

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2025.04.017

## 基于频域幅-相变化规律的爆破振动波形仿真研究\*

王淼<sup>a,b</sup>, 李立峰<sup>a,b</sup>

(武汉理工大学 a. 资源与环境工程学院;

b. 关键非金属矿产资源绿色利用教育部重点实验室, 武汉 430070)

**摘要:** 爆破振动安全的精细化评估需综合考虑振动波形全过程特性, 常见的时域叠加方法难以精确控制频谱特征, 而频域波形仿真研究尚存不足。研究旨在提出一种基于傅立叶分析的幅-相联合波形仿真方法, 以满足爆破振动分析与安全评估的需求。通过分析爆破振动信号的频域特征, 主频及主频幅度随传播距离的衰减特征得到验证, 同时发现相位谱经解卷绕后的主导频率成分呈线性趋势, 且其斜率与比例距离呈对数函数关系。结合幅度谱和相位谱随传播距离(比例距离)的变化规律, 并引入置信区间随机参数和波形包络函数, 研究建立了频域幅-相联合波形仿真方法的定量表达与计算流程, 实现了爆破振动波形的时域重构。在此基础上, 研究将仿真方法进行蒙特卡洛模拟, 并将结果的统计分布和实测的峰值质点振速 (PPV) 衰减曲线进行对比分析。研究结果显示: 仿真波形的 PPV 统计分布与实测数据吻合良好, 验证了幅-相联合波形仿真方法的有效性和可行性得到了验证。相较于时域叠加方法, 本研究提出的频域幅-相联合波形仿真方法能够更精确地表征各频率成分的分布及其变化规律, 为复杂结构的动力响应精细分析提供更精确的输入荷载。未来研究将进一步考虑地质各向异性对相位传播的影响, 并开发基于机器学习的参数动态修正模型, 以提升该方法在不同工程场景中的适应性。

**关键词:** 爆破振动; 波形仿真; 傅立叶分析; 幅-相变化规律

中图分类号: TD235.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2025)04-0155-11

## Simulation of Blasting Vibration Waveform based on Magnitude-phase Variation Law in Frequency Domain

WANG Miao<sup>a,b</sup>, LI Li-feng<sup>a,b</sup>

(a. School of Resources and Environment Engineering; b. Key Laboratory of Green Utilization of Critical Non-metallic Mineral Resources, Ministry of Education, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** The refined evaluation of blasting vibration safety needs to consider the whole process characteristics of vibration waveform. The common time-domain superposition method has limitations in accurately controlling spectrum characteristics, and the simulation research of frequency-domain waveforms remains insufficient. This study proposes an amplitude-phase joint waveform simulation method based on Fourier analysis to meet the needs of blasting vibration analysis and safety assessment. By analyzing the frequency domain characteristics of blasting vibration sig-

收稿日期 (Date of reception): 2025-03-05

网络首发日期 (Published online): 2025-05-19

作者简介: 王淼 (2000-), 女, 硕士研究生, 主要从事采矿、爆破等方面的科研工作, (E-mail) wangmiao@whut.edu.cn。

通信作者: 李立峰 (1986-), 男, 副教授、博士, 主要从事采矿、爆破、安全等方面的教学与科研工作, (E-mail) lifeng.li@whut.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (52104098)

**About the author:** WANG Miao (2000-), female, master's degree student, mainly engaged in mining, blasting and other aspects of scientific research, (E-mail) wangmiao@whut.edu.cn.

**Corresponding author:** LI Li-feng (1986-), Male, Associate Professor, Ph. D, mainly engaged in teaching and scientific research in mining, blasting and safety, (E-mail) lifeng.li@whut.edu.cn.

**Fund Programs:** National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52104098)

nals, the attenuation characteristics of the main frequency and its magnitude with respect to propagation distance are verified. At the same time, it is found that the dominant frequency component of the unwrapped phase spectrum is linear, and its slope has a logarithmic function relationship with the proportional distance. Based on the variation of magnitude spectrum and phase spectrum with the propagation distance (proportional to the distance), and the introduction of random parameters within the confidence interval and waveform envelope function, this study establishes the quantitative expression and calculation flow of the magnitude-phase joint waveform simulation method in the frequency domain. The time-domain reconstruction of the blasting vibration waveform is realized. On this basis, a Monte Carlo simulation is performed on the proposed method, and the statistical distribution of the results is compared with the measured peak particle velocity (PPV) attenuation curve. The results show that the PPV statistical distribution of simulated waveforms is in good agreement with the measured data, which verifies the effectiveness and feasibility of the magnitude-phase joint waveform simulation method. Compared to the time-domain superposition method, the frequency-domain magnitude-phase joint waveform simulation method proposed in this study can more accurately characterize the distribution and variation of each frequency component, providing more accurate input loads for a fine analysis of the dynamic response of complex structures. Future studies will further investigate the influence of geological anisotropy on phase propagation and develop a dynamic parameter correction model based on machine learning to enhance the adaptability of this method across various engineering scenarios.

**Key words:** blasting vibration; waveform simulation; Fourier analysis; magnitude-phase variation pattern

爆破广泛应用于采矿、土木工程等行业,然而爆破振动对于周边环境及建筑物的安全隐患始终是学术界和行业关切的问题<sup>[1]</sup>。爆破振动安全评估从只考虑峰值质点振速(PPV)单因素判据逐步发展到了兼顾PPV与主频的双因素判据<sup>[2-5]</sup>,已成为一个不可或缺的环节。然而,爆破振动持续时间对结构的危害作用也不可忽视<sup>[6-8]</sup>。因此,爆破振动的安全评估实际涉及到多因素影响,尤其是对于爆破工程中的重点保护对象,应当全面分析爆破振动荷载全过程的动态特性和结构的响应特性,因而需要对爆破振动全波形进行仿真<sup>[9,10]</sup>。

爆破振动信号波形的仿真方法可以从时域和频域两个方向来探索。从时域角度来看,波形叠加是最常用的方法之一,几十年来诸多学者,包括Anderson<sup>[11]</sup>、Blair<sup>[12,13]</sup>、卢文波<sup>[14]</sup>、Silva<sup>[15]</sup>、杨年华<sup>[16]</sup>、Singh<sup>[17]</sup>、何理等<sup>[18]</sup>,对其原理和应用进行了大量研究。波形叠加法具有物理意义明确、直观性强等优点,但无法很好地控制频谱特性。从频域角度看,若将爆破振动信号进行傅里叶变换,则可以用幅度和相位来表示。换言之,若能根据某种要求或特征生成相应的幅度谱(即通常所说的频谱)和相位谱,便能对爆破振动波形进行仿真,并保证一定的频域控制精度。这方面的研究目前还比较少,娄建武等对这一方法进行了有益的探索<sup>[19]</sup>,利用模拟的功率和按均匀分布随机选取的频率和相位进行爆破振动波形仿真。

本文将以傅立叶分析为基础,分析频域内爆破振动幅度谱和相位谱的频域特征及随距离的变化规律,探讨爆破振动波形的幅-相联合仿真方法,为爆

破振动作用下结构响应和损伤的精细化研究提供信号基础。

## 1 爆破振动信号的频域特征

### 1.1 爆破振动信号的傅里叶级数展开

傅立叶级数是一种分析周期信号的有效工具<sup>[20]</sup>,可以将信号分解为包含不同频率成分的谐波分量。假设某一周期函数表示为

$$f(t) = f(t + kT) \quad (1)$$

式中, $T$ 是函数的周期,且 $k=0,1,2,\dots$

傅里叶级数的基本思想是将一个周期信号表示为一系列正弦函数和余弦函数的叠加,即

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t) \quad (2)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega_0 t) dt \quad (3)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega_0 t) dt \quad (4)$$

式中: $\omega$ 是信号的角频率, $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$ ;  $a_0$ 是信号的直流分量; $a_n$ 和 $b_n$ 分别是信号中对应频率的余弦和正弦分量的幅度系数,将其改写为幅度和相位的形式,可表示为

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin(n\omega_0 t + \varphi_n) \quad (5)$$

式中,幅度 $c_n$ 和相位 $\varphi_n$ 定义为

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (6)$$

$$\varphi_n = \tan^{-1} \left( -\frac{b_n}{a_n} \right)$$

然而,爆破振动信号在工程实践中通常是有限

长的非周期信号,若将其视为一个周期信号的单个周期,仍可用傅里叶级数进行分析,并得到信号的幅度谱和相位谱。此外,爆破振动信号是经过采样而得的离散时间信号,而采样定理要求采样频率至少为信号最高频率的两倍,才能无失真重建连续信号。当采样率为  $1 \times 10^4$  Hz 时,其最高可解析频率为  $5 \times$

$10^3$  Hz(奈奎斯特频率),因此完整的傅立叶谱频率范围应为  $0-5 \times 10^3$  Hz,以确保频谱完整性<sup>[21]</sup>。考虑到爆破振动信号的能量主要集中在低频范围,为便于观察其中幅值和相位的分布,后续章节中的频率显示范围统一调整为  $0 \sim 100$  Hz。图 1 所示为某实测爆破振动信号的幅度谱和相位谱。

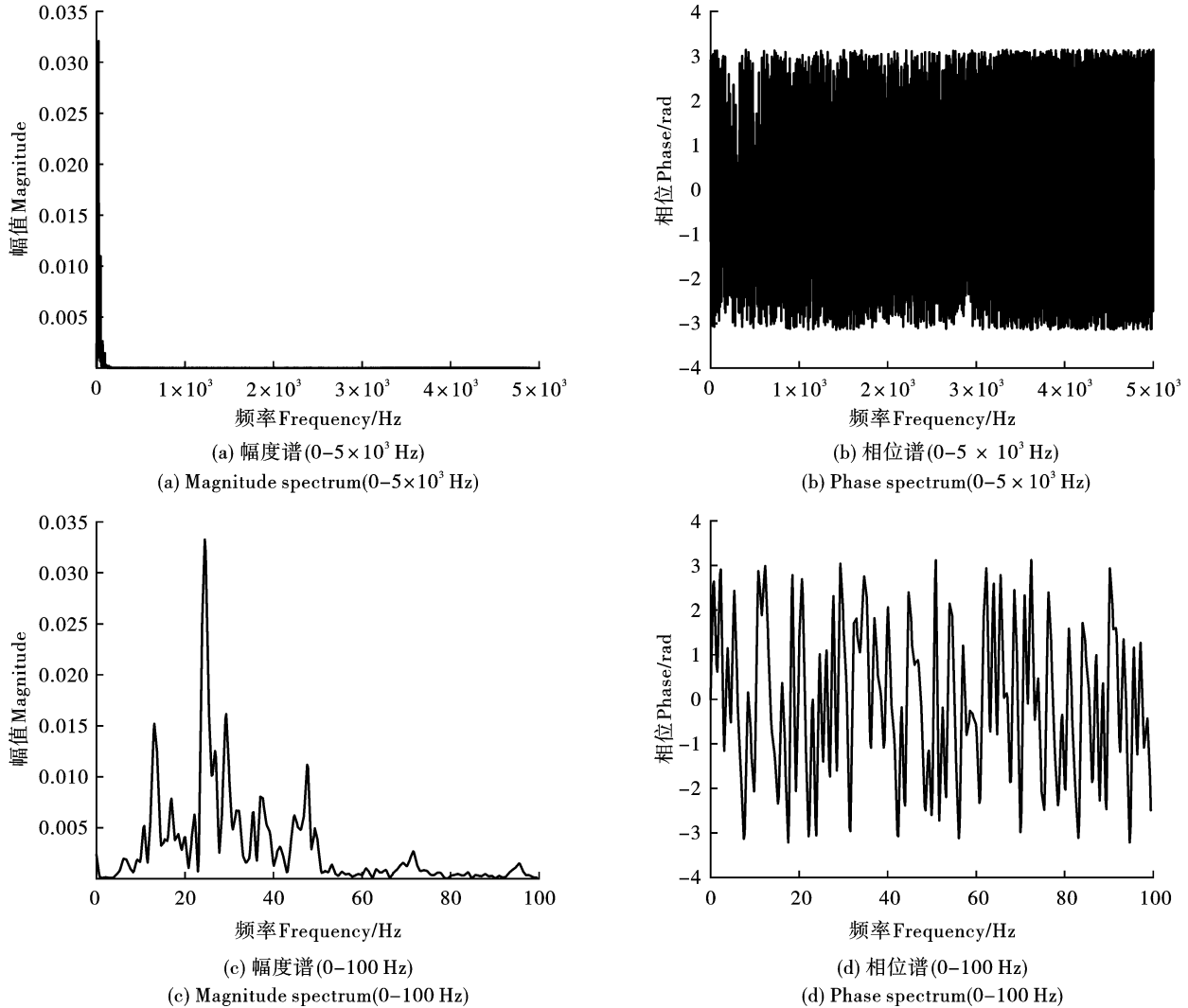


图 1 某一信号的幅度谱和相位谱(采样率:  $1 \times 10^4$  Hz)

Fig. 1 The magnitude and phase spectra of a signal(sampling rate:  $1 \times 10^4$  Hz)

### 1.2 爆破振动信号的幅度谱和相位谱特征

如图 1(a)和图 1(c)所示,爆破振动信号的幅度谱曲线通常表现为不规则的多峰特性,这些峰值对应信号中能量较为集中的频率成分。总体来看,幅度谱曲线的能量分布随频率升高逐渐衰减,高频部分的能量占比较低,而低频和中频部分的能量较为集中<sup>[22-24]</sup>。同时,爆破振动信号频率成分随距离和传播介质变化而动态调整,低频成分通常在传播过程中衰减较慢,而高频成分则受能量耗散和传播路径的影响衰减较快<sup>[25]</sup>。此外,爆破振动信号的主频和幅度分布与爆破药量、炸药类型、地质条件以及

传感器布置位置密切相关<sup>[26-28]</sup>。有关幅度谱的研究在过去几十年的研究中已经非常详实<sup>[29]</sup>,故本文将对相位谱进行详细的分析。

在信号处理中,公式(6)中反正切计算所得的相位通常被限制在主值范围  $[-\pi, \pi]$ 。当真实相位变化超过这一范围时,会因周期性截断出现跳变(如从  $\pi$  突变到  $-\pi$ ),导致相位曲线不连续,这种现象称为“卷绕”<sup>[30]</sup>,如图 1(b)和图 1(d)所示。为了得到连续的相位曲线,就需要将图 1 所示的相位解卷绕<sup>[31,32]</sup>,该过程旨在消除相位跳变,从而恢复其原有的连续性。相位解卷绕的公式为

$$\theta_k = \theta_k^p + \theta_k^c \quad (7)$$

式中： $\theta_k$  是解卷绕后的相位； $\theta_k^p$  为相位主值； $\theta_k^c$  是解卷绕时的附加向量。

$$\theta_k^c = \begin{cases} 0, & k = 0 \\ \theta_{k-1}^c + 2\pi, & k > 0 \& \theta_k^p - \theta_{k-1}^p < -\pi \\ \theta_{k-1}^c, & k > 0 \& -\pi \leq \theta_k^p - \theta_{k-1}^p \leq \pi \\ \theta_{k-1}^c - 2\pi, & k > 0 \& \theta_k^p - \theta_{k-1}^p > \pi \end{cases} \quad (8)$$

图1(b)中的相位主值经过解卷绕展开的相位谱如图2所示,呈现为一条连续的曲线,为进一步的分析与计算提供便利。

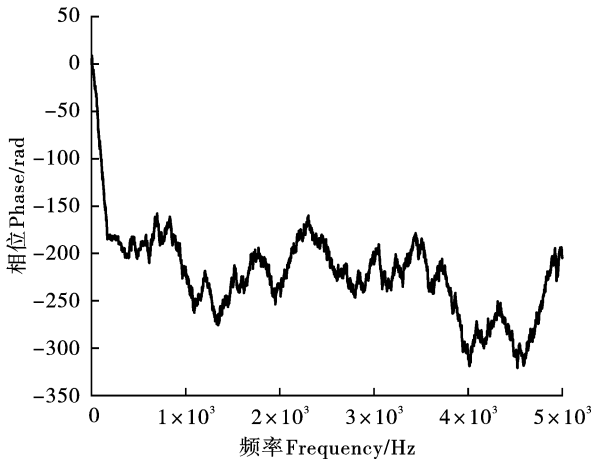
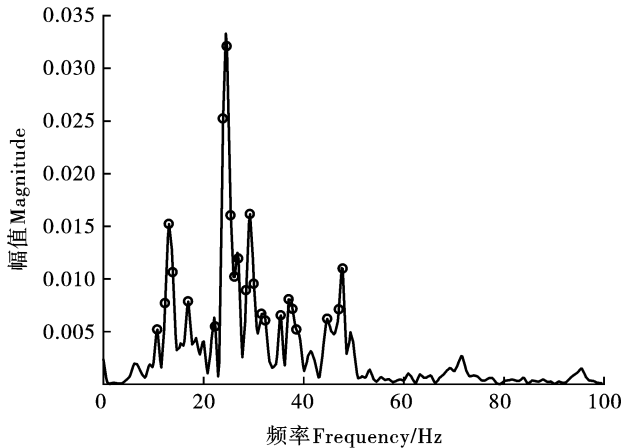
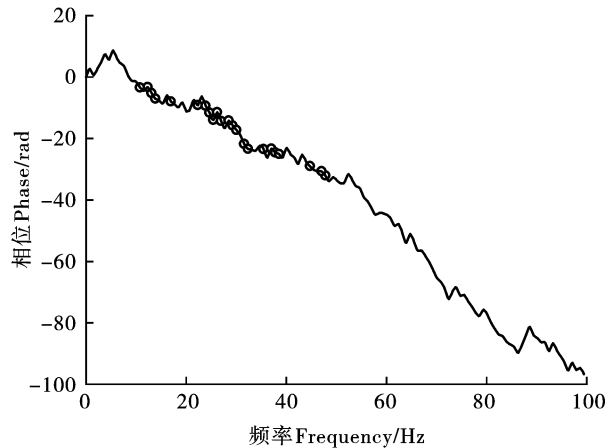


图2 解卷绕的相位谱

Fig. 2 Unwrapped phase spectrum



(a) Cumulative picked points in the magnitude spectrum



(b) Cumulative picked points in the phase spectrum

图3 幅度谱和相位谱累积取点示意图

Fig. 3 Schematic of the cumulative pickup points of the amplitude and phase spectra

## 2 爆破振动传播过程中的幅-相变化规律

### 2.1 爆破振动测试与分析

#### 2.1.1 爆破振动监测方案

某石灰岩矿山典型的爆破作业采用18孔布孔方

图2中的相位谱总体呈随频率增加而下降的趋势,并伴随有一定的起伏或振荡,使之难以用规则的曲线来表征相位谱的特征。若对相位谱以不同类型的曲线(直线、二次多项式、三次多项式、指数函数等)进行拟合,发现其拟合度都不甚理想( $R^2$ 分别为:0.3708、0.378、0.4405、0.3646)。由图1所示的幅度谱可以看出,在整个频率范围内,只有在大约100 Hz以内有显著的幅度值,其余大部分频率处的幅度都非常小,甚至接近于0。也就是说,在主频带之外,其他频率成分对爆破振动波形的贡献都很小。因此,筛选对爆破振动波形贡献最大的频率成分(主导频率成分)所呈现的特征可能排除部分干扰项,以便更清晰地观察爆破振动信号的相位特征。

将幅度谱中的频率成分按从大到小的顺序排列,并从最大值开始依次累积选取幅度值 $\{c_{decend,k}, k=1,2,\dots,K\}$ 及其对应频率 $\{f_{decend,k}, k=1,2,\dots,K\}$ 处的相位 $\{\varphi_{reorder,k}, k=1,2,\dots,K\}$ (如图3所示),带入公式(5)计算爆破振动的时域近似波形,直到所计算的近似信号波形与原信号之间的相关系数达到或超过0.95(如图4所示)。然后,对选取的频率 $\{f_{decend,k}, k=1,2,\dots,K\}$ 和相位值 $\{\varphi_{reorder,k}, k=1,2,\dots,K\}$ 进行线性回归,得到拟合的直线( $R^2=0.9571$ ),如图5所示。筛选频率成分的具体步骤如图6所示。

式,分为3排,每排6个炮孔。炮孔的孔距为6 m,排距为3 m,直径120 mm,炮孔深度17 m,堵塞长度为4 m。使用电子雷管逐孔起爆。爆破参数总结如表1所示。

爆破振动监测设置了3个测点,测点具体位置如图7所示。

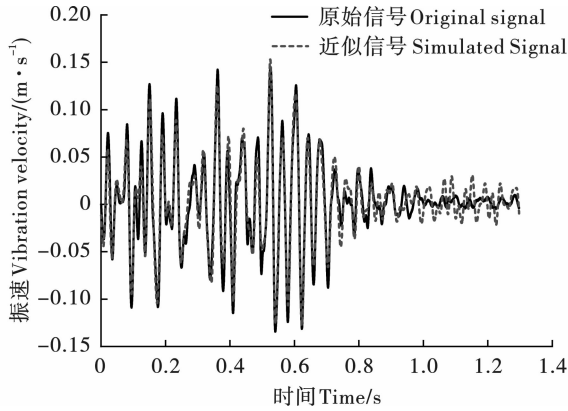


图 4 近似波形与原始波形对比图

Fig. 4 Comparison of approximated and original waveforms

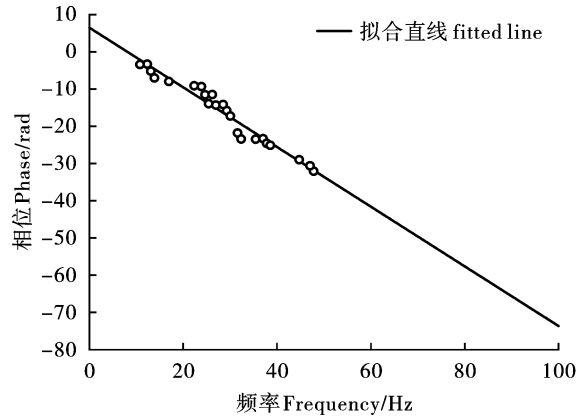


图 5 相位线性回归结果

Fig. 5 Linear regression result of phase

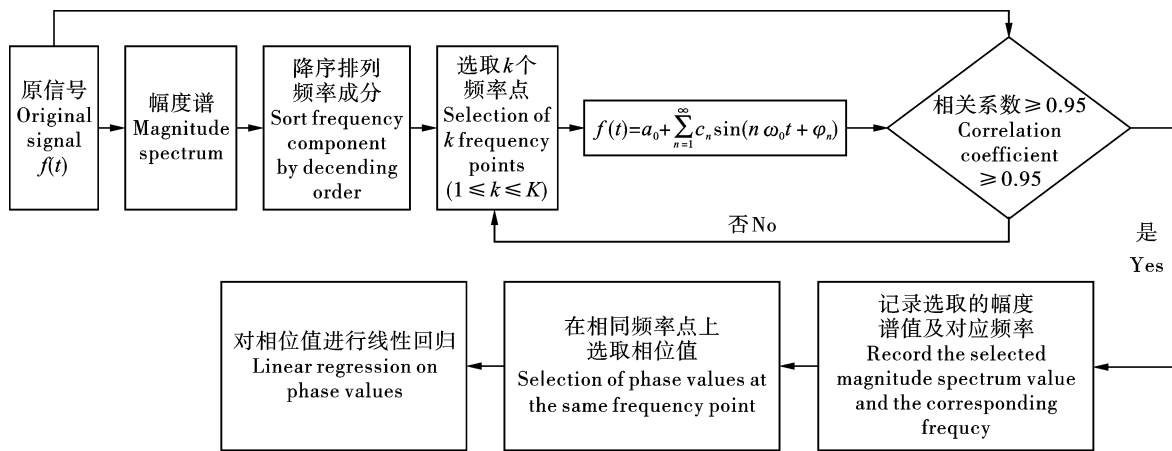


图 6 筛选频率流程图

Fig. 6 Frequency picking flowchart

表 1 主要爆破参数

Table 1 Main blasting parameterse

孔径 Hole diameter/mm	孔深 Hole depth/m	单孔装药量 Charge per hole/kg	装药结构 Charging structure	堵塞长度 Stemming length/m	孔距 Hole spacing/m	排距 Burden/m	孔数 Hole number	雷管 Detonator	起爆方式 Initiation
120	17	88	耦合装药 Coupled charge	4	6	3	18	电子雷管 Electronic detonator	逐孔起爆 Hole-by- hole initiation

2.1.2 爆破振动监测结果与分析

本研究共进行了 6 次爆破振动测试,结果如表 2 所示。本文所涉及的研究主要观察幅度和相位随传播距离的变化规律,因此将装药量归一化,使用比例距离( $SD = d/Q^{-3}$ )进行分析<sup>[33,34]</sup>。

其中,峰值质点振速 (PPV) 随比例距离的增大总体呈减小趋势 (如图 8 所示)。当比例距离小于 30 时,PPV 迅速减小,爆破振动强度衰减明显;当比例距离超过 30 后,PPV 趋于平稳,说明爆破振动强度衰减趋势变缓。

表 2 中的结果显示,所有方向分量的主频随比

例距离的增加均呈现逐渐降低的趋势 (如图 9 所示,三个方向的拟合结果见公式 (9) ~ (11)), 这一变化趋势与卢文波<sup>[35]</sup>、周俊汝等人的研究结果相吻合<sup>[36]</sup>,进一步验证了主频与爆破振动传播之间的负相关关系。同时,随着比例距离的增加,主频的幅度也呈逐渐减小的趋势。如图 10 所示,三个方向的拟合结果见式 (12) ~ (14)。

$$f_{main,x} = 55.96 \cdot SD^{-0.19} \quad (9)$$

$$f_{main,y} = 67.27 \cdot SD^{-0.18} \quad (10)$$

$$f_{main,z} = 68.62 \cdot SD^{-0.21} \quad (11)$$

$$M_x = 3.83 \cdot SD^{-0.9} \quad (12)$$

$$M_y = 19.09 \cdot SD^{-1.36} \quad (13)$$

$$M_z = 28.64 \cdot SD^{-1.46} \quad (14)$$

### 2.2 相位直线斜率随距离的变化规律

将图 6 所示的方法应用于表 2 中的所有爆破振动信号,可得到每一条爆破振动波形对应的相位谱斜率。为了更直观地观察相位斜率随比例距离变化的趋势,将爆心距及其对应的信号相位斜率作为自变量和因变量进行拟合,分析结果如图 11,式(15)~(17)所示。结果显示,随着爆心距离的增加,相位直线的斜率以对数函数呈现逐渐上升的趋势。其中,当比例距离小于 60 时,相位斜率的增加速率较大,相位上升较快;当比例距离超过 60 后,相位的斜率的变化速率变得稳定,上升趋势变得平缓,类似线性变化。

$$slope_x = 1.60 \cdot \log(SD) - 4.46 \quad (15)$$

$$slope_y = 1.11 \cdot \log(SD) - 3.17 \quad (16)$$

$$slope_z = 1.56 \cdot \log(SD) - 4.33 \quad (17)$$

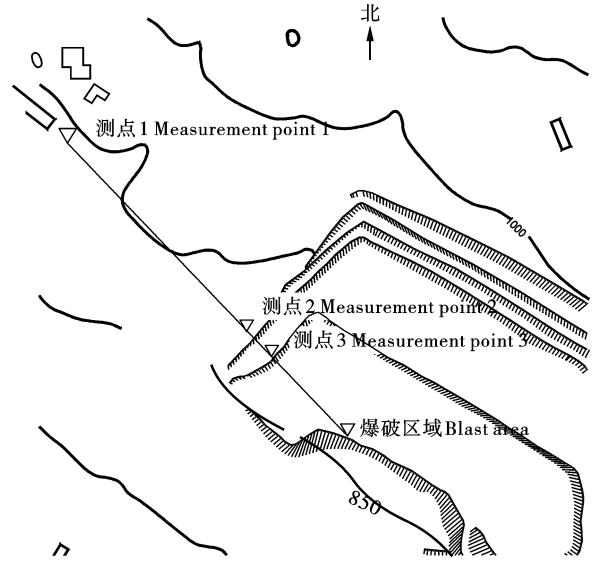


图 7 测点布置示意图

Fig. 7 Schematic layout of measurement points

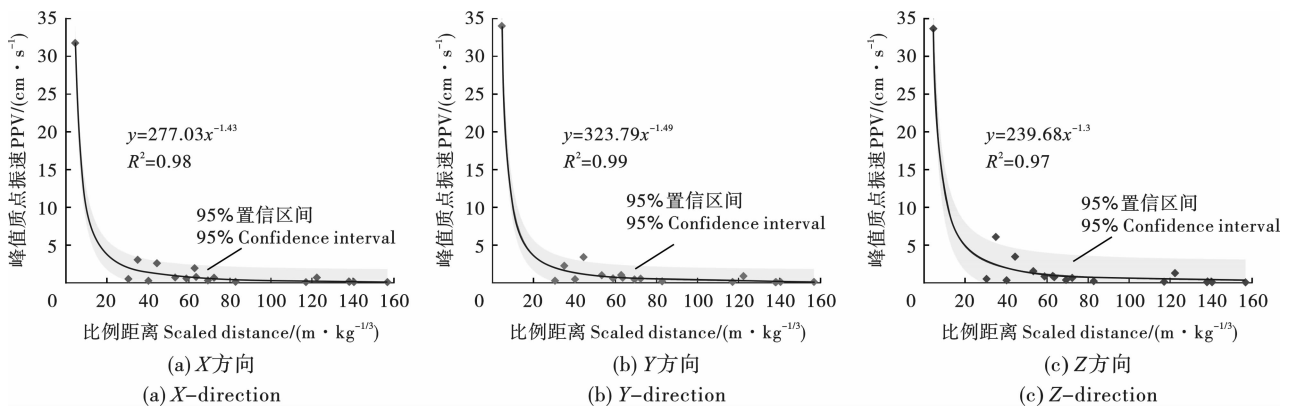


图 8 PPV 随比例距离衰减规律拟合结果

Fig. 8 Decay law fitting results of PPV with scaled distance

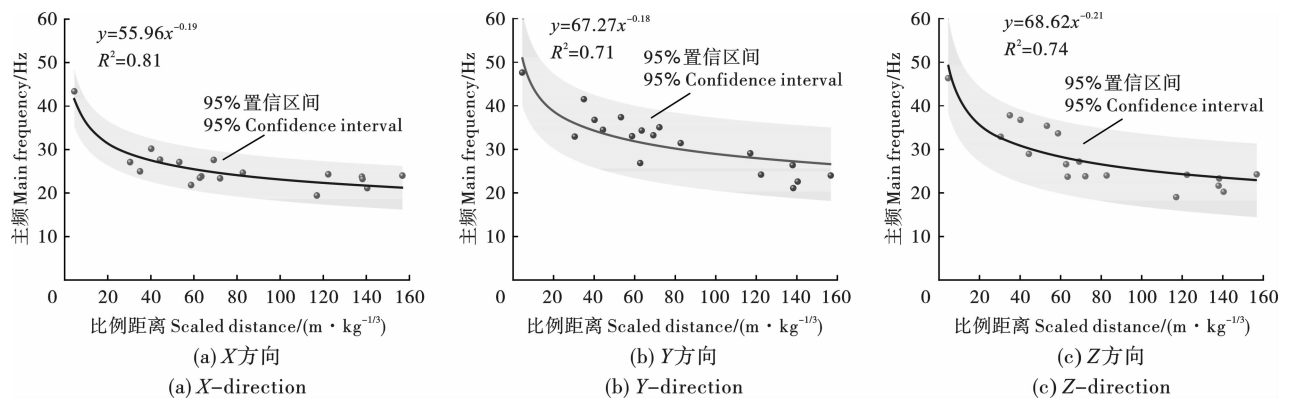


图 9 主频随比例距离的变化趋势

Fig. 9 Variation trend of main frequency with scaled distance

### 3 幅-相联合波形仿真方法

在波形仿真方法的论述中,为减少计算量,同时也不失一般性,幅度谱、相位谱及爆破振动波形的仿

真计算以 x 方向分量为例进行分析。值得注意的是,与图 3 所示的累积选取有限个频率点  $\{f_{decend,k}, k = 1, 2, \dots, K\}$  以寻找其中规律的目的不同,为了尽量使仿真波形更加接近实际波形,除了这些主要频

率成分之外,还应包含幅度值比较低的频率成分。 率范围为 0 ~ 100 Hz 以内的所有频率成分。因此,本研究仿真波形所用的幅度谱、相位谱包含频

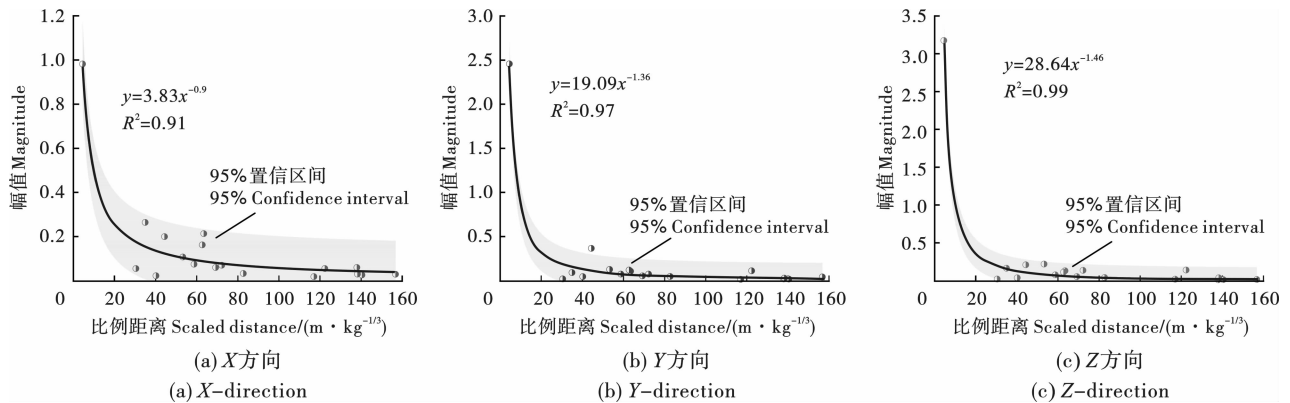


图 10 主频幅度随比例距离的变化趋势

Fig. 10 Variation trend of magnitude at main frequency with scaled distance

表 2 爆破振动监测数据汇总表  
Table 2 Measured data of blasting vibrations

监测次序 Measurement sequence	测点序号 Measurement point number	X 方向(水平切向) X direction(tangential)			Y 方向(水平径向) Y direction(radial)			Z 方向(垂直竖向) Z - direction(vertical)			爆心距 Distance to blast center d/m
		PPV/ (cm·s <sup>-1</sup> )	主频 Main frequency	主频幅度 Magnitude at main frequency	PPV/ (cm·s <sup>-1</sup> )	主频 Main frequency	主频幅度 Magnitude at main frequency	PPV/ (cm·s <sup>-1</sup> )	主频 Main frequency	主频幅度 Magnitude at main frequency	
			$f_{main,x}/$ Hz	$M_x$		$f_{main,x}/$ Hz	$M_y$		$f_{main,x}/$ Hz	$M_z$	
1	1	3.04	25.0	0.26	2.25	41.5	0.09	6.07	37.8	0.16	155
	2	2.59	27.7	0.20	3.41	34.5	0.37	3.46	28.9	0.21	197
	3	0.69	24.3	0.05	0.89	24.2	0.11	1.28	24.1	0.14	544
2	1	0.51	27.1	0.05	0.28	32.9	0.02	0.52	32.9	0.02	137
	2	0.28	30.2	0.02	0.47	36.8	0.04	0.34	36.7	0.04	181
	3	0.11	19.4	0.02	0.11	29.1	0.01	0.13	19.0	0.02	528
3	1	0.58	21.8	0.07	0.59	33.0	0.07	0.85	33.7	0.07	268
	2	0.31	27.6	0.06	0.46	33.2	0.05	0.38	27.2	0.05	317
	3	0.10	21.1	0.03	0.13	22.6	0.02	0.07	20.2	0.01	643
4	1	0.67	23.4	0.07	0.55	35.0	0.07	0.66	23.8	0.13	316
	2	0.15	24.7	0.03	0.19	31.4	0.05	0.22	24.0	0.04	362
	3	0.09	24.0	0.03	0.12	24.0	0.04	0.06	24.2	0.01	686
5	1	0.72	27.1	0.11	1.02	37.4	0.13	1.55	35.4	0.22	233
	2	0.77	23.8	0.21	0.67	34.3	0.11	0.74	23.7	0.13	277
	3	0.17	23.7	0.06	0.08	26.4	0.02	0.08	21.6	0.01	604
6	1	31.77	43.4	0.98	34.03	47.6	2.46	33.67	46.3	3.17	20
	2	1.94	23.5	0.16	1.02	26.8	0.12	0.91	26.6	0.11	285
	3	0.15	23.2	0.03	0.11	21.1	0.03	0.18	23.3	0.03	628

3.1 幅度谱的仿真

前文所述的主频幅度随比例距离的变化规律为

任意距离的爆破振动信号幅度谱的仿真提供了可行的思路。具体方法如下:

根据所要模拟爆破振动波形对应的最大单段药量和爆心距,计算比例距离,然后根据公式(9)和(12),计算对应的主频及主频幅度。需要注意的是,由拟合公式计算出的主频和主频幅度只是统计学意义上的平均结果,并不代表真实的幅度值。因此,主频及主频幅度的选定还需要考虑测量误差、地质条件、传播路径等随机因素,故在均值附近一定的

置信区间(本文中选取 95% 置信度)内随机选取。假设主频和主频幅度都遵循正态分布,在随机选取某一主频和主频幅度之后,通过 MATLAB 软件进行编程计算,可以得到一个与图 1(c)中实测信号的幅度谱特征相似的仿真幅度谱。图 12 展示了 3 个不同比例距离对应的爆破振动信号幅度谱的仿真结果。

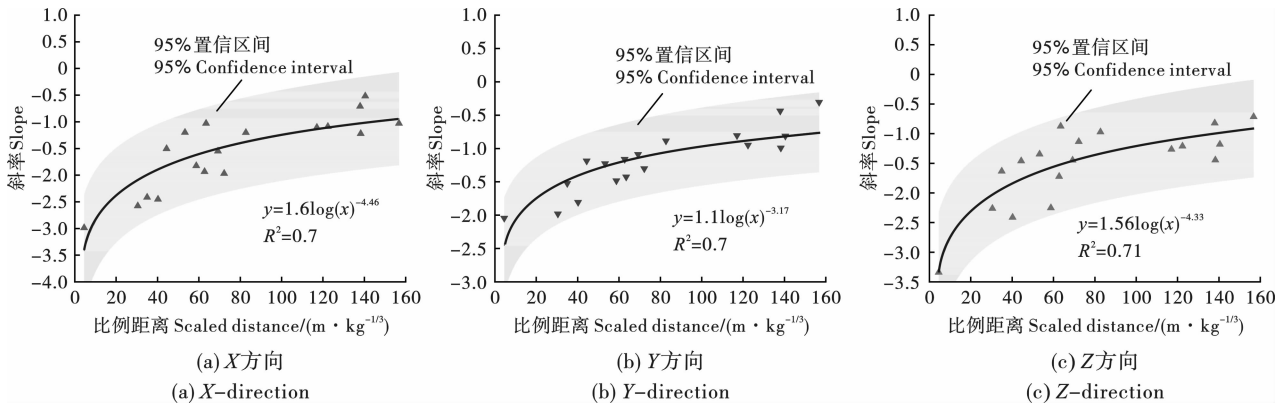


图 11 相位斜率随比例距离的变化趋势

Fig. 11 Variation trend of phase slope with scaled distance

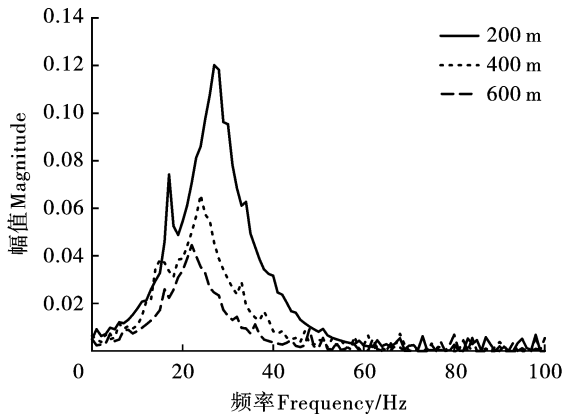


图 12 随机生成的幅度谱(x方向)

Fig. 12 Randomly generated magnitude spectra(x-direction)

### 3.2 相位谱的仿真

仍然以  $x$  方向为例,依据比例距离,由图 11(a)和公式(15)计算相位斜率。同样需要注意,图 11 拟合计算出的相位斜率也是统计学意义上的平均结果,并不代表真实的相位斜率一定是公式计算结果。因此,假设相位斜率遵循正态分布,在拟合曲线两侧 95% 置信区间内随机选取相位斜率。与影响主频的随机因素相同,为了模拟实际相位谱中可能存在的波动与变化,在得到的相位直线的基础上加入一定水平的噪声,得到与图 3(b)中相位谱特征相似的仿真相位谱。图 13 展示了 3 个不同比例距离对应的爆破振动信号相位谱的仿真结果。

### 3.3 爆破振动波形仿真

在得到仿真的幅度谱和相位谱后,将其带入式(5),仍然利用傅立叶级数计算波形。为确保仿真波形具有与实际波形相似的“头部上升,尾部衰减”的特征,本研究结合指数函数  $f(t) = \frac{1 - e^{-at}}{\max f(t)}$  ( $t \leq t_{ppv}$ ) 和高斯分布函数  $f(t) = Ae^{-\frac{(t-t_{ppv})^2}{2a^2}}$  ( $t > t_{ppv}$ ),  $A = 1, \sigma = 0.2$  合成波形包络函数。将包络函数与傅立叶级数计算结果相乘,最终得到仿真的爆破振动波形。如图 14 所示。波形仿真的具体步骤如图 15 所示。

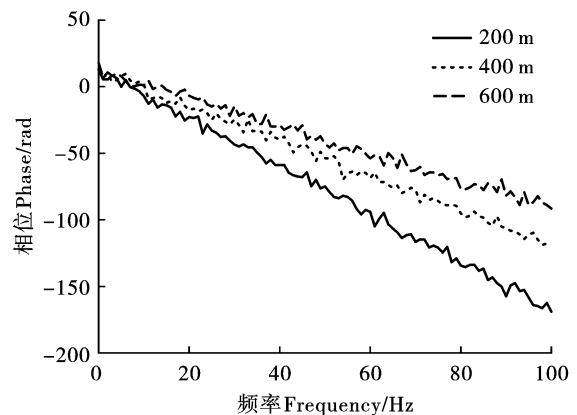


图 13 随机生成的相位谱(x方向)

Fig. 13 Randomly generated phase spectra(x-direction)

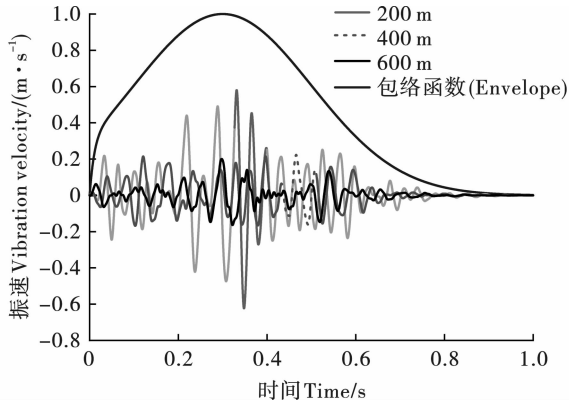


图 14 合成波形(x方向)  
Fig. 14 Synthesized waveform(x-direction)

### 4 验证与讨论

为了验证幅-相联合波形仿真方法的有效性,分别取三个比例距离:200 m、400 m、600 m,采用蒙特卡洛模拟,按照前述方法对 x 方向的爆破振动波形重复计算 100 次,获得 100 个不同的爆破振动波形及其峰值质点振速(PPV)。将三个距离的 PPV 进行统计分析,画出相应的直方图(如图 16 所示)。由图 16 可以看出,仿真爆破振动波形的 PPV 近似服从正态分布,三个距离的均值和方差分别为:(0.73,0.14)、(0.41,0.07)、(0.16,0.03)。将这三个分布的误差条图对标到图 8(a)中的爆破振动衰减曲线上,可以看到分布基本涵盖了对应比例距离

附近的实测 PPV(如图 17(a)所示),这也验证了本文提出的仿真模型的可信度和实用性。同样地,y 和 z 方向的 PPV 误差条图也展示在图 17(b)和图 17(c)中。

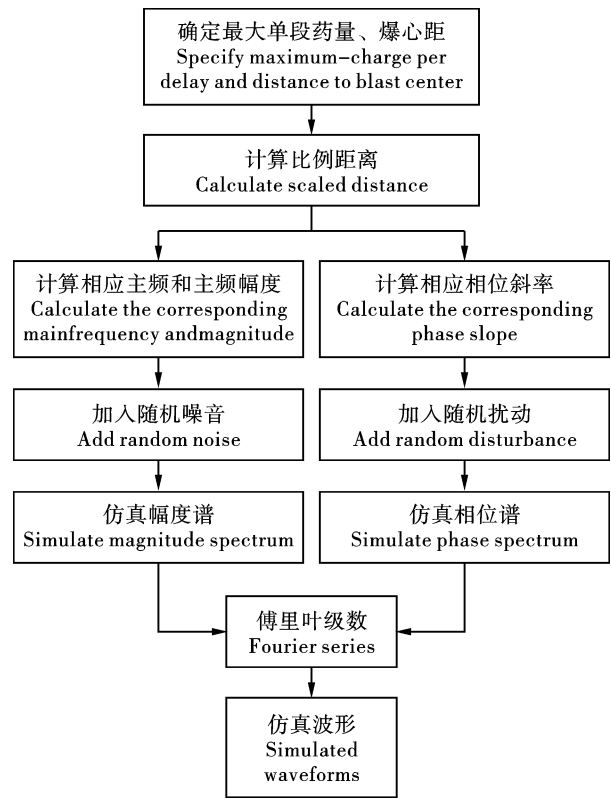


图 15 波形仿真流程图  
Fig. 15 Waveform simulation flowchart

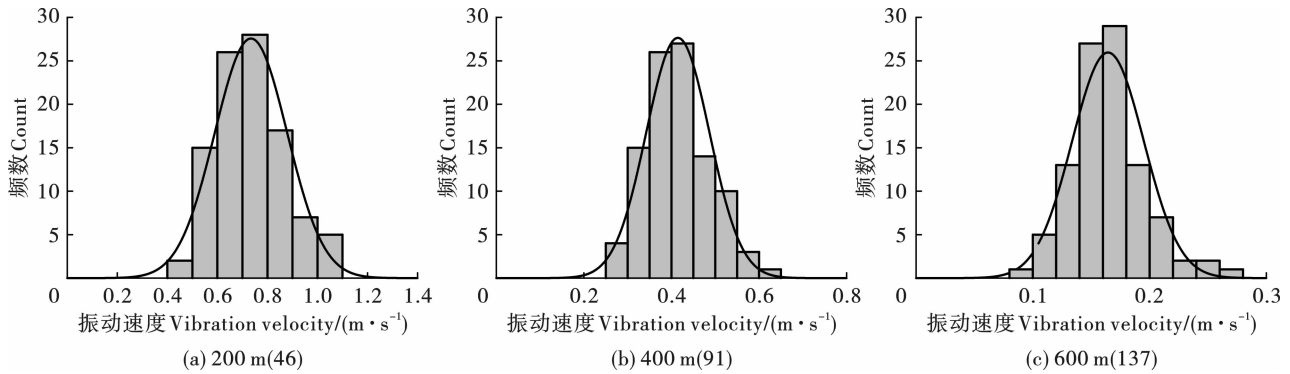


图 16 蒙特卡洛模拟 PPV 直方图

Fig. 16 PPV histogram by Monte Carlo simulation

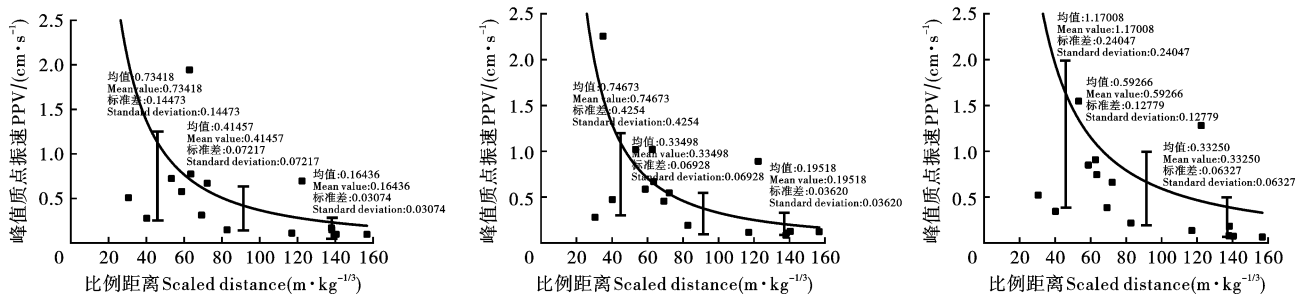


图 17 PPV 衰减曲线与蒙特卡洛模拟结果

Fig. 17 PPV decay curves and Monte Carlo simulation results

需要注意的是,本研究所得出的主频、主频幅度、相位斜率的拟合结果,符合物理规律的变化趋势,但是仍有可能因数据量和具体工程的不同,其参数的具体数值有所不同。其原因除了潜在的测量误差之外,可能还包括爆破振动的随机性、地质条件的各向异性和非均匀性以及传播路径的差异性。这意味着,对于不同矿山或爆破工程,需要积累当地的爆破振动数据才能更准确地分析其中规律。

在波形仿真过程中,该方法不仅关注信号的频谱特性,还充分考虑并利用了频谱的衰减规律。这一特性使得该方法能够更真实地模拟信号在真实环境中的传播和衰减过程。

## 5 结论

本研究针对爆破振动分析与安全评估需求,结合主频衰减模型与蒙特卡洛模拟验证,建立了考虑幅度谱多峰特性和相位线性衰减的联合仿真模型,提出基于傅立叶分析的幅-相联合波形仿真方法。主要结论如下:

1) 爆破振动信号的相位谱经解卷绕处理后,其主导频率成分的相位值呈现线性衰减规律,并且相位直线斜率与比例距离呈对数函数关系。

2) 仿真波形峰值质点振速(PPV)的统计分布与实测数据具有良好吻合度。相较于时域叠加方法,本方法通过引入幅度和相位动态衰减机制,能够针对性地表征各频率成分的分布及其变化,有效仿真符合需求的爆破振动波形。

3) 幅-相联合爆破振动波形仿真方法具有较好的可操作性,可为复杂结构动力响应分析提供更精确的输入荷载。

未来研究需进一步考虑地质各向异性对相位传播的影响,并开发基于机器学习的参数动态修正模型,以提升该方法在不同工程场景中的适应性。

### 参考文献 (References)

- [1] MOHAMMAD Forrukh Hossain Khan CA, MD Jafar Hossain, MOHAMMAD Tofayal Ahmed, et al. Ground vibration effect evaluation due to blasting operations[J]. *Helvion*, 2025, 11(2): e41759.
- [2] DUVALL W I, FOGELSON D E. Review of criteria for estimating damage to residences from blasting vibrations [R]. Washington: U. S. Department of the Interior, Bureau of Mines, 1962.
- [3] EDWARDS A T, NORTHWOOD T D. Experimental studies of the effects of blasting on structures[J]. *The Engineer*, 1960(210): 538-546.
- [4] 汪旭光,于亚伦.关于爆破震动安全判据的几个问题[J]. *工程爆破*, 2001, 7(2): 88-92.
- [4] WANG Xu-guang, YU Ya-lun. On several problems of safety criterion for blasting vibration [J]. *Engineering Blasting*, 2001, 7(2): 88-92. (in Chinese)
- [5] 中华人民共和国国家标准编写组. GB6722—2014 爆破安全规程[S]. 北京:中国标准出版社, 2015.
- [5] The National Standards Compilation Group of Peoples Republic of China. GB6722—2014 Safety regulations for blasting[S]. Beijing: Chinese Standard Press, 2015. (in Chinese)
- [6] 张雪亮,黄树棠. 爆破地震效应[M]. 北京:地震出版社, 1981: 72-138.
- [7] 李的林,高振儒,朱立新. 爆破震动危害中几个重要因素分析[J]. *工程爆破*, 1999, 5(3): 64-67.
- [7] LI De-lin, GAO Zhen-ru, ZHU Li-xin. Analysis on several principal factors of blasting vibration hazards [J]. *Engineering Blasting*, 1999, 5(3): 64-67. (in Chinese)
- [8] 李夕兵,凌同华,张义平. 爆破震动信号分析理论与技术[M]. 北京:科学出版社, 2009: 226-239.
- [9] 李 鹏,卢文波,陈 明. 爆破振动全历程预测及主动控制研究进展[J]. *力学进展*, 2011, 41(5): 537-546.
- [9] LI Peng, LU Wen-bo, CHEN Ming. Advances in full time-history prediction and active control of blasting vibration [J]. *Advances in Mechanics*, 2011, 41(5): 537-546. (in Chinese)
- [10] 李 坚,赵 岩,周文磊,等. 掏槽爆破作用下振动波形预测及影响分区确定[J]. *工程爆破*, 2024, 30(4): 122-130.
- [10] LI Jian, ZHAO Yan, ZHOU Wen-lei, et al. Prediction of vibration waveforms and the determination of influence zones under the action of tunnel cutting blasting[J]. *Engineering Blasting*, 2024, 30(4): 122-130. (in Chinese)
- [11] ANDERSON D A, RITTER A P, WINZER S R, et al. A method for site-specific prediction and control of ground vibration from blasting[C]// *Proceedings of the First Mini-Symposium on Explosives and Blasting Research*. San Diego: Society of Explosives Engineers, 1985: 28-43.
- [12] D P Blair. Blast vibration control in the presence of delay scatter and random fluctuations between blastholes[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1993, 17(2): 95-118.
- [13] D P Blair. Non-linear superposition models of blast vibration[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, 45(2): 235-247.
- [14] 卢文波,王进攻. 爆源中远区的爆破振动场模拟[J]. *爆破*, 1996, 13(3): 8-11.
- [14] LU Wen-bo, WANG Jin-gong. A simulation of blasting vibration in middle and far field of explosion source[J]. *Blasting*, 1996, 13(3): 8-11. (in Chinese)
- [15] SILVA-CASTRO J J. Blast vibration modeling using improved signature hole technique for bench blast [D]. Lexington: University of Kentucky, 2012.
- [16] 杨年华,张 乐. 爆破振动波叠加数值预测方法[J]. *爆炸与冲击*, 2012, 32(1): 84-90.

- [16] YANG Nian-hua, ZHANG Le. Blasting vibration waveform prediction method based on superposition principle [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012, 32(1): 84-90. (in Chinese)
- [17] SINGH C P, AGRAWAL H, MISHRA A K. A study on influence of blast-induced ground vibration in dragline bench blasting using signature hole analysis [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, 13(13): 10.
- [18] 何 理, 谢先启, 韩传伟, 等. 基于地震波频谱分析与线性叠加的电子雷管延时优选 [J]. *金属矿山*, 2021, 56(11): 41-48.
- [18] HE Li, XIE Xian-qi, HAN Chuan-wei, et al. Delay time interval optimization of electronic detonator based on spectrum analysis and linear superposition of seismic wave [J]. *Metal Mine*, 2021, 56(11): 41-48. (in Chinese)
- [19] 姜建武, 龙 源, 徐全军, 等. 人工模拟爆破震动信号及其频谱特性检验 [J]. *工程爆破*, 2001, 7(1): 7-11.
- [19] LOU Jian-wu, LONG Yuan, XU Quan-jun, et al. Simulation of blasting vibration signal and verification of its frequency spectrum [J]. *Engineering Blasting*, 2001, 7(1): 7-11. (in Chinese)
- [20] 胡广书. 数字信号处理: 理论、算法与实现 [M]. 第2版. 北京: 清华大学出版社, 2003: 94-120.
- [21] ALAN V Oppenheim, ALAN S Willsky, S Hamid Nawab. 信号与系统 [M]. 第2版. 北京: 电子工业出版社, 2020: 385-534.
- [22] SILVA-CASTRO J J. Blast vibration modeling using improved signature hole technique for bench blast [D]. Lexington: University of Kentucky, 2012.
- [23] 范 磊, 沈 蔚. 爆破振动频谱特性实验研究 [J]. *爆破*, 2001, 18(4): 18-20.
- [23] FAN Lei, SHEN Wei. Experimental study on frequency spectrum characteristics of blast vibration wave [J]. *Blasting*, 2001, 18(4): 18-20.
- [24] 李新平, 张雪屏, 刘飞香, 等. 群孔齐发爆破岩体振动频谱特性研究 [J]. *爆破*, 2021, 38(1): 14-20, 35.
- [24] LI Xin-ping, ZHANG Xue-ping, LIU Fei-xiang, et al. Vibration spectrum characteristics of rock mass in simultaneous borehole blasting [J]. *Blasting*, 2021, 38(1): 14-20, 35. (in Chinese)
- [25] SHARON K Reamer, KLAUS-G Hinzen, BRIAN W Stump. Near-source characterization of the seismic wavefield radiated from quarry blasts [J]. *Geophysical Journal International*, 1992, 110(3): 435-450.
- [26] Segarra, Pablo, López, et al. Uncertainty in measurements of vibrations from blasting [J]. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 2012, 45(6): 1119-1126.
- [27] 李孝林, 王少雄, 高怀树. 爆破振动频率影响因素分析 [J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2006, 25(2): 204-206.
- [27] LI Xiao-lin, WANG Shao-xiong, GAO Huai-shu. Analysis of factors affecting blasting vibration frequency [J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition)*, 2006, 25(2): 204-206. (in Chinese)
- [28] 李 鹏, 卢文波, 吴新霞, 等. 爆源因素对岩体开挖爆破振动频谱特性的影响研究 [J]. *长江科学院院报*, 2014, 31(11): 182-188.
- [28] LI Peng, LU Wen-bo, WU Xin-xia, et al. Influence of blast source parameters on spectral characteristics of vibration induced by blast of rock mass [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2014, 31(11): 182-188. (in Chinese)
- [29] 何 理, 殷 琳, 钟冬望, 等. 爆破振动强度、波形与频谱研究综述: 预测及主动控制 [J]. *爆破*, 2024, 41(3): 189-204, 262.
- [29] HE Li, YIN Lin, ZHONG Dong-wang, et al. Research review on blast vibration intensity, waveform and spectrum: prediction and active control [J]. *Blasting*, 2024, 41(3): 189-204, 262. (in Chinese)
- [30] KARAM Z N, OPPENHEIM A V. Computation of the one-dimensional unwrapped phase [C] // 2007 15th International Conference on Digital Signal Processing. IEEE, 2007: 304-307.
- [31] SHRIKHANDE Manish, GUPTA Vinay Kumar. On the characterisation of the phase spectrum for strong motion synthesis [J]. *Journal Of Earthquake Engineering*, 2001, 5(4): 465-482.
- [32] VIJAY K Arya, H D Holden. Deconvolution of seismic data-an overview [J]. *Geoscience Electronics, IEEE Transactions on*, 1978, 16(2): 95-98.
- [33] 崔年生. 露天深孔台阶爆破振动特征分析及安全控制 [J]. *中国矿业*, 2023, 32(3): 86-90.
- [33] CUI Nian-sheng. Characteristics analysis and safety control of open-pit deep-hole bench blasting vibration [J]. *China Mining Magazine*, 2023, 32(3): 86-90. (in Chinese)
- [34] 张文涛, 汪海波, 高朋飞, 等. 大型露天矿山深孔台阶爆破振动特征与安全控制 [J]. *金属矿山*, 2024, 59(9): 151-160.
- [34] ZHANG Wen-tao, WANG Hai-bo, GAO Peng-fei, et al. Characteristics analysis and safety control of deep-hole bench blasting vibration in Large open-pit mine [J]. *Metal Mine*, 2024, 59(9): 151-160. (in Chinese)
- [35] 卢文波, 张 乐, 周俊汝, 等. 爆破振动频率衰减机制和衰减规律的理论分析 [J]. *爆破*, 2013, 30(2): 1-6.
- [35] LU Wen-bo, ZHANG Le, ZHOU Jun-ru, et al. Theoretical analysis on decay mechanism and law of blasting vibration frequency [J]. *Blasting*, 2013, 30(2): 1-6.
- [36] 周俊汝, 卢文波, 张 乐, 等. 爆破地震波传播过程的振动频率衰减规律研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(11): 2171-2178.
- [36] ZHOU Jun-ru, LU Wen-bo, ZHANG Le, et al. Attenuation of vibration frequency during propagation of blasting seismic wave [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(11): 2171-2178. (in Chinese)