

地铁场站咽喉区上盖建筑结构振动测试

黄建华^{1,2}, 许仁堃^{1,2}

(1. 福建理工大学 土木工程学院, 福建 福州 350118;

2. 地下工程福建省高校重点实验室, 福建 福州 350118)

摘要: 为研究地铁运行对上盖建筑的振动影响, 以福州市某轨道交通线地铁场站咽喉区上盖建筑为测试对象, 采用现场测试的方法, 对地铁场站咽喉区上盖建筑楼板中央和剪力墙脚处的振动响应特征进行分析, 并基于烦恼度模型对其舒适度作出评价。研究表明: 随着楼层数的增加, 楼板跨中铅垂向振动逐渐衰减, 而第四层为振动放大层, 其楼板及剪力墙脚的振动加速度有效值均被放大; 楼板铅垂向振幅峰值的优势频率为 40~70 Hz, 剪力墙脚铅垂向振幅峰值集中在 10 Hz 附近, 随着楼层数的增加呈现先衰减后放大的趋势, 而水平垂轨向振幅与楼层数正相关, 振幅峰值集中在 0~20 Hz 和 40~60 Hz; 楼板振动加速度级 VAL 在 1~50 Hz 随频率增加而增大, 在 50~80 Hz 随频率增加而逐渐降低, 且第一层 VAL 超出一级限值, 各铅垂向 Z 振级 VL_Z 整体上随楼层数的增加而减小; 地铁运营状态下, 地铁场站咽喉区上盖物业居住者在第一层卧室中可能会产生“轻度烦恼”的生活体验。研究成果可为地铁场站上盖建筑结构的减振设计提供参考。

关键词: 地铁场站; 上盖建筑; 咽喉区; 振动测试; 振级; 烦恼度

中图分类号: TU311.3; TU973.16 **文献标志码:** A

文章编号: 2097-3853(2024)03-0205-08

Vibration test of superstructures in metro station throat area

HUANG Jianhua^{1,2}, XU Renkun^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Key Laboratory of Underground Engineering of Colleges and Universities of Fujian Province, Fuzhou 350118, China)

Abstract: In order to study the vibration impact of subway operation on the upper buildings, taking the superstructure of the throat area of a subway station in Fuzhou City as the test object, the method of field test was adopted for an analysis of the vibration response characteristics at the central points of the superstructure building slabs and the footings of shear walls in the throat area of subway stations, and the comfort degree was evaluated based on the annoyance model. Results show that with the increase of the number of floors, vibration gradually attenuated in the middle of the floor in the lead plumb direction, while the fourth floor experienced vibration amplification, particularly the effective values of the vibration acceleration of the floor slab and shear wall foot; the dominant frequency of the floor plate's lead plumb direction amplitude peak was 40~70 Hz, while the shear wall foot's lead plumb direction amplitude peak was mainly around 10 Hz. The amplitudes showed an initial tendency of attenuation and then amplification with the increase of floors. The horizontal plumb track amplitude showed a positive correlation with the number of floors, with peak amplitude peaks concentrated mainly in the ranges of 0~20 Hz and 40~60 Hz; the vibration acceleration level VAL of the floor slabs increased with the increase of frequency in the range of 1~50 Hz but gradually decreased with the increase of frequency in the range of 50~80 Hz. The first floor VAL exceeded the first level of the limit, and the lead vertical Z vibration level VL_Z of each plumb track decreased overall as the number of floors increased; the occupants of the property above the throat area of the subway station may experience “mild annoyance” in the first-floor bedroom during subway operation. The research findings can serve as a reference for the vibration damping design of subway station superstructures.

Keywords: metro station; superstructure; throat area; vibration test; vibration level; annoyance degree

收稿日期: 2023-12-19

基金项目: 国家自然科学基金(51678153); 福建省自然科学基金(2021J011064)

第一作者简介: 黄建华(1969—), 男, 福建莆田人, 教授, 博士, 研究方向: 地铁上盖结构、地铁与隧道及地下结构与围护。

城市轨道交通因其高效、环保、安全、准时、经济等特点在我国得到快速发展,为解决地铁建设工程造价昂贵、占地面积大等问题,地铁上盖物业开发模式应运而生。然而地铁场站下方有频繁的列车进出,列车运行所产生的振动容易引起上盖建筑结构振动,进而影响人们的正常生活与工作环境质量。

针对列车运行引起的建筑振动规律问题,国内外学者主要从现场测试和数值模拟两方面展开研究,其中现场实测是最接近实际情况的方法。Masoud 等^[1]通过采集波士顿地区列车轨道地面处和邻近地铁建筑内部的振幅和频率信息,探讨地铁运行对周边建筑的振动影响;Connolly 等^[2]收集了来自比利时、法国、西班牙等 7 个欧洲国家 17 个高铁站 1 500 多个地面振动试验数据,研究土质、列车类型及列车运行速度等因素对振动水平的影响。谢伟平等^[3]在多个城市的地铁车辆段运用库内对列车振动荷载开展实测,研究地铁列车进出车辆段对上盖物业的振动影响;陈兆玮等^[4]通过对成都某建筑群现场测试掌握其地铁振动源强特征,研究地铁动荷载下土体振动的空间传播规律并评估地铁运行对建筑群的影响;周颖等^[5]对上海徐泾车辆基地试车线旁的高层隔震住宅测试,探究不同车速下地铁振动引起的上盖隔震建筑竖向振动影响。

然而现有测试多将测点布设于列车轨道地表或地铁沿线建筑物内,带上盖物业的地铁场站发展历程短,实际案例少,为此,本文以福州某地铁场站咽喉区上盖建筑为测试对象,通过对地铁咽喉区正线上方建筑楼板中央和剪力墙脚处现场实测,从时域和频域角度分析振动传播规律并作出振级评价,最后基于烦恼度模型量化地铁运行振动环境下的居住舒适度,以期对地铁场站上盖建筑结构的振动控制提供参考。

1 测试概况

1.1 地铁场站概况

福州市某轨道交通线整体呈东西走向,场站西侧紧邻 316 国道,北侧止于向莆铁路高架桥,平面呈喇叭形状,由北往南根据功能划分为 3 部分,南侧为连接车站的出入段线区,长度约 250 m,中部为咽喉区,北部为库房区及厂前区。该场站运用库区轨道为无缝线路,平交道采用现浇混凝土整体道床加嵌丝橡胶条,并设置双层非线性减振

扣件;咽喉区和出入段线区轨道采用减振垫碎石道床,平交道铺设橡胶道口板,钢轨接头采用减振接头夹板,其中咽喉区在非道岔区增设阻尼钢轨用以衰减振动和抑制噪声,并分布有众多半径为 150 m 的小半径曲线轨道。

1.2 测点布置

振动测试对象为地铁咽喉区正线上方的地上 5 层 8#住宅楼,受测建筑为独栋框架剪力墙结构,总高度为 17.800 m,一梯两户,测点位于各层 R3 户型的卧室(测点编号分别为 b、d)和客厅(测点编号为 a、c)处,如图 1、图 2 所示。测试现场及传感布置如图 3、图 4 所示。该住宅位于咽喉区,轨道由直线并行过渡到小曲率半径曲线,是地铁场站各项作业的必经之地,因此受到的振动干扰较为显著。

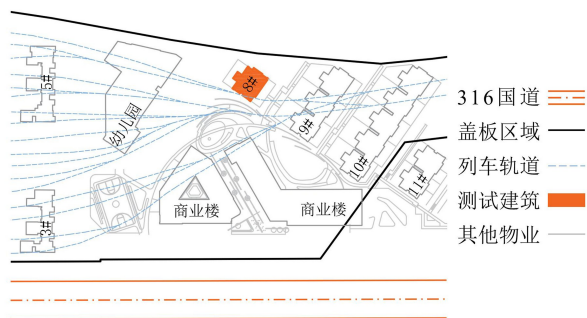


图 1 测试目标建筑区位图

Fig.1 Site plan of test target building

1.3 测试步骤

福州地铁 2 号线采用 B 型车 6 节编组,车长 118.66 m。咽喉区列车运行时速 10~25 km/h,高峰时段行车间隔 5.75 min,平峰时段为 7.83 min。实测时间选在夜间收车时段 10:30~12:30,该时段列车均回车库,频次密集,附近人流量、道路交通量和施工作业较白天少,以降低周围环境干扰振动,确保测试数据可靠性。

2 数据分析

2.1 时域分析

图 5 为典型的列车经过时楼板振动加速度全时程图。在地铁列车运行引发的振动持续时间段内,截取各个测点振动响应较为显著的 50 s,合计 64 000 个采样点,遵循波形完整、无干扰和无畸变原则,选出如图 6 和图 7 所示的各层楼板及剪力墙脚测点的振动加速度时程曲线进行初步分析。

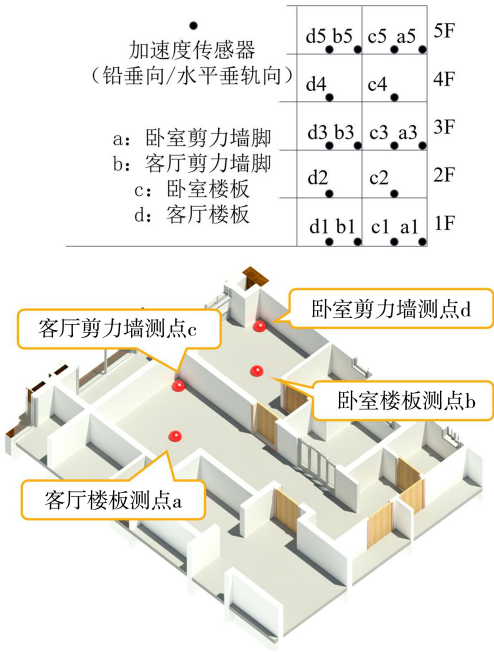


图 2 测点布置示意图

Fig.2 Measuring point arrangement



图 3 测试现场图

Fig.3 Test site

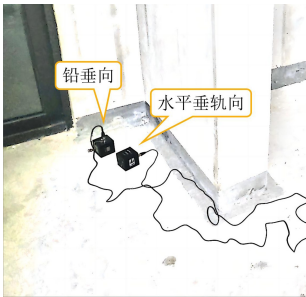


图 4 传感器布置图

Fig.4 Sensor arrangement diagram

鉴于时间对振动加速度峰值的拾取具有不可避免的随机性,为降低样本离散程度,采用加速度有效值(a_{rms})作为统计量更有利于分析振动响应随楼层数增加的传播规律。从图 6 和图 7 中计算各楼层楼板和剪力墙脚测点的 a_{rms} ,并提取振动

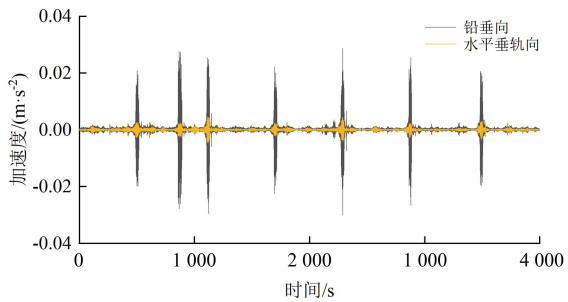
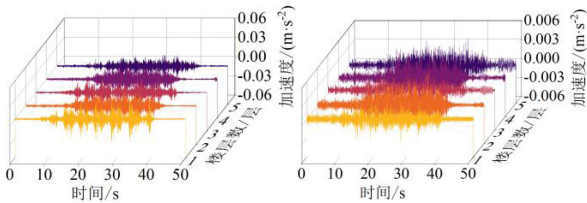
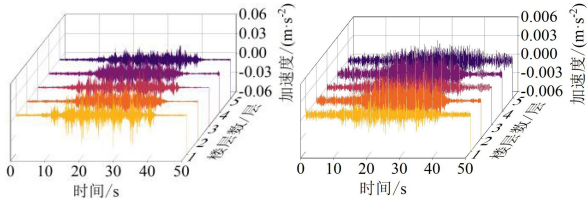


图 5 测点振动加速度全时程图

Fig.5 Full-time history graph of vibration acceleration at measurement points



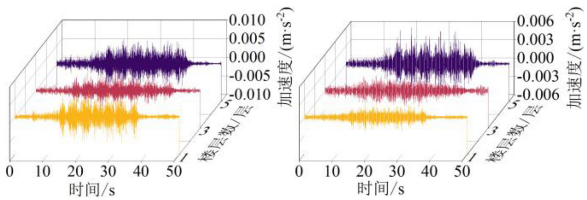
(a) 各层卧室铅垂向测点 (b) 各层卧室水平垂轨向测点



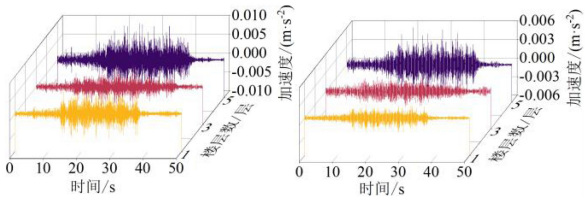
(c) 各层客厅铅垂向测点 (d) 各层客厅水平垂轨向测点

图 6 楼板测点振动加速度时程曲线

Fig.6 Time history curve of vibration acceleration at floor measurement points



(a) 各层卧室铅垂向测点 (b) 各层卧室水平垂轨向测点



(c) 各层客厅铅垂向测点 (d) 各层客厅水平垂轨向测点

图 7 剪力墙脚测点振动加速度时程曲线

Fig.7 Vibration acceleration time history curve of shear wall footing measurement points

加速度瞬时峰值(a_{max}),得出 a_{rms} 和 a_{max} 随楼层数增加的变化曲线如图 8 所示。

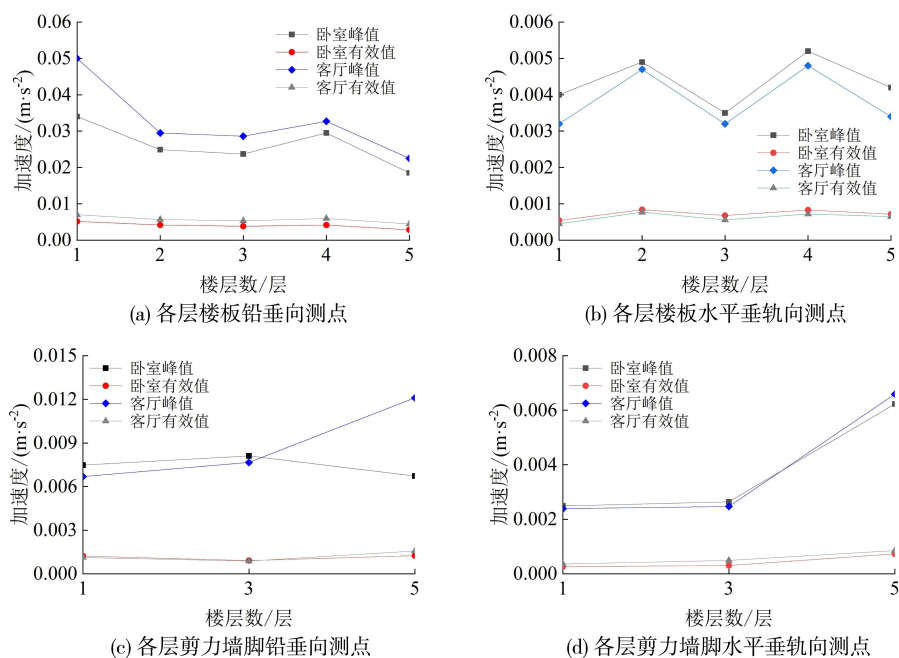


图 8 a_{rms} 和 a_{max} 随楼层数增加的变化曲线

Fig.8 Curve showing variation of a_{rms} and a_{max} with increasing number of floors

从图 7、图 8 可知：

(1) 本实测建筑为框架剪力墙结构，楼板铅垂向 a_{rms} 量级约在 $0.002 \sim 0.007 \text{ m/s}^2$ 内，水平垂轨向 a_{rms} 量级范围均在 0.001 m/s^2 内，两者相差近 10 倍，可知该地铁上盖建筑楼板振动方向主要为铅垂向，与已有研究相符合；实测得到的该建筑各层剪力墙脚铅垂向与水平垂轨向 a_{rms} 量级均在 0.001 m/s^2 内，两者处于同一量级。综合来看，对于地铁上盖框剪结构建筑，在同一楼层中，楼板中央位置振动最大，剪力墙脚的振动最小，且剪力墙脚处受到的地铁运行引起水平向和铅垂向振动响应为同一量级。

(2) 卧室和客厅楼板跨中测点的铅垂向 a_{rms} 随着楼层数的增加大体呈衰减趋势，振动加速度峰值也相应随之递减；对于各层楼板水平垂轨向测点， a_{rms} 和 a_{max} 则呈现离散特性。

(3) 剪力墙脚测点的铅垂向 a_{rms} 及对应 a_{max} 随着楼层数的增加存在一定波动；水平垂轨向 a_{rms} 及对应 a_{max} 随着楼层数的增加总体呈放大趋势， a_{rms} 分别由第一层卧室测点的 $2.59 \times 10^{-4} \text{ m/s}^2$ 和客厅测点的 $3.57 \times 10^{-4} \text{ m/s}^2$ ，放大至五层卧室测点的 $7.32 \times 10^{-4} \text{ m/s}^2$ 和 $8.53 \times 10^{-4} \text{ m/s}^2$ ，增长幅度分别约为 183% 和 139%。

(4) 综合图 8 曲线可以发现，第四层的卧室

和客厅楼板及其剪力墙脚测点的 a_{rms} 均被放大，表明第四层为振动放大层。这可能是由于该层所在区域受到的地铁运行振源激励频率与其某阶固有频率接近，引发剪力墙和楼板的振动并产生共振现象，从而导致该区域 a_{rms} 及 a_{max} 显著增大。

2.2 频域分析

采用 Hanning 窗截断信号并减少频谱泄漏，对信号加窗后的频谱按“幅值相等”原则修正，以消除加窗后幅值不一致问题，利用快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT) 对采集的加速度离散信号进行频谱分析。

由图 9 可知：

(1) 与楼板测点的水平垂轨向振动相比，铅垂向振动更为剧烈且存在显著峰值点，其振幅与水平垂轨向振幅的最大比值出现在第四层客厅的楼板测点，比值约为 14:1。因此应把楼板铅垂向振动作为研究的首要对象。

(2) 总体来看，除了第一层卧室楼板测点由于地铁振动源强的随机性和不确定性导致测试结果出现一定的离散化偏差外，第二层至第五层楼板测点的振动加速度峰值分量均显示出客厅楼板测点高于卧室楼板测点。这是由于建筑振动的峰值频率分布受楼板的自振频率与振动源强的激振频率主导，而楼板的自振频率则主要取决于其跨

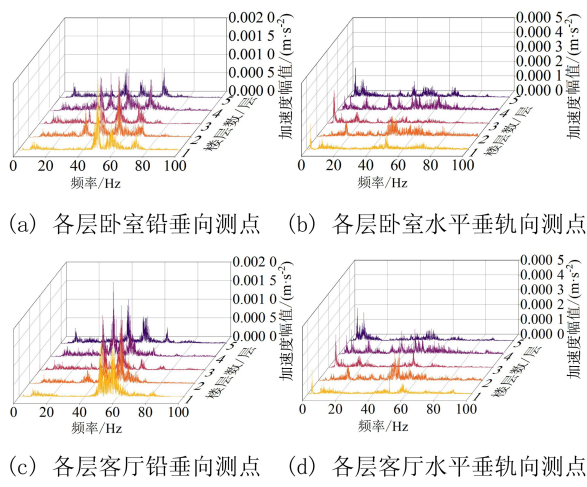


图 9 楼板测点振动加速度频域曲线

Fig.9 Frequency domain curve of vibration acceleration at floor measurement points

度和厚度。由于该建筑户型的客厅楼板跨度较大,墙体结构可对楼板产生约束作用并影响其竖向刚度,因此可得结论:测点所在楼板厚度一致时,楼板跨度越大,楼板振动幅度越大。

(3)在 0~20 Hz 频率段振幅较低,振动成分含量较少。在 10 Hz 频率附近出现振动分量幅度为 0.000 2~0.000 3 m/s² 的小波峰,这是由于测试目标建筑毗邻国道,周围交通流产生的振动对测试结果造成一定干扰,但总体来看其影响程度较小,实测数据仍然具备足够可信度。

(4)铅垂向振幅峰值同样仅在 2.1 节中所述的第四层振动放大区中出现放大现象,最大振幅峰值接近 0.002 5 m/s²,而其他楼层的振幅峰值均逐渐衰减,因此楼板测点的铅垂向振幅峰值总体趋势为随着层高数的增加先减小后放大,最后再衰减,这与前述规律相符。

(5)各层楼板测点铅垂向振幅峰值所在频率范围集中在 40~70 Hz,而孙亮明等^[6]对国内某地铁车辆段试车线上盖建筑实测发现竖向振动峰值所在频率为 40~50 Hz,邹超等^[7]对深圳某地铁车辆段试车线及咽喉区实测发现振动峰值分别出现在 63~80 Hz 和 31.5~40 Hz 频率段。可以看出,振动加速度频率成分受多方面因素共同作用,包括不同行车速度导致的列车振动荷载大小差异,地铁场站不同功能区(如出入段线区、咽喉区和运用库区等)的道床类型和列车轮轨条件,以及上盖建筑层数、高度及其楼板结构跨度与厚度等。

由图 10 可知:

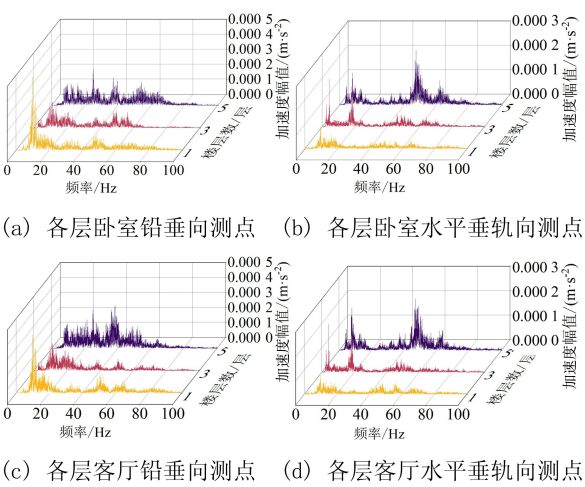


图 10 剪力墙脚测点振动加速度频域曲线

Fig.10 Vibration acceleration frequency domain curve of shear wall footing measurement point

(1)剪力墙脚测点的振幅峰值与振动加速度时程曲线类似,同样出现在第一层卧室。作为承重结构,其铅垂向振动量级约为 0.000 5 m/s²,仅为楼板测点铅垂向振动幅值量级的 1/5 倍。

(2)第一层剪力墙脚测点的铅垂向振幅峰值集中在 10 Hz 和 50 Hz 附近,其中 10 Hz 频率处的铅垂向振幅最大,并随着楼层数的增高呈现出先衰减再放大的趋势。

(3)水平垂轨向振动幅值大小与楼层数正相关,并逐渐逼近至与铅垂向振动幅值量级相同的水平,其峰值集中在 0~20 Hz 和 40~60 Hz 频率段。因此,对于上盖建筑中的剪力墙结构,应同样将水平垂轨向振动响应纳入研究和考量的范畴。

2.3 振级分析

由前述时频分析可知,对于地铁列车运行引发上盖建筑楼板的振动响应问题,铅垂向振动更显著,而对于剪力墙结构,铅垂向和水平垂轨向振动皆应共同考虑。GB/T 50355-2018《住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准》^[8]中规定,测点及拾振器应布设在室内楼板中央等人员主要活动的地面区域,因此本节主要对楼板各测点的铅垂向振动响应进行振级分析,并参照 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》^[9]要求,每次列车通过时记录分频最大振级作为该次列车通过时的测量值,以分频最大振级的算术平均值为该测点的振动评价量。将测试对象所在区域归于如表 1 所示的 1 类区域,将卧室楼板测点的振级指标限值选择为夜间时段,

客厅楼板测点的振级指标限值选择为全天时段。

表 1 Z 振级限值及对应振动期望、标准差

Tab.1 Z-vibration grade limits and corresponding vibration expectations, standard deviations

类别	适用地带	昼间振动/dB			夜间振动/dB		
		限值	μ	σ	限值	μ	σ
0 类	特殊住宅区	65	62	6	62	62	3
1 类	居民、文教区	65	62	6	62	62	3
2 类	混合区、商业中心区	70	67	6	67	67	3
	工业集中区	70	67	6	67	67	3
3 类	交通干线道路两侧	75	72	6	72	72	3
4 类	铁路干线两侧	75	72	6	72	72	3

注:表中 μ 为振动期望; σ 为振动标准差。

由图 11、图 12 和图 13 可知:

(1)除第一层楼板测点波动性较大外,其余楼层的振级在 1~50 Hz 频率范围内呈现出随着频率增加而增大的趋势,这可能是因为第一层楼板靠近地面,采集数据时因附近有行人经过和施工机械设备运行而受到一定程度的振动干扰,进而导致振级数值发生震荡。在 50~80 Hz 频率段,振动加速度级随着频率增加逐渐衰减。总体上看,各层楼板卧室和客厅测点的振动加速度级峰值基本集中在 50 Hz 频率处,由此可知,50 Hz 为地铁运行引起住宅楼板振动的优势频率。

(2)在 50 Hz 频率处,第一层楼板卧室测点的振动加速度级达到一级规范限值。规范对客厅的振动容许规定相对宽松。尽管综合来看,各层楼板各测点的振动加速度级均未超过二级限值,但显然该建筑在减小振动问题上仍有优化的空间。

(3)各层楼板测点的铅垂向 Z 振级在中间楼层小有波动,随着楼层数的增加整体呈衰减趋势,铅垂向 Z 振级峰值为 68.182 dB,出现在第一层卧室楼板测点,均未超出室内振动规范限值要求。

2.4 烦恼度评价

烦恼度定义为产生烦恼反应或者认为外界刺激“不可接受”的人的比例,是实验心理学领域确定烦恼阈限的主要依据。本小节基于张诗雨^[10]建立的室内振声烦恼率模型,利用正态分布函数 $f(x)$ 描述人对振动感受不确定性的差异分布,如

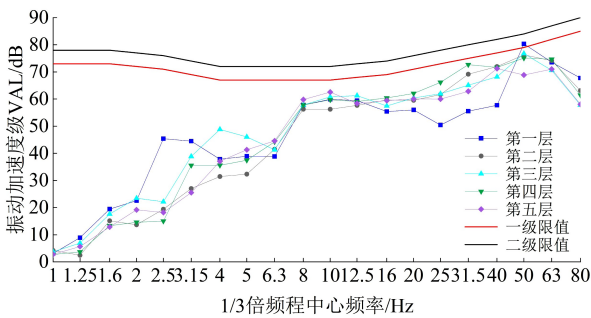


图 11 各层楼板卧室测点振动加速度级 VAL 曲线

Fig.11 Vibration acceleration levels (VAL) curve of bedroom measurement points on each floor

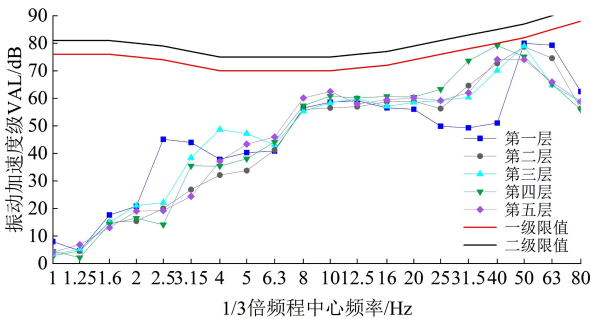


图 12 各层楼板客厅测点振动加速度级 VAL 曲线

Fig.12 Vibration acceleration level (VAL) curve of living room measurement points on each floor

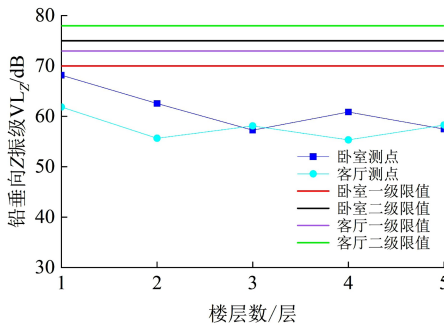


图 13 各层楼板测点铅垂向 Z 振级 VL_z 曲线

Fig.13 Vertical Z-vibration level (VL_z) curve of measurement points on each floor

式(1)所示。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

同时构造振动影响下人体烦恼度的模糊隶属度函数 $M(x)$,如式(2)所示。

$$M(x) = \begin{cases} 0 & x < VL_{\min} \\ ax+b & VL_{\min} \leq x \leq VL_{\max} \\ 1 & x > VL_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

综合考虑人体在振动环境中主观感受的随机

性和模糊性,将上述两函数进行耦合,从而建立出振动环境下的烦恼度模型,如式(3)所示。

$$A(x)=\int_{VL_{min}}^{VL_{max}}f(x)M(x)dx=$$
$$\begin{cases}0&x\leq VL_{min}\\ \int_{VL_{min}}^{VL_{max}}\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}}\exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)(ax+b)dx&VL_{min}\leq x\leq VL_{max}\\ 1&x\geq VL_{max}\end{cases}$$

(3)

式中, x 为 1/3 倍频程中心频率上的最大振级; VL_{min} 为主观烦恼反应“感觉不到”的振动阈限,当振级小于 VL_{min} 时,烦恼度为 0; VL_{max} 为主观烦恼反应“无法忍受”的振动阈限,当振级大于 VL_{max} 时,烦恼度为 1。

根据 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》^[9]和朱瑾如等^[11]在上海市地铁 8 号线振动对邻近小区居民舒适度影响的调查,如图 14 所示,可知人体的振动感应阈值下限约为 65 dB。考虑到人体对振动感知受多种因素影响,包括振源的频率、位置、方向、持续时间,以及个体差异因素等,为确保人体在振动环境下的舒适性,偏保守地将振动阈值下限 VL_{min} 设定为 60 dB,振动阈值上限 VL_{max} 设定为 100 dB。

系数 a 和 b 通过式(4)确定。

$$\begin{cases}aVL_{min}+b=0\\ aVL_{max}+b=1\end{cases}$$

(4)

可求得 $a=0.028,b=-1.714$ 。

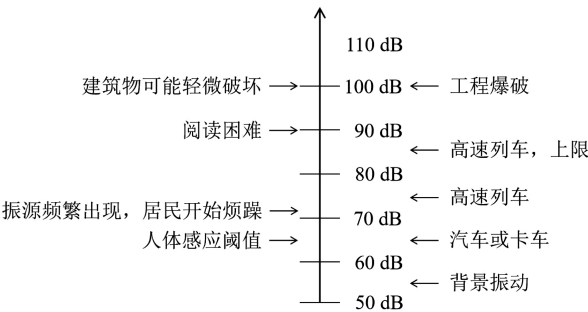


图 14 振源加速度振级与人体反应图^[11]

Fig.14 Graph of vibration acceleration levels and human body response

根据 SUN K 等^[12]提出的烦恼率模型, μ 统一取低于限值 3 dB, σ 昼间经验取值为 6,夜间经验取值为 3,如 2.3 节表 1 所示。

将求得积分值归一化,绘出各类地区夜间振动烦恼度曲线如图 15 所示。

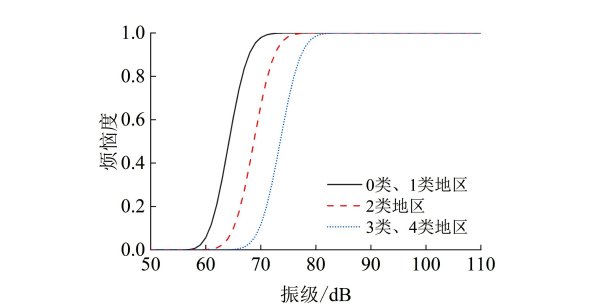


图 15 各类地区夜间振动烦恼度曲线

Fig.15 Curves of nighttime vibration annoyance levels in various regions

利用抽样调查中的划分手段,将烦恼度 A 划分为 5 个等级:[0,0.2) 时,Ⅰ级,无烦恼;[0.2,0.4) 时,Ⅱ级,略微烦恼;[0.4,0.6) 时,Ⅲ级,轻度烦恼;[0.6,0.8) 时,Ⅳ级,烦恼;[0.8,1) 时,Ⅴ级,重度烦恼。参考心理物理学评价方法,把 $A=0.6$ 作为烦恼阈限,相应将 Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ 级烦恼度归类至人类可接受烦恼的容许范围,Ⅳ级和 Ⅴ级则为无法接受的范围。通过代入 2.3 节振级分析得到的铅垂向 Z 振级 VL_z 至对应地区曲线,可得各层各楼板测点的振动烦恼度,利用插值法绘制烦恼度曲面图,如图 16 所示。

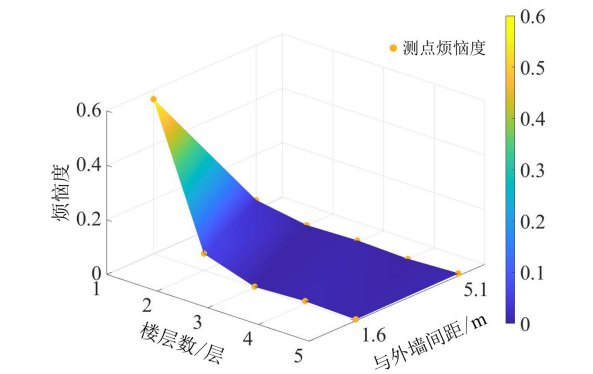


图 16 振动烦恼度三维插值曲面图

Fig.16 3D interpolated surface plot of vibration annoyance levels

- 结合图 16 数据可以看出:
- (1)第一层卧室楼板测点振动烦恼度 A 高达 0.567,为本测试建筑中烦恼度最大的测点。
 - (2)随着楼层的增加,各测点的振动烦恼度呈急剧下降趋势,且普遍低于烦恼阈限 0.6。
 - (3)测点到外墙的距离除了对第一层振动烦恼度造成明显的差异影响外,该因素对测试目标

建筑第二层至第五层的振动烦恼度影响不大。

(4)除第一层卧室楼板测点外,其他各层楼板测点烦恼度都远低于 0.1。因此,在地铁运营状态下,列车咽喉区上盖物业居住者在第一层卧室中可能会产生“轻度烦恼”的生活体验,而在该层客厅及其他楼层中则都处于“无烦恼”范畴。

3 结论

1)同一楼层中楼板中央位置振动最大,剪力墙脚的振动最小,且剪力墙脚处受到地铁运行引起水平向和铅垂向振动响应为同一量级;楼板跨中测点振动响应随楼层增加大体呈衰减趋势,第四层测点范围区域为振动放大区,地铁运行振源激励频率与该层楼板某阶固有频率接近产生共振,由此楼板及剪力墙脚振动加速度有效值均被放大。

2)厚度一定时,楼板振动幅度随跨度增加而变大;各层楼板铅垂向振幅峰值所在频率范围集中在 40~70 Hz,仅在第四层振动放大区中同样存

在放大现象,而其他楼层的振动幅值峰值均逐渐衰减;第一层剪力墙脚铅垂向振动幅值峰值集中在 10 Hz 频率附近,幅值随着楼层数增高呈现出先衰减再放大趋势;水平垂轨向振动幅值大小与楼层数正相关,峰值主要集中在 0~20 Hz 和 40~60 Hz 频率段。

3)除第一层楼板波动性较大外,其余楼层振动加速度级在 1~50 Hz 频率范围内随频率增加而扩大,在 50~80 Hz 频率段,振动加速度级随频率增加逐渐衰减,50 Hz 为地铁运行引起住宅楼板振动的优势频率;各层楼板各测点振动加速度级均未超出二级限值,但部分达到一级限值,且铅垂向 Z 振级超出规范限值要求,该建筑振动控制方面仍有优化空间。

4)地铁运营状态下,场站咽喉区上盖物业居住者在第一层卧室中可能产生“轻度烦恼”的体验感,而在该层客厅及其他楼层中则都处于“无烦恼”范畴。

参考文献:

- [1] SANAYEI M, MAURYA P, MOORE J A. Measurement of building foundation and ground-borne vibrations due to surface trains and subways[J]. Engineering Structures, 2013, 53: 102-111.
- [2] CONNOLLY D P, ALVES COSTA P, KOUROUSSIS G, et al. Large scale international testing of railway ground vibrations across Europe[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 71: 1-12.
- [3] 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.
- [4] 陈兆玮,徐鸿,尹镗,等. 地铁运行引发临近建筑群低频微振动及传递规律研究[J]. 振动工程学报, 2023, 36(6): 1623-1632.
- [5] 周颖,郭启航,张增德,等. 地铁上盖隔震建筑车致振动实测与模拟分析[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(9): 83-92.
- [6] 孙亮明,李国豪. 地铁车辆段试车线诱发上盖住宅振动的实测研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(22): 90-96.
- [7] 邹超,陈颖,陶子渝,等. 地铁车辆段上盖建筑水平向振动特性与预测方法研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(7): 282-289.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准: GB/T 50355—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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: JGJ/T 170—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [10] 张诗雨. 地铁引发砖混结构振声响应预测和联合评价研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2022.
- [11] 朱瑾如,钱程,潘雨桐,等. 地铁振动对建筑物及人体舒适度影响的研究[J]. 结构工程师, 2017, 33(5): 125-134.
- [12] SUN K, ZHANG W, DING H P, et al. Embedding human annoyance rate models in wireless smart sensors for assessing the influence of subway train-induced ambient vibration[J]. Smart Materials and Structures, 2016, 25(10): 105023.

(责任编辑: 陈雯)