

既有线浮置板隔振系统减振及疲劳性能试验研究

王瑞吉¹, 余华丽¹, 田志勇^{1,2}, 李超华¹, 黄文波¹, 廖玉杰¹

(1. 四川交大工程检测咨询有限公司, 成都 611730; 2. 西南交通大学结构工程试验中心, 成都 610031)

摘 要: 为研究既有线浮置板系统中钢弹簧隔振器的减振与疲劳性能, 以运营 8 年后的重庆轨道交通 1 号线浮置板系统为背景, 通过现场试验及疲劳试验, 评价其持续服役能力。首先, 通过列车激励振动试验, 测试分析当前浮置板系统的自振频率、阻尼比; 然后, 对浮置板轨道及普通轨道进行减振性能试验, 对比浮置板轨道及普通轨道的减振效果; 最后, 取出钢弹簧隔振器开展疲劳试验, 研究隔振器刚度、阻尼比、高度随疲劳加载的变化规律。结果表明: 当前浮置板系统的自振频率和阻尼比均处于合理范围; 与普通轨道相比, 浮置板轨道通过提高自身的垂向加速度, 吸收大量的振动能量, 降低地铁行车对环境的振动干扰, 减振性能满足要求; 300 万次疲劳加载中, 隔振器的刚度、阻尼比、高度的变化量均低于规范限值, 钢弹簧和套筒焊缝未见裂纹, 阻尼材料未出现溢出渗漏现象。综合评价, 该浮置板系统减振和疲劳性能在运营 8 年后依然满足设计要求, 可继续服役并具备较长的使用寿命。

关键词: 城市轨道交通; 浮置板隔振系统; 减振性能; 疲劳试验

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2026)03-0134-07

Experimental Study on the Vibration Isolation and Fatigue Performance of the Floating Slab Isolation Systems for Existing Subway Lines

WANG Ruiji¹, YU Huali¹, TIAN Zhiyong^{1,2}, LI Chaohua¹, HUANG Wenbo¹, LIAO Yujie¹

(1. Sichuan Jiada Engineering Detection & Consulting Co., Ltd., Chengdu 611730;

2. Test Center of Structural Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

Abstract: To investigate the vibration isolation and fatigue performance of steel spring isolators in floating slab systems for existing subway lines, this study evaluates their long-term service capability through field tests and fatigue tests, using the floating slab system of Chongqing Metro Line 1—which has been in operation for eight years—as a case study. First, train-induced vibration tests were conducted to measure and analyze the natural frequency and damping ratio of the current floating slab system. Next, vibration reduction performance tests were performed on both the floating slab track and conventional track to compare their vibration reduction effects. Finally, a steel spring isolator was removed for fatigue testing to investigate how the isolator stiffness, damping ratio, and height changed under fatigue loading. Results indicate that the natural frequency and damping ratio of the current floating slab system remain within reasonable ranges. Compared to conventional tracks, the floating slab track absorbs substantial vibration energy by increasing its own vertical acceleration, thereby reducing vibration interference

收稿日期: 2025-09-10 修回日期: 2025-12-24

第一作者: 王瑞吉, 男, 硕士, 高级工程师, 从事多尺度结构行为模拟与智能检测技术研究, stduwj@163.com

通信作者: 余华丽, 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事桥梁检测、运营健康监测、结构事故鉴定, 279004047@qq.com

基金项目: 四川省科技计划项目(2021GFW020)

引用格式: 王瑞吉, 余华丽, 田志勇, 等. 既有线浮置板隔振系统减振及疲劳性能试验研究[J]. 都市轨道交通, 2026, 39(3): 134–140.

Wang Ruiji, Yu Huali, Tian Zhiyong, et al. Experimental study on the vibration isolation and fatigue performance of the floating slab isolation systems for existing subway lines[J]. Urban rapid rail transit, 2026, 39(3): 134–140.

from subway operations to the environment and meeting vibration reduction requirements. During 3 million fatigue cycles, changes in the isolator stiffness, damping ratio, and height remained below specification limits. No cracks were observed in the steel springs or sleeve welds, and no leakage occurred in the damping material. A comprehensive evaluation indicates that the mechanical and vibration damping performance of this floating slab system continues to meet design requirements, suggesting that the system can remain in service and has a long service life.

Keywords: urban rail transit; floating slab vibration isolation system; vibration reduction performance; fatigue testing

地铁运营极大地缓解了城市的交通压力。然而,地铁内行车会产生剧烈振动,进而对周边环境产生较大干扰。在减振要求高的地铁通行区域,常采用浮置板系统作为缓冲部件,以降低列车振动对环境的影响^[1-2]。然而随着运营时间推移,浮置板会不可避免地产生开裂和破损等病害,隔振系统的老化也有可能在一定程度上影响地铁线路的减振效果^[3-5]。因此针对既有浮置板系统减振与疲劳性能、使用寿命展开研究,评价浮置板的减振性能和使用寿命,对提升地铁交通的适用性具有极为重要的意义。

当前针对既有地铁浮置板系统的力学行为,国内学者展开大量的研究工作。巫江等^[6]针对隔振器失效判别,提出一种基于深度残差网的自动检测方法,该方法通过分析结构动力响应判定隔振器的工作状态,为浮置板的智能运维奠定基础。贺利工等^[7]研究手性超结构隔振器浮置板系统的减振性能,结果表明,该系统可将振动垂向位移降低 11.5%。任娟娟等^[8]基于 160 km/h 时速地铁,对不同减振垫及刚度下轨道结构的动力特性及减振特性进行研究,结果表明,降低减振垫刚度有助于提升结构减振效果,减振垫的最佳面刚度介于 0.012~0.024 N/mm³。李明航等^[9]采用普通道床和橡胶垫浮置板轨道进行对比研究,引入车轮激励参数,提出不同频段的激励原理与浮置板减振性能评价结果紧密相关。陆晨旭等^[10]针对钢弹簧失效现象,建立考虑钢弹簧失效的浮置板模型,研究其对系统动力性能及浮置板减振效果的影响,发现浮置板轨道系统中,钢弹簧失效将导致低频振动(0~20 Hz)产生放大现象。高扬等^[11]研究提出一种基于附加位移放大杠杆的浮置板隔振系统,并通过试验和有限元分析,验证该系统的减振效果。黄俊飞等^[12]基于某地铁线路隧道,研究隧道内钢弹簧浮置板的减振特性,结果表明,重量级和中量级浮置板的减振差异为 5.3 dB。靳永福等^[13]采用不同车辆参数对减振扣件及钢弹簧浮置板路段进行振动测试研究,提出地铁小半径曲线区域内的振动特性,发现相较于压缩型减振扣件,钢弹簧浮置板具有更好的减振性能。石培泽^[14]针对钢

轨嵌入式钢弹簧浮置板,提出结构设计方案,并研究钢轨支承形式及轨下连续支承参数对轨道结构减振性能的影响。

分析国内研究现状可得,针对地铁浮置板系统的力学行为,既有研究聚焦于隔振器的减振性能研究,提出多种检测和分析方法,为浮置板系统的减振效果评价提供重要的参考依据。此外,钢弹簧隔振器的疲劳性能对浮置板系统使用寿命的影响较为重要。然而,当前统筹考虑力学、减振性能和疲劳试验的浮置板系统全寿命研究还比较少,钢弹簧隔振器的长期性能还有待进一步探索。因此,有必要对地铁钢弹簧浮置板的服役性能和疲劳行为展开全面的检测和试验研究,从而为隔振系统的设计和施工提供全方位反馈,在较大程度上提升地铁运维的适用性和效率。

基于上述分析,本文以重庆市轨道交通 1 号线钢弹簧浮置板隔振系统为背景展开研究,该隔振系统已经运营 8 年,浮置板表面出现破损病害。为了研究该系统当前的力学与减振性能,采用现场试验的方法,掌握结构的损伤和振动传递特征,量化并评价系统的减振效果。在此基础上,将系统的核心部件(钢弹簧隔振器)从浮置板中拆出,移送至试验室进行 300 万次疲劳加载,量化并评价隔振器的疲劳性能。本文定量展示钢弹簧浮置板的全寿命力学行为变化规律,研究结果可为地铁隔振系统的设计、施工、运维管养的优化和升级提供依据,也可为同类减隔振工程提供参考。

1 工程概况

为提高地铁系统自身的减振能力,重庆市轨道交通 1 号线采用浮置板隔振系统,在轨道下方布置钢弹簧隔振器,如图 1~2 所示。隔振器由钢弹簧、阻尼材料、阻尼套筒和上下支撑组件构成,其与道床板一起构成浮置板隔振系统。浮置板之间设置剪力铰,用于加强板之间的变形协调。地铁运营过程中,列车振动通过钢轨传递至浮置板,在隔振系统内部弹簧和阻尼的缓冲下,振动效应得以削弱。该地铁线路采用 B 型车,6 辆编组,设计最高速度为 100 km/h,设计轴重为 140 kN;轨距为 1.435 m,轨底坡 1/30,扣件基

本间距 625 mm; 道床板宽 3.08 m, 厚 0.42 m, 标准长度 25 m, 采用 C40 混凝土, 内置 HRB400 级钢筋。地铁线路运营 8 年后, 浮置板表面出现局部开裂、破损等病害。为量化该隔振系统当前的力学性能、减振性能及后期使用寿命, 对其进行全面现场试验和疲劳试验, 并基于实验结果综合评价隔振系统的整体适用性。

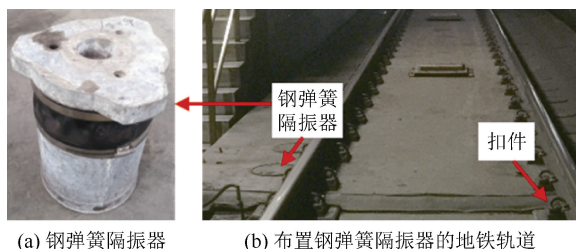


图 1 地铁轨道及其下方的钢弹簧隔振器

Figure 1 Subway tracks and a steel spring isolator beneath them

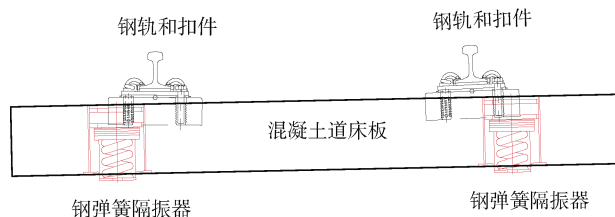


图 2 钢弹簧浮置板隔振系统

Figure 2 Steel spring floating slab vibration isolation system

2 力学与减振性能试验

2.1 力学与减振性能试验方案

为了掌握浮置板隔振系统当前的力学性能和减振性能, 对其进行现场试验测试: 浮置板系统的损伤检测; 浮置板系统的自振频率和阻尼比测试; 减振性能对比测试, 选取线路条件、钢轨和扣件类型与钢弹簧浮置板轨道相同或相似的普通地铁轨道作为参照系, 分别测试浮置板系统和普通轨道的振动效应, 对比量化浮置板系统的减振效果。振动效应测试参数包括钢轨垂向振动加速度、道床板垂向振动加速度、隧道壁垂向振动加速度、隧道壁横向振动加速度, 测点布置见图 3。《浮置板轨道技术规范》(CJJ/T 191—2012)^[15]规定, 与普通轨道相比, 浮置板系统的减振指标分频振级均方根的差值 ΔL_a 和分频振级的最大差值 $\Delta L_{\max}$ 应能达到 10 dB 及以上。

浮置板系统与普通轨道分频振级均方根的差值 ΔL_a 的计算式为:

$$\Delta L_a = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^n 10^{\frac{VL_q(i)}{10}} \right) - 10 \lg \left(\sum_{i=1}^n 10^{\frac{VL_h(i)}{10}} \right) \quad (1)$$

式中, $VL_q(i)$ 为普通道床轨旁测点垂向振动加速度在 1/3 倍频程第 i 个中心频率的分频振级, dB; $VL_h(i)$ 为浮置板系统轨旁垂向振动加速度在 1/3 倍频程第 i 个中心频率的分频振级, dB。

浮置板系统与普通轨道分频振级的最大差值 $\Delta L_{\max}$ 的计算式为:

$$\Delta L_{\max} = \max_{i=1 \rightarrow n} [VL_q(i) - VL_h(i)] \quad (2)$$

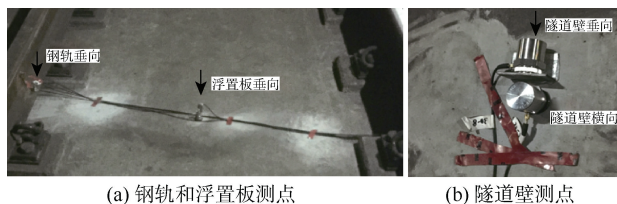


图 3 振动测点布置

Figure 3 Arrangement of vibration measurement points

2.2 力学与减振性能试验结果

浮置板系统损伤检测结果表明: 浮置板系统剪力铰工作状态正常; 钢弹簧隔振器顶面局部存在轻微锈蚀, 但无破损和开裂病害, 工作状态良好; 浮置板系统排水正常; 部分浮置板密封条局部开裂、破损; 部分浮置板横向开裂(宽度 0.04~0.12 mm), 据裂缝特征和分布判断, 其属于非结构性裂缝。综上, 虽然密封条及轨道板存在开裂破损问题, 但浮置板系统整体工作状态良好。

现场列车通过后, 测试浮置板的衰减振动, 据此分析浮置板的自振频率和阻尼比。自振频率测试结果见图 4, 系统固有频率值为 13.125 Hz, 满足规范^[15]中规定的固有频率范围 6~16 Hz。采用半功率带宽法计算得到浮置板的阻尼比为 6.25%, 满足规范^[15]规定的阻尼比不应小于 5%。

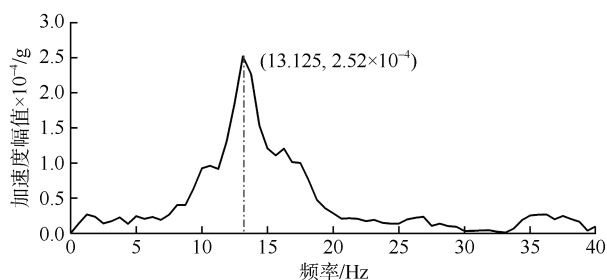


图 4 浮置板振动频率测试结果

Figure 4 Test results for the vibration frequency of floating slabs

浮置板系统的振动传递路径为: 钢轨→浮置板→隧道壁。与之相比, 普通轨道板系统的振动传递路径

则为：钢轨→普通道床板→隧道壁。在相近的列车通行条件下，浮置板系统和普通轨道板系统的振动响应实测结果见图5~6。对比可以发现，两个系统的钢轨垂向振动加速度较为接近，但钢弹簧隔振器通过提高浮置板的垂向加速度，吸收大量的振动能量，从而降低隧道壁的振动；普通道床板的振动加速度相对较小，将大量的振动能量传递至隧道壁，致使隧道壁振动加速度较高，如图6所示。因此可以得出，钢弹簧浮置板系统有效减轻列车振动对周边环境的影响。

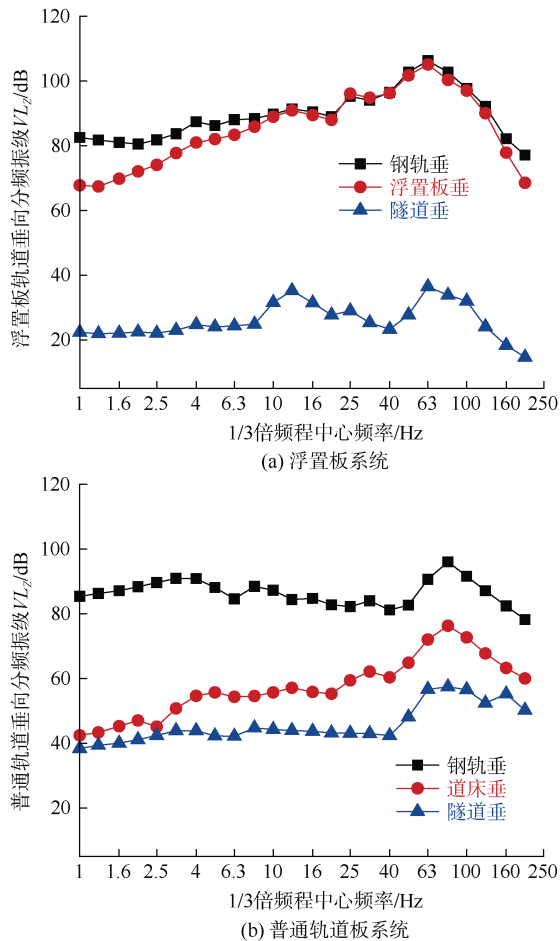


图5 普通道板和浮置板的振动响应

Figure 5 Vibration responses of conventional track slabs and floating slabs

为进一步量化钢弹簧浮置板的减振效果，以测试结果表1为基础，根据式(1)和式(2)计算得到分频振级均方根的差值 ΔL_a 为12.322 dB，分频振级的最大差值 $\Delta L_{\max}$ 为28.275 dB，如表1所示。可见 ΔL_a 和 $\Delta L_{\max}$ 的量值均高于10 dB，满足规范^[15]中减振要求。综上所述，该钢弹簧隔振器浮置板系统的运营状况较好，有效降低列车通行带来的振动干扰。

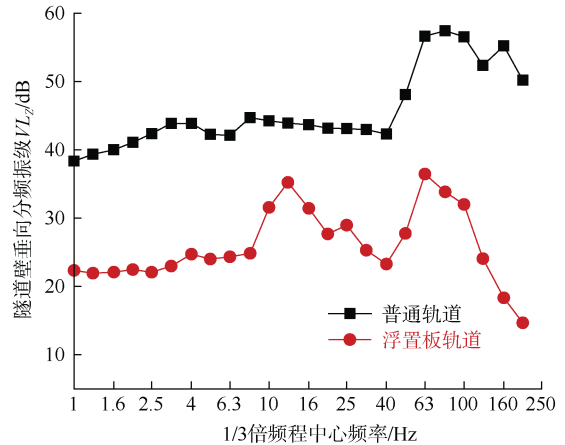


图6 普通道板和浮置板的隧道壁垂向分频振级对比

Figure 6 Comparison of vertical frequency-band vibration levels on tunnel walls between conventional track slabs and floating slabs

表1 钢弹簧浮置板的减振测试结果

Table 1 Vibration reduction test and analysis results of the steel-spring floating slab

中心频率/ Hz	分频振级/dB		中心频率/ Hz	分频振级/dB	
	$VL_q(i)$	$VL_b(i)$		$VL_q(i)$	$VL_b(i)$
1	38.3153	22.2904	16	43.6768	31.3758
1.25	39.3048	21.9342	20	43.1566	27.6738
1.6	39.9665	22.0030	25	43.0323	28.9509
2	41.0775	22.4057	31.5	42.9642	25.2775
2.5	42.3686	22.0016	40	42.2678	23.2505
3.15	43.8206	22.9201	50	48.0309	27.7346
4	43.8136	24.6620	63	56.5955	36.4018
5	42.2061	23.9494	80	57.3695	33.8359
6.3	42.1097	24.2688	100	56.5296	31.9838
8	44.6690	24.7989	125	52.3269	24.0567
10	44.2496	31.5060	160	55.2164	18.2794
12.5	43.8691	35.2068	200	50.1669	14.6291

3 疲劳试验

钢弹簧隔振器是该浮置板系统的核心部件，为了进一步研究浮置板系统后期的使用寿命，在地铁现场随机抽取钢弹簧隔振器样本，并移送至试验室进行疲劳试验。

3.1 疲劳试验方案

疲劳试验装置见图7，隔振器置于支撑装置上方，疲劳试验机与隔振器顶面接触并进行疲劳加载。采用位移控制加载进程，根据实际运营状况制定疲劳幅。疲劳下限位移为隔振器在无列车通行时的位移量(3 mm)，

上限位移对应隔振器在线路正常运营时的位移量(7 mm)。疲劳加载频率为 4 Hz，根据设计情况，确定疲劳加载次数为 300 万次。试验期间，当疲劳次数达到 1 万、10 万、20 万、50 万、100 万、200 万、300 万次时，根据《振动与冲击隔振器静、动态性能测试方法》(GB/T 15168—2013)^[16]测试隔振器的静刚度 K 、阻尼比 ξ 、高度 h ，并检查弹簧和套筒焊缝的开裂情况以及阻尼材料的溢出情况。



图 7 疲劳试验装置
Figure 7 Fatigue testing apparatus

3.2 疲劳试验结果

疲劳试验过程中，隔振器的刚度、阻尼比、高度变化规律见图 8，结果见表 2。计算隔振器的刚度变化率 ΔK 、阻尼比变化率 $\Delta \xi$ 以及高度变化率 Δh ，计算式分别为：

$$\Delta K = \frac{K_{300} - K_0}{K_0} \times 100\% \tag{3}$$

$$\Delta \xi = \frac{\xi_{300} - \xi_0}{\xi_0} \times 100\% \tag{4}$$

$$\Delta h = h_{300} - h_0 \tag{5}$$

式中， K_{300} 为隔振器在 300 万次疲劳加载后的刚度值，kN/mm； K_0 为隔振器在疲劳加载前的刚度值，kN/mm； ξ_{300} 为隔振器在 300 万次疲劳加载后的阻尼比； ξ_0 为隔振器在疲劳加载前的阻尼比； h_{300} 为隔振器在 300 万次疲劳加载后的高度值，mm； h_0 为隔振器在疲劳加载前的高度值，mm。

《浮置板轨道技术规范》(CJJ/T 191—2012)^[15]和《螺旋弹簧疲劳试验规范》(GB/T 16947—2009)^[17]规定，疲劳试验过程中，隔振器的螺旋钢弹簧不得出现目视裂纹，液态阻尼物质不得外溢，隔振器刚度变化与阻尼变化均不应大于 10%，高度变化应小于 2 mm。根据图 8 和表 2 可得，隔振器在经历 300 万次疲劳加

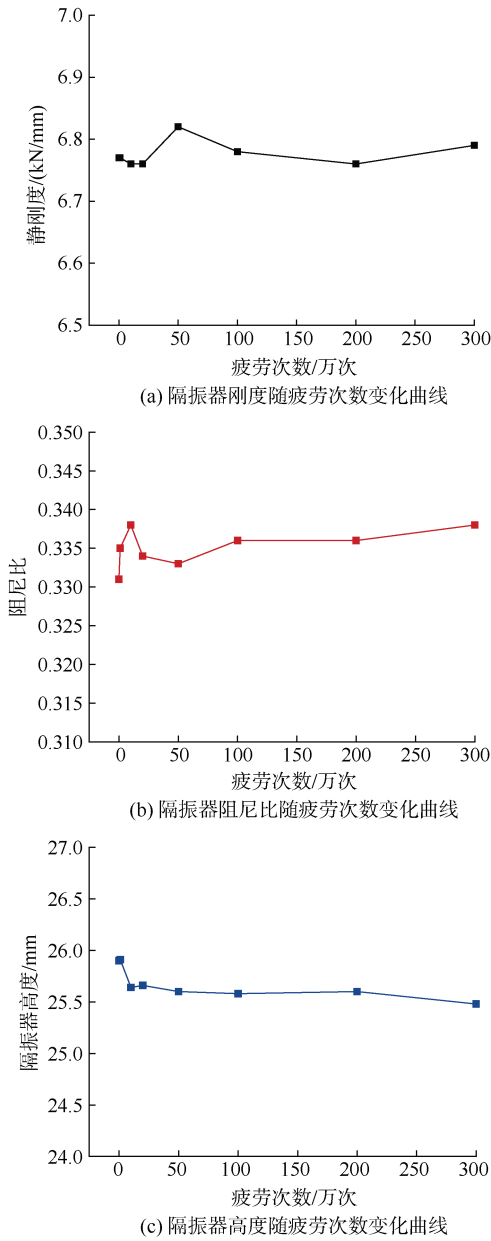


图 8 隔振器疲劳试验结果
Figure 8 Fatigue test results of the vibration isolator

表 2 隔振器的刚度、阻尼比、高度变化评价结果
Table 2 Evaluation of stiffness, damping ratio, and height variation of the vibration isolator

检测结果	规范要求	测试结果	评价
刚度变化率 $\Delta K/\%$	≤ 10	0.30	合格
阻尼比变化率 $\Delta \xi/\%$	≤ 10	2.0	合格
高度变化 $\Delta h/\text{mm}$	< 2	0.42	合格

载后，其刚度、阻尼比、高度变化均低于规范限值，疲劳后隔振器的钢弹簧和套筒焊缝未见裂纹，隔振器的阻尼材料也未出现溢出渗漏现象。因此，隔振

器的疲劳性能满足要求,可继续服役并具备较长的使用寿命。

4 结语

针对地铁轨道钢弹簧浮置板隔振系统开展试验测试,研究系统的减振与疲劳性能,评价隔振器的持续服役能力,得出以下结论:

1) 钢弹簧浮置板系统在运营 8 年后,除局部区域破损外,其他重要指标(固有振动频率、阻尼比、减振性能)依然能够满足设计要求。

2) 与普通轨道板相比,钢弹簧隔振器通过提高浮置板的垂向加速度,吸收大量的振动能量,降低隧道壁的振动,减轻列车振动对周边环境的影响。

3) 经历 300 万次疲劳加载后,钢弹簧隔振器未见裂纹,其阻尼材料也未出现溢出渗漏现象,刚度、阻尼比和高度变化均处于合理范围内,表明该隔振器可继续服役并具备较长的使用寿命。

在本文研究的基础上,有必要及时修复浮置板的局部破损区域,并针对钢弹簧隔振器支撑下的行车舒适性展开研究与评价,从而为减振系统的大范围推广奠定基础,在更大程度上提升地铁交通的适用性。

参考文献

- [1] 尹学军, 兰慧峰, 李会超, 等. 多等级减振预制道床减振效果及振动位移研究[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(6): 75-81.
Yin Xuejun, Lan Huifeng, Li Huichao, et al. Vibration reduction effect and displacement in multi-level vibration reduction prefabricated track bed[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(6): 75-81.
- [2] 谢玉梅, 贺玉龙, 徐鸿, 等. 成都市域快轨减振措施效果分析[J]. 都市快轨交通, 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.
- [3] 刘天正, 陈嘉梁, 邹超, 等. 地铁激励下筏板基础建筑振动响应实测与预测模型研究[J]. 噪声与振动控制, 2025, 45(4): 252-258.

- Liu Tianzheng, Chen Jialiang, Zou Chao, et al. Measurement and prediction of raft foundation building vibration under the excitation of metro train operation[J]. Noise and vibration control, 2025, 45(4): 252-258.
- [4] 冯青松, 齐英睿, 周涛, 等. 地铁环境振动对精密仪器影响的预测与分析[J]. 噪声与振动控制, 2025, 45(2): 185-190.
Feng Qingsong, Qi Yingrui, Zhou Tao, et al. Prediction and analysis of the influence of subway environmental vibration on precision instruments[J]. Noise and vibration control, 2025, 45(2): 185-190.
- [5] 李海琼, 谢伟平. 地铁运行引起的结构振动及二次噪声研究[J]. 武汉理工大学学报, 2025, 47(5): 8-14.
Li Haiqiong, Xie Weiping. Study on structural vibration and secondary noise induced by subway operations[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2025, 47(5): 8-14.
- [6] 巫江, 卢宁, 庞玲, 等. 基于结构振动响应的长型浮置板轨道隔振器失效检测方法[J]. 铁道建筑, 2024, 64(6): 63-70.
Wu Jiang, Lu Ning, Pang Ling, et al. Failure detection method of vibration isolator of long-size floating slab track based on structure vibration response[J]. Railway engineering, 2024, 64(6): 63-70.
- [7] 贺利工, 赵才友, 刘文武, 等. 手性超结构隔振器浮置板轨道系统减振特性研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(22): 248-255.
He Ligong, Zhao Caiyou, Liu Wenwu, et al. Vibration reduction characteristics of the floating slab track system with a chiral superstructure vibration isolator[J]. Journal of vibration and shock, 2023, 42(22): 248-255.
- [8] 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.
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.
- [9] 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.
- 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.
- [10] 陆晨旭, 时瑾, 郭中光. 钢弹簧失效组合对浮置板轨道动力性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(12): 4503-4513.
- Lu Chenxu, Shi Jin, Guo Zhongguang. Influence of steel spring failure combination on dynamic performance of floating slab track[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(12): 4503-4513.
- [11] 高扬, 张强, 刘文光, 等. 新型钢弹簧浮置板道床隔振试验与数值分析研究[J]. 世界地震工程, 2020, 36(3): 38-47.
- Gao Yang, Zhang Qiang, Liu Wenguang, et al. Vibration isolation test and numerical analysis of a new type of steel spring floating slab track[J]. World earthquake engineering, 2020, 36(3): 38-47.
- [12] 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.
- Huang Junfei, Qin Jialiang. On-site measurement and analysis of vibration reduction effect of steel spring floating slab track in metro tunnel[J]. Urban mass transit, 2020, 23(1): 83-86.
- [13] 靳永福, 傅荣, 查国涛, 等. 地铁小半径曲线地段钢弹簧浮置板轨道振动特性测试及分析[J]. 铁道建筑, 2020, 60(12): 126-129.
- Jin Yongfu, Fu Rong, Zha Guotao, et al. Test and analysis on vibration characteristics of steel spring floating slab track in small radius curve section of metro[J]. Railway engineering, 2020, 60(12): 126-129.
- [14] 石培泽. 钢轨嵌入式钢弹簧浮置板轨道减振性能分析[J]. 铁道建筑, 2019, 59(10): 114-118.
- Shi Peize. Analysis of vibration reduction performance of rail embedded steel spring floating slab track[J]. Railway engineering, 2019, 59(10): 114-118.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 浮置板轨道技术规范: CJJ/T 191—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for floating slab track: CJJ/T 191—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.
- [16] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 振动与冲击隔离器静、动态性能测试方法: GB/T 15168—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Vibration and shock isolators measuring method for its static and dynamic characteristics: GB/T 15168—2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [17] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 螺旋弹簧疲劳试验规范: GB/T 16947—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Helical spring fatigue testing standard: GB/T 16947—2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.

(编辑: 傅依萱)