

市域铁路车辆状态对隧道振动的影响机制

孙 魁¹, 农兴中¹, 冯青松²

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 广州 510010;

2. 华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室, 南昌 330013)

摘 要: 为研究市域铁路车辆状态对轮轨系统振动的影响, 建立车辆-轨道-隧道垂向耦合动力学模型, 分析行车速度、列车载客量、轮对质量和车轮多边形对车辆、轨道和隧道振动响应的影响机制。研究表明: 随着列车运行速度由 100 km/h 提升至 160 km/h, 隧道振动源强相应从 68.05 dB 上升至 72.06 dB; 随着列车载客量的增加, 车辆垂向平稳性指标逐渐减小, 轮轨垂向力、钢轨垂向位移、钢轨垂向加速度、钢轨最大 Z 振级和隧道垂向位移逐渐增加, 隧道的垂向加速度和最大 Z 振级基本保持不变; 列车载客量主要影响 10 Hz 以下频率范围内的隧道振动响应, 在 10 Hz 以上频率范围内, 隧道振动响应主要由轮轨不平顺控制, 导致空载、满载和超载 3 种工况下隧道加速度级无显著差异; 增加轮对质量会导致钢轨和隧道的最大 Z 振级增加; 在车辆的日常养护维修过程中, 要避免车轮多边形激励频率与轮轨系统 P2 共振频率出现重合现象。

关键词: 市域铁路; 振动源强; 行车速度; 列车载客量; 车轮多边形

中图分类号: U211.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2026)01-0124-06

Influence Mechanism of Suburban Railway Vehicle Conditions on Tunnel Vibration Source Strength

SUN Kui¹, NONG Xingzhong¹, FENG Qingsong²

(1. Guangzhou Metro Design and Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510010; 2. State Key Laboratory of Performance Monitoring Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, Nanchang 330013)

Abstract: In order to study the influence of vehicle conditions on wheel-rail system vibration in suburban railways, a vertically coupled dynamic vehicle-track-tunnel model is established, and the influence mechanism of operating speed, train passenger load, wheelset mass and wheel polygonalization on the vibration response of vehicle, rail and tunnel is analyzed in detail. The research results show that with the train speed increasing from 100 km/h to 160 km/h, tunnel vibration source strength increases from 68.05 dB to 72.06 dB. With the increase of train passenger load, the vertical ride comfort index of vehicles gradually decreases, while the vertical wheel-rail force, rail vertical displacement and acceleration, maximum Z vibration level of the rail, and tunnel vertical displacement gradually increase, while the tunnel vertical acceleration and maximum Z-vibration level remain basically unchanged. Passenger load mainly affects the tunnel vibration response below 10 Hz. Above 10 Hz, the response is governed primarily by wheel-rail irregularities, and the tunnel acceleration level shows no significant differences among no-load, full-load, and overload conditions. Increasing wheelset mass increases the maximum Z vibration level of the rail and tunnel. During routine vehicle maintenance, the excitation frequency of wheel polygonalization should be prevented from

收稿日期: 2025-04-24 修回日期: 2025-05-21

第一作者: 孙魁, 男, 博士后, 工程师, 主要从事轨道交通环境振动和轨道动力学研究, sunkui@dsjy.com

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金(2025A1515011271); 中国博士后科学基金资助项目(2024M750628)

引用格式: 孙魁, 农兴中, 冯青松. 市域铁路车辆状态对隧道振动的影响机制[J]. 都市轨道交通, 2026, 39(1): 124–129.

SUN Kui, NONG Xingzhong, FENG Qingsong. Influence mechanism of suburban railway vehicle conditions on tunnel vibration source strength[J]. Urban rapid rail transit, 2026, 39(1): 124–129.

coinciding with the wheel-rail system P2 resonance frequency.

Keywords: suburban railways; vibration source strength; operating speed; train passenger load; wheel polygonalization

市域铁路作为一种高效的轨道交通方式,以快速、大容量和低成本运营的特点,有效缓解了城市交通压力并促进了区域间的经济联系。然而,市域铁路的高速和大轴重特性导致显著的环境振动问题,对周边环境和居民生活产生了不利影响^[1]。目前对市域铁路引起的环境振动问题的研究仍显不足,车辆状态对振动源强的影响等问题亟待进一步探讨和解决。

张校恺等^[2]提出了一种隧道振动源强可靠性分析方法,分析了列车轴重、钢轨波磨和隧道周围土体弹性模量对振动源强随机性的影响。马龙祥等^[3]建立了隧道-土体薄片有限元-无限元耦合模型,探明了地铁车辆类型和编组情况对地铁环境振动的影响水平。刘文武等^[4]通过对地铁隧道区间断面进行测试,分析了车速、车轮损伤等因素对地铁振动源强的影响。毛苇^[5]基于地铁隧道振动实测数据分析了车轮状态对振动源强的影响规律,分析结果表明车轮状态引起的最大 Z 振级变化范围可达 20 dB。谢玉梅等^[6]以成都市域快线为例,采用现场测试方法分析了不同减振轨道的减振效果,并指出与地铁相比,市域快线的振动源强偏低。

通过上述文献可知,现有研究已对车辆因素对地铁隧道振动源强的影响开展了大量研究,多基于现场实测数据展开分析,但尚未从理论层面深入探究上述因素致使振动源强显著波动的内在机理。同时,当前研究多聚焦于地铁线路,对市域铁路车辆状态影响振动源强的关键机制仍缺乏系统性认知。因此,迫切需要进行进一步的科学研究深入探讨车辆状态与环境振动之间的映射关系。本文借助市域铁路车辆-轨道-隧道耦合动力学模型,分析行车速度、列车载客量、轮对质量和车轮多边形对轮轨系统振动响应的影响。

1 动力学计算模型

1.1 模型与参数

为了模拟市域铁路车辆在隧道内高速运行所引起的振动响应,建立车辆-轨道-隧道垂向耦合模型,建模过程详见参考文献[7],采用交叉迭代算法进行求解。市域 D 型车参数见表 1 所示。

轨道类型为整体道床,扣件动刚度为 50 kN/mm,扣件间距为 0.60 m,隧道内径为 7.70 m,管片厚度为 0.40 m,隧道周围土体弹性模量为 1300 MPa,隧道基

础的等效刚度计算方法详见参考文献[8]。

表 1 车辆参数

Table 1 Vehicle parameters

名称	数值
车体质量/kg	46 000
转向架质量/kg	3 600
轮对质量/kg	1 700
车体点头惯量/(kg·m ²)	1.65×10 ⁶
转向架点头惯量/(kg·m ²)	1 659
二系悬挂刚度/(N/m)	5.80×10 ⁵
二系悬挂阻尼/(N·s/m)	1.60×10 ⁵
一系悬挂刚度/(N/m)	1.40×10 ⁶
一系悬挂阻尼/(N·s/m)	5.00×10 ⁴
固定轴距/m	2.50
转向架中心距离/m	15.70

1.2 模型验证

为了验证本文所建立模型的准确性,选取市域铁路隧道区间进行隧道振动源强测试,该测试断面行车速度为 120 km/h,轨道结构类型为普通整体道床,隧道结构类型为圆形盾构隧道,隧道围岩为全风化花岗岩。采用 RMF 1 100 波磨测量小车进行钢轨表面不平顺测量,并作为动力学模型的激励。

采用德国 HEAD 数据采集仪进行数据采集,隧道壁振动加速度采用 393B04 加速度传感器,现场测试照片如图 1 所示。



图 1 现场测试照片

Figure 1 On-site testing photograph

图 2 给出了隧道加速度级的计算结果和测试结果的对比。分析图 2 可知,隧道加速度级的计算结果和测试结果在 4~200 Hz 范围内吻合良好,隧道最大 Z 振

级分别为 73.81 和 72.37 dB, 相差 1.44 dB, 从而说明本文所建立模型具有较高的准确性。

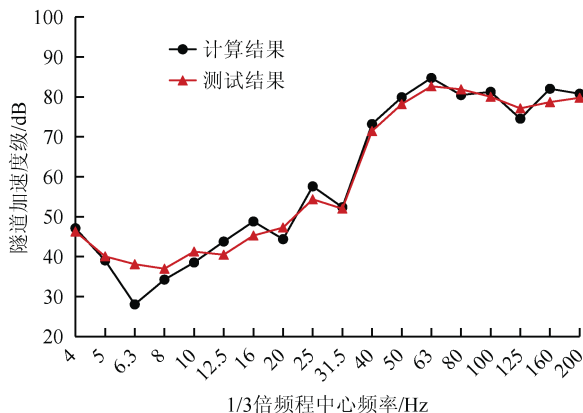


图2 隧道加速度级对比

Figure 2 Comparison of tunnel acceleration levels

2 参数影响分析

本章主要分析行车速度、列车载客量、轮对质量和车轮多边形对车辆、轨道和隧道结构振动响应的影响。

2.1 行车速度

《环境影响评价技术导则 城市轨道交通》(HJ 453—2018)(以下简称《导则》)中给出了列车运行速度小于或等于 100 km/h 时振动源强的速度修正值计算公式:

$$C_v = 20 \log_{10} \frac{v}{v_0} \quad (1)$$

式中, C_v 为振动源强的速度修正系数; v 为预测点的列车实际运行速度; v_0 为振动源强参考点的列车运行速度。

但是,《导则》中没有给出列车运行速度大于 100 km/h 时速度修正值的计算公式。因此,本节分析市域 D 型车的运行速度分别为 100、110、120、130、140、150 和 160 km/h 时,列车运行导致的隧道振动,隧道最大 Z 振级如图 3 所示。

分析图 3 可知,随着行车速度的增加,隧道最大 Z 振级呈现非线性增加趋势,当列车运行速度从 100 km/h 增加至 160 km/h 时,隧道最大 Z 振级从 68.05 dB 增加至 72.06 dB。《导则》规定参考点的列车运行速度不小于预测点列车运行速度的 75%,故选取行车速度 130 km/h 作为振动源强参考点的列车运行速度,对图 3 中的隧道最大 Z 振级进行拟合,拟合式为:

$$VL_{Z_{\max}} = 20.08 \log_{10} \frac{v}{130} + 70.59 \quad (2)$$

式中, $VL_{Z_{\max}}$ 为预测点处的隧道最大 Z 振级。

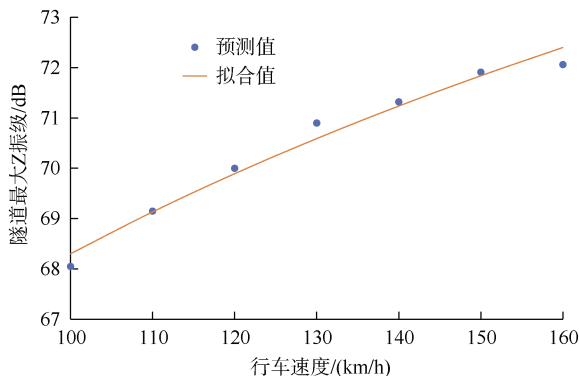


图3 行车速度对隧道振动的影响

Figure 3 Influence of operation speed on tunnel vibration

分析式(2)可知,预测点处的隧道最大 Z 振级与列车运行速度呈正相关关系,速度差为 10 km/h 时,隧道最大 Z 振级变化幅度平均值为 0.68 dB。当列车运行速度为 130 km/h 时,隧道最大 Z 振级为 70.59 dB。与式(1)相比,当列车速度介于 100 至 160 km/h 时,振动源强的速度修正值计算式与《导则》所提供的公式基本一致。

根据文献[6]中实测结果,列车速度为 106 km/h 时,整体道床的隧道最大 Z 振级为 69.6 dB,利用式(2)可以得到相同速度下隧道最大 Z 振级为 68.81 dB,与实测结果十分接近,从而说明本文分析结果具有较高的可信度,即可以采用式(2)对市域铁路行车速度在 100~160 km/h 范围内的隧道最大 Z 振级进行速度修正。

2.2 列车载客量

本节研究列车载客量对车辆、轨道和隧道动力响应的影响,包括空载、满载和超载 3 种工况,对应的车体质量分别为 33 000、46 000、54 000 kg。

行车速度取为 160 km/h,不同列车载客量情况下车辆、轨道和隧道动力响应结果如表 2 所示。分析表 2 可知,随着列车载客量的增加,车辆垂向平稳性指标逐渐减小,轮轨垂向力、钢轨垂向位移和钢轨垂向加速度逐渐增加,相比之下,隧道的垂向加速度和最大

表2 不同列车载客量工况下轮轨动力响应峰值

Table 2 Peak values of wheel-rail dynamic response under different train passenger load conditions

工况	垂向 平稳性 指标	轮轨 垂向力/ kN	钢轨垂向 位移/ mm	钢轨垂向 加速度/ (m/s ²)	隧道垂向 加速度/ (m/s ²)	隧道最大 Z 振级/ dB
空载	2.14	85.91	0.56	285.36	0.27	72.03
满载	1.94	102.48	0.68	320.11	0.27	72.06
超载	1.84	112.40	0.75	338.79	0.27	72.05

Z 振级基本保持不变。对于车辆垂向平稳性指标而言,随着车体质量的增加,车体的惯性越大,在车辆-轨道-隧道耦合动力学模型的激励(轮轨不平顺)不变的情况下,车体的振动加速度越小,故车辆垂向平稳性指标呈现减小趋势。图 4 给出了不同列车载客量情况下钢轨和隧道加速度级。

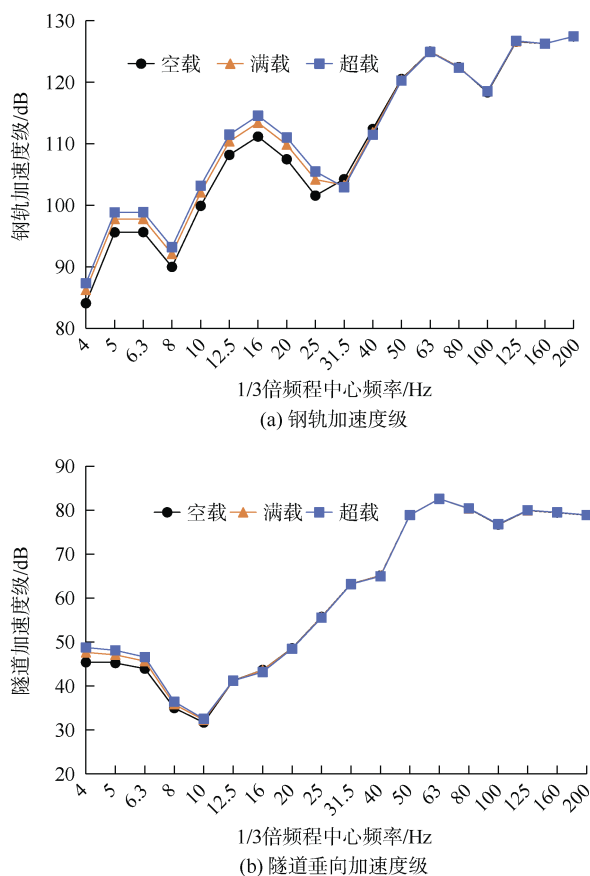


图 4 列车载客量对钢轨和隧道加速度级的影响

Figure 4 Influence of train passenger load on acceleration level of rail and tunnel

分析图 4(a)可知,在 4~31.5 Hz 频率范围内,列车载客量增加会导致钢轨加速度增加,与空载工况相比,超载工况下不同中心频率处的钢轨加速度级平均增量约为 3.37 dB。而在 31.5~200 Hz 频段范围内,列车载客量对钢轨加速度的影响可以忽略不计。

图 4(b)的分析结果显示,列车载客量差异引起隧道加速度在 4~10 Hz 频率范围内显著增加,超载工况下隧道加速度级相较于空载工况平均增加约 2.23 dB。在 10 Hz 以上频率范围内,隧道加速度不受列车载客量变化的影响,其主要原因可能是:当行车速度为 160 km/h 时,在 10 Hz 以下频率范围内,隧道振动响应主要由准静态激励控制;在 10~200 Hz 频率范围内,隧道振

动响应主要由轮轨不平顺控制,因此空载、满载和超载 3 种工况下隧道加速度级并未表现出明显差异。

2.3 轮对质量

由于轮对制造误差、车轮磨损等原因,实际运营车辆的轮对质量会存在较大的随机性,轮对质量近似服从变异系数为 0.15 的正态分布^[9]。根据正态分布的特性,轮对质量处于均值加减 2 倍标准差区间内的概率为 0.954 5,在原有轮对质量的基础上,调整轮对质量至原有值的 130%或 70%,轮对质量计算工况如表 3 所示。

表 3 轮对质量
Table 3 Wheelset mass

工况	放大系数	轮对质量/kg
1	0.70	1 190
2	1.00	1 700
3	1.30	2 210

行车速度取为 160 km/h,列车载客量为满载状态,不同轮对质量情况下车辆、轨道和隧道动力响应结果如表 4 所示。

表 4 不同轮对质量工况下轮轨动力响应峰值
Table 4 Peak values of wheel-rail dynamic response under different wheelset mass conditions

工况	垂向 平稳性 指标	轮轨 垂向力/ kN	钢轨最大 Z 振级/ dB	隧道垂向 位移/ mm	隧道垂向 加速度/ (m/s ²)	隧道最大 Z 振级/ dB
1	1.94	94.24	117.21	0.03	0.25	70.43
2	1.94	102.48	117.59	0.03	0.27	72.06
3	1.94	107.51	118.54	0.03	0.27	73.61

分析表 4 可知,随着轮对质量的增加,轮轨相互作用逐渐加剧,轮轨垂向力、钢轨最大 Z 振级、隧道垂向加速度和隧道最大 Z 振级逐渐增加,但由于车辆一系和二系悬挂的隔振作用,车辆垂向平稳性指标基本不受影响。

2.4 车轮多边形

车轮多边形的等效不平顺可以采用谐波函数进行表示^[10],考虑到环境振动主要关注 80 Hz 以下频段,故本节分析时车轮多边形阶数分别取为 1、2、3 和 4 阶,行车速度取为 160 km/h,相应的车轮多边形激励频率分别为 16.45、32.90、49.35 和 65.80 Hz,车轮多边形幅值取为 0.10 mm,列车载客量为满载状态,不同车轮多边形阶数情况下轮轨垂向力和隧道加速度级如图 5 所示,1~4 阶对应的隧道最大 Z 振级分别为

72.07、72.30、74.86、77.74 dB。

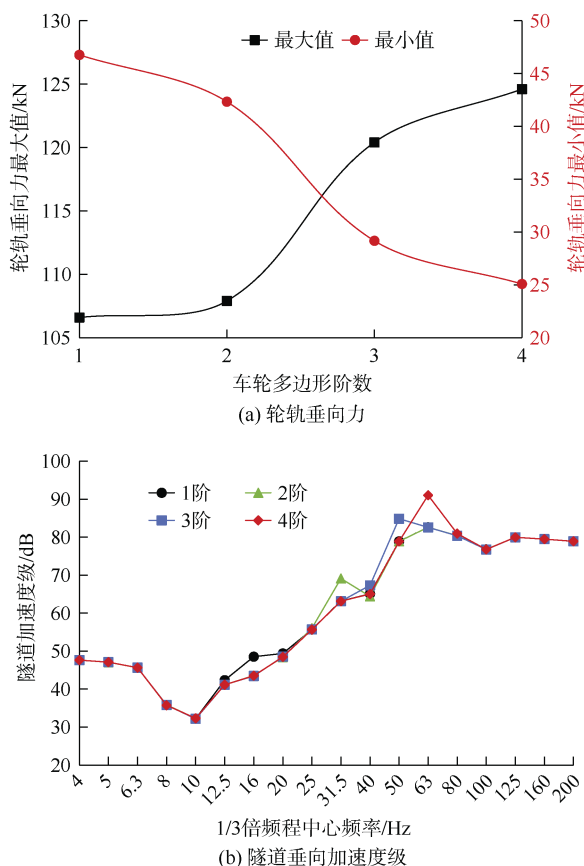


图5 车轮多边形阶数对轮轨垂向力和隧道加速度级的影响
Figure 5 Influence of wheel polygonalization order on wheel-rail vertical force and acceleration level of tunnel

分析图5可知,在隧道加速度级图中,在车轮多边形的激励频率处存在明显的峰值。在1、2、3和4阶车轮多边形4种工况下,4阶车轮多边形引起的隧道最大Z振级最大,其主要原因是:4阶车轮多边形的激励频率为65.80 Hz,与轮轨系统的P2共振频率58.64 Hz^[11]最为接近,可能产生了共振现象,从而造成轮轨垂向力显著增加,直接导致隧道振动响应在4阶车轮多边形激励频率附近出现明显的峰值。

当不存在车轮多边形时,隧道最大Z振级为72.06 dB。当车轮存在1阶和2阶多边形时,隧道最大Z振级并没有因为车轮多边形而显著增大,当车轮存在3阶和4阶多边形时,隧道最大Z振级快速增加,分别为74.86和77.74 dB。因此,在车辆的日常养护维修过程中,要避免车轮多边形激励频率与轮轨系统P2共振频率出现重合现象,从而减缓车致环境振动对线路周边居民的影响。

3 结论

本文建立了车辆-轨道-隧道垂向耦合动力学模型,详细分析了行车速度、列车载客量、轮对质量和车轮多边形对隧道振动源强的影响,主要结论如下:

1) 当列车运行速度从100 km/h增加至160 km/h时,隧道最大Z振级从68.05 dB增加至72.06 dB。

2) 随着列车载客量的增加,车辆垂向平稳性指标逐渐减小,而隧道的垂向加速度和最大Z振级基本保持不变。列车载客量主要影响10 Hz以下频率范围内的隧道振动响应,在10~200 Hz频率范围内,隧道振动响应主要由轮轨不平顺控制,导致空载、满载和超载3种工况下隧道加速度级无显著差异。

3) 轮对质量的增加会加剧轮轨相互作用,导致钢轨和隧道的最大Z振级增加。

4) 在车辆的日常养护维修过程中,要避免车轮多边形激励频率与轮轨系统P2共振频率出现重合现象,从而减缓车致环境振动对线路周边居民的影响。

参考文献

- [1] 李平, 罗信伟, 朱文海. 市域快线现浇钢弹簧浮置板轨道动力性能研究[J]. 振动测试与诊断, 2021, 41(1): 142-149.
LI Ping, LUO Xinwei, ZHU Wenhui. Dynamic performance of cast-in-place steel spring floating slab track in urban express rail transit[J]. Journal of vibration, measurement & diagnosis, 2021, 41(1): 142-149.
- [2] 张校恺, 韦凯. 一种环境振动源强预测随机可靠度分析方法[J]. 振动与冲击, 2024, 43(6): 336-344.
ZHANG Xiaokai, WEI Kai. Stochastic reliability analysis method for environmental vibration source strength prediction[J]. Journal of vibration and shock, 2024, 43(6): 336-344.
- [3] 马龙祥, 赵瑞桐, 甘雨航, 等. 车型及编组对地铁运营诱发环境振动的影响研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(11): 24-30.
MA Longxiang, ZHAO Ruitong, GAN Yuhang, et al. Effects of train type and formation on metro operation induced environmental vibration[J]. Journal of vibration and shock, 2019, 38(11): 24-30.
- [4] 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]. 都市轨道交通, 2024, 37(4): 24-31.
LIU Wenwu, FENG Qingsong, LUO Xinwei, 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.
- [5] 毛芾. 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 Wei. 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.
- [6] 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.
- [7] 黄国庆, 孙魁, 陈虹兵, 等. 中等减振梯形轨枕轨道结构关键设计参数[J]. 铁道建筑, 2024, 64(3): 47-51.
HUANG Guoqing, SUN Kui, CHEN Hongbing, et al. Key design parameters of medium damping trapezoidal sleeper track structure[J]. Railway engineering, 2024, 64(3): 47-51.
- [8] 徐庆元, 范浩, 孟亚军, 等. 地铁隧道橡胶浮置板轨道纵向连接理论研究[J]. 交通运输工程学报, 2013, 13(4): 37-44.
XU Qingyuan, FAN Hao, MENG Yajun, et al. Theoretical study of longitudinal connection for rubber floating slab track of subway tunnel[J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2013, 13(4): 37-44.
- [9] 余志武, 毛建锋, 谈遂, 等. 车辆参数随机的车桥竖向随机振动分析[J]. 铁道学报, 2015, 37(1): 97-104.
YU Zhiwu, MAO Jianfeng, TAN Sui, et al. The stochastic analysis of the Track-bridge vertical coupled vibration with random train parameters[J]. Journal of the China railway society, 2015, 37(1): 97-104.
- [10] 王秋实, 王泽根, 周劲松, 等. 基于迭代修正 DFT 的车轮多边形磨耗状态识别[J]. 振动测试与诊断, 2023, 43(3): 485-492.
WANG Qiushi, WANG Zegen, ZHOU Jinsong, et al. Detection framework of wheel polygon wear state based on iterative modified DFT[J]. Journal of vibration, measurement & diagnosis, 2023, 43(3): 485-492.
- [11] LI Q, WU D J. Analysis of the dominant vibration frequencies of rail bridges for structure-borne noise using a power flow method[J]. Journal of sound and vibration, 2013, 332(18): 4153-4163.

(编辑: 傅依萱)

(上接第 123 页)

- [6] WAN X, ZHANG Z, YE G, et al. Boundary effect of foamed cement paste under the influence of air-coupled impact-echo[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2024, 1337(1): 012003.
- [7] HE Dan, WANG Xiufeng, FRISWELL M I, et al. Identification of modal parameters from noisy transient response signals[J]. Structural control and health monitoring, 2017, 24(11): e2019.
- [8] KAWAMURA A, FUJIKURA K. Impact noise suppression using speech spectral phase estimator[J]. IEEE transactions on electronics, information and systems, 2018, 138(11): 1410-1416.
- [9] YAO Fei, CHU Jinchao, LU Xingqi. Improved stack imaging of spectral amplitude based on the impact echo method for identification of defects in grout-filled lap connection[J]. Construction and building materials, 2023, 398: 132420.
- [10] WU Haonian, YAN Li, PEIWEN X, et al. Denoising method for weak velocity test signals under laser-induced shock waves based on attention-guided multi-scale convolutional neural network[J]. Optics and lasers in engineering, 2023, 170: 107749.
- [11] YANG Weifeng, WANG Qing, HOU Yuting, et al. Analysis and denoising of electric noise in phased array ultrasonic testing system[J]. NDT & E international, 2024, 146: 103164.
- [12] WANCHOO P, PANDEY A, SHUKLA A. Stress wave propagation and force transmission in polymeric closed cell foams subjected to air shock loading[J]. Extreme mechanics letters, 2023, 63: 102061.
- [13] ZHOU Rui, HAN Jiangtao, GUO Zhenyu, et al. De-noising of magnetotelluric signals by discrete wavelet transform and SVD decomposition[J]. Remote sensing, 2021, 13(23): 4932.
- [14] WINURSITO A, ARIFIN F, NASUHA A, et al. Design of robust heart abnormality detection system based on wavelet denoising algorithm[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2111(1): 012048.
- [15] JIANG Hong, LI Dong, ZHANG Xiaoming, et al. Research on de-noising method of fiber grating multiplexing network based on LCEEMD-LWT[J]. Optik, 2021, 247: 167997.
- [16] SAMANN F, SCHANZE T. Finding an optimal dictionary of different wavelet types using sparse modeling to denoise ECG signal[J]. Current directions in biomedical engineering, 2021, 7(2): 125-128.
- [17] PANIGRAHI S K, GUPTA S. Joint bilateral filter for signal recovery from phase preserved curvelet coefficients for image denoising[J]. International journal of image and graphics, 2021, 21(4): 2150049.

(编辑: 傅依萱)