

文章编号:1671-6833(2025)05-0111-08

减振垫浮置板道床减振性能及参数优化

徐平¹, 刘向明², 张文跃¹, 杨延峰³, 韩月旺⁴

(1. 郑州大学 水利与交通学院, 河南 郑州 450001; 2. 铁科院(深圳)研究设计院有限公司, 广东 深圳 518050; 3. 中国铁道科学研究院集团有限公司, 北京 100081; 4. 郑州地铁集团有限公司, 河南 郑州 450054)

摘要: 地铁列车运行引起沿线环境振动及建筑物二次结构噪声问题越发突出, 有必要开展减振垫浮置板道床减振性能及参数优化研究。首先, 以郑州某地铁运营线路为工程实例, 现场实测了普通整体道床和减振垫浮置板道床的振动信号, 通过 1/3 倍频谱分析, 得到了 Z 计权振动加速度级, 相较于普通整体道床, 减振垫浮置板道床具有优良的减振效果, 可达 12.80 dB; 其次, 运用 ABAQUS 软件, 建立了减振垫浮置板道床-隧道-土体有限元模型, 基于实测数据验证了模型的准确性和采取假定的合理性, 采用单因素分析法研究结果表明: 适当降低扣件刚度、增加浮置板密度和降低减振垫静态模量, 能够提高减振垫浮置板道床的减振效果。最后, 提出了一种减振垫浮置板轨道的扣件刚度、减振垫静态模量和浮置板密度等优化参数配置方案, 经有限元模拟对比分析, 优化后的减振垫浮置板道床能够实现更加理想的减振效果。

关键词: 减振垫; 浮置板; 减振性能; 参数优化; 有限元模拟; 动力响应

中图分类号: U455.49

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2025.05.025

随着城市化进程的快速推进, 地铁已经成为城市交通的重要组成部分。当地铁近距离穿越商业中心及居民区时, 地铁列车运行引起沿线环境振动及建筑物二次结构噪声问题越发突出。减振垫浮置板道床通过减振垫与轨道板及其上部结构形成隔振系统, 从而对环境振动进行控制, 是常用的轨道减振设计之一^[1-4]。

近年来, 国内外众多学者针对减振垫浮置板道床开展了大量研究, 在减振垫的动力特性和力学性能方面, 冯青松等^[5]计算了 CRH6 型动车以 160 km/h 速度经过双块式无砟轨道-橡胶减振垫浮置板轨道过渡段时所引起的轮轨系统动力响应; 任娟娟等^[6]分析了地铁列车以 160 km/h 速度行驶时, 不同减振垫刚度下轨道结构的动力响应和减振性能; 王启好等^[7]通过对比数值模拟和实测结果发现采用减振垫超弹性本构模型计算得到的隧道和轨道振动响应, 与现场实测数据更为吻合; 王梦林等^[8]建立车

辆-轨道系统动力分析模型, 研究了轨道板厚度、扣件刚度和减振垫刚度对聚氨酯减振浮置板轨道结构动力响应的影响; 李明航等^[9]开展了车轮不圆顺测试, 分析了不同轮轨在不平顺状态下橡胶垫浮置板轨道的减振效果。在减振垫试验、改良和研发方面, Li 等^[10]对服役 20 a 的橡胶减振器浮置板开展了测试分析, 长期服役后的橡胶减振器产生了一定程度的硬化, 但减振效果仍可达到 12.9 dB; 刘向明等^[11]为改善减振垫浮置板轨道的减振效果, 提出了新型的两侧半铺减振垫浮置板轨道, 并通过足尺模型测试分析了振动特性; He 等^[12]研发了一种能够填充高阻尼液的空心孔橡胶减振器, 并进行了车辆安全性、振动、噪声、轨道变形和轮轨力等试验研究; 许孝堂等^[13]提出了预制式减振垫浮置道床技术, 并先后应用于青岛的 3 条新建地铁项目; Chen 等^[14]研发了具有谐波频率的预应力阻尼装置, 提高了振垫浮置板轨道的整体稳定性; 张皓迪等^[15]以目前工程中

收稿日期: 2026-04-13; 修订日期: 2026-05-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278467); 中国铁道科学研究院基金项目(2022YJ296); 河南省科技攻关(242102240019)

作者简介: 徐平(1977—), 男, 山东日照人, 郑州大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事轨道减振隔振研究, E-mail: plian127@163.com。

引用本文: 徐平, 刘向明, 张文跃, 等. 减振垫浮置板道床减振性能及参数优化[J]. 郑州大学学报(工学版), 2026, 47(5): 111-118. [Xu Ping, Liu Xiangming, Zhang Wenyue, et al. Vibration reduction performance and parameter optimization of damping pad floating slab track bed[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2026, 47(5): 111-118.]

最常用的两种减振措施(减振扣件和减振垫)为研究对象,探究了轨道扣件刚度、损耗因子及减振垫隔振频率的最优匹配策略。

综上所述,众多学者对减振垫浮置板道床的长期服役性能、新工艺及减振性能的影响因素进行了深入研究,但关于减振垫浮置板道床优化参数配置的研究较少。本文以郑州某地铁运营线路为工程实例,现场实测了普通整体道床和减振垫浮置板道床的振动信号,分析了其动力响应特征和减振性能;运用 ABAQUS 软件,建立了减振垫浮置板道床-隧道-土体的三维有限元模型,基于实测数据验证了模型的准确性。通过单因素分析法,提出了减振垫浮置板道床的扣件刚度、减振垫静态模量及浮置板密度等优化参数配置方案,相关成果可为中国地铁的减振设计、评估和改造提供参考和借鉴。

1 振动测试结果分析

郑州某地铁线路一期工程和二期工程分别于 2013 年 12 月 28 日和 2017 年 1 月 12 日开通运营,线路全长 41.2 km,全部为地下线,隧道外径 6.2 m,内径 5.5 m,采用 6 节编组 B 型列车,最高运行速度 100 km/h。该线路穿越郑州繁华地段,沿线敏感建筑多,对减振降噪要求较高,采用 GJ-Ⅲ 减振扣件轨道、橡胶垫浮置板轨道及钢弹簧浮置板轨道等 3 种减振措施。

为了对比分析橡胶减振垫浮置板道床的减振性能,并为数值模拟提供参考依据,对普通整体道床和

橡胶减振垫浮置板道床振动信号进行实测分析,测点布置示意图和加速度传感器安装照片,如图 1 所示。测点 1 布置在钢轨的轨腰上,测点 2 布置在道床中心线上,测点 3 布置在高于轨道顶面 1.25 m 的隧道侧壁上。

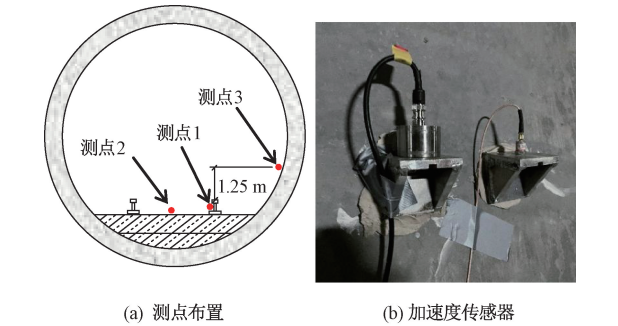


图 1 振动信号测点布置
Figure 1 Schematic diagram of test point layout

振动信号测试采用北京东方振动和噪声技术研究所研制的设备,包含以下 3 部分。①INV3062C1L 型 24 位高精度采集仪。9 通道模拟输入,单道采样频率 102.4 kHz,频率示值和分辨率误差<0.01%;②INV 9832.50 型 3 向加速度传感器。灵敏度 100 mV/g,采样频率 1~10 kHz(±1 dB)和 0.4~12 kHz(±3 dB);③计算机数据分析系统。DASP V10 软件。充分考虑地铁的振动特性,现场测试的采样频率选取 512 Hz。

地铁以 70 km/h 运行时,普通整体道床和橡胶减振垫浮置板道床的 3 个测点的垂向振动加速度时程曲线,如图 2 所示。

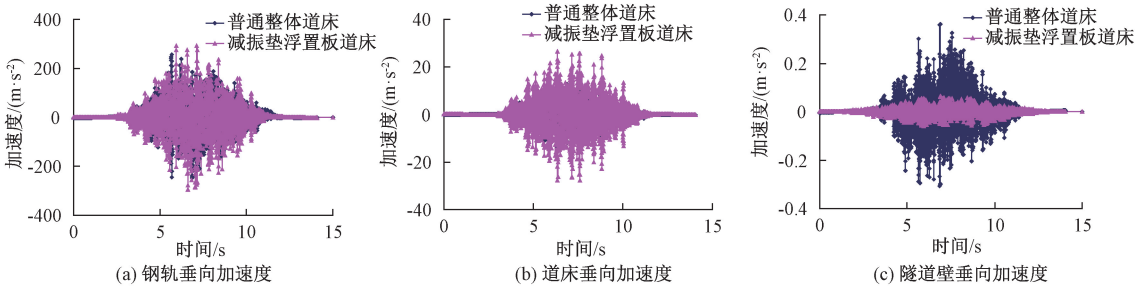


图 2 实测加速度时程曲线
Figure 2 In-situ tested acceleration time-history curves

从图 2 可以看出,地铁运行引起普通整体道床和橡胶减振垫浮置板道床的 3 个测点的振动主要集中在 2.5~12.5 s 的时间段内,作用时长均低于 10 s。通过时域分析,计算得到了各测点的垂向加速度有效值,见表 1。

从表 1 可知,以普通道床作为参照,减振垫浮置板道床的钢轨和道床板的垂向加速度均有所增加,分别增加 5.60%和 238.79%;而隧道壁的垂向加速度则明显降低,降幅为 66.13%,可以初步判定,减

振垫浮置板道床具有优良的减振性能^[1]。

表 1 不同测点的垂向加速度有效值
Table 1 Effective vertical acceleration values at different test point

测点位置	加速度/(m·s ⁻²)	
	普通整体道床	减振垫浮置板道床
钢轨	46.090	48.670
道床板	2.140	7.250
隧道壁	0.062	0.021

根据 GB 50868—2013《建筑工程容许振动标准》^[16],采用 1/3 倍频程分析方法对振动信号进行处理,即将振动时程信号依次分为若干幅波形,对每一幅波形进行 1/3 倍频程分析,可得到各个中心频率对应的分频振级, Z 计权振动加速度级 VL_z 可由下式计算^[13]:

$$VL_z = 10\log\left(\sum_{i=1}^n 10^{(VL_i+\alpha_i)/10}\right)。$$

(1)

式中: n 为 1/3 倍频程中心频率的总数; VL_i 表示第 i 个中心频率 ω_i 处未经计权的分频振动加速度级; α_i 为对应频率 Z 计权因子,具体数值见文献^[17]。

根据 GJJ/T 191—2012《浮置板轨道技术规范》^[18],在进行减振性能评价时,振动频率区间设定为 1~200 Hz,并重点关注垂向振动加速度测定,选用的关键计算指标为减振区(减振垫浮置板道床)与非减振区(普通整体道床)隧道壁在各频段下的 Z 计权振动加速度级 VL_z 之差 ΔL_a 。

根据实测的隧道壁加速度信号,得到了减振垫浮置板道床和普通整体道床的 Z 计权 1/3 频程曲线,如图 3 所示。从图 3 可以看出,减振垫浮置板道床在 1~6.3 Hz 和 12.5~200 Hz 之间起到了减振作用,且在 50~200 Hz 之间的减振效果最明显,但在 8~10 Hz 之间,减振垫浮置板道床的 VL_z 超过普通整体道床 4.68 dB,主要是因为在该频率区间内,减振垫浮置板道床与列车振动频率接近,产生了共振;经计算,1~200 Hz 之间的 ΔL_a 为 12.80 dB,即减振垫浮置板道床的减振效果可达 12.80 dB。

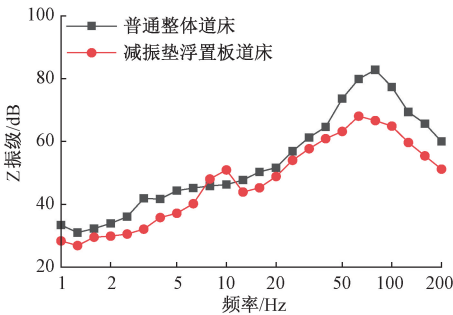


图 3 减振垫浮置板道床和普通整体道床的隧道壁加速度分频振级对比曲线

Figure 3 Comparison curves of frequency spectrum of acceleration levels for tunnel walls of damping pad floating slab track bed and ordinary integral track bed

2 减振垫浮置板道床有限元模型

2.1 有限元模型及材料参数

根据相关研究^[19],有限元模型的宽度和深度取土体剪切波长 λ_s 的 1~1.5 倍、长度取隧道直径 D 的 15 倍,在这种条件下进行有限元模拟时的振动相

对稳定,勘察报告提供的土体剪切波长为 4~5 m,综合考虑计算机运行时间和有限元模拟精度,有限元模型的宽度、厚度和纵向长度分别设置为 100、50、75 m。各土层的物理力学参数见表 2。

表 2 土层物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of soil layers

材料名称	层厚/ m	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模 量/MPa	泊松比
人工填土	2	1 700	130	0.31
粉土	6	1 880	215	0.41
粉质黏土	22	1 920	430	0.38
粉质黏土	20	1 950	600	0.38

减振垫的变形较小且受力方向单一,选用 Mooney-Rivlin 模型来描述橡胶材料的超弹性,其应变能函数 W ^[20] 为

$$W = C_1(I_1 - 3) + C_2(I_2 - 3)。$$

(2)

式中: C_1 和 C_2 分别为代表材料超弹性的力学特性参数; I_1 和 I_2 分别为与主拉伸变形密切相关的变形张量不变量。

减振垫的剪切模量 G 与弹性模量 E_0 、材料的超弹性力学性能常数 C_1 、 C_2 存在如下关系:

$$G = E_0/3 = 2(C_1 + C_2)。$$

(3)

当 C_1 和 C_2 之间的比率固定在 0.05 时,模拟的变形荷载关系最接近橡胶实测结果^[16]。地铁线路采用 USM1000W 型号减振垫,相关参数见表 3。

表 3 减振垫相关参数

Table 3 Parameters of damping pad

参数	取值
弹性模量/MPa	0.27
剪切模量/MPa	0.09
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	466.67
静态模量/($\text{N} \cdot \text{mm}^{-3}$)	0.019
超弹性力学性能常数 C_1 /MPa	0.042 9
超弹性力学性能常数 C_2 /MPa	0.002 1

在减振垫浮置板道床轨道系统中,减振垫为钢筋混凝土道床提供支撑,而扣件则将钢轨组件与道床板固定连接,设定扣件动静刚度比为 1.4^[21],轨道扣件的标准间距为 625 mm,为简化分析,将扣件设置为弹簧阻尼单元,模拟其在 3 个正交方向(隧道轴向、横向、垂向)的刚度及阻尼效应,双钢轨与道床之间共设置 240 个弹簧阻尼单元。隧道由 C50 钢筋混凝土预制管片拼装而成,隧道中心埋深 20 m、外径 6.2 m、内径 5.5 m,采用 8 节点实体缩减积分单元 C3D8R 划分隧道和钢轨。

参考高铁隧道动态气密性有限元模型^[22],采用 ABAQUS 软件构建超弹性减振垫浮置板道床-隧道-土体的三维有限元模型,如图 4 所示。

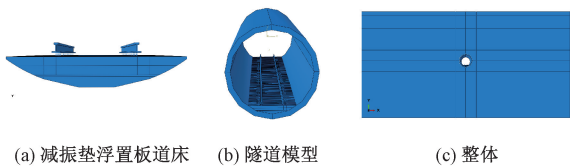


图 4 三有限元模型
Figure 4 3D finite FEM model

单元网络划分如下:隧道周边 3 m 以内区域的土体网格尺寸加密至 0.5 m,其他区域土体网格取 1 m,共划分 803 100 个单元;隧道、减振垫、钢轨和道床的网格尺寸均取 0.2 m,单元数量分别为 120 540,17 500,1 560 和 15 200。

为避免振动波在边界反射叠加增强而导致计算结果失真,在有限元模型的四周和底部设置无限元单元,模型顶端设为自由边界。

2.2 列车移动荷载的施加

地铁列车每个轮子产生的荷载,由连续排列的 5 个轨枕共同承担,引入分散系数 k_1 和叠加系数 k_2 ,最终可以得到一个基于单个轮轴载荷且能够反映轨枕实际载荷分布情况的表达式^[23]:

$$F(t) = k_1 k_2 (P_0 + P_1 \sin \omega_1 t + P_2 \sin \omega_2 t + P_3 \sin \omega_3 t); \tag{4}$$

$$P_i = M_0 a_i \omega_i^2, i = 1, 2, 3; \tag{5}$$

$$\omega_i = 2\pi v / L_i, i = 1, 2, 3. \tag{6}$$

式中: P_0 为车轮静止荷载; t 为荷载作用时长; P_1 、 P_2 、 P_3 分别表示行车平顺性标准、动力附加荷载极限及波形磨损阈值所对应的振动荷载幅度; M_0 为车辆簧下质量; ω_i 为对应圆频率; v 为地铁车速; a_i 为矢高; L_i 为波长。

地铁线路采用 6 节编组 B 型列车,车体长 19 m,单侧静载荷 P_0 为 70 kN,簧下质量 M_0 为 750 kg,控制条件分别取: $L_1 = 10.0$ m、 $a_1 = 5.0$ mm、 $L_2 = 2.0$ m、 $a_2 = 0.6$ mm、 $L_3 = 0.5$ m、 $a_3 = 0.1$ mm,进行振动信号实测时的地铁列车运行速度为 70 km/h, k_1 和 k_2 按经验取 $k_1 k_2 = 1$ 。将上述参数代入式(4)~(6),最终得到了地铁列车以 70 km/h 行驶时的竖向轮载时程曲线,如图 5 所示。根据单节车厢的轮轨间距,确定竖向轮载的空间分布,如图 6 所示。

在每条钢轨上施加图 6 所示的 4 个竖向轮载,并以 70 km/h 的速度向前运行,可以模拟地铁列车运行引起的动荷载,在有限元模拟中,列车动载荷通过 ABAQUS 提供的 DLOAD 子程序施加,该子程序采用 Fortran 语言编写。此外,为确保模拟结果的稳定性和准确性,应选择合适的时间步长,综合有限元

模型网格尺寸、波速和固有周期等多个关键因素,将计算时间步长确定为 0.005 s^[17]。

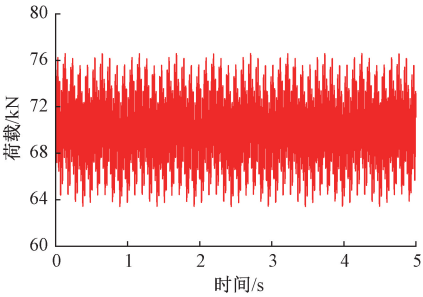


图 5 竖向轮载时程曲线
Figure 5 Time-history curve of vertical wheel load

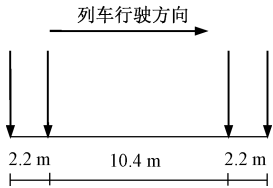


图 6 竖向轮载空间分布
Figure 6 Distribution of vertical wheel load

2.3 有限元模型验证

根据地铁设计资料,橡胶减振垫浮置板道床的参数分别为:扣件刚度 3.5×10^7 N/m、浮置板密度 2 500 kg/m³、减振垫静态模量 0.019 N/mm³,车速取 70 km/h,按图 1(a) 设置轨道、浮置板和隧道壁的加速度拾取点,各拾取点的实测和数值模拟的加速度有效值见表 4。从表 4 可知,3 个拾取点的实测和数值模拟的有效值基本接近,误差均在 10% 以内。

表 4 实测和模拟加速度有效值

Table 4 Measured and simulated acceleration values			
拾取点	实测值/(m·s ⁻²)	模拟值/(m·s ⁻²)	误差/%
钢轨	48.670	43.950	9.70
道床板	7.250	6.610	8.83
隧道壁	0.021	0.019	9.52

实测与模拟隧道壁加速度分频振级对比曲线如图 7 所示。

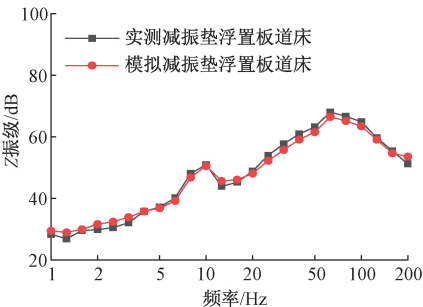


图 7 实测与模拟隧道壁加速度分频振级对比曲线
Figure 7 Comparison curves of in-situ measured and simulated frequency spectrum of acceleration levels for tunnel walls

从图 7 可以看出,数值模拟和现场实测的减振垫浮置板道床的 Z 计权 1/3 倍频程的变化趋势一致,减振垫浮置板道床的实测和模拟减振效果分别为 12.80 dB 和 12.93 dB,误差仅 1.02%,结合表 4,验证了有限元模型的准确性和采用假定的合理性。

3 动力响应分析及参数优化

3.1 动力响应分析

采用单因素分析法,分别建立有限元模型,分析扣件刚度、浮置板密度和减振垫静态模量等 3 个参数对减振垫浮置板道床的动力响应和减振效果的影响,选取 3 个工况:①工况一,固定浮置板密度 2 500 kg/m³、减振垫静态模量 0.019 N/mm³,扣件刚度分别取 2.5×10⁷、3.5×10⁷、4.5×10⁷、5.5×10⁷ N/m;②工况二,固定扣件刚度 3.5×10⁷ N/m、减振垫静态模量 0.019 N/mm³,浮置板密度分别取 2 500、2 700、2 900、3 100 kg/m³;③工况三,固定扣件刚度 3.5×10⁷ N/m,浮置板密度 2 500 kg/m³,减振垫静态模量分别取 0.019、0.025、0.046、0.100 N/mm³。

(1)扣件刚度对动力响应的影响。对于工况一,不同扣件刚度的减振垫浮置板道床各拾取测点的垂向加速度及位移峰值,见表 5。由表 5 可知,增加扣件刚度,能降低钢轨垂向加速度和位移、提高行车安全性、降低钢轨损耗、延长轨道寿命,但会增大浮置板位移和隧道壁垂向加速度,不利于减振,因此,在进行轨道减振设计时,应在确保列车安全运行的前提下,可通过适当降低扣件刚度来提高减振垫浮置板道床的减振效果。

表 5 不同扣件刚度时的动力响应
Table 5 Dynamic response with different fastener stiffness

扣件 刚度/ (10 ⁷ N·m ⁻¹)	钢轨加 速度/ (m·s ⁻²)	钢轨位 移/mm	浮置板 加速度/ (m·s ⁻²)	浮置板 位移/ mm	隧道壁 加速度/ (m·s ⁻²)
2.5	455.846	3.165	30.624	2.345	0.064
3.5	406.266	2.849	32.637	2.338	0.067
4.5	369.764	2.547	34.834	2.330	0.069
5.5	341.832	2.436	37.016	2.322	0.072

(2)浮置板密度对动力响应的影响。对于工况二,不同浮置板密度的减振垫浮置板道床的垂向加速度和位移峰值,见表 6。由表 6 可知,增加浮置板密度对钢轨和浮置板位移的影响较小,但浮置板和隧道壁的垂向振动加速度峰值却明显下降,因此,增加浮置板密度能够提高减振垫浮置板道床的减振效果。

(3)减振垫静态模量对动力响应的影响。对于工况三,不同减振垫静态模量的减振垫浮置板道床

的垂向加速度和位移峰值,见表 7。由表 7 可知,减振垫静态模量与扣件刚度对道床结构的动力响应规律基本一致,增加减振垫静态模量,可以减小钢轨的垂向加速度和位移,但会增大浮置板和隧道壁的垂向加速度,不利于减振,因此,可通过降低减振垫静态模量来提高减振垫浮置板道床的减振效果。

表 6 不同浮置板密度时的动力响应
Table 6 Dynamic response with different floating
plate densities

浮置板 密度/ (kg·m ⁻³)	钢轨加 速度/ (m·s ⁻²)	钢轨 位移/ mm	浮置板 加速度/ (m·s ⁻²)	浮置板 位移/ mm	隧道壁 加速度/ (m·s ⁻²)
2 500	406.266	2.849	32.637	2.338	0.067
2 700	408.247	2.861	29.892	2.342	0.063
2 900	411.513	2.893	25.695	2.349	0.06
3 100	415.638	2.921	22.384	2.354	0.058

表 7 不同减振垫静态模量时的动力响应
Table 7 Dynamic response with different static modulus

减振垫静 态模量/ (N·mm ⁻³)	钢轨 加速度/ (m·s ⁻²)	钢轨 位移/ mm	浮置板 加速度/ (m·s ⁻²)	浮置板 位移/ mm	隧道壁 加速度/ (m·s ⁻²)
0.019	406.266	2.849	32.637	2.338	0.067
0.025	398.752	2.53	33.781	2.157	0.07
0.046	379.824	2.316	34.904	1.983	0.076
0.100	356.343	2.187	36.365	1.861	0.084

3.2 减振垫浮置板道床参数优化

与动力响应分析相同,设置 3 个工况,减振垫浮置板道床的减振效果,见表 8。根据表 8,对于每一个工况,选取减振效果最优的参数,即扣件刚度 2.5×10⁷ N/m、减振垫静态模量 0.019 N/mm³、浮置板密度 3 100 kg/m³,组成优化参数配置方案。

表 8 各工况的减振效果
Table 8 Vibration reduction performance of various
working conditions

工况	扣件 刚度/ (10 ⁷ N·m ⁻¹)	浮置板 密度/ (kg·m ⁻³)	减振垫静 态模量/ (N·mm ⁻³)	减振 效果/ dB
一	2.5	2 500	0.019	13.17
	3.5	2 500	0.019	12.93
	4.5	2 500	0.019	12.84
	5.5	2 500	0.019	12.77
二	3.5	2 500	0.019	12.93
	3.5	2 700	0.019	12.98
	3.5	2 900	0.019	13.09
	3.5	3 100	0.019	13.19
三	3.5	2 500	0.019	12.93
	3.5	2 500	0.025	12.76
	3.5	2 500	0.046	12.64
	3.5	2 500	0.100	12.49

作为对比,车速取 70 km/h,给出了优化参数配置和常规参数配置(扣件刚度 3.5×10^7 N/m、浮置板密度 $2\,500\text{ kg/m}^3$ 、减振垫静态模量 0.019 N/mm^3)的钢轨、浮置板和隧道壁的垂向振动加速度时程曲线,如图 8 所示。从图 8 可以看出,常规参数和优化参数两种配置的浮置板道床的钢轨、浮置板和隧道壁的垂向振动加速度时程曲线变化规律基本一致,振动主要集中在 $0.7\sim2.3\text{ s}$ 的时间段内,作用时长均低于 1.6 s 。根据图 8,得到了

钢轨、道床板和隧道壁的垂向振动加速度峰值,见表 9。

从表 9 可知,相较于常规参数,采取优化参数的浮置板道床更能降低隧道壁的加速度峰值,降幅为 13.43%,即能更有效地降低隧道二次振源的能量输出,具有更好的减振效果。

车速取 70 km/h,得到了普通整体道床和优化参数配置的减振垫浮置板道床隧道壁 $1\sim200\text{ Hz}$ 内的 Z 计权 $1/3$ 倍频程变化曲线,如图 9 所示。

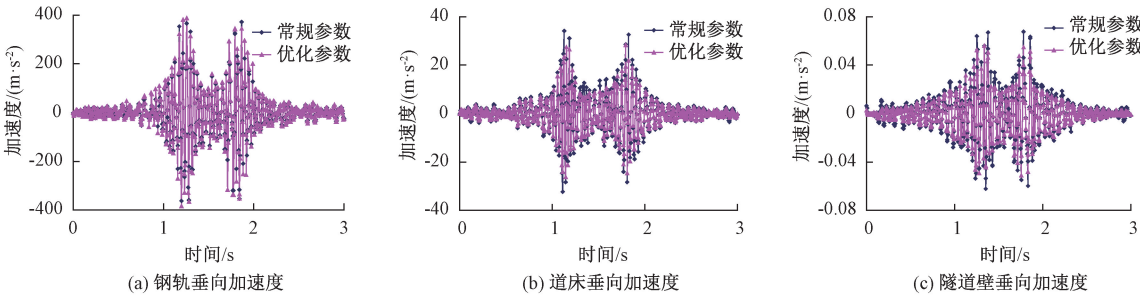


图 8 常规和优化参数两种配置的加速度时程曲线

Figure 8 Acceleration time-history curves with normal and optimized parameters

表 9 常规和优化参数两种配置的加速度峰值

Table 9 Peak acceleration with normal and optimized parameters

拾取点	加速度峰值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	
	常规参数	优化参数
钢轨	406.266	430.642
道床板	32.637	28.336
隧道壁	0.067	0.058

振垫浮置板道床的减振效果为 13.73 dB,比采取优化参数的减振效果(实测 12.80 dB、模拟 12.93 dB)分别提高 0.93 和 0.80 dB,减振效果更加理想。

4 结论

以郑州某地铁运营线路为工程实例,开展了减振垫浮置板道床减振性能的实测分析和有限元模拟,并根据单因素分析法,对减振垫浮置板道床进行了参数优化,主要结论如下。

(1)根据实测动力信号分析得出,相较于普通整体道床,采用常规参数配置的减振垫浮置板道床具有优良的减振效果,可达 12.80 dB。

(2)通过动力响应分析得出,在保证系统满足地铁列车安全运行的前提下,适当减小扣件刚度、增加浮置板的密度、减小减振垫静态模量,能够提高减振垫浮置板道床的减振效果。

(3)提出了减振垫浮置板道床优化配置方案:扣件刚度 2.5×10^7 N/m、减振垫静态模量 0.019 N/mm^3 、浮置板密度 $3\,100\text{ kg/m}^3$,相较于普通整体道床,减振效果可达 13.73 dB,高于常规参数配置的减振垫浮置板道床的 12.80 dB,具有更加优良的减振效果。

参考文献:

[1] He Jianci, Wang Ping, Tang Jian, et al. Analysis of vi-

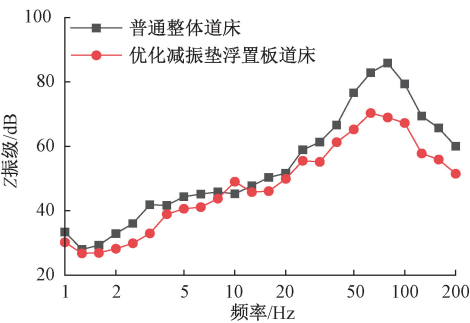


图 9 优化减振垫浮置板道床和普通整体道床的隧道壁加速度分频振级对比曲线

Figure 9 Comparison curves of frequency spectrum of acceleration levels for tunnel walls with optimized damping pad floating slab track bed and ordinary integral track bed

从图 9 可以看出,采用优化参数后的减振垫浮置板道床显著降低了 $1\sim8\text{ Hz}$ 以及 $12.5\sim200\text{ Hz}$ 频率区间的 Z 级振动,尽管在 10 Hz 附近仍存在共振现象,但已从图 3 的 4.68 dB 减弱至 3.74 dB, $1\sim200\text{ Hz}$ 内的 ΔL_a 为 13.73 dB,即采用优化参数的减

bration control effects of floating slabs with polyurethane damping pad and rubber damping pad [J]. Railway Standard Design, 2018, 62(2): 57–61. [何鉴辞, 王平, 唐剑, 等. 聚氨酯减振垫与橡胶减振垫浮置板轨道振动控制效果分析[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(2): 57–61.]

[2] Zhang Shengyan. Study on driving safety and vibration reduction performance of track slabs with damping pads in curve section of metro line [J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(7): 130–134. [张生延. 地铁线路曲线段减振垫轨道板行车安全及减振性能研究[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(7): 130–134.]

[3] Pu Qianhua, Wei Kai, He Tianlong, et al. Combined vibration reduction effect of sleeper pad and ballast pad in metro depot [J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(23): 20–29. [蒲前华, 韦凯, 贺天龙, 等. 地铁车辆段轨枕垫与道砟垫组合减振效果研究[J]. 振动与冲击, 2024, 43(23): 20–29.]

[4] Wang Liangshan. Research on vibration characteristics and secondary noise propagation law of buildings in subway overhead development [J]. Construction Technology, 2025, 54(22): 6–11. [王良山. 地铁上盖开发建筑群振动特性及二次噪声传播规律研究[J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(22): 6–11.]

[5] Feng Qingsong, Sun Kui. Dynamic analysis of vibration-reduction pad floating slab track transition section on urban express line [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2022, 39(3): 40–45. [冯青松, 孙魁. 市域快线减振垫浮置板轨道过渡段动力学分析[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(3): 40–45.]

[6] Ren Juanjuan, Luo Lei, Zhang Yichi, et al. Vibration damping characteristics of floating slab track with different damping pad stiffness in a 160 km/h subway [J]. Noise and Vibration Control, 2025, 45(2): 151–156. [任娟娟, 罗磊, 张亦弛, 等. 160 km/h 地铁不同减振垫刚度下浮置板轨道减振特性[J]. 噪声与振动控制, 2025, 45(2): 151–156.]

[7] Wang Qihao, Cai Xiaopei, Chang Wenhao, et al. Dynamic simulation of rubber floating slab track based on the hyperelastic constitutive model of vibration isolation pad [J]. China Railway Science, 2023, 44(1): 87–96. [王启好, 蔡小培, 常文浩, 等. 基于超弹性本构模型的橡胶浮置板轨道动力仿真[J]. 中国铁道科学, 2023, 44(1): 87–96.]

[8] Wang Menglin, Chen Xianmai. Study on damping parameters of floating plate track with polyurethane damping [J]. Railway Engineering, 2022, 62(10): 51–54. [王梦林, 陈宪麦. 聚氨酯减振浮置板轨道结构减振参数研究[J]. 铁道建筑, 2022, 62(10): 51–54.]

[9] Li Minghang, Wang Wenbin, Wu Zongzhen, et al. The influence of wheel-rail excitation on the vibration reduction effect of rubber pad floating slab track [J]. China Railway Science, 2024, 45(2): 30–40. [李明航, 王文斌, 吴宗臻, 等. 轮轨激励对橡胶垫浮置板轨道减振效果的影响[J]. 中国铁道科学, 2024, 45(2): 30–40.]

[10] Li Qiuyi, Luo Wei. Service performance evaluation of rubber floating slab track for metro in operation [M]//Proceedings of the 2nd international conference on innovative solutions in hydropower engineering and civil engineering. Singapore: Springer, 2023: 111–123.

[11] Liu Xiangming, Zhao Chongji, Jiang Huihuang, et al. Design and vibration characteristics of floating slab track with semi-laid damping pad on both sides [J]. Railway Engineering, 2023, 63(3): 40–44. [刘向明, 赵崇基, 江辉煌, 等. 两侧半铺减振垫浮置板轨道设计及振动特性研究[J]. 铁道建筑, 2023, 63(3): 40–44.]

[12] He Wei, Zou Chao, Pang Yutao, et al. Environmental noise and vibration characteristics of rubber-spring floating slab track [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(11): 13671–13689.

[13] Xu Xiaotang, Li Huichao, Hong Yu, et al. Dynamics and experimental study on prefabricated damping pad floating slab track [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2024, 44(6): 12–22. [许孝堂, 李会超, 洪彧, 等. 预制式减振垫浮置道床动力学及试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2024, 44(6): 12–22.]

[14] Chen Zhaowei, Zhang Hanbo, Pu Qianhua, et al. Vibration reduction performance of a novel harmonic frequency damping device for damping pad floating slab track [J]. Buildings, 2024, 14(12): 3976.

[15] Zhang Haodi, He Yuanpeng, Wang Xinghuan, et al. Optimal matching for vibration reduction of parameters of track fastener and rubber absorber of metro [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(6): 2382–2392. [张皓迪, 何远鹏, 王星欢, 等. 地铁轨道扣件和减振垫参数的减振性能最优匹配[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(6): 2382–2392.]

[16] GB 50868—2013 建筑工程容许振动标准[S].

[17] Yuan Yang. Study on artificial single-point pulse excitations method for prediction of metro train-induced environmental vibration [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014. [袁扬. 地铁列车振动环境响应预测的人工单点列脉冲激励方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.]

[18] CJJ/T 191—2012 浮置板轨道技术规范[S].

[19] Xu Ping, Li Xifeng, Zhang Wenyue. Dynamic response analysis of short-distance vertical overlapping subway shield tunnels [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2023, 45(5): 1008-1016. [徐平, 李西峰, 张文跃. 近距离垂直交叠地铁盾构隧道的动力响应分析 [J]. 地震工程学报, 2023, 45(5): 1008-1016.]

[20] Zheng Mingjun, Wang Wenjing, Chen Zhengnan, et al. Determination for mechanical constants of rubber Mooney-Rivlin model [J]. China Rubber Industry, 2003, 50(8): 462-465. [郑明军, 王文静, 陈政南, 等. 橡胶 Mooney-Rivlin 模型力学性能常数的确定 [J]. 橡胶工业, 2003, 50(8): 462-465.]

[21] Gao Liang, Zhong Yanglong, Liang Shujuan, et al. Analysis of vibration magnification effect of floating slab track under vertical bending vibration mode [J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(8): 114-121. [高亮, 钟阳龙, 梁淑娟, 等. 浮置式轨道在垂向弯曲振动模式下的振动放大效应研究 [J]. 铁道学报, 2017, 39(8): 114-121.]

[22] Yin Xiaochun, Lu Yaohui, Zhao Hongxing, et al. Numerical analysis method for dynamic air tightness value of high-speed train [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2022, 43(5): 52-58. [尹小春, 卢耀辉, 赵宏星, 等. 隧道工况下高速列车动态气密性数值分析方法 [J]. 郑州大学学报 (工学版), 2022, 43(5): 52-58.]

[23] Liang Bo, Luo Hong, Sun Changxin. Simulated study on vibration load of high speed railway [J]. Journal of the China Railway Society, 2006, 28(4): 89-94. [梁波, 罗红, 孙常新. 高速铁路振动荷载的模拟研究 [J]. 铁道学报, 2006, 28(4): 89-94.]

Vibration Reduction Performance and Parameter Optimization of
Damping Pad Floating Slab Track Bed

XU Ping¹, LIU Xiangming², ZHANG Wenyue¹, YANG Yanfeng³, HAN Yuewang⁴

(1. School of Water and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. China Academy of Railway Sciences (Shenzhen) Research and Design Institute Co., Ltd. Shenzhen 518050, China; 3. China Academy of Railway Sciences Co., Ltd., Beijing 100081, China; 4. Zhengzhou Metro Co., Ltd., Zhengzhou 450054, China)

Abstract: The problem of environmental vibration and secondary structural noise caused by subway train operation along the line is becoming increasingly prominent, and so it is necessary to carry out the optimization research on vibration reduction performance of damping pad floating slab track bed. Firstly, One operating metro line of Zhengzhou was selected as an engineering example, and the vibration signals of ordinary integral track bed and damping pad floating slab track bed were in-situ tested, the Z-weighted vibration acceleration levels were obtained with 1/3 octave spectrum analysis, and the damping pad floating slab had better vibration reduction performance compared to ordinary integral track bed, which could reach 12.80 dB. Secondly, The simulation model of damping pad floating slab track bed-tunnel-soil was established with ABAQUS software. The accuracy of the model and rationality of assumption were verified compared with measured data, the single factor analysis method was adopted. The results showed that: by appropriately reducing the vertical stiffness of the fasteners, increasing the density of the floating slab and reducing the static modulus of the damping pad vibration reduction performance of the damping pad floating slab track bed can be improved. Finally, an optimized combination scheme for damping pad floating slab track bed was proposed for parameters such as fastener stiffness, static modulus of vibration damping pad and floating slab density. The optimized damping pad floating slab track bed could achieve better vibration reduction performance with comparative analysis through finite element simulation.

Keywords: damping pad; floating slab; vibration reduction performance; parameter optimization; FEM simulation; dynamic response