

地铁车辆段试车线减振改造后振动特性研究

张凌¹, 彭思捷¹, 冯青松², 徐浩能²

(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: 研究地铁车辆段试车线区域高层建筑振动超标的问题。通过对某地铁车辆段试车线减振改造前后的环境振动进行现场实测和有限元仿真, 分析减振改造前后振源及上盖的振动传递规律。结果表明: 发现车速对源强的主频的影响会影响到各楼层楼板振动的水平, 卧室测点在 60 km/h 工况下的振动较大, 而客厅在 40 km/h 工况下的振动更大。振动随振源的距离的增大呈现先减小后增大再减小的现象。钢弹簧浮置板进行减振的同时, 噪声可能会略微放大, 改造后振源各测点振动均降低了 10 dB 以上, 但 7.5 m 测点的噪声增加了 0.96 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。相比于普通碎石道床, 减振改造后钢弹簧浮置板能大幅减少振动, 使此车辆段试车线区域上盖建筑满足相应规范要求。

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: U270.11

文献标志码: A

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

Zhang Lin¹, Peng Sijie¹, Feng Qingsong², Xu Haoneng²

(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: Studying the issue of excessive vibration in high-rise buildings located in the test track area of subway depots. 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 are analyzed. The results indicate 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 is relatively large under the condition of 60 km/h, while the vibration in living rooms is more significant under the condition of 40 km/h. The vibration first decreases, then increases, and finally decreases again as the distance from the vibration source increases. While the steel spring floating slab reduces vibration, noise may be slightly amplified, with all vibration measurement points at the vibration source reduced by more than 10 dB after the modification, but the noise at the 7.5 m measurement point increased by 0.96 dB. By comparing and observing the changes in vibration levels at different frequencies with floor height before and after the vibration reduction modification, it is 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 is 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: Test track; vibration reduction modification; field measurement; simulation; steel spring floating slab

收稿日期: 2024-09-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52468063)

当前我国城市轨道交通发展十分迅猛,截止 2023 年底,我国内地共有 59 个城市开通城市轨道交通线路 338 条,其中地铁运营里程为 8 547.67 km,占比 76.1 %^[1]。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,国内外大部分车辆段采用的都是地面单层车辆段,通常地铁车辆段设置在线路的首尾站附近,承担了地铁列车停放、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加明显,这种开发模式缩短了轨道交通振源与建筑之间的距离,但车辆段内的车辆通常在凌晨和深夜运行列车运行产生的振动问题有可能会影响上盖居民的正常生活^[2-5],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的研究工作,冯青松^[6-8]等在双层车辆段内进行了现场实测,发现在 80 Hz 以上频段,土体的对高频能量的衰减作用使得二层行车引起的上盖建筑低层振动能量大于一层行车;马晓华^[9]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比选,建议在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^[10]通过有限元软件进行仿真,发现道砟垫对上盖建筑的减振效果随着频率的增大呈整体改善的趋势,40 Hz 以上的频段,结构最大插入损失可达 7~12 dB。车速越高,道砟垫刚度越小,道砟垫对上盖建筑的减振效果越好。徐浩能^[11]等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,主要集中在 40~50 Hz 范围。陈艳明^[12]等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规律,其中端部股道行车时线性衰减率比中部股道行车要大;谢伟平^[13]等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,列车引起楼板的振动主频始终集中在其自振频率处。贺利工^[14]等通过分析某双层车辆段分析运用库振源特性及其传递衰减规律,得出车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^[15]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,总振级最小的是库内区,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^[16]研究得出试车线的昼间试车速度不应超过 45 km/h,新建试车线与住宅区的距离应不小于 30 m。Zou^[17-19]发现地铁车辆段咽喉区在楼层共振频率下,楼层中部的列车引起的加速度水平可能比柱子附近的加速度水平高出 20~25 dB。垂直振动主要随距振源距离的增加而衰减,而水平振动则因楼板中垂直振动传播波和柱中弯曲波的水平振动而随楼层不同而衰减。地铁振动还会受到车辆状态、土层结构、上盖建筑结构等因素^[20-23]的影响。

综上所述,既有的研究多集中在车辆段的运用库、检修库等库房上盖区域,而对试车线区域的不同轨道形式的实测和仿真分析很少。而这一区域由于试车线车速较大而导致振动较大,迫切需要进行深入研究。且对不同轨道形式的实际应用研究也多以不同断面下展开,结果会受到车辆、速度、轨道不平顺,地质等方面差异造成的影响,大大降低了现场测试的精准度。本文在试车线原位置进行减振改造和对比分析,减少了其他因素的影响,能提高数据的准确性。

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程度,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的减振效果,所得结论可为类似工程减振控制及上盖建筑布局提供一定参考。

1 车辆段现场概况和实测方案

本文的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/h,为其他区域列车速度的 4~8 倍。既有研究表明,列车速度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程度,如图 1 所示为振源测点断面,本次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。测点位于建筑的 5 层、12 层和 18 层的客厅和卧室地板中央。

试车线有砟轨道振动测点包括钢轨垂向振动、轨枕振动、砟脚地面振动、距线路中心线 7.5 m 处的地面振动，临近柱子振动和 7.5 m 处振动测点这 5 个测点。如图 3 所示。

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。试验共采集数据 40 组，车速为 40 km/h 和 60 km/h。

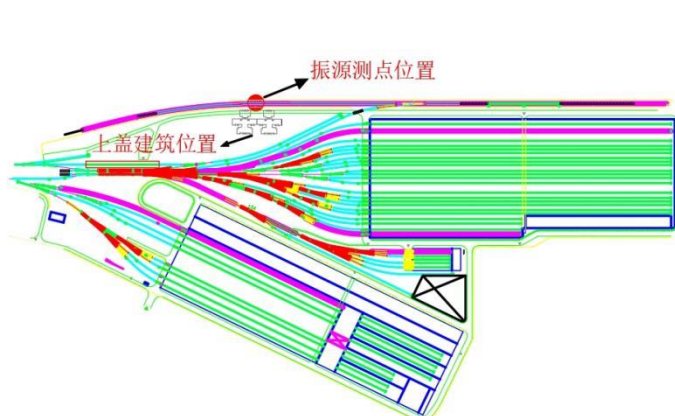


图 1 车辆段平面示意图

Fig.1 Schematic diagram of the depot layout

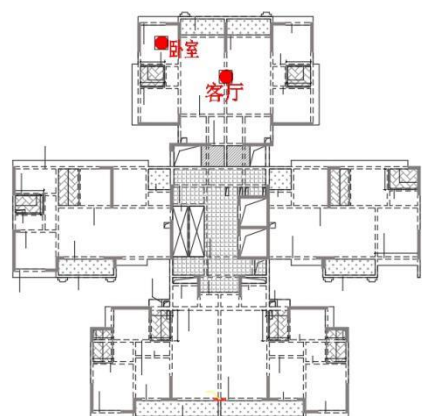


图 2 上盖建筑测点布置图

Fig.2 Measurement point layout of the building cover

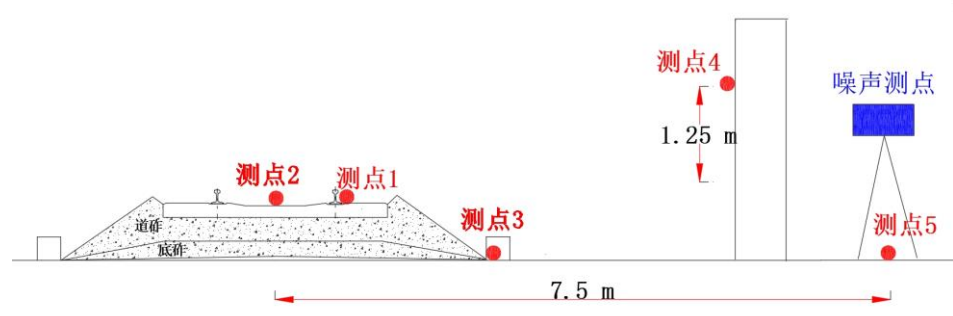


图 3 有砟轨道振源测点布置图

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

2 减振改造前上盖实测数据的分析

由于试车线的车速较运用库等车辆段区域较大，存在振动超标风险，合理准确的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，能较好的反应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）对上盖建筑卧室振动进行评价，按照国际标准 ISO 2631-1:1997 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。

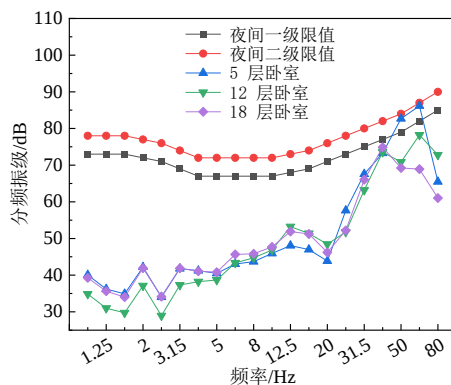
其中 GB/T 50355-2018 的 Z 振级限值为：卧室昼间 73 dB（一级）、78 dB（二级），夜间 70 dB（一级）、75 dB（二级），客厅全天 73 dB（一级）、78 dB（二级）。一级限值为适宜达到的限值，二级为不得超过的限值。

表 1 实测 Z 振级

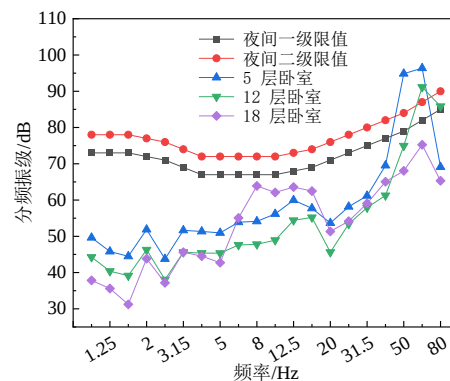
Table .1 Measured Z-vibration levels

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

试车线上车辆白天夜间均可能运行，因此参照 夜间限值，由表 1 可得，5 层卧室、12 层卧室在速度 60 km/h 均超过夜间二级限值 75 dB。5 层卧室在速度 40 km/h 的振动超过夜间一级限值，5 层客厅在速度 40 km/h 的振动超过二级限值。其中 5 层卧室在列车速度 60 km/h 的振动超过二级限值 10.3 dB，振动存在严重超标的现象。



(a) 速度 40 km/h 上盖实测三分之一倍频程图



(b) 速度 60 km/h 上盖实测三分之一倍频程图

图 4 不同速度下上盖实测三分之一倍频程图

Fig. 4 Measured one-third octave band diagram of the upper cover at different speeds

取实测 40 组数据的分频振级的平均值，绘制三分之一倍频图如上，由图可知，在运行速度为 40 km/h 时，在 50~60 Hz 的频段，5 层卧室超过了一级限值，而 18 层在 40 Hz 时的振动大于 12 层，但在限值允许的范围内。由此也可验证振动随楼层增加而呈现的先减后增的现象。

速度 60 km/h 时，5 层卧室和 12 层卧室在 63 Hz 时的振动均超过了二级限值，由此可判断此车辆段试车线存在超标现象，长期受振动和结构噪声影响，会影响上盖居民的休息和工作，某些低频段结构噪声甚至会与人的胸腔和脑腔产生共振，导致心脏病和高血压等症状，因此该车辆段试车线进行了改造，原试车线轨道形式为有砟轨道，后改造为钢弹簧浮置板。

由表 1 数据可以发现，在同一楼层的振动并非完全呈现速度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 60 km/h 工况下的振动较大，而客厅测点则在 40 km/h 工况下的振动大于 60 km/h，说明车速对源强的主频的影响会影响到各楼层楼板振动的水平。客厅振动较大的原因是 40 km/h 时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 60 km/h 时，激励频率与卧室楼板的自振频率接近。

对比不同速度下建筑测点的振动响应，发现速度 60 km/h 时，建筑的振动超标现象较速度 40 km/h 时

更为严重，且超标区域为居民所更为关心的卧室，因此需要重点对车速 60 km/h 的振动进行减振和研究。

为了解轨道减振降噪改造措施的实际效果，进行改造后轨道振动噪声源强的对比测试。本次测试在试车线上安排专车进行跑车测试，往返共跑车 30 趟，车速 60 km/h。测试断面和测试仪器均与改造前保持一致，如图 5 所示，测点 1、3、4、5 与减振改造前测点一致，测点 6 为道床振动测点。

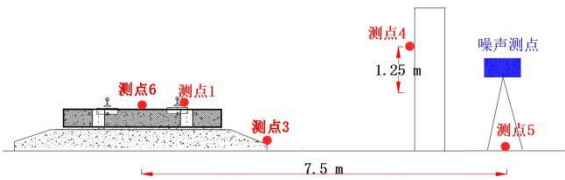
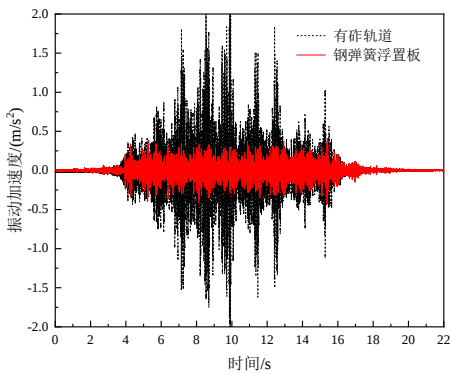


图 5 钢弹簧浮置板振源测点布置图

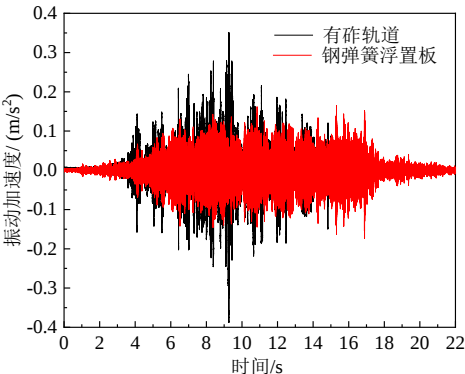
Fig.5 Layout diagram for measurement points of vibration sources on steel spring floating plate

3 减振改造前后振源实测对比分析

试车线上车速均为 60 km/h 的测点时域对比如图 6 所示，对比两种工况，有砟轨道下砟脚测点 3 的加速度峰值为 2.00 m/s^2 ，加速度有效值为 0.35 m/s^2 。采取钢弹簧浮置板减振后砟脚测点 3 加速度峰值为 0.43 m/s^2 ，有效值为 0.08 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。



(a) 测点 3 时域对比图



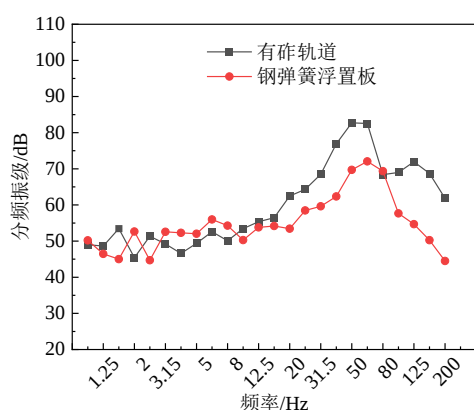
(b) 测点 4 时域对比图

图 6 减振改造前后振源测点时域对比图

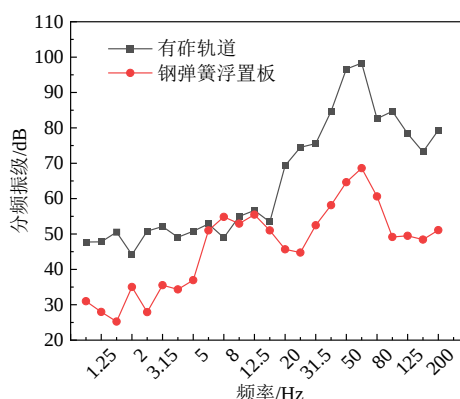
Fig.6 Time-domain comparison diagram of vibration source measurement points before and after vibration mitigation retrofitting

测点 4 有砟轨道下的加速度峰值为 0.39 m/s^2 ，加速度有效值为 0.05 m/s^2 ，改造后测点 4 加速度峰值为 0.17 m/s^2 ，有效值为 0.028 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。两个测点进行对比，由于钢弹簧浮置板对振动的衰减作用，道床测点的振动衰减明显大于柱子测点。

图 6 给出了在某一测次时测点 4 和测点 5 在 1~200 Hz 内的振动响应，从图 7 (a) 可以看出，改测点五的振动在 1~15 Hz 较为接近，15 Hz 以后频段的分频振级均呈现先增大在减小的趋势，有砟轨道的测点在 50 Hz 处达到第一峰值，而减振改造后的钢弹簧浮置板测点在 65 Hz 处达到第一峰值。对比 20~200 Hz 内频段，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，该频段内各分频振级降低约 6~17 dB，而在 20 Hz 以下频段，二者数值相当。



(a) 测点 5 三分之一倍频程图



(b) 测点 4 三分之一倍频程图

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

从图 7 (b) 可以看出, 减振前后的测点四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 31.5~125 Hz 以内。全频段内, 6~8 Hz 的频段钢弹簧浮置板的振动有略微放大, 1~6 Hz 和 8~200 Hz 减振改造后钢弹簧浮置板的柱子测点振动强度均小于改造前, 钢弹簧浮置板的减振作用使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, 振源处钢弹簧浮置板对 20~200 Hz 频段的减振效果较为明显。

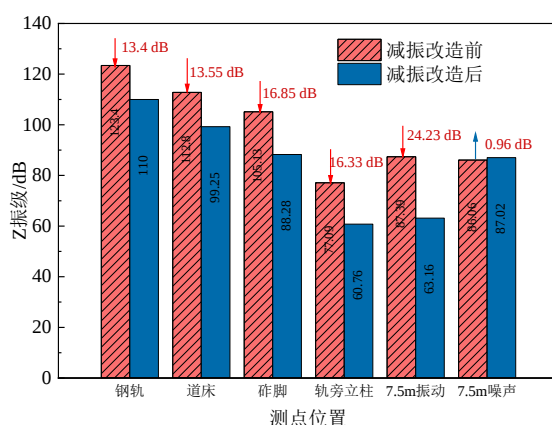


图 8 改造前后 z 振级对比

Fig.8 Comparison of z-direction vibration level before and after transformation

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, 由图 8 所示, 与改造前 (碎石道床) 相比, 7.5 m 处地面最大 z 振级降低最为明显, 下降了 24.23 dB, 振动随距离振源的距离并非呈现单调递减的现象, 在振动由钢轨传递至轨旁立柱时一直在衰减, 在 7.5 m 处振动出现了放大现象。减振改造前较轨旁立柱测点振动, 7.5 m 振动放大了 10.3 dB, 改造后放大减少到了 2.4 dB。改造后振源各测点振动均降低了 10 dB 以上, 但 7.5 m 测点的噪声略有增加。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。

4 车辆段有限元模型的建立与验证

由于改造前的实测是在居民入住前所进行的, 而改造后的居民均已入住, 对上盖建筑实测造成了一定的困难, 且与改造前无法进行很好的对照。为进一步推进试车线上不同轨道形式对上盖建筑的振动的

影响研究，本章对改造前后的振源及上盖进行有限元仿真，运用有限元软件建立列车~轨道~土体~桩~上盖建筑三维全耦合动力学模型，轮轨不平顺选取课题组在另一相似工况车辆段实测的钢轨粗糙度，轮轨竖向力由动力学仿真软件 UM 中计算，图 9 为有限元模型整体图。

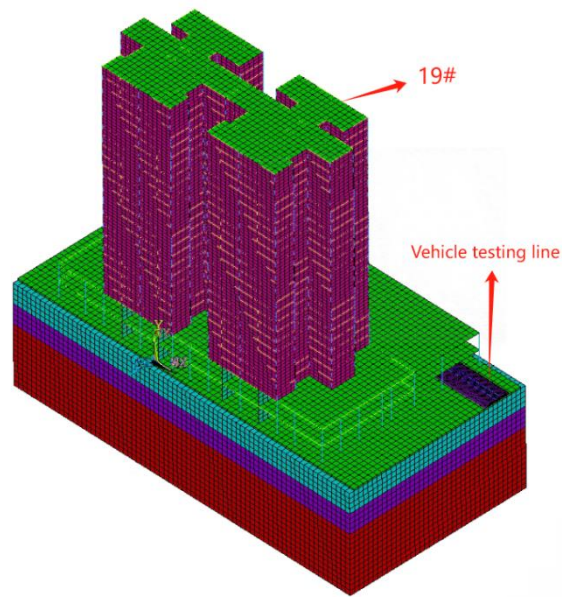


图 9 车辆段有限元模型整体图

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，将改造前的实测与仿真得到的振动响应进行结果对比，结果如图 10（a）所示，上盖 5 层测点的实测加速度峰值为 0.07 m/s²，而仿真峰值为 0.06 m/s²，模型在时域上较为吻合。

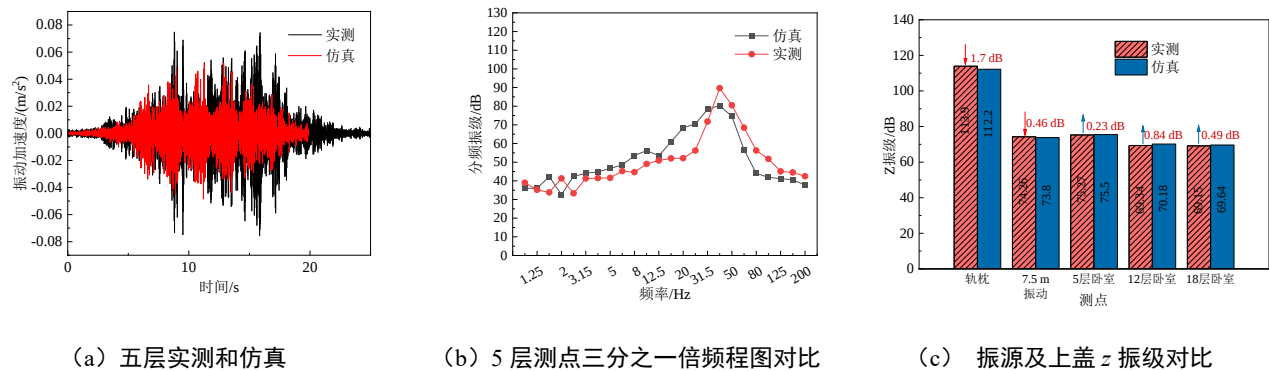


图 10 实测与仿真对比图

Fig.10 Measured vs simulated comparison chart

将上盖 5 层测点三分之一倍频图对比如图 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，在其他频段相近。图 10（c）为振源以及上盖所提取 Z 振级对比，轨枕处数据仿真有 1.7 dB 误差，但是在误差范围之内，能够验证模型较为准确，参数设置较为合理。

5 上盖建筑不同楼层振动传递分析

本节以不同楼层上盖卧室盖板的振动数据为分析对象，由图 11 可知，随着车速由 40 km/h 增加至 60 km/h，各层 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，随着层高的增加，Z 振级增加的幅值有所降低。1 层的振动较小，由于其位于大平台，

其盖板厚度大于其它层，且振动被大平台盖板所吸收了一部分。对比 60 km/h 工况和 80 km/h 工况，发现振动响应并不是随着速度的增加而单调增加，在 1~7 层时，列车 80 km/h 速度时的 Z 振级小于 60 km/h，这更加体现了卧室 60 km/h 时，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，而 80 km/h 速度时，则未出现放大现象。车速 40 km/h 时，在第 9 层衰减至最低水平，其后随着楼层增加出现放大现象，由于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得能量增大。而车速 60 km/h 时的最低值出现在第 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响应规范要求。振动最大值均出现在第二层的楼板，此为最有可能振动超标的楼层。于是对二层卧室进行进一步分析。

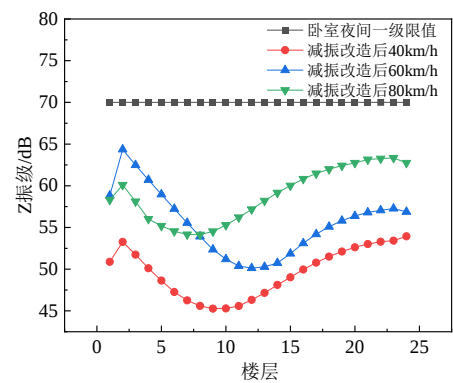


图 11 不同车速下的上盖传递规律

Fig.11 Transmission patterns of the upper

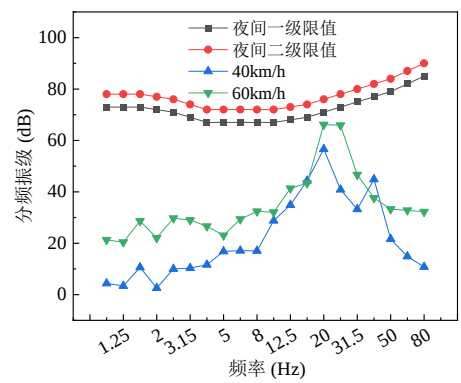


图 12 2 层卧室三分之一倍频图

Fig.12 One-third octave band diagram of cover at different vehicle speeds of the bedroom on the 2nd floor

由图 12 可见，2 层卧室测点在不同速度下的振动主频均在 15~40 Hz，且均在 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。

6 减振改造前后上盖建筑振动传递特性分析

本节以行车速度为 60 km/h 时，上盖 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 (a) 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，而改造后的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以及客厅卧室的楼板固有频率的差异有关。

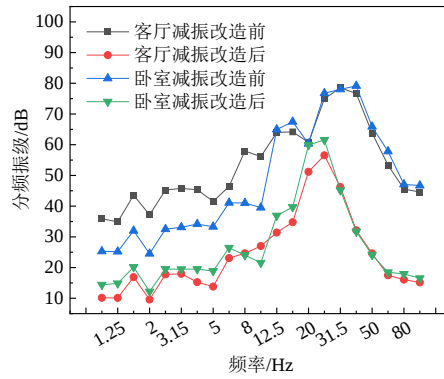
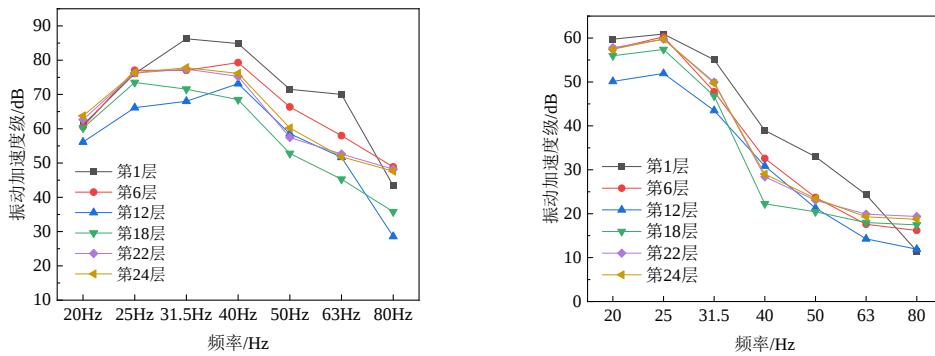


图 13 上盖建筑第 5 层不同区域振动分析

Fig.13 Vibration analysis of different zones on the 5th floor of the superstructure building

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，不同工况的上盖振动主要频率均集中在 20~80 Hz 处。故对此区间频段进行重点分析。



(a) 改造前各分频振级随层高变化图

(b) 改造后各分频振级随层高变化图

图 14 减振改造前后分频振级随层高变化图

Fig.14 Frequency-divided vibration levels varying with floor height before and after vibration mitigation retrofit diagram

由图 14 (a) 所示，减振改造前第 1 层、第 2 层和第 12 层的卧室振动加速度级在 40 Hz 时达到最大，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 时达到峰值。各楼层在 25~40 Hz 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现先增后减的现象，80 Hz 在各层的振动均为最小值。

图 14 (b) 中，减振改造后 31.5~40 Hz 时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。

7 结论

本文采用现场实测和数值计算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强及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) 在同一楼层的振动并非完全呈现速度越大振动越大的特点，卧室测点在 60 km/h 工况下的振动较大，而客厅测点则在 40 km/h 工况下的振动大。说明车速对源强的主频的影响会影响到各楼层楼板振动的水平。客厅振动较大的原因是 40 km/h 时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 60 km/h 时, 激励频率与卧室楼板的自振频率接近。

2) 振动随振源的距离的增大呈现先减小后增大再减小的现象, 在振动传递至距钢轨 7.5 m 处振动出现了放大现象。减振改造前 7.5 m 处振动放大了 10.3 dB, 改造后放大 2.4 dB。改造后振源各测点振动均降低了 10 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) 钢弹簧浮置板使得振源处 7.5 m 测点在 20~200 Hz 频段分频振级降低约 6~17 dB, 柱子测点在 1~6 Hz 和 8~200 Hz 频段降低约 12~29 dB。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, 振源处钢弹簧浮置板对 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 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, 郭玉斌. 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, ZOU C, HU J C J. 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]. Vibration. Testing and 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 sources 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 development 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. Vibration test and analysis of superstructure buildings in different areas of depot[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 M L. 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. 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. Measurement and analysis of vehicle-induced vibration characteristics on the test track of subway depot[J]. Research on Urban Rail 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 C 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, 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, 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.
- [20] 刘文武, 冯青松, 罗信伟, 等. 地铁隧道振动源强受车辆状态影响因素实测分析[J]. 都市快轨交通, 2024, 37(4): 24-31.
- LIU W W, FENG Q S, LUO X W, et al. Measured Analysis of Vibration Source Strength in Metro Tunnels Influenced by Vehicle Condition Factors[J]. URBAN RAPID RAIL TRANSIT, 2024, 37(4): 24-31.

- [21] 毛苇. 车轮状态对地铁列车振动源强的影响及评价方法研究[J]. 振动与冲击, 2024, 43(17): 184-190.
MAO W. Effects of wheel condition on vibration source intensity of subway trains and their evaluation method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(17): 184-190.
- [22] 温玉君, 张君秋, 周颖, 等. 地铁车辆段上盖框架-核心筒结构车致振动试验研究[J]. 结构工程师, 2024, 40(4): 83-91.
WEN R J, ZHANG J Q, ZHOU Y, et al. Experimental study on subway-induced vibration of over-track frame-core tube structure in a metro depot[J]. Structural Engineers, 2024, 40(4): 83-91.
- [23] WANG Q, MIAO L, ZHENG H, et al. Design of elastic metamaterial plate and application in subway vibration isolation[J]. Applied Physics A, 2024, 130(8): 557.



通信作者: 张凌 (1978—), 女, 副教授, 博士, 硕士生导师。研究方向为综合交通枢纽振动与噪声与地铁上盖建筑振动与结构噪声。E-Mail: 19114729@qq.com。