

DOI: 10.11779/CJGE20240846

台阶单孔爆破振动预测模型的构建与参数确定

李洪超^{1,2}, 韩昊轩¹, 李胜林^{*3}, 李晨⁴, 贾贝⁵, 王樾尧⁶

(1. 昆明理工大学公共安全与应急管理学院, 云南 昆明 650093; 2. 昆明理工大学城市学院, 云南 昆明 650053; 3. 中国矿业大学(北京)力学与土木工程学院, 北京 100083; 4. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310008; 5. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 6. 中国市政工程西南设计研究总院有限公司, 四川 成都 610036)

摘要: 基于调制白噪声的过程确定频率函数, 选取 gamma 函数作为强度函数, 构建能够描述波形随机性及非平稳性的台阶单孔爆破振动预测模型; 以现场实测波形为对比样本、残差相似度为评价指标, 用试错法计算得出符合现场实测波形的模型参数大致区间; 对各参数试错区间进行划分并利用正交设计与极差分析计算得到模型最优参数, 将模型最优参数代入到爆破振动预测模型中, 模型输出波形曲线与现场实测波形的峰值时刻、峰值振速、持续时间、主频的较好吻合, 证明了所构建模型以及参数确定方法的正确性; 将本模型输出峰值振速与萨道夫斯基公式预测结果分别与实测波形的峰值振速进行对比, 较小的计算误差证明了模型所具有的优越性。

关键词: 台阶单孔爆破; 振动预测模型; 波形残差相似度; K-S 双样本检验; 正交试验与极差分析

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2025)12-2652-11

作者简介: 李洪超(1984—), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩石 RHT 参数敏感性和控制爆破理论的研究。E-mail: 34031826@qq.com。

Construction and parameter determination of vibration prediction model for single-hole bench blasting

LI Hongchao^{1,2}, HAN Haoxuan¹, LI Shenglin³, LI Chen⁴, JIA Bei⁵, WANG Xiyao⁶

(1. School of Public Safety and Emergency Management, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 2. City College, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650053, China; 3. China University of Mining and Technology (Beijing), School of Mechanics and Civil Engineering, Beijing 100083, China; 4. Power China, Huadong Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310008, China; 5. China Enfei Engineering Technology Co., Ltd., Beijing 100038, China; 6. China Municipal Engineering Southwest Design and Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610036, China)

Abstract: Based on the process of modulating white noise, the frequency function is determined, and the gamma function is selected as the intensity function to construct a single-hole blasting vibration prediction model that can describe the randomness and non-stationarity of the waveform. Taking the field measured waveform as the comparison sample and the residual similarity as the evaluation index, the approximate interval of the model parameters conforming to the field measured waveform is calculated by the trial and error method. The trial and error interval of each parameter is divided and the optimal parameters of the model are obtained by orthogonal design and range analysis. The optimal parameters of the model are substituted into the blasting vibration prediction model. The output waveform curve of the model is in good agreement with the peak time, peak vibration velocity, duration and main frequency of the field measured waveform, which proves the correctness of the constructed model and the parameter determination method. The output peak vibration velocity of this model and the prediction results of Sadovsky formula are compared with the peak vibration velocity of the measured waveform respectively. The smaller calculation error proves the superiority of this model.

Key words: single-hole bench blasting; vibration prediction model; waveform residual similarity; K-S two-sample test; orthogonal test and range analysis

基金项目: 国家自然科学基金项目(52364016, 52164010, 52064025, 52164009); 云南省“兴滇英才支持计划”青年人才专项(KKXX202456056); 云南省重大科技专项计划项目(202102AG050024) This work was supported by National Natural Science Foundation of China (Grant Nos.52364016, 52164010, 52064025, 52164009 and 52401336), Yunnan Province's 'Xingdian Elite Support Plan' Youth Talent Project (Grant No.KKXX202456056), and Yunnan Province Major Science and Technology Special Plan Project (Grant No.202102AG050024).

收稿日期(Received): 2024-08-20

修回日期(Revised): 2024-11-07

接受日期(Accepted): 2024-11-15

网络出版日期(Online): 2024-11-16

*通信作者(E-mail: lsl@cumtb.edu.cn)

0 引言

爆破被广泛的应用于大规模的工程建设中, 爆破振动作为爆破有害效应之首^[1], 对周围构筑物产生危害甚至造成人员伤亡已经屡见不鲜, 因此, 预测并控制爆破振动具有重要的现实意义。学者们早期研究主要集中在峰值振速、主振频率等单一爆破参数上^[2]。随着研究的深入, 学者们发现仅以爆破峰值振速、主振频率作为爆破振动的安全判据并不完全可靠^[3]。为了适应爆破技术的发展、满足复杂建筑结构响应分析的需求, 爆破振动波形的预测日渐得到学者们的青睐。

目前, 以实测单孔波形为基础的叠加法^[4]是爆破振动波形预测领域中常用的方法, Anderson^[5]首次采用线性叠加理论叠加单孔波形; Blair^[6], Hinzen^[7]对单孔爆破振动进行监测, 采用卷积叠加对群孔波形进行预测。虽然有众多学者对叠加理论进行了完善, 但是所提的线性、非线性叠加模型皆基于单孔爆破振动波形相同的假定, 这与现场实测波形不相符。1947 年 Housner^[8]叠加一系列的随机脉冲构建了第一个地震动平稳随机模型; Kanai^[9], TajimiA^[10]将基岩的影响视为白噪声, 将覆土层视为滤波器, 构建了过滤白噪声模型; 为了描述地震波在传播过程中强度的非平稳性, Bolotin^[11]提出了利用强度包络函数对平稳随机过程进行调幅值。学者们在不同领域建立了众多的预测模型, 虽然预测目标不同, 但在模型参数求解的方法上有着相似之处, 马寒箫等^[12]为研究高斯扩散模型预测精度的影响因素, 设置大气稳定度、气体种类、气体初始密度为正交表因素, 以 NMSE 为评价指标, 得出正交试验各因素的较优水平, 使用极差分析得出最优水平; 宋勇强等^[13]使用神经网络模型来代替发酵现场试验, 设置乙醇浓度、发酵时间、PH 值、发酵温度为正交表因素, 以模型输出含酸量值作为评价指标, 得出正交表中较优水平, 再通过极差分析确定最优水平。

在爆破振动波的预测过程当中, 模型参数的求解与模型的构建同样重要, 为了准确便捷的求解模型参数, 本文在前人模型参数求解方法的基础上, 结合爆破振动波的性质, 归纳出适用于爆破振动预测模型参数的求解方法。因此, 建立可以描述爆破振动波特征的单孔爆破振动预测模型, 并总结出准确快捷的模型参数计算方法, 可以有效提高爆破振动预测结果精度, 具有重要学术价值与实际意义。

1 台阶单孔爆破振动预测模型构建

为保证爆破振动预测模型的强度和频率相互独立, 采用文献^[11]Bolotin 提出的模型, 利用方程 $x(t)$ 来描述模型的频率, $A(t)$ 描述模型的强度, 构建爆破

振动预测模型 $X(t)$ 。

$$X(t) = A(t)x(t) \quad (1)$$

式中: $A(t)$ 为强度包络函数; $x(t)$ 为频率表达式。

1.1 频率方程的建立

求解杜哈梅积分得到单位冲击下单自由度体系下有阻尼的振动方程 $h(t)$ ^[14]:

$$h(t) = \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\omega t} \sin[\omega\sqrt{1-\xi^2}t] \quad (2)$$

式中: t 为时间变量; ω 为固有角频率; ξ 为阻尼比 (波阻抗)。

用高斯白噪声序列卷积振动方程 $h(t)$, 得到频率输出方程 $f(t)$:

$$f(t) = h(t) \otimes w(t) \text{ 或 } f(t) = \int_{-\infty}^t h(t-\tau)w(\tau)d\tau \quad (3)$$

式中: $w(t)$ 为白噪声序列; $f(t)$ 为未标准化处理的频率函数。

振动方程方差为 σ_f^2 :

$$\sigma_f^2 = S \int_{-\infty}^{+\infty} h^2(t)dt \quad (4)$$

使用式 (4) 对方程进行标准化处理, 来消除频率函数的强度属性, 并得到频率方程 $x(t)$:

$$x(t) = \frac{f(t)}{\sigma_f} = \frac{1}{\sigma_f} \int_{-\infty}^t h(t-\tau)w(\tau)d\tau \quad (5)$$

式中: S 为白噪声功率谱密度; $h(t)$ 为单自由度体系下的单位冲击振动方程; \otimes 为卷积运算或卷积核。

为了描述振动波形频率的非平稳性, 赋予滤波器阻尼比 ξ 和固有 (角) 频率 ω 时变性^[15], 利用 $\xi(\tau)$ 与 $\omega(\tau)$ 的时变性将频率方程 ($x(t)$) 非平稳化, 采用指数衰减函数来描述振动波的时变性:

$$\omega(\tau) = \eta e^{-\gamma\tau} \quad (6)$$

式中: η 为初始角频率; γ 为下降指数。

故修正后的振动方程与标准差为

$$h[t-\tau, \lambda(\tau)] = \frac{1}{1-\xi^2} e^{-\xi\omega(\tau)(t-\tau)} \sin\left[\omega(\tau)\sqrt{1-\xi^2}(t-\tau)\right], \quad (7)$$

$$\sigma_f^2(t) = S \int_{-\infty}^t h^2[t-\tau, \lambda(\tau)]d\tau \quad (8)$$

至此, 得到能够描述频率非平稳性的数学方程 $x(t)$, 其表达式为

$$x(t) = \frac{1}{\sigma_f} f(t) = \frac{1}{\sigma_f} \int_{-\infty}^t h[t-\tau, \lambda(\tau)]w(\tau)d\tau \quad (9)$$

1.2 强度方程的建立

常用的强度方程主要有 Goto-Toki 单参数函数、胡聿贤-周锡元双指数函数、Iyengar 单指数函数、衰减正弦函数、对数正态分布函数、Saragoni-Hart Gamma 函数^[16] (图 1) 等, 由图 1 (c), (e) 可知, Iyengar 单指数函数和对数正态分布函数的初始值不为 0, 这与爆破振动速度曲线不相符, 将二者剔除;

采用控制变量法以峰值时刻、包络线形状为依据对强度函数进行筛选(图 2, 3), 因 Goto-Toki 单参数函数只有一个参数, 无法改变函数的峰值时刻; 由图 2(a), (b)可知, 双指数函数与衰减正弦函数的峰值前半部分几乎没有调节能力; 由图 3(a)~(c)可知, gamma 函数的调节性较强, 故选用 gamma 函数作为强度包络函数(A(t)):

$$A(t) = I_0 t^{\alpha-1} e^{-\beta t} \quad (10)$$

由式(1)可得, 所构建的台阶爆破振动预测模型(X(t))为

$$X(t) = I_0 t^{\alpha-1} e^{-\beta t} \frac{1}{\sigma_f} \int_{-\infty}^t h[t-\tau, \lambda(\tau)] w(\tau) d\tau \quad (11)$$

式中: α, β 为与包络线峰值位置和形状有关的参数, 且要求 $\alpha > 1$ 。

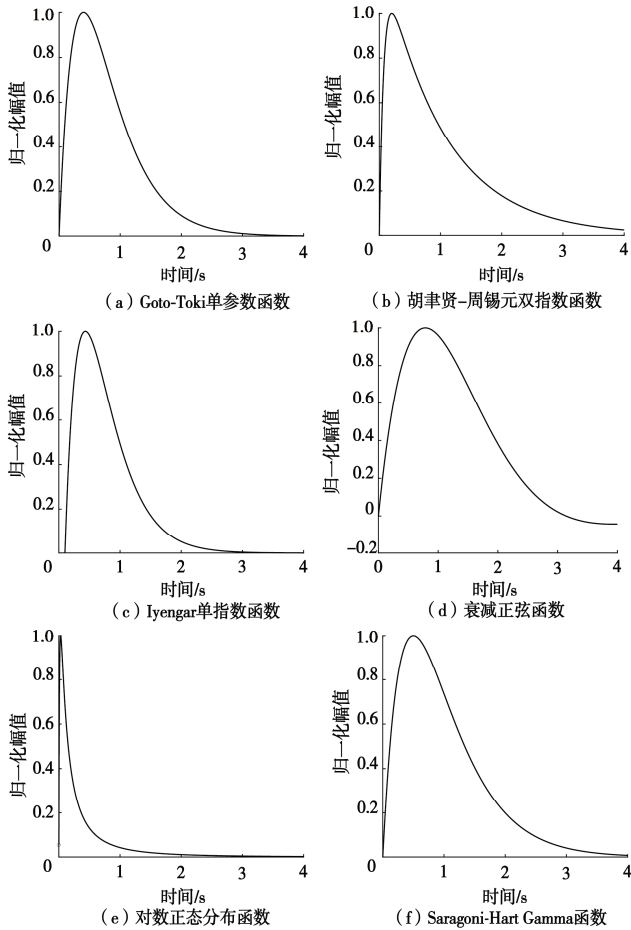


图 1 不同强度曲线

Fig. 1 Different intensity curves

利用该模型输出模拟波形后, 因用白噪声做冲击序列会夸大低频处的幅值^[17], 导致现场质点(监测点)的时程位移不为 0, 这与爆破振动波的位移特性不符, 故对生成的 X(t)进行高通滤波, 减小低频处的幅值来提高 X(t)在低频处的模拟精度。为了说明高通滤波器对模型输出曲线的影响规律, 采用不同截止频率的一阶线性高通滤波器对模型输出的波形曲线进行高通滤波, 滤波结果如图 4 所示, 由图 4 可知, 随着截止频

率的不断增大, 曲线峰值振速不断减小, 质点位移收敛于 0, 但过高的截止频率会导致波形峰值波速发生大幅改变, 因此, 为了确定合理的截止频率, 规定滤波后峰值振速的改变量为 5%所对应的滤波器频率为最佳截止频率。

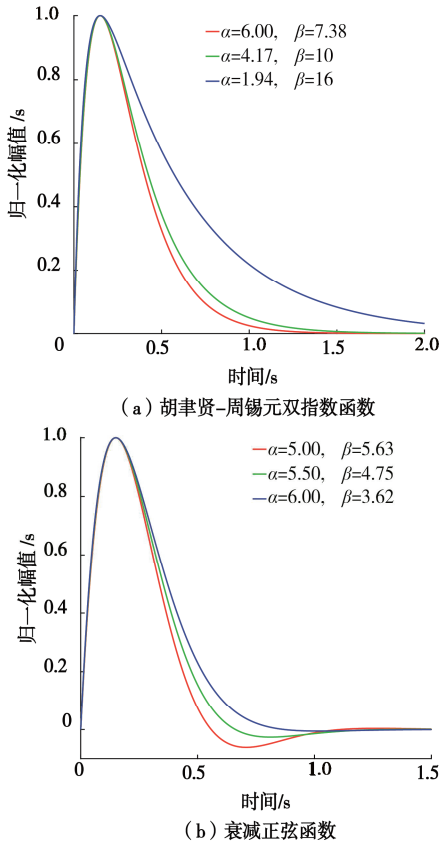
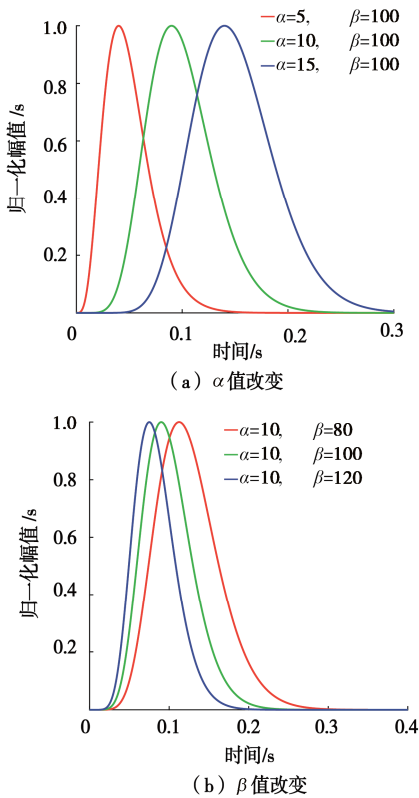


图 2 强度曲线与模型参数的变化规律

Fig. 2 Variation of strength curve and model parameters



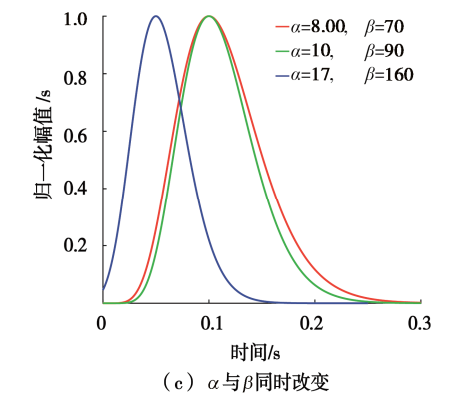


图 3 gamma 函数随模型参数的变化规律
Fig. 3 Variation of gamma function with model parameters

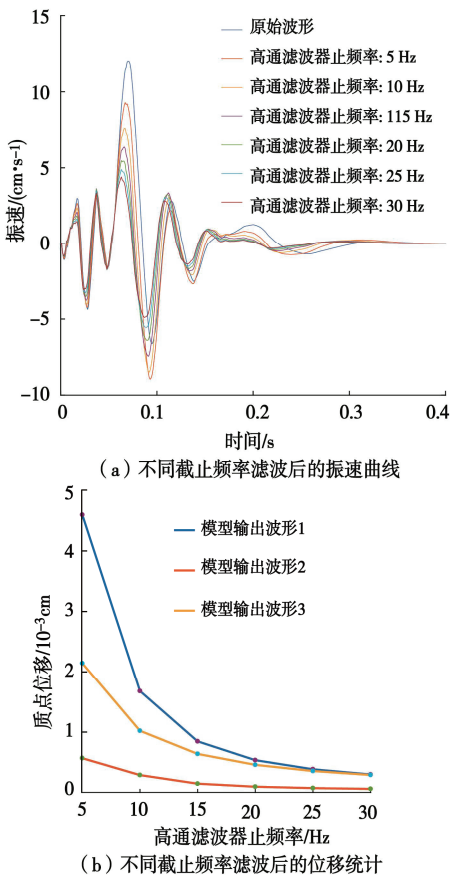


图 4 不同截止频率的高通滤波器过滤波形后的振速曲线与质点位移
Fig. 4 Vibration velocity curves and particle displacement after filtering waveforms using high pass filters with different cutoff frequencies

2 模型参数确定研究

2.1 波形相似度的判断方法

为了描述模型输出曲线与实测波形的差异，经过对比分析，以峰值振速，峰值时刻，主频，持续时间来描述波形曲线的特征，持续时间是指出从波形 0 时刻开始到最后大于 $1/e$ 峰值振速后的零点时刻。但波形特征属性相似无法描述两组波形相似，如图 5 所

示，波形 1 与波形 2 在峰值振速、峰值时刻比较接近，但这两组波形相似度不高，为了解决这个问题，采用残差相似度 C_E 来量化波形之间的相似程度。

$$C_E = \sum_{i=1}^n \alpha_i \sigma_i \quad (12)$$

式中： $\alpha_i = \frac{|x_i|}{\sum_{i=1}^n |x_i|}$ ， $\sigma_i = 1 - \frac{|x_i - \hat{x}_i|}{\max(|x_i|, |\hat{x}_i|)}$ 。其中， x_i ，

\hat{x}_i 为实测爆破信号和仿真爆破信号的第 i 个时间点对应振幅； n 为信号长度； σ_i 为第 i 个点的可信度； α_i 为第 i 个点的权重； C_E 为仿真信号与实测信号的残差可信度量化指标，称为残差相似度。结合上述公式可知，仿真波形相似度越高， C_E 越接近于 1。

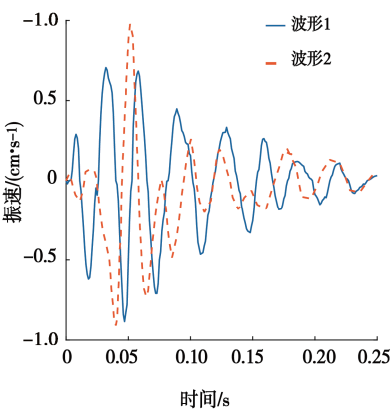


图 5 波形峰值振速和峰值时刻对比图
Fig. 5 Comparison of peak vibration velocity and peak time of waveform

为了保证模型输出波形与实测波形的相似度，对残差相似度阈值 C_{E0} 进行确定，利用本文所构建的台阶单孔爆破振动预测模型输出 8 组模拟波形，将模拟波形与一组实测波形进行比较，统计每组模拟波形与实测波形中 5 个波峰峰值较大的误差，统计结果如表 1 所示。由表 1 可知，残差相似度 C_E 越大，各个波形误差的均值越小。基于模拟曲线与现场实测曲线的对比结果，规定各波峰之间误差均值不大于 20% 时，认为仿真波形与实测波形相似，由表中数据可知，当 $C_{E0}=0.40$ 时，两个波形的各波峰误差均值分别为 19.6%，19.8%，故本文选取 $C_{E0}=0.40$ 作为残差相似度的阈值。

表 1 仿真波峰值与实测波峰值 5 个较大的误差

Table 1 Five significant errors between simulated peak values and measured peak values

序号	波峰 1	波峰 2	波峰 3	波峰 4	波峰 5	均值	C_E
1	94	86	26	39	53	59.6	0.28
2	46	18	67	29	63	44.6	0.30
3	11	20	31	28	32	24.4	0.35
4	18	9	27	30	26	22.0	0.39
5	6	20	26	24	22	19.6	0.40
6	18	19	9	29	27	19.8	0.40
7	17	14	5	23	21	16.0	0.42
8	24	5	14	7	25	15.0	0.49

2.2 模型输出波形随机性验证

(1) 仿真随机性验证

根据爆破振动监测结果可知，爆破振动波形具有随机性，为了验证模型输出波形的随机性，在模型选取相同参数的情况下，以同一组模型参数输出 3 条仿真波形，对仿真结果的随机性进行验证（图 6）。图 6 中 3 次仿真波形的峰值时刻依次为 0.074, 0.050, 0.057 s；峰值振速依次为 0.055, 0.520, 0.056 cm/s；持续时间依次为 0.119, 0.089, 0.094, 0.069 s；以及主频依次为 14, 15, 12, 13 Hz。由此可知，在相同模型参数取值下，仿真结果的波形曲线特征并不完全相同，在波形形状及特征上表现出一定的随机性，这与爆破振动波形的实际特征相符。

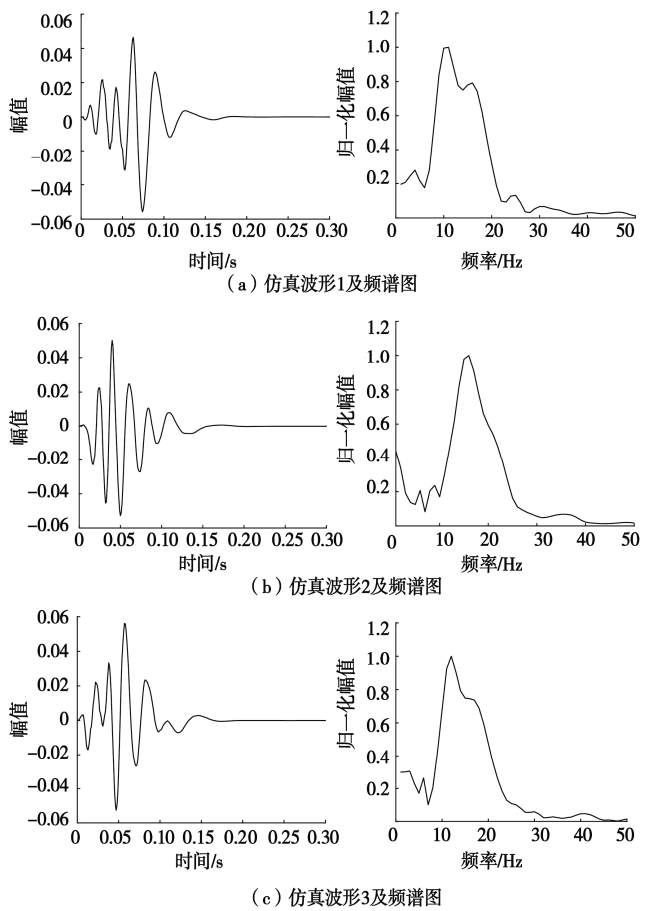


图 6 仿真波形图及频谱图

Fig. 6 Simulation waveform and spectrum diagram

(2) 波形随机性利用

由大数定理可知，随着试验次数的增加，事件发生的概率逐渐趋于稳定，故采用多组试验的方法来消除同一模型参数下输出波形特征的随机性。为了寻找最佳重复试验次数，本文分别进行了两轮试验次数为 200, 500, 700 的重复仿真试验，并引入 KS 双样本检验^[18]两轮循环模拟的波形曲线特征（峰值时刻、峰值振速、持续时间、主频）分布的相似程度。

KS 双样本检验假设，现有两个独立样本 X_1, \dots

$X_m \sim F_1(x)$, $Y_1, \dots Y_n \sim F_2(x)$ ，原假设 $H_0: F_{1m}(x) = F_{2n}(x)$ ，备择假设： $F_1(x) \neq F_2(x)$ ，统计两个样本中事件发生的频数，计算各事件的离散概率密度并绘制离散分布函数图，构建的统计量 $Z(\lambda)$ 小于等于临界值 Z_0 的概率 P 为

$$P = 2 \cdot \sum_{j=1}^{\infty} (-1)^{j-1} e^{-2j^2 \lambda^2} \quad (13)$$

式中： $\lambda = \left[\sqrt{N_e} + 0.12 + \frac{0.11}{\sqrt{N_e}} \right] D$ ； $N_e = \frac{mn}{m+n}$ ， $D_{n,m} = \sup_x |F_{1,n}(x) - F_{2,m}(x)|$ ； $F_{1,m} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x(i)$, $F_{2,n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x(i)$ 。

其中， m 为样本 1 的数量， n 为样本 2 的数量， $F_{1,m}$ 为样本 1 的分布函数， $F_{2,n}$ 为样本 2 的分布函数， $D_{n,m}$ 为 $F_{1,m}(x)$ 与 $F_{2,n}(x)$ 差值的最大值。

波形曲线特征的 KS 双样本检验结果如表 2 所示，其中两个分布之间的 P 值越接近于 1，其相似度越高。由表 2 可知，两轮 200 次循环模拟结果的波形曲线特征所对应的均值基本相同，误差不超过 5% 可忽略不计，但其对应的 P 值较低，峰值时刻 T_p 的 P 值为 0.66、峰值振速 V_{max} 的 P 值为 0.36、持续时间 T_0 的 P 值为 0.48、主频 f 的 P 值为 0.67。这意味着两组 200 次循环模拟结果的 T_p , V_{max} , T_0 , f 分布并不是很吻合，相比之下，两轮 500 次和两轮 700 次试验结果波形曲线特征不仅在均值方面误差更小，而且对应的 P 值都超过了 0.95，这表明 500 次和 700 次重复试验的特征分布比较接近。但又考虑到计算机耗时问题，本文选取 500 次重复试验的结果来描述固定模型参数下仿真试验的波形曲线特征，从而消除随机性对模型结果带来的影响。

表 2 波形曲线特征的 K-S 双样本检验结果

Table 2 Results of K-S two sample test for waveform curve characteristics

循环次数	characteristics							
	峰值时刻		峰值振速		持续时间		主频	
	T_p/ms		$V_{\text{max}}/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$		T_0/ms		F/Hz	
	均值	P 值	均值	P 值	均值	P 值	均值	P 值
200	44	0.66	0.52	0.36	119	0.48	33	0.67
200	43.6		0.52		120		33	
500	45.6	0.96	0.51	0.98	123	0.94	32	0.92
500	45.3		0.5		125		32	
700	44.6	0.98	0.5	0.99	124	0.98	32	0.95
700	44.7		0.49		123		32	

2.3 模型参数选取规定

根据本文所构建模型的特点，不同频率方程参数所生成的波形时程频率具有唯一性，其所对应的频率函数参数也唯一，而对于不同的强度方程参数可能会输出相似度极高的波形，现以两种不同的强度方程参

数为例(频率方程参数固定不变): 第一组强度方程参数($I_0=10, \alpha=2, \beta=20$)、第二组强度方程参数($I_0=73, \alpha=2.5, \beta=30$), 分别代入到爆破振动模型中(图 7 所示), 第一组、第二组强度方程参数所输出的峰值时刻分别为 0.068, 0.068 s; 峰值振速分别为 0.245, 0.239 cm/s; 持续时间分别为 0.24, 0.238 s; 主频分别为 8, 8 Hz 两组波形的残差相似度为 0.85; 经分析可得, 这两组参数所输出的波形几乎完全一致。为了提高模型参数确定的速度, 现规定当模型参数输出曲线的残差相似度期望第一次大于 0.4 时, 即确定该模型参数为符合现场试验波形特征的参数。

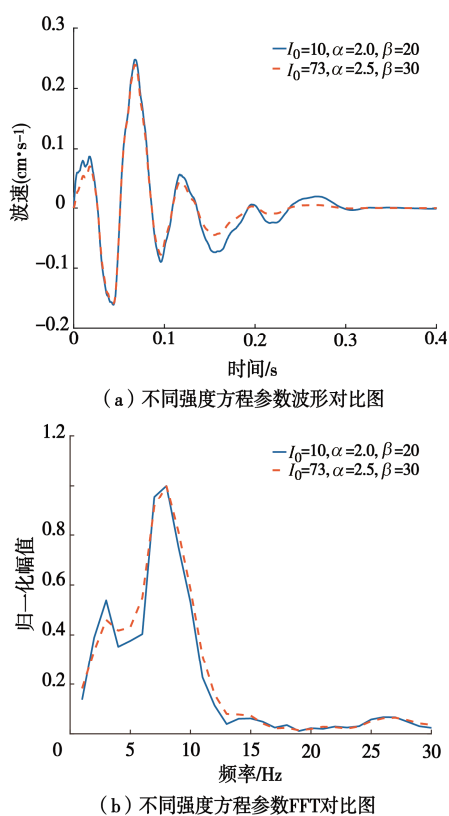


图 7 现场实测波形与预测模型对比图

Fig. 7 Comparison between on-site measured waveforms and prediction models

2.4 模型参数确定方法

(1) 进行参数计算时, 首先要进行试错试验, 得到各模型参数的近似区间 $[I_{0min}, I_{0max}]$, $[\alpha_{min}, \alpha_{max}]$, $[\beta_{min}, \beta_{max}]$, $[\eta_{min}, \eta_{max}]$, $[\gamma_{min}, \gamma_{max}]$ 。将近似区间划分为若干个闭区间 $[I_{01}, I_{02}]$, $[I_{02}, I_{03}]$, $\cdots, [I_{0n-1}, I_{0n}]$, 选取各区间的上下限 $I_{01}, I_{02}, I_{03}, I_{0n-1}, I_{0n}$ 作为正交设计的若干个水平, 其它 4 个参数同理。

(2) 选用模型参数 ($I_0, \alpha, \beta, \gamma, \eta, \xi$) 作为正交表因素, 并基于大量的不同正交试验水平验证, 过多的正交表水平会增加试验的次数, 增加求解模型参数的计算量, 过少的正交表水平可能无法保证模拟波形的精度, 在综合考量求解模型参数的计算量与模

型的模拟精度后, 选取 $L_{25}(5^5)$ 的正交表计算模型参数。利用所构建的模型对正交试验表中模型参数进行曲线输出, 计算 25 组试验的残差相似度期望, 确定正交表中残差相似度最大的模型参数为现场实测波形的较优组合参数, 在正交试验的基础上采用极差分析计算得到最优组合参数。

3 模型的工程验证与优越性对比

3.1 江西某铜矿现场验证及与其它模型优越性对比

在江西某铜矿进行 1 次台阶单孔爆破振动测试试验, 爆区岩体分布主要为千枚岩及少量斑岩, 炸药种类为乳化炸药, 采用数码电子雷管逐孔起爆, 孔间毫秒延时为 500 ms, 现场布置图见图 8; 监测到的典型样本波形以#1 炮孔为例, 如图 9 所示; 台阶爆破振动现场试验参数见表 3。

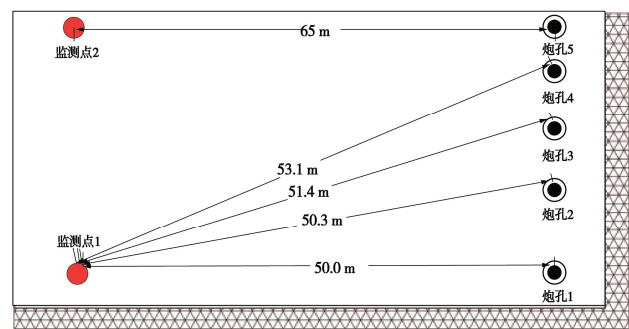


图 8 台阶单孔爆破振动现场布置图

Fig. 8 On-site layout of single hole bench blasting vibration

表 3 台阶爆破振动现场试验参数

Table 3 Parameters of on-site test for step blasting vibration

序号	监测点峰值振速/(cm·s ⁻¹)	装药量/kg	到监测点距离/m	孔径/mm	孔深/m	填塞/m
1	9.821	650	50.00	250	16.5	7.00
2	5.447	450	50.30	250	14.5	7.80
3	5.956	450	51.42	250	14.5	7.80
4	0.242	50	53.16	250	5.0	4.25
5	0.374	100	65.00	250	6.0	3.00

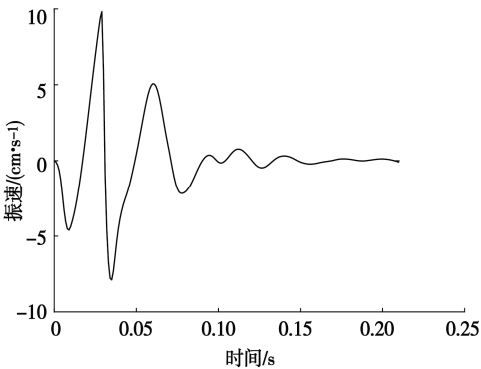


图 9 #1 炮孔爆破振动监测样本波形

Fig. 9 Sample waveform of vibration monitoring for #1 blast hole blasting

(1) 爆破振动预测模型的现场试验验证

为了验证模型有效性,利用本文所构建的模型对#1 炮孔、#5 炮孔的爆破振动波形进行模拟,并将模拟波形与现场实测波形进行验证。整个计算过程以#1 炮孔为例,首先对模型参数进行试错试验,得到模型参数区间(表 4)。将 I_0 , α , β , γ , η , ξ 等间隔划分为 5 个区间,区间取值如表 5 所示。具体计算结果见表 6。由表 6 可知,25 组试验结果中残差相似度 C_E 的最大值为 0.520, C_E 最大时所对应的参数组合为 $I_0=400$, $\alpha=2.0$, $\beta=40$, $\eta=220$, $\gamma=1.7$ 。

表 4 试错试验所确定的模型参数大致区间

Table 4 Approximate range of model parameters determined by trial and error experiments					
模型参数	I_0	α	β	η	γ
区间范围	[450, 600]	[1.8,2.4]	[25,40]	[200,250]	[1.5,1.8]

表 5 区间范围内的各因素水平的划分

Table 5 Division of factor levels within interval range					
序号	I_0	α	β	η	γ
1	400	1.6	20	210	1.4
2	450	1.8	25	220	1.5
3	500	2.0	30	230	1.6
4	550	2.2	35	240	1.7
5	600	2.4	40	250	1.8

表 6 残差相似度计算结果

Table 6 Residual similarity calculation results						
组别	I_0	α	β	η	γ	C_E
1	400	1.6	20	210	1.4	0.126
2	400	1.8	30	240	1.8	0.347
3	400	2.0	40	220	1.7	0.520
4	400	2.2	25	250	1.6	0.378
5	400	2.4	35	230	1.5	0.391
6	450	1.6	40	240	1.6	0.288
7	450	1.8	25	220	1.5	0.251
8	450	2.0	35	250	1.4	0.488
9	450	2.2	20	230	1.8	0.290
10	450	2.4	30	210	1.7	0.414
11	500	1.6	35	220	1.8	0.226
12	500	1.8	20	250	1.7	0.165
13	500	2.0	30	230	1.6	0.408
14	500	2.2	40	210	1.5	0.470
15	500	2.4	25	240	1.4	0.367
16	550	1.6	30	250	1.5	0.165
17	550	1.8	40	230	1.4	0.400
18	550	2.0	25	210	1.8	0.305
19	550	2.2	35	240	1.7	0.479
20	550	2.4	20	220	1.6	0.283
21	600	1.6	25	230	1.7	0.118
22	600	1.8	35	210	1.6	0.330
23	600	2.0	20	240	1.5	0.209
24	600	2.2	30	220	1.4	0.426
25	600	2.4	40	250	1.8	0.402

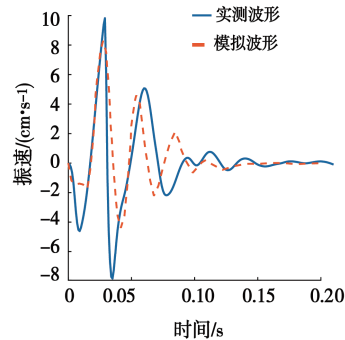
在正交试验的基础上进行极差分析,并以 k 值作为评价指标选取最优水平,极差分析结果见表 7。由表 7 可知模型参数对应的最优水平分别为 1, 4, 5, 2, 1。最优水平所对应的最优参数为 $I_0=400$, $\alpha=2.2$,

$\beta=40$, $\eta=220$, $\gamma=1.4$, 将此组模型参数代入本文所构建的台阶单孔爆破预测模型输出 500 组波形,计算模拟波形与实测波形的残差相似度期望 C_E 为 0.524。

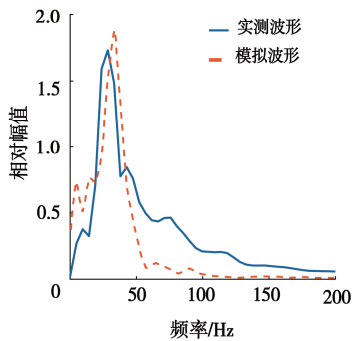
表 7 最大残差相似度 C_E 极差分析表

Table 7 Maximum residual similarity C_E range analysis table					
编号	I_0	α	β	η	γ
K1	1.76	0.92	1.07	1.64	1.81
K2	1.73	1.49	1.42	1.71	1.49
K3	1.64	1.93	1.76	1.61	1.69
K4	1.63	2.04	1.91	1.69	1.70
k1	0.214	0.112	0.130	0.200	0.219
k2	0.210	0.181	0.172	0.207	0.180
k3	0.198	0.234	0.214	0.195	0.205
k4	0.198	0.248	0.232	0.205	0.206
最优水平	1	4	5	2	1

为了验证模型的有效性,将模型输出最大残差相似度 C_E 的#1 炮孔仿真波形与其实测波形进行对比,波形对比结果如图 10 所示。



(a) #1炮孔实测波形与预测模型波形图



(b) #1炮孔实测波形与预测模型FFT图

图 10 实测波形与模拟波形振速与 FFT 变换对比图

Fig. 10 Comparison of measured waveform and simulated waveform vibration velocity and FFT transformation

同理,利用上述方法对#5 炮孔的爆破振动预测波形进行模拟,并与其实测波形进行对比。将 1#炮孔与#5 炮孔的模拟波形特征进行统计,统计结果见表 8。由表可知, #1 炮孔实测波形与模拟波形的残差相似度 $C_E=0.524$ 时,峰值时刻、峰值振速、持续时间和主频方面平均误差为 8.46%, #5 炮孔实测波形与模拟波形的残差相似度 $C_E=0.525$,峰值时刻、峰值振速、持续时间和主频方面平均误差为 5.53%。总体来看,模型预测波形在峰值振速、峰值时刻、持续时间、主频与

实测波形特征十分相似。

表 8 实测与仿真波形的波形曲线特征对比

Table 8 Comparison of waveform curve characteristics between measured and simulated waveforms

序号	波形与误差	峰值 振速/ (cm·s ⁻¹)	峰值 时刻/ ms	持续时 间/ms	主频/ Hz	C _E
#1	实测波形	9.82	29	70	29	0.524
	模拟波形	8.41	29	66	33	
	误差/%	14.36	0.00	5.71	13.79	
#5	实测波形	0.37	25	60	25	0.525
	模拟波形	0.33	26	58	24	
	误差/%	10.81	4.00	3.33	4.00	

(2) 爆破振动预测模型与萨道夫斯基公式对比

由萨道夫斯基预测模型可知：不同位置峰值振速与炮孔装药量和爆源距测点的水平距离存在指数关系，表达式为

$$V=K\left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)^{\alpha}。$$
(14)

式中：V为峰值振速(cm/s)；Q为最大单响装药量(kg)；R为爆源距测点的水平距离(m)；K，α为与地形和地质条件有关的参数。

以表 3 中#2—#4 炮孔的 V，Q，R 为基础数据，用回归方法的到 K，α 值，对#1，#5 炮孔的 V 进行预测，具体表达式见式（15），拟合结果如图 11 所示，由图 11 可知，#1 炮孔现场实测波形峰值振速为 9.82 cm/s，萨道夫斯基公式预测峰值振速为 13.56 cm/s，误差为 38.12%；#5 炮孔现场实测波形峰值振速为 0.37 cm/s，萨道夫斯基公式预测峰值振速为 0.25 cm/s，误差为 30.56%；由表 8 可知，#1 炮孔爆破振动预测模型峰值振速预测结果的误差为 14.36%，#5 炮孔爆破振动预测模型峰值振速预测结果的误差为 10.81%。

$$V=10.163\left(\frac{Q^{\frac{1}{3}}}{R}\right)^{0.3230}。$$
(15)

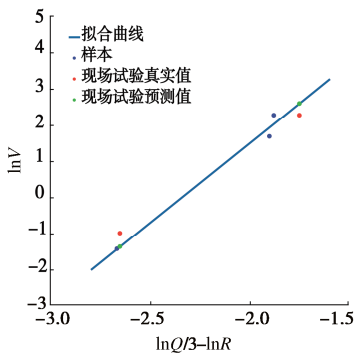


图 11 萨道夫斯基模型拟合结果

Fig. 11 Fitting results of Sadovskii model

3.2 广西某石灰石矿现场验证及与其它模型优越性对比

在广西某石灰石矿同一区域进行 3 次台阶单孔爆

破振动测试试验，爆区岩体分布主要为石灰岩，炸药种类为乳化炸药，采用数码电子雷管逐孔起爆，分别记录同一地点不同次数的单孔爆破振动试验，炮孔详细参数见表 9，现场布置图见图 12，以#1 炮孔#2 监测点监测到的爆破振动样本波形为例，如图 13 所示。

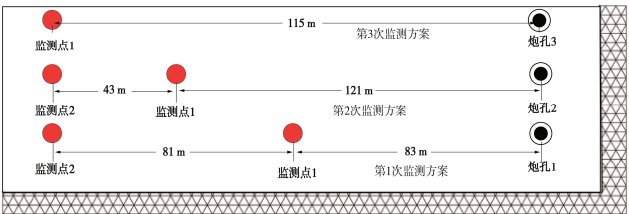


图 12 台阶爆破振动监测方案

Fig. 12 Monitoring plan for bench blasting vibration

(1) 爆破振动预测模型的现场试验验证

为了验证模型有效性，利用本文所构建的模型对#1 炮孔#2 监测点、#5 炮孔#3 监测点的爆破振动波形进行模拟，并将模拟波形与现场实测波形进行验证。整个计算过程以#1 炮孔#2 监测点为例。

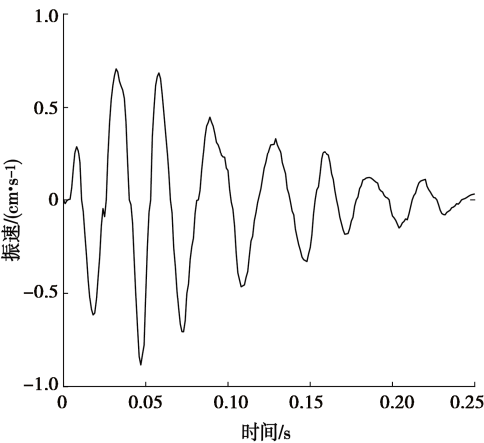


图 13 #1 炮孔#2 监测点爆破振动监测样本波形

Fig. 13 Sample waveform of blasting vibration monitoring at monitoring point 2 of borehole 1

表 9 台阶爆破振动现场试验参数

Table 9 Parameters of on-site test for bench blasting vibration

炮孔 序号	监测点 1 峰 值振速/ (cm·s ⁻¹)	装药 量/ kg	到监测点 距离/m	孔径/ mm	孔深/ m	填塞/ m
炮孔 1	2.67 0.90	150	83.0 164.0	250	12	4.7
炮孔 2	0.59 0.33	160	121.0 164.0	250	12	4.5
炮孔 3	1.12	140	115.0	250	12	5.0

首先对模型参数进行试错试验，得到模型参数区间，如表 10 所示。将 I₀，α，β，γ，η，ζ 等间隔划分为 5 个区间，区间取值如表 11 所示。利用所构建的模型采用 5 因素 5 水平正交试验表（L₂₅(5⁵））进行曲线输出，计算 25 组试验的残差相似度，具体计算结果见

表 12。由表 12 可知, 16 组试验结果中残差相似度 C_E 的最大值为 0.508, C_E 最大时的参数组合为 $I_0=300$, $\alpha=2.6$, $\beta=30$, $\eta=125$, $\gamma=3$ 。

表 10 试错试验所确定的模型参数大致区间

Table 10 Approximate range of model parameters determined by trial and error experiments					
参数	I_0	α	β	η	γ
区间范围	[100,300]	[2.0,2.8]	[20,40]	[100,200]	[3,7]

表 11 区间范围内的各因素水平的划分

Table 11 Division of factor levels within interval range					
水平	I_0	α	β	η	γ
1	100	2	20	100	3
2	150	2.2	25	125	4
3	200	2.4	30	150	5
4	250	2.6	35	175	6
5	300	2.8	40	200	7

表 12 残差相似度计算结果

Table 12 Residual similarity calculation results						
组别	I_0	α	β	η	γ	C_E
1	100	2.0	20	100	3	0.261
2	100	2.2	30	175	7	0.504
3	100	2.4	40	125	6	0.364
4	100	2.6	25	200	5	0.474
5	100	2.8	35	150	4	0.213
6	150	2.0	40	175	5	0.382
7	150	2.2	25	125	4	0.382
8	150	2.4	35	200	3	0.490
9	150	2.6	20	150	7	0.438
10	150	2.8	30	100	6	0.366
11	200	2.0	35	125	7	0.302
12	200	2.2	20	200	6	0.213
13	200	2.4	30	150	5	0.499
14	200	2.6	40	100	4	0.375
15	200	2.8	25	175	3	0.495
16	250	2.0	30	200	4	0.220
17	250	2.2	40	150	3	0.423
18	250	2.4	25	100	7	0.385
19	250	2.6	35	175	6	0.482
20	250	2.8	20	125	5	0.411
21	300	2.0	25	150	6	0.141
22	300	2.2	35	100	5	0.362
23	300	2.4	20	175	4	0.229
24	300	2.6	30	125	3	0.508
25	300	2.8	40	200	7	0.347

在正交试验的基础上进行极差分析, 极差分析结果见表 13。由表 13 可知最优模型对应的水平分别为 2, 4, 3, 4, 1。由此可知, 理论最优水平应为 $I_0=150$, $\alpha=2.8$, $\beta=30$, $\eta=175$, $\gamma=3$, 将此组模型参数输出 500 组波形, 其残差相似度期望为 0.510。

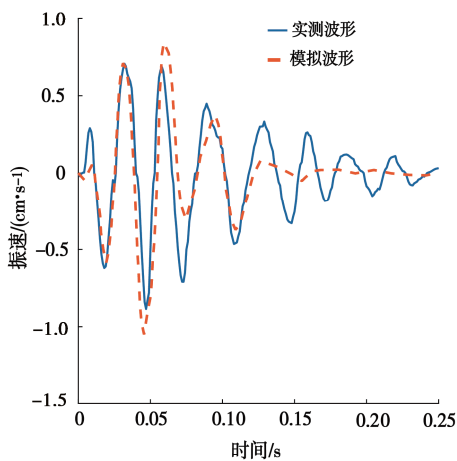
为了验证模型的有效性, 将模型输出最大残差相似度 $C_E=0.510$ 的#1 炮孔#2 监测点的仿真波形与其实测波形进行对比, 波形对比结果如图 14 所示。

同理, 利用上述方法对#3 炮孔#3 监测点的爆破振动预测波形进行模拟, 并与其实测波形进行对比, 现将#1 炮孔#2 监测点与#3 炮孔#3 监测点的模拟波形特征

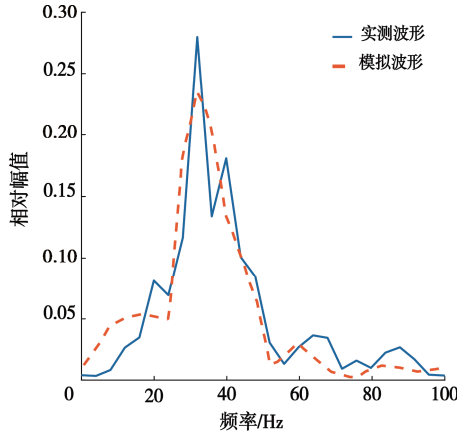
进行统计, 统计结果见表 14, 由表 14 可知, #1 炮孔#2 监测点爆破振动预测模型的波形特征的平均误差为 8.85%, #3 炮孔#3 监测点爆破振动预测模型的波性特征的平均误差为 7.00%。总体来看, 现场实测波形与预测模型在峰值振速、峰值时刻、持续时间、主频等误差较小, 由此可知, 当模型参数组合满足一定条件时, 台阶单孔爆破振动波形仿真模型可以预测出与实测波十分相近的仿真波形。

表 13 最大残差相似度 C_E 极差分析表

Table 13 Maximum residual similarity C_E range analysis table					
编号	I_0	α	β	η	γ
K1	1.82	1.31	1.55	1.75	2.18
K2	2.06	1.88	1.88	1.97	1.42
K3	1.88	1.97	2.10	1.71	2.13
K4	1.92	2.28	1.85	2.09	1.57
K5	1.59	1.83	1.89	1.74	1.98
k1	0.196	0.141	0.167	0.189	0.235
k2	0.222	0.203	0.203	0.212	0.153
k3	0.203	0.212	0.226	0.185	0.230
k4	0.207	0.246	0.200	0.226	0.169
k5	0.171	0.198	0.204	0.188	0.213
最优水平	2	4	3	4	1



(a) #1炮孔#2监测点实测波形与预测模型波形图



(b) #1炮孔#2监测点实测波形与预测模型FFT图

图 14 实测波形与模拟波形振速与 FFT 变换对比图
Fig. 14 Comparison of measured waveform and simulated waveform vibration velocity and FFT transformation

表 14 实测波与仿真波对比

Table 14 Comparison between measured waves and simulated

waves						
序号	波形与误差	峰值 振速/ (cm·s ⁻¹)	峰值 时刻/ ms	持续 时间/ ms	主频 /Hz	C _E
#1 炮孔 #2 监测 点	实测波 形	0.88	47	153	31	0.510
	模拟波 形	1.04	45	132	31	
	误差/%	17.50	4.20	13.70	0	
#3 炮孔 #3 监测 点	实测波 形	1.12	42	138	28	0.525
	模拟波 形	0.94	40	133	27	
	误差/%	16.00	4.80	3.60	3.60	

(2) 爆破振动预测模型与萨道夫斯基公式对比

以表 9 中#1 炮孔的监测点 1, 及#2—#3 炮孔所监测的 V , Q , R 为基础数据, 用回归方法的到 K , α 值, 对#1 炮孔#2 监测点及#3 炮孔进行预测, 具体表达式见式 (16), 拟合结果如图 15 所示, 由图 15 可知, #1 炮孔#2 监测点现场实测波形峰值振速为 0.88 cm/s, 萨道夫斯基公式预测峰值振速为 0.26 cm/s, 误差为 70.23%, #3 炮孔现场实测波形分峰值振速为 1.12 cm/s, 萨道夫斯基公式预测峰值振速为 0.77 cm/s, 误差为 30.46。由表 14 可知, #1 炮孔#2 监测点爆破振动预测模型的峰值振速预测误差为 17.5%, #3 炮孔#3 监测点爆破振动预测模型的峰值振速预测误差为 16%。

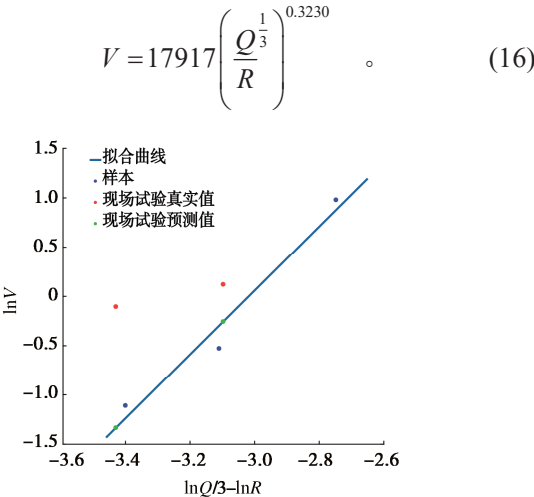


图 15 萨道夫斯基模型拟合结果

Fig. 15 Fitting results of Sadoviski model

经对比可知, 本文所构建的台阶单孔爆破振动预测模型与萨道夫斯基相比, 预测的峰值振速更加准确, 且能较为准确的输出峰值时刻、持续时间、主频等爆破振动关键参数, 具有萨道夫斯基无法比拟的优势。

4 结 论

以实测爆破振动波形的特性为基础, 借鉴地震波

预测模型构建方式, 建立了台阶单孔爆破振动预测模型, 得到 4 点结论。

(1) 利用单自由度冲击响应、高斯白噪声序列、频率衰减函数构建频率方程 $x(t)$, 选取 γ 函数作为强度方程 $A(t)$, 构建单孔爆破振动预测模型。

(2) 基于 KS-双检验, 考虑 P 值与计算机耗时, 得到在模型输出 500 组波形后能够保证波形属性特征分布相似; 采用试错法计算得到模型参数的大致区间, 以残差相似度为评价指标, 利用正交试验与极差分析方法确定模型最优参数。

(3) 将最优参数代入台阶单孔爆破振动预测模型输出波形, 模拟波形与现场实测波形的较好吻合证明了所构建模型与参数确定方法的正确性。

(4) 将模型输出曲线的峰值振速、萨道夫斯基公式的预测结果分别与实测波形的峰值振速进行对比, 较小的预测误差证明了本文所构建模型的优越性。

利益冲突声明/Conflict of Interests: 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

作者贡献/Authors' Contributions: 李洪超、韩昊轩参与研究内容设计, 李胜林提供试验指导, 李晨、贾贝完成试验和分析, 李洪超、韩昊轩、王樺尧参与论文写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。This study was designed by LI Hongchao and HAN Haoxuan. The experiments were supervised by Li Shenglin. The experiments and analyses were conducted by LI Chen and JIA Bei. The manuscript was drafted and revised by LI Hongchao, HAN Haoxuan and WANG Xiyao. All the authors have read the last version of manuscript and consented for submission.

参考文献:

[1] 梁书锋, 王宇涛, 刘殿书, 等. 爆破振动速度预测安全保证系数的确定[J]. 爆炸与冲击, 2015, 35(5): 741-746. (LIANG Shufeng, WANG Yutao, LIU Dianshu, et al. Determination of safety coefficient for predicting blasting vibration velocity[J]. Explosion and Shock Waves, 2015, 35(5): 741-746. (in Chinese))

[2] 梁书锋, 凌天龙, 李 晨. 高铁长城站小净距隧道爆破振动效应研究[J]. 爆破, 2021, 38(1): 116-123, 139. (LIANG Shufeng, LING Tianlong, LI Chen. Study on blasting vibration effect of small spacing tunnel in high-speed railway Great Wall Station [J]. Blasting, 2021, 38(1): 116-123, 139. (in Chinese))

[3] 赵明生, 张建华, 易长平. 基于单段波形叠加的爆破振动信号时频分析[J]. 煤炭学报, 2010, 35(8): 1279-1282.

- (ZHAO Mingsheng, ZHANG Jianhua, YI Changping. Time-frequency analysis based on single-stage addition of waveforms of blasting vibration signals[J]. Journal of China Coal Society, 2010, **35**(8): 1279-1282. (in Chinese))
- [4] 韩亮, 李红江, 辛崇伟, 等. 深孔台阶爆破近区振动强度分布的模拟研究[J]. 煤炭学报, 2018, **43**(增刊1): 71-78. (HAN Liang, LI Hongjiang, XIN Chongwei, et al. Simulation study on vibration intensity distribution near deep hole bench blasting[J]. Journal of China Coal Society, 2018, **43**(S1): 71-78. (in Chinese))
- [5] ANDERSON D A. A method site-specific prediction and control of ground vibration from blasting[C]// Proc 1st Symp on Explosives and Blasting Research, Wroclaw, 1985.
- [6] BLAIR D P. The measurement, modelling and control of ground vibrations due to blasting[C]// Proceedings of the 2nd international symposium of rock fragmentation by blasting, Keystone, 1987.
- [7] HINZEN K G. Modelling of blast vibrations[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1988, **25**(6): 439-445.
- [8] HOUSNER G W. Properties of strong ground motion earthquakes[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1955, **45**(3): 197-218.
- [9] KANAI K. Semi-empirical formula for the seismic characteristics of the ground[J]. Bulletin of Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 1957, **35**(2): 309-325.
- [10] TAJIMI H. Statistical method of determining the maximum response of building structure during an earthquake[C]// Proceedings of the Second World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo, 1960.
- [11] BOLOTIN V V. Statistical theory of a seismic design of structures[C]// Proceedings of the Second World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo, 1960.
- [12] 马寒箫, 邢志祥, 吴凡, 等. 基于正交试验法的高斯扩散模型预测精度研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, **19**(10): 164-170. (MA Hanxiao, XING Zhixiang, WU Fan, et al. Research on prediction accuracy of Gaussian diffusion model based on orthogonal test method[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023, **19**(10): 164-170. (in Chinese))
- [13] 宋勇强, 负建民, 安志刚, 等. 基于正交设计与人工神经网络模型的醋酸菌A3菌株醋酸发酵条件优化[J]. 食品工业科技, 2013, **34**(5): 142-146, 150. (SONG Yongqiang, YUN Jianmin, AN Zhigang, et al. Optimization of acetic acid fermentation condition of Acetobacter A3 based on orthogonal design coupled with artificial neural networks model[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, **34**(5): 142-146, 150. (in Chinese))
- [14] 姜万中. 关于杜哈梅积分的注释[J]. 石河子农学院学报, 1986, **4**(2): 99-106. (JIANG Wanzhong. Notes on duhamel integral[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 1986, **4**(2): 99-106. (in Chinese))
- [15] 董银峰. 非平稳信号处理方法的改进及在地震工程中的应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010. (DONG Yinfeng. Improvement of Nonstationary Signal Processing Method and its Application in Earthquake Engineering[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010. (in Chinese))
- [16] RODOLFO SARAGONI G, HART G C. Simulation of artificial earthquakes[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1973, **2**(3): 249-267.
- [17] LIAO S, ZERVA A. Physically compliant, conditionally simulated spatially variable seismic ground motions for performance-based design[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2006, **35**(7): 891-919.
- [18] 郑震, 严迎建, 蔡爵嵩, 等. 基于双样本KS检验的非特定TVLA方法[J]. 通信学报, 2023, **44**(5): 137-147. (ZHENG Zhen, YAN Yingjian, CAI Juesong, et al. Non-specific TVLA method based on two-sample KS test[J]. Journal on Communications, 2023, **44**(5): 137-147. (in Chinese))