

地铁车辆段天车运行引发上盖物业振动试验研究^{*}

刘堂辉¹ 涂勤明¹ 罗信伟¹ 陈艳明² 冯青松²

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 510010, 广州;

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, 330013, 南昌 // 第一作者, 高级设计师)

摘要 为掌握地铁车辆段天车的振动源强特性及其在车辆内的振动传播规律, 在广州某地铁车辆段进行了现场振动试验。分析结果表明: 天车在车辆段运行时, 接缝处牛腿振动加速度明显较大于无缝处, 两者相差 3~4 dB, 因此建议车辆段内天车轨道使用无缝钢轨, 以达到减小振动源强的目的。天车以满载和空载两种工况运行时, 上盖建筑物楼板中央和柱脚振动在 6~12.5 Hz 频段有一定差异。在该频率范围, 天车以满载工况运行引起上盖建筑的振动大于空载工况, 而在其它频率范围则相差不大。天车引起的振动从上盖建筑物 1 层柱脚向 3 层柱脚传递时, 在大于 80 Hz 频率范围会有一定衰减, 而在 30~60 Hz 频段则会出现一定的放大, 在 5~20 Hz 频段基本没有变化。天车振动能量通过阻抗较小的混凝土结构直接传至上盖建筑物, 从而造成吊车运行引起上盖建筑物的振动响应较大。因此, 车辆段设计时除关注列车引起的振动外, 还应关注天车运行诱发上盖物业的振动。

关键词 地铁车辆段; 上盖物业; 天车; 振动试验; 振动源强

中图分类号 TU311.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.09.027

Experimental Study on Vibration of Metro Depot Overhead Property Induced by Bridge Crane Running

LIU Tanghui, TU Qinming, LUO Xinwei, CHEN Yanming, FENG Qingsong

Abstract To grasp the characteristics of vibration source strength of the bridge crane and the vehicle vibration propagation law in the metro depot, field vibration test is carried out in a metro depot in Guangzhou. Results show that when the bridge crane is running in the depot, vibration acceleration of the corbel at the joint is obviously larger than that at the seamless part, with a difference of 3~4 dB. Seamless rail is recommended for bridge crane track in the depot, so as to reduce the

vibration source strength. When the bridge crane running under full load and no-load conditions, there is a certain difference of 6 Hz~12.5 Hz in frequency band. In this frequency range, the vibration of the overhead building induced by the bridge crane operating under full load condition is greater than that under no-load condition, but there is no significant difference in other frequency ranges. When the vibration induced by the bridge crane transmits from the column base of the first floor to the column base of the third floor, certain attenuation appears in the frequency range greater than 80 Hz, certain amplification in the frequency range of 30 Hz~60 Hz, and there is basically no change in the frequency range of 5 Hz~20 Hz. The vibration energy of the bridge crane is directly transmitted to the overhead building through the concrete structure with small impedance, which causes the vibration response of the overhead building induced by the bridge crane operation to be larger. Therefore, in the design of metro depot, in addition to the vibration induced by train, the vibration of the overhead building induced by bridge crane operation should also be focused.

Key words metro depot; overhead property; bridge crane; vibration test; vibration source strength

First-author's address Guangzhou Metro Design and Research Institute, 510010, Guangzhou, China

0 引言

为充分利用地铁车辆段地面和地上空间, 不少城市尝试在地铁车辆段上盖进行物业开发。然而, 地铁车辆段上盖物业的振动和噪声问题不容忽视。地铁检修库天车在运行过程中产生的振动通过牛腿—柱子—车辆段平台传至上盖建筑, 从而引起上盖建筑的振动, 进而诱发二次结构噪声。若人长期暴露在严重的振动和低频噪声环境下, 人体的心血

^{*} 国家自然科学基金项目(51878277, 51668020); 江西省主要学科科学技术带头人培养计划项目(20194BCJ22008); 江西省重点研发计划项目(20192BBE50008)

管和神经系统等生理功能可能会受到一定的损害。因此控制车辆段上盖物业的振动和噪声成为上盖物业是否开发成功的关键。

随着地铁车辆段上盖物业这类工程的不断发展,不少学者开始关注这类结构的振动噪声问题。文献[1-3]通过现场实测分析了地铁车辆段列车振动源强特性,并且建立了基于车辆段上盖物业振动舒适度评价的精细化有限元模型。文献[4]通过地震振动台试验,研究了沈阳某地铁车辆段上盖双子楼结构的振动特性。文献[5-8]对广州和深圳的地铁车辆段进行了现场实测,分析了车辆段内地铁振动在车辆段地面及上盖建筑物内的振动传播规律,并采用经验公式计算了建筑物内辐射的结构噪声。文献[9]提出了预测地铁车辆段上盖建筑振动的阻抗模型,该模型计算效率较高,适用于车辆段建设初期的初步预测评估。文献[10]提出了屏障减振措施,对比分析了屏障不同宽度、深度及填充材料的减振效果。文献[11-12]对某高架车辆段上盖七层住宅楼振动进行了实测和理论分析,理论模型采用二维车辆-轨道耦合模型和三维车辆段结构有限元模型,并采用动力刚度法预测了上盖建筑结构的振动。文献[13]通过现场实测和三维有限元模型分析了试车线和检修线双振源作用下车辆段上盖建筑物的振动特性。文献[14]通过现场实测分析了某下沉式双层地铁车辆段咽喉区的振动源强特性及振动在车辆段平台的传播规律。

上述研究更多关注地铁列车运行引起的车辆段及上盖建筑物的振动噪声问题,对天车运行引起车辆段的振动问题研究还较少。地铁车辆检修过程中需要使用天车,天车在运行过程中产生的振动同样不可忽视。与地铁列车运行引起车辆段上盖物业振动不同,天车运行产生的振动传递路径为轨道—牛腿—柱子—车辆段平台—上盖建筑物,振动能量不经过土体的衰减直接传至上盖建筑物。基于此,本文结合广州某地铁车辆段,通过采用现场试验手段对天车运行引起的振动源强和上盖建筑物振动进行研究,掌握天车的振动源强特性及其在车辆内的振动传播特征及规律,以期对地铁车辆段减振设计提供有益参考。

1 现场测试

1.1 工程概况

广州某地铁车辆段主要由运用库、调机及工程

车库、联合检修库、试车线构成,其中天车主要在联合检修库。车辆段上盖物业开发包括住宅、商业、休闲娱乐、幼儿园、学校等。住宅共 61 栋,其中 54[#]楼—61[#]楼位于联合检修库上方。本文试验断面正上方为 57[#]楼,该栋楼为叠墅,共 3 层,测试期间主体结构已完工。

1.2 测点布置及试验工况

联合检修库天车振动源强共布置 2 个断面:断面一为天车轨道无缝断面,编号为 L31-1;断面二为天车轨道接缝断面,编号为 L31-2。两个断面间隔一个柱间距。分别在两个断面的牛腿处布置振动传感器。此外,在联合检修库上盖 57[#]楼内 1 层和 3 层楼板中央和柱脚布置振动测点。

本次试验分为 2 种工况:工况 1 以最大载重量 5 t 运行,共运行 10 次;工况 2 以空载运行,共运行 5 次。2 种工况下的天车运行速度约为 4 km/h,天车现场运行如图 1 所示。



图 1 广州某地铁车辆段联合检修库天车运行现场

1.3 测试仪器

本次测试采集仪采用德国 Head 公司 SQuadriga III 测试系统,源强处振动传感器采用 PCB352 振动加速度传感器,上盖建筑物内采用 941B 型振动加速度传感器。源强处和上盖建筑物内振动采样频率为 500 Hz。

2 测试结果分析

2.1 振动源强分析

联合检修库在各工况下源强处振动加速度响应如表 1 所示,两断面牛腿处振动时频域分析如图 2~3 所示。可以看出,各测次振动加速度级离散性较小,测试结果比较理想。当天车以最大载重量在联合检修库内运行时,无缝处和钢轨接缝处牛腿的振动加速度级均值分别为 94.3 dB 和 97.6 dB。当天车空载在联合检修库内运行时,无缝处和钢轨接缝处牛腿的振动加速度级均值分别为 96.2 dB 和 99.2 dB。接缝处振动加速度明显较大

表 1 广州某地铁车辆段联合检修库源强振动加速度级

工况	测量次数	不同断面处的振动加速度级	
		L31-1(无缝)	L31-2(接缝)
最大载重量(5 t)	1	94.4	97.9
	2	94.0	97.5
	3	94.3	97.8
	4	94.0	97.3
	5	94.3	97.6
	6	94.4	97.6
	7	94.4	97.4
	8	94.6	97.8
	9	94.3	97.4
	10	94.5	97.8
空载	平均值	94.3	97.6
	11	95.6	98.8
	12	96.3	99.2
	13	96.2	99.2
	14	96.3	99.3
	15	96.2	99.1
	16	96.2	99.4
	平均值	96.2	99.2

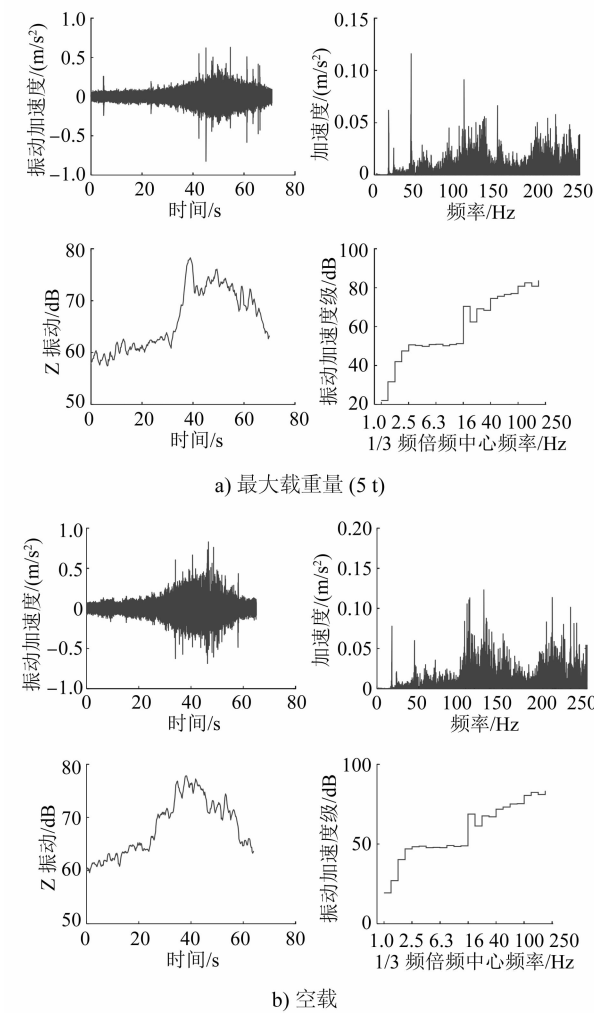


图 2 广州某地铁车辆段联合检修库断面 L31-1 牛腿不同工况下的振动时频域响应图

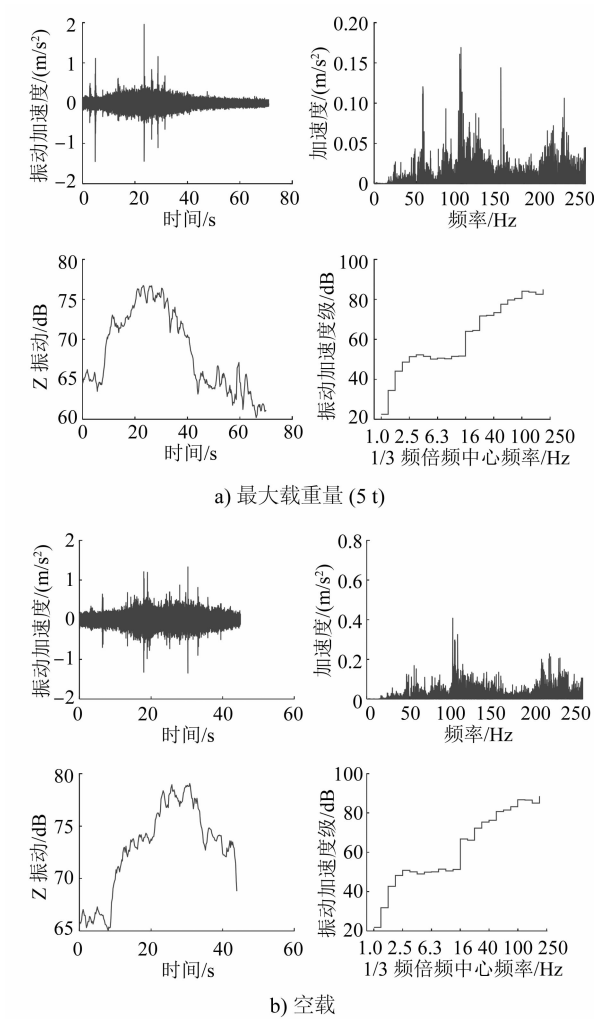


图 3 广州某地铁车辆段联合检修库断面 L31-2 牛腿不同工况下的振动时频域响应图

于无缝处,两者相差有 3~4 dB。建议车辆段内天车轨道使用无缝钢轨,从而达到减小振动源强的目的。与天车以最大载重量工况运行相比,同一速度(4 km/h)下天车空载运行引起的振动源强响应比满载工况还大,两者相差 1~2 dB。天车运行过程中,牛腿处振动频率分布较为分散,其中卓越频率分布在 100~150 Hz 频段。

2.2 上盖建筑物振动分析

车辆段上盖建筑物室内振动评价量为 Z 振级(见表 2),评价标准参考 GB/T 50355—2018《住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准》^[15]。联合检修库天车运行诱发建筑物振动响应如表 3 所示。可以看出,天车以满载在联合检修库内运行时,上盖建筑物 1 层和 3 层楼板中央 Z 振级均值分别达到 81.2 dB 和 84.9 dB,超过规范二级限值 3~6 dB,这可能由于吊车振动直接通过牛腿—柱子—上盖平

台传至上盖建筑物,振动能量不经过土体的衰减直接传至上盖建筑物,而混凝土结构阻抗较小,从而造成吊车运行引起上盖建筑物的振动响应较大。因此,在车辆段设计过程中,除了关注列车引起振动外,还需重点关注天车运行诱发上盖物业的振动。由于柱脚处受到梁和柱的约束作用,因此柱脚处的振动小于楼板中央的振动,两者相差 10~15 dB 左右。吊车运行引起上盖建筑物振动从 1 层传至 3 层时,柱脚和板中振动均有所放大。

表 2 标准 GB/T 50355—2018 中规定的住宅建筑

室内 Z 振级限值			单位: dB
房间名称	限值等级	时段	限值
卧室	一级	昼间	73
		夜间	70
	二级	昼间	78
		夜间	75
起居室(厅)	一级	全天	73
	二级	全天	78

表 3 广州某地铁车辆段联合检修库天车诱发

上盖物业 57#楼 Z 振级

单位: dB

工况	测量次数	不同测点处的 Z 振级			
		1 层柱脚	1 层板中	3 层柱脚	3 层板中
满载(5 t)	1	68.4	79.5	71.7	84.8
	2	67.8	79.4	69.9	83.0
	3	68.0	80.6	71.3	86.8
	4	67.3	80.3	69.8	82.4
	5	68.8	81.4	71.7	84.1
	6	67.5	81.9	70.1	85.7
	7	68.8	83.4	72.5	86.5
	8	68.5	82.4	70.4	85.5
	9	70.5	80.8	73.3	84.7
	10	69.1	82.1	72.0	85.2
	平均值	68.5	81.2	71.3	84.9
空载	11	67.1	79.1	69.7	84.3
	12	69.6	78.9	71.1	86.4
	13	67.7	77.3	69.5	84.3
	14	69.8	78.5	71.7	86.5
	15	68.5	76.7	70.5	82.9
	平均值	68.5	78.1	70.5	84.9

天车运行诱发上盖建筑物楼板中央和柱脚的 1/3 倍频如图 4~5 所示。从图中可以看出,建筑内 1 层板中振动峰值发生在 31.5 Hz,3 层板中振动峰值发生在 25.0 Hz,这可能与楼板构造有关,3 层楼板厚度小于 1 层楼板,导致 3 层楼板刚度小于 1 层楼板,使得 3 层楼板的振动峰值频率小于一层楼板。天车以满载和空载两种工况运行时,板中和柱脚振动在 6.0~12.5 Hz 频段有一定差异,在该频率范围,

天车以满载工况运行引起上盖建筑的振动大于空载的工况,而在其它频率范围则相差不大。

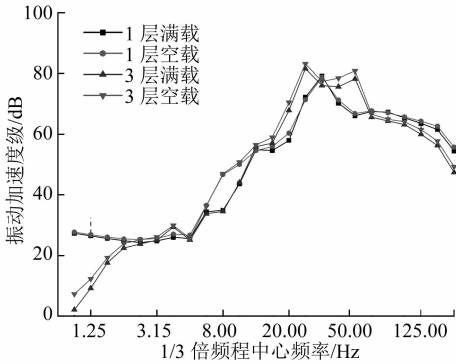


图 4 广州某地铁车辆段联合检修库天车诱发上盖物业 57# 楼楼板中央测点 1/3 倍频程图

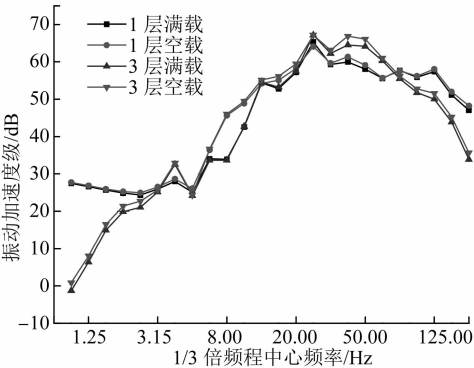


图 5 广州某地铁车辆段联合检修库天车诱发上盖物业 57# 楼柱脚测点 1/3 倍频程图

2.3 振动传递分析

天车运行引起振动在牛腿-上盖建筑物传递 1/3 倍频如图 6 所示。从图中可以看出:振动从上盖建筑物内 1 层柱脚向 3 层柱脚传递过程中,在 3 Hz 以内和 80 Hz 以上频率范围会有一定衰减,而在 30~60 Hz 频段则会有一定的放大,在 5~20 Hz 频

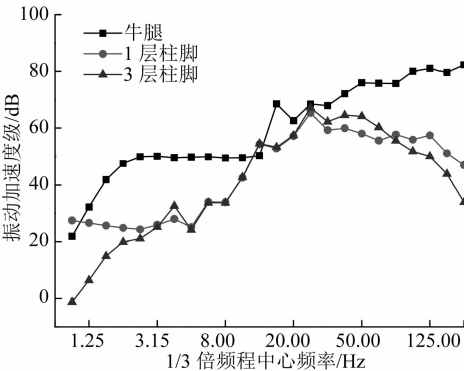


图 6 广州某地铁车辆段联合检修库天车运行振动传递 1/3 倍频图

段基本没有变化。在分析频率范围内,1层和3层柱脚振动相比振源牛腿处有明显衰减;在50 Hz以上,频率越高衰减越大;在200 Hz处衰减最大,达到30~40 dB。

3 结语

本文通过对天车运行引起地铁车辆段上盖建筑物振动进行了试验研究,基于试验结果分析了天车振动源强、上盖建筑物振动特性和振动传递规律,得到如下结论:

1) 天车在车辆段运行时,接缝处牛腿振动加速度明显较大于无缝处,两者相差3~4 dB。建议车辆段内天车轨道使用无缝钢轨,以达到减小振动源强的目的。

2) 天车振动能量通过阻抗较小的混凝土结构直接传至上盖建筑物,从而造成吊车运行引起上盖建筑物的振动响应较大。因此,在车辆段设计过程中,除关注列车引起振动外,还应重点关注天车运行诱发上盖物业的振动。

3) 天车以满载和空载两种工况运行时,上盖建筑物内楼板中央和柱脚振动在6.0~12.5 Hz频段有一定差异,在该频率范围,天车以满载工况运行引起上盖建筑的振动大于空载工况,而在其它频率范围则相差不大。

4) 天车引起的振动从上盖建筑物1层柱脚向3层柱脚传递时,Z振级出现一定的增大。在小于3 Hz以内和大于80 Hz频率范围会有一定衰减,而在30~60 Hz频段则会出现一定的放大,在5~20 Hz频段基本没有变化。

参考文献

- [1] 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(6): 90.
- [2] 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(8): 132.

- [3] 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(8): 110.
- [4] 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(6): 56.
- [5] 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.
- [6] ZOU C, WANG Y M, A. MOORE J, et al. Train-induced field vibration measurement of ground and over-track buildings[J]. Science of the Total Environment, 2017, 575: 1339-1351.
- [7] TAO Z Y, WANG Y M, SANAYEI M, et al. Experimental study of train-induced vibration in over-track buildings in a metro depot[J]. Engineering Structures, 2019, 198: 109473.
- [8] TAO Z Y, WANG Y M, ZOU C, et al. Assessment of ventilation noise impact from metro depot with over-track platform structure on workers and nearby inhabitants[J]. Environmental science and pollution research, 2019, 26(9): 9203-9218.
- [9] ZOU C, A. MOORE J, SANAYEI M, et al. Impedance model for estimating train-induced building vibrations[J]. Engineering Structures, 2018, 172: 739-50.
- [10] TAO Z Y, WANG Y M, ZHANG X, et al. Vibration isolation of over-track buildings in a metro depot by using trackside wave barriers[J]. Journal of Building Engineering, 2020, 30: 101270.
- [11] GUO T, CAO Z L, ZHANG Z Q, et al. Numerical simulation of floor vibrations of a metro depot under moving subway trains[J]. Journal of Vibration and Control, 2018, 24(18): 4353-4366.
- [12] CAO Z L, GUO T, ZHANG Z Q. Vibration measurement in a metro depot with trains running in the top story[J]. Journal of Vibroengineering, 2017, 19(1): 502-519.
- [13] 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(4): 59.
- [14] 陈艳明,冯青松,刘庆杰,等. 下沉式地铁车辆段咽喉区车致振动特性[J]. 交通运输工程学报,2020(3): 51.
- [15] 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: 4-5.

(收稿日期:2021-01-25)

《城市轨道交通研究》官方网站网址变更公告

根据同济大学对所属单位官方网站管理的统一要求,从2021年7月15日起,《城市轨道交通研究》官方网站网址(原网址:www.umt1998.com)变更为:https://umt1998.tongji.edu.cn。给各位作者、读者带来不便,敬请谅解。

上海铁大城市轨道交通研究杂志社有限公司

2021年7月1日