DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.069
开放科学(资源服务)标识码OSID:

地铁振动下的轨道结构应力波传播特性

李杨[1],孔庆钊[1],杨霞[1],周杨彬[2],朱福钢[2]
(1.同济大学 土木工程学院,上海 200092; 2.浙江舜创智能光学科技有限公司,浙江 宁波 315400)

摘　要:在地铁运行过程中钢轨上产生的振动以应力波的形式沿着钢轨-轨底垫片-轨枕-道床-隧道-土体的路径传播。为探究传播路径中应力波的基础特性变化规律,在室内搭建一段地铁隧道钢轨模型,用激光多普勒测振仪测量试验模型不同部位的应力波信号,并通过扫描式测振仪获取钢轨不同表面应力波波场的真实传播过程;同时,采用有限元仿真软件LS-DYNA,从图像角度对应力波传播过程中的波场变化特征进行对比分析。结果表明:钢轨上由轮轨相互作用激励产生的应力波信号主要以25~400 Hz低频信号及1 400 Hz高频信号为主,最终传播至土体内的应力波信号主要集中在25~200 Hz低频范围;与实测数据对比发现,搭建的钢轨试验模型在动力性能方面与实际地铁隧道基本一致;信号数据分析及波场云图结果均显示,应力波的高频成分在从钢轨传播至混凝土轨枕的阶段衰减最明显,信号能量传递率也最低;通过对比激光多普勒测振仪实测与计算机仿真的应力波波场可知,可从图像层面直观验证计算机仿真方法的正确性;对于复杂介质和模型中的波场研究,可采用激光多普勒测振仪的实测结果替代计算机仿真结果。

关键词:地铁轨道;振动;应力波;波场变化;地铁隧道
中图分类号:U211.3　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**2096-6717(2026)04-0198-12

Stress wave propagation characteristics in track structures under subway vibrations

LI Yang[1], *KONG Qingzhao*[1], *YANG Xia*[1], *ZHOU Yangbin*[2], *ZHU Fugang*[2]
(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China; 2. Zhejiang Sunnyinnovation Optical Intelligence Technology Co., LTD., Ningbo 315400, Zhejiang, P. R. China)

Abstract: During the operation of a subway, vibrations generated on steel rails propagate in the form of stress waves along the path: rail-rail pad-sleeper-ballast-tunnel-soil. In order to investigate variations in the fundamental characteristics of stress waves along this propagation path, we constructed an indoor model of a subway tunnel with steel rails. A Laser Doppler Vibrometer (LDV) was used to measure stress wave signals at different locations of the experimental model, and a scanning LDV was employed to capture the real propagation process of stress waves on different surfaces of the steel rails. Finally, the finite element simulation software LS-DYNA was utilized to perform a comparative analysis of the changes in wave field characteristics during stress wave propagation from an image perspective. The research results indicate that the stress wave

收稿日期:2024-05-19
基金项目:上海市科委课题(21DZ1204400)
作者简介:李杨(1992-),男,博士生,主要从事结构振动研究,E-mail:Liyangtiantian@163.com。
杨霞(通信作者),女,博士生,E-mail:xiay@tongji.edu.cn。
Received: 2024-05-19
Foundation item: Project of Shanghai Science and Technology Commission (No. 21DZ1204400)
Author brief: LI Yang (1992-), PhD candidate, main research interest: structural vibration, E-mail: Liyangtiantian@163.com.
YANG Xia (corresponding author), PhD candidate, E-mail: xiay@tongji.edu.cn.

signals generated by the wheel-rail interaction on the steel rails are mainly characterized by low-frequency signals ranging from 25 to 400 Hz and high-frequency signals at 1 400 Hz. Conversely, the stress wave signals propagating into the soil primarily consist of low-frequency signals ranging from 25 to 200 Hz. A comparison between the measured data and test results of the experimental model demonstrates that the steel rail model exhibits dynamic performance consistent with the actual subway tunnel. The analysis of signal data and wave field contour maps both indicate that the high-frequency components of stress waves attenuate most rapidly during propagation from the steel rail to the concrete sleeper, exhibiting the lowest signal energy transfer rate. The comparison of stress wave fields from LDV measurement and computer simulation intuitively validates the accuracy of the simulation method from an image perspective. Additionally, this study suggests that LDV measurement results can serve as an alternative to computer simulation results for investigating wave fields in complex media and models.

Keywords: subway track; vibrations; stress waves; wave field variation; subway tunnel

自城市地铁轨道交通发展以来，地铁振动一直是伴随其发展的重要课题，也是振动研究领域的热点，众多学者已针对该问题开展了大量研究。黄强等[1]对地铁隧道内外土层振动开展全方位现场实测，系统探究了地铁振动在土体的空间传播规律；袁扬等[2]同样采用现场实测方法，对无外界振动干扰的小半径曲线地铁区间开展地面振动测试，结果表明，曲线段地铁振动频带较宽，地面振动幅值随距隧道中心线距离的增加呈波动性衰减；刘鹏辉等[3]对地铁隧道内不同轨道结构的减振性能开展现场振动测试，结果表明，轨道结构对高频振动的减振效果显著优于低频振动；曾志平等[4]采用数值模拟手段探究不同轨道类型下地铁振动的传递特征，系统揭示了地铁轨道的动力响应规律；张凌等[5]基于不同振动评价标准，采用统计学方法对地铁振动信号进行实测分析与综合评价，其研究成果为地铁振动的影响评估提供了参考；耿传智等[6]利用计算机仿真软件建立隧道-土体数值模型，重点分析了不同轨道结构区段的地表振动响应。

针对地铁运营引发的振动问题，现有研究主要集中在轨道结构、土体及周边设施的振动响应、信号频谱成分与衰减规律等方面，多采用宏观分析视角，相关成果主要服务于实际工程需求。总体而言，现有研究多围绕地铁振动频率等特征展开分析，同时针对地铁工程的减隔震措施开展探究，取得了诸多成果。但目前，关于地铁振动激励下应力波的传播与衰减机理、信号能量损耗特征等的研究仍较为匮乏。现场实测为地铁振动研究的重要手段，计算机仿真则可在一定程度上揭示相关作用机理。然而，针对地铁振动应力波开展室内模型试验，借助图像直观呈现其在轨道结构中传播、反射与绕射等规律的研究仍较为欠缺。

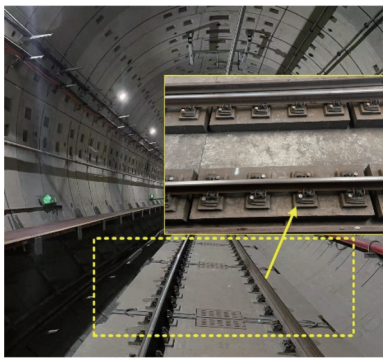
笔者以上海地铁隧道轨道为研究背景，在室内搭建地铁隧道-钢轨简化试验模型，采用激光多普勒测振仪（LDV）开展振动测试，结合多普勒信号与波场云图，直观再现地铁激励下应力波在钢轨-隧道壁-土体中的传播规律；同步建立计算机仿真分析模型，从波场图像视角探究应力波的动态传播与演化过程，进一步揭示地铁振动信号的传播特征与演变规律。

1　模型试验设计

1.1　试验装置设计

为真实模拟地铁车辆运行时在钢轨上激励产生的应力波信号特征，结合上海地铁隧道的实际情况，在室内搭建一个长度为1 800 mm的简易单轨试验装置，如图1所示。采用UIC60型重型钢轨，材质为高碳微钇PD_3钢；采用“科隆蛋”减振扣件，轨底放置橡胶垫板；按实际地铁隧道内的600 mm间距布置混凝土轨枕。钢轨两端各向外延伸300 mm，且两端不施加任何约束，以此减弱端头截面反射波的强度。采用T形螺栓与减振扣件对钢轨进行固定，其中T形螺栓的拧紧扭矩设定为300 N·m。将整套装置放置于盛满压实土体的试验箱上部，激振器作为激励源安装在钢轨顶面，且将激振器头部与钢轨轨头踏面顶紧；激振器在信号发生器和功率放大器的控制下输出振动激励信号，主要模拟地铁车辆经过时轮轨相互作用产生的垂向振动，暂不考虑轮轨水平接触振动的影响。混凝土轨枕用于模拟地铁隧道内的道床及隧道壁结构，土箱内的土体则用于模拟与地铁隧道衬砌管片外壁接触的土层环境。钢轨试验装置在一定程度上与实际地铁隧道结构在边界条件、轮轨相互作用激励产生的应力波方面仍存在一定差异，但考虑到激振器激励力度相对较小，应力波衰减速度较快，且主要对应力波在整个传导路径上的基础特性变化规律进行定性研

究,因此,上述差异带来的影响相对有限。为最大程度降低周围环境振动对试验数据的干扰,提升信号信噪比,模型试验均在振动仪器实验室内开展[7];同时,在土箱底部铺设60 mm厚的海绵以实现减振吸波效果,模拟低反射边界条件。



(a) 地铁隧道钢轨

(b) 简化钢轨试验装置

图1 试验装置

Fig. 1 Experimental setup

1.2 信号激励与采集

为方便准确描述测量方法与数据分析,对振动方向进行如下定义:钢轨纵向为X方向,横断面的水平方向为Y方向,竖直方向为Z方向,如图2(a)所示。

在试验过程中,采用信号发生器生成所需的激励信号,经功率放大器对该激励信号进行放大处理后,输入至激振器,由激振器输出对应频率的振动信号[8]。依据测点位置分布情况,将试验数据采集部位分为近振源和远振源2个测点区。为减少误差、提高信号信噪比,每个测点的振动数据均采集3次并取平均值;每次采集时,需手动调整激光头位置,确保激光垂直于测点所在平面,试验布置装置如图2(b)所示。

激振器在钢轨轨头踏面激励产生的应力波在经过不同介质时,其信号能量总会有不同程度的衰减。为有效测量土体表面的时域振动信号数据,选用高灵敏度非接触式激光多普勒测振仪进行振动信号采集,设备核心部件主要由高精密激光干涉仪与信号处理器组成。其中,干涉仪内激光器发射频率为F_0的偏振光,光束透过分光镜后分为测量光与参考光两路。参考光经过声光调制器后产生固定频移F;测量光聚焦至物体表面后,由物体振动引起测量光的频移$f=\frac{2V}{\lambda}$,随后系统收集的反射光与参考光在传感器表面汇聚并产生干涉现象,干涉信号的频率为F_0+F+f。最后,信号处理器将携带物体振动信息的频率信号转换为反映物体振动速度和位移的多普勒频移信号。依据测得的振动速度参数,理论上还可求得振动位移与加速度,位移关于时间t的函数可表示为

$$X(t)=A\sin(2\pi ft) \tag{1}$$

式中:A为振幅;f为振动频率。

振动速度可表示为

$$V(t)=2\pi fA\cos(2\pi ft) \tag{2}$$

振动加速度可表示为

$$a(t)=-(2\pi f)^2A\sin(2\pi ft) \tag{3}$$

该方法测量的基本原理如图2(c)、(d)所示。

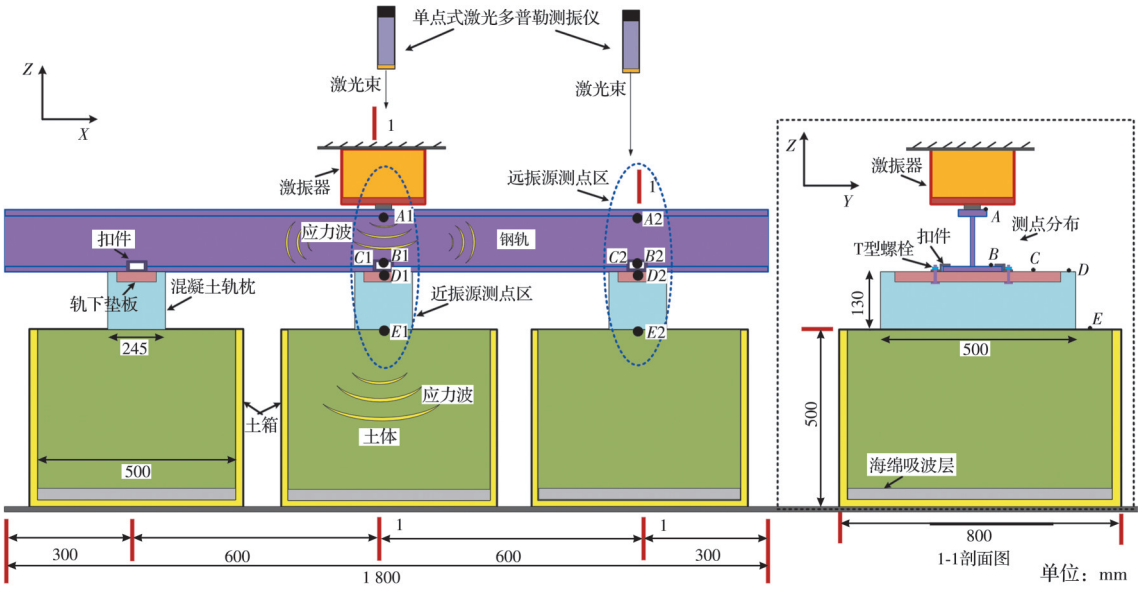
由于激振器输出激振力较小,为精准采集各部位振动信号,试验采用高灵敏度单点式红外激光多普勒仪,分别对同一剖面内钢轨、轨下垫板、混凝土轨枕及土体测点区域开展Z方向振动数据采集。该多普勒测振仪整体采用光纤传输信号,可发射波长为1 550 nm的测量激光,对测点振动速度的功率谱分辨率优于$0.01(\mu m/s)/\sqrt{Hz}$,最大测量速度为±24.5 m/s,频率测量范围为0~25 MHz。

1.3 试验流程与扫频激励方案

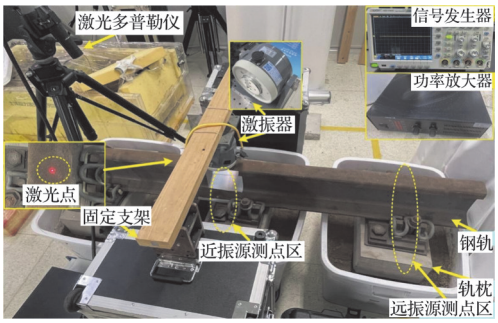
扫频试验是振动研究领域的重要试验方法。由于扫频过程中激励频率随时间持续变化,结构响应的频率成分也会随之改变。扫频试验结果可清晰反映结构在各激励频率下的响应水平,进而快速判定结构的动力特性。

为验证该试验装置能否完整模拟地铁运营工况下钢轨-隧道体系的动力响应特性以及激励作用产生的应力波信号变化规律,拟定试验流程为:首先,通过激振器在钢轨踏面顶部施加正弦扫频激励,扫描频率范围为20~1 500 Hz,扫频速率为3 kHz;采用单点式激光多普勒测振仪,以60 000采样率分别采集近振源与远振源区域各测点的振动数据,并将本次扫频试验结果与黄强等[1]的地铁现场实测数据开展对比分析。其次,基于扫频试验获取的结构响应主频,调节激振器按该主频施加单位正弦荷载,开展定频激励试验;同步采集各测点区振动数据,探究应力波信号沿钢轨-扣件-轨下垫板-混凝土轨枕-土体的全过程传播与衰减规律。

基于试验结果,采用有限元软件LS-DYNA对试验过程进行仿真建模与计算,以云图形式进一步探究应力波从钢轨到土体的完整传播过程;同时,采用扫描式激光多普勒测振仪对钢轨的横剖面及

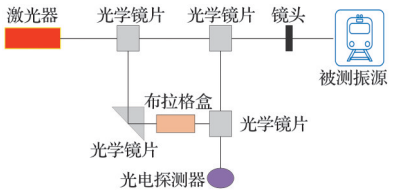


（a）试验装置示意图



（b）试验装置布设情况

（c）单点式激光多普勒测振仪



（d）激光多普勒测振仪基本原理

图 2　测点振动信号采集试验示意图

Fig. 2　Schematic diagram of vibration signal acquisition test at measuring points

侧表面进行扫描，获取应力波在钢轨上真实的传播特征，并与有限元计算云图进行对比验证。

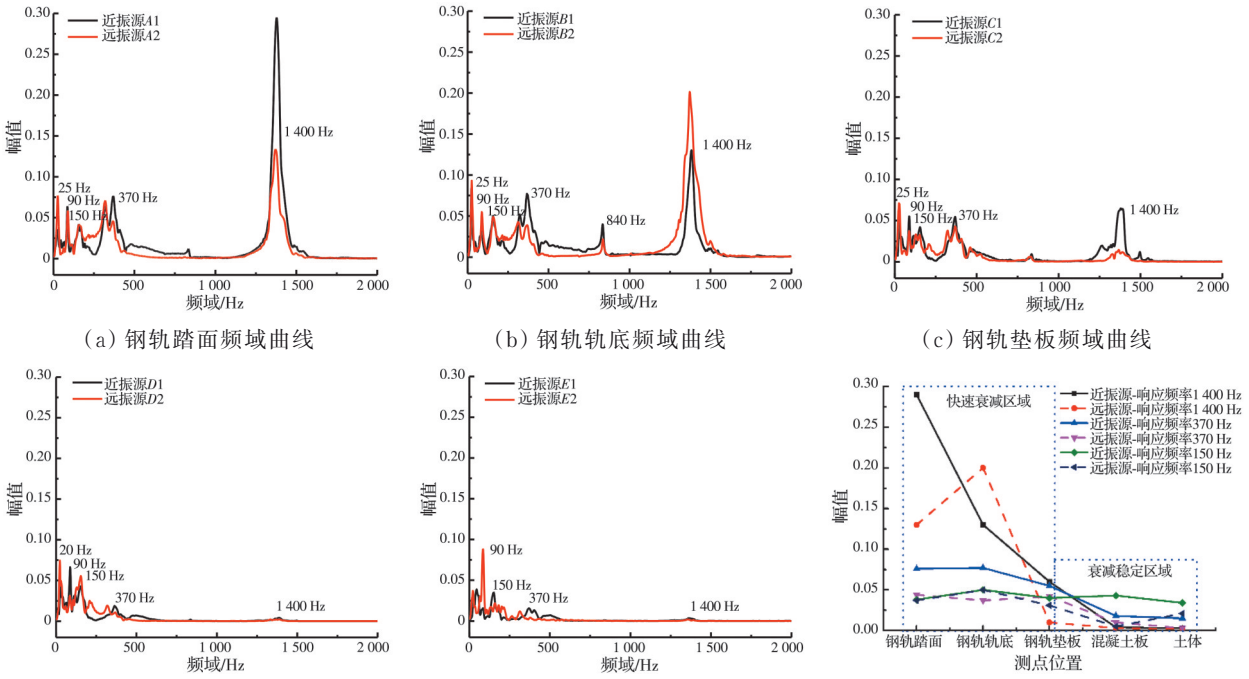
2　扫频试验结果分析

2.1　应力波传播过程中的频率特征

钢轨踏面部位的扫频频域结果如图 3(a)～(e)所示。从频谱响应规律来看，近振源与远振源区域各测点的扫频响应频率整体高度一致。其中，钢轨踏面应力波的特征频带主要集中在 25～400 Hz 低频及 1 400 Hz 高频附近[9]；钢轨轨底应力波的特征频带集中在 25～500 Hz 与 840、1 400 Hz 附近；钢轨垫板的特征频带集中于 25～500 Hz 及 1 400 Hz 附近；混凝土板的特征频带集中于 25～400 Hz；土体的特征频带集中于 25～200 Hz。而黄强等[1]的现场实测结果同样表明：地铁列车经过时，钢轨振动主频分布于 50～350 Hz 与 1 000～1 400 Hz 区间，道床及隧道壁的主频为 30～500 Hz，周围土层的主频集中于 20～200 Hz 之间。试验结果与现场实测规律高度吻合，表明室内简化地铁隧道结构模型可用于地铁隧道的动力学性能研究。

为对比分析低频、中频及高频激励条件下，近振源与远振源位置各部位响应信号的幅值衰减规律，提取图 3(a)～(e)中各频域曲线的最大幅值，并绘制幅值衰减曲线，如图 3(f)所示。从各测点主频幅值的衰减情况来看，在从钢轨踏面传播至钢轨垫板的过程中，主频为 1 400Hz 的高频成分衰减速度最快；其次是主频为 370 Hz 的中频成分；而处于 25～400 Hz 之间的低频成分最大幅值变化最不明显。这一现象充分体现了高频信号成分快速衰减的显著特征，且各信号成分的总体衰减规律与黄强等[1]的研究结果高度吻合，表明设计的试验装置所模拟的动力性能与实际地铁隧道基本一致。

总体上,在行驶过程中,地铁列车轮轨相互作用产生的应力波无论其频谱成分多么复杂,其中的高频成分在经过钢轨-轨底-垫板的传播中会快速衰减,最终传递至土体的应力波信号主要以100 Hz以内的低频成分为主。



(a) 钢轨踏面频域曲线 (b) 钢轨轨底频域曲线 (c) 钢轨垫板频域曲线

(d) 混凝土板频域曲线 (e) 土体频域曲线 (f) 信号响应频率幅值衰减曲线

图3 各测点时域和频域曲线

Fig. 3 Time-domain and frequency-domain curves at each measuring point

2.2 小波包分解方法处理数据

为进一步探究应力波在传播过程中不同频带信号的分布情况及频带内能量的传递规律,采用小波包分解方法,对各测点的应力波信号进行4层小波包分解,通过重构分解后的信号,提取各频带上的应力波能量值。

小波包分解法可在低频和高频段对微弱信号进行精细分解,实现对信号的多尺度、多分辨分析,基本操作步骤如下:

1)对采集的信号进行n层分解,每次分解均可得到对应的高频信号与低频信号,分解后共形成2^n个频带。其中,(i,j)表示第i层的第j个节点,设$X_{i,j}$为第(i,j)节点的小波包分解系数,其层次结构如图4所示。

2)对最下层小波包系数$X_{n,j}$进行信号重构,获得重构信号$S_{n,j}$;原始采集的信号可由重构信号叠加获得,其表达式为

$$S=S_{n,0}+S_{n,1}+S_{n,2}+\cdots+S_{n,2^n-1} \tag{4}$$

3)根据重构信号计算各子信号对应频段的能量值,其表达式为

$$E_{n,j}=\int\left|S_{n,j}\right|^2\mathrm{d}t=\sum_{j=1}^{2^n-1}\left|X_{n,j}\right|^2 \tag{5}$$

信号采集频率为12 000 Hz,经4层小波包分解后获得16个子信号,每个子信号的频带宽度为375 Hz,频带范围依次为0~375 Hz、375~750 Hz…5 625~6 000 Hz,各子频带信号能量计算结果如图5所示。从各频带信号能量的对比情况来看,近振源测点区域的钢轨踏面测点在1 125~1 500 Hz频带内的能量占比高达75%以上,而在0~375 Hz频带内的能量占比则不足10%;相反,土体上的测点在1 125~1 500 Hz频带内的能量占比接近0,而在0~375 Hz频带内的能量占比则高达90%。表明越靠近振源位置,信号能量越强,且信号中高频成分的占比越高[10];随着应力波沿钢轨-轨底垫片-轨枕-道床-隧道-土体的路径传播,高频成分会快速衰减,导致低频成分的信号占比持续攀升。从传播过程中的信号能量曲线变化来看,在传播至混凝土垫板时,1 000 Hz以上的高频信号成分能量已变得极其微

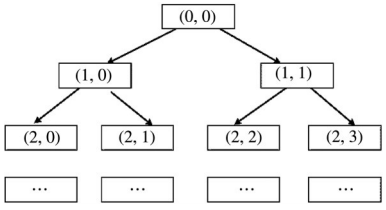
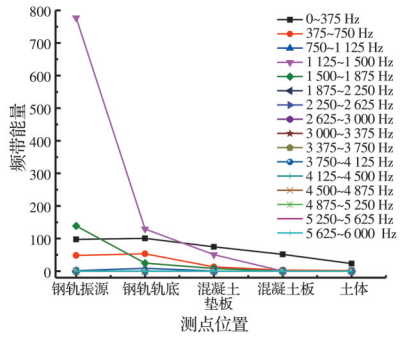
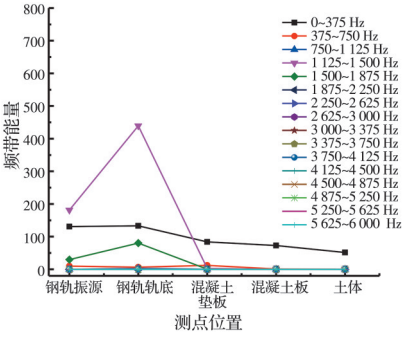


图4 小波包分解树形图

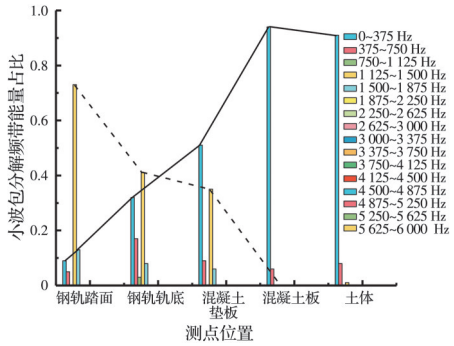
Fig. 4 Wavelet packet decomposition tree diagram



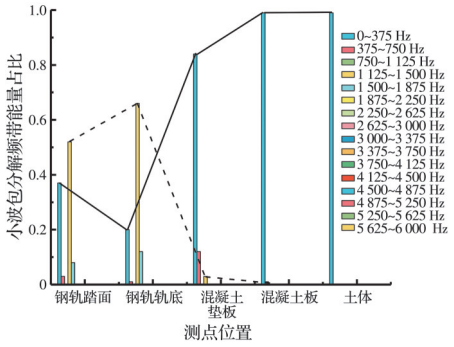
（a）近振源小波包分解频段能量



（b）远振源小波包分解频段能量



（c）近振源小波包分解频段能量占比



（d）远振源小波包分解频段能量占比

图 5　小波包分解频段能量分布图

Fig. 5　Energy distribution chart of frequency bands for wavelet packet decomposition

弱，难以继续向下传递。各频带信号能量占比柱状图进一步印证了这一结论，这也是地铁隧道壁及周围土体内难以监测到地铁列车激励产生高频应力波信号的重要原因。

3　定频激励试验

3.1　试验方案

为进一步分析应力波信号能量在传播路径中的衰减规律，结合室内隧道简易模型动力学响应主要集中在 90、370、1 400 Hz 频段的特点，按照确定的主频响应频段开展定频激励测试，重点分析应力波在钢轨-轨底垫片-轨枕-土体传播路径上的能量衰减规律。

3.2　激励信号

相关研究表明[11]，可采用激振力函数近似模拟地铁列车轮轨间的竖向激振力，如图 6 所示。该函数涵盖车辆振动性质、线路平顺性、车速、荷载组合及传递关系，可在一定程度上模拟车辆荷载，主要包括地铁列车载重的静荷载、多组正弦函数叠加的附加动荷载以及反映轨道波形磨耗和轨道不平顺的正弦振动荷载叠加而成的动荷载激励函数 $f(t)$，其基本表达式为

$$f(t)=P_0+P_1\sin(\omega_1 t)+P_2\sin(\omega_2 t)+P_3\sin(\omega_3 t) \tag{6}$$

式中：P_0 为车轮静荷载，kN。

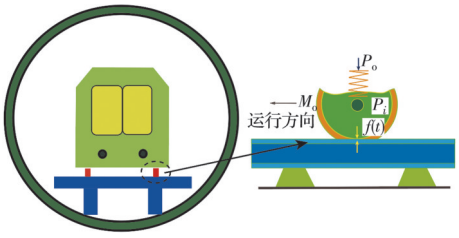


图 6　地铁轮轨相互作用力

Fig.6　Subway wheel-rail interaction force

动荷载峰值 P_i 计算式为

$$P_i=M_0\alpha_i\omega_i^2,\ i=1,2,3 \tag{7}$$

式中：M_0 为地铁列车弹簧下的质量，kg；α_i 为地铁车辆的不平顺振动矢高，取值见表 1；ω_i 为行驶速度下的不平顺振动波长圆频率，其计算式为

$$\omega_i=\frac{2\pi V}{L_i} \tag{8}$$

式中：V 为地铁行驶速度，m/s；L_i 为地铁车辆的不平顺振动波长，取值见表 1。

在静载工况下，普通 B 型地铁列车空车载重时，单轮轨相互作用力取 $P_0=70$ kN，弹簧下的质量为 $M_0=750$ kg；地铁车辆的不平顺振动波长及矢高的取值分别为 $L_1=10$ m、$\alpha_1=3.5$ mm，$L_2=2$ m、$\alpha_2=0.4$ mm，$L_3=0.5$ mm、$\alpha_3=0.08$ mm。

当前城市地铁列车速度一般为 30～80 km/h，假定列车按最大设计运行速度 80 km/h 行驶，则地铁车辆单个轮轨相互作用力 $f(t)$/kN 的函数表达

表1 轨道不平顺管理值

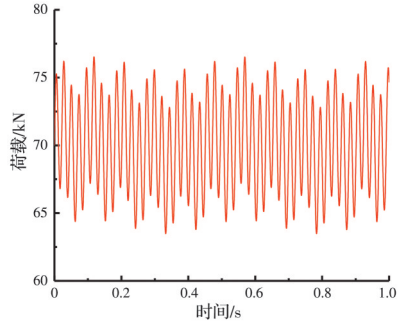
Table 1 Track irregularity management values

控制条件	波长/m	正矢/mm
行车平稳性(Ⅰ)	50	16
	20	9
	10	5
作用于线路上的动力附加荷载(Ⅱ)	5	2.5
	2	0.6
	1	0.3
波形磨损(Ⅲ)	0.5	0.1
	0.05	0.005

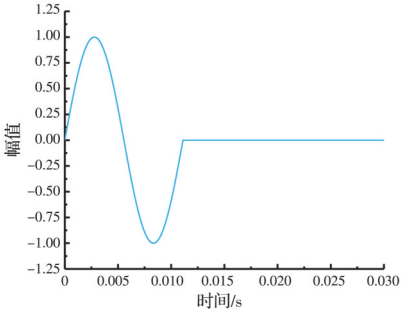
式为

$$f(t)=70+0.51\sin(13.9t)+1.46\sin(69.7t)+4.66\sin(278.8t) \quad (9)$$

相关时程曲线如图7所示。



(a) 地铁轮轨相互作用力时程曲线



(b) 单位正弦荷载

图7 激励信号

Fig. 7 Excitation signals

从推导计算的列车轮轨相互作用力函数形式来看,该函数由一系列不同频率的正弦函数叠加而成;同时,考虑到地铁列车激励产生的应力波信号通常具有较宽的频段,且不同地区、不同线路段的地铁运行激励产生的应力波信号特点存在一定差异。因此,为更好地分析应力波传播特性及信号特征的一般变化规律,结合任何复杂荷载形式均可由正弦荷载$f(t)=\sin(\omega t)$叠加表示的特性,同时采用单点式激光多普勒测振仪,分别对近振源区、远振源区的测点进行振动数据采集,采样频率为60 000。

3.3 应力波信号能量的传播结果分析

为研究应力波在传播路径上的衰减情况,引入响应能量传递率概念,其定义为:同一激励荷载作用下,信号能量通过系统前后的响应比值。从图8可知,在到达混凝土垫板之前,信号能量峰值下降曲线锐减;相较于钢轨踏面的信号能量,混凝土垫板处的应力波信号能量在90、370、1 400 Hz激励作用下的传递率分别为37.5%、12.5%、6.6%。受应力波频率与固体中晶格结构和分子相互作用方式的影响,钢轨位置的激励信号频率越高,应力波信号的能量传递率越低,信号能量的衰减程度越严重;而低频信号在各类介质间的穿透能力显著优于高频信号,进而导致地铁在运行中传播至土体的应力波信号频率主要集中在低频频带上[12]。

4 应力波传播云图

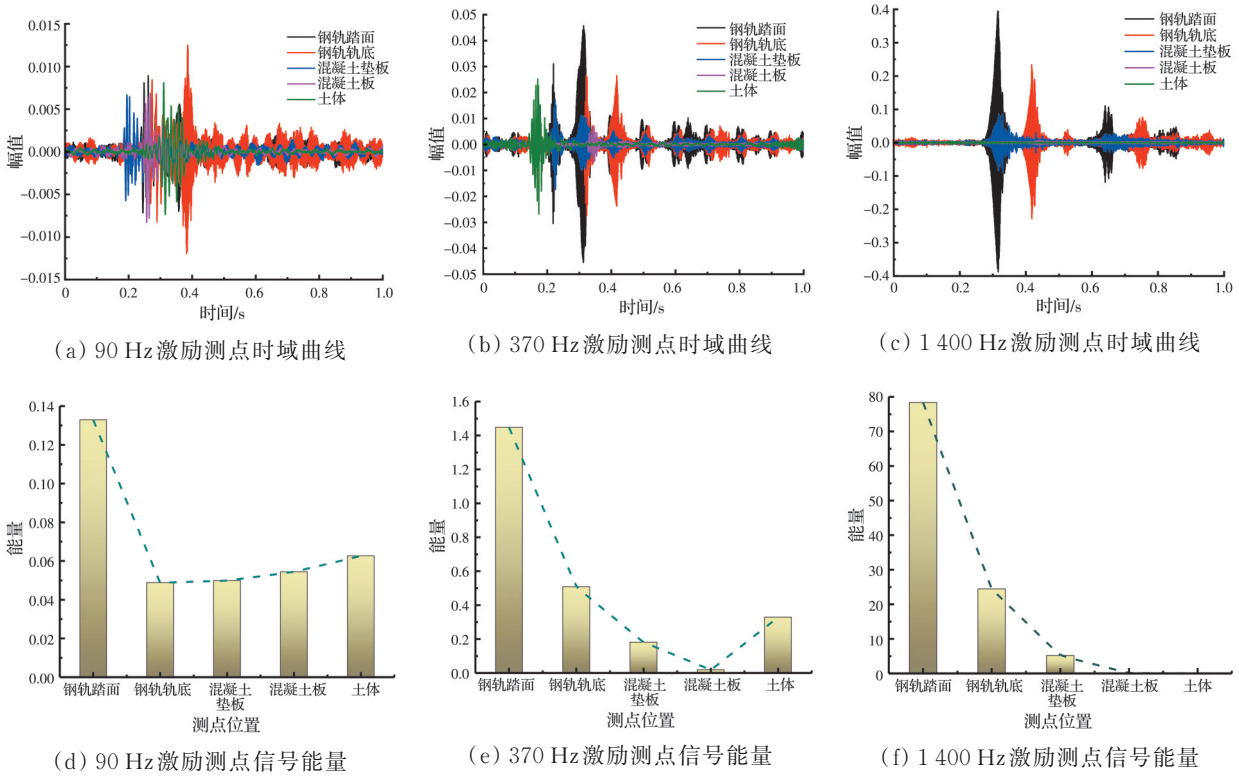
4.1 钢轨应力波传播扫描试验

为直观地展示应力波波场在不同介质中真实的传播与演化过程,选用以氦氖(He-Ne)激光为光源的扫描式激光多普勒测振仪,分别对钢轨侧表面Y方向振动、端部剖面X方向振动进行逐点扫描,以介质表面二维振动图像真实再现波场演化过程。

去除试验装置中的单点式测振仪,在钢轨的端部断面和侧面位置分别架设一台扫描式激光多普勒测振仪,通过激光束扫描获取钢轨表面的应力波数据,并对数据进行进一步处理。

该扫描式激光测振仪主要依靠其扫描头内部的高精度干涉仪和一对高速摆镜工作,其工作过程如下:通过高速摆镜将激光束偏转到测点位置,再由控制箱内的速度解码器解调扫描头输入的原始多普勒信号,最后经扫描软件处理,即可得到测点扫描区域的二维振动动画图像。

考虑到激振器的激励频率范围相对有限,其产生的应力波波长远大于钢轨尺寸,难以完整展现应力波在钢轨表面的传播过程,因此需通过提高激振源的信号频率来缩短波长,经计算与测试验证,激励频率需控制在80 kHz以上。为此,采用压电陶瓷片代替激振器作为高频信号激励源,将其分别粘贴于钢轨侧面及端部剖面顶部,激励信号仍由信号发生器产生,经功率放大器放大后输入。考虑到压电陶瓷片在钢轨上激励产生的应力波信号能量较弱,为提升扫描信号质量,在钢轨扫描区域的外表面粘贴增强反光材质的反光膜,以提高激光反射强度,进而提升信号采集质量[13]。多普勒激光测振仪扫描试验装置示意图如图9所示。

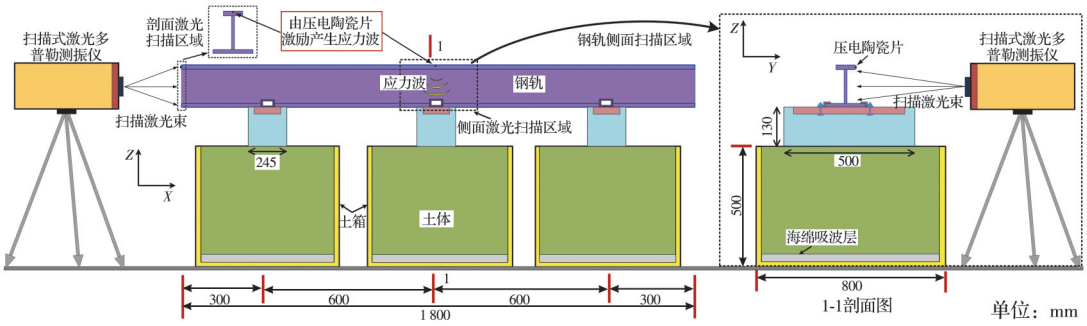


（a）90 Hz激励测点时域曲线　（b）370 Hz激励测点时域曲线　（c）1 400 Hz激励测点时域曲线

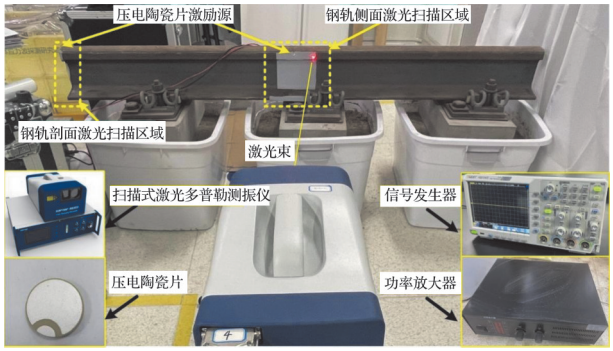
（d）90 Hz激励测点信号能量　（e）370 Hz激励测点信号能量　（f）1 400 Hz激励测点信号能量

图 8　应力波信号能量的传播规律

Fig.8　Propagation law of energy for stress wave signals



（a）激光扫描试验装置示意图



（b）激光扫描试验装置布设情况

图 9　测点区扫描试验示意图

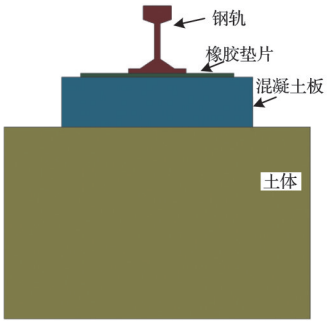
Fig.9　Schematic diagram of scanning experiment in measuring point area

4.2　计算机仿真建模方法

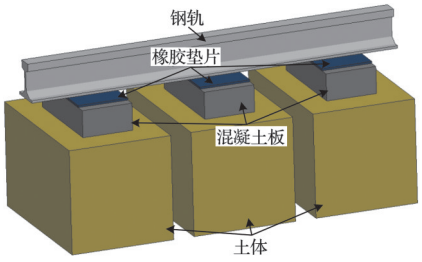
在扫描试验的基础上，采用有限元分析软件LS-DYNA 分别为扫描试验装置创建 2D 和 3D 仿真模型，并同步选定频率 80 000 的单位正弦荷载作为计算机仿真模型的激振频率。通过对比仿真结果与实测结果验证计算机模型的准确性；在此基础

上进一步分析应力波从钢轨传播至不同介质时的波场演化规律。

有限元仿真模型的网格尺寸一般取应力波波长的1/6～1/12,针对研究对象,经计算将网格划分为1 mm长的精细化网格,仿真过程采用LS-DYNA显式动力分析模块。土体的4个侧面及底面通过关键字Boundary-Non-Reflecting设置无反射吸收边界,以模拟土体的半无限空间边界;钢轨与橡胶垫片、橡胶垫片与混凝土板、混凝土板与土体之间的界面接触均采用软件中的Automatic-Surface-To-Surface接触模式,相关仿真模型如图10所示。



(a) 2D仿真模型



(b) 3D仿真模型

图10 计算机仿真模型

Fig.10 Computer simulation model

土体选用LS-DYNA软件中的193# Drucker-Prager材料模型,该模型为摩尔-库伦准则的近似形式,屈服面不随材料屈服发生变化,不存在强化准则[14]。模型关键参数包括黏聚力、内摩擦角与膨胀角,其中膨胀角主要用于控制土体的体积膨胀特性。为简化计算,模型不考虑体积变化。根据以往经验[15-16],隧道周围土层的阻尼比通常在0.03～0.05之间,因此模型中土体阻尼比取0.03。考虑到试验模型全程均处于弹性受力阶段,模型中的钢轨、橡胶垫片及混凝土板均采用弹性材料参数[4],各材料的详细参数如表2所示。

表2 材料属性参数

Table 2 Material property parameters

材料	弹性模量/MPa	密度/(kg/m^3)	泊松比	内摩擦角/(°)	黏聚力c/kPa
钢轨	209 000	7 830	0.30		
轨下垫板	7.84	960	0.47		
混凝土板	30 000	2 500	0.21		
土体	145	1 836	0.37	18	18

4.3 结果分析

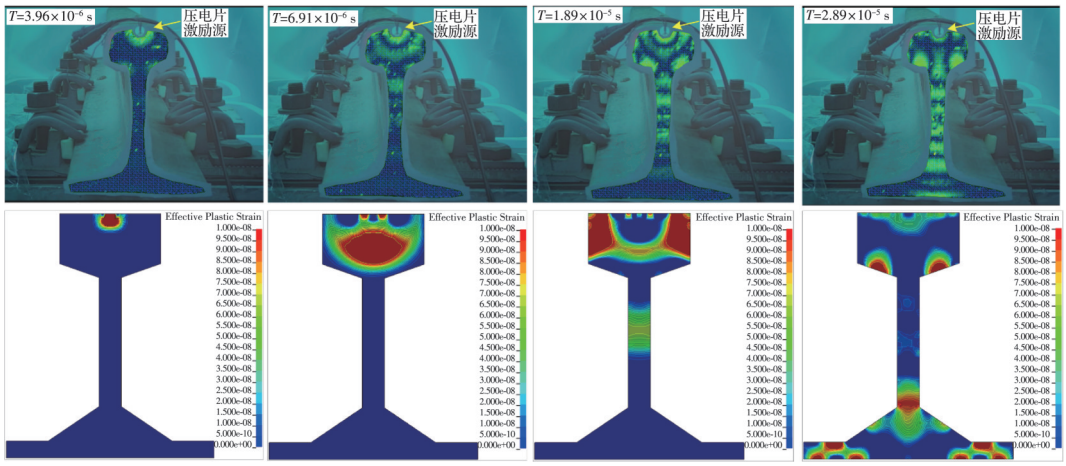
将激光多普勒测振仪扫描结果与仿真计算结果进行对比,如图11所示。由波场云图可知,压电陶瓷片在轨头踏面激励产生的应力波呈球状向四周扩散,传播至轨头侧面及下颚界面后产生强烈反射,致使轨头下颚处出现能量集中现象[17-18]。平行于轨腰的应力波沿轨腰继续向轨底传播,到达轨底后,以半球状扩展并在轨底面发生反射,仿真波场结果同样如此。从信号能量变化角度来看,钢轨上应力波能量的衰减主要源于不同界面上的反射作用,而材料自身引起的衰减并不明显。究其原因,一是钢轨横截面尺寸较小,应力波衰减速率缓慢[19];二是钢材材质均匀,自身阻尼对波动能量的衰减作用较小。综上,通过波场演化特征对比,可有效验证仿真建模的合理性与准确性。

4.4 响应频率下的波场传播规律

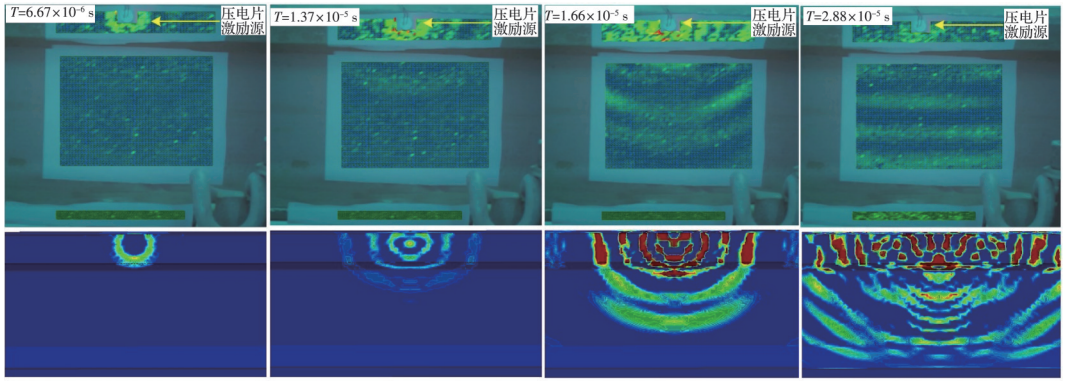
按照计算机仿真方法,对试验模型中的钢轨-轨枕-土体结构开展三维建模。在钢轨踏面位置施加激励源[20],进一步分析应力波由钢轨向周边不同介质传播过程中的波场演化规律。

扫频试验和黄强等[1]的实测结果均表明,地铁列车在钢轨上激励产生的应力波特征频带范围主要集中在50～350 Hz、1 000～1 400 Hz。依据扫频试验所得的3个主频(90、370、1 400 Hz)分别以单位正弦荷载形式施加于3D计算机仿真模型的钢轨踏面,计算结果如图12所示。为更清晰地展示应力波在不同介质中的传播演化过程,将从透视图角度对其演化规律进行分析。

从波场图可知,在钢轨上激励产生的应力波呈半球状向钢轨两侧及底部扩展,透射过不同介质界面时产生部分反射波,另一部分透射波则继续扩展。受传播路径长度、不同介质中的波速差异及频散效应的影响,高频激励源产生的应力波波速略高于低频激励源,因此波场图中两侧土体的首波波阵面到达时间存在一定延迟;分析云图能量特征发现,应力波从振源传播至土体后,波场能量显著衰减,其中衰减最快的阶段为钢轨到混凝土轨枕的传播过程,这与信号数据衰减分析结论一致。由此可见,钢轨下方的橡胶垫片在阻隔应力波传递过程中发挥着至关重要的作用,提升或优化橡胶垫片的性能,可有效阻断钢轨振动噪声的传递,对减轻地铁振动、降低振动影响具有重要意义。



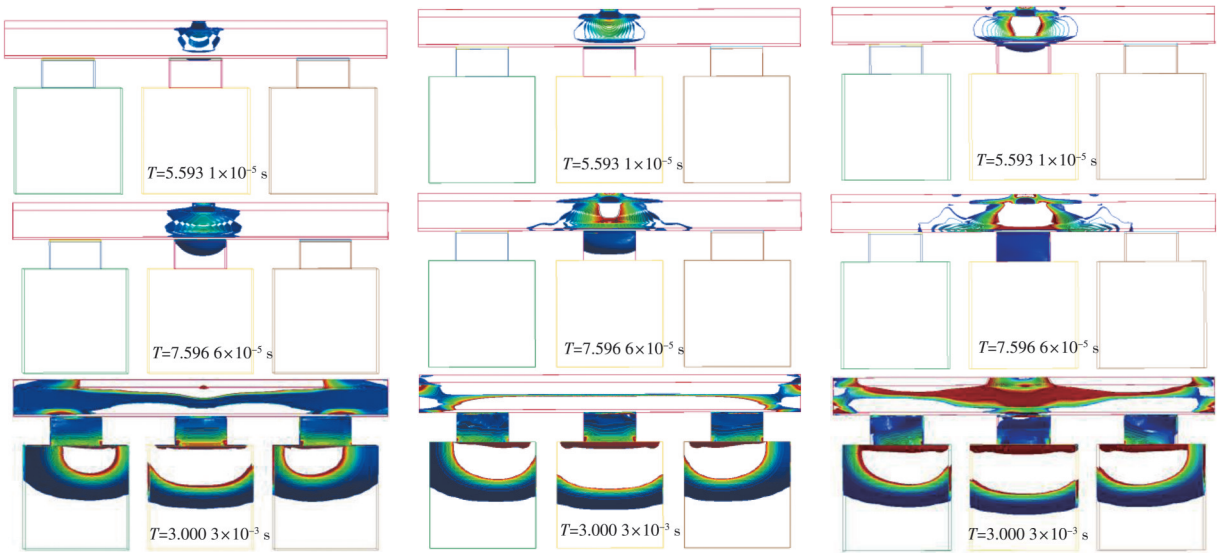
（a）钢轨剖面应力波实测与计算机仿真云图的对比



（b）钢轨侧面应力波实测与计算机仿真云图的对比

图 11　钢轨应力波传播实测与仿真结果的对比

Fig.11　Comparison of measured and simulated results for rail stress wave propagation



（a）激励频率 90Hz　　（b）激励频率 370Hz　　（c）激励频率 1 400 Hz

图 12　应力波波形传播对比

Fig.12　Comparison of stress wave propagation waveforms

5　结论

通过室内搭建的地铁钢轨试验模型结合计算机仿真分析，从应力波信号传播特性及波场传播云图角度对地铁激励应力波在传导路径上的基本传播规律开展研究，主要结论如下：

1）轮轨相互作用在钢轨上激励产生的应力波信号主要以 25～400 Hz 的低频信号和 1 400 Hz 的

高频信号为主;最终传播至土体内的应力波信号,主要集中在25~200 Hz的低频范围。搭建的钢轨试验模型动力性能与实际地铁隧道基本一致。

2)信号数据分析与波场云图结果均表明,应力波的高频成分在从钢轨向混凝土轨枕传播的过程中衰减最快,信号能量传递率最低。由此可见,提升或改善橡胶垫片性能是实现地铁减振降噪的重要举措。

3)通过对比激光多普勒测振仪实测与计算机仿真的应力波波场结果,从图像角度验证了计算机仿真方法的准确性;同时,对于复杂介质及模型中的波场研究,可采用激光多普勒测振仪的实测结果替代计算机仿真结果。

参考文献

[1] 黄强, 姚湘静, 黄宏伟, 等. 地铁运行时轨道-隧道-地层振动实测与分析[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(2): 260-265.
Huang Q, Yao X J, Huang H W, et al. Measurement and analysis of track-tunnel-stratum vibration during subway operation[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(2): 260-265. (in Chinese)

[2] 袁扬, 刘维宁, 刘卫丰. 基于现场测试的曲线段地铁地面振动传播规律[J]. 中国铁道科学, 2012, 33(4): 133-138.
Yuan Y, Liu W N, Liu W F. Propagation law of ground vibration in the curve section of metro based on in-situ measurement[J]. China Railway Science, 2012, 33(4): 133-138. (in Chinese)

[3] 刘鹏辉, 杨宜谦, 尹京. 地铁隧道内不同轨道结构振动测试与分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(2): 31-36.
Liu P H, Yang Y Q, Yin J. Test and analysis on vibration of different track structures in tunnel[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(2): 31-36. (in Chinese)

[4] 曾志平, 黄相东, 王卫东, 等. 地铁不同轨道类型振动传递规律对比研究[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(7): 74-79, 112.
Zeng Z P, Huang X D, Wang W D, et al. Comparative research on the vibration transmission law of different subway track types[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(7): 74-79, 112. (in Chinese)

[5] 张凌, 雷晓燕, 刘全民, 等. 地铁环境振动源强测试与评价标准分析[J]. 振动、测试与诊断, 2020, 40(1): 89-94.
Zhang L, Lei X Y, Liu Q M, et al. Analysis on test and evaluation standard of metro environmental vibration source intensity[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(1): 89-94. (in Chinese)

[6] 耿传智, 廖志军. 地铁振动衰减特性研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(3): 344-348, 368.
Geng C Z, Liao Z J. Research on attenuation characteristics of subway vibration[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2009, 37(3): 344-348, 368. (in Chinese)

[7] 王营营, 白杨, 徐晓辉, 等. 正弦扫频振动试验结构响应的高精度频谱分析方法[J]. 航天器环境工程, 2020, 37(6): 552-560.
Wang Y Y, Bai Y, Xu X H, et al. A method for high-accuracy spectrum analysis of structural response in sine-swept vibration test[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2020, 37(6): 552-560. (in Chinese)

[8] 何宪光, 沈飞, 谢俊彦. 激光多普勒测振技术在固体火箭发动机试验中的应用研究综述[J]. 环境技术, 2023, 41(11): 60-66, 86.
He X G, Shen F, Xie J Y. A review of the application of laser Doppler vibration measurement technology in solid rocket motor test[J]. Environmental Technology, 2023, 41(11): 60-66, 86. (in Chinese)

[9] 蒋宇静, 吴法博, 张学朋, 等. 基于激光多普勒测振的混凝土损伤量化评价研究[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(5): 889-903.
Jiang Y J, Wu F B, Zhang X P, et al. Non-destructive quantitative assessment on the damage of concrete structure based on laser Doppler vibrometer technology[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(5): 889-903. (in Chinese)

[10] 田源, 黄羽立, 王一星, 等. 不同阻尼模型对地铁振动下结构动力响应分析的影响研究[J]. 工程力学, 2023, 40(2): 56-65.
Tian Y, Huang Y L, Wang Y X, et al. Influence of damping models on structural dynamic response analyses under subway-induced vibrations[J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(2): 56-65. (in Chinese)

[11] 吕鹏, 宗刚, 李文涛, 等. 地铁引发场地振动的实测信号能量分析[J]. 工程力学, 2013, 30(增刊1): 325-328.
Lv P, Zong G, Li W T, et al. Energy analysis of ground vibration induced by subway trains[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(S1): 325-328. (in Chinese)

[12] 张鹤年, 阳建强, 孙广俊, 等. 地铁运行诱发的环境振动数值模拟与模型预测[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2012, 42(5): 988-993.
Zhang H N, Yang J Q, Sun G J, et al. Numerical simulation and model prediction for environmental vibrations induced by metro operation[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2012, 42(5): 988-993. (in Chinese)

[13] 马蒙, 李明航, 谭新宇, 等. 地铁轮轨耦合不平顺激励对轨道振动影响分析[J]. 工程力学, 2021, 38(5): 191-198.
Ma M, Li M H, Tan X Y, et al. Influence analysis on

track vibration due to coupled irregularity excitation of metro wheel-track[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(5): 191-198. (in Chinese)

[14] 杨维国, 李昊, 郗景凯. 地铁致某近代建筑振动分析及减隔振措施研究[J]. 振动工程学报, 2023, 36(1): 147-158.
Yang W G, Li H, Xi J K. Vibration analysis of a modern building caused by metro and research on vibration reduction measures[J]. Journal of Vibration Engineering, 2023, 36(1): 147-158. (in Chinese)

[15] 田光明, 陈光禒. 正弦扫描振动响应的时频分析[J]. 振动与冲击, 2005, 24(6): 13-16.
Tian G M, Chen G J. Time-frequency analysis of the response in a sine-swept vibration test[J]. Journal of Vibration and Shock, 2005, 24(6): 13-16. (in Chinese)

[16] Hidalgo R M, Fernandez J G, Rivera R R, et al. A simple adjustable window algorithm to improve FFT measurements[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2002, 51(1): 31-36.

[17] Spada A, Capriotti M, Lanza di Scalea F. Global-local model for three-dimensional guided wave scattering with application to rail flaw detection[J]. Structural Health Monitoring, 2022, 21(2): 370-386.

[18] 刘杰, 杜飞, 张培杰, 等. 车辆段组合减振道岔振动特性及传递规律研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(11): 4507-4519.
Liu J, Du F, Zhang P J. et al. Study on the vibration characteristics and transmission law of turnout with combined vibration reduction measures in metro depot[J]. Journal of Railway Science and Engineering., 2024, 21(11): 4507-4519.(in Chinese)

[19] 路德春, 高泽军, 孔凡超, 等. 地铁列车运行诱发地面邻近建筑振动的数值模拟研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2023, 45(6): 113-124.
Lu D C, Gao Z J, Kong F C, et al. Numerical study on vibration of ground building adjacent to metro induced by operation of subway train[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2023, 45(6): 113-124. (in Chinese)

[20] 吴波, 赵睿, 蒙国往, 等. 基于模糊理论的地铁深基坑非对称施工安全风险评估[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(5): 8-15.
Wu B, Zhao R, Meng G W, et al. Safety risk assessment of asymmetric construction of subway deep foundation pit based on fuzzy theory[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(5): 8-15.

（编辑　朱备）