

文章编号: 1005-0523(2025)03-0012-10



## 地铁车辆段试车线减振改造后振动特性研究

张凌<sup>1</sup>, 彭思捷<sup>1</sup>, 冯青松<sup>2</sup>, 徐浩能<sup>2</sup>

(1. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 华东交通大学交通运输工程学院, 江西 南昌 330013)

**摘要:**为解决地铁车辆段试车线区域上盖建筑振动超标的问题,对某地铁车辆段试车线进行钢弹簧浮置板减振改造,对改造前后的环境振动进行现场实测和有限元仿真,分析振源及上盖的振动传递规律。结果表明:车辆在试车线行车时,车速对源强主频的影响会影响到各楼层楼板的振动水平,卧室测点在车速60 km/h的工况下振动较大,而客厅测点在车速40 km/h的工况下振动较大。振动随测点与振源距离的增大呈先减小后增大再减小的趋势。钢弹簧浮置板减振可能会导致噪声放大,改造后振源各测点振动均降低了10.00 dB以上,但距轨道中心7.5 m测点的噪声增加了0.96 dB。对比观察发现随试车线区域上盖建筑层高的变化,减振改造前后各分频振级振动加速度级最大频段出现了前移,由减振改造前的25~40 Hz变为了20~25 Hz,这与振源处激励频率的改变有关。相比于普通碎石道床,钢弹簧浮置板道床能大幅减少振动,使此车辆段试车线区域上盖建筑振动满足相应规范要求。

**关键词:** 试车线; 减振改造; 实测; 仿真; 钢弹簧浮置板

中图分类号: U225.4

文献标志码: A

本文引用格式: 张凌, 彭思捷, 冯青松, 等. 地铁车辆段试车线减振改造后振动特性研究[J]. 华东交通大学学报, 2025, 42(3): 12-21.

## Research on Vibration Characteristics After Vibration Reduction Renovation of the Testing Line in Subway Depot

Zhang Ling<sup>1</sup>, Peng Sijie<sup>1</sup>, Feng Qingsong<sup>2</sup>, Xu Haoneng<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

2. School of Transportation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** The issue of excessive vibration in high-rise buildings located in the test track area of subway depots is studying. Through on-site measurement and finite element simulation of the environmental vibration before and after the vibration reduction transformation of a subway vehicle testing line, the vibration source and the vibration transmission law of the upper cover before and after the vibration reduction transformation were analyzed. The results indicated that the influence of vehicle speed on the dominant frequency of the source intensity affects the level of vibration transmitted to various floor slabs. The vibration measured in bedrooms was relatively large under the condition of 60 km/h, while the vibration in living rooms was more significant under the condition of 40 km/h. The vibration decreased first, then increased and then decreased with the increased of the distance between the measuring point and the vibration source. While the steel spring floating slab reduced vibration, noise may be slightly amplified, with all vibration measurement pointed at the vibration source reduced by

收稿日期: 2024-09-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(52468063)

more than 10.00 dB after the modification, but the noise at the 7.5 m measurement point increased by 0.96 dB. By compared and observed the changes in vibration levels at different frequencies with floor height before and after the vibration reduction modification, it was found that the maximum frequency band of vibration acceleration level shifts forward, from 25~40 Hz before the modification to 20~25 Hz after, which was related to the change in excitation frequency at the vibration source. Compared to conventional ballast beds, the steel spring floating slab after vibration reduction modification can significantly reduce vibrations, enabling the buildings constructed above the test track area of this depot to meet the corresponding regulatory requirements.

**Key words:** testing line; vibration reduction modification; field measurement; simulation; steel spring floating slab

**Citation format:** ZHANG L, PENG S J, FENG Q S, et al. Research on vibration characteristics after vibration reduction renovation of the testing line in subway depot[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42 (3): 12-21.

近年来,我国城市轨道交通发展势头强劲,截至2023年底,我国境内已有59个城市开通轨道交通线路,数量多达338条,其中地铁运营里程为8 547.67 km,占总运营里程的76.1%<sup>[1]</sup>。为了进一步提高土地和资源空间的利用率,地铁车辆段上盖建筑应运而生。目前,国内外大多数车辆段仍采用地面单层结构,地铁车辆段通常设置在线路的首尾站附近,主要承担地铁列车停放、检查、整备和修理的任务。随着城市规模的不断扩大,车辆段的开发价值也愈发突出,车辆段的开发导致轨道交通振源与建筑之间的距离缩短,车辆段内的车辆在凌晨和深夜运行产生的振动极有可能会影响上盖建筑中居民的正常生活<sup>[2-5]</sup>,因此掌握振源和上盖的振动传播规律,有效控制振动意义重大。

目前国内外专家已开展了大量研究,冯青松等<sup>[6-8]</sup>在双层车辆段内进行现场实测,发现在80 Hz以上频段,土体对高频能量的衰减作用使得一层行车引起的上盖建筑低层振动能量小于二层行车。马晓华<sup>[9]</sup>研究发现库门口的振动值大于库内区段,库末端振动值最小,以车辆段库门口设置不同刚度值时对建筑物的振动影响为对象进行仿真分析,通过减振效果、经济性、施工便利性多方面的对比,建议上盖开发地段的库门口设计为整体道床并铺设减振扣件,刚度宜为15 kN/mm。曹志刚等<sup>[10]</sup>使用有限元软件仿真分析,发现道砟垫对上盖建筑的减振效果随着振动频率的增大呈整体提升的趋势,40 Hz以上的频段,结构最大插入损失可达7~12 dB。车速越快,道砟垫刚度越小,对上盖建筑的减振效果

越好。贺利工等<sup>[11]</sup>发现由于梁和楼板的阻抗作用,振动总能量在向上传播的过程中逐渐衰减,不同传递路径对不同频段振动的衰减作用不尽相同。建筑物内振动主频主要受楼板固有频率影响较大,集中在40~50 Hz。陈艳明等<sup>[12]</sup>对下沉式车辆段列检库区域进行了现场实测,发现列车运行引起上盖平台的振动随着与线路中心距离的增大呈线性衰减,其中端部股道行车时线性衰减率比中部股道要大。谢伟平等<sup>[13]</sup>对杭州某车辆段试车线上盖建筑进行实测,发现车速改变并不能引起楼板振动主频的变化,楼板的振动主频始终集中在其自振频率处。贺利工等<sup>[14]</sup>通过分析某双层车辆段库振源特性及其传递衰减规律,得知车辆在运用库二层行车比一层行车引起上方盖板的振动响应大。岳修平等<sup>[15]</sup>通过实测数据分析发现试车线的总振级最大,其次是咽喉区,最小的是库内区,在关注上盖建筑振动时,尤其需要对6~63 Hz频带的振动进行控制,根据此研究结果可对不同区域的振动进行针对性控制。闫宇智等<sup>[16]</sup>研究得出试车线的昼间试车速率不应超过45 km/h,新建试车线与住宅区的距离应不小于30 m。Zou等<sup>[17-19]</sup>发现地铁车辆段咽喉区与试车线由于轨道结构的不同,导致上盖建筑水平振动频率差异较大,与咽喉区相比,试车线车辆引起的上盖建筑水平振动以高频段为主;车辆段上盖建筑中,垂直振动随与振源距离的增加而衰减,水平振动则受楼板中垂直振动波和柱中弯曲波的影响呈现不同的衰减规律。

综上所述,既有的研究多集中在车辆段运用

库、检修库等库房上盖区域,而对试车线区域不同轨道形式的实测和仿真分析很少。而这一区域由于列车运行速率较大导致振动较大,迫切需要深入研究。且对不同轨道形式的应用研究也多在不同断面下展开,然而其结果会受到车辆类型、运行速率、轨道不平顺以及地质条件等方面差异的影响,大大降低了现场测试的精准度。本文在试车线区域进行减振改造和对比分析,减少了其他因素的影响,提高了数据的准确性。

基于此,本文对广州某车辆段试车线源强及上盖建筑区域进行现场实测,分析不同因素下试车线列车对周围环境的振动影响,并用有限元软件进行仿真,以项目减振改造前的碎石道床为对照,分析改造后钢弹簧浮置板道床的减振效果,所得结论对类似工程减振控制及上盖建筑布局具有重要参考价值。

## 1 车辆段现场概况和实测方案

实测车辆段为架空式单层车辆段,其主体构筑物包括停车列检库、周月检库、静调库、联合检修库、洗车机库、工程车库和试车线等,其中试车线的主要作用为测试新车与检修后列车运行时的综合性能,该区域列车最大时速可达80 km,为其他区域列车速率的4~8倍。既有研究表明,列车速率大小与其造成的环境振动强度成正比,因此本文在试车线上设置振源和上盖测点研究试车线列车运行造成的环境振动影响,图1为车辆段平面示意图,其中红点处为振源测点,测试断面均为有砟轨道。

上盖建筑测点布置如图2,其中试车线位于19#建筑物北侧约15 m,为振动敏感区。19#建筑物为框架剪力墙结构,建筑每层层高2.9 m,总楼层为24层。测点位于建筑5层、12层和18层的客厅和卧室地板中央。

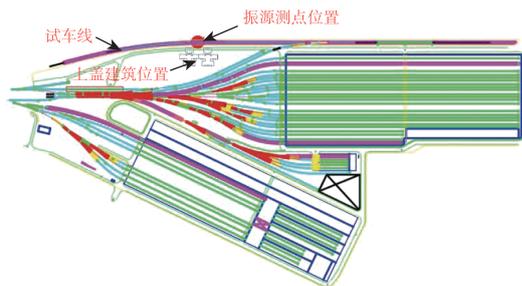


图1 车辆段平面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the depot

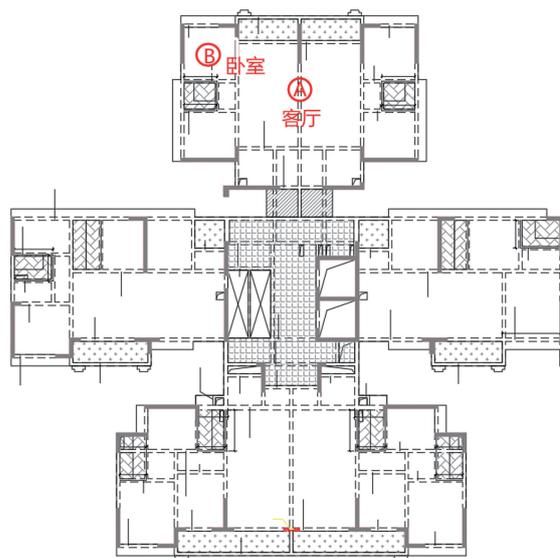


图2 上盖建筑测点布置图

Fig. 2 Measurement point layout of the over-track building

试车线有砟轨道设置了5个振动测点,具体包括:钢轨垂向振动测点(测点1)、轨枕振动测点(测点2)、砟脚地面振动测点(测点3)、临近柱子振动测点(测点4),以及距线路中心线7.5 m处的地面振动测点(测点5),如图3所示。

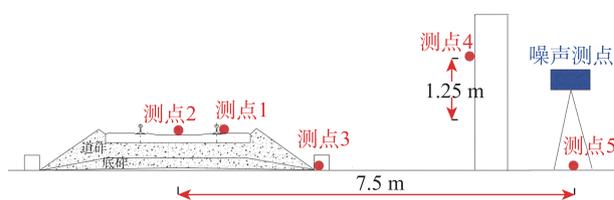


图3 有砟轨道振源测点布置图

Fig. 3 Layout diagram for measurement points of vibration sources on unballasted track

为消除车辆因素带来的实验误差,本次测试采用单辆服役状态良好的8节编组A型专车在试车线上来回行车。所用数据采集仪为NI CRIO-9031和德国便携式Head采集仪,盖上和盖下采样频率均设置为1 600 Hz。分别在车速40 km/h和60 km/h工况下采集测点数据20次,共获得40组数据。

## 2 减振改造前上盖实测数据的分析

由于试车线的车速快于运用库等车辆段区域,存在振动超标的风险,合理准确地评估其对上盖建筑的影响尤为重要,国内现行振动评价指标主要为最大Z振级和分频最大振级,能较好的反映振动强

度和峰值影响。

本文采用《住宅建筑室内振动限值及其测量方法标准》(GB/T 50355—2018)对上盖建筑中卧室的振动情况进行评价,按照《机械振动与冲击人体暴露于全身振动的评价》(GB/T 13441.1—2007)中的全身振动Z计权因子对振动加速度级进行修正得到Z振级。

其中GB/T 50355—2018的Z振级限值为:卧室昼间73 dB(一级)、78 dB(二级),夜间70 dB(一级)、75 dB(二级),客厅全天73 dB(一级)、78 dB(二级)。一级限值为适宜达到的限值,二级为不得超过的限值。

由于试车线上车辆在昼间与夜间均存在运行的可能,故以夜间限值作为参照标准。根据表1数据显示,当车辆运行速率达到60 km/h时,上盖建筑5层卧室与12层卧室的振动值均超出夜间二级限值75 dB。此外,5层卧室在车辆运行速率40 km/h的工况下,振动值超过夜间一级限值;5层客厅在车辆运行速率40 km/h的工况下,振动值也超出二级限值。值得注意的是,5层卧室在车辆运行速率60 km/h的工况下,振动值超出二级限值10.3 dB,存在较为严重的振动超标问题。

表1 实测Z振级

Tab.1 Measured Z-vibration level dB

测点位置	40 km/h	60 km/h
5层卧室	74.6	85.3
12层卧室	68.1	77.4
18层卧室	66.9	69.9
5层客厅	80.8	75.3
12层客厅	73.4	69.3
18层客厅	75.1	69.1

取实测40组数据分频振级的平均值,绘制三分之一倍频程图,见图4。由图可知车辆运行速率为40 km/h的工况下,在50~60 Hz的频段,上盖建筑5层卧室振动超过了一级限值,而18层在40 Hz频率下的振动大于12层,但未超过限值。由此也可验证振动随楼层增加而呈现的先减后增的规律。

车辆运行速率为60 km/h的工况下,上盖建筑5层卧室和12层卧室在63 Hz频率下振动均超过了二级限值,由此可判断此车辆段试车线长期暴露在振动和结构噪声环境下,严重影响居民的休息和工作。某些低频段结构噪声甚至会与人的胸腔和脑

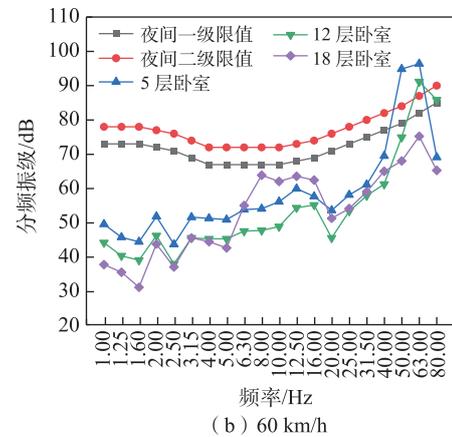
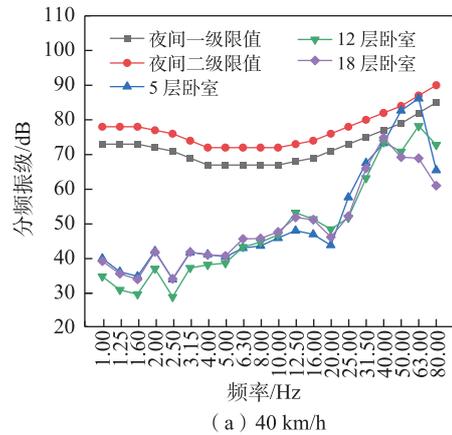


图4 不同车速工况下上盖建筑实测三分之一倍频程图  
Fig. 4 Measured one-third octave band diagram of the over track building at different speeds

腔产生共振,引发心脏病和高血压等健康问题。对该车辆段试车线实施改造,将原试车线有砟轨道改造为钢弹簧浮置板结构,以降低振动与噪声的影响。

由表1数据可以发现,试车线上盖建筑同一楼层的振动并非完全呈现车辆行驶速率越大振动越大的特点,卧室的跨径为3.5 m×3.2 m,客厅为6.5 m×4 m,卧室测点在车速60 km/h工况下测得的振动大于客厅测点,而客厅测点则在车速40 km/h工况下测得的振动大于车速60 km/h工况,说明车速对源强主频的影响会影响到各楼层楼板的振动水平。客厅振动较大的原因是车速40 km/h工况下激励频率与客厅楼板的自频率接近。卧室振动较大的原因是车速60 km/h工况下,激励频率与卧室楼板的自振频率接近。

通过对上盖建筑各测点在不同车速下振动响应的对比分析发现,当车辆运行速率达到60 km/h时,建筑的振动超标情况比40 km/h时更为严重,且卧室

为主要超标区域。鉴于此,亟需针对车速 60 km/h 工况下的振动问题开展深入研究,并采取有效的减振措施。

为评估轨道减振降噪改造措施的实际效果,开展钢弹簧浮置板改造前后轨道振动噪声源强对比测试。此次测试于试车线进行,安排专车以 60 km/h 的车速往返跑车 30 趟。测试断面与仪器均与改造前保持一致,其中测点 1、3、4、5 与改造前保持一致,新增测点 6 用于监测道床振动情况,如图 5 所示。

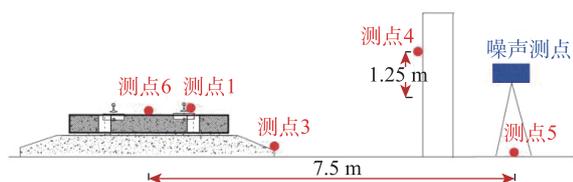


图5 钢弹簧浮置板改造后振源测点布置图

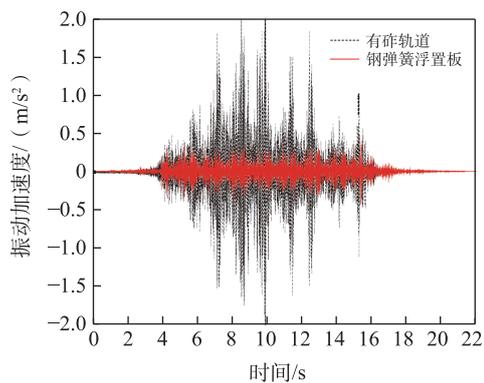
Fig. 5 Layout diagram for measurement points of vibration sources after renovation by steel spring floating plate

### 3 减振改造前后振源实测对比分析

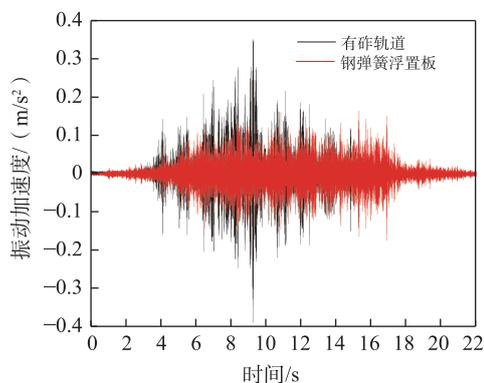
试车线上车速 60 km/h 工况下测点时域对比如图 6 所示,对比改造前后两种工况,有砟轨道砟脚测点 3 的加速度峰值为  $2.00 \text{ m/s}^2$ ,加速度有效值为  $0.35 \text{ m/s}^2$ 。钢弹簧浮置板减振改造后砟脚测点 3 加速度峰值为  $0.43 \text{ m/s}^2$ ,有效值为  $0.08 \text{ m/s}^2$ 。改造前测点 3 的振动加速度峰值是改造后的 4.65 倍,有效值为改造后的 4.37 倍。

测点 4 在有砟轨道工况下的加速度峰值为  $0.39 \text{ m/s}^2$ ,加速度有效值为  $0.050 \text{ m/s}^2$ ,改造后测点 4 加速度峰值为  $0.170 \text{ m/s}^2$ ,有效值为  $0.028 \text{ m/s}^2$ ,改造前测点 4 的振动加速度峰值是改造后的 2.3 倍,有效值为 1.78 倍。通过对两个测点的数据分析与对比可知,受钢弹簧浮置板卓越的振动衰减性能影响,道床测点的振动衰减幅度显著高于柱子测点。

图 7 给出了在某一测次测点 4 和测点 5 在 1~200 Hz 内的振动响应,从图 7(a)可以看出,减振前后测点 4 的振动峰值均出现在 65 Hz 处。且二者分频振级随频率增加的变化趋势相似,振动主频段均分布在 31.50~125.00 Hz 以内。全频段内,6~8 Hz 频段钢弹簧浮置板道床测点 4 的振动略微放大,1~6 Hz 和 8~200 Hz 钢弹簧浮置板道床的测点 4 振动强度均小于改造前,钢弹簧浮置板的减振作用使



(a) 测点3



(b) 测点4

图6 减振改造前后振源测点时域对比图

Fig. 6 Time-domain comparison diagram of vibration source measurement points before and after vibration mitigation renovation

得各频率下振级降低 12~29 dB。说明减振改造后,振动并不是全频段减小,在 6~8 Hz 频段下会有放大现象,钢弹簧浮置板对振源处 20~200 Hz 频段的减振效果较为明显。

从图 7(b)可以看出,减振改造前后测点 5 的振动在 1~15 Hz 频段较为接近,15 Hz 以后频段的随频率增大分频振级均呈现先增大再减小的趋势,有砟轨道工况下的测点在 50 Hz 处达到第一峰值,而改造后的钢弹簧浮置板道床测点在 65 Hz 处达到第一峰值。对比 20~200 Hz 频段,发现钢弹簧浮置板的存在使得该频段的振动能量大幅降低,该频段各分频振级降低约 6~17 dB,而在 20 Hz 以下频段,二者数值相当。

为了更直观的对比此车辆段试车线改造前后的振动变化,取减振改造前后振源处测试数据的最大 Z 振级平均值进行对比,如图 8 所示,与改造前相比,距轨道中心 7.5 m 处测点地面最大 Z 振级降低最为明显,下降了 24.23 dB,振动随与振源的距离的

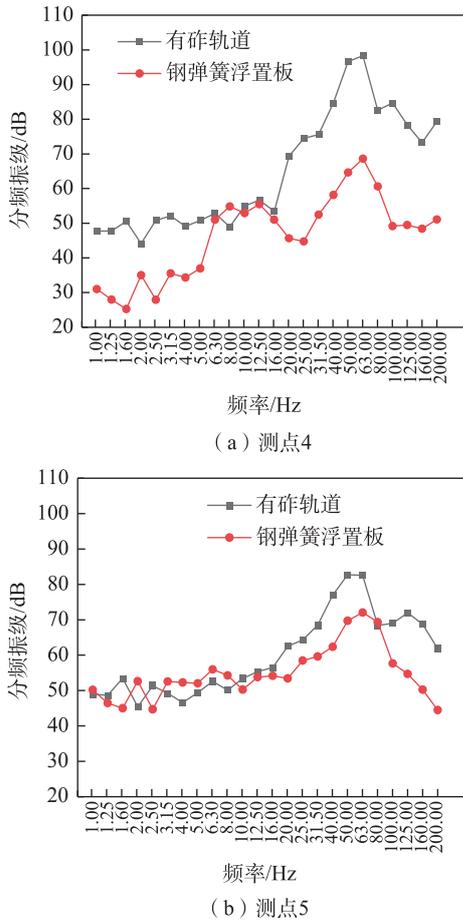


图7 减振改造前后振源测点三分之一倍频程对比图  
Fig. 7 Comparison diagram of one-third octave bands at vibration source measurement points before and after vibration mitigation renovation

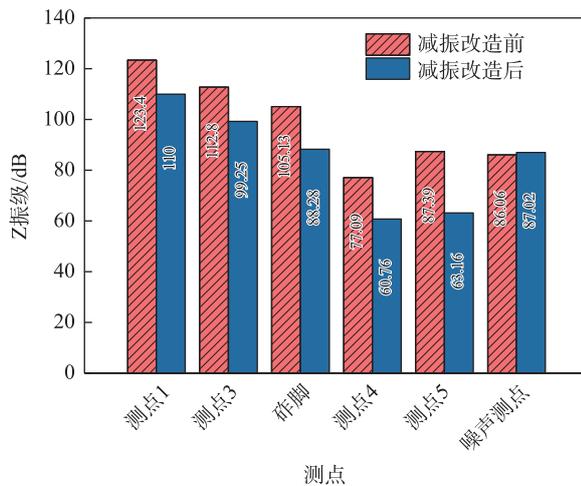


图8 减振改造前后Z振级对比  
Fig. 8 Comparison of Z-vibration level before and after vibration mitigation renovation

增加并非呈现单调递减,在由钢轨传递至轨旁立柱时振动一直在衰减,在距轨道中心7.5 m处测点振动出现了放大。减振改造前距轨道中心7.5 m处测点振动较轨旁立柱测点放大了10.30 dB,改造后放大减少为2.40 dB。改造后振源各测点振动均降低了10.00 dB以上,但距轨道中心7.5 m测点的噪声略有增加。

#### 4 车辆段有限元模型的建立与验证

鉴于减振改造前的上盖建筑现场实测开展于居民入住前,而改造后的实测需在住户已完全入住的情况下进行,这不仅为上盖建筑的实测造成了一定的困难,且使得改造前后的数据对比增加了新的影响因素。为进一步探究试车线不同轨道形式对上盖建筑振动的影响规律,本文应用有限元仿真技术,通过构建列车-轨道-土体-桩-上盖建筑的三维全耦合动力学模型,全面模拟复杂的振动传递过程。轮轨不平顺参数采用课题组在相似工况车辆段实测所得的钢轨粗糙度数据,轮轨竖向力则借助动力学仿真软件UM计算获得。图9为有限元模型图。

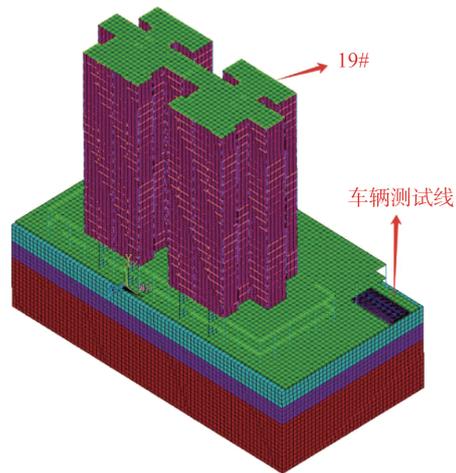
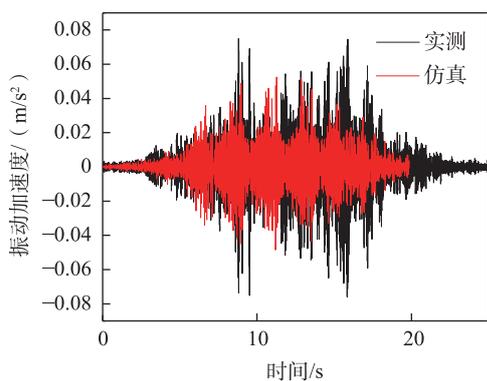
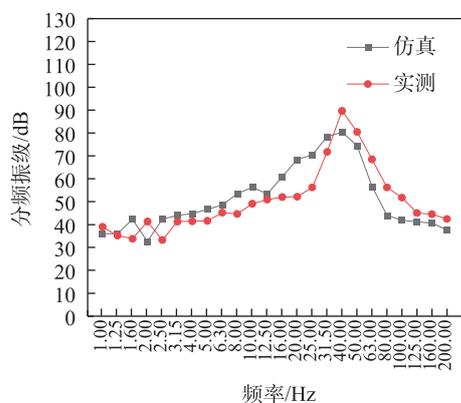


图9 车辆段有限元模型整体图  
Fig. 9 Overall view of the finite element model of the depot

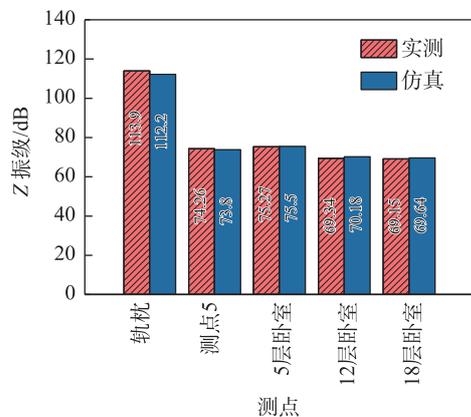
为验证有限元模型和输入荷载的正确性,将改造前实测与仿真得到的振动响应进行对比,结果如图10(a)所示,试车线上盖建筑5层测点的实测加速度峰值为0.07 m/s<sup>2</sup>,仿真峰值为0.06 m/s<sup>2</sup>,模型在时域上较为吻合。



(a) 5层实测和仿真



(b) 5层测点三分之一倍频程图对比



(c) 振源及上盖 Z 振级对比

图 10 实测与仿真对比图

Fig. 10 Measured vs simulated comparison chart

试车线上盖建筑5层测点三分之一倍频程图实测与仿真对比如图10(b)所示,振动加速度级随频率的增加变化趋势基本相同,但由于未考虑车轮不圆度等因素,在15~30 Hz时,仿真数据比实测数据大,其他频段二者数据相近。图10(c)为振源以及上盖所提取Z振级对比图,轨枕处数据仿真有1.70 dB误差,在误差范围内,说明仿真模型较为准确,参数设置较为合理。

## 5 减振改造后上盖建筑振动传递分析

为研究减振改造后不同车速工况下振动在上盖建筑中的传递规律,分别对40、60、80 km/h速率工况下上盖建筑不同楼层卧室盖板的振动数据进行采集,结果如图11所示。由图11可知,随着车速由40 km/h增加至60 km/h,各楼层Z振级均有所增加,其中低层Z振级增加9~12 dB,由于其距离振源较近,振动由柱子和剪力墙等传递至上盖建筑,随着层高的增加,Z振级幅值的增加有所降低。上盖建筑1层表现出较低的振动响应特性,这主要归因于1层所处的大平台结构,其盖板厚度大于其他楼层,且能够有效吸收振动能量。对比车速60 km/h工况和80 km/h工况,发现振动响应并不是随着车速的增加而单调增加,上盖建筑1~7层,车速80 km/h工况下的Z振级小于60 km/h工况,60 km/h工况下,激励频率与卧室楼板的自振频率接近,出现了振动放大的现象。车速40 km/h工况下,上盖建筑第9层振动衰减至最低水平,其后随着楼层增加振动放大,原因是振动波沿上盖柱子传至顶层时,上部已无吸收能量的结构,这时入射波与反射波的叠加作用使振动能量增大;而车速60 km/h工况下振动最低值出现在第13层,这与上盖不同楼层的自振频率不同等因素有关。但对比图11中的夜间卧室限值,改造后试车线上盖建筑振动水平满足相应规范要求。振动最大值均出现在第2层的楼板,确定第2层为最有可能振动超标的楼层。于是对2层卧室进行进一步分析。

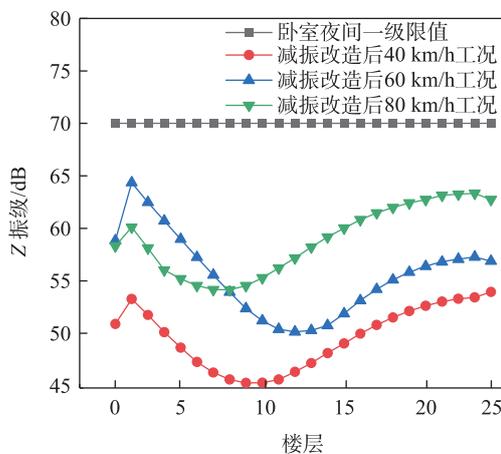


图 11 不同车速下的上盖建筑振动传递规律

Fig. 11 Vibration transmission law of over track building under different vehicle speeds

由图12可见,上盖建筑2层卧室测点在不同速率工况下的振动主频均在15~40 Hz,且在20 Hz达到峰值,2层卧室在各频段的振动均小于夜间限值,进一步验证了使用钢弹簧浮置板进行此车辆段试车线改造可使上盖建筑振动响应满足相应规范要求。

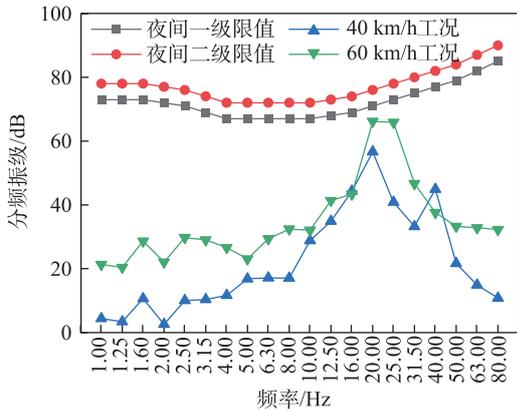


图12 不同车速下上盖建筑2层卧室三分之一倍频程图  
Fig. 12 One-third octave band diagram of cover at different vehicle speeds of the bedroom on the 2nd floor of the over track building

### 6 减振改造前后上盖建筑振动传递特性分析

以车速 60 km/h 工况下上盖建筑5层卧室和客厅的仿真数据为分析对象,分析减振改造前后对人体影响较大的1~100 Hz频段的振动响应,各工况下典型分频振级数据如图13所示。由图可见,在改造前客厅和卧室的分频振级在低频段的差异较明显,客厅在1~10 Hz的振动加速度级明显大于卧室,而

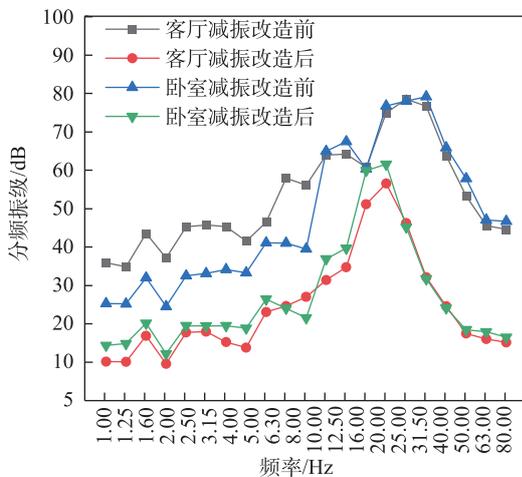


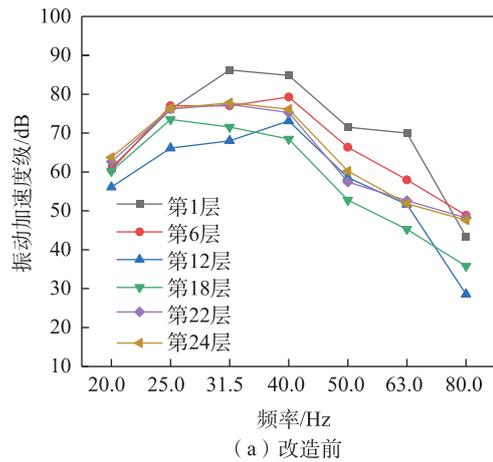
图13 上盖建筑第5层不同区域振动分析  
Fig. 13 Vibration analysis of different zones on the 5th floor of the over track building

改造后客厅和卧室则较为接近,这与钢弹簧浮置板对低频振动的衰减作用以及客厅、卧室楼板的固有频率差异有关。

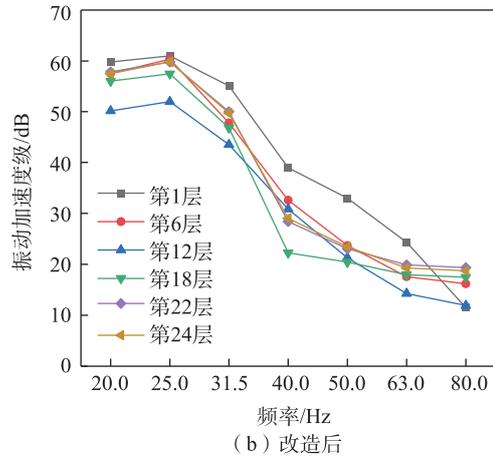
有砟轨道工况下的峰值频率出现在40 Hz,而改造后钢弹簧浮置板工况下的峰值频率出现在30 Hz,不同工况下上盖建筑振动主要频率均集中在20~80 Hz处。故对此频段进行重点分析。

由图14(a)所示,减振改造前上盖建筑第1层、第2层和第12层的卧室振动加速度级在40 Hz振动频率下达到最大,随着楼层的继续增加,第18层、22层和24层卧室的振动加速度级在25 Hz下达到峰值。各楼层在25~40 Hz频段的振动加速度级较大,应优先考虑对此频段进行减振,不同楼层振动随频率增加均呈先增后减的现象,振动频率为80 Hz时各层的振动均为最小。

图14(b)中,减振改造后31.5~40.0 Hz频段振



(a) 改造前



(b) 改造后

图14 减振改造前后分频振级随上盖建筑层高变化图  
Fig. 14 Frequency-divided vibration levels varying with floor height before and after vibration mitigation renovation

动加速度级下降显著,降低近 25 dB。对比观察减振改造前后各分频振级随层高的变化,发现振动加速度级最大频段出现了前移,由减振改造前的 25~40 Hz 变为了 20~25 Hz,这与振源处激励频率的改变有关。

## 7 结论

本文采用现场实测和仿真分析相结合的方法研究广州某单层车辆段试车线区域车致振动源对盖上环境振动的影响,对比分析了减振改造前后的振动响应,得到以下结论。

1) 上盖建筑同一楼层的振动并非完全呈现行车速率越大振动越大的规律,卧室测点在车速 60 km/h 工况下的振动较大,而客厅测点则在车速 40 km/h 工况下的振动较大。说明车速对源强主频的影响会影响上盖建筑各楼层楼板振动的水平。客厅振动较大的原因是车速 40 km/h 工况下激励频率与客厅楼板的自振频率接近。卧室振动较大的原因是车速 60 km/h 时,激励频率与卧室楼板的自振频率接近。

2) 振动随振源距离的增大呈现先减小后增大再减小的规律,在振动传递至距钢轨中心 7.5 m 处振动出现了放大。减振改造前距钢轨中心 7.5 m 处振动放大 10.30 dB,改造后放大 2.40 dB。改造后振源各测点振动均降低了 10.00 dB 以上,但 7.5 m 测点的噪声增加 0.96 dB。说明在钢弹簧浮置板进行减振的同时,噪声可能会略微放大。

3) 钢弹簧浮置板使得距钢轨中心(振源处) 7.5 m 测点在 20~200 Hz 频段分频振级降低约 6.0~17.0 dB,柱子测点(测点 4)在 1~6 Hz 和 8~200 Hz 频段降低约 12.0~29.0 dB。减振改造后,振动并不是全频段减小,在 6~8 Hz 频段下会放大,振源处 20~200 Hz 频段的减振效果较为明显。

4) 减振改造后上盖建筑 31.5~40.0 Hz 频段的振动加速度级下降显著,降低近 25 dB。对比观察减振改造前后各分频振级随层高的变化,发现振动加速度级最大频段出现了前移,由减振改造前的 25~40 Hz 变为了 20~25 Hz,这与振源处激励频率的改变有关。

### 参考文献:

[1] 侯秀芳,冯晨,燕汉民,等. 2023年中国内地城市轨道交通运营线路概况[J]. 都市轨道交通, 2024, 37(1): 10-16.

HOU X F, FENG C, YAN H M, et al. Overview of urban rail transit operational lines in Chinese mainland in 2023 [J]. *Urban Rapid Rail Transit*, 2024, 37(1): 10-16.

[2] OUA KKA S, VERLINDEN O, KOUROUSSIS G. Railway ground vibration and mitigation measures: benchmarking of best practices[J]. *Railway Engineering Science*, 2022, 30(1): 1-22.

[3] 宋瑞祥,张斌,邬玉斌. 地铁车辆段上盖建筑环境振动影响及控制研究概述[J]. 中国环保产业, 2023(11): 93-99.

SONG R X, ZHANG B, WU Y B. Research overview on environmental vibration influence and control technologies for over-track buildings on metro depot[J]. *China's Environmental Protection Industry*, 2023(11): 93-99.

[4] QIU Y T, ZOU C, HU J H, et al. Prediction and mitigation of building vibrations caused by train operations on concrete floors[J]. *Applied acoustics*, 2024, 219: 109941.

[5] 农兴中,罗信伟,冯青松,等. 双层车辆段上盖建筑振动及结构噪声特性分析[J]. 振动.测试与诊断, 2023, 43(6): 1232-1238.

NONG X Z, LUO X W, FENG Q S, et al. Analysis of vibration and secondary noise characteristics of over-track building in double-deck depot[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2023, 43(6): 1232-1238.

[6] 冯青松,余超,唐柏赞,等. 双层车辆段上盖建筑振动与结构噪声预测分析[J]. 振动与冲击, 2023, 42(9): 304-311.

FENG Q S, YU C, TANG B Z, et al. Prediction and analysis of vibration and structural noise of upper cover building of double-deck depot[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(9): 304-311.

[7] 冯青松,王子玉,刘全民,等. 地铁车辆段不同区域振动特性对比分析[J]. 振动与冲击, 2020, 39(14): 179-185.

FENG Q S, WANG Z Y, LIU Q M, et al. Comparative analysis of environmental vibration characteristics in different regions of a metro depot[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(14): 179-185.

[8] 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 Q S, WANG Z Y, LIU Q M, et al. Vibration characteristics of metro depot upper building under double vibration source excitation[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2019, 19(4): 59-69.

[9] 马晓华,王敏,贺志文,等. 上盖开发车辆段的库门口振动研究[J]. 噪声与振动控制, 2024, 44(4): 266-269.

MA X H, WANG M, HE Z W, et al. Research on the vibration of the depot doorway of the upper cover develop-

- ment above metro depot[J]. *Noise and Vibration Control*, 2024, 44(4): 266-269.
- [10] 曹志刚, 王思崎, 许逸飞, 等. 地铁车辆段上盖建筑道砟垫减振机理与效果[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2023, 57(1): 71-80.  
CAO Z G, WANG S Q, XU Y F, et al. Vibration mitigation mechanism and effect of ballast mats for over-track buildings on metro depot[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2023, 57(1): 71-80.
- [11] 贺利工, 徐浩能, 唐柏赞, 等. 车辆段不同区域上盖建筑振动测试分析[J]. *噪声与振动控制*, 2024, 44(2): 235-241.  
HE L G, XU H N, TANG B Z, et al. Analysis of vibration test of over-track buildings in different areas of depots[J]. *Noise and Vibration Control*, 2024, 44(2): 235-241.
- [12] 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 Y M, FENG Q S, LIU Q J, 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.
- [13] 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 W P, YUAN K, SUN L M. Train-induced vibration test of metro depot over-track buildings[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2020, 37(3): 99-107.
- [14] 贺利工, 刘文武, 罗信伟, 等. 双层车辆段运用库环境振动特性实测分析[J]. *华东交通大学学报*, 2023, 40(3): 33-39.  
HE L G, LIU W W, LUO X W, et al. Measurement and analysis of environmental vibration characteristics of operation zone for double deck depot[J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2023, 40(3): 33-39.
- [15] 岳修平, 鞠龙华, 邓力, 等. 地铁车辆段不同区域振动传递特性分析[J]. *噪声与振动控制*, 2024, 44(3): 223-228.  
YUE X P, JU L H, DENG L, et al. Comparative analysis of vibration transmission characteristics in different areas of metro depots[J]. *Noise and Vibration Control*, 2024, 44(3): 223-228.
- [16] 闫宇智, 邵斌, 丁德云, 等. 地铁车辆段试车线车致振动特性实测与分析[J]. *城市轨道交通研究*, 2022, 25(1): 148-154.  
YAN Y Z, SHAO B, DING D Y, et al. Field measurement and analysis of characteristics of vehicle induced vibration on metro depot testing line[J]. *Urban Mass Transit*, 2022, 25(1): 148-154.
- [17] 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 C, WANG Y M, WANG Z H, 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.
- [18] 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.
- [19] WANG P, WANG Y M, ZOU C, et al. A preliminary investigation of noise impact within metro stations in the urban city of Guangzhou, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(12): 11371-11382.



通信作者:张凌(1978—),女,副教授,博士,硕士生导师。研究方向为轨道交通环境振动与噪声。E-mail:19114729@qq.com。

(责任编辑:李根)