

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2026.03.005

交通振动传播衰减规律的神经网络 预测模型与试验研究

高冬平

(中铁建国际工程咨询(福州)有限公司,福建福州350000)

摘要: 交通荷载引起的环境振动会影响建筑物安全和人居环境。其传播与衰减受车辆、路面和土体多因素共同控制。结合模型土箱试验、道路实测、有限元模拟和SSA-BP神经网络,研究交通荷载作用下场地振动传播与衰减规律。研究表明:在8~15 Hz激振范围内,10~15 Hz振动加速度随距离衰减更明显,8 Hz振动衰减较缓;轿车、客车和货车在距路缘4 m处的竖向振动加速度峰值分别为0.016 29、0.034 61和0.066 57 m/s²;车辆越重,振动加速度峰值越大,但增长关系并非线性,主要与车辆悬架和轴距差异有关;三类车辆竖向振动主频分别为14.16、13.43和10.62 Hz。10~30 Hz成分随距离增加衰减较快,远场振动以0~10 Hz低频成分为主。有限元模拟与实测结果在加速度峰值衰减和频率分布上吻合较好。SSA-BP模型在模拟数据集测试中的平均绝对百分比误差分别为13.4%(峰值)和7.5%(主频);而在实际道路验证工况下,模型预测值与实测值的相对误差均小于6%,证明了该模型具有良好的泛化能力与工程适用性。

关键词: 振动衰减;模型土箱试验;交通振动实测;有限元模拟;频谱特性

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)03-0035-07

Vibration Characteristics of Model Soil Boxes and Roads under Traffic Load

GAO Dongping

(China Railway Construction International Engineering Consulting (Fuzhou) Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350000, China)

Abstract: Environmental vibration induced by traffic loads may affect building safety and the living environment. Its propagation and attenuation are jointly controlled by multiple factors, including vehicle characteristics, pavement conditions, and soil properties. In this work, model soil-box tests, field road measurements, finite element simulations, and a sparrow search algorithm-backpropagation neural network (SSA-BP) were combined to investigate the propagation and attenuation characteristics of site vibration under traffic loading. The results are as follows. Within the excitation frequency range of 8–15 Hz, vibration acceleration at 10~15 Hz attenuates more significantly with increasing distance, whereas the attenuation at 8 Hz is relatively gradual. The field measurement results indicate that the peak vertical vibration accelerations induced by passenger cars, buses, and trucks at a distance of 4 m from the road curb are 0.01629, 0.03461, and 0.06657 m/s², respectively. Heavier vehicles generate larger peak vibration accelerations; however, the increase is not linear, which is mainly attributed to differences in vehicle suspension systems and wheel-bases. The dominant vertical vibration frequencies of the three vehicle types are 14.16 Hz, 13.43 Hz, and 10.62 Hz, respectively. The frequency-domain results reveal that vibration components in the range of 10~30 Hz attenuate rapidly with increasing distance, while far-field vibration is dominated by low-frequency components within 0~10 Hz. The finite element simulation results agree well with the field measurements in terms of both peak acceleration attenuation and frequency distribution. The results further indicate that the SSA-BP model achieves mean absolute percentage er-

收稿日期:2025-12-12

修稿日期:2026-03-04

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52378495)

作者简介:高冬平(1972—),男,高级工程师,主要从事岩土工程设计与研究等方面工作。E-mail: gaodongping@ccecc.com.cn

rors of 13.4% for peak acceleration and 7.5% for dominant frequency in the simulated dataset tests. Under actual road validation conditions, the relative errors between the predicted and measured values are all less than 6%, demonstrating that the proposed model has good generalization capability and engineering applicability.

Keywords: vibration attenuation; model soil box test; traffic vibration field measurement; finite element simulation; spectral characteristics

交通荷载是车辆行驶过程中产生的移动作用力。该作用力经路面和路基传入土体,并进一步作用于周边建筑物。交通振动通常以低频和中频为主,可能引起结构疲劳、裂缝扩展和地基沉降,也会降低居住舒适性^[1]。因此,明确交通荷载作用下场地振动的传播与衰减规律,是建筑安全评估和振动控制的基础。

交通振动传播问题最早可归入弹性介质波动问题。Lamb^[2]研究了半无限弹性空间表面在竖向简谐荷载作用下的动力响应,为地表振动传播分析提供了理论基础。Miller等^[3]进一步分析了半无限固体中压缩波和剪切波的能量分配规律,说明不同波形在能量传递中的作用存在差异。Woods^[4]通过位移衰减曲线研究了土体中表面波的衰减规律,指出面波衰减慢于体波,是远场振动的重要组成部分。

随着交通工程的发展,研究对象逐渐从理想弹性半空间扩展到车辆、道路和土体耦合体系。Sheng等^[5]研究了移动荷载作用下轨道结构和地基参数对地面振动的影响。Hunt^[6]建立了交通荷载诱发地面振动的随机分析模型,考虑了车辆动力特性和道路结构参数的影响。Connolly等^[7]采用数值模拟分析了高速铁路路堤中地基振动传播特征,说明路基结构和土体刚度会显著影响振动幅值和传播范围。

国内研究多采用现场测试和数值模拟相结合的方法。夏禾等^[8]通过现场测试分析了列车运行对周围地面和建筑物振动的影响。杨果岳^[9]研究了车辆随机荷载与柔性路面的相互作用,建立了车辆荷载与路面动力响应之间的关系。朱利明等^[10]测试并分析了地铁运行对历史建筑的振动影响。宗刚等^[11]比较了建筑物建成前后地铁诱发场地振动响应的差异。张亚彬等^[12]基于地铁实测数据分析了上方建筑结构的振动响应规律。陈璠^[13]通过环境激励试验研究了场地振动衰减规律。许暮迪等^[14]和张新豪等^[15]进一步从舒适度角度分析了交通振动对建筑和桥梁使用性能的影响。

由于交通振源及其传播机制十分复杂,目前对振动传播规律的研究重要集中于原位试验和数值模拟,还需进一步深化考虑多因素影响。本文旨在构

建一种兼顾物理机理与计算效率的交通振动快速预测模型。研究逻辑如下:①利用模型土箱试验探索频率依赖型衰减规律;②通过有限元三维耦合模型模拟复杂路面工况,解决神经网络训练所需的大样本量问题;③引入麻雀搜索算法(SSA)优化BP神经网络,封装形成预测工具。研究的核心科学问题在于如何将小尺度物理规律与大规模数值样本融合,实现对复杂场地振动响应的精准映射。

1 交通振动试验测试

为了给后续数值模拟提供物理基准并确定关键频率敏感区间,本节首先通过模型土箱试验探索竖向荷载在受限土体空间内的基础传播特性,其研究结果将直接指导后续神经网络特征变量的筛选。为保证模型土箱试验结果的可靠性,参照《土工试验规程》(SL237—1999)和《铁路工程土工试验规程》(TB10102—2010)开展土体制备与参数测试。小尺度试验存在一定的边界效应和尺度效应,但其核心目的并非直接量化原型应力,而是利用受限空间内的受控变量定性揭示“频率-距离”的耦合衰减机制。这种定性规律在波动力学上具有普适性,可作为数值模拟机理验证的基础。试验过程中,土体采用分层填筑、逐层夯实的方法填入砂箱,以控制其密实度和均匀性;同时对各层土体的密度、含水率和动力学参数进行检测。测试结果为:模型土体密度为 $1\,340\text{ kg/m}^3$,含水率为7.3%,压缩波速和剪切波速分别为 234.8 、 134.6 m/s 。根据波动理论计算得到土体泊松比为0.26,弹性模量为 60.4 MPa 。

车辆荷载作为一种循环动荷载,具有一定振动频率和振幅,其作用力大小受汽车载重、车速、作用位置及路面平整度综合影响。通过模型土箱试验分析车辆荷载下不同频率在土体中振动衰减特性,由于交通荷载表现为中低频率特性,因此对振动产生影响的参数进行公式化处理,结合理论分析,建立适当模型来预测地面振动形式。将车辆荷载 $P(t)$ 视作若干半正弦波荷其表达式为:

$$P(t) = P_0 + P\sin(\omega t) \quad (1)$$

$$\omega = \frac{2\pi v}{L} \quad (2)$$

式中: P_0 为车辆静载; P 为荷载振动幅值; ω 为车载振动圆频率; v 为车辆行驶速度; L 为几何曲线的波长,一般取车身长。

根据《公路工程技术标准》,将道路混合车辆换算为普通家用汽车、城市公共汽车和载重货车三种标准车型进行计算。对应车辆全长 L 为 6.0、13.7、12.0 m,假设车辆行驶中速度 20、40、60、80、100、120、140、160 km/h。由此可得到由于车速所产生的振动频率集中在前 10 Hz。由于交通荷载集表现为中低频率特性,由车速对振动频率的影响多集中在低频上,由路面不平顺对车辆振动所产生的频率多集中在中频区间,为能更好的反应振动衰减特性本节考虑速度及路面不平顺等影响,选取 4 种频率进行振动土箱试验。试验模型及荷载加载图如图 2 所示,对应激振工况如表 1 所示。

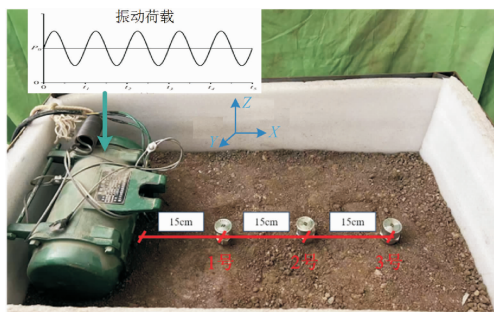


图 1 测点布置图

表 1 激振工况表

| 编号 | 激振频率/Hz | 激振力/N |
|----|---------|-------|
| 1 | 8 | 19.2 |
| 2 | 10 | 30.0 |
| 3 | 12 | 43.2 |
| 4 | 15 | 67.4 |

模型土箱 Z 向加速度及主频测试如图 2 所示,由图 2(a)可知,模型土箱在 8、10、12 和 15 Hz 激振下,三个测点识别得到的主频基本保持不变,且与输入频率一致。说明在 15~45 cm 传播范围内,土体没有改变振动的主导频率,振动传播主要表现为幅值衰减,而不是频率漂移。由图 2(b)可知, Z 向振动加速度幅值随传播距离增加而减小。不同频率的衰减幅度存在明显差异。15 Hz 工况的初始响应最大,但衰减也最明显;12 和 10 Hz 工况次之;8 Hz 工况幅值较小,且随距离变化较缓。这说明高频振动在近场更容易激发较大的加速度响应,但其传播能力较弱。其原因在于,高频波长较短,传播过程中更

易受土颗粒间摩擦、孔隙结构和材料阻尼影响,能量耗散更快。低频振动波长较长,对局部非均质性的敏感性较低,因此衰减较慢。

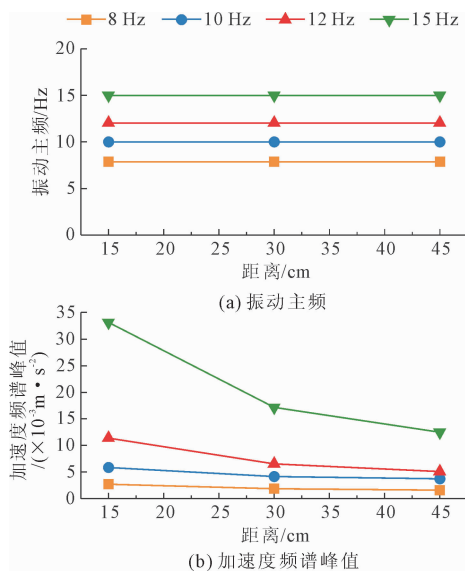


图 2 模型土箱 Z 向加速度及主频测试

图 3 进一步给出了 Z 向振动加速度峰值的距离衰减规律。各频率工况下,加速度峰值均随距离增加而降低,说明土体对交通振动具有明显的空间衰减作用。在 15 cm 测点处,加速度峰值随激振频率增大而增大,15 Hz 工况峰值最高。这与输入动荷载水平和土体惯性响应有关。频率越高,单位时间内荷载变化越快,土体颗粒需要产生更大的加速度以跟随外部激励,因此近场峰值更大。从衰减形态看,15 Hz 工况由近场到远场下降最明显,表现出强烈的能量耗散特征。12 和 10 Hz 工况也呈下降趋势,但衰减幅度相对较小。8 Hz 工况峰值始终处于较低水平,且沿距离变化较弱。该现象说明,交通振动中的高频成分主要控制近场响应,低频成分更容易向远场传播。

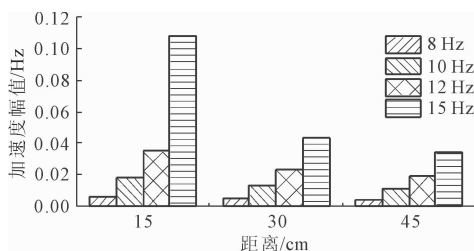


图 3 模型土箱 Z 向振动加速度峰值衰减曲线

2 振动传播数值模拟和数据集构建

由于模型土箱存在尺度效应且实测工况有限,

难以满足神经网络训练所需的泛化性要求。因此采用文献[17]实测数据验证 ABAQUS 三维耦合模型的可靠性,进而通过多参数正交组合构建覆盖典型交通场景的大规模训练数据集。振动测试共布置 5 个测点,测点均位于精密测试建筑区域至道路方向的垂线上。根据现场实际地形,5 个测点距道路边缘的距离分别为 5、29、70、90 和 125 m。典型车辆工况选取质量为 32 t 的重载汽车,车辆通过速度为 30~40 km/h。在此基础上,采用 ABAQUS 建立移动车辆荷载-行驶路面-土体三维耦合有限元模型,并将模拟结果与文献[17]实测结果进行对比。文献[17]详细记录了重载汽车(32 t)作用下的场地振动响应,其测点布置涵盖了距路缘 5~125 m 的宽广范围,提供了完整的远近场衰减序列数据,而且该文献数据源于高标准的原位测试,其地质条件与建模参数交代详实,具有极高的参考价值 and 可比性。

模型几何和计算区域如图 4 所示。在有限元建模过程中,为确保计算精度并真实模拟半无限空间场地的动力边界,本文对模型细节进行了如下严格设定:首先,土体计算域确定为 100 m×100 m×30 m,为有效消减人工边界处的波动反射,模型四周及底部均布置了三维八节点线性单向无限单元(CIN3D8)。其次,在网格划分方案中充分考虑了波动传播的分辨率要求,网格尺寸 h 严格遵循 $h \leq \lambda_{\min} / (8 \sim 10)$ 准则(其中 λ_{\min} 为土体中最小剪切

波长);为此,对路面下方的近场区域网格进行细化处理,尺寸设定为 0.25 m,并向远场以 2 m 的梯度逐步过渡。在动力参数设定方面,土体阻尼比取为 0.003,计算步长选取为 0.001 s,经校验满足 Courant 稳定性条件,确保了对高频成分捕捉的准确性。最后,路面不平顺度依据《机械振动 道路路面谱测量数据报告》^[16](GB/T 7031—2005),通过逆傅里叶变换生成 A~D 级随机路面谱作为激振源输入;车辆轮胎与路面之间构建了面-面耦合接触模型,其法向遵循“硬”接触准则,切向则采用库仑摩擦定律以模拟真实的能量传递机制。

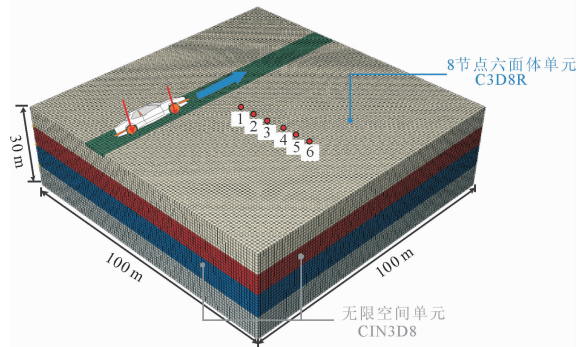


图 4 三维土体模型图

车辆模型采用三轴重载汽车半车模型。车体节点和车轮节点采用质量单元,悬架和轮胎采用弹簧-阻尼单元。模型考虑车体沉浮、点头运动和三轴轮胎垂向振动。重载汽车计算参数见表 2。

表 2 重载汽车计算参数

| 前轴簧上 刚度 K_{c1} $/(N \cdot m^{-1})$ | 前轴簧上 阻尼 C_{c1} $/(N \cdot s \cdot m^{-1})$ | 第 2,3 轴簧上 刚度 $K_{c2,3}$ $/(N \cdot m^{-1})$ | 第 2,3 轴簧上 阻尼 $C_{c2,3}$ $/(N \cdot s \cdot m^{-1})$ | 前轴簧下 刚度 K_{t1} $/(N \cdot m^{-1})$ | 前轴簧下 阻尼 C_{t1} $/(N \cdot s \cdot m^{-1})$ | 第 2,3 轴簧下 刚度 $K_{t2,3}$ $/(N \cdot m^{-1})$ | 第 2,3 轴簧下 阻尼 $C_{t2,3}$ $/(N \cdot s \cdot m^{-1})$ |
|--|--|---|---|--|--|---|---|
| 242604 | 2190 | 1903172 | 7882 | 875082 | 2000 | 3503307 | 4000 |

图 5 给出了不同距离处振动加速度有效值的实测结果与有限元模拟结果。整体来看,模拟结果与测试结果变化趋势一致,均表现为随距道路距离增加而逐渐减小。5 m 处振动响应最大,测试值为 6.54 mm/s²,模拟值为 6.83 mm/s²。当距离增加至 70 m 时,测试值降至 3.09 mm/s²,模拟值降至 2.66 mm/s²。在 125 m 处,测试值和模拟值分别为 1.66 mm/s²。振动衰减主要发生在近场区域。5~70 m 范围内,振动加速度有效值下降明显。其原因是车辆荷载产生的波动在土体中向外传播时,能量随传播面积扩大而发生几何扩散,同时土体材料阻尼不断消耗振动能量。70 m 之后,衰减速率降低,曲线趋于平缓。这说明高频成分在近场已被明显削弱,

远场响应主要由低频成分控制。

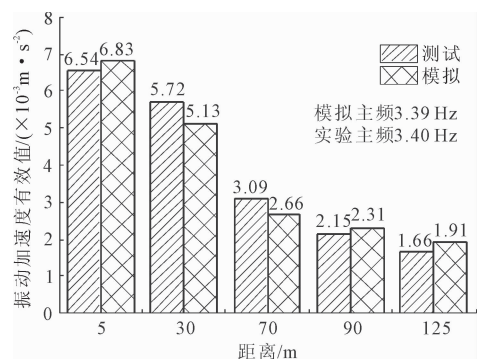


图 5 振动加速度有效值对比图

模拟值与测试值在部分测点存在差异。5、90 m

处模拟值略高于测试值,29、70 m处模拟值略低于测试值。差异可能来自现场土层空间不均匀性、轮胎-路面接触状态波动、车辆速度波动,以及现场地形和边界条件的简化。总体而言,有限元模型能够反映振动加速度随距离衰减的主要规律,可用于后续样本数据构建和 SSA-BP 模型训练。

为获得充足训练样本,基于验证后的 ABAQUS 三维有限元模型开展多工况计算。模型考虑土体剪切波速、弹性模量、密度、阻尼比、路面等级、车重和车速等因素。模型工况见表3。数据集构建采用全因子正交组合设计方法,以确保参数空间的全面覆盖。样本集涵盖了不同土层性质(波速 113~316

m/s)、城市道路到高速公路(路面等级 A~D)、轻型轿车到重载货车(2~32 t)以及低速到高速(20~160 km/h)的完整跨度。每组有限元模型沿水平扩散方向每隔 2 m 提取一个特征点,共记录 25 个位置的动态响应。96 000 组数据并非简单重复,而是通过对不同土层刚度、路面平顺度、载重速度组合下的非线性响应进行离散化采样所得。这种多参数深度耦合的样本构建方式,确保了神经网络在面对不同工程地质条件和交通流特征时,具有良好的物理代表性与泛化能力。同时为降低过拟合风险,样本按 80%、10% 和 10% 的比例随机划分为训练集、验证集和测试集。

表3 模型工况表

| 土体剪切波速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | 土体弹性模量/MPa | 土体密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 土体阻尼比 | 路面等级 | 车重/t | 车速/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$) |
|---|------------|--|-----------|---------|------------------|--|
| 113.2 | 50 | 1500 | 0.01~0.15 | A/B/C/D | 2/10/20/24/28/32 | 20/40/60/80/100/120/140/160 |
| 150.4 | 100 | 1700 | 0.01~0.15 | A/B/C/D | 2/10/20/24/28/32 | 20/40/60/80/100/120/140/160 |
| 201.2 | 200 | 1900 | 0.01~0.15 | A/B/C/D | 2/10/20/24/28/32 | 20/40/60/80/100/120/140/160 |
| 270.7 | 400 | 2100 | 0.01~0.15 | A/B/C/D | 2/10/20/24/28/32 | 20/40/60/80/100/120/140/160 |
| 316.8 | 600 | 2300 | 0.01~0.15 | A/B/C/D | 2/10/20/24/28/32 | 20/40/60/80/100/120/140/160 |

3 SSA-BP 神经网络预测模型

SSA-BP 神经网络是在 BP 神经网络中引入麻雀搜索算法形成的优化模型。BP 神经网络具有非线性映射能力,可描述车辆荷载、路面不平顺、土体参数与振动响应之间的复杂关系。但 BP 网络初始权值和阈值通常随机确定,容易出现收敛慢和局部最优问题。麻雀搜索算法可对 BP 网络的初始权值和阈值进行全局优化,从而提高训练稳定性和预测精度。本文先通过模型土箱试验和文献实测数据验证有限元模型。随后,基于有限元模型构建车辆-路面-土体耦合振动数据集。样本数据经归一化处理,按训练集、验证集和测试集划分。SSA 以预测误差为适应度函数,搜索 BP 网络的最优权值和阈值。优化完成后,将最优参数赋给 BP 网络,用于振动加速度峰值和主频预测。具体算法流程如图6所示。本研究构建的 SSA-BP 模型结构细节如下:①网络拓扑:采用 7-15-2 结构,输入层包含土体剪切波速、弹性模量、密度、阻尼比、路面等级、车重、车速 7 个神经元;输出层为振动加速度峰值和主频 2 个神经元;②隐藏层设定:根据经验公式并经多次试算,确定隐藏层节点数为 15,激活函数采用 Tansig 函数,输出层采用 Purelin 函数;③训练参数:初始学

习率设定为 0.01,训练目标误差为 10^{-6} ,最大迭代次数设置为 1 000 次。SSA 种群规模为 30,最大迭代次数为 50 次,安全阈值为 0.8。

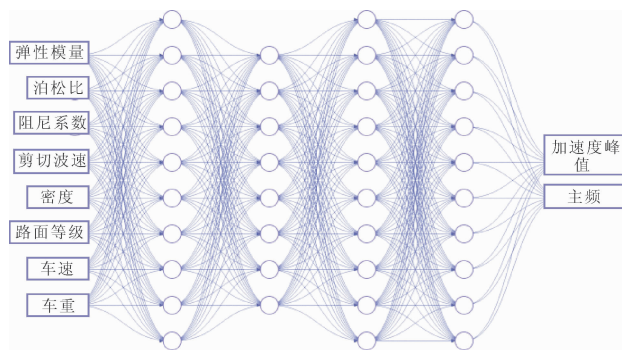


图6 SSA-BP 神经网络模型框图

图7给出了 SSA-BP 神经网络模型在测试集上的预测结果。横坐标为真实值,纵坐标为预测值。图7(a)中,振动加速度峰值预测点整体分布在 $y=x$ 附近,说明模型能够较好拟合车辆荷载、路面不平顺和土体参数与振动强度之间的非线性关系。低幅值区间内散点更集中,高幅值区间内离散程度略有增加。这是因为高幅值振动通常对应更强的车辆激励或较弱的土体耗能条件,输入参数耦合更明显,导致预测不确定性增加。图7(b)中,主频预测值也基本

沿 $y = x$ 分布,说明模型能够识别交通振动的主要频率特征。与加速度峰值相比,主频散点呈现一定带状分布。这主要与主频提取方式有关。主频由频谱峰值确定,属于离散频率特征;当车辆参数、路面等级或土体动力参数变化时,频谱峰值可能在相邻频带间切换,因此散点分布不如加速度峰值连续。

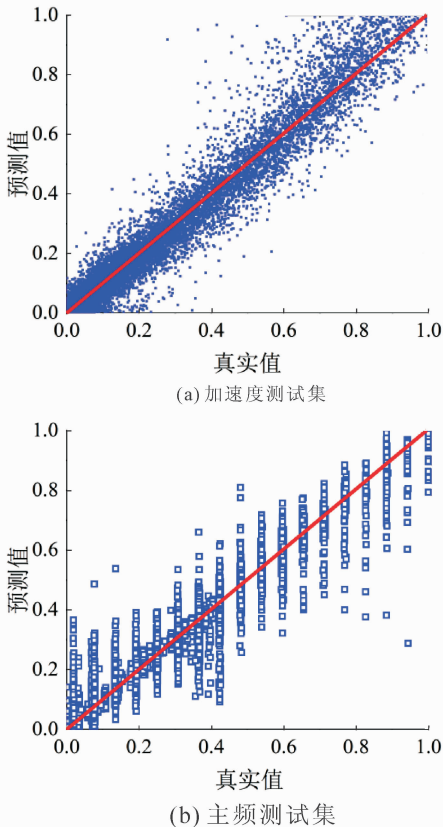


图 7 SSA-BP 神经网络模型预测与实际值的振动加速度峰值和主频之间的比较

误差统计结果表明,振动加速度峰值预测模型的均方根误差为 0.001,平均绝对误差为 0.000 7,决定系数 R^2 为 0.939 6,平均相对误差为 13.4%。振动主频预测模型的均方根误差为 0.130 9,平均绝对误差为 0.075 3,决定系数 R^2 为 0.959 7,平均相对误差为 7.5%。两类预测结果的 R^2 均大于 0.9,说明模型具有较好的拟合精度。加速度峰值的平均绝对百分比误差高于主频,主要是因为部分低幅值样本的真实值较小,较小的绝对误差也会放大相对误差。总体上,SSA-BP 模型可较好预测交通荷载作用下的振动加速度峰值和主频。需要说明的是,测试集中加速度峰值的平均绝对百分比误差(MAPE)为 13.4%,略高于实测验验证误差。这主要是由于在 9.6 万组大规模样本中,存在大量远场低幅值振动数据(真实值接近于 0),根据 MAPE 的数学定义,极

小的真实值作为分母会导致微小的绝对误差被成倍放大相对误差。实际上,在具有工程意义的中、高幅值区间内,模型的预测精度显著优于此全局平均值。

4 实际道路振动实测

为验证 SSA-BP 预测模型的准确性,本文通过道路现场测试验证预测模型的准确性和适用性。本次测试位置选取上海锦秋路与丰翔路之间的外环高速,沿道路垂线布置测点,分别距离道路边缘 4、8、12 m 布置三个测点,每个测点沿 X、Y、Z 三个方向放置三个传感器,X 向为南北方向(平行于道路的水平向),Y 向为东西方向(垂直于道路的水平向),Z 向为垂直路面方向(竖向)。测量每个测点的三个方向振动加速度,并通过测得数据对车致振动的影响进行评估。测点位置及布置图如图 8 所示。测试工况见表 4 所示。



图 8 测点位置图

表 4 现场道路测试工况表

| 编号 | 车辆类型 | 车速/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$) | 车重/t |
|----|------|--|------|
| 1 | 轿车 | 54 | 2 |
| 2 | 公共客车 | 54 | 10 |
| 3 | 货车 | 50 | 32 |

道路实测结果表明,轿车、公共客车和货车在 4 m 处的 Z 向振动加速度主频分别为 14.16、13.43 和 10.62 Hz。在车速接近时,轿车主频较高,货车主频较低。其原因是轿车轴距较小,通过测试路段时轮胎-路面激励频率较高;货车轴距较大,激励频率较低。Z 向振动频率主要集中在 30 Hz 以内。0~10 Hz 频段随距离变化较小,10~30 Hz 频段随距离增加下降明显。说明高频成分更容易被土体阻尼耗散,远场响应以低频成分为主。道路实测与预测振动加速度峰值误差对比见表 5。相较于前述涵盖极端工况的模拟测试集,本次实测验验证聚焦于常规交通行驶区间。由于实测数据幅值处于传感器最优量

程且信噪比较高,避免了模拟样本中极小值的数学放大效应。对比结果显示,针对轿车、客车、货车三种典型车型的相对误差范围为 4.49%~5.33%,均控制在 6% 以内。说明 SSA-BP 模型可用于道路交通振动加速度峰值预测。

表5 道路实测与预测振动加速度峰值误差对比表

| 项目 | 距离/m | 轿车/Hz | 客车/Hz | 货车/Hz |
|----------------------|------|---------|---------|---------|
| 实测振动 加速度峰值 | 4 | 0.01629 | 0.03461 | 0.06657 |
| | 8 | 0.01233 | 0.02517 | 0.04762 |
| | 12 | 0.01187 | 0.02395 | 0.04363 |
| SSA-BP 预测振 动加速度峰值 | 4 | 0.01723 | 0.03662 | 0.06872 |
| | 8 | 0.01342 | 0.02698 | 0.05023 |
| | 12 | 0.01198 | 0.02323 | 0.04156 |
| 误差/% | | 5.18 | 5.33 | 4.49 |

道路实测与预测主频误差对比见表 6。三类车辆的相对误差为 3.95%~5.24%,均小于 6%。说明 SSA-BP 模型能够捕捉交通振动的主要频率特征,可用于主频预测。

表6 道路实测与预测主频误差对比表

| 项目 | 距离/m | 轿车/Hz | 客车/Hz | 货车/Hz |
|-------------|------|-------|-------|-------|
| 振动实测主频 | 4 | 14.16 | 13.43 | 10.62 |
| | 8 | 14.16 | 11.59 | 10.62 |
| | 12 | 13.24 | 9.89 | 10.07 |
| SSA-BP 预测主频 | 4 | 14.52 | 13.72 | 11.56 |
| | 8 | 13.41 | 10.78 | 10.79 |
| | 12 | 12.7 | 10.54 | 10.21 |
| 误差/% | | 3.97 | 5.24 | 3.95 |

5 结论

通过整合物理模型试验、大规模数值仿真与 SSA-BP 神经网络算法,构建了交通振动传播衰减规律的预测与评价框架。研究实现了从基础物理机理识别到多因素耦合下振动响应定量映射的跨越,主要结论如下:

(1) 揭示了场地振动的频率敏感型衰减机制。模型土箱试验与道路实测共同表明,土体对交通振动具有明显的“低通滤波”效应:10~30 Hz 的高频成分在近场(<15 m)因材料阻尼产生剧烈能量耗散,衰减系数随频率增加显著增大;而 0~10 Hz 的低频成分表现出更强的远场传播能力,构成了远场振动的主要成分。

(2) 阐明了复杂因素影响下的场地动力响应规律。交通振动衰减由几何扩散与材料阻尼共同控

制,5~70 m 范围为振动能量的高速衰减区。车辆载重与振动幅值呈亚线性增长关系,这归因于车辆悬架系统的非线性阻尼特征以及重载下地基土动力刚度的局部强化。

(3) 构建并验证了数据驱动振动预测模型。基于 3 840 个有限元工况构建的大规模数据集,SSA-BP 神经网络能够精准捕捉土体参数、路面等级与车辆特征之间的非线性映射关系。尽管训练样本以数值模拟为主,但模型在实际道路场景测试中展现了良好的匹配性,峰值与主频预测误差均控制在 6% 左右。

(4) 提出了交通振动影响的快速评估方案。所建立的预测框架可作为交通规划初期场地振动评估的辅助工具。需要说明的是,受限于现场实测样本规模,该模型目前主要基于数值模拟数据集的物理规律总结,可为类似地质条件下的交通振动预估提供量化参考,但在针对极端复杂地层或特种车辆的预测时,仍需结合现场测试进行修正。

参考文献:

- [1] 周云. 交通荷载对周边建筑的振动影响分析[D]. 杭州:浙江大学,2005.
- [2] Lamb E H. On the propagation of tremors over the surface of an elastic solid[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1904,203(359-371):1-42.
- [3] Miller G F, Pursey H. On the partition of energy between elastic waves in a semi-infinite solid[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1955,233(1192):55-69.
- [4] Woods R D. Screening of surface wave in soils[J]. Journal of the Soil Mechanics & Foundations Division, 1968, 94:951-980.
- [5] Sheng X, Jones C J C, Petyt M. Ground vibration generated by a load moving along a railway track[J]. Journal of Sound & Vibration, 1999,228(01):129-156.
- [6] Hunt H E M. Stochastic modelling of traffic-induced ground vibration[J]. Journal of Sound Vibration, 1991, 144(01):53-70.
- [7] Connolly D, Giannopoulos A, Forde M C. Numerical modelling of ground borne vibrations from high speed rail lines on embankments[J]. Soil dynamics and earthquake engineering, 2013,46:13-19.
- [8] 夏禾,张楠,曹艳梅. 列车对周围地面及建筑物振动影响的试验研究[J]. 铁道学报,2004,26(04):93-98.
- [9] 杨果岳. 车辆随机荷载与柔性路面相互作用的研究[D]. 长沙:中南大学,2007.

安全系数满足要求兼顾危险截面位于仰拱的合理转动刚度上限值是 $50 (\text{MN} \cdot \text{m})/\text{rad}$ 。

(3) 预制构件宜优先采用“3+3”对称分块方式,同时具备衬砌受力安全、吊装运输便利以及接缝防水可靠等诸多优点。

(4) 通缝拼装衬砌受力优于错缝拼装,变形控制与接头转角劣于错缝拼装,基于运营稳定与工程耐久性的角度考虑,宜优先选择错缝拼装方式。

参考文献:

[1] 严金秀. 中国隧道工程技术发展 40 年[J]. 隧道建设(中英文),2019,39(04):537-544.

[2] 赵勇,田四明. 截至 2018 年底中国铁路隧道情况统计[J]. 隧道建设(中英文),2019,39(02):324-335.

[3] 田四明,王伟,杨昌宇,等. 中国铁路隧道 40 年发展与展望[J]. 隧道建设(中英文),2021,41(11):1903-1930.

[4] 张民庆,韩静玉,王水善,等. 隧道拱部衬砌混凝土浇筑结束控制标准研究[J]. 铁道工程学报,2021,38(09):29-33,47.

[5] 王丹. 拱顶脱空对隧道衬砌结构力学特性的影响分析[J]. 铁道建筑技术,2021(09):38-41,57.

[6] 宁小宝. 浅谈隧道衬砌脱空的成因与处治[J]. 建筑机械化,2022,43(02):47-50.

[7] 项一恒. 隧道拱顶衬砌脱空及欠厚对结构安全性影响

研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2022.

[8] 李乐乐,郝艳广,韩劲龙,等. 高速铁路隧道衬砌厚度不足对隧道结构安全性的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),2021,52(01):105-108.

[9] 周晓军,宁远思,杨昌宇. 矿山法施工双线铁路隧道二次衬砌拱部预制拼装结构的设计与工程应用[J]. 现代隧道技术,2022,59(04):204-217.

[10] 王嵩,谢运来,卿伟宸,等. 矿山法隧道拱部装配式衬砌结构设计研究[J]. 隧道建设(中英文),2022,42(S1):360-368.

[11] 周晓军,郭建,杨昌宇,等. 钻爆法双线铁路隧道预制拼装二次衬砌分块方式研究[J]. 现代隧道技术,2021,58(06):46-58.

[12] 杨宝,刘保林,曹林卫,等. 矿山法铁路隧道拱部预制衬砌接头选型设计研究[J]. 铁道标准设计,2021,65(10):179-183,204.

[13] 杨秀仁. 我国预制装配式地铁车站建造技术发展现状与展望[J]. 隧道建设(中英文),2021,41(11):1849-1870.

[14] 杨秀仁. 明挖地铁车站预制装配结构理论与实践[D]. 北京:北京交通大学,2020.

[15] 张胜龙. 铁路隧道预制装配式衬砌接头力学性能及选型研究[D]. 北京:中国铁道科学研究院,2020.

[16] 林志,郝理,李玉文,等. 钻爆法公路隧道装配式衬砌结构关键技术研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2020,39(03):107-112.

(上接第 41 页)

[10] 朱利明,王成龙,蓝天,等. 地铁运行引起的南京鼓楼振动测试与分析[J]. 建筑结构学报,2018,39(S1):291-296.

[11] 宗刚,郑玉琴,任晓崧,等. 建筑物对地铁引发场地振动影响的实测分析[J]. 工程力学,2018,35(S1):287-292.

[12] 张亚彬,秦学波,韩旭. 地铁运行引起上方建筑振动的现场实测与规律分析[J]. 河南科技,2020,39(29):119-121.

[13] 陈璠. 环境激励下的场地振动衰减规律试验研究[D]. 北京:北京建筑大学,2019.

[14] 许暮迪,张辉,花雨萌,等. 空间框架式客运车站振动舒适度分析[J]. 铁道科学与工程学报,2020,17

(10):2635-2641.

[15] 张新豪,孙昊,孙继梅. 基于车致振动响应的双层钢桁梁桥行人舒适性评价[C]//2023 世界交通运输大会(WTC2023)论文集(上册). 中国科学技术协会、交通运输部、中国工程院、湖北省人民政府,中国公路学会,2023:7.

[16] GB/T 7031—2005 机械振动 道路路面谱测量数据报告[S]. 北京:中国标准出版社,2005.

[17] Wang Hongzhen, Zhang Chunsheng, Jiang Jianqun. Vibration characteristics and isolation in vibration-sensitive areas under moving vehicle load[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022,153(02):107077.