

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2024.01.019

# 成都市域快轨减振措施效果分析

谢玉梅<sup>1</sup>, 贺玉龙<sup>1</sup>, 徐 鸿<sup>2</sup>, 程宇杰<sup>1</sup>, 周文祥<sup>1</sup>

- 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 成都 611756;
- 中铁二院工程集团有限责任公司生态环境设计研究院, 成都 610031)

**摘要:** 为评价市域快轨的减振效果, 以成都市域快轨 18 号线某圆形盾构隧道为例, 选取了线路条件基本相同的相近断面, 对双层非线性减振扣件、减振垫浮置板、钢弹簧浮置板 3 种减振措施及对应普通道床断面进行现场测试, 研究市域快轨减振措施的减振效果。通过对实测数据进行时域、频域和 1/3 倍频程分析, 得到不同减振措施和普通断面的隧道壁最大 Z 振级( $VL_{Zmax}$ ), 并对比得到不同减振措施的减振效果; 通过对测点的隧道壁振动加速度级及地面振动进行 1/3 倍频程分析, 得到振动的传播衰减情况。结果表明: 3 种减振措施都有减振效果, 双层非线性减振扣件减振效果为 7.3 dB, 减振垫浮置板的减振效果为 16.2 dB, 钢弹簧浮置板的减振效果最好, 达到了 19.7 dB。

**关键词:** 市域快轨; 减振措施; 减振效果; 1/3 倍频程; 双层非线性减振扣件; 减振垫浮置板; 钢弹簧浮置板  
**中图分类号:** U239.5; X839 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6073(2024)01-0120-07

## Effectiveness of Vibration Reduction Measures on Chengdu Urban Express

XIE Yumei<sup>1</sup>, HE Yulong<sup>1</sup>, XU Hong<sup>2</sup>, CHENG Yujie<sup>1</sup>, ZHOU Wenxiang<sup>1</sup>

- Faculty of Geoscience and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756;
- Institute of Eco-Environment, China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031)

**Abstract:** To evaluate the vibration reduction effect of urban express, similar sections with essentially the same line conditions were studied. Different vibration reduction measures and corresponding common overall track bed sections were tested on-site to study the vibration reduction effect of urban express vibration reduction measures. Through the time domain, frequency domain, and one-third octave analysis of the measured data, the vibration reduction measures and maximum Z-vibration level ( $VL_{Zmax}$ ) of the ordinary section of the tunnel wall were obtained, and the vibration reduction effects of different vibration reduction measures were compared. The vibration acceleration of the tunnel wall at the measuring point and the ground vibration were analyzed in one-third of an octave to obtain the propagation attenuation of the vibration. The results show that the three vibration reduction measures reduced vibration. The vibration reduction of the double-layer nonlinear vibration reduction fastener was 7.3 dB; the vibration reduction was 16.2 dB for the vibration damping pad floating plate and 19.7 dB for the steel spring floating plate.

**Keywords:** urban rapid rail; vibration reduction measures; vibration reduction effect; one-third octave; double-layer nonlinear vibration reduction fastener; vibration damping pad floating plate; spring floating plate

收稿日期: 2022-10-31 修回日期: 2023-11-05

第一作者: 谢玉梅, 女, 硕士研究生, 研究方向为轨道交通环境振动, 2490540417@qq.com

通信作者: 贺玉龙, 男, 博士, 教授, 研究方向为轨道交通环境振动与噪声, yulonghe@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078433)

引用格式: 谢玉梅, 贺玉龙, 徐鸿, 等. 成都市域快轨减振措施效果分析[J]. 都市轨道交通, 2024, 37(1): 120-126.

XIE Yumei, HE Yulong, XU Hong, et al. Effectiveness of vibration reduction measures on Chengdu urban express[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(1): 120-126.

## 1 研究背景

截至 2022 年年底,我国内地累计运营城市轨道交通线路 10 287.45 km,成都市城市轨道交通运营线路长度达 652.04 km<sup>[1]</sup>。与此同时,环境振动污染日益突出,已经对沿线人们的日常生活造成了诸多不便,投诉事件时有发生。

目前,多位学者对地铁环境振动开展了研究。韦凯等<sup>[2]</sup>利用室内试验与模拟探讨规范中减振垫浮置板轨道减振效果评价的合理性。曾飞<sup>[3]</sup>分析了适用于市域铁路的减振措施。韩艺翠<sup>[4]</sup>通过实测对比了地铁 5 种减振措施的减振效果。于坤宏<sup>[5]</sup>通过对多个城际铁路的环评预测值和实测值对比分析得知,城际铁路的振动源强偏低。金浩<sup>[6]</sup>探究了新型隔振材料—橡胶混凝土面支撑浮置板轨道的动力特性。Zhang<sup>[7]</sup>分别实测南昌地铁 1 号线和上海地铁 11 号线,研究了地铁隧道的列车振动特性。陈俊豪<sup>[8]</sup>通过实测时速 130 km/h 的城际铁路的隧道钢轨、道床板和隧道壁振动,分析得出振动能量在各个位置的主要频段。

市域快轨的运行速度远高于地铁的运行速度,但现阶段对于市域快轨减振措施的减振效果研究较少。本文选取成都新建市域快轨 18 号线某圆形盾构隧道,对不同减振措施的振动加速度进行现场测试,分析不同减振措施的减振效果,以为今后市域快轨的减振措施选型提供借鉴。

## 2 现场测试

### 2.1 测试条件

成都市域快轨 18 号线车辆全长 188.42 m,宽 3 000 mm,高 3 842 mm,8A 编组,时速达到 140 km/h,列车的受电方式为 AC25 kV。18 号线参数如表 1 所示。

表 1 成都市域快轨 18 号线参数  
Table 1 Parameters of Chengdu Metro Line 18

项目	参数
轨距/mm	1 435
四线区间	采用四线形式敷设,普线在外侧两根股道运行,机场快线在内侧两根股道运行
供电制式	AC25kV,走行轨回流方式
车站站台长度/m	186
运行最高速度(km/h)	160
轨道	正线及配线用 60 kg/m 钢轨,车场线用 50 kg/m 钢轨岔
轨面静态平顺度	CPIII 控制网

隧道结构为圆形盾构隧道,内径 7.5 m,外径 8.3 m,管片厚度 0.4 m,直线段地下线。隧道所处地层为富水砂卵石层与泥岩。

### 2.2 测试仪器

采用 8 通道信号采集仪 INV3060A,采集列车通过隧道壁时的垂向振动加速度,传感器选用压电式加速度传感器,型号为 LC0115T,量程为 1 g,灵敏度 5 000 mV/g,频率范围为 0.1~1 500 Hz(±10%)。

### 2.3 测试断面

现场共测试 6 个断面,分别是双层非线性减振扣件(简称“双非扣件”)、减振垫浮置板、钢弹簧浮置板及各自对应的普通道床。测试断面线路条件基本相同且距离相近,均为直线段圆形盾构隧道。轨道参数如表 2 所示。

表 2 轨道参数  
Table 2 Orbital parameters

轨道类型	隧道断面	扣件类型	扣件节点静刚度/(kN/mm)
钢弹簧浮置板轨道	圆形盾构	GB 型	20~35
一般非减振轨道	圆形盾构	GB 型	20~35
减振扣件轨道	圆形盾构	GJ-III 型	10~15
橡胶隔振垫轨道	圆形盾构	GB 型	20~35

### 2.4 测点布置

每个断面测试隧道壁的垂向振动加速度,测点位于距离轨顶面 1.5 m 的隧道壁上。每一组普通道床与减振措施断面同区间同步进行测试,测试采集全天数据,选取 10 组代表性数据,以减少随机误差,现场测试如图 1 所示。测试按照标准进行<sup>[9-15]</sup>。



图 1 现场测试  
Figure 1 Field test

### 2.5 评价指标

评价量为单次列车通过时间内的最大 Z 振级( $1/L_{Zmax}$ ),减振效果评价量为减振轨道与普通整体道床对比段隧

道壁  $VL_{Zmax}$  的差值  $\Delta VL_{Zmax}$ 。

为对不同测点数据进行整合分析,利用《环境影响评价技术导则 城市轨道交通》(HJ453—2018)<sup>[10]</sup>中的经验公式进行修正。由于在测试过程中,选取条件相似的路段同区间同步进行测试,故轴重、簧下质量、轮轨条件、隧道形式、距离衰减、建筑物类型和行车密度均一致,故列车振动修正公式计算如式(1)所示。

$$VL_{Zmax} = VL_{Z0max} + C_V \quad (1)$$

式中,  $VL_{Zmax}$  为修正后的  $VL_{Zmax}$ , dB;  $VL_{Z0max}$  为列车运行振动源强, dB;  $C_V$  为振动修正,按式(2)计算。

$$C_V = 20 \lg V/V_0 \quad (2)$$

式中,  $V$  为列车通过减振断面的运行速度, km/h;  $V_0$  为源强的列车参考速度, km/h。

### 3 测试结果分析

#### 3.1 市域快轨振动源强

本次测试成都市域快轨 18 号线市域 A 型车的振动源强为 69.6 dB(列车运行速度 96 km/h),大大低于环评阶段采用的源强 87.2 dB(列车运行速度 60 km/h),也低于成都市目前 A 型车和 B 型车的实测振动源强,见表 3。

表 3 成都市轨道交通地下线典型振动源强

Table 3 Typical vibration source intensities of Chengdu rail transit underground lines

列车类型	$VL_{Zmax}/dB$	测试速度/(km/h)
成都地铁 B 型车	63.8~80.5	72
成都地铁 A 型车	63.2~72.1	72
成都地铁 A 型车	71.8~73.9	90
市域 A 型车	69.6	106

出现这种现象的原因主要有:①该市域快轨轨面静态平顺度参照高铁标准执行 CPIII 标准,轨面的平顺度远超一般的地铁线路;②此线刚投入运营,轮轨条件好,不存在钢轨波磨现象;③此线的盾构隧道比其他地铁线路的隧道内径大,成都地铁其他线路盾构隧道内径 5.4 m,而 18 号线盾构隧道内径 7.5 m;④此线的盾构隧道管片更厚,18 号线管片厚度 0.4 m,其他线路管片厚度 0.3 m,属于重型隧道结构,有利于减振。

#### 3.2 双非扣件与普通道床段结果分析

选取 10 组代表性直线段圆形盾构隧道数据进行分析,以消除随机干扰。双非扣件段与普通道床段隧

道壁典型时域曲线分别如图 2、图 3 所示。

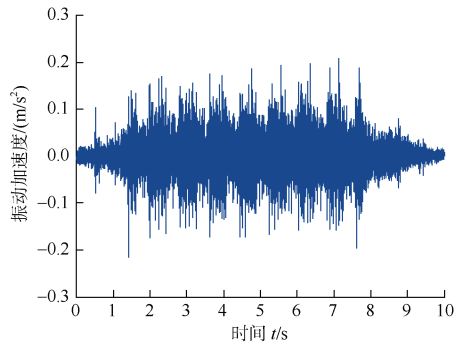


图 2 双非扣件段隧道壁典型时域曲线

Figure 2 Typical time-domain curve of double-layer nonlinear vibration reduction fastener

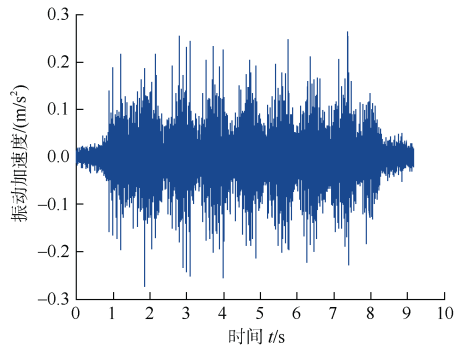


图 3 普通道床段隧道壁典型时域曲线

Figure 3 Typical time-domain curve of ordinary integral ballast bed

由图 2~3 可知,直线段双非扣件测试断面和普通道床测试断面的隧道壁垂向振动加速度峰值分别为  $0.236 \text{ m/s}^2$  和  $0.256 \text{ m/s}^2$ ,有效值分别为  $0.040 1 \text{ m/s}^2$  和  $0.045 8 \text{ m/s}^2$ 。

双非扣件段与普通道床段隧道壁典型 1/3 倍频程曲线如图 4 所示。

由图 4 可知,双非扣件段和普通道床段隧道壁测点的垂向加速度频谱峰值主要分布在  $50 \sim 63 \text{ Hz}$ 。双非扣件的减振范围为  $5 \sim 40 \text{ Hz}$  和  $80 \sim 200 \text{ Hz}$ ;在  $6.3 \sim 25 \text{ Hz}$  和  $63 \sim 125 \text{ Hz}$  减振效果明显;在  $12.5 \text{ Hz}$  减振效果最好,达到了  $17.3 \text{ dB}$ 。但是在  $1 \sim 5 \text{ Hz}$  存在振动放大现象。

双非扣件段隧道壁的  $VL_{Zmax}$  为  $63.4 \text{ dB}$ ,普通道床段隧道壁的  $VL_{Z0max}$  为  $69.6 \text{ dB}$ 。普通道床段列车运行速度为  $96 \text{ km/h}$ ,双非扣件段列车运行速度为  $109 \text{ km/h}$ 。由式(2),普通道床段的速度修正量为  $1.1 \text{ dB}$ ,修正后普通道床段的  $VL_{Zmax}$  为  $70.7 \text{ dB}$ ,因此,双非扣件的减振效果为  $7.3 \text{ dB}$ 。

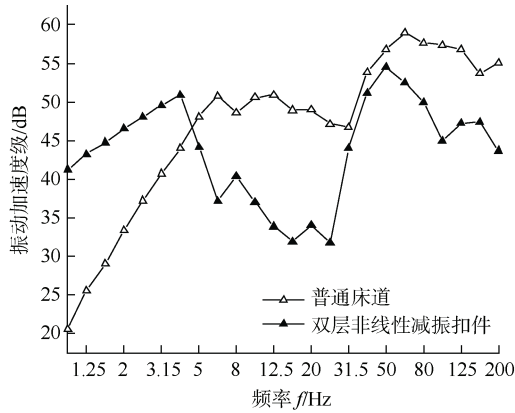


图4 双非扣件与普通道床段隧道壁 1/3 倍频程  
Figure 4 Double-layer nonlinear fastener and ordinary integral ballast bed, one-third octave

### 3.3 减振垫浮置板与普通道床段结果分析

减振垫浮置板与普通道床段典型时域曲线分别如图 5、图 6 所示。减振垫浮置板和普通道床测点的隧道壁垂向振动加速度峰值分别为  $0.0146 \text{ m/s}^2$ 、 $0.261 \text{ m/s}^2$ ，有效值分别为  $0.00289 \text{ m/s}^2$ 、 $0.0516 \text{ m/s}^2$ 。

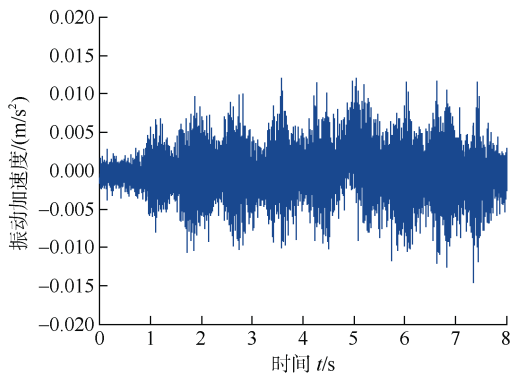


图5 减振垫浮置板段隧道壁典型时域曲线  
Figure 5 Typical time-domain curve of shock-absorbing pad-floating plate

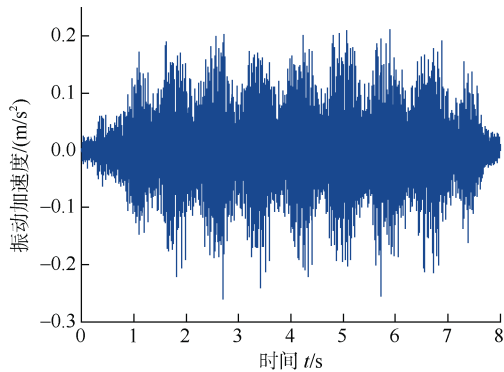


图6 普通道床段隧道壁典型时域曲线  
Figure 6 Typical time-domain curve of ordinary integral ballast bed

减振垫浮置板段与普通道床段隧道壁典型 1/3 倍频程曲线如图 7 所示。减振垫浮置板段和普通道床段隧道壁的垂向加速度频谱峰值主要分布在 63 Hz 附近。减振垫浮置板道床的减振范围为 31.5~200 Hz；在 160 Hz 减振效果最好，达 30 dB。但是在 1~5 Hz 有振动放大的效果。

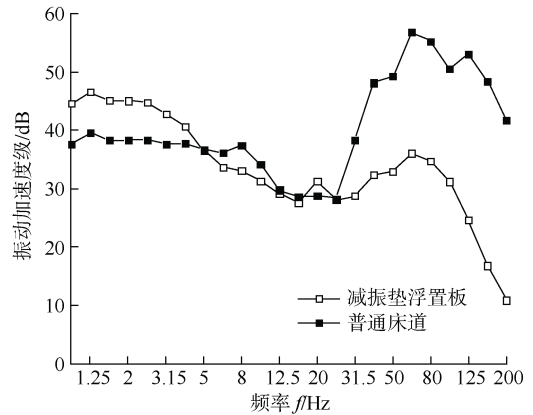


图7 减振垫浮置板与普通道床段隧道壁 1/3 倍频程  
Figure 7 One-third octave band between floating plate of vibration damping pad and ordinary integral track bed

普通道床段的列车运行速度为 106 km/h，减振垫浮置板段的列车运行速度为 107 km/h。减振垫浮置板段隧道壁的  $VL_{Zmax}$  为 49.9 dB，普通道床段隧道壁的  $VL_{Z0max}$  为 66.0 dB。由式(2)，普通道床段的速度修正值为 0.1 dB，普通道床速度修正后的  $VL_{Zmax}$  为 66.1 dB。减振垫浮置板的减振效果为 16.2 dB。

### 3.4 钢弹簧浮置板与普通道床段结果分析

钢弹簧浮置板与普通道床段隧道壁典型时域曲线分别如图 8、图 9 所示，钢弹簧浮置板测试断面和

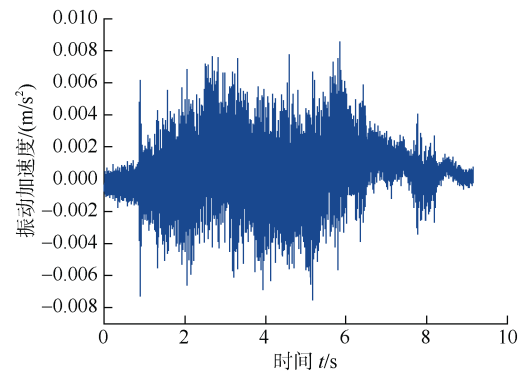


图8 钢弹簧浮置板段隧道壁典型时域曲线  
Figure 8 Typical time-domain curve of steel spring floating plate

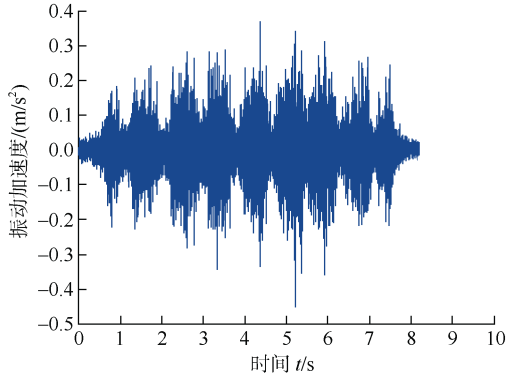


图 9 普通道床段隧道壁典型时域曲线  
Figure 9 Typical time-domain curve of ordinary integral ballast bed

普通道床测试断面的隧道壁垂向振动加速度峰值分别为  $0.010\ 2\ \text{m/s}^2$ 、 $0.333\ \text{m/s}^2$ ，有效值分别为  $0.002\ 01\ \text{m/s}^2$ 、 $0.072\ 9\ \text{m/s}^2$ 。

钢弹簧浮置板段与普通道床段隧道壁典型 1/3 倍频程曲线如图 10 所示，钢弹簧浮置板段和普通道床段测点的垂向加速度频谱峰值主要分布在 50~63 Hz。钢弹簧浮置板在 5~200 Hz 范围均有减振效果；在 20~200 Hz 范围减振效果明显，在 63 Hz 减振效果最好，达到了 25 dB。钢弹簧浮置板的固有频率为 4 Hz，在 1~5 Hz 有振动放大的现象。

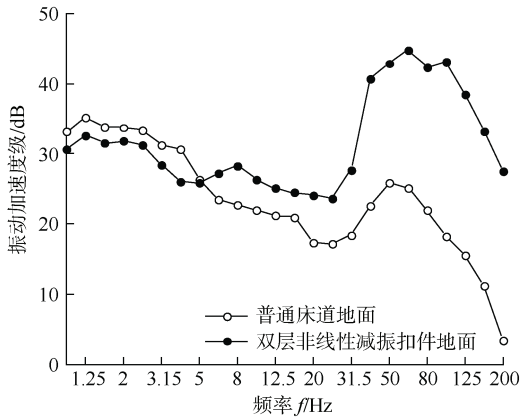


图 10 钢弹簧浮置板与普通道床段 1/3 倍频程  
Figure 10 Steel spring floating plate and ordinary integral ballast bed, one-third octave

钢弹簧浮置板的隧道壁的  $VL_{Zmax}$  为 44.7 dB，普通道床的隧道壁的  $VL_{Z0max}$  为 62.0 dB。普通道床的运行速度为 103 km/h，钢弹簧浮置板的运行速度为 139 km/h。由于此处的测点相距较远，且列车处于加速阶段，故速度相差较远，所以需要进行速度修正。由式(2)，普通道床的速度修正值为 2.4 dB，修正后普通道床速度

$VL_{Zmax}$  为 64.4 dB，钢弹簧浮置板的减振效果为 19.7 dB。

综上所述，不同减振措施实际减振效果如表 4 所示。

表 4 不同减振措施的减振效果  
Table 4 Vibration reduction with vibration reduction measures

位置	$VL_{Z0max}/\text{dB}$	$VL_{Zmax}/\text{dB}$	实际减振效果/dB
普通道床	69.6	70.7	7.3
双非扣件	—	63.4	
普通道床	66.0	66.1	16.2
减振垫浮置板	—	49.9	
普通道床	62.0	64.4	19.7
钢弹簧浮置板	—	44.7	

## 4 地面环境振动测试

地面环境振动测点现场如图 11 所示。



图 11 地面测试现场  
Figure 11 Ground-test site map

### 4.1 双非扣件与普通道床段地面振动分析

地面测点条件：富水砂卵石地层，邻近道路，来往车辆多为小汽车；双非扣件段埋深 30 m，普通道床段埋深 24 m。双非扣件与普通道床段地面测试 1/3 倍频程分析如图 12 所示，地面双非扣件段测点和普通道

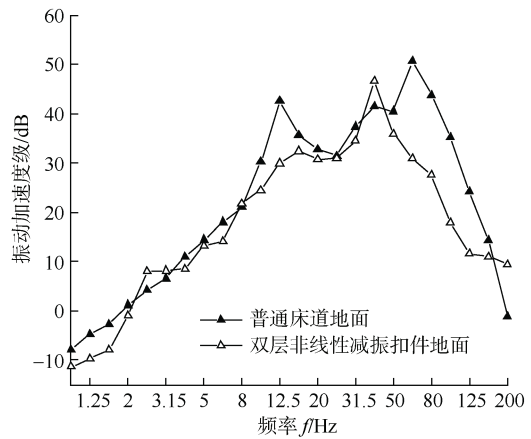


图 12 双非扣件与普通道床段地面测点 1/3 倍频程曲线  
Figure 12 One-third-octave curve of double-layer nonlinear damping fasteners and ground measuring points of ordinary integral ballast bed

床段测点的垂向加速度频谱峰值主要分布在 50~63 Hz。双非扣件段地面振动的减振范围为 8~25 Hz、50~160 Hz；在 50~160 Hz 的减振效果明显，在 63 Hz 减振效果最好，达到了 20 dB。但是在 2~3 Hz、32~45 Hz 有振动放大现象。双非扣件段地面振动的  $VL_{Zmax}$  为 47 dB，普通道床段地面振动的  $VL_{Zmax}$  为 53 dB。经计算，埋深修正量影响较小，故不考虑埋深影响。

#### 4.2 减振垫浮置板与普通道床段地面振动分析

地面测点条件：富水砂卵石地层，邻近道路，来往车辆多为小汽车；减振垫浮置板断面埋深 24 m，普通道床段埋深 21 m。减振垫浮置板道床与普通道床段地面振动 1/3 倍频程曲线如图 13 所示。

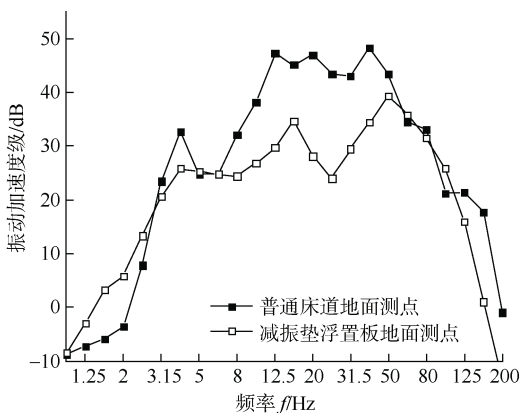


图 13 减振垫浮置板与普通道床段地面测点 1/3 倍频程曲线  
Figure 13 One-third octave curve of vibration damping pad floating slab track bed and ordinary integral track bed

由图 13 可知，地面减振垫浮置板段测点和普通道床测点地面振动的垂向加速度频谱峰值主要分布在 40~50 Hz。减振垫浮置板在 6~60 Hz、125~200 Hz 范围均有减振效果，其中在 6~60 Hz 范围减振效果明显，在 24 Hz 减振效果最好，达到了 19 dB。在 1~3 Hz 有振动放大的现象。减振垫浮置板的地面  $VL_{Zmax}$  为 44 dB，普通道床的地面  $VL_{Zmax}$  为 54.5 dB。经计算，埋深修正量影响较小，故不考虑埋深影响。

#### 4.3 钢弹簧浮置板与普通道床段地面振动分析

钢弹簧浮置板断面地面测点条件：泥岩，埋深 24 m，邻近道路，来往车辆多为大卡车。普通道床断面地面测点条件：泥岩，埋深 47 m，封闭道路，无来往车辆。钢弹簧浮置板与普通道床段地面测点 1/3 倍频程如图 14 所示。

由图 14 可知，钢弹簧浮置板段地面测试断面和普通道床段测试断面的垂向加速度频谱峰值主要分布在 50 Hz 附近。钢弹簧浮置板的减振范围为 2~10 Hz，

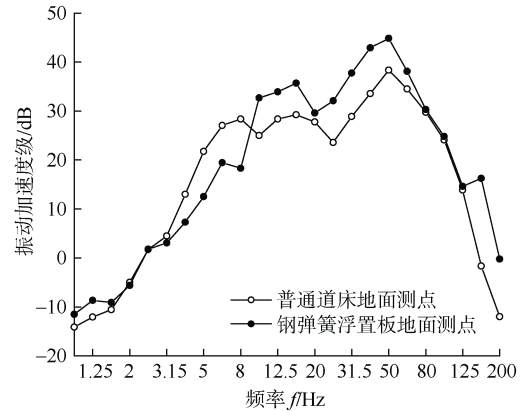


图 14 钢弹簧浮置板与普通道床段地面测点 1/3 倍频程  
Figure 14 One-third octave curve of steel spring floating plate and common integral track bed

在 10~80 Hz 减振垫浮置板的  $VL_{Zmax}$  大于普通道床，但在 1~2 Hz 有振动放大的效果。钢弹簧浮置板的地面  $VL_{Zmax}$  为 43 dB，普通道床的地面  $VL_{Zmax}$  为 42 dB。

由于两个测点的埋深差距较大，需要进行修正之后再比较，利用《环境影响评价技术导则 城市轨道交通》经验公式进行埋深修正。地下线线路中心线正上方至两侧 7.5 m 范围内：

$$C_D = -81g[\beta(H-1.25)] \quad (3)$$

式中， $H$  为预测点地面至轨顶面的垂直距离，m； $\beta$  为土层的调整系数，取 0.25。

根据式(3)可得，钢弹簧浮置板段的距离衰减  $C_D$  为 -6.04 dB，普通道床段的距离衰减  $C_D$  为 -8.47 dB。修正后，钢弹簧浮置板段地面  $VL_{Zmax}$  为 49.04 dB，普通道床段地面  $VL_{Zmax}$  为 50.47 dB。

考虑埋深影响后，钢弹簧浮置板的  $VL_{Zmax}$  略小于普通道床的  $VL_{Zmax}$ 。除此之外，钢弹簧浮置板地面测点还受到地面交通影响最终导致地面测点的  $VL_{Zmax}$  偏大。普通道床在经过地层衰减后，衰减了 15 dB，由于埋深大且无环境干扰，故衰减量较大。

## 5 结论

1) 成都市域快轨 18 号线振动源强为 69.6 dB，低于成都市目前 A 型车和 B 型车的实测振动源强。良好的轨面平顺性与轮轨关系、重型隧道结构有利于降低振动源强。

2) 成都市域快轨 18 号线双非扣件的减振效果为 7.3 dB，在 6.3~25 Hz 和 63~125 Hz 的减振效果明显；减振垫浮置板道床的减振效果为 16.2 dB，在 31.5~200 Hz 的减振效果明显；钢弹簧浮置板的减振效果为

19.7 dB, 在 20~200 Hz 的减振效果明显。

3) 减振垫浮置板、双非扣件对地面环境振动也有明显衰减作用, 地面测点振动符合标准。

#### 参考文献

- [1] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 2022 年度统计和分析报告[J]. 城市轨道交通, 2023(4): 13-15.
- [2] 韦凯, 成芳, 赵泽明, 等. 减振垫浮置板轨道减振效果评价方法研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(3): 656-664.  
WEI Kai, CHENG Fang, ZHAO Zeming, et al. Research on the evaluation method of vibration reduction effect of damping pad floating slab track[J]. Journal of railway science and engineering, 2022, 19(3): 656-664.
- [3] 曾飞, 王彦飞, 仵飞, 等. 温州市域铁路 S1 线减振扣件设计及应用[J]. 都市轨道交通, 2020, 33(4): 104-108.  
ZENG Fei, WANG Yanfei, WU Fei, et al. Design and application of damping fasteners for line S1 of Wenzhou regional railway[J]. Urban rapid rail transit, 2020, 33(4): 104-108.
- [4] 韩艺馨, 贺玉龙, 李怀龙. 成都地铁钢弹簧浮置板道床减振性能分析[J]. 噪声与振动控制, 2019, 39(1): 136-139.  
HAN Yihui, HE Yulong, LI Huailong. Analysis of the vibration reduction performance of steel spring floating slab track bed of Chengdu metro[J]. Noise and vibration control, 2019, 39(1): 136-139.
- [5] 于坤宏. 都市圈城际铁路地下线振动环境影响评价研究[J]. 铁道标准设计, 2023, 67(1): 185-190.  
YU Kunhong. Research on the vibration environmental impact assessment of intercity railway underground lines in metropolitan areas[J]. Railway standard design, 2023, 67(1): 185-190.
- [6] 金浩, 赵晨. 面支撑橡胶混凝土浮置板轨道动力特性的细观分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(6): 2057-2064.  
JIN Hao, ZHAO Chen. Mesoscale investigation of the dynamic performance of a full-surface supporting floating slab track made of rubberized concrete[J]. Journal of railway science and engineering, 2023, 20(6): 2057-2064.
- [7] ZHANG Xiaohui, ZHOU Shunhua, HE Chao, et al. Experimental investigation on train-induced vibration of the ground railway embankment and under-crossing subway tunnels[J]. Transportation geotechnics, 2021, 26: 100422.
- [8] 陈俊豪, 柯文华, 陈嵘, 等. 时速 130 km 城际铁路振源特性试验研究[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(7): 63-67.  
CHEN Junhao, KE Wenhua, CHEN Rong, et al. Experimental study on vibration source characteristics of 130 km/h intercity railway[J]. Railway standard design, 2018, 62(7): 63-67.
- [9] 中铁二院工程集团有限责任公司. 成都轨道交通 18 号线一期工程环境影响报告书[R]. 成都: 2016.  
China Railway Eryuan Engineering Group Co.LTD Environmental Impact Report for Chengdu Rail Transit Line 18 Phase I Project [R]. Chengdu: 2016.
- [10] 环境保护部. 环境影响评价技术导则 城市轨道交通: HJ453—2018[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2019.  
Department of Environmental Protection. Technical Guidelines for Environmental Impact Assessment, urban rail transit: HJ453—2018[S]. Department of Environmental Protection. Beijing: China Environmental Science Press, 2019.
- [11] 全国机械振动与冲击标准化技术委员会. 机械振动与冲击-加速度计的机械安装: GB/T14412—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.  
National Technical Committee for Standardization of mechanical vibration and shock. Mechanical vibration and impact-mechanical installation of accelerometers: GB/T14412—2005[S]. Beijing: China Standard Press, 2005.
- [12] 住房和城乡建设部. 城市轨道交通工程测量规范: GB/T50308—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.  
Ministry of Housing and urban-rural development. Specification for measurement of urban rail transport engineering: GBT50308—2017[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2018.
- [13] 全国机械振动与冲击标准化技术委员会. 机械振动列车通过时引起铁路隧道内部振动的测量: GB/T 19846—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.  
National Technical Committee for Standardization of mechanical vibration and shock. Measurement of internal vibration of railway tunnels caused by mechanical vibration trains: GB/T 19846—2009[S]. Beijing: China Standard Press, 2009.
- [14] 全国机械振动与冲击标准化技术委员会. 机械振动与冲击人体暴露于全身振动的的评价第 1 部分: GB/T13441.1—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.  
National Technical Committee for Standardization of mechanical vibration and shock. Mechanical vibration and shock-evaluation of human exposure to whole-body vibration-part 1: GB/T13441.1—2007[S]. Beijing: China Standard Press, 2007.
- [15] 北京市劳动保护科学研究所. 城市区域环境振动测量方法: GB10071—88[S]. 北京: 中国标准出版社, 1989.  
Beijing Institute of Labor Protection. Measurement method of environmental vibration in urban area: GB10071—88[S]. Beijing: China Standard Press, 1989.

(编辑: 傅依萱)