

下沉式地铁车辆段列检库车致振动实测与分析*

陈艳明¹, 冯青松¹, 刘庆杰¹, 刘文武², 罗信伟²

(1. 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)

(2. 广州地铁设计研究院股份有限公司 广州, 510010)

摘要 为研究列车运行引起下沉式地铁车辆段振动特性,以目前国内最大的某下沉式地铁车辆段为研究对象,基于现场实测数据分析下沉式地铁车辆段内列检库振源特性和振动传播规律。分析结果表明:列车在列检库运行速度约为 9~14 km/h 情况下,其钢轨振动加速度峰值地下负 1 层约为 12.7 m/s²,地下负 2 层约为 2.7 m/s²;支撑立柱振动加速度峰值地下负 1 层约为 0.6 m/s²,地下负 2 层约为 0.2 m/s²,其主要频段约为 100~200 Hz。列车运行引起上盖平台的振动随着与行车轨道中心线距离的增大呈线性衰减规律,端部股道行车时线性衰减率约为 0.2 dB/m,中部股道行车时约为 0.1 dB/m,在 50~200 Hz 频段呈单调递减规律,而在 10 Hz 以内低频段衰减缓慢。列车从地下负 1 层行车时,平台盖板的振动相对地下负 1 层的楼板衰减约 6.2 dB,但其振动值已接近国家相关标准的限值,需重点关注地下负 1 层行车引起上盖建筑物的振动。研究成果可为下沉式地铁车辆段的振动预测、振动舒适度评价及减振设计提供参考依据。

关键词 下沉式车辆段; 现场实测; 振动源强; 振动传播规律

中图分类号 TH113; U211

引言

近年来,我国城市轨道交通的发展十分迅速,截止 2018 年 6 月底,全国共有 35 座城市开通运营城市轨道交通线路,总里程约为 5 200 km。在城市轨道交通迅速发展的同时,与之相配套的地铁车辆段同样得到快速发展。地铁车辆段作为地铁列车停放、检查、整备和修理的场所,其占地面积大。如果能充分利用其空间,在车辆段平台以上进行物业开发,如住宅、办公楼、学校等,可以获取丰厚的投资回报。国内北京、上海、广州、深圳、武汉、杭州、成都及宁波等很多城市都对地铁车辆段进行了物业开发。目前,车辆段基本都采用地面式车辆段,地面式车辆段地面 1 层为车辆段工作区域。随着城市用地的紧张,为进一步提高土地的利用率,近几年出现了下沉式地铁车辆段。下沉式地铁车辆段把工作区域从地面转移到地下,且地下可设计多层,地面上可进行物业开发。下沉式车辆段相比地面式车辆段,可以更大程度地利用土地,在相同占地面积的情况下可以容纳更多列车,在土地异常紧张的大城市具有广阔的应用前景。

下沉式车辆段相比地面式车辆段,因其结构的

特殊性使得其振动问题也更加复杂。在下沉式地铁车辆段中,列车从地下负 1 层运行引起的振动传路路径为钢轨—道床—立柱—上盖平台—上盖建筑物,振动波传播介质刚度较大,因此振动衰减较慢。此外,下沉式地下双层地铁车辆段具有空间跨度大、自振频率低、阻尼小等特点,列车在车辆段内运行时容易引起结构共振。

下沉式车辆段工作区域中面积最大的为列检库,列检库为列车日常停放和检查的场所,其上盖平台通常规划住宅类建筑物,因此有必要掌握下沉式地铁车辆段列检库的振动特性,包括其振源特性和振动传播规律,为设计这类结构时提供参考依据。王毅等^[1]对北京市八王坟地铁车辆段振动与噪声在上盖平台上的传播过程进行了理论分析和类比测试。Zou 等^[2-3]分别对广州和深圳某车辆段进行了现场实测,并分析了振动在地面和建筑物的传播规律。文献[4-5]对广州地铁 3 号线厦滘车辆段试车线和咽喉区进行了现场实测,根据实测数据分析了列车引起地面振动加速度在时、频域内的传播规律。李绿宇等^[6]对沈阳地铁车辆段上盖双子楼结构开展了模拟地震振动台试验研究。文献[7-9]通过车辆段现场实测和理论分析,总结分析了车辆段车致振动

* 国家自然科学基金资助项目(51878277, 52068029);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:2019-04-22;修回日期:2019-07-04

规律和车辆段上盖物业舒适度评价的一般性流程,并提出了基于舒适度评价的有限元模型建立方法。郭玉斌等^[10]通过现场实测以及建立立柱-平台-建筑三维精细化有限元模型,分析车辆段上盖建筑物振动影响和分布规律。郑辉^[11]通过有限元仿真研究了空沟和填充沟的宽度、深度和设置位置对地铁车辆段的减振效果。

上述研究主要集中在地面式地铁车辆段的振动问题,对于下沉式地铁车辆段这一新型结构和车辆段内列检库的振动问题鲜有文献报道。基于此,笔者以国内最大的某下沉式地铁车辆段为研究背景,通过现场实测的方法研究下沉式地铁车辆段列检库振源特性及其振动传播规律,为此类结构的振动精准预测、减振设计提供参考依据。

1 现场测试

1.1 工程概况

某下沉式车辆段是地铁车辆基地重要组成部分之一,全列车的停车/列检以及相应的配属车辆的周/月检任务都由其承担。车辆段工程主体结构采用下沉式地下双层钢筋混凝土框架结构,结构类型为大底盘+多塔结构,场地土层分布为人工杂填土、冲积软土、粉质黏土和上更新统软石土。车辆段主要包含4个区块:联络线区间、咽喉区、列检库区及运用库区。车辆段最多可同时停放76列地铁列车(每层设置38个停车列位)。车辆段平台以上规划建设包括15栋多层住宅、6栋高层住宅和商业裙房、地铁运行控制中心和地铁停车库等。车辆段上盖建筑物规划效果如图1所示。



图1 车辆段上盖建筑物规划效果图

Fig.1 Planning renderings of metro depot over-track buildings

规划建设高层住宅位于车辆段检修库上方,本次测试断面布置在车辆段面积最大的列检库。车辆段区域分布如图2所示,车辆段内检修库现场如图3

所示,车辆段列检库列车和轨道基本信息见表1。

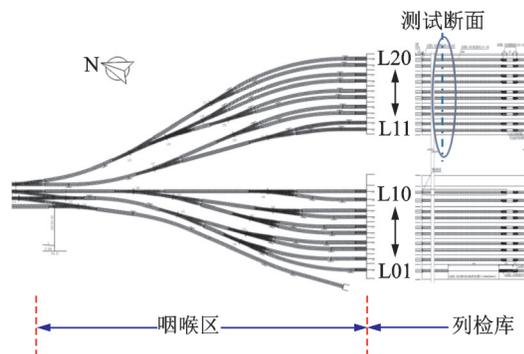


图2 地铁车辆段测试断面布置图

Fig.2 Test section layout of metro depot



图3 地铁车辆段内检修库现场

Fig.3 On-site of metro depot service shop

表1 车辆段列检库列车-轨道基本信息

Tab.1 The basic information of train-track in depot service shop

信息项目	列检库(东区)
车体参数	A型,每节车长为23m,宽为3.1m,轴重为16t
编组	6节
轨道条件	地下负1层,50 kg/m普通无缝钢轨
扣件	双层非线性减振扣件
钢轨支撑	立柱式架空支撑
载重情况	空载
列车运行速度	地下负1层,9.9 km/h;地下负2层,14.2 km/h
列车运行方向	入库

1.2 测点布置及测试仪器

车辆段检修库为了检修的需要,钢轨采用短立柱进行架空支撑。本次测试测点布置于车辆段列检库地下负2层钢轨、支撑立柱和地面,见图4中 $D_9 \sim D_{11}$;地下负1层钢轨、支撑立柱和楼板,见图4中 $D_6 \sim D_8$;在平台盖板上垂直于列车运行方向布置测试断面,各测点位于楼板每跨的跨中,见图4中

$D_1 \sim D_5$ 。测点布置剖面图如图4所示,测点现场布置如图5、图6所示。

本次测试采集系统采用DATaRec 4 DIC24数据采集仪,传感器采用ICP加速度传感器和941B加速度传感器,所有测试仪器和传感器测试前都进行了校准。测试采取自动触发采集方式,即采集仪开启后对振动加速度信号进行持续监测,当列车通过时,触发通道加速度峰值超过触发值开始采集,持续采集30s后停止采集,等待下一列列

车触发采集。根据以往类似工程经验,钢轨上频率主要分布在1500 Hz以内,楼板主要频率在200 Hz以内,由采样定理可知,当采样频率大于或等于有效信号最高频率的2倍采样频率,采样值就可以包含原始信号的所有信息。因此,钢轨及支撑短柱采样频率设为3000 Hz,楼板及平台盖板为800 Hz。本次测试共采集27组振动加速度数据,选取其中测试效果相对较好的10组数据进行统计分析。

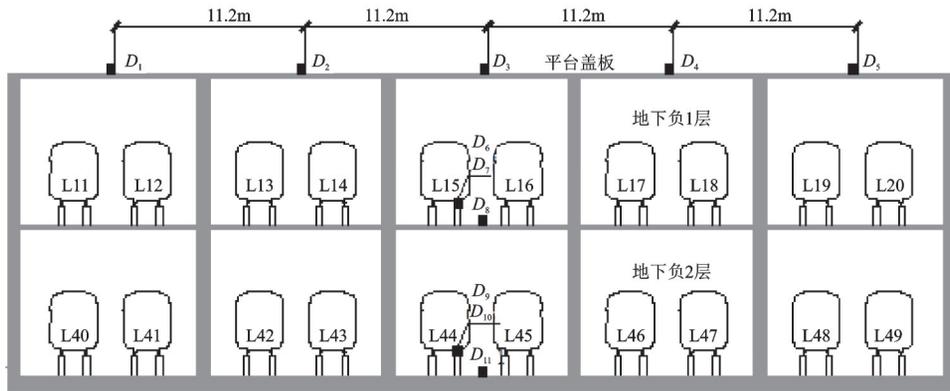


图4 列检库测点布置图

Fig.4 Layout of measured points in service shop

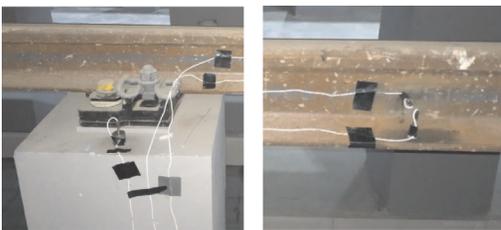


图5 列检库内钢轨及支撑短柱测点现场布置图

Fig.5 Field layout of rail and supporting short column measured points in service shop



图6 平台盖板测点现场布置图

Fig.6 Field layout of measured points on the upper platform

2 测试结果分析

2.1 振动源强特性

分别测试多组列车进入地下负1层和地下负2

层车辆段列检库时钢轨、支撑立柱、楼板及平台盖板的振动加速度。表2为钢轨和支撑立柱振动源强统计表,图7、图8为钢轨和支撑短柱某一组典型垂向振动加速度时程图,图9、图10为振动加速度频谱图。

表2 钢轨及支撑立柱振动源强

Tab.2 Vibration responses of rail and supported column

位置	分析指标	钢轨	支撑立柱
地下负1层	加速度峰值平均值/($m \cdot s^{-2}$)	12.73	0.61
1层	主频段频率/Hz	100~900	100~200
地下负2层	加速度峰值平均值/($m \cdot s^{-2}$)	2.68	0.16
2层	主频段频率/Hz	100~900	100~200

从表2、图7和图8中可以看出,地下负1层的钢轨和支撑立柱的振动加速度峰值平均值分别为12.73和0.61 m/s^2 ,地下负2层的钢轨和支撑立柱的振动加速度峰值平均值分别为2.68和0.16 m/s^2 ,地下负1层的钢轨和支撑立柱振动加速度都大于地下负2层,分别是地下负2层的4.8倍和3.8倍。其原因分析如下:地下负1层钢轨和支撑立柱位于楼板上,地下负2层钢轨和支撑立柱位于下部地面基础

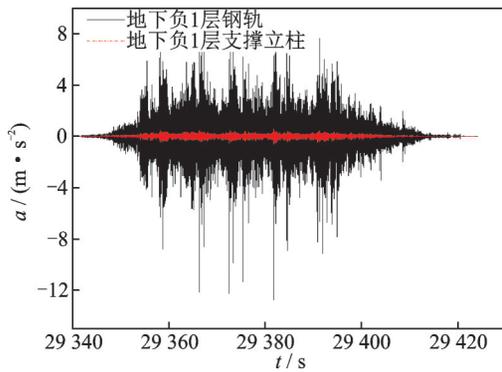


图7 地下负1层钢轨及支撑立柱加速度时程图

Fig.7 Time history chart of rail and supported column acceleration in underground negative floor

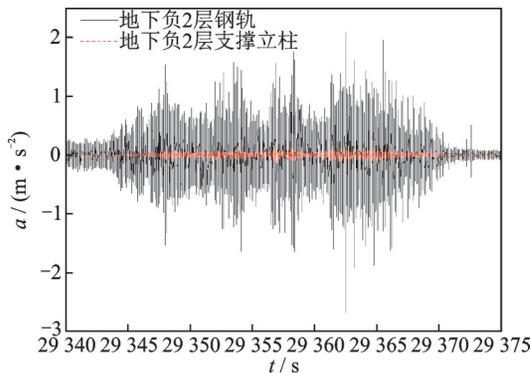


图8 地下负2层钢轨及支撑立柱加速度时程图

Fig.8 Time history chart of rail and supported column acceleration in negative second floor

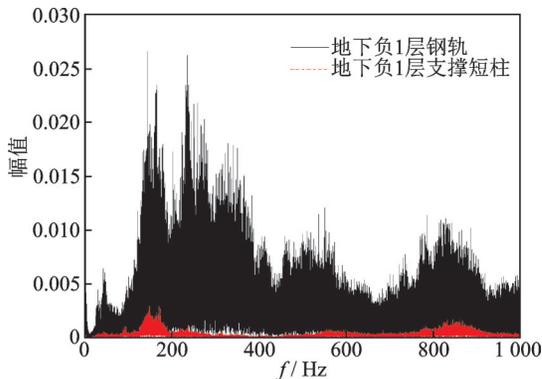


图9 地下负1层钢轨及立柱频谱图

Fig.9 Spectrum of rail and column in underground negative floor

上,地下负1层行车可能激发楼板结构的弯曲振动,从而使支撑立柱和钢轨振动增大。此外,地下负2层钢轨采用了阻尼钢轨,阻尼钢轨通过阻尼材料吸收一部分振动能量,从而抑制钢轨的振动。因此,地下负1层钢轨和支撑立柱的振动响应大于地下负2层。

由图9、图10可以看出,钢轨相比支撑立柱频带

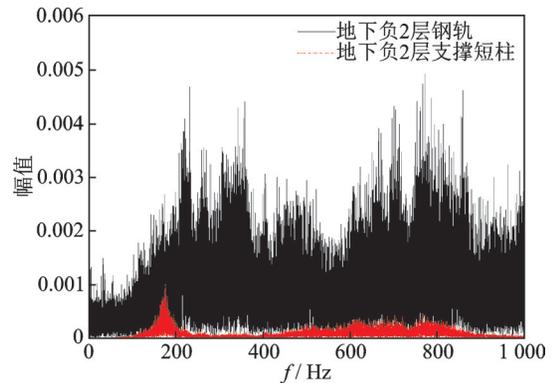


图10 地下负2层钢轨及立柱频谱图

Fig.10 Spectrum of rail and column in negative second floor

更宽,其振动主要分布在100~900 Hz;相比钢轨,支撑短柱有明显的主频段,其主频段为100~200 Hz,振动从钢轨传至支撑立柱时200 Hz以上高频衰减较快。

2.2 振动传播规律

基于实测振动加速度数据,从频域、Z振级等角度分析列车运行引起列检库盖板振动横向传播规律和层间振动传播规律。

2.2.1 盖板振动横向传播规律

为研究列车进出车辆段列检库引起其上部平台盖板振动随行车轨道中心线距离变化的横向传播规律,分别选取2种典型行车工况进行分析。

工况1:列车在端部测点 D_5 正下方地下1层股道(L19,L20)运行;

工况2:列车在中部测点 D_3 正下方地下1层股道(L15,L16)运行。

1) 频域分析。图11为工况1、工况2下列检库盖板平台各测点垂向1/3倍频图。

从图11中可以看出,列车无论在端部还是中部股道行车,各测点虽然与行车轨道中心线水平距离不同,但其频率分布基本相同。列车进出列检库引起上盖平台的主频段都在10~50 Hz之间。在10 Hz以内,各测点随着与行车轨道中心线距离增大,其振级无明显衰减;在10~50 Hz频段,各测点随着距离增大,其振级总体上呈现减小的规律;在50~200 Hz频段,各测点随着距离增大,其振级呈现明显单调递减规律。由此说明,列车在列检库运行引起上盖平台的振动衰减主要发生在中高频段。依据国际标准ISO 10137-2007,人体对铅垂向振动的敏感频带为4~8 Hz,而在平台盖板上随着距离增大在该低频段基本无衰减。

为更加直观描述单个频率处振动沿平台盖板的

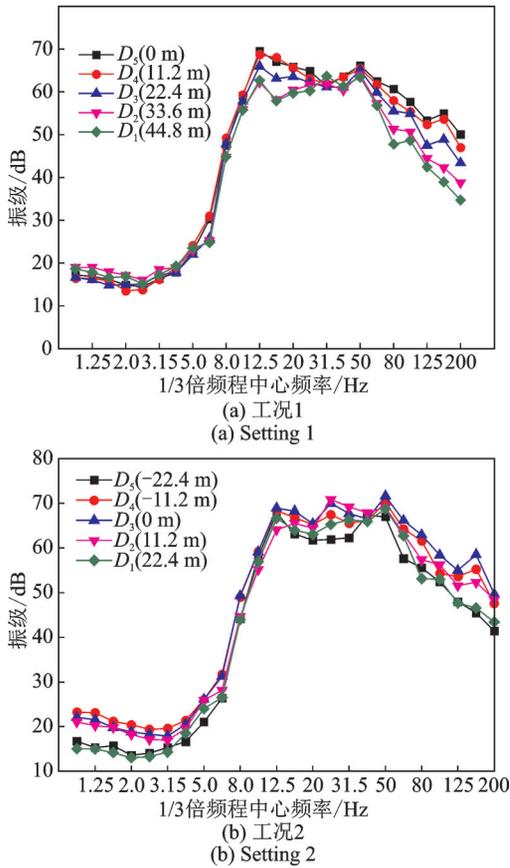


图11 不同工况下中盖板平台振动1/3倍频图
Fig.11 1/3 octave spectrum of platform vibration under different working conditions

横向传播规律,计算各个测点在1/3倍频程中心频率2.5,5,25,40,80和160 Hz处的加速度振级,并将同频率在不同距离测点的加速度振级用B样条曲线连接,如图12所示。从图中可以看出,列车在端部股道行车时,其引起上盖平台的振动在2.5和5 Hz低频处几乎无衰减,甚至有增大现象。不论列车在端部股道行车(工况1)还是在中部股道行车(工况2)时,在25和40 Hz中频处衰减缓慢;而在80和160 Hz高频处衰减明显,且呈现单调递减特征。

2) Z振级分析。图13为平台盖板各测点在端部股道、中部股道2种行车工况下的Z振级(V_{Lz})误差传递统计图,并将各测点Z振级平均值与距行车轨道中心线距离作回归分析,得到2种工况下的回归曲线和拟合公式。

由图13可知,当列车从车辆段端部股道(L19, L20)行车时(工况1),其引起上盖平台的振动响应随着与行车轨道中心距离增大呈线性衰减规律,线性衰减速度为0.19 dB/m,线性拟合确定性系数 $R^2=0.979$ 。当列车从车辆段中部股道(L15, L16)行车时(工况2),其引起上盖平台的振动响应从行

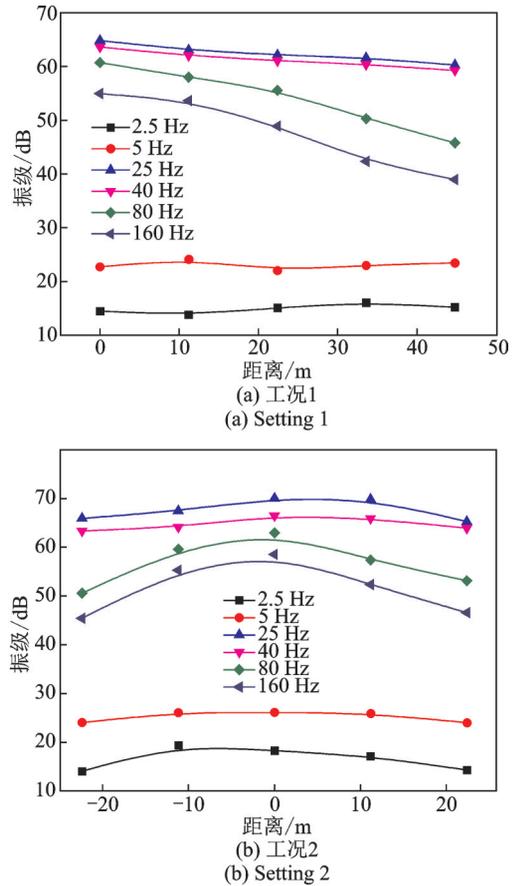


图12 不同工况下各频率处加速度振级随距离变化图
Fig.12 Variation of vibration levels with distance at different frequencies under different working conditions

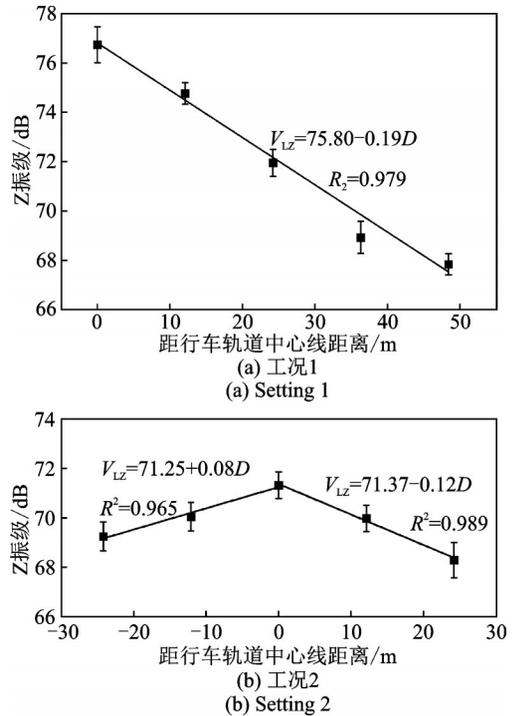


图13 不同工况下各测点Z振级拟合-误差传递统计图
Fig.13 Fitting curve of Z vibration level error bar of each measured point under different working conditions

车股道正上方至两端分别呈线性衰减规律,线性衰减速度分别为 0.08 和 0.12 dB/m,线性拟合确定性系数分别为 $R^2=0.965(D<0)$ 和 $R^2=0.989(D>0)$, D 为各测点距行车轨道中心线水平距离。端部股道行车时上盖平台各测点 Z 振级衰减率(0.19 dB/m)与中部股道行车时振动往两端的衰减率(0.08, 0.12 dB/m)之和基本相等。主要原因可能为:列车无论从端部股道还是中部股道行车,引起上盖平台的振动能量基本相当,从端部股道行车时上盖平台的振动往一端衰减较快,而从中部股道行车时上盖平台的振动能往两端衰减,因此端部股道行车时上盖平台的振动衰减率和中部股道行车时上盖平台往两端的衰减率之和相当。

2.2.2 振动层间传递规律

表 3 为列车从列检库地下负 2 层和地下负 1 层行车时引起各层测点的 Z 振级均值大小分布。由表 3 可以看出,列车从地下负 2 层行车时,地下负 1 层楼板和平台盖板振动相比地下负 2 层地面振动增大了约 3~4 dB,主要可能是由于地下负 2 层测点位于地面上,其振动波传递路径为钢轨—支撑短柱—基础—土体—地面,因此地面测点振动会经过土体而被衰减,而地下负 1 层和平台盖板振动波传递为地下负 2 层钢轨—支撑短柱—基础—立柱—地下负 1 层楼板/平台盖板,地下负 1 层和平台盖板振动没有被土体衰减。因此,地下负 1 层和平台盖板的振动相比地下负 2 层地面略有增大。列车从地下负 1 层行车时,可能激发地下负 1 层楼板局部弯曲振动模态,因此地下负 1 层楼板的 Z 振级达到约 78 dB;振动通过立柱传至上盖平台,其振动相对地下负 1 层楼板的振动衰减了约 6 dB。

表 3 列检库各层测点 Z 振级
Tab.3 Z vibration level of measured points in service shop dB

工况	指标	地下负	地下负	盖板
		2层	1层	
地下负 2 层行车	Z 振级	54.0	57.6	57.96
	衰减量	—	3.6	3.96
地下负 1 层行车	Z 振级	—	77.6	71.4
	衰减量	—	—	-6.2

虽然列车从地下负 1 层行车时,振动从地下负 1 层楼板传至平台盖板时衰减了约 6 dB,但其引起盖板的振动平均达到 71.4 dB,已接近《城市区域环境振动标准》^[12](GB 10070 — 88)规定限值,该区域为

商业和居住用途,限值为夜间 72 dB。虽然平均值没达到限值,但是振动最大值已超过限值,且车辆段列车进入车辆段时间在晚上 10 点到 12 点之间,这段时间正是居民开始晚间休息的时段,对振动更为敏感。因此,需重点关注地下负 1 层行车引起上盖建筑物的振动。

图 14、图 15 为地下负 1 层和地下负 2 层行车时不同楼层振动 1/3 倍频图。由图可以看出,地下负 2 层行车时,地下负 1 层楼板和平台盖板在 2 Hz 以上频段的振级都大于地下负 2 层,这也解释了地下负 2 层行车时,地下负 1 层楼板和平台盖板的振动大于地下负 2 层地面的振动。当列车从地下负 1 层行车时,上盖平台振动衰减频段主要发生在 20~80 Hz 频段。

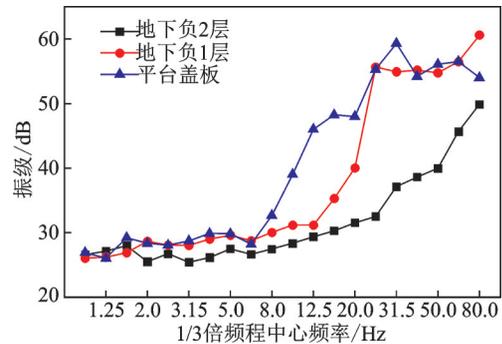


图 14 地下负 2 层行车时各层楼板振动加速度 1/3 倍频图
Fig.14 1/3 octave spectrum of floor slabs vibration acceleration in negative second floor

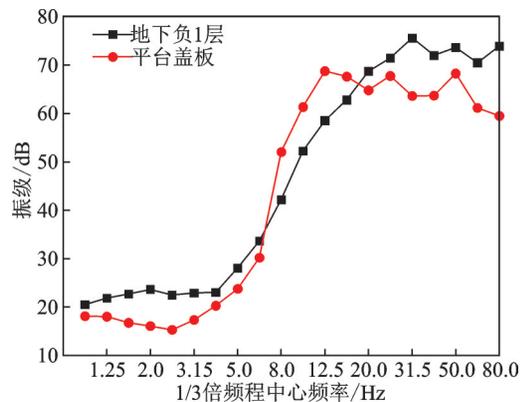


图 15 地下负 1 层行车时各层楼板振动加速度 1/3 倍频图
Fig.15 1/3 octave spectrum of floor slabs vibration acceleration in underground negative floor

3 结 论

1) 列车在列检库运行速度约为 9~14 km/h 情况下,列检库内钢轨振动加速度峰值地下负 1 层约为 12.7 m/s²,地下负 2 层约为 2.7 m/s²;支撑立柱的

振动加速度峰值地下负1层约为 0.6 m/s^2 ,地下负2层约为 0.2 m/s^2 ,其主频段为 $100\sim 200 \text{ Hz}$ 。

2) 列车运行引起上盖平台的振动随着与行车轨道中心线距离的增大呈线性衰减规律,端部股道行车时线性衰减率约为 0.2 dB/m ,中部股道行车时衰减率约为 0.1 dB/m 。

3) 上盖平台的振动随着与行车轨道中心线距离的增大,在 $50\sim 200 \text{ Hz}$ 频段呈现明显单调递减规律,而在 10 Hz 以内低频段衰减缓慢,振动衰减主要发生在中高频段。

4) 列车从地下1层行车时,平台盖板的振动相对地下1层的楼板衰减了约 6 dB ,但其振动值已接近国家相关标准的限值,需重点关注地下负1层行车引起上盖建筑物的振动。

参 考 文 献

- [1] 王毅,徐辉. 地铁车辆段平台居住小区振动与噪声污染控制[J]. 中国环境监测, 1999, 15(6): 43-45.
WANG Yi, XU Hui. A brief talk on the pollution controlling of vibration and noise of the community built on the platform of subway traffic [J]. Environmental Monitoring in China, 1999, 15(6): 43-45. (in Chinese)
- [2] 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.
- [3] ZOU C, WANG Y M, JAMES A M, et al. Train-induced field vibration measurement of ground and over-track buildings [J]. Science of the Total Environment, 2017, 575: 1339-1351.
- [4] 汪益敏,曾哲民,邹超,等. 地铁车辆段试车线列车振动影响的试验研究[J]. 华南理工大学学报, 2014, 42(12): 1-8.
WANG Yimin, ZENG Zhemin, ZOU Chao, et al. Experimental investigation into train-induced vibrations of test-line at metro depot [J]. Journal of South China University of Technology, 2014, 42(12): 1-8. (in Chinese)
- [5] 邹超,汪益敏,汪朝晖,等. 地铁车辆段咽喉区地面振动传播规律实测与分析[J]. 振动与冲击, 2015, 34(16): 200-206.
ZOU Chao, WANG Yimin, WANG Zhaohui, et al. Field measurement and analysis of ground vibration in the throat area of metro depot [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(16): 200-206. (in Chinese)
- [6] 李绿宇,国巍,蒋丽忠,等. 沈阳地铁车辆段上盖双子楼隔振性能的振动台试验研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(6): 56-62.
LI Luyu, GUO Wei, JIANG Lizhong, et al. Shaking table tests on the isolation performance of two buildings built on the top head of Shenyang metro depot [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(6): 56-62. (in Chinese)
- [7] 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 Weiping, ZHAO Na, HE Wei, et al. Analysis on vibration serviceability of over-track buildings [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(6): 90-96. (in Chinese)
- [8] 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 Weiping. Field measurement of the subway train loading in a car depot [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(8): 132-137. (in Chinese)
- [9] 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 Weiping, CHEN Yanming, YAO Chunqiao. Vibration analysis of train depot over-track buildings induced by train load [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(8): 110-115. (in Chinese)
- [10] 邬玉斌,张斌,刘应华,等. 地铁车辆段库上建筑环境振动影响规律研究[J]. 铁道学报, 2015, 37(8): 98-103.
WU Yubin, ZHANG Bin, LIU Yinghua, et al. Law of vibrations influence of subway on metro depot superstructure [J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(8): 98-103. (in Chinese)
- [11] 郑辉. 减振沟技术在地铁车辆段上盖开发中的研究及设计应用[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(11): 150-154.
ZHENG Hui. Research and design application of vibration damping ditch technology in metro depot with upper property development [J]. Railway Stand and Design, 2018, 62(11): 150-154. (in Chinese)
- [12] 国家环境保护局. GB10070—88 城市区域环境振动标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.



第一作者简介:陈艳明,男,1990年9月生,博士生。主要研究方向为铁路环境振动与噪声控制。曾发表《地铁车辆段上盖物业车致振动分析》(《振动与冲击》2016年第35卷第8期)等论文。
E-mail: 944894571@qq.com

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: fqshdtdx@aliyun.com