\sim 140\text{ Hz}$ 之间,高频振动比较丰富。

3.3 车致影响因素与传播规律

3.3.1 列车加载车速的影响

图 10 给出了不同车速下各测点的竖向 Z 振级平均值。由图 10 可知:列车以 $60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的设计

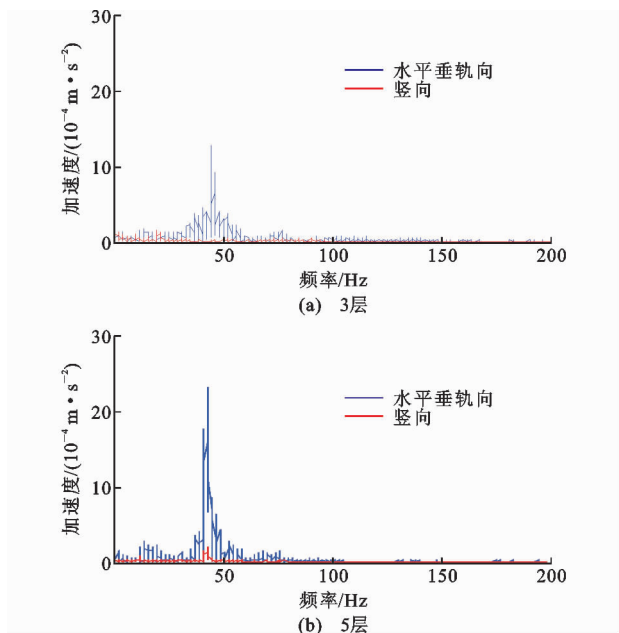


图 6 考察点 1# 竖向和水平垂轨向加速度频谱曲线 ($v=60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$)

Fig. 6 Frequency Spectrum Curves of Vertical and Horizontal Accelerations of Inspection Point 1# ($v=60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$)

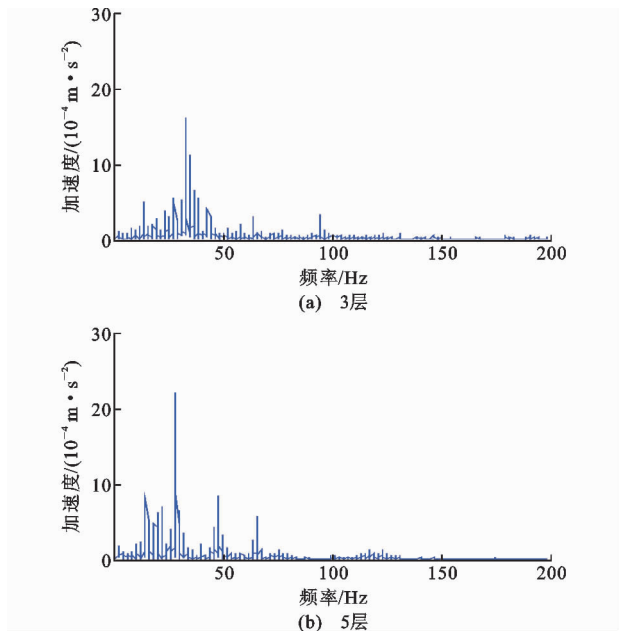


图 7 考察点 2# 竖向加速度频谱曲线 ($v=60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$)

Fig. 7 Frequency Spectrum Curve of Vertical Acceleration of Inspection Point 2# ($v=60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$)

车速运行时各楼层测点的竖向 Z 振级最大,列车加载车速从 $60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 降到 $25\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,各层楼板的 Z 振级减小了 $4\sim 9\text{ dB}$,柱边测点的 Z 振级降低了 $4\sim 6\text{ dB}$;随着加载车速的降低,地铁上盖建筑

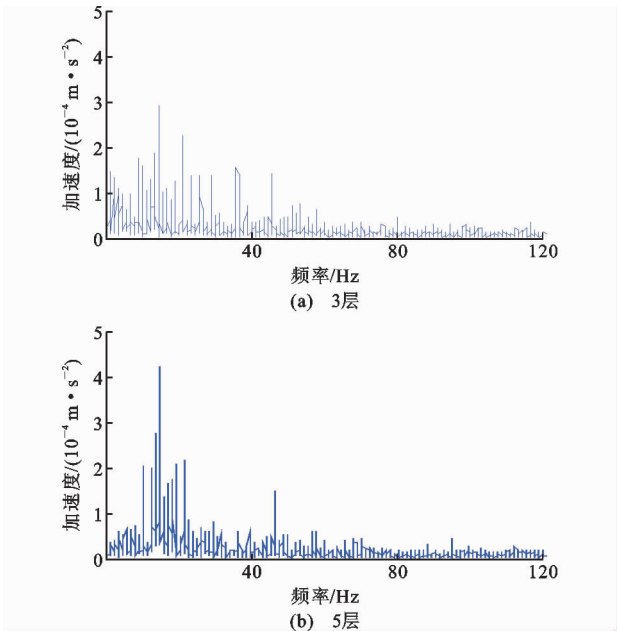


图 8 考察点 3[#] 竖向频率加速度频谱曲线
($v=60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$)

Fig. 8 Frequency Spectrum Curve of Vertical Acceleration of Inspection Point 3[#] ($v=60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$)

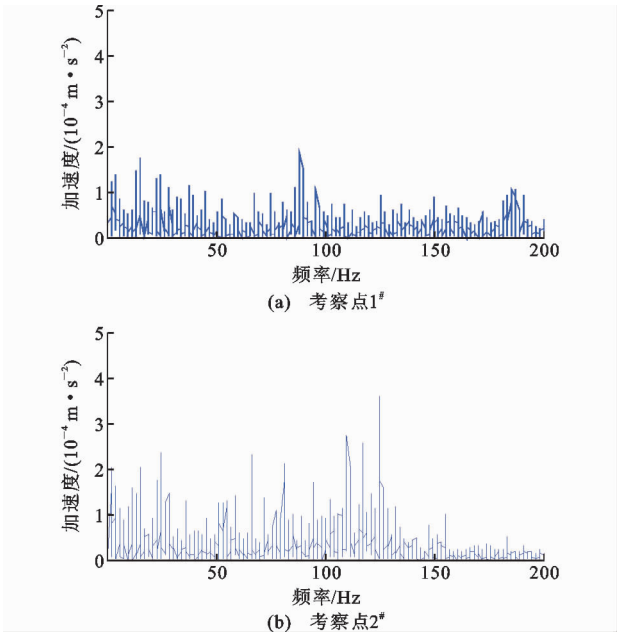


图 9 平台层楼板竖向加速度频谱曲线
($v=60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$)

Fig. 9 Frequency Spectrum Curve of Vertical Acceleration of Platform Floor ($v=60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$)

中不同部位的振级出现总体减小的趋势,部分楼板的竖向 Z 振级出现“反弹”现象;加载车速低于 $40\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 后,板厚较大的平台层和客厅二层、卧室三层楼板的竖向 Z 振级对车速的降低不再敏感,降低加载车速无法继续获得理想的减振效果。

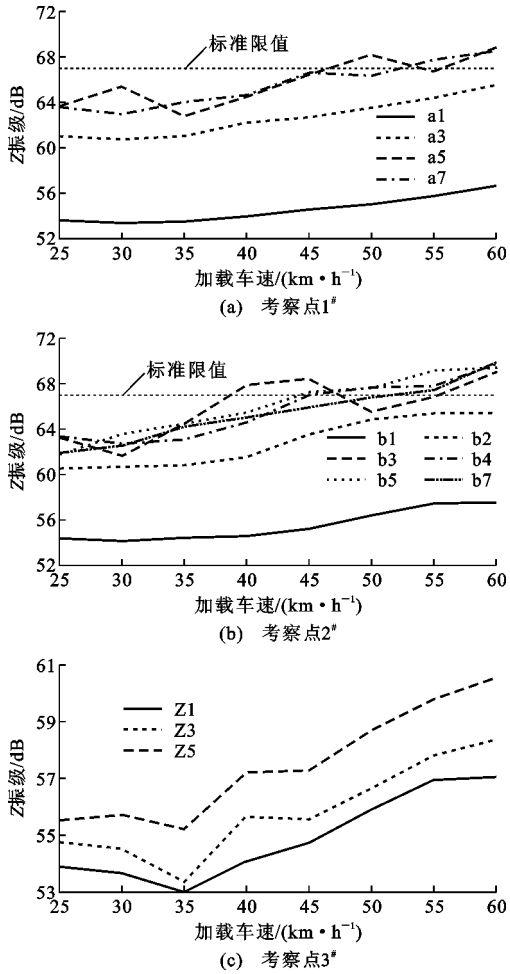


图 10 不同加载车速下各考察点平均 Z 振级
Fig. 10 Average Z-level of Inspection Points Under Different Loading Speeds

图 11 给出了不同加载车速下客厅楼板(考察点 2[#])和柱边测点(考察点 3[#])1/3 倍频程加速度振级,不同车速下各测点的 1/3 倍频程谱分布类似,柱边测点的频率主要分布在低频段 $10\sim 25\text{ Hz}$ 之间,客厅楼板的最大分频振级出现在楼板自振频率附近,楼板与柱边测点分频振级的极值在 $10\sim 25\text{ Hz}$ 之间,说明该频段主要表现为上盖建筑的整体振动。随着车速的降低,各测点分频振级整体上呈下降趋势,部分楼板最大分频振级出现明显“反弹”现象,其最大分频振级出现在较低的加载车速下。

3.3.2 楼板厚度与跨度的影响

图 10(b)中不同车速下板厚较大的 b2 加强层楼板平均 Z 振级比标准层楼板小 $0.5\sim 7\text{ dB}$;平台层楼板整体厚度达到 1.8 m ,不同车速下平台层楼板的平均 Z 振级比上部楼层楼板小 $6\sim 14\text{ dB}$,但从图 11 中 b2 和 b3 楼板的 1/3 倍频程振级来看,厚度较大的 b2 楼板峰值中心频率点为 40 Hz ,b3 楼板

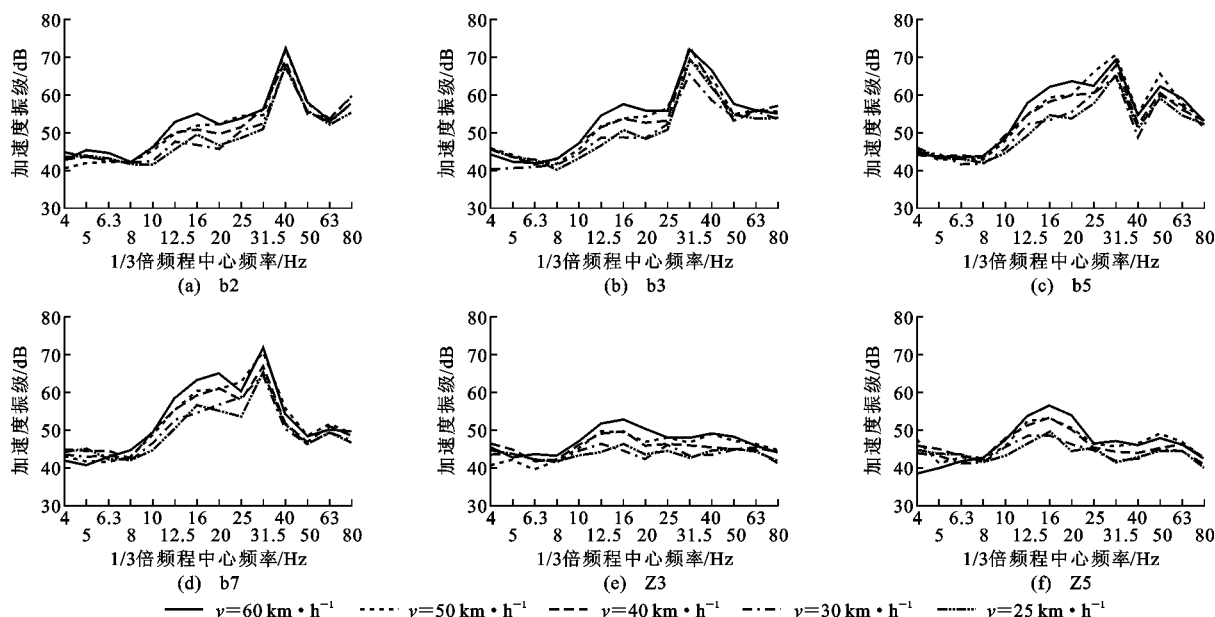


图 11 考察点 2[#], 3[#] 各层 1/3 倍频程谱

Fig. 11 1/3 Octave Spectrum of Different Floors at Inspection Points 2[#] and 3[#]

峰值中心频率为 31.5 Hz,不同车速下两者最大分频振级比较接近,部分车速下厚度较大的 b2 楼板的最大分频振级更大。

b2 与 a3 楼板跨度与板厚都相差较大,但自振频率比较接近,从图 10 还可以看出:不同车速下两者的 Z 振级同样比较接近,结合柱边与楼板振动频谱分布特性,可以证明基于楼板一阶频率提出的地铁周边建筑楼板车致振动简易预测方法^[20]同样适用于地铁上盖住宅楼板的振动预测,但对部分楼板需进一步考虑其二阶频率的影响;对比不同车速下卧室楼板与客厅楼板的平均 Z 振级,可以发现跨度较小的卧室楼板整体振动强度更低。以上结果表明,增大楼板的厚度及减小楼板的跨度来增加楼板的自振频率有利于减小楼板的振动强度。

3.3.3 振动在上盖建筑中的传播规律

从图 10 进一步可以看出,柱边测点的 Z 振级沿层高有增大的趋势,5 层柱边测点的 Z 振级比 3 层大 1~2 dB,对于多层上盖建筑而言较高层楼板的平均 Z 振级明显大于较低楼层。

图 12 给出了列车以 60 km · h⁻¹ 的车速运行时,客厅不同楼层的 1/3 倍频程振级,由图 12 可知,上盖建筑中楼板在 10~25 Hz 之间的低频振动沿层高有放大趋势,这是因为振动波在屋顶自由端发生反射与入射波进行叠加使得较高楼层的低频振动较大,建议对低层建筑的较高楼层测点进行加密布置。对比图 11 同一层楼板与柱边测点的频谱可以发现,由于柱边测点整体刚度大,板的刚度相对较小,使得

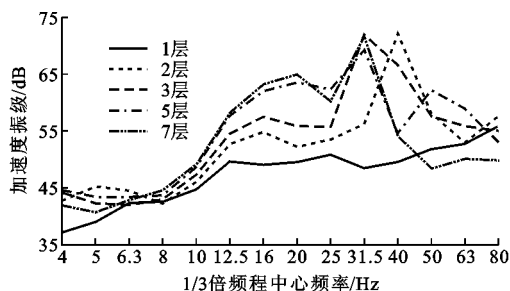


图 12 考察点 2[#] 各层 1/3 倍频程谱

Fig. 12 1/3 Octave Spectrum of Different Floors at Inspection Point 2[#]

振动由墙柱传播到楼板时在楼板自振频率附近有显著的放大效应。

3.4 试车线上盖建筑车致振动影响

中国尚未颁布与人体振动舒适度相关的振动评价标准,《城市区域环境振动标准》(GB 10070—88)从环境保护的角度规定了建筑所处环境各种类型振源诱发振动的容许限值,用该标准来评价建筑室内环境振动舒适度时,其限值略高于国外人体振动舒适度评价的相关标准^[10]。

表 3 为 GB 10070—88 规定的 Z 振级标准限值。地铁上盖住宅属于居民区,Z 振级昼间限值 70 dB,夜间限值 67 dB,试车线列车试车运行主要集中在夜间,因此取夜间限值作为试车线上盖建筑室内振动限值。

图 10(a), (b) 给出了不同车速下考察点 1[#] (卧室) 和考察点 2[#] (客厅) 各层楼板的 Z 振级分布图及限值。当车速超过 45 km · h⁻¹ 时,卧室 5 层、7 层

表 3 GB 10070—88 规定的建筑物所处环境振动限值

Tab. 3 Vibration Limits for Building Environment in GB 10070—88

区域	振动限值/dB	
	昼间	夜间
特殊住宅区	65	62
居民区、文教区	70	67
混合区、商业中心区	75	72
工业集中区	75	72
交通干线道路两侧	75	72

楼板的平均 Z 振级超过标准限值 $1\sim 2$ dB,当车速超过 $35\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,客厅 3 层及以上楼板的平均 Z 振级超过标准限值 $1\sim 3$ dB,平台层楼板的 Z 振级低于规范限值 10 dB 以上,2 层加强层楼板的 Z 振级低于规范限值 2 dB 以上。结果表明:在设计车速下,试车线上盖建筑物中的振动强度超过了规范限值,会给上部建筑中的居民带来不舒适感,严格来说当车速下降到 $35\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 以下时,地铁上盖建筑中各测点的振动都能满足规范的要求,但为了保证试车线的试车功能,在设计最大运行时速不变的情况下,有必要进一步对试车线上盖建筑采取减振措施。

4 结 语

(1)楼板的自振频率主要受跨度、楼板厚度、活荷载分布和工程施工误差等因素影响,楼板实测阻尼比小于 1%。

(2)上盖建筑的车致振动以竖向为主,建筑中 $10\sim 25\text{ Hz}$ 范围内的低频振动表现为建筑的整体振动,沿层高有放大的趋势,不同列车加载车速下上盖建筑楼板对柱边传播的振动有显著的放大效应,振动频率分布都非常集中,在楼板的自振频率附近出现峰值。

(3)上盖建筑 Z 振级沿层高整体呈增大的趋势,随着列车加载车速的降低,地铁上盖建筑中不同部位的振级呈总体减小的趋势,部分楼层楼板 Z 振级出现了“反弹”现象。增大楼板的厚度及减小楼板的跨度会增大楼板的自振频率,降低楼板的 Z 振级。

(4)列车以超过 $35\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的车速运行时上盖建筑标准层楼板的实测最大 Z 振级超过了标准限值,楼板厚度较大的平台层与加强层楼板的 Z 振级都在规范限值容许范围之内。为保证上盖建筑的居住环境及试车线的使用功能,有必要在轨道减振的基础上对上盖建筑进一步采取其他减振措施。

(5)车辆段试车线上盖建筑楼板的自振频率应高于 25 Hz ,避免放大上盖建筑在 $10\sim 25\text{ Hz}$ 之间的整体振动。实际使用过程中楼板分布有家具等活载,这会降低楼板的一阶自振频率,给楼板的振动舒适度带来不利影响,在设计及数值分析过程中应适当考虑活载等效质量的影响。

(6)平台层以下的商业夹层楼板厚度大,振动问题并不严重,地铁试车线上盖建筑中的振动强度较大,尽管试车线道床采取了减振措施,但并未达到减振设计的要求,建议采用层间隔振的方法对平台层以上的建筑进行隔振设计,对于车辆段列车运行车速较低的其他区段,可适当提高楼板厚度设计值,通过增大楼板的自振频率提高楼板的振动舒适度。

参考文献:

References:

[1] 许 锐,李寻昌,程 辉,等.基于振源-传播模型的地铁引起地面振动数值预测[J]. 建筑科学与工程学报, 2016,33(5):57-63.

XU Rui,LI Xun-chang,CHENG Hui,et al. Numerical Prediction of Ground Vibration Induced by Subway Based on Vibration Source and Propagation Model [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016,33(5):57-63.

[2] LOPES P,COSTA P A,CALCADA R,et al. Influence of Soil Stiffness on Building Vibrations Due to Railway Traffic in Tunnels: Numerical Study [J]. Computers and Geotechnics,2014,61:277-291.

[3] LOPES P,COSTA P A,FERRAZ M,et al. Numerical Modeling of Vibrations Induced by Railway Traffic in Tunnels: From the Source to the Nearby Buildings [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014,61-62:269-285.

[4] HESAMI S,AHMADI S,GHALESARI A T. Numerical Modeling of Train-induced Vibration of Near-by Multi-story Building: A Case Study [J]. KSCE Journal of Civil Engineering,2016,20(5):1701-1713.

[5] 屈文俊,夏 倩. 地铁环境下既有建筑结构的减隔振方法研究[J]. 建筑科学与工程学报,2012,29(1):8-14.

QU Wen-jun, XIA Qian. Research on Mitigation Methods of Vibrations Caused by Metro Environment for Existing Building Structures[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2012,29(1):8-14.

[6] SANAYEI M,MAURYA P,MOORE J A. Measurement of Building Foundation and Ground-borne Vibrations Due to Surface Trains and Subways[J]. En-

- gineering Structures, 2013, 53: 102-111.
- [7] 何卫, 谢伟平. 地铁车辆段列车动荷载特性实测研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(8): 132-137.
HE Wei, XIE Wei-ping. Field Measurement of the Subway Train Loading in a Car Depot[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(8): 132-137.
- [8] ZOU C, WANG Y, WANG G P, et al. Measurement of Ground and Nearby Building Vibration and Noise Induced by Trains in a Metro Depot[J]. Science of the Total Environment, 2015, 536: 761-773.
- [9] ZOU C, WANG G Y, MOORE J A, et al. Train-induced Field Vibration Measurements of Ground and Over-track Buildings[J]. Science of the Total Environment, 2017, 575: 1339-1351.
- [10] 谢伟平, 赵娜, 何卫, 等. 地铁上盖物业振动舒适度分析[J]. 土木工程学报, 2013, 46(6): 90-96.
XIE Wei-ping, ZHAO Na, HE Wei, et al. Analysis on Vibration Serviceability of Over-track Buildings[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(6): 90-96.
- [11] 谢伟平, 陈艳明, 姚春桥. 地铁车辆段上盖物业车致振动分析[J]. 振动与冲击, 2016, 35(8): 110-115.
XIE Wei-ping, CHEN Yan-ming, YAO Chun-qiao. Vibration Analysis of Train Depot Over-track Buildings Induced by Train Load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(8): 110-115.
- [12] 谢伟平, 王政印, 孙亮明. 地铁车辆段新型隔振支座的减振效果研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(10): 63-70, 93.
XIE Wei-ping, WANG Zheng-yin, SUN Liang-ming. Vibration Reduction Effect of a New Isolation Bearing for a Metro Depot[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(10): 63-70, 93.
- [13] 缪惠全, 王闯, 李杰. 加速度基线漂移频域处理方法的对比研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(13): 66-71.
MIAO Hui-quan, WANG Chuang, LI Jie. Frequency Domain Processing Methods for Acceleration Integrations Baseline Drift[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(13): 66-71.
- [14] GB 10070—88, 城市区域环境振动标准[S].
- GB 10070—88, Standard of Environmental Vibration in Urban Area[S].
- [15] 曹志远. 板壳振动理论[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1989.
CAO Zhi-yuan. Vibration Theory of Plates and Shells[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1989.
- [16] AU S K. Fast Bayesian FFT Method for Ambient Modal Identification with Separated Modes[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2011, 137(3): 214-226.
- [17] 韩建平, 郑沛娟. 环境激励下基于快速贝叶斯 FFT 的实桥模态参数识别[J]. 工程力学, 2014, 31(4): 119-125.
HAN Jian-ping, ZHENG Pei-juan. Modal Parameter Identification of an Actual Bridge by Fast Bayesian FFT Method Under Ambient Excitation[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(4): 119-125.
- [18] 李秋胜, 韩旭亮, 何运成, 等. 环境风激励下的深圳平安金融中心模态参数识别[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(3): 1-8.
LI Qiu-sheng, HAN Xu-liang, HE Yun-cheng, et al. Modal Parameter Identification of Ping'an Financial Center in Shenzhen Under Ambient Wind Excitation[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(3): 1-8.
- [19] 张笑华, 任伟新, 禹丹江. 结构模态参数识别的随机子空间法[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2005, 33(增): 46-49.
ZHANG Xiao-hua, REN Wei-xin, YU Dan-jiang. Structural Modal Parameter Identification Applying Stochastic Subspace Identification[J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science, 2005, 33(S): 46-49.
- [20] 蒋通, 李丽琴, 刘峰. 地铁引起邻近建筑物楼板的振动及简易预测方法[J]. 结构工程师, 2012, 28(6): 29-33.
JIANG Tong, LI Li-qin, LIU Feng. Analysis and Prediction of Train-induced Floor Vibration in Adjacent Buildings[J]. Structural Engineers, 2012, 28(6): 29-33.