

双层车辆段上盖建筑振动及结构噪声特性分析*

农兴中¹, 罗信伟¹, 冯青松², 陈艳明², 余超², 刘庆杰²

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司 广州, 510010)

(2. 华东交通大学铁路环境振动与噪声教育部工程研究中心 南昌, 330013)

摘要 为研究双层车辆段地铁运行引发的垂向振动沿上盖建筑物的传播规律及二次结构噪声问题,介绍了横岗双层车辆段咽喉区断面及上盖建筑的现场测试。采用傅里叶变换、传递损失以及1/3倍频谱等方法研究了振源特性,在此基础上,通过构建线性拟合函数和互功率谱密度函数,分析了上盖结构振动与室内二次结构噪声的关系。分析结果表明:由于高频振动经过土体衰减迅速,在80 Hz以上频段,车辆段内1层承重柱振动加速度级小于2层承重柱;振动沿建筑物传至顶层时,入射波与反射波的叠加作用使得顶层振动能量放大;建筑物二次结构噪声声压主频在100 Hz以下,峰值出现在40 Hz附近,且预测建筑物中容易激发的噪声频段在40~60 Hz;楼板振动辐射噪声对室内二次结构噪声贡献主要在40 Hz附近。综上,建议着重关注振动沿上盖建筑传递在40 Hz处的响应情况。

关键词 双层车辆段;咽喉区;传递规律;二次结构噪声;相关性分析

中图分类号 TH113;U231

引言

我国正大力推动轨道交通发展^[1],地铁作为现代城市的重要交通工具之一,具有客流量大、安全、准时、方便及舒适等优点。目前,国内外仍是以地面单层车辆段为主。双层车辆段相比地面单层车辆段,进一步提高了土地的利用率,相同的面积可以停放更多列车,在土地紧张且列车众多的大城市更加适用。虽然双层式车辆段应用前景广阔,但地铁在其中运行时对环境振动产生的影响同样不容忽视^[2-4],其中既包括振动超标,也存在振动引发的二次结构噪声超标问题。与单层车辆段不同,地铁在2层运行时,振动不经过土体衰减作用,直接由立柱上传至平台,从而对上盖建筑物内居民生活舒适度造成影响。

国内外已有关于地铁运行引起上盖建筑振动传播规律的现场测试及分析报道^[5-8]。Liu^[9]测试了某隧道不同测点的振动加速度,对位于振动敏感区建筑物内部的振动和二次结构噪声进行采集分析,研究了振源特性及其引发的地面振动传播规律。Zou等^[10-11]通过对广州和深圳某车辆段咽喉区和试车线进行现场实测,分析了振动在地面和建筑物的传播规律,得知振动能量通过立柱上传至平台时,会导致

某些频段范围内平台振动放大。冯青松等^[12]以广州某地铁车辆段为研究对象,实测了试车线与库内列车运行引起的地面振动加速度,并建立车辆段上盖建筑模型,分析双振源激励对上盖建筑物楼板振动的影响。陈艳明等^[13]实测分析了下沉式车辆段地铁振动沿盖板的传播规律,并结合国内相关标准进行了评价。

上述研究主要分析地下线路或单层车辆段上盖建筑物的振动噪声问题,而对双层车辆段车致振动沿上盖建筑传播特性及其引发的二次结构噪声问题研究较少。为掌握地面双层车辆段咽喉区振动传播规律,笔者对深圳横岗双层车辆段咽喉区及其上盖建筑进行现场实测,通过对测试结果进行频谱分析与相关性分析,研究振动传播规律及其与建筑物内二次结构噪声之间的联系。研究结果可为地铁车辆段及上盖建筑减振降噪设计提供参考依据。

1 现场测试

该双层车辆段为典型双层车辆基地,上盖大平台(平台高为12.3 m),平台之上为架空层(层高为5.6 m),架空层之上为住宅。上盖结构类型为现浇

* 国家自然科学基金资助项目(52068029, 51878277);江西省主要学科学术和技术带头人培养计划资助项目(20194BCJ22008);江西省重点研发计划资助项目(20192BBE50008)

收稿日期:2021-06-26;修回日期:2021-09-05

钢筋混凝土框支剪力墙结构,总高度为 13 层 52 m,安全等级为二级,车辆段建筑与上盖物业之间无特殊减振结构。本次测试断面布置在振动情况最复杂的咽喉区(1层为 L63 道岔,2层为 L-13 股道),3#居民楼距离咽喉区位置最近,为振动和噪声敏感区域,其中咽喉区和上盖建筑测点布置如图 1 所示。上盖建筑中的振动与噪声测点均布置在每层楼板中心位置,噪声测点距离地面 1.2 m。测试期间保证门窗紧闭,防止空气噪声造成干扰,影响测试结果。本次测试共采集 20 组列车出库时经过咽喉区的数据,并分别在 1,2 层选取 4 组测试结果良好的行车数据作为对比工况进行分析。

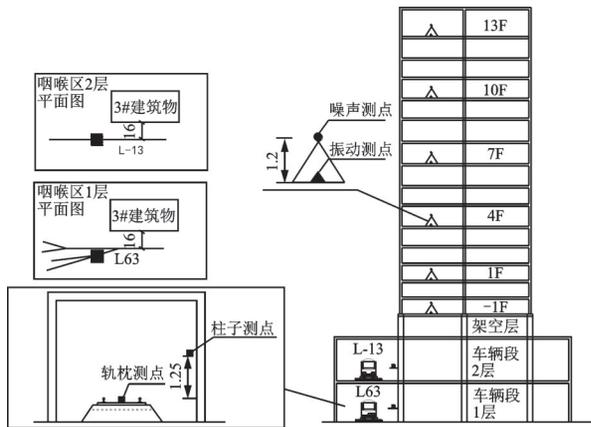


图 1 测点布置图(单位:m)

Fig.1 Schematic diagram of measuring points (unit:m)

测试采用的数据采集仪包括 NI CRIO-9031 和 SQuadriga III 测试系统、DIC24 和 NI9181 便携式数据采集仪。其中:NI CRIO-9031 用于车辆段内振动源强测试,并采用触发采样的方式进行监测;NI9181 便携式数据采集仪、SQuadriga III 和 DIC24 数据采集仪用于车辆段上盖建筑物内振动噪声测试。现场测点布置如图 2 所示。

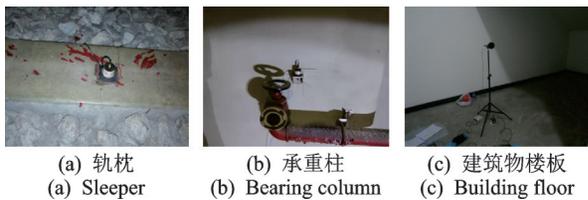


图 2 现场测点布置图

Fig.2 Field layout of measuring points

2 测试结果及分析

2.1 环境振动及噪声评价方法

2.1.1 振动评价方法

振动对于建筑物和人体的影响主要表现在振动

能量方面,而加速度有效值是反映振动能量的重要指标。通常以振动加速度级分析振动传播规律,定义为

$$VAL = 20lg(a_{rms}/a_{ref}) \quad (1)$$

其中: $a_{ref}=10^{-6} m/s^2$,为基准加速度; a_{rms} 为振动加速度有效值。

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt} \quad (2)$$

按规定的频率计权曲线对振动加速度级计权修正后得到的单值评价量,称为振动级 VL。在对建筑物振动评价时,采用全身振动 Z 计权因子对振动级进行修正,记为 Z 振级 VL_Z。

2.1.2 噪声评价方法

为了描述人耳对声音强弱变化响应的特性,引入声压级的概念来表示声音的大小。声压级 L_P 的表达式为

$$L_P = 20lg(p_{rms}/p_{ref}) \quad (3)$$

其中: $p_{ref}=2 \times 10^{-5} Pa$,为基准声压; p_{rms} 为声压有效值。

$$p_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt} \quad (4)$$

由于声压级只反映声音强弱对人体的影响,为了使声音的客观度量和人耳主观感觉一致,采用 A 计权网络对声压级进行修正,记为 A 声级 L_A。

2.2 振动源强特性

咽喉区 1 层和 2 层测点时频图分别如图 3,4 所示。由图可知,由于道岔的冲击作用,咽喉区 1 层测点主频带相较于 2 层的主频带更宽。对于 1 层轨枕测点,其主频段在 50~500 Hz;2 层测点有较明显的主频段,轨枕主频集中在 50~300 Hz 之间;承重柱主频集中在 50~100 Hz 之间。其中,振动在轨枕传至承重柱时,1 层和 2 层均在大于 150 Hz 的高频段下降迅速。

咽喉区测点振动响应如表 1 所示。由表可知:1 层轨枕垂向加速度峰值和振动加速度级均大于 2 层;1 层承重柱垂向加速度峰值和振动加速度级均小于 2 层。这主要是因为 1 层轨道位于地下基础上,而 2 层轨道直接位于混凝土板上,1 层轨枕的支承刚度远大于 2 层,且轨枕振动的高频部分又被基础土层吸收一部分,导致 1 层振动从轨枕传至承重柱衰减大于 2 层。

图 5 为咽喉区测点 1/3 倍频程图。由图可知:1 层轨枕振动加速度级全程都大于 2 层轨枕;8~80 Hz 频段内,1 层承重柱振动加速度级大于 2 层承

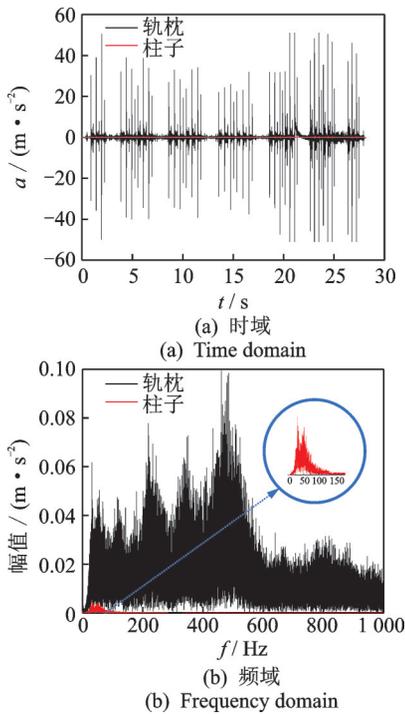


图3 咽喉区1层测点时频图

Fig.3 Time-frequency spectrum of the 1st floor of throat area

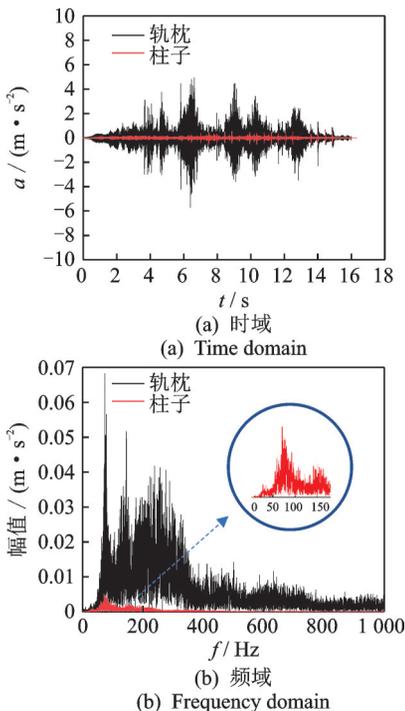


图4 咽喉区2层测点时频图

Fig.4 Time-frequency spectrum of the 2nd floor of throat area

重柱;80 Hz以上频段,1层承重柱振动加速度级小于2层承重柱;2层轨枕和2层承重柱1/3倍频程变化趋势一致,在12.5~80 Hz频段内上升迅速,并在中心频率80 Hz处达到峰值,然后略微下降再缓慢上升;1层轨枕在50 Hz以上频段呈上升趋势,而1层承重柱呈下降趋势。

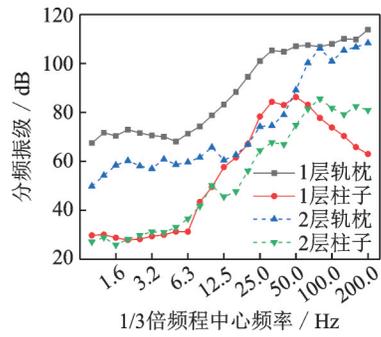


图5 咽喉区测点1/3倍频程

Fig.5 1/3 octave band spectrum of throat area

表1 咽喉区测点振动响应

Tab.1 Vibration response of measuring point

位置	指标	轨枕	承重柱
1层	主频/Hz	50~500	30~80
	峰值/(m·s ⁻²)	51.00	0.36
	振动加速度级/dB	103.10	90.74
2层	主频/Hz	50~300	50~100
	峰值/(m·s ⁻²)	5.87	0.53
	振动加速度级/dB	91.56	91.06

为了更直观地展现振动从轨枕至承重柱的传递损失,采用分频段传递损失比来分析其衰减情况。分频段传递损失比^[14]可定义为

$$\eta_i = (T_i - B_i) / T_i \quad (5)$$

其中: η_i 为轨枕-承重柱第*i*个1/3倍频段的传递损失比; T_i 为轨枕第*i*个1/3倍频段振动加速度级; B_i 为承重柱第*i*个1/3倍频段振动加速度级。

轨枕-承重柱分频传递损失比如图6所示,可以看出:1层轨枕-承重柱振动加速度损失比始终大于2层;1层传递损失比最大为0.62,2层传递损失比最大为0.55;在25~80 Hz频段内,传递损失比达到最低水平;在80 Hz以上频段,1层损失比上升速度明显大于2层,这说明1层振动源强高频衰减速度要明显大于2层。

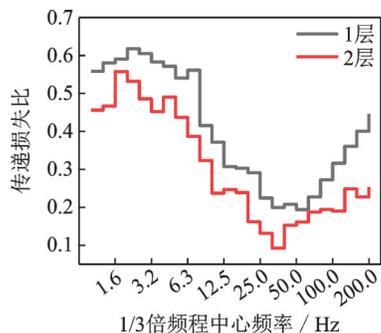


图6 轨枕-承重柱分频传递损失比

Fig.6 Transfer loss ratio of sleeper-column frequency division

由此可知,即使 1 层轨枕处振动响应大于 2 层轨枕,但在传播过程中由于高频段的能量迅速损耗,导致 1 层承重柱的振动响应小于 2 层。

2.3 振动及二次结构噪声传播规律

2.3.1 振动传播规律

为分析咽喉区 1,2 层行车沿上盖建筑物的传播规律,测试记录列车分别通过车辆段 1 层 L63 道岔和 2 层 L-13(分别记为工况 1 和工况 2)时,3#各楼层测点的振动响应。

表 2 为 3#楼 Z 振级统计表。由表可知,当列车经过咽喉区 2 层 L-13 股道时,各楼层 Z 振级比经过 1 层 L63 道岔时的大 2~8 dB。按照表 2 各测点 Z 振级数据,将其分为列车 1 层通过和 2 层通过 2 种工况,上盖建筑各楼层 Z 振级如图 7 所示。除顶层外,各楼层 Z 振级变化并不明显,顶层则出现了一定的振动放大现象。这可能是由于振动沿楼层传至顶层时,上部已无传递能量结构,这时入射波与反射波的叠加作用使得能量放大。

表 2 3#楼 Z 振级统计表

Tab.2 Statistical table of Z vibration level of the 3rd building

股道	测次	各测点 Z 振级/dB					
		-1层	1层	4层	7层	10层	13层
1层 L63	1	54.4	54.7	54.0	54.2	52.4	52.9
	2	54.1	53.1	55.5	54.9	55.2	58.6
	3	56.0	54.9	55.1	54.7	53.5	55.6
	4	56.1	55.5	55.8	56.3	56.3	58.7
2层 L-13	5	58.3	57.3	56.1	56.9	56.1	58.7
	6	60.6	59.2	59.6	61.1	60.5	63.7
	7	60.3	59.0	58.4	59.4	59.6	62.5
	8	57.3	57.2	56.8	57.5	57.0	58.8

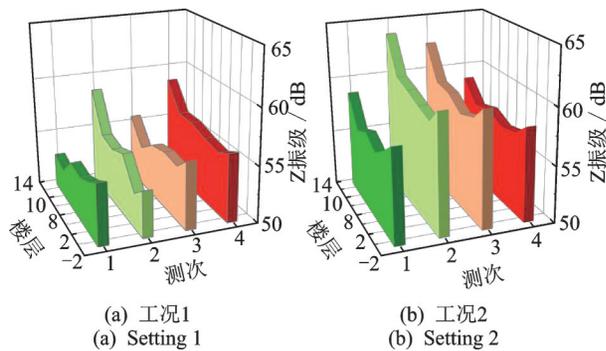


图 7 上盖建筑各楼层 Z 振级
Fig.7 Z vibration level of each measuring point of the over-track building

为进一步研究建筑结构对振动传递的影响,绘制咽喉区 1,2 层行车时引起 3#楼各层 1/3 倍频程如图 8 所示。由图可以看出,在 50 Hz 范围内,各楼层 1/3 倍频程中心频率对应的加速度级相差较小,其衰减主要出现在 50 Hz 以上。其中:顶层在 50 Hz 范围内加速度级大于其他各楼层,而在 50 Hz 以上衰减迅速;各楼层加速度级在频率 8 Hz 处存在峰值,这可能是由于测点所处楼板在该频段处有局部弯曲振动模态。

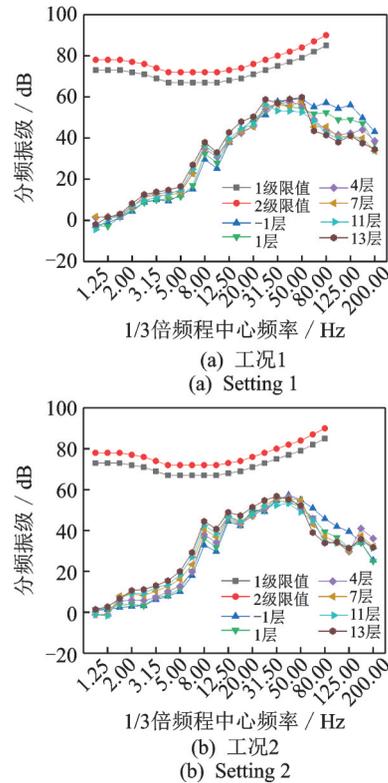


图 8 各楼层振动 1/3 倍频程
Fig.8 1/3 octave band spectrums of each floor vibration

2.3.2 二次结构噪声传播规律

地铁经过时产生的振动通过土层传递到周围建筑物基础,引起建筑物振动,进而引发结构的二次结构噪声。人体能感知到的声音频率范围在 20 Hz~20 kHz,在封闭空间内,室外高频空气噪声对室内声场影响不大,室内声音主要由列车运行时建筑物结构振动引发。基于此,分析了地铁列车经过咽喉区时周围建筑物内产生的二次结构噪声时频特性。

选取上盖建筑-1 层噪声测点,当列车分别经过咽喉区 1 层和 2 层时,上盖建筑-1 层二次结构噪声时频如图 9 所示。相较于背景噪声,车致振动引发的二次结构噪声在 40~60 Hz 出现明显的放大效应,预测这是建筑物中容易激发的噪声频段。

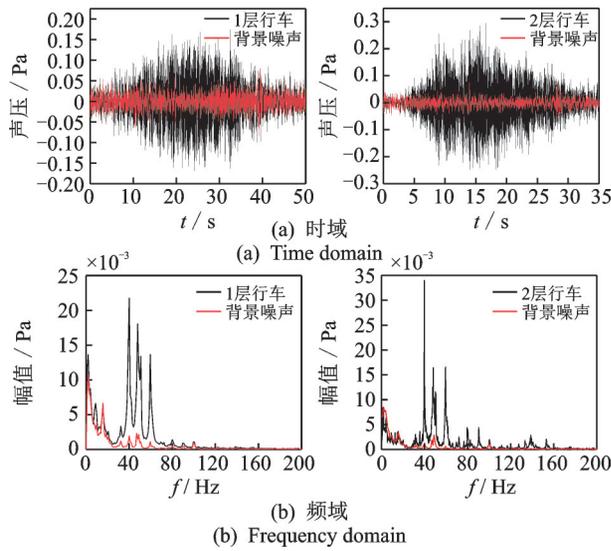


图9 上盖建筑-1层二次结构噪声时频图

Fig.9 Time-frequency spectrum of secondary noise on the 1st floor underground of the over-track building

2.3.3 振动和二次结构噪声相关性分析

列车分别在车辆段1,2层行车时,上盖建筑-1层振动及二次结构噪声1/3倍频程如图10所示。不论是1层行车还是2层行车,-1层振动加速度级和二次结构噪声声压级均在40 Hz附近达到最大值,然后整体呈递减趋势。其中80 Hz以上频段,1层行车引起的振动及二次结构噪声响应均明显小于2层行车,这是由于1层行车时,80 Hz以上高频能量经过土层大幅衰减。

分别计算出列车1层运行和2层运行时,上盖建筑物内各层测点振动总级值与二次结构噪声总级值,对其进行线性回归分析,得到振动与二次结构噪声相关性拟合曲线如图11所示,拟合度分别为0.92和0.95,基本证明了二次结构噪声和车致上盖建筑物振动之间的相关性。

进一步利用振动信号 $X(t)$ 和噪声信号 $Y(t)$ 的互功率谱 $S_{XY}(\omega)$ 分析两信号间在不同频率点上的相关性,互功率谱密度函数定义如下

$$S_{XY}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{XY}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (6)$$

其中: R_{XY} 为互相关函数。

$S_{XY}(\omega)$ 越大,表明两信号的相应频率关联度越高;若 $S_{XY}(\omega)=0$,表明其相应频率分量正交。

咽喉区1,2层行车时,上盖建筑-1层振动与二次结构噪声互谱分析见图12。在频率为40 Hz附近,振动与二次结构噪声之间的相关性最大,即楼板振动辐射噪声对二次结构噪声贡献主要在40 Hz附近。

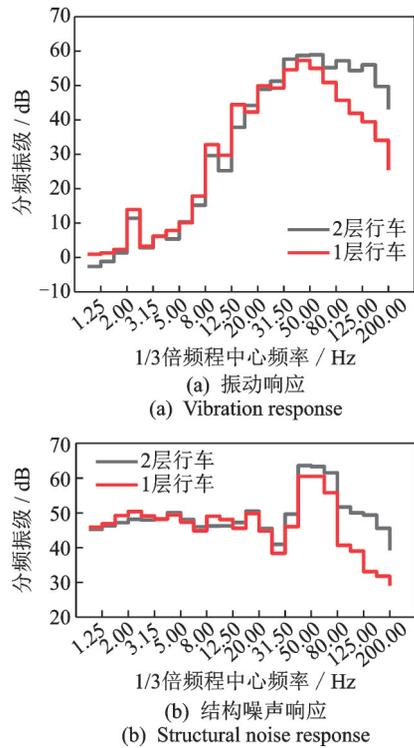


图10 上盖建筑-1层振动及二次结构噪声1/3倍频程
Fig.10 1/3 octave band spectra of vibration and secondary structure noise on the 1st floor underground of the over-track building

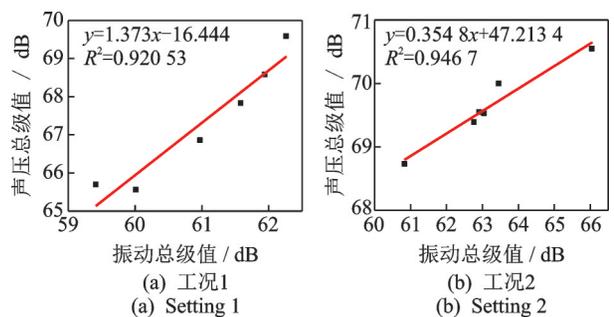


图11 振动与二次结构噪声相关性拟合曲线

Fig.11 Fitting curve of correlation between vibration and secondary structure noise

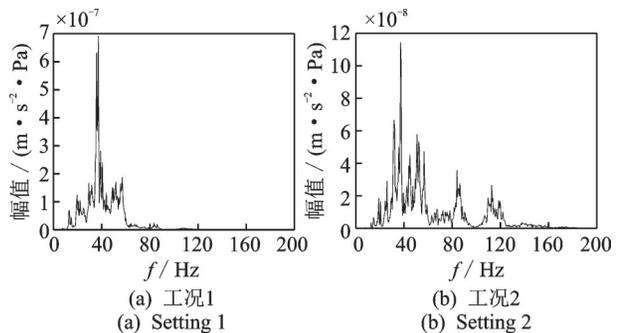


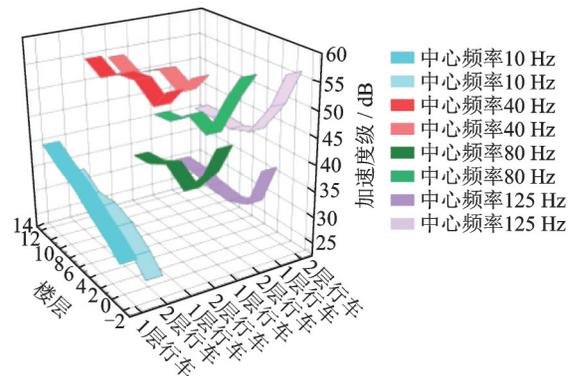
图12 振动与二次结构噪声互谱分析

Fig.12 Cross spectrum analysis of vibration and secondary structure noise

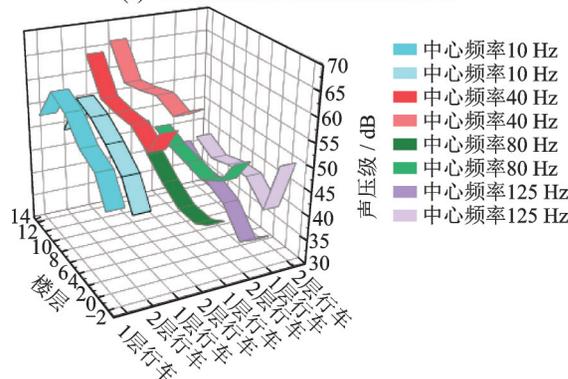
2.4 单个频率段振动及噪声传播规律

为研究单个频率段振动与二次结构噪声沿上盖建筑的传播规律,选取 1/3 倍频程中心频率分别为 10, 40, 80 和 125 Hz, 绘制各测点振动与二次结构噪声随楼层的变化曲面, 并将同频率不同测点振动加速度级/声压级用各异特征曲面连接, 各中心频率处加速度级/声压级随楼层的变化如图 13 所示。

由图 13 可以看出: 中心频率为 10 Hz 时, 振动加速度级随楼层增加而增大, 而二次结构噪声声压级在顶层出现明显下降趋势; 中心频率为 80 和 125 Hz 时, 振动在高层变化趋势趋向稳定, 而二次结构存在一定上升趋势, 其中当中心频率为 80 Hz 时, 在建筑物中层存在振动放大现象; 中心频率为 40 Hz 时, 无论是 1 层行车还是 2 层行车, 加速度级和声压级随楼层的变化趋势基本保持一致, 即振动在中心频率为 40 Hz 附近处对二次结构噪声的影响明显, 而到高频处影响并不直接。由图 10 可知, 上盖建筑-1 层处振动与二次结构噪声在 40 Hz 附近都达到了峰值, 因此在未来考虑车辆段上盖建筑振动与二次结构噪声影响时, 应重点关注 1/3 倍频程中心频率 40 Hz 处的响应。



(a) 加速度级的变化
(a) Variation trend of acceleration level



(b) 声压级的变化
(b) Variation trend of sound pressure level

图 13 各中心频率处加速度级/声压级随楼层的变化
Fig.13 Variation trend of acceleration level / sound pressure level at each center frequency with floor

2.5 振动及二次结构噪声评价

2.5.1 上盖建筑振动评价

由表 2 可知, 当列车通过咽喉区时, 该栋楼的 Z 振级均小于 GB 10070—1988《城市区域环境振动标准》中居民、文教区夜间限值 67 dB。由图 8 可知, 根据 GB/T 5035—2018《住宅建筑室内振动限值及测量方法标准》对上盖建筑振动进行评价, 各测点均没有超过对应频段的 1 级限值。

2.5.2 上盖建筑二次结构噪声评价

室内二次结构噪声评价量为等效连续 A 声压级, 评价标准为 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》, 等效 A 声压级限值取居住、商业混合区夜间限值 38 dB(A)。当二次结构噪声测量值与相应背景噪声值的差值大于 3 dB 时, 应进行二次结构噪声修正, 3#楼二次结构噪声声压级统计如表 3 所示, 在-1 层和顶层出现二次结构噪声值超标的情况。综上所述, 利用 Z 振级和分频振动加速度级作为指标对上盖建筑振动进行评价时, 全部测点均没有超过相应的规范限值, 但后期仍应采取相应的减振降噪措施, 防止振动引发的建筑物二次结构噪声超标, 同时应重点关注底层和顶层的二次结构噪声情况。

表 3 3#楼二次结构噪声声压级统计表

Tab.3 Statistical table of noise pressure level of secondary structure of the 3rd Building dB(A)

比较项目	工况	-1层	1层	4层	7层	10层	13层
标准限值		38	38	38	38	38	38
列车运行	1层L63	44.0	38.6	35.1	36.2	36.9	40.1
	2层L-13	42.7	37.7	35.4	35.9	37.7	41.6
背景噪声		32.0	30.8	29.2	30.2	31.5	32.4
修正后	1层L63	44.0	37.6	34.2	35.2	34.3	39.7
实际值	2层L-13	42.7	36.7	34.1	34.6	36.7	40.8

3 结 论

- 1) 道岔产生的冲击作用使得 1 层轨枕振动加速度级全程都大于 2 层轨枕; 在 8~80 Hz 频段内, 1 层承重柱振动加速度级大于 2 层承重柱; 由于高频振动经过土体衰减迅速, 在 80 Hz 以上频段, 1 层承重柱振动加速度级小于 2 层承重柱。
- 2) 无论在 1 层还是 2 层行车, 各楼层 Z 振级变化并不明显, 振动沿楼层传至顶层时, 入射波与反射波的叠加作用使得顶层振动能量放大。
- 3) 在 50 Hz 范围内, 各楼层 1/3 倍频程中心频率对应的振动加速度级相差较小, 其衰减主要出现在 50 Hz 以上。其中: 顶层在 50 Hz 范围以内加速度

级大于其他各楼层,而在 50 Hz 以上衰减迅速;各楼层加速度级在频率 8 Hz 处有峰值,这可能是由于测点所处楼板在该频段处有局部弯曲振动模态。

4) 建筑物内二次结构噪声声压主频都在 100 Hz 以下,峰值出现在 40 Hz 附近,且建筑物中容易激发的声音频段预测在 40~60 Hz。振动在 1/3 倍频程中心频率为 40 Hz 附近处对二次结构噪声的影响最为显著,即楼板振动辐射噪声对二次结构噪声贡献主要在 40 Hz 附近,该频段接近常见建筑物楼板的固有频率。

5) 各楼层无论是 Z 振级还是分频振动加速度级均达到相应的规范要求,但是底层和顶层出现了二次结构噪声超标的现象,这为其他双层车辆段类似工况下上盖建筑物振动敏感区域的选取具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] 户书辉,王玲. 地铁车辆段物业开发设计——以深圳地铁 5 号线塘朗车辆段为例[J]. 城市轨道交通研究, 2013,16(3):112-115.
HU Shuhui, WANG Ling. Property development and design of Tanglong depot on Shenzhen metro line 5[J]. Urban Mass Transit, 2013,16(3): 112-115. (in Chinese)
- [2] 夏禾,曹艳梅. 轨道交通引起的环境振动问题[J]. 铁道科学与工程学报, 2004(1):44-51.
XIA He, CAO Yanmei. Problems of railway traffic induced vibrations of environments[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2004(1): 44-51. (in Chinese)
- [3] THOMPSON D. Railway noise and vibration: mechanisms, modelling and means of control[M]. Amsterdam:Elsevier, 2008: 24-57.
- [4] 刘维宁,马蒙,刘卫丰,等. 我国城市轨道交通环境振动影响的研究现状[J]. 中国科学:技术科学, 2016, 46(6):547-559.
LIU Weining, MA Meng, LIU Weifeng, et al. Overview on current research of environmental vibration influence induced by urban mass in China[J]. Scientia Sinica (Technological), 2016, 46(6): 547-559. (in Chinese)
- [5] 陈建国,夏禾,曹艳梅,等. 运行列车对周围建筑物振动影响的试验研究[J]. 振动工程学报, 2008(5): 476-481.
CHEN Jianguo, XIA He, Cao Yanmei, et al. Experimental study on the influence of running train on the vibration of surrounding buildings[J]. Journal of Vibration Engineering, 2008(5): 476-481. (in Chinese)
- [6] 洪俊青,刘伟庆. 地铁对周边建筑物振动影响分析[J]. 振动与冲击, 2006, 25(4):142-145, 183.
HONG Junqing, LIU Weiqing. Analysis of effects induced by subway train on surrounding building vibration [J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(4): 142-145, 183. (in Chinese)
- [7] 侯博文. 地铁-房建联合体耦合动力学及振动控制技术[D]. 北京:北京交通大学, 2016.
- [8] SANAYEI M, ANISH K P, MOORE J A, et al. Measurement and prediction of train-induced vibrations in a full-scale building[J]. Engineering Structure, 2014, 77:119-128.
- [9] LIU S W. Measurement and analysis of vibration and noise in the ambient environment of metro[J]. Measurement, 2020,163: 107998.
- [10] ZOU C, WANG Y M, JAMES A, et al. Train-induced field vibration measurements of ground and over-track buildings[J]. Science of the Total Environment, 2017, 575: 1339-1351.
- [11] ZOU C, WANG Y M, WANG 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.
- [12] 冯青松,王子玉,刘全民,等. 双振源激励下地铁车辆段上盖建筑物振动特性[J]. 交通运输工程学报, 2019,19(4):59-69.
FENG Qingsong, WANG Ziyu, LIU Quanmin, et al. Vibration characteristic of metro depot upper building under double vibration source excitation[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2019, 19(4): 59-69. (in Chinese)
- [13] 陈艳明,冯青松,刘庆杰,等. 下沉式地铁车辆段列检库车致振动实测与分析[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(3): 532-538.
CHEN Yanming, FENG Qingsong, LIU Qing-jie, et al. Test and analysis of vibration induced by train operation in sinking metro depot service shop[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(3): 532-538. (in Chinese)
- [14] 马蒙,李明航,吴宗臻,等. 地铁列车与定点锤击荷载下浮置板轨道减振效果对比试验研究[J]. 中国铁道科学, 2019, 40(5): 28-34.
MA Meng, LI Minghang, WU Zongzhen, et al. Comparative experimental study on vibration reduction effect of floating slab track under metro train and fixed point hammering loads[J]. China Railway Science, 2019, 40(5): 28-34. (in Chinese)



第一作者简介:农兴中,男,1970年3月生,教授级高级工程师。主要研究方向为城市轨道交通工程设计。曾发表《不同轨道结构地铁车内噪声影响特性分析》(《铁道标准设计》2019年第63卷第4期)等论文。

E-mail:nongxingzhong@gmdi.cn

通信作者简介:冯青松,男,1978年11月生,教授、博士生导师。主要研究方向为铁路环境振动与噪声控制。

E-mail:fqshdjtdx@aliyun.com