

钢弹簧浮置板轨道减振效果现场与实验室测评研究

陈江雪

中国铁路设计集团有限公司，城市轨道交通数字化建设与测评技术国家工程研究中心，天津

收稿日期：2024年4月7日；录用日期：2024年5月17日；发布日期：2024年5月31日

摘要

为研究分析钢弹簧浮置板轨道减振特性，现场对比测试隧道壁和基础位置的振动特性和减振效果，通过电磁式激振器施加冲击激励对实验室基础位置插入损失进行测评研究，并结合现场测试规律进一步估算出隧道壁位置减振效果。研究表明：振动从基础传至隧道壁后大幅衰减，普通整体道床轨道最大Z振级衰减11.2 dB，钢弹簧浮置板轨道最大Z振级衰减20.0 dB；测点位置和车次对钢弹簧浮置板轨道减振效果评价具有较大影响；实验室测评钢弹簧浮置板轨道在6.3 Hz~12.5 Hz不具有减振效果，在16 Hz以上频段减振效果较好；基础位置的减振效果为7.5 dB，估算隧道壁位置Z振级插入损失为16 dB左右。

关键词

地铁，钢弹簧浮置板轨道，减振效果，实验室测试

Field and Laboratory Test Research on the Vibration Reduction Effect of Steel Spring Floating Slab Track

Jiangxue Chen

National Engineering Research Center for Digital Construction and Evaluation of Urban Rail Transit,
China Railway Design Corporation, Tianjin

Received: Apr. 7th, 2024; accepted: May 17th, 2024; published: May 31st, 2024

Abstract

In order to study and analyze the vibration reduction characteristics of steel spring floating slab tracks in field and laboratory evaluations, the vibration characteristics and vibration reduction

effects of tunnel walls and base positions were compared and tested on site. The insertion loss at the base position in the laboratory was evaluated by applying impact excitation through an electromagnetic vibrator, and the vibration reduction effect at the tunnel wall position was further estimated based on on-site testing patterns. The results show that the vibration attenuates significantly from the base to the tunnel wall, with a maximum Z-vibration level attenuation of 11.2 dB for ordinary tracks and 20.0 dB for steel spring floating slab tracks. The train number and measurement point position have a significant impact on the evaluation of the vibration reduction effect of the steel spring floating plate track. The laboratory evaluation shows that the steel spring floating slab track does not have vibration reduction effect between 6.3 Hz and 12.5 Hz, but has better vibration reduction effect in the frequency band above 16 Hz. The vibration reduction effect at the base position is 7.5 dB, and the estimated Z-vibration level insertion loss at the tunnel wall position is about 16 dB.

Keywords

Subway, Steel Spring Floating Slab Track, Vibration Reduction Effect, Laboratory Test

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国城市建设规模快速发展，地铁列车运行引起沿线环境振动问题也越来越受到人们的关注[1] [2] [3]。因此，轨道系统设计时通常在钢轨扣件、轨枕或道床等位置采取减振措施[4] [5] [6] [7]。钢弹簧浮置板轨道通过钢弹簧隔振器将道床与基础隔离开来，构成质量 - 弹簧 - 阻尼系统，是目前在轨道交通中应用最广泛、减振效果最明显的一种减振轨道型式。

钢弹簧浮置板轨道的动力特性与减振效果可通过现场实测确定。黄俊飞[8]在隧道壁安装垂向加速度传感器，现场实测研究地铁隧道内钢弹簧浮置板轨道的实际减振效果。李克飞[9]对比分析安装了普通扣件、III型轨道减振扣件和钢弹簧浮置板轨道的钢轨、道床及道壁振动特点，分析了不同减振措施带来的减振效果。林渝轲[10]测试分析了时速 120 km 地铁隧道内普通整体道床、梯形轨枕轨道、钢弹簧浮置板轨道的振动特性和减振效果。吴永芳[11]通过现场隧道壁振动测试分析了减振扣件、弹性短轨枕和浮置板轨道的减振效果。

由于现场测试受线路和车辆因素影响较大，且新建线路的钢弹簧浮置板轨道减振效果测试评价无法事先进行现场测试。因此通常采用落锤、落轴等设备施加冲击荷载，开展实验室测评研究。金浩[12]通过实验室自动落锤激励试验探讨了梯式轨道枕下减振垫铺设方式对其减振能力的影响。李明航[13]基于实验室定点锤击试验定量分析了预载值对轨道减振效果的影响，当预载值达到一定程度后，Z 振级插入损失趋于稳定。王金[14]进行实验室落轴试验，对比两种不同阻尼比的隔振器浮置板轨道结构减振性能的差异。朱胜阳[15]通过实验室落轴试验研究应用动力吸振器浮置板轨道的低频振动控制特性。

本文对地铁线路直线段开展现场振动测试研究，分别测试普通整体道床轨道和钢弹簧浮置板轨道在基础和隧道壁位置上的振动特性，并对分析测点位置对减振效果评价的影响。然后以实验室铺设的普通整体道床轨道和钢弹簧浮置板轨道为基础，通过电磁式激振器施加冲击激励，对实验室基础位置的插入损失进行了测评研究，结合现场测试规律进一步估算出隧道壁位置减振效果。研究成果为减振轨道实验室测评提供了重要参考。

2. 现场测评研究

2.1. 测点布置

对地铁线路直线段开展现场振动测试研究。该地铁线路为地下盾构线路，盾构隧道截面为圆形，钢轨为 60 kg/m 的无缝钢轨，表面状态良好。

为记录地铁列车通过时轨道产生的振动情况，将加速度传感器分别固定在基础和隧道壁测点上。基础垂向振动测点布置在道床板下方隧道基础位置，隧道壁垂向振动测点布置在隧道壁上，距轨面高度 1.25 m 的位置[16]。普通整体道床轨道和钢弹簧浮置板轨道测点布置如图 1 所示。地铁正常运行期间，采集普通工作日一天的行车数据，地铁列车通过测试断面时车速约 100 km/h。

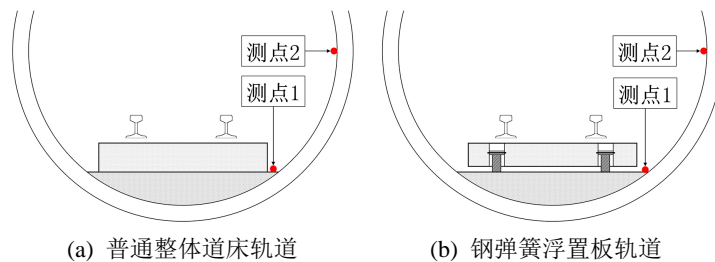


Figure 1. Layout diagram of measuring points
图 1. 测点布置示意图

2.2. 普通整体道床轨道

2.2.1. Z 振级分析

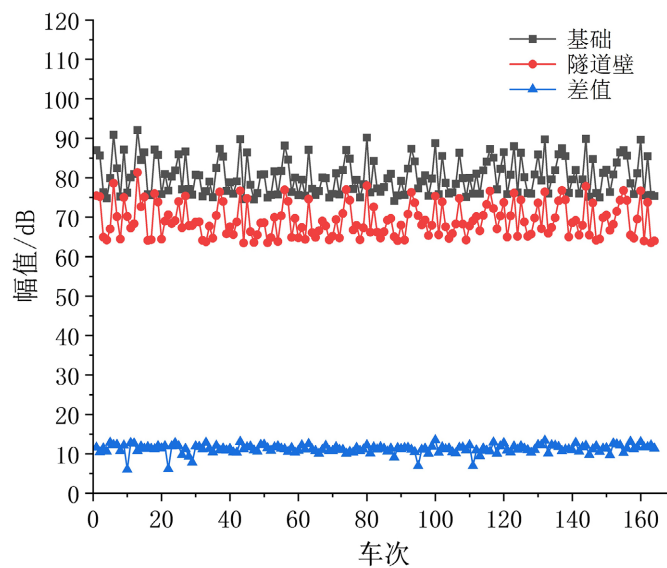


Figure 2. The maximum Z-vibration level of ordinary track
图 2. 普通整体道床轨道振动最大 Z 振级

在《城市区域环境振动测量方法 GB10071-1988》[17]中，采用全身振动 Z 计权因子修正后得到的振动加速度级，即 Z 振级(VL_z)，进行振动评价，Z 振级反映了垂向振动加速度在三分之一倍频程中心频率 1 Hz~80 Hz 范围内计权后的振动能量。Z 振级计算公式为

$$VL_z = 10 \log \left(\sum 10^{(VL_i + \lambda_i)/10} \right) \quad (1)$$

其中： VL_i 为第*i*个频带的振动加速度级(dB)； λ_i 为第*i*个频带的计权因子(dB)。

最大Z振级(VL_z, \max)为列车通过过程中Z振级的最大值。计算列车通过时间内的Z振级，时间积分常数为1秒，重叠系数7/8。据此获得列车通过测试断面的最大Z振级。

图2为普通整体道床轨道测试断面全天通过列车基础和隧道壁垂向振动最大Z振级。可以看出，对于不同车次，基础测点和隧道壁测点最大Z振级的分布均较为离散，且变化规律具有一致性；基础测点平均值为80.4 dB，最大值92.1 dB，最小值74.1 dB，最大值与最小值相差18.0 dB；隧道壁测点平均值为69.2 dB，最大值81.3 dB，最小值63.5 dB，最大值与最小值相差17.9 dB；相同车次下基础测点与隧道壁测点的差值波动较小，差值的平均值为11.2 dB。

2.2.2. 频域分析

根据全天通过列车Z振级分析，选择平均值车次作为典型工况进行频域分析。普通整体道床轨道典型工况列车通过测试断面时基础和隧道壁的平均Z振级分别为80.4 dB、69.5 dB，振动从基础传至隧道壁后振动大幅衰减10.9 dB。

普通整体道床轨道测试断面典型工况的基础和隧道壁垂向振动加速度三分之一倍频程频谱如图3所示。可以看出，基础测点的振动幅值在所有频段内均大于隧道壁测点。

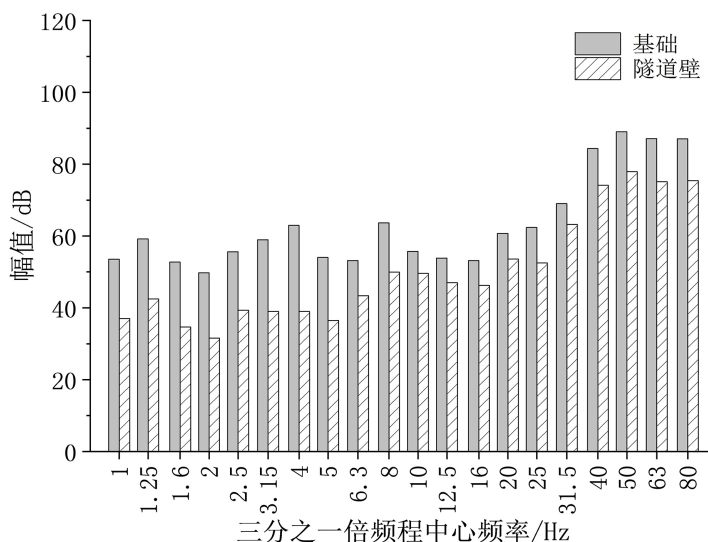


Figure 3. One-third octave spectrum of typical operating conditions

图3. 典型工况三分之一倍频程频谱

2.3. 钢弹簧浮置板轨道

2.3.1. Z振级分析

图4为钢弹簧浮置板轨道测试断面全天通过列车基础和隧道壁垂向振动最大Z振级。可以看出，对于不同车次，基础测点和隧道壁测点最大Z振级的分布均较为离散，且变化规律具有一致性；基础测点平均值为74.7 dB，最大值84.3 dB，最小值70.0 dB，最大值与最小值相差14.3 dB；隧道壁测点平均值为54.7 dB，最大值61.1 dB，最小值51.5 dB，最大值与最小值相差9.6 dB；相同车次下基础测点与隧道壁测点的差值波动较小，差值的平均值为20.0 dB。

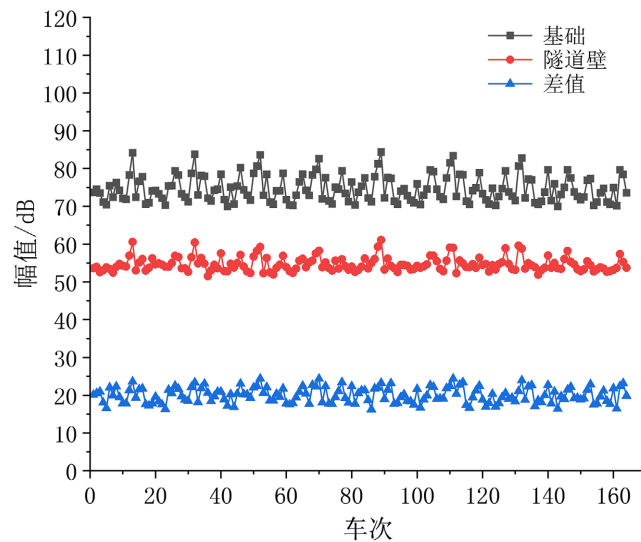


Figure 4. The maximum Z-vibration level of steel spring floating slab tracks

图 4. 钢弹簧浮置板轨道振动最大 Z 振级

2.3.2. 频域分析

根据全天通过列车 Z 振级分析, 选择平均值车次作为典型工况进行频域分析。钢弹簧浮置板轨道典型工况列车通过测试断面时基础和隧道壁的平均 Z 振级分别为 73.0 dB、53.9 dB, 振动从基础传至隧道壁后振动大幅衰减 19.1 dB。

钢弹簧浮置板轨道测试断面典型工况的基础和隧道壁垂向振动加速度三分之一倍频程频谱如图 5 所示。可以看出, 基础测点的振动幅值在所有频段内均大于隧道壁测点。

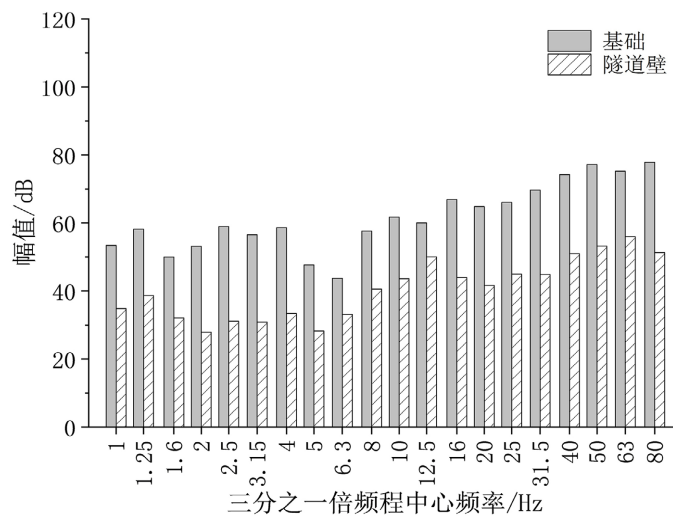


Figure 5. One-third octave spectrum of typical operating conditions

图 5. 典型工况三分之一倍频程频谱

2.4. 减振效果

2.4.1. Z 振级分析

全天通过列车基础和隧道壁垂向振动最大 Z 振级插入损失如图 6 所示。可以看出, 对于不同车次,

基础测点和隧道壁测点最大 Z 振级插入损失的分布均较为离散；隧道壁测点最大 Z 振级插入损失均为正值，基础测点最大 Z 振级插入损失出现负值，说明部分车次通过时，钢弹簧浮置板轨道比普通整体道床轨道在基础位置产生的振动更加剧烈；基础测点最大 Z 振级插入损失平均值为 5.7 dB，最大值 17.6 dB，最小值 -8.8 dB，最大值与最小值相差 26.4 dB；隧道壁测点最大 Z 振级插入损失平均值为 14.5 dB，最大值 25.2 dB，最小值 2.9 dB，最大值与最小值相差 22.2 dB；基础测点与隧道壁测点最大 Z 振级插入损失差值的平均值为 8.8 dB。说明车次和测点位置对减振轨道减振效果评价具有较大影响。

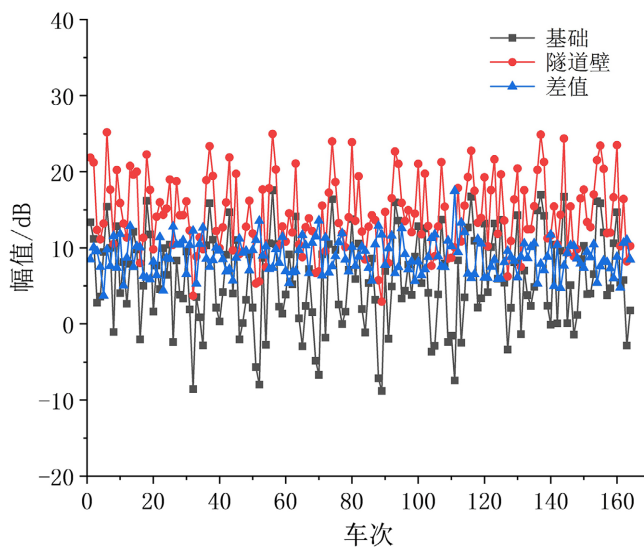


Figure 6. Insertion loss of the maximum Z-vibration level
图 6. 最大 Z 振级插入损失

2.4.2. 频域分析

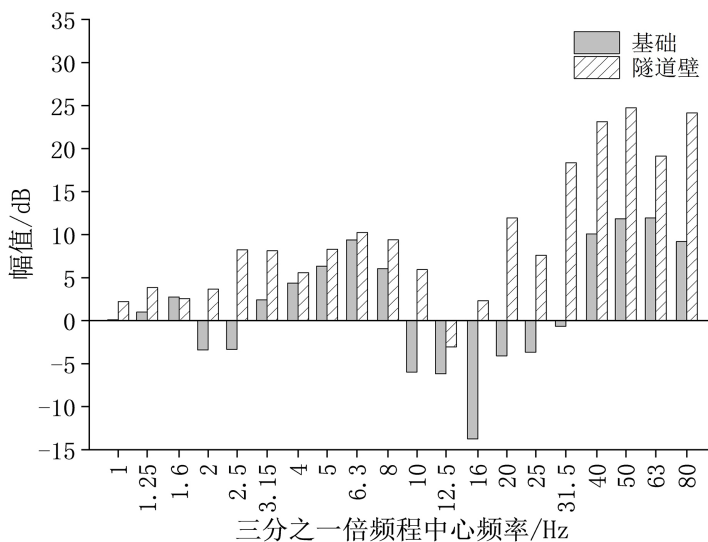


Figure 7. Insertion loss of the typical operating conditions
图 7. 典型工况插入损失

根据全天通过列车 Z 振级分析，选择平均值车次作为典型工况进行频域分析。典型工况列车通过测

试断面时基础测点和隧道壁测点的平均 Z 振级插入损失分别为 7.4 dB、15.6 dB，相差 8.2 dB。

普通整体道床轨道和钢弹簧浮置板轨道测试断面典型工况插入损失如图 7 所示。对于基础测点，在 2 Hz~2.5 Hz、10 Hz~31.5 Hz 区间，钢弹簧浮置板轨道断面的振动大于普通整体道床轨道断面，在其他频段，钢弹簧浮置板轨道具有减振效果；对于隧道壁测点，钢弹簧浮置板轨道在除 12.5 Hz 以外的其他频段具有减振效果。隧道壁测点振动响应叠加了隧道衬砌等结构系统的影响作用，因此隧道壁测点减振效果整体表现优于基础测点。

3. 实验室测评研究

3.1. 实验装备和测点布置

中国铁路设计集团有限公司城市轨道交通数字化建设与测评技术国家工程研究中心建设有完善的激振系统、轨道系统和测试系统。激振系统为 EES-70W 型电磁式激振器，自重 4700 kg，最大输出加速度幅值 15 m/s^2 。能够进行冲击激励、扫频激励和编制载荷谱激励输出。轨道系统为 1:1 实体轨道，包含普通整体道床轨道、钢弹簧浮置板轨道和梯形轨枕轨道，采用 60 kg/m 标准钢轨。

振动测点布置于轨道板基础位置如图 8 所示。对普通整体道床轨道和钢弹簧浮置板轨道分别施加相同幅值大小的冲击激励，激振器输出加速度幅值范围： $10 \text{ m/s}^2 \sim 14 \text{ m/s}^2$ ，换算为施加在钢轨上的激振力幅值约 47 kN~65.8 kN，在其他测试条件一致情况下进行数据采集。

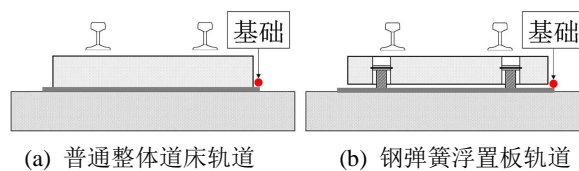


Figure 8. Layout of measurement points
图 8. 测点布置

3.2. 普通整体道床轨道

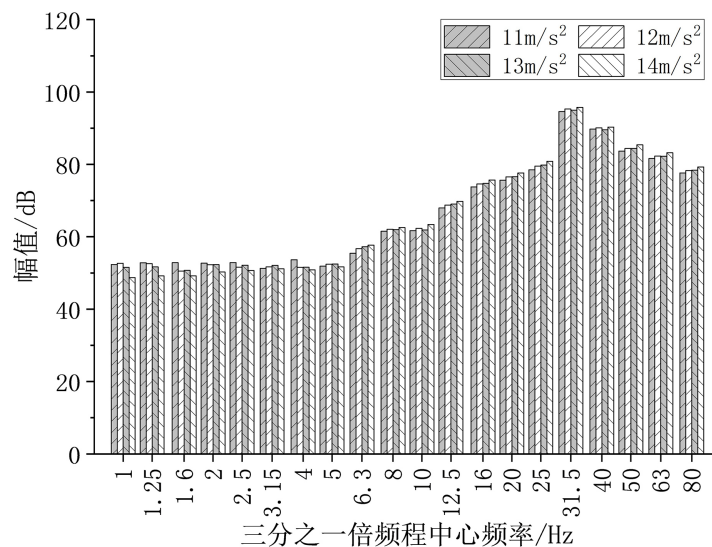


Figure 9. One-third octave spectrum
图 9. 三分之一倍频程频谱

普通整体道床轨道实验室基础位置垂向振动平均 Z 振级如表 1 所示，三分之一倍频程频谱如图 9 所示。随着脉冲激励幅值的增大，Z 振级总值也随之增大，但增幅较小。

Table 1. Z-vibration level at the base position

表 1. 基础位置振动 Z 振级

激励幅值(m/s ²)	11	12	13	14
Z 振级(dB)	88.1	88.8	88.5	89.3

3.3. 钢弹簧浮置板轨道

钢弹簧浮置板轨道实验室基础位置垂向振动 Z 振级如表 2 所示，三分之一倍频程频谱如图 10 所示。随着脉冲激励幅值的增大，Z 振级总值也随之增大，但增幅较小。

Table 2. Z-vibration level at the base position

表 2. 基础位置振动 Z 振级

激励幅值(m/s ²)	11	12	13	14
Z 振级(dB)	80.4	80.9	81.3	81.8

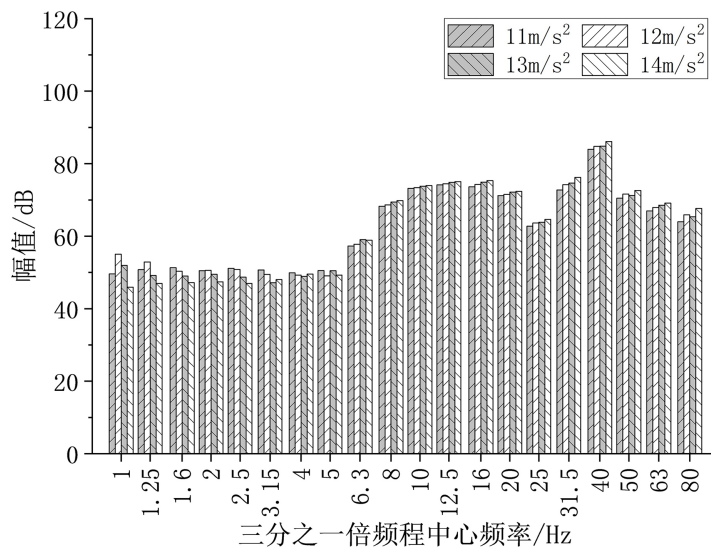


Figure 10. One-third octave spectrum

图 10. 三分之一倍频程频谱

3.4. 减振效果

Table 3. Insertion loss of Z-vibration level

表 3. Z 振级插入损失

激励幅值(m/s ²)	11	12	13	14
Z 振级(dB)	7.7	7.7	7.2	7.4

普通整体道床轨道与钢弹簧浮置板轨道实验室基础位置的 Z 振级插入损失如表 3 所示，三分之一倍频程频谱如图 11 所示。可以看出，该型钢弹簧浮置板轨道在 6.3 Hz~12.5 Hz 不具有减振效果，在 16 Hz

以上频段减振效果较好。本次实验室测试中,在不同幅值大小的冲击激励下,该型钢弹簧浮置板轨道的减振效果基本保持不变,平均值为 7.5 dB,根据现场测试结果规律可以估算出该型钢弹簧浮置板轨道在隧道壁位置的 Z 振级插入损失为 16 dB 左右。

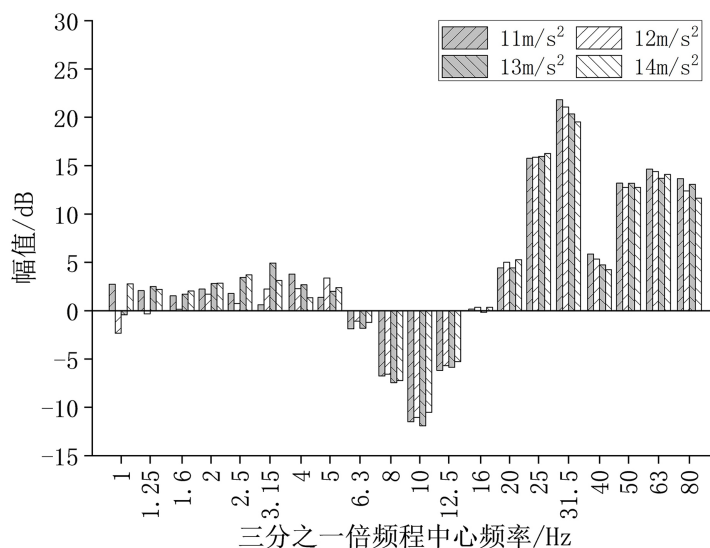


Figure 11. Vibration reduction effect
图 11. 减振效果

4. 结论

1) 地铁列车通过测试断面时,振动从基础传至隧道壁后振动大幅衰减,普通整体道床轨道最大 Z 振级衰减 11.2 dB,钢弹簧浮置板轨道最大 Z 振级衰减 20.0 dB。

2) 测点位置对钢弹簧浮置板轨道减振效果评价具有较大影响,基础测点与隧道壁测点最大 Z 振级插入损失差值的平均值为 8.8 dB。

3) 基于实验室冲击激励测评结果,钢弹簧浮置板轨道在 6.3 Hz~12.5 Hz 不具有减振效果,在 16 Hz 以上频段减振效果较好。钢弹簧浮置板轨道在实验室基础位置的减振效果为 7.5 dB,根据现场测试结果规律可以估算出隧道壁位置 Z 振级插入损失为 16 dB 左右。

基金项目

天津市自然科学基金青年基金项目(22JCQNJC01710);中国铁路设计集团有限公司科技开发 A 类重点课题(2023A0253815, 2024A0253809)。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 叶玉华, 郑天恩, 乔玲, 等. 铁路噪声对沿线居民影响的研究[J]. 铁路劳动安全卫生与环保, 1999, 26(3): 141-145.
- [3] 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(1): 44-51.
- [4] 于春华. 城市轨道交通轨道减振设计与研究[J]. 铁道工程学报, 2007(4): 77-79.
- [5] 伍卫凡. 高等减振轨道过渡段设置方案研究[J]. 铁道工程学报, 2021(12): 56-60, 67.
- [6] Li, X.Z., Guo, Z., Lei, K.N., et al. (2022) Effects of Steel Spring Floating Slab on Vibration and Noise of a Rail Transit

Box-Girder. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport*, **175**, 261-274.

<https://doi.org/10.1680/jtran.19.00059>

- [7] Zhu, S.Y., Yang, J.Z., Yan, H., *et al.* (2015) Low-Frequency Vibration Control of Floating Slab Tracks Using Dynamic Vibration Absorbers. *Vehicle System Dynamics*, **53**, 1296-1314. <https://doi.org/10.1080/00423114.2015.1046460>
- [8] 黄俊飞, 秦佳良. 地铁隧道内钢弹簧浮置板轨道的减振效果实测分析[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(1): 83-86.
- [9] 李克飞, 刘维宁, 孙晓静, 等. 北京地铁 5 号线地下线减振措施现场测试与分析[J]. 铁道学报, 2011, 33(4): 112-118.
- [10] 林渝轲, 吴梦瑶, 王平. 120 km/h 地铁多种减振轨道结构现场测试与分析[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(2): 67-71.
- [11] 吴永芳. 轨道减振效果系统评价方法研究[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(3): 1-6.
- [12] 金浩, 刘维宁. 枕下减振垫铺设方式对梯式轨道减振性能影响试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(2): 73-78.
- [13] 李明航, 马蒙, 刘维宁, 等. 轨道预载对梯式轨道系统减振效果影响试验研究[J]. 铁道学报, 2020, 42(5): 113-119.
- [14] 王金, 高志升, 张鸿飞, 等. 浮置板轨道结构减振性能的落轴试验[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(10): 37-40+85.
- [15] 朱胜阳, 王建伟, 蔡成标, 等. 应用动力吸振器的浮置板轨道低频振动控制特性的试验研究[J]. 铁道学报, 2021, 43(4): 142-149.
- [16] 生态环境部. HJ 453-2018 环境影响评价技术导则——城市轨道交通[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2018.
- [17] 国家环境保护局. GB/T 10071-1988 城市区域环境振动测量方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.