

文章编号: 1005-0523(2025)02-0035-11



基于长期监测的市域快线室内振动 噪声特性研究

翟利华^{1,2}, 肖军华¹, 徐璐³, 陈艳玟³, 刘庆杰³

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510010; 3. 华东交通大学交通运输工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要:为研究160 km/h市域快线诱发沿线建筑物室内振动与二次结构噪声的特性,在某新建运营的市域快线沿线一建筑物室内部署长期监测系统,开展长期振动噪声监测工作。基于对大量监测数据的分析,研究了160 km/h市域快线诱发沿线建筑物室内振动与二次结构噪声特性,以及不同行车速度下振动噪声特征的变化。分析结果表明,市域快线诱发室内振动各频段均有一定的离散性,其中在25.0~125.0 Hz频段的分频振级离散程度低于其他频段,市域快线诱发的室内二次结构噪声各频段分频声压级的离散性显著大于室内振动的分频振级离散性。二次结构噪声与背景噪声的差异主要集中在31.5~125.0 Hz频段。市域快线诱发室内的振动分频振级与二次结构噪声分频声压级在31.5~100.0 Hz频段相关性较大,列车运行速度增大后,振级与二次结构噪声相关性并没有显著提高,但振动与二次结构噪声监测数据离散程度有所减少。列车运行速度增大后,分频振级在20.0~50.0 Hz有所增大,而二次结构噪声声压级仅在31.5 Hz处增大。

关键词:市域快线;长期监测;振动;二次结构噪声

中图分类号:U238

文献标志码:A

本文引用格式:翟利华,肖军华,徐璐,等.基于长期监测的市域快线室内振动噪声特性研究[J].华东交通大学学报,2025,42(2):35-45.

Study on Indoor Vibration and Noise Characteristics of Urban Subway Based on Long-Term Monitoring

Zhai Lihua^{1,2}, Xiao Junhua¹, Xu Lu³, Chen Yanwen³, Liu Qingjie³

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;
2. Guangzhou Metro Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510010, China; 3. School of Transportation Engineering,
East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: In order to study the characteristics of indoor vibration and secondary noise of buildings induced by 160 km/h urban subway, a long-term monitoring system was deployed in a building room along a new urban express line to carry out long-term vibration and noise monitoring. Based on the analysis of a large number of monitoring data, the characteristics of indoor vibration and secondary structural noise of buildings along the high-speed underground line are studied, and the changes of vibration and noise characteristics at different driving speeds are studied. The analysis results show that each frequency band of indoor vibration induced by subway has a certain degree of dispersion. In the 25.0~125.0 Hz frequency band, the dispersion degree of the frequency-

收稿日期: 2024-09-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51868024)

divided vibration level is lower than that of other frequency bands. The dispersion of the frequency-divided sound pressure level of each frequency band of indoor secondary structural noise induced by subway is significantly greater than that of the frequency-divided vibration level of indoor vibration induced by subway. The difference between secondary structural noise and background noise is mainly concentrated in the 31.5~125.0 Hz frequency band. The correlation between the vibration frequency-divided vibration level and the secondary structural noise frequency-divided sound pressure level in the subway-induced room is large in the frequency band of 31.5~100.0 Hz. After the speed increases, the correlation between the vibration level and the secondary structural noise does not increase significantly, but the dispersion degree of the vibration and secondary structural noise monitoring data decreases. After the speed increases, the vibration frequency division vibration level increases at 20.0~50.0 Hz, while the secondary noise sound pressure level of the structure increases only at 31.5 Hz.

Key words: urban subway; long-term monitoring; vibration; secondary structure noise

Citation format: ZHAI L H, XIAO J H, XU L, et al. Study on indoor vibration and noise characteristics of urban subway based on long-term monitoring[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(2): 35-45.

近年来,为加强中心城区与卫星城的联系,最高运营速度达 160 km/h,以地下线为主要敷设方式的城际铁路应运而生^[1-2]。广州地铁 18 号和 22 号线是国内较早采用时速 160 km/h 的全地下市域快线^[3]。市域快线的发展大幅减少市民的通行时间^[4-6],成为城市轨道交通发展的新热点。城市轨道交通在方便人们出行的同时,也带来了环境振动与二次结构噪声污染^[7-10]。市域快线与普速地铁的振动特性差异显著,主要体现在更快的车速、更大的隧道断面尺寸和车辆类型不同等方面,目前我国关于地铁诱发环境振动的相关研究主要集中在普通地铁,既有的振动噪声预测方法难以适用于 120~160 km/h 的线路^[11-12]。因此,开展相关研究具有较强的理论和实践意义。

随着运营速度的增加,地铁列车竖向加速度幅值显著增大^[13]。研究发现,市域快线在运营时引发的振动与普速地铁存在较大差异,其振动峰值较小,振动频率较高^[14-16]。现场实测是预测和评估地铁环境振动噪声最可靠的手段。为了评价地铁振动对沿线建筑物的影响,国内外学者通过实测进行了一系列的研究。地铁振动易诱发沿线建筑物发生共振^[17],产生二次结构噪声,郝影等^[18]将测试数据与国内标准对比,发现即使最大 Z 振级满足《城市区域环境振动标准》(GB 10070—1988)中的限值,居民的主观烦恼度仍较高。实测是研究地铁振动噪声的有效方法^[19],李明航等^[20]对某地铁线路同一区间内 2 个断面进行现场原位测试,发现测试断面

振动源强离散超过 15.00 dB,早晚高峰时段振动源强没有明显增大。

大量的研究表明^[21-22],即使在同一天内,列车在相对确定的条件下运行,列车引起的振动噪声在不同时刻也是高度随机的,给实测和预测的应用带来了很大困难^[23-24]。为更准确地评价和分析地铁诱发沿线建筑物室内振动与二次结构噪声,需要大量的数据来弥补测试数据的离散和随机性,传统的现场测试方法已无法满足要求。

为了更加深刻地掌握市域快线诱发环境振动和二次结构噪声的特征,通过部署长期监测的方式,对某新建运营城际铁路沿线建筑物室内振动噪声进行实时监测,通过长时间的实时监测,获取了大量的监测数据。基于庞大的数据量、较长的数据采集时间跨度,对市域快线诱发室内振动与二次结构噪声的数据特征以及市域快线提速前后诱发室内振动噪声与二次结构噪声的变化进行研究。

1 监测系统概况

1.1 监测位置

在某 160 km/h 市域快线沿线一处振动噪声敏感建筑物内进行长期室内振动噪声监测。该地铁为市域快线,其轨道使用橡胶浮置板轨道、SFC 型扣件、60 kg/m 钢轨。监测点选择在一间无人居住、门窗封闭,且受背景噪声影响较小的房间内,布置振动噪声监测系统。

1.2 监测仪器

如图1所示,所采用的监测仪器包括希声云轨道监测主机。该主机可实现定时、触发及连续采样,并支持边缘计算,从而实时获得幅值、频谱、Z振级、

A计权声压等指标,并将数据自动上传至云端,实现长时间监测功能。室内环境振动采用PCB 393B04加速度传感器监测,二次结构噪声采用GRAS声传感器监测。



图1 振动噪声信号采集仪器
Fig. 1 Vibration and noise signal acquisition instrument

1.3 监测布置

监测现场布置如图2所示。该振动噪声敏感点建筑物共5层,为砖混结构,无电梯。监测位置选在该建筑物一层靠近地铁线路一侧的房内(面积约18.0 m²,层高3.0 m),房间内摆放家具,墙壁为乳胶漆装饰,无吸声材料(见图3)。建筑物外墙距离线路中心线约5.0 m,线路埋深23.0 m。为尽量减少室内驻波的影响,在房间中央处布置一个393B04加速度传感器;在靠近房间中央处布置一个GRAS声传感器,距离地面1.2 m。



图3 监测房间内部图
Fig. 3 Monitor the interior of the room

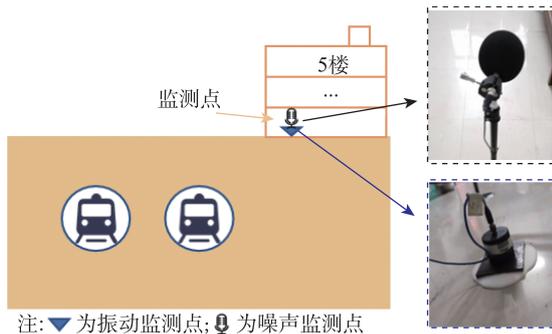


图2 测试现场布置示意图
Fig. 2 Monitoring scene layout diagram

1.4 监测流程

监测系统的工作流程图如图4所示。监测系统采用“云边协同”^[25]的方式实现数据的采集、边缘计算、清洗工作。通过自动触发的方式采集信号,当振动信号峰值大于监测主机设置的振动阈值0.01 m/s²时,监测主机开始采集室内振动噪声信号。列车运

行速度为40 km/h时,采样时间为60 s;运行速度为160 km/h时,采样时间为25 s。采样频率为2 560.0 Hz。其中,监测初期一段时间内处理好的数据集用于进行模型训练。数据采集完成后自动进入边缘计算程序,计算得到振动噪声信号的峰值、有效值、1/3倍频程幅值等特征数据。随后,各项特征数据通过5G网络上传至云端数据库。通过部署在云端的K邻近(K-nearest neighbor, KNN)分类模型对振动噪声信号进行识别,实现对背景信号与车致信号的分离,最终得到由列车诱发的振动信号和二次结构噪声信号,KNN分类模型的具体算法可参考文献[25],训练集测试结果为召回率98.10%,精度为94.85%。监测系统振动噪声信号分类图如图5所示,监测系统对于背景振动、列车引起振动、背景噪声以及列车诱发二次结构噪声有明显的区分表示。

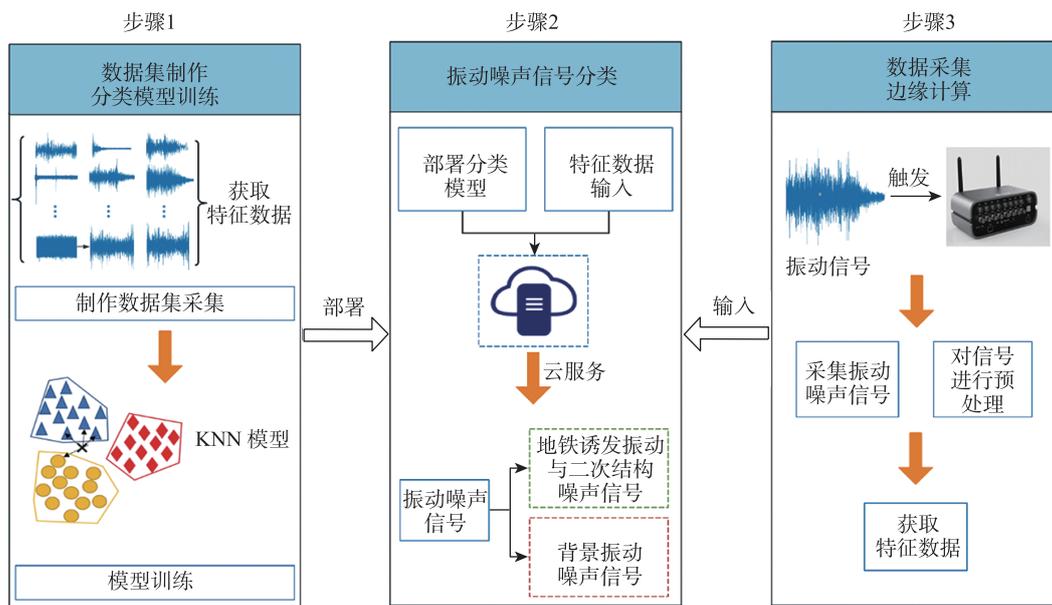


图4 监测流程图

Fig. 4 Monitoring flow chart

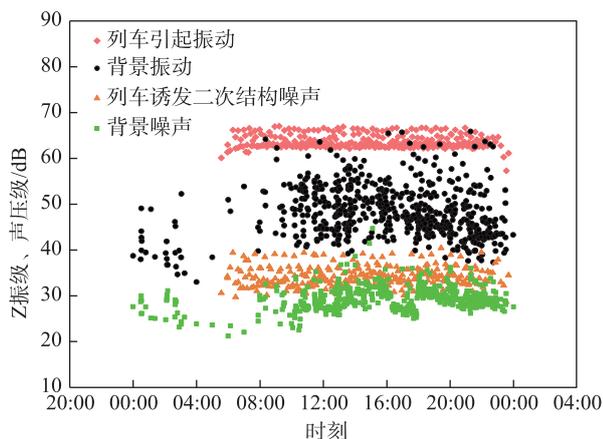


图5 监测系统振动噪声信号分类效果图

Fig. 5 Vibration noise signal classification effect diagram of monitoring system

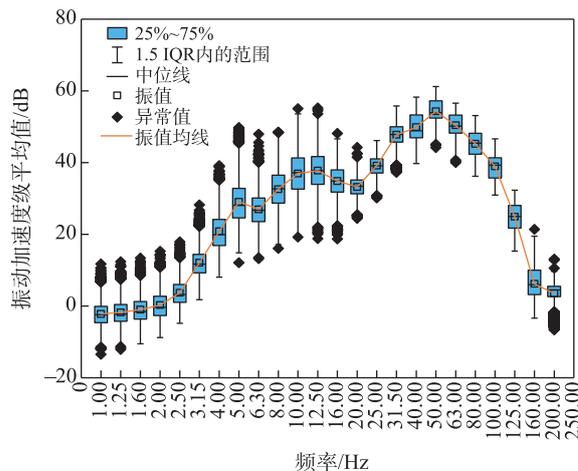


图6 车致振动分频箱型图

Fig. 6 Train-induced vibration frequency division box diagram

2 监测数据特性分析

选取2022年某月采集的室内振动噪声数据,分析市域快线诱发室内振动和二次结构噪声的数据特征,以及列车诱发振动与背景振动、列车诱发室内二次结构噪声与背景噪声的区别。

2.1 频谱分析

车致振动1/3倍频谱箱型图如图6所示。振动的主要频率在50.0 Hz附近,最大幅值为54.00 dB,次级主要频率在12.5 Hz附近。各分频振级都存在不同程度的离散,最大差值为15.70 dB。在1.0~20.0 Hz

频段,分频振级离散程度较大,在此频段内分频振动主要受背景振动的影响较大,导致数据的离散性较高,有更多的异常值;在25.0~125.0 Hz频段内,分频振级离散程度较其他频段内更低,数据较稳定,异常值较少;在1.0~50.0 Hz频段内,分频振级总体呈现增大趋势,峰值出现在50.0 Hz处为54.30 dB。

二次结构噪声1/3倍频谱箱型图如图7所示。噪声的主要频率在50.0 Hz附近,最大幅值为49.00 dB。在20.0~50.0 Hz频段内,分频声压级逐渐增大,在50.0 Hz处达到顶峰,在50.0 Hz处,差值最大为

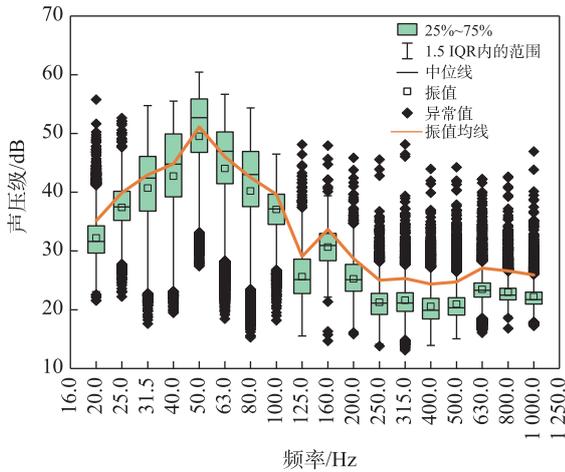


图7 二次结构噪声分频箱型图
Fig. 7 Structural born noise divider box diagram

27.33 dB;在20.0~125.0 Hz频段内,二次结构噪声分频声压级随频率变化的规律与车致振动分频振级相似,且峰值均出现在50.0 Hz处,因此,可以得出,在此频段内二次结构噪声分频声压级主要受列车运行引起的振动影响;在125.0~1 000.0 Hz频段内,分频声压级主要源自环境噪声的影响。从离散程度的角度分析,环境噪声对车致二次结构噪声的影响程度明显要大于环境振动对车致振动的影响,因此二次结构噪声有更多的异常值。

2.2 车致信号与背景信号分析

对比列车诱发室内振动和室内背景振动的频谱数据,得出受列车振动影响较大的敏感频段。列车诱发室内振动与室内背景振动的1/3倍频谱图如图8所示。在1.0~20.0 Hz频段,车致振动与背景振

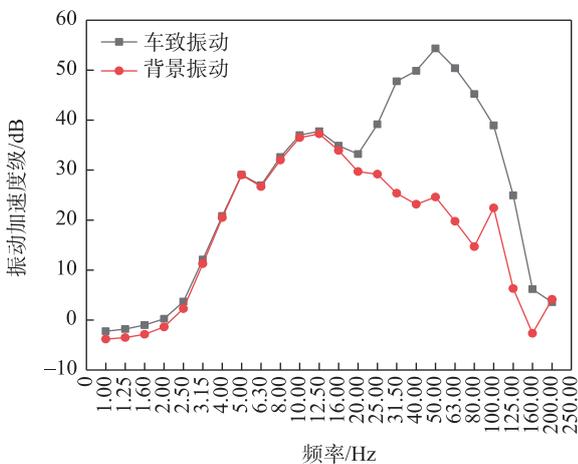


图8 室内振动频谱图
Fig. 8 Indoor vibration spectrum diagram

动分频振级几乎一致,因为被测建筑所在环境非常安静,背景振动比较稳定,建筑地面的振动存在相对稳定的振动模式;在25.0~125.0 Hz频段,两者差异较大,车致振动分频振级大于背景振动,由于列车的振动源强主频为40.0~80.0 Hz,经过底层的衰减会在50.0 Hz附近产生峰值,这个峰值附近的频段环境振动与车致振动差异明显,说明该频段区间为车致振动的敏感频段。车致振动与背景振动中心频率分别出现在12.5,50.0 Hz处。

车致二次结构噪声与室内背景噪声的1/3倍频谱图如图9所示。噪声峰值中心频率均在50.0 Hz处。车致二次结构噪声分频声压级与背景噪声分频声压级的差异主要集中在25.0~125.0 Hz频段内,其他频段两者差异不大,说明当列车通过时,室内二次结构噪声在25.0~125.0 Hz频段内受列车运行影响较大,其他频段主要受环境固有噪声的影响。

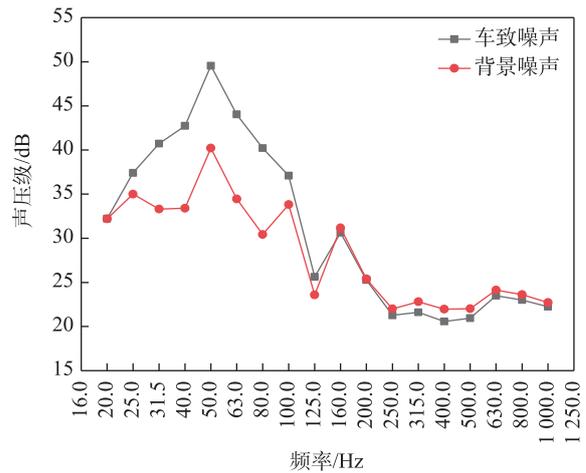


图9 室内噪声频谱图
Fig. 9 Indoor noise spectrum diagram

3 长期监测数据分析

长期监测期间,列车运行速度在不同时段有所变化。通过分析列车以40 km/h运行时监测的一个月内的4 177组地板中央处垂向振动加速度级与室内二次结构噪声声压级数据的分频拟合图,以及速度增大后以160 km/h运行时监测的一个月内的8 291组数据的分频拟合图(1/倍频程),研究列车在不同运行速度下对沿线建筑物内环境振动噪声的影响。

3.1 不同速度下车致振动噪声相关性分析

列车以40 km/h运行时监测的一个月内的振动

噪声数据拟合图部分如图 10 所示。x 为振动加速度级, dB; y 为噪声声压级, dB; R^2 为决定系数。各频率振动加速度级与噪声声压级均存在一定的离散性, 且离散程度各不相同。20.0, 25.0, 125.0, 160.0, 200.0 Hz 的线性相关性较低, 数据离散性较大; 在受列车影响较大的 31.5~100.0 Hz 频段线性相关性较高。此外, 频率在振动中心频率 50.0 Hz 附近的振动加速度级与噪声声压级线性相关性较高。

列车以 160 km/h 运行时监测的一个月内的振动噪声数据拟合图如图 11 所示。各频率振动加速度级与噪声声压级数据特征同 40 km/h 时类似。20.0, 25.0, 125.0, 160.0, 200.0 Hz 的线性相关性较低, 距离振动中心频率越近相关性越高。对比不同速度

各中心频段的拟合图可知, 地下快速线运营车速提高导致地板中心振动变大与二次结构噪声变化并不是简单的线性关系, 如在 31.5 Hz 频率处, 列车运行速度为 160 km/h 时室内振动加速度级与噪声声压级相关性反而降低; 而在 50.0 Hz 处, 相关性升高。

由于列车引发地板振动与二次结构噪声并非简单的线性相关, 因此, 为研究两者的单调关系, 引入斯皮尔曼相关性系数, 斯皮尔曼相关系数计算式如

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n-1)}$$

式中: ρ 为斯皮尔曼等级相关系数; n 为数据对(观测值对)的数量; d_i 为第 i 对观测值等级之间的差异。

斯皮尔曼相关性系数如表 1 所示。总体趋势是

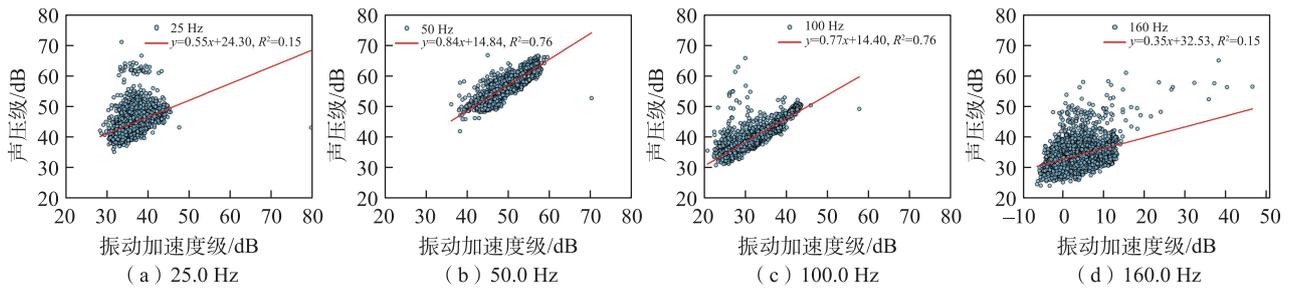


图 10 运行速度为 40 km/h 时振动噪声相关性分析

Fig. 10 Correlation analysis of vibration and noise when the running speed is 40 km/h

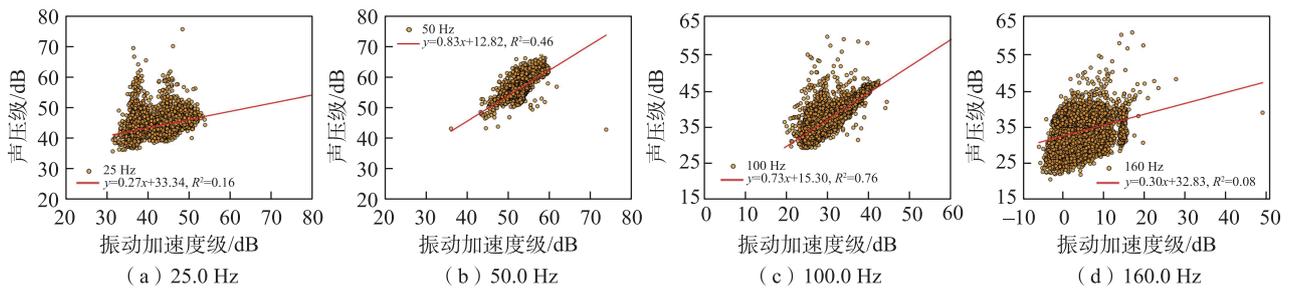


图 11 运行速度为 160 km/h 时振动噪声相关性分析

Fig. 11 Correlation analysis of vibration and noise when the running speed is 160 km/h

表 1 不同速度振动噪声斯皮尔曼相关性系数

Tab.1 Spearman correlation coefficient of vibration noise at different speeds

速度/(km/h)	频率/Hz										
	20.0	25.0	31.5	40.0	50.0	63.0	80.0	100.0	125.0	160.0	200.0
40	0.476	0.477	0.789	0.746	0.844	0.862	0.91	0.89	0.521	0.314	0.398
160	0.429	0.518	0.703	0.536	0.627	0.920	0.878	0.775	0.496	0.269	0.254

靠近特征频率附近频率的斯皮尔曼相关性系数较大,而20.0,25.0,125.0,160.0,200.0 Hz频率的斯皮尔曼相关性系数较小,验证了地板振动中心频率附近为影响二次结构噪声的主要频段。

3.2 监测数据对比分析

列车以不同速度运行时监测的一个月内的列车诱发室内振动数据箱型图如图12所示。对比得知,运行速度40 km/h时监测的每日的振动数据分布较高速时相对分散,说明列车运营速度越低,不同列车之间诱发室内振动差异较大。此外,运行速度为40 km/h时数据箱型图中中位线变化较高速时大,说明速度越大,列车诱发室内振动值变化越稳定。

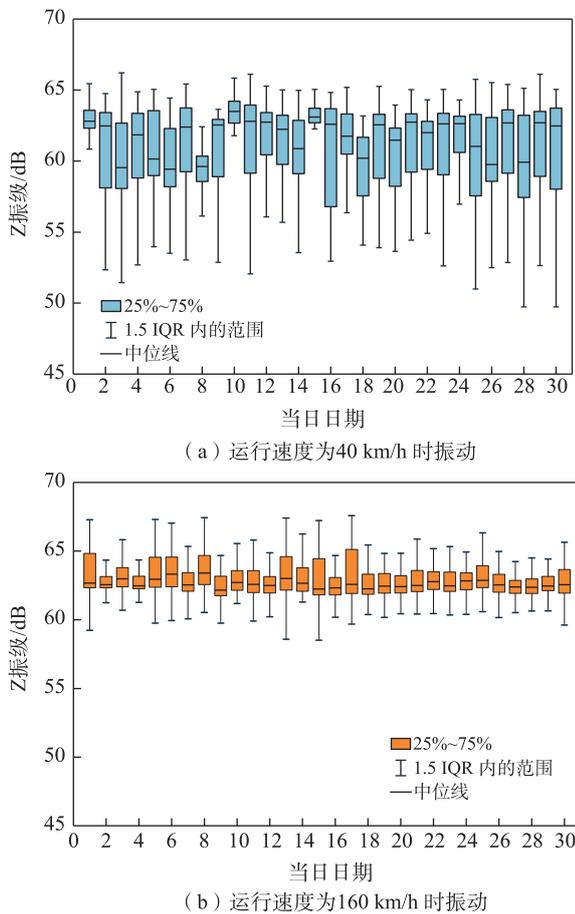


图12 不同速度振动监测数据对比图
Fig. 12 Comparison of vibration monitoring data at different speeds

不同速度下监测的一个月内的列车诱发室内振动均值对比图如图13所示。列车运行速度增大后,平均每天的振动均值增加了约2.12 dB,且随着运营时间的增加,列车诱发室内振动并未逐渐增

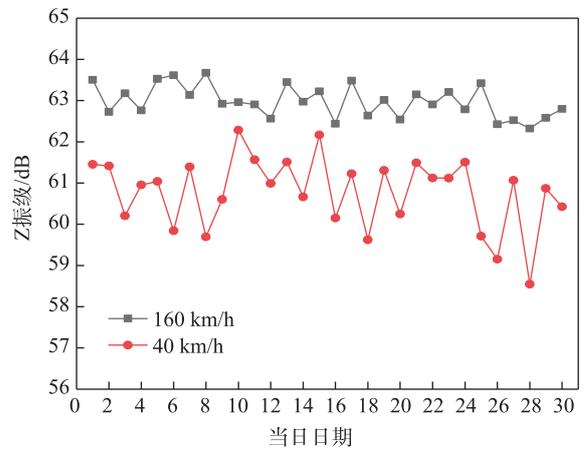


图13 不同速度振动均值对比图
Fig. 13 Comparison of vibration mean at different speeds

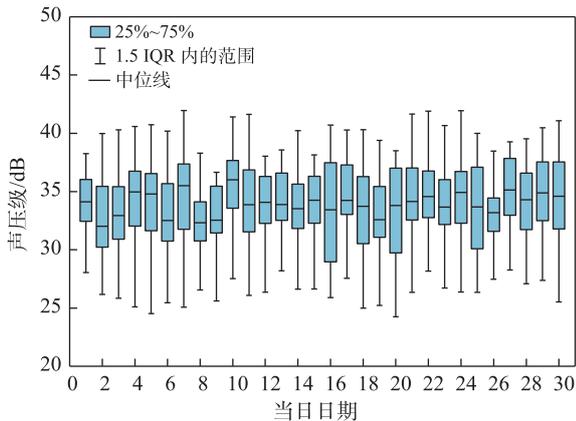
大,而是在一定区间内波动。在该月中,不同运行速度每日振动均值差异较大,运行速度为40 km/h时最大均值差为3.74 dB,而运行速度为160 km/h时最大均值差只有1.35 dB。

不同速度下监测的一个月内的列车诱发室内二次结构噪声数据箱型图如图14所示。对比得知,运行速度为160 km/h时监测的每日的二次结构噪声数据的离散性比40 km/h时小。与振动差异显著不同,不同速度监测到的二次结构噪声随速度增大而增大的规律并不明显。

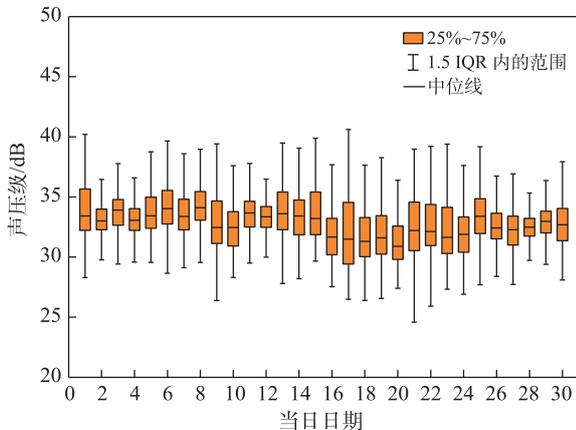
不同速度下监测的一个月内的列车诱发室内二次结构噪声均值对比图如图15所示。列车运营导致室内二次结构噪声没有随速度增大而增大的规律,且列车运行速度增大后,平均每天的二次结构噪声均值减少了0.93 dB左右。在该月中,运行速度为40 km/h时二次结构噪声最大均值差为3.65 dB,运行速度为160 km/h时最大均值差为3.19 dB,两者差异不大。

由上述分析可知,列车速度增大会导致监测点室内地板振动显著增大,且速度增大后不同列车诱发的振动值差异较小,此外,速度的提升对室内二次结构噪声的影响并不明显。

不同速度下地板振动1/3倍频程对比图如图16所示。不同速度振动各中心频率的振级变化都是随频率的增大而增大,在50.0 Hz处达到峰值,但运行速度为160 km/h时在31.5 Hz频率处出现第二峰值。对比不同速度振动数据1/3倍频程变化可知,160 km/h时地板振动加速度级在20.0~50.0 Hz频段内均有所提高。其中,在31.5 Hz处提高了6.99 dB,



(a) 运行速度为 40 km/h 时噪声



(b) 运行速度为 160 km/h 时噪声

图 14 不同速度二次结构噪声监测数据对比图
Fig. 14 Comparison of monitoring data of structural born noise at different speeds

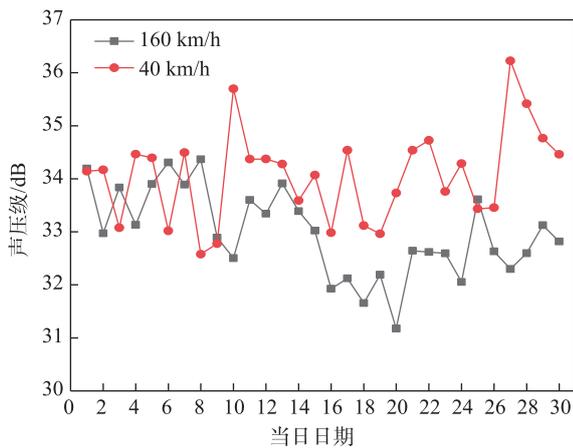


图 15 不同速度二次结构噪声均值对比图
Fig. 15 Comparison of mean values of structural born noise at different speeds

在 40.0 Hz 处提高了 2.90 dB, 此频段为振动增大的主要原因。

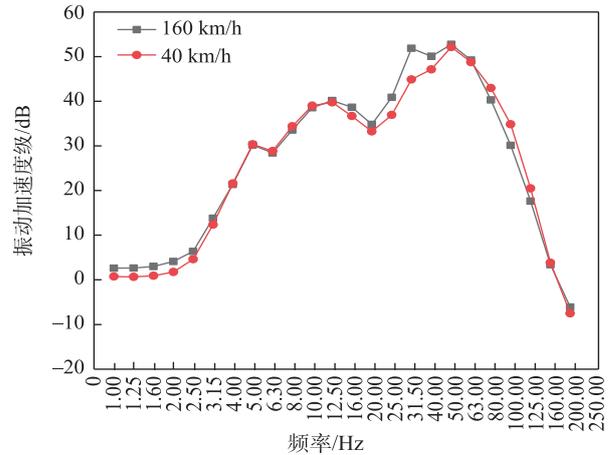


图 16 不同速度振动频率对比图
Fig. 16 Vibration frequency comparison diagram at different speeds

不同速度下二次结构噪声 1/3 倍频程对比图如图 17 所示。与地板振动不同, 列车运行速度为 160 km/h 时室内监测点二次结构噪声并没有随列车运行速度的提高而增大。在该速度时噪声声压级在 31.5 Hz 处显著提高, 提高了 5.18 dB; 但在 40.0~50.0 Hz 频段与振动数据表现相反, 速度增大后各频段声压级均有所减少。

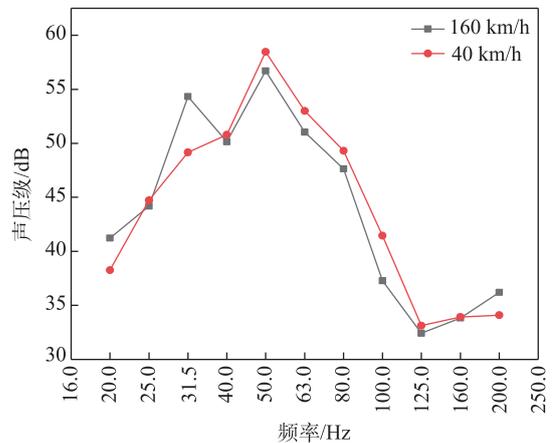
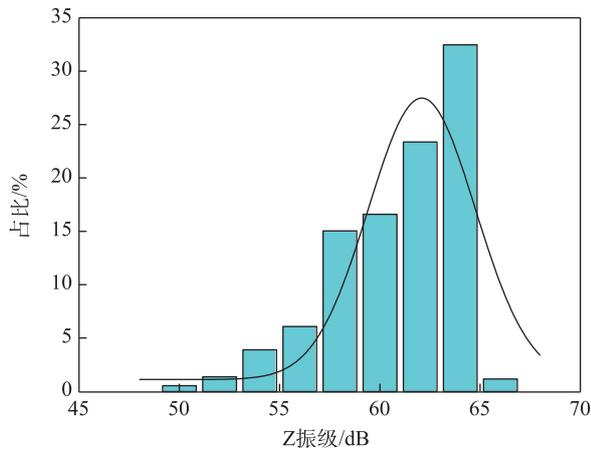
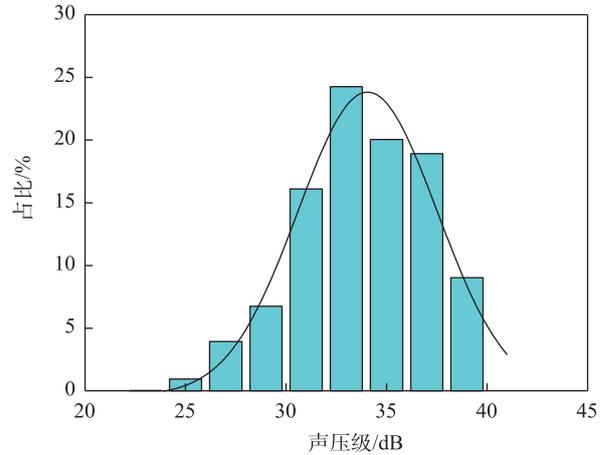


图 17 不同速度二次结构噪声频率对比图
Fig. 17 Structure secondary noise frequency comparison diagram at different speeds

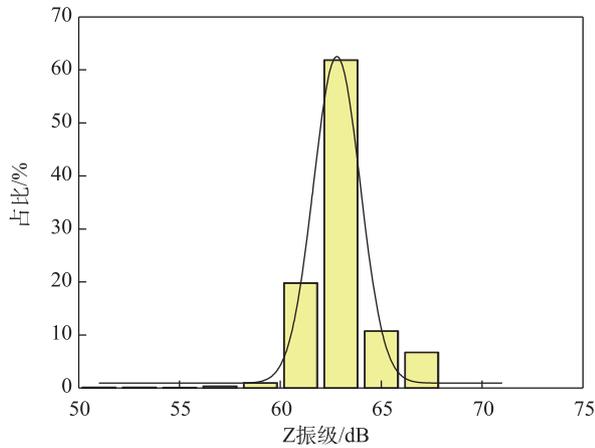
综上所述, 速度增大后地板振动增大的主要原因是速度增大后地板振动在 20.0~63.0 Hz 频段内振动加速度级增大, 其中, 影响最大的是 31.5 Hz 处; 同振动加速度级一样, 速度增大后二次结构噪声声压级在 31.5 Hz 处有显著增大, 但在其主要频率附近的其他频段内, 声压级并没有明显增大。速度增



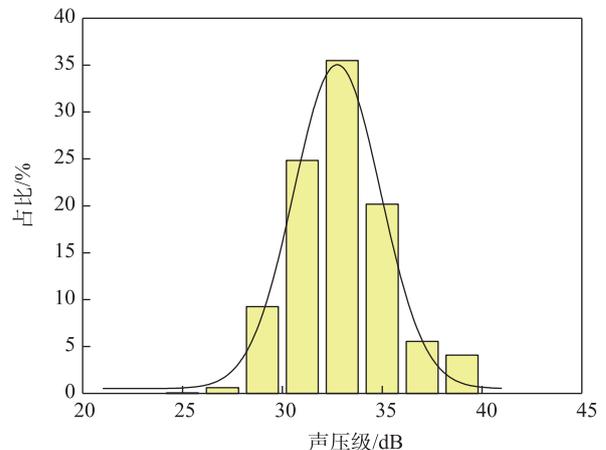
(a) 运行速度为 40 km/h 时 Z 振级分布



(a) 运行速度为 40 km/h 时声压级分布



(b) 运行速度为 160 km/h 时 Z 振级分布



(b) 运行速度为 160 km/h 时声压级分布

图 18 不同速度振动 Z 振级分布对比图

Fig. 18 Comparison diagram of Z-level distribution of vibration at different speeds

图 19 不同速度二次结构噪声声压级分布对比图

Fig. 19 Comparison diagram of structure born noise distribution at different speeds

大后室内二次结构噪声无明显增大。

3.3 监测数据统计分析

不同速度下振动 Z 振级正态分布统计对比图如图 18 所示。运行速度为 160 km/h 时 60.00 dB 以下的振动数据明显减少,而 60.00~65.00 dB 的振动数据增多。运行速度为 40 km/h 时,列车诱发室内地板振动受车辆状态、轨道状态、载客量等因素影响较大,40 km/h 时振动 Z 振级整体分布较为分散,而 160 km/h 时分布更为紧密、数据离散性更小。

不同速度下室内二次结构噪声声压级正态分布统计对比图如图 19 所示。由于噪声数据受速度增大的影响较小,数据并没有明显增多,但运行速度为 160 km/h 时噪声数据分布紧密度更高。在该速度时噪声数据在 25.00~35.00 dB 分布较提速前无显著变化,而在 35.00~40.00 dB 分布有所减少。

4 结论

对某 160 km/h 市域快线沿线建筑物进行了室内振动和二次结构噪声进行了长期监测,通过对长期监测数据的分析得到如下结论。

1) 室内振动频谱分析结果表明,列车诱发室内振动能量主要集中在 25.0~125.0 Hz 频段内,在 50.0 Hz 处幅值最大为 54.0 dB。并且在各频段均具有一定的离散性,其中,在 25.0~125.0 Hz 频段内,分频振级离散程度较其他频段更低,在这一频段内,列车诱发室内振动受环境振动影响较小。

2) 列车诱发室内二次结构噪声在各频段分频声压级的离散性要明显大于列车诱发室内振动分频振级的离散性,二次结构噪声与背景噪声的差异主要集中在 31.5~125.0 Hz 频段内。

3) 列车诱发室内振动分频振级与二次结构噪声分频声压级在 31.5~100.0 Hz 频段内相关性较大, 速度增大后振动与二次结构噪声相关性并没有显著提高, 但振动与二次结构噪声监测数据离散程度有所减少。

4) 列车速度增大后振动分频振级在 20.00~50.00 Hz 频段内均有所增大, 而二次结构噪声声压级仅在 31.50 Hz 处增大, 在其他频段还有所减少。因此, 速度增大后振动较提速前显著增大, 而二次结构噪声无显著增大。

参考文献:

- [1] 欧阳滔, 刘庆杰, 罗信伟, 等. 快速地下线振动源强特性实测分析[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(3): 55-64.
OUYANG T, LIU Q J, LUO X W, et al. Measured characterisation of vibration source strengths for express underground lines[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(3): 55-64.
- [2] 周德豪. 某 160 km/h 市域快速轨道交通地下线环境振动特性试验研究[J]. 铁道标准设计, 2024, 68(8): 202-208.
ZHOU D H. Experimental study on environmental vibration characteristics of a 160 km/h urban rail rapid transit underground line[J]. Railway Standard Design, 2024, 68(8): 202-208.
- [3] 李平. 时速 160 km 市域快线轨道减振设计研究[J]. 铁道建筑技术, 2019(4): 33-37.
LI P. Design research on track vibration reduction for urban rapid rail transit with the speed of 160 km/h[J]. Railway Construction Technology, 2019(4): 33-37.
- [4] 刘长卿, 车驰东, 吴庞. 地铁振动对地面建筑物影响的数值分析与测试[J]. 噪声与振动控制, 2013, 33(3): 188-193.
LIU C Q, CHE C D, WU P. Numerical analysis and experimental investigation of the effects of subway vibration on ground building subway vibration on ground building[J]. Noise and Vibration Control, 2013, 33(3): 188-193.
- [5] 王谊, 何华凤, 徐赞. 城市轨道交通振动噪声治理技术研究综述[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(6): 216-219.
WANG Y, HE H F, XU Z. Research review on urban rail transit vibration noise treatment technology[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(6): 216-219.
- [6] 高鑫. 城市轨道交通地下线环境振动协同控制技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
GAO X. Research on environmental vibration cooperative control technology of urban rail transit underground line[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.
- [7] 王福文, 冯爱军. 2022 年我国城市轨道交通数据统计与发展分析[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(3): 521-528.
WANG F W, FENG A J. Statistics and development analysis of urban rail transit in China in 2022[J]. Tunnel Construction (Chinese and English), 2023, 43(3): 521-528.
- [8] 邹超, 冯青松, 何卫. 列车运行引起地铁车辆段与上盖建筑环境振动研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(1): 27-46.
ZOU C, FENG Q S, HE W. Research review on environmental vibrations in metro depot and over-track buildings induced by train operation[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(1): 27-46.
- [9] ZOU C, WANG Y, WANG P, et al. Measurement of ground and nearby building vibration and noise induced by trains in a metro depot[J]. Science of The Total Environment, 2015, 536: 761-773.
- [10] 马蒙, 张厚贵. 城市轨道交通环境振动对人体影响的暴露-响应关系研究现状[J]. 噪声与振动控制, 2021, 41(1): 1-5.
MA M, ZHANG H G. Research advance of the exposure-response relationship between railway vibration and human comfort[J]. Noise and Vibration Control, 2021, 41(1): 1-5.
- [11] 孙成龙. 高速铁路地下线环境振动预测与控制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
SUN C L. Prediction and control study on environmental vibration of underground lines in high-speed railway[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [12] 张志峰. 高速铁路地下线引起的环境振动及周期排桩隔振措施研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2023.
ZHANG Z F. Research on environmental vibration caused by underground high-speed railway line and vibration isolation measures of periodic piles[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023.
- [13] 齐少轩, 任娟娟, 巫江, 等. 竖曲线桥上带减振扣件整体道床轨道动力学特性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(1): 314-320.
QI S X, REN J J, WU J, et al. Analysis on dynamic characteristic of monolithic track bed with damper fastener on vertical curve bridges[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(1): 314-320.
- [14] 刘健美, 赵峻鹏, 侯爽. 高速地铁列车竖向振动特性分析[J]. 地震工程与工程振动, 2023, 43(4): 245-250.

- LIU J M, ZHAO J P, HOU S. Analysis of vertical vibration characteristics of high speed subway train[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2023, 43(4): 245-250.
- [15] 刘新军. 考虑地面动荷载的地铁运行隧道结构安全分析[J]. 西安科技大学学报, 2017, 37(2): 171-177.
LIU X J. Safety analysis of the tunnel structure during metro operation with ground dynamic load taken into account[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2017, 37(2): 171-177.
- [16] 姚锦宝. 考虑土-结构动力相互作用的轨道交通引起的环境振动及隔振措施研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
YAO J B. Study on the train-induced environment vibrations and isolation measures considering soil-structure interaction[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.
- [17] 雷晓燕, 王全金, 圣小珍. 城市轨道交通环境振动与振动噪声研究[J]. 铁道学报, 2003, 25(5): 109-113.
LEI X Y, WANG Q J, SHENG X Z. Study on environmental vibration and vibration noises induced by the urban rail transit system[J]. Journal of the China Railway Society, 2003, 25(5): 109-113.
- [18] 郝影, 宋欣爽, 张磊, 等. 城市轨道交通地下段引起居民室内振动的频谱特性分析[J]. 中国环境监测, 2022, 38(2): 136-142.
HAO Y, SONG X S, ZHANG L, et al. Frequency spectrum analysis of indoor vibration caused by underground section of urban rail transit[J]. Environmental Monitoring in China, 2022, 38(2): 136-142.
- [19] 马蒙, 刘维宁, 刘卫丰. 列车引起环境振动预测方法与不确定性研究进展[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(3): 1-16.
MA M, LIU W N, LIU W F. Research progresses of prediction method and uncertainty of train-induced environmental vibration[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(3): 1-16.
- [20] 李明航, 马蒙, 刘维宁, 等. 地铁列车振动源强离散机理测试分析[J]. 振动、测试与诊断, 2020, 40(4): 738-744.
LI M H, MA M, LIU W N, et al. Analysis mechanism of vibration source dispersion induced by metro trains through in-situ test[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(4): 738-744.
- [21] LIANG R, LIU W, LI W, et al. A traffic noise source identification method for buildings adjacent to multiple transport infrastructures based on deep learning[J]. Building and Environment, 2022, 211: 108764.
- [22] LI C, LIU W, LIANG R. Identification of vertical wheel-rail contact force based on an analytical model and measurement and its application in predicting ground-borne vibration[J]. Journal of the International Measurement Confederation, 2021, 186: 110182.
- [23] JONES S, KUO K, HUSSEIN M, et al. Prediction uncertainties and inaccuracies resulting from common assumptions in modelling vibration from underground railways [J]. Journal of Rail and Rapid Transit, 2012, 226(5): 501-512.
- [24] LOMBAERT G, GALVÍN P, FRANÇOIS S, et al. Quantification of uncertainty in the prediction of railway induced ground vibration due to the use of statistical track unevenness data[J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 333(18): 4232-4253.
- [25] LIU Q J, XU L, FENG Q S. Intelligent monitoring of vibration and structural-borne noise induced by rail transit [J]. Intelligent Transportation Infrastructure, 2023, 2: liad013.



第一作者: 翟利华(1978—),男,教授级高级工程师,博士,研究方向为城市轨道交通工程设计。E-mail:zhailihua@gm-di.com。



通信作者: 肖军华(1980—),男,教授,博士生导师,研究方向为铁路和城市轨道交通线路变形控制。E-mail:jhxiao@tongji.edu.cn。

(责任编辑:姜红贵)