地下中深孔错相减振孔间延期时间优选*

张梦雲[1],张云鹏[2,3],杨曦[2,3],闫鹏[2]

(1.华北理工大学 以升创新教育基地/钢铁碳中和学院, 河北 唐山市 063210;
2.华北理工大学 矿业工程学院, 河北 唐山市 063210;
3.河北省矿业开发与安全技术重点实验室, 河北 唐山市 063210)

摘要:爆破振动对周边建筑物造成的安全问题亟待解决,而传统减振方法存在依赖经验参数、缺乏小样本统计支持的问题。通过对某矿开展爆破振动监测,利用快速傅里叶变换提取峰值振动频率,采用Bootstrap方法、贝叶斯分析及极大似然估计对比分析峰值振动频率特性。在此基础上,将孔间延期时间调整为其对应的半周期并进行现场试验验证,确定该方法的准确性。结果表明:随爆源距离增加,质点振动速度逐渐减小,不同方向上振速的衰减态势也不同;Bootstrap方法无需假设总体服从特定分布,直接从原样本出发进行抽样,能够更好地反映样本的特征和分布情况,统计结果更贴合实际;确定半周期8 ms为最佳孔间延期时间。现场试验显示,相较于孔间延期时间20 ms,孔间延期时间8 ms时X、Y、Z方向峰值振速分别降低14.81%,12.68%和36.51%,合速度方向的峰值振速降低22.55%,减振效果显著。研究结果为地下中深孔爆破提供了参数优化依据,有效解决了爆破振动造成的安全问题。

关键词:错相减振;快速傅里叶变换;Bootstrap方法;贝叶斯分析;极大似然估计;孔间延期时间

中图分类号:TD235.4 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)04-0069-09

Optimization of Inter-Hole Delay Time for Phase Staggering Vibration Reduction Holes in Underground Medium-Deep Holes

ZHANG Mengyun[1], *ZHANG Yunpeng*[2,3], *YANG Xi*[2,3], *YAN Peng*[2]

(1.Yisheng Innovation Education Base / Institute of Steel Carbon Neutrality,
North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063210, China;
2.College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063210, China;
3.Key Laboratory of Mining Development and Safety Technology of Hebei Province, Tangshan, Hebei 063210, China)

Abstract: The safety issues posed by blasting vibration to surrounding buildings urgently need to be addressed, while traditional vibration-reduction methods rely on empirical parameters and lack statistical support based on small sample sizes. By conducting blast vibration monitoring at a certain mine, the peak vibration frequency was extracted using the fast Fourier transformation (FFT). The characteristics of the peak vibration frequency were then analyzed using a comparative approach that incorporated the Bootstrap method, Bayesian analysis, and maximum likelihood estimation. Based on this, the inter-hole delay time was adjusted to half a cycle and verified through field tests to confirm the accuracy of this method. The results show that as the distance from the explosion source increases, the vibration velocity of the particle gradually decreases, and the attenuation characteristics of vibration velocity vary with direction. The Bootstrap method does not require the assumption that the population follows a specific distribution, instead drawing samples directly from the original sample. This approach better reflects the characteristics and distribution of the samples, resulting in statistical outcomes that are more representative of reality. An 8-ms half-cycle is determined to be the optimal inter-hole delay time. Field tests show that, compared to a 20-ms inter-hole delay time, an 8-ms inter-hole delay time reduces peak vibration velocity in the X, Y, and Z directions by 14.81%, 12.68%, and 36.51%, respectively, while the peak vibration velocity in the combined velocity direction decreases by 22.55%, demonstrating a significant vibration reduction effect. The research findings provide a basis for optimizing parameters in medium-deep holes underground blasting, effectively addressing safety issues caused by blasting vibrations.

Key words: Phase staggering vibration reduction, Fast Fourier transformation, Bootstrap method, Bayesian analysis, Maximum likelihood estimation, Inter-hole delay time

* **收稿日期**:2025-05-24
基金项目:河北省高等学校科学技术研究项目(QN2023166);华北理工大学大学生创新创业基金项目(X2024214)
作者简介:张梦雲(2004—),女,山东日照人,主要从事爆破工程等方面的研究。E-mail:1130844266@qq.com
通信作者:张云鹏(1963—),男,河北唐山人,博士,教授,主要从事矿业工程、爆破工程、安全技术与管理等方面的研究。E-mail:ncstzyp@163.com

0 引言

爆破是矿山工程等领域广泛应用的一种作业手段,其产生的爆破振动对建筑物、自然环境以及居民区的影响不可忽视[1-5]。随着部分矿山采矿作业范围向居民区延伸,降低爆破振动对居民区的影响愈发关键。已有研究表明,通过调整不同炮孔起爆的延期时间可以实现爆破振动波波峰和波谷的干扰相消,达到减振的目的[6-9],这对避免周围建筑物被破坏,降低爆破对周围居民的影响,增加居民对爆破作业的接受程度具有重要意义。

想要实现爆破振动波的错相叠加,孔间延期时间的选择极为关键,其发展历程经历了多个阶段。早期,龙源等[10]通过总结多个经验计算公式及具有较好减振效果的延期时间采用值,归纳出峒室微差爆破时间间隔的选取规律,并给出了不同规模峒室爆破微差时间的选取范围;吴腾芳等[11]对以往微差爆破实践和相关理论研究进行定性分析,明确了微差爆破在降低爆破振动、提高爆破效果等方面的重要性,依据研究现状提出从实践中总结出的半理论半经验公式更接近实际情况。通过总结前人经验和定性分析,在选择孔间延期时间的方法上有了一定进展,但研究方法相对较为单一,定量分析的力度不足,导致延期时间选择的准确性不高,难以满足复杂工程的需求。凌同华等[12]提出利用小波包变换的局部分析能力,选用 sym7 作为最优小波基对爆破振动信号进行连续小波变换取模,得出雷管实际爆炸时间,提高了对延期时间确定的精度,为微差爆破分析提供了新方法;陈士海等[13]利用傅里叶变换得到不同延期时间下叠加信号的频谱,通过对比不同微差时间下的主频变化可知,主频随微差时间的不同呈阶跃锯齿型变化。上述学者利用不同的研究方法对爆破振动信号进行分析,得到合理的微差时间,但受现场因素制约使得试验结果具有局限性。随着电子雷管的普及,孔间延期时间更加精确。何理等[14]通过统计分析多个单孔爆破波列叠加,得到了合成波形峰值振动速度随延期时间的变化关系,发现当孔间延时为 0.4～0.6 倍的主振周期时,合成波形峰值振速可能出现最小值或较小值;李祥龙等[15]对不同延期时间的振动时程信号进行分析,结果表明,当地下浅孔的孔间延时为 25 ms 时减振效果最佳;廖晓目[16]运用多孔爆破振动速度叠加公式计算不同孔间延期时间的单炮孔叠加振速,从而得出振速峰值最低的孔间延期时间;IWANO 等[17]通过现场试验发现单孔爆破振动波形的峰值振速遵循 Weibull 分布,并提出采用 Weibull 分布反函数生成随机数扩大或收缩单炮孔的振动波形作为种子基波,实现不同延期时间的多孔延迟爆破振动波型模拟计算。综上所述,学者们多采用数值模拟、理论分析、现场试验等多种方法确定孔间延期时间,利用统计方法确定延期时间则较少涉足。基于此,本文提出了一种利用概率统计得到孔间最佳延期时间的研究方法,旨在为孔间延期时间的确定提供新的思路和解决方案。

本文以多炮孔振动为研究对象,对爆破得到的振动波形进行快速傅里叶变换得到频谱图,统计频谱图中峰值振动对应的频率,分别利用 Bootstrap 方法、贝叶斯分析、极大似然估计 3 种方法分析峰值频率的分布情况,明确了 3 种分析方法的优缺点及爆破振动波的周期,将孔间延期时间调整为其对应的半周期并进行现场试验,验证该方法的准确性。

1 爆破振动监测

1.1 工程背景

某矿为隐伏矿体,埋藏于地表 300 m 以下。矿体埋深具有北浅南深及西浅东深特征,靠近居民区一侧埋藏较深。采场选用 Simba1354 型液压采矿凿岩台车凿上向扇形中深孔,孔径 76 mm,孔深 4～17 m,排距 1.5～2 m,孔底距 3～4 m。炮孔延米爆破量 7 t/m,采用乳化炸药爆破,非电起爆系统双路起爆,一次爆破 1～2 排孔,回采炸药单耗 0.47 kg/t。采用上向扇形方式布孔,其中最大孔深大于 17 m,逐孔起爆,孔间延期 20 ms,排间延期 200 ms,各炮孔起爆顺序及时间如图 1 所示。

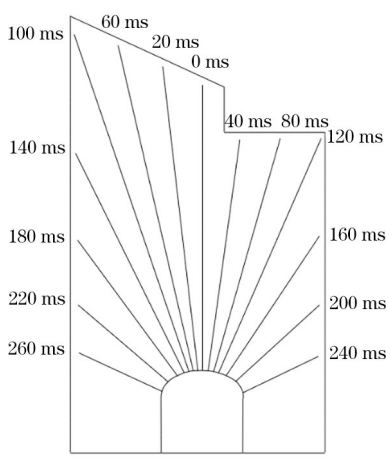


图 1 各孔起爆时刻

Fig.1 Detonation moments of each hole

1.2　测点布置及监测

在同一水平线上共布置 3 个测点，在靠近爆源和村庄处各布置一个测点，在村庄内部布置一个测点，测点位置如图 2 所示。爆破区距测点 420～501 m，爆破位置位于地下－185～－230 m 处，爆破区距最近测点直线距离 420 m，垂直距离－185 m，水平距离 377 m。

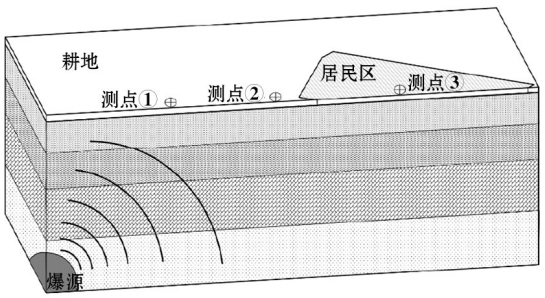


图 2　测点布设

Fig.2　Layout of measuring points

1.3　爆破振动试验

在爆破工程领域主要采用萨道夫斯基公式来预测爆破振动速度，其公式为：

$$V=K\left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)^{\alpha} \tag{1}$$

式中：V 为质点振动速度，cm/s；Q 为最大一段的药量，kg；R 为测点到爆破中心的距离，m；K、α 分别为与爆破场地地质条件等因素有关的场地系数和衰减指数。

为方便回归分析，将公式(1)等号两边取对数，得到线性公式(2)：

$$\ln V=\ln K+\alpha\ln\left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right) \tag{2}$$

设 $y=\ln V$，$a=\alpha$，$x=\ln\left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)$，$b=\ln K$，则线性公式(2)可简化为：

$$y=ax+b \tag{3}$$

爆破监测结果见表 1，当孔间延期时间为 20 ms 时，X 方向振速平均值为 0.027 cm/s，Y 方向振速平均值为 0.071 cm/s，Z 方向振速平均值为 0.063 cm/s，合速度方向振速平均值为 0.102 cm/s。

表 1　孔间延期时间 20 ms 的峰值振速实测数据

Table 1　Measured data of peak vibration velocity when the delay time between holes is 20 ms

序号	孔间延期时间/ms	X 方向振速/(cm/s)	X 方向主频/Hz	Y 方向振速/(cm/s)	Y 方面主频/Hz	Z 方向振速/(cm/s)	Z 方向主频/Hz	合速度/(cm/s)	最大单向振速/(cm/s)
1	20	0.010	58.6	0.080	13.7	0.037	19.5	0.089	0.080
2	20	0.012	60.5	0.104	9.8	0.049	17.6	0.115	0.104
3	20	0.022	72.3	0.089	9.8	0.058	50.8	0.108	0.089
4	20	0.026	60.5	0.082	19.5	0.055	50.8	0.102	0.082
5	20	0.020	74.2	0.055	9.8	0.034	50.8	0.068	0.055
6	20	0.019	70.3	0.071	7.8	0.038	50.8	0.082	0.071
7	20	0.051	52.7	0.073	21.5	0.103	50.8	0.136	0.103
8	20	0.031	72.3	0.060	9.8	0.070	50.8	0.098	0.070
9	20	0.054	70.3	0.063	21.5	0.073	52.7	0.111	0.073
10	20	0.017	74.2	0.063	7.8	0.038	17.6	0.076	0.063
11	20	0.047	72.3	0.084	21.5	0.092	52.7	0.133	0.092
12	20	0.013	50.8	0.053	60.5	0.052	50.8	0.076	0.053
13	20	0.014	74.2	0.077	7.8	0.034	17.6	0.086	0.077
14	20	0.029	50.8	0.047	50.8	0.069	50.8	0.088	0.069
15	20	0.037	72.3	0.082	9.8	0.050	48.8	0.103	0.082
16	20	0.030	74.2	0.047	58.6	0.064	50.8	0.084	0.064
17	20	0.023	62.5	0.093	9.8	0.050	29.3	0.108	0.093
18	20	0.022	72.3	0.066	9.8	0.059	50.8	0.091	0.066
19	20	0.040	72.3	0.047	23.4	0.054	50.8	0.082	0.054
20	20	0.022	72.3	0.066	9.8	0.059	50.8	0.091	0.066
21	20	0.030	72.3	0.060	7.8	0.054	50.8	0.086	0.060
22	20	0.037	74.2	0.063	5.9	0.052	52.7	0.089	0.063
23	20	0.036	72.3	0.104	15.6	0.052	50.8	0.121	0.104
24	20	0.036	62.5	0.144	13.7	0.062	52.7	0.161	0.144
25	20	0.029	72.3	0.060	9.8	0.056	50.8	0.087	0.060
26	20	0.019	72.3	0.067	9.8	0.041	17.6	0.081	0.067
27	20	0.014	76.2	0.036	9.8	0.071	48.8	0.081	0.071
28	20	0.023	74.2	0.067	17.6	0.080	17.6	0.107	0.080
29	20	0.021	74.2	0.055	25.4	0.124	21.5	0.138	0.124
30	20	0.020	68.4	0.068	9.8	0.130	21.5	0.148	0.130
31	20	0.034	52.7	0.072	9.8	0.097	52.7	0.126	0.097

对 3 个不同方向的质点振动速度及合速度进行线性拟合,结果如图 3 所示。

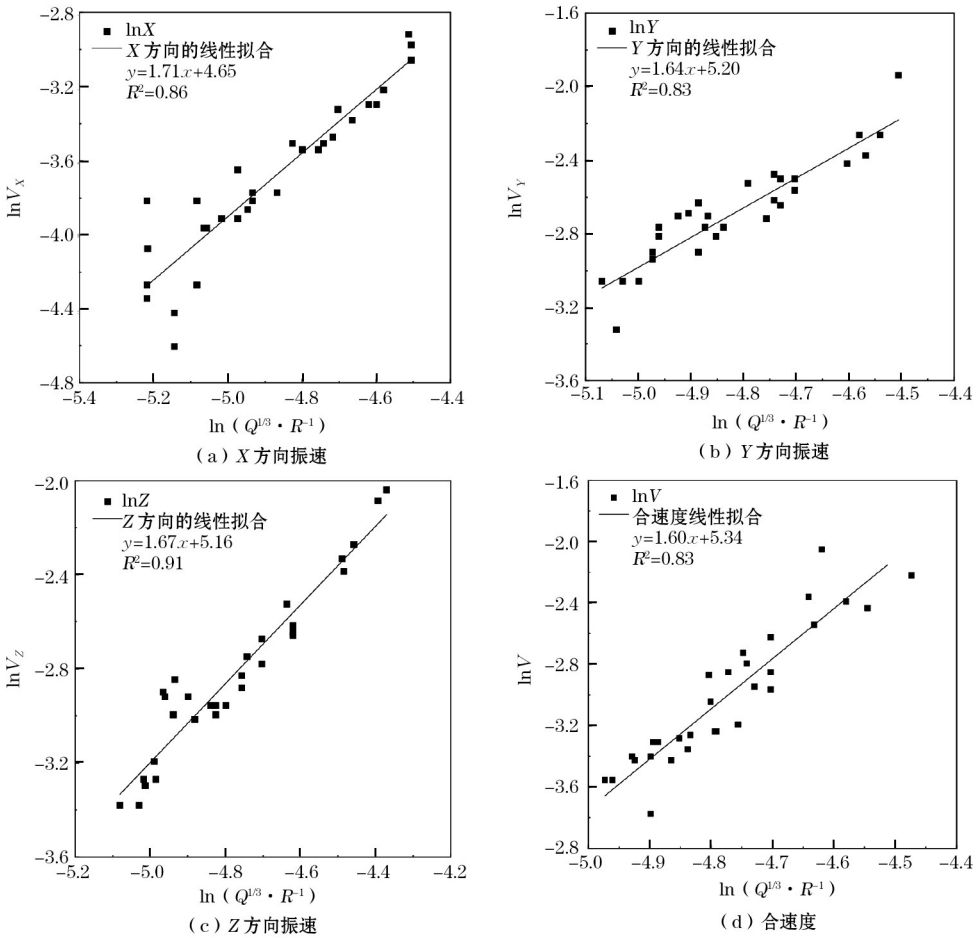


图 3 各方向振速拟合结果

Fig.3 Fitting results of vibration velocity in each direction

根据线性拟合得到质点振动速度和线性拟合曲线的相关系数均达到 0.8 以上,表明两者的线性关系显著。基于质点振动速度的拟合曲线得到在 X、Y、Z 三个方向以及合速度方向上 K 和 α 的具体值,见表 2,由此可得出不同方向上的萨道夫斯基振动速度公式,分别为:

$$V_x=104.59\left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)^{1.71} \tag{4}$$

$$V_y=181.27\left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)^{1.64} \tag{5}$$

$$V_z=174.47\left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)^{1.67} \tag{6}$$

$$V=208.89\left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)^{1.60} \tag{7}$$

由式(4)至式(7)可知,在不同方向上,随着距爆源距离的增加,质点振动速度逐渐减小,这是因为随着距离增加,爆破能量在传播过程中呈现衰减趋势。受传播介质的影响,各方向间 K 和 α 的具体值不同,即随着距离的增加,不同方向上振速的衰减态势不同。

表 2 萨道夫斯基公式拟合参数

Table 2 Fitting parameters of Sandovsky formula

方向	拟合曲线	K	α
X 方向	$y=1.71x+4.65$	104.59	1.71
Y 方向	$y=1.64x+5.20$	181.27	1.64
Z 方向	$y=1.67x+5.16$	174.47	1.67
合速度	$y=1.60x+5.34$	208.89	1.60

2 爆破振动波频谱分析

2.1 快速傅里叶变换

快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform,FFT)是一种高效计算离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform,DFT)及其逆变换的算法。经快速傅里叶变换可以实现振动波型从时域到频域的转变。

离散傅里叶变换(DFT)的表达式[18]为：

$$X_{(k)}=\sum_{n=0}^{N-1}x_n e^{-i\frac{2\pi kn}{N}},k=0,1,\cdots,N-1 \quad (8)$$

式中：n 表示离散时间；k 表示离散频率；N 为采样点数。

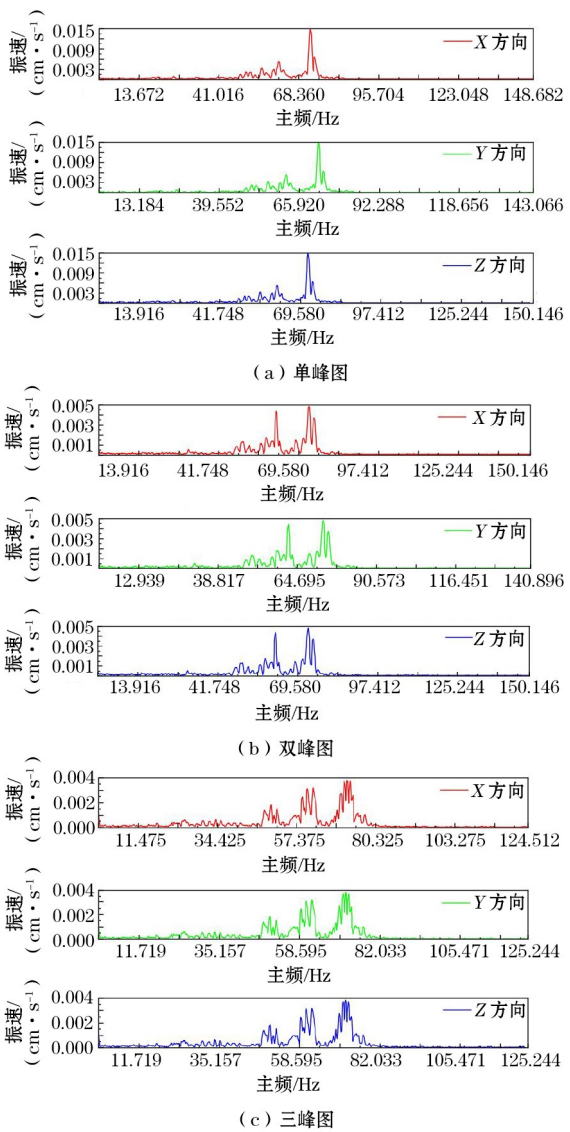
式(8)逆变换公式为：

$$X_{(n)}=\sum_{n=0}^{N-1}x_k e^{i\frac{2\pi kn}{N}},k=0,1,\cdots,N-1 \quad (9)$$

振动波形经过快速傅里叶变换被分解为多个不同频率正弦函数的线性组合，从而得到振动波型的峰值，这些峰值通常对应原始振动波形中能量最强的频率分量。

2.2　爆破振动信号的快速傅里叶变换

对爆破振动波形进行快速傅里叶变换得到相应的频域图，典型振动频域图如图 4 所示。



(a) 单峰图

(b) 双峰图

(c) 三峰图

图 4　典型振动频域图

Fig.4　Typical vibration frequency domain diagrams

在不同测点处测得的频域图中出现了单峰和多峰的显著区别，产生这种现象的原因在于爆破振动波蕴含的能量在不同频率波段的分布具有差异性，当处于距爆源较近的位置时(如测点①)，爆破振动波包含低频、中频和高频 3 种能量，频域图为三峰，三者均会随着与爆源距离的增加而发生衰减，然而其衰减幅度存在明显不同。随着距离的不断增加，高频能量的衰减速度相对较快，致使在较远处无法得到高频能量振动波形，而低频能量具有较强的抗衰减能力，故在较远处(如测点③)测得的爆破振动波形呈现为单峰。测点②处于高频能量衰减过程阶段，振动波形具有双峰特点。各测点典型波形图如图 5 所示。

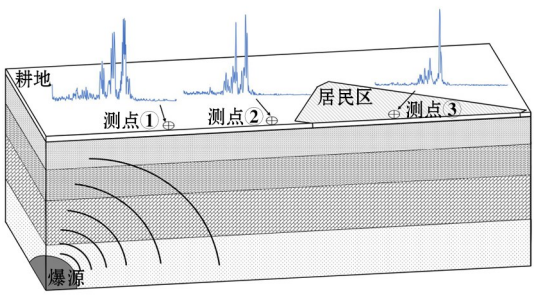


图 5　各测点典型波形图

Fig.5　Typical waveform for each measuring point

3　孔间延期时间计算

经快速傅里叶变换分析后可知，爆破振动信号的频率会随距离的增加呈现不同程度的衰减，具有高频能量衰减速度快，低频能量衰减速度慢的特点。

为便于统计爆破对居民区的振动影响，仅统计位于居民区内部测点③处测得的爆破振动波，该测点距爆源较远，因此测点③处测得的爆破振动信号仅含低频能量，经快速傅里叶变换后其频域图为单峰图。

通过统计单峰频域图上峰值对应的频率，得到测点③的爆破振动信号频率分布情况，然后利用 Bootstrap 方法、贝叶斯分析、极大似然估计 3 种方法对频率样本进行分析，得到峰值振动频率。因三个方向上的分析结果及数据分布情况类似，限于篇幅，每种方法仅分析 X 方向上的数据分布。

3.1　Bootstrap 方法

Bootstrap 方法通过对原始样本数据进行有放回的随机抽样，得到多个新样本，从而扩大样本数量，无需对总体分布做严格假设，但需要足够的抽样

次数保证分析结果的稳定性。

原始样本的峰值振动频率均值为 63.28 Hz,标准差为 4.81 Hz。设置抽样次数为 1 000 次,对爆破振动峰值对应频率进行统计,得到重抽样后峰值振动频率均值为 63.22 Hz,标准差为 4.62 Hz。Bootstrap 方法得到的统计数据汇总见表 3,生成的样本峰值振动频率均值和标准差 Q-Q 图如图 6 和图 7 所示。由图 6 和图 7 可知,数据点大致呈直线分布,表明利用 Bootstrap 方法重抽样得到的样本均值近似服从正态分布 $N(63.21,1.30)$,样本标准差近似服从正态分布 $N(4.64,1.26)$,对原始数据进行重抽样后得到的样本数据均值和标准差与原始样本数据近乎一致。这说明重抽样过程有效保留了原始数据的离散特征,保证了后续统计推断的可靠性。

因此,利用 Bootstrap 方法计算得到的各方向峰值振动频率均值和标准差可信度极高,进一步对 1 000 次重抽样得到的样本峰值振动频率均值进行统计分析,具体分布直方图和正态拟合曲线如图 8 所示。从图 8 可以看出,重抽样后的峰值振动频率均值围绕原始样本均值附近波动,分布形态呈钟型,标准差 1.30 Hz 远小于个体数据的波动幅度 4.62 Hz。这表明尽管单次爆破振动频率分布的随机性强,但样本均值的估计具有较高的稳定性与精度。

表 3 Bootstrap 方法统计特征

Table 3 Statistical characteristic by Bootstrap method

方向	峰值振动频率均值/Hz	峰值振动频率标准差/Hz	95.0%置信区间
X 方向	63.22	4.62	(61.27,65.55)
Y 方向	63.22	4.62	(61.26,65.54)
Z 方向	63.22	4.62	(61.24,65.54)

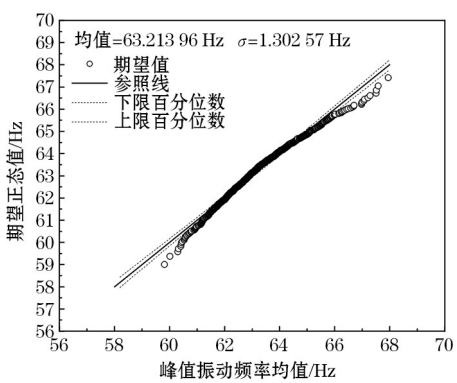


图 6 样本频率均值 Q-Q 图

Fig.6 Q-Q plot of mean peak vibration frequencies of samples

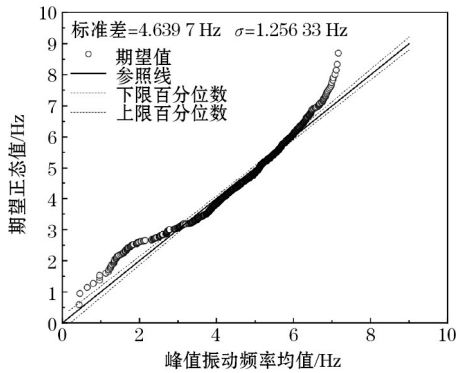


图 7 样本峰值振动频率标准差 Q-Q 图

Fig.7 Q-Q plot of standard deviation of peak vibration frequencies of samples

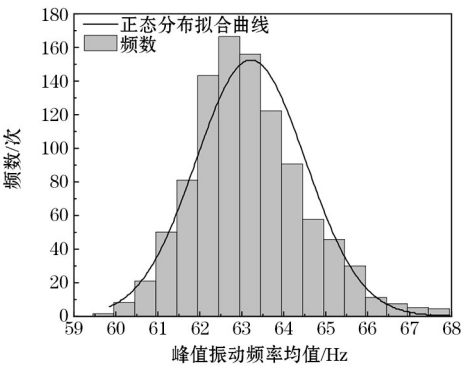


图 8 重抽样样本均值频数分布

Fig.8 Frequency counts distribution of resampled sample means

3.2 贝叶斯分析

贝叶斯分析是基于贝叶斯定理的一种统计推断方法,其核心是将先验知识与新获取的数据相结合得到后验分布情况,从而实现对概率的更新与优化。

为减小先验分布误差对结果的影响,利用 Bootstrap 方法重抽样后得到的样本主频均值和标准差作为贝叶斯分析的先验分布。爆破振动波峰值对应频率的分布状况服从正态分布,并使用正态分布作为先验分布,先验分布的主频均值为 63.21 Hz,标准差为 1.3 Hz,利用 Python 软件得到经贝叶斯分析后的后验置信区间分布,如图 9 所示,不同方向的统计特征见表 4。由图 9 可知,先验分布根据爆破实测参数不断优化后,其分布特征仍服从正态分布,X、Y、Z 三个方向上的统计值相差较小,爆破振动波峰值对应的优势主频率为 63.26 Hz,标准差为 0.18 Hz,说明在小样本基础上经贝叶斯分析得到的后验分布均值代表性强,预测准确性高。

表 4　贝叶斯分析统计特征

Table 4　Statistical characteristic by Bayesian analysis

方向	后验分布主频均值/Hz	后验分布主频标准差/Hz	95.0%置信区间
X 方向	63.29	0.18	(62.94,63.64)
Y 方向	63.28	0.18	(62.94,63.63)
Z 方向	63.29	0.18	(62.94,63.64)

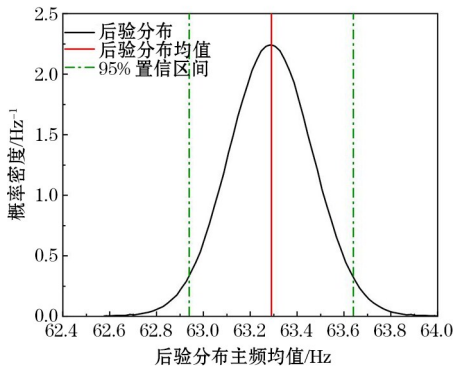


图 9　贝叶斯分析后验概率分布

Fig.9　Posterior probability distribution of Bayesian analysis

3.3　极大似然估计

极大似然估计通过已知样本数据构建似然函数来寻找使样本出现概率最大的参数值。利用 Python 软件得到极大似然估计统计特征，见表 5，绘制数据直方图和正态分布拟合曲线，如图 10 所示。经统计得到爆破振动波峰值对应的优势主频率为 63.29 Hz，由图 10 可知，样本数据集中分布在 62 Hz 附近，正态分布拟合曲线峰值与直方图峰值位置不一致，这是由于正态分布拟合曲线是基于数据整体的分布趋势，但样本数据在 74 Hz 附近存在局部集中，影响拟合结果的准确性。由于样本的随机性，即使在整体数据服从正态分布的背景下，小样本情况下也可能出现拟合曲线和直方图峰值不重合的现象，当样本数量足够大时，极大似然估计量会趋于真实参数值，并在所有无偏估计量中具有最小方差，但在小样本情况下波动性较大。

表 5　极大似然估计统计特征

Table 5　Statistical characteristic by maximum likelihood estimation

方向	主频均值/Hz	主频标准差/Hz	95.0%置信区间
X 方向	63.29	4.81	(61.53,65.06)
Y 方向	63.29	4.81	(61.52,65.05)
Z 方向	63.29	4.81	(61.52,65.05)

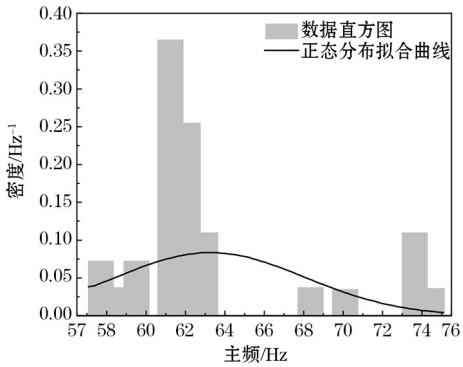


图 10　极大似然估计数据分布

Fig.10　Data distribution of maximum likelihood estimation

3.4　不同方法结果对比

在小样本基础上贝叶斯分析综合考虑了先验信息和样本数据，避免了仅依赖有限样本数据可能导致的较大不确定性，通过整合先验知识，可以对参数的取值范围进行更合理的约束，从而减少估计的误差，结果更为集中和准确，置信区间范围相对较小，但统计结果受先验分布的影响大，因此对总体分布情况的假设准确性要求高。

Bootstrap 方法无需假设总体服从特定分布，直接从原样本出发进行抽样，能够更好地反映样本的特征和分布情况，统计结果更贴合实际。极大似然估计在小样本情况下则呈现出一定的局限性，置信区间范围较宽泛。

综合理论分析数据得到振动频率所对应的主频范围为 63.22～63.29 Hz，通过计算求出主频对应周期为 16 ms。在此基础上，通过对爆破振动特性及相关影响因素的综合考量，明确了半周期 8 ms 为最佳孔间延期时间。

4　现场试验验证

由理论分析可知，当孔间延期时间为 8 ms 时可使相邻炮孔爆炸波的主振频率相差半个周期，控制波峰和波谷干扰相消，从而达到减振的目的。在某矿山经过多次试验得到孔间延期调整后的峰值振速实测数据，见表 6。由于部分试验振速过低，无法触发测振仪，在统计时予以剔除，不纳入结果分析。由表 6 数据计算可得到，*X* 方向振速平均值为 0.023 cm/s，*Y* 方向振速平均值为 0.062 cm/s，*Z* 方向振速平均值为 0.040 cm/s，合速度方向振速平均值为 0.079 cm/s。与孔间延期时间 20 ms 的峰值振速相

比,延间延期时间 8 ms 时 X、Y、Z 三个方向的峰值振速分别降低 14.81%、12.68%和 36.51%,合速度方向的峰值振速降低 22.55%,可有效降低爆破振动幅度。

表 6 孔间延期时间 8 ms 时峰值振速实测数据

Table 6 Measured data of peak vibration velocity when the delay time between holes is 8 ms

序号	孔间延期时间/ms	X 方向振速/(cm/s)	X 方向主频/Hz	Y 方向振速/(cm/s)	Y 方向主频/Hz	Z 方向振速/(cm/s)	Z 方向主频/Hz	合速度/(cm/s)	最大单向振速/(cm/s)
1	8	0.023	60.5	0.076	5.9	0.029	5.9	0.085	0.076
2	8	0.045	70.3	0.044	19.5	0.059	50.8	0.086	0.059
3	8	—	—	—	—	—	—	—	—
4	8	—	—	—	—	—	—	—	—
5	8	0.022	72.3	0.065	11.7	0.030	9.8	0.075	0.065
6	8	0.030	72.3	0.097	9.8	0.049	50.8	0.113	0.097
7	8	0.012	60.5	0.053	9.8	0.024	9.8	0.059	0.053
8	8	0.029	62.5	0.057	7.8	0.031	52.7	0.071	0.057
9	8	0.015	76.2	0.045	7.8	0.055	35.2	0.072	0.055
10	8	0.017	70.3	0.060	11.7	0.044	19.5	0.076	0.060
11	8	0.012	72.3	0.062	13.7	0.040	17.6	0.075	0.062
12	8	0.024	70.3	0.059	7.8	0.040	48.8	0.075	0.059
13	8	—	—	—	—	—	—	—	—

注:表中“—”表示爆破振速小于 0.02 cm/s,无法达到测振仪的触发阈值,没有触发。

5 结论

(1) 对爆破振动监测结果进行萨道夫斯基拟合,得到地下中深孔爆破振动速度随距离的变化规律。随爆源距离增加,质点振动速度逐渐减小,不同方向上振速的衰减态势也不同。

(2) 应用 3 种统计方法统计快速傅里叶变换峰值对应频率的分布情况,其中 Bootstrap 方法和贝叶斯分析都适用于小样本统计分析,极大似然估计易受样本数量影响,在样本数量较小时结果波动性大。Bootstrap 方法无需判断总体分布情况,基于实际数据进行重抽样模拟扩大样本数量,使统计结果更贴合实际,在总体分布不易确定的场景中具有极大优势,但统计结果的稳定性受抽样次数影响,抽样次数不足影响统计结果的稳定性和准确性;贝叶斯分析需要判断总体的分布情况作为先验分布,利用样本数据不断调整总体的分布情况,统计结果较其他统计结果而言更加精确,但在对总体分布不明确的情况下应用难度较大,受先验分布影响会存在误差。因此,Bootstrap 方法对于寻找峰值对应频率具有更大优势。

(3) 综合理论分析数据、爆破振动特性和相关影响因素,发现该矿山地下中深孔爆破孔间延期时间为 8 ms 时减振效果最好,与孔间延期时间 20 ms 时的峰值振速相比,其 X、Y、Z 三个方向的峰值振速分别降低 14.81%、12.68%和 36.51%,合速度方向的峰值振速降低 22.55%,并经过现场多次试验验证了分析结果的准确性,减振效果显著。研究结果可为地下中深孔延期时间的选取提供参考。

参考文献(References):

[1] 何国栋.隧道爆破振动监测与控制技术研究[J].科技创新与应用,2024,14(12):104-107.
HE Guodong. Research on tunnel blasting vibration monitoring and control technology [J]. Technology Innovation and Application,2024,14(12):104-107.

[2] 王正英,翟利军,石绍飞,等.会宝岭铁矿爆破振动危害控制研究[J].黄金,2024,45(3):5-8.
WANG Zhengying, ZHAI Lijun, SHI Shaofei, et al. Research on control of blasting vibration hazards in Huibaoling Iron Mine[J]. Gold,2024,45(3):5-8.

[3] 汪志国,贾旭峰,赵龙,等.中深孔爆破振动传播特性分析与控制[J].黄金,2023,44(9):36-40.
WANG Zhiguo, JIA Xufeng, ZHAO Long, et al. Analysis and control of vibration propagation characteristics of medium-long hole blasting[J]. Gold,2023,44(9):36-40.

[4] 赵学龙,郝家旺.某矿区爆破振动对邻近建筑稳定性影响研究[J].矿业研究与开发,2018,38(7):48-51.
ZHAO Xuelong, HAO Jiawang. The influence of blasting vibration on adjacent buildings stability in a mining area[J]. Mining Research and Development,2018,38(7):48-51.

[5] 陈际经,胡静云,李庶林.柿竹园矿地下特大爆破的微震监测技术研究[J].矿业研究与开发,2011,31(2):59-62.
CHEN Jijing, HU Jingyun, LI Shulin. Microseism monitoring for the underground extra large-scale blasting in Shizhuyuan mine[J]. Mining Research and Development, 2011,31(2):59-62.

[6] 孟祥栋,田振农,王守伟,等.城区隧道微震爆破技术研究[J].爆破,2011,28(4):6-10.
MENG Xiangdong, TIAN Zhennong, WANG Shouwei, et al. Study on slight vibration technology of tunnel blasting in urban area[J]. Blasting,2011,28(4):6-10.

[7] 舒文军.城市轨道交通暗挖隧道错相减震爆破技术研究[J].价值工程,2022,41(12):99-102.
SHU Wenjun. A study on staggered shock absorption blasting technology of underground tunnel in urban rail transit[J]. Value Engineering,2022,41(12):99-102.

[8] 田振农,孟祥栋,王国欣.城区隧道电子雷管起爆错相减震机理分析[J].振动与冲击,2012,31(21):108-111.
TIAN Zhennong, MENG Xiangdong, WANG Guoxin. Mechanism analysis of fault-phase vibration reduction for tunnel blasting initiated by electronic detonators in city area [J]. Journal of Vibration and Shcok,2012,31(21):108-111.

[9] 刘丽霞,蒋玉波,李进进.电子雷管起爆错相减震试验研究[J].施工技术,2014,43(17):43-45.
LIU Lixia, JIANG Yubo, LI Jinjin. Experimental study on the shock absorption by phase dislocation using electron-delay detonator[J]. Construction Technology,2014,43(17):43-45.

[10] 龙源,林吓平,刘强.峒室爆破微差设计原则及时间间隔选取研究[J].爆破,1997(4):34-37.
LONG Yuan, LIN Xiaping, LIU Qiang. Study on the design principle and selection of time interval of mine blasting micro differentials[J]. Blasting,1997(4):34-37.

[11] 吴腾芳,王凯.微差爆破技术研究现状[J].爆破,1997(1):53-57.
WU Tengfang, WANG Kai. Current status of research on differential blasting technology[J]. Blasting,1997(1):53-57.

[12] 凌同华,李夕兵.用小波变换识别微差爆破中的实际延迟时间[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2004(2):21-23.
LING Tonghua, LI Xibing. Using wavelet transform to identify practical time of delay in millisecond blasting[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition),2004(2):21-23.

[13] 陈士海,燕永峰,戚桂峰,等.微差爆破降震效果影响因素分析[J].岩土力学,2011,32(10):3003-3008.
CHEN Shihai, YAN Yongfeng, QI Guifeng, et al. Analysis of influence factors of interference vibration reduction of millisecond blasting[J]. Rock and Soil Mechanics,2011,32(10):3003-3008.

[14] 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(11):41-48.
HE Li, XIE Xianqi, HAN Chuanwei, et al. Delay time interval optimization of electronic detonator based on spectrum analysis and linear superposition of seismic wave [J]. Metal Mine,2021(11):41-48.

[15] 李祥龙,张其虎,王建国,等.地下爆破精确延时逐孔起爆减振试验研究[J].黄金科学技术,2021,29(3):401-410.
LI Xianglong, ZHANG Qihu, WANG Jianguo, et al. Experimental study on precise delay hole-by-hole blasting vibration reduction of underground blasting[J]. Gold Science and Technology,2021,29(3):401-410.

[16] 廖晓目.高陡边坡微差爆破振动主动控制与频谱特征研究[D].长沙:中南大学,2023.
LIAO Xiaomu. Study on active control and spectrum characteristics of millisecond blasting vibration in high and steep slope[D]. Changsha:Central South University,2023.

[17] IWANO K, HASHIBA K, NAGAE J, et al. Reduction of tunnel blasting induced ground vibrations using advanced electronic detonators-science direct [J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2020,105:103556.

[18] 胡静.隧道爆破开挖震动信号频谱分析[J].建筑结构,2022(增刊1):2866-2870.
HU Jing. Spectrum analysis of vibration signal of tunnel blasting excavation[J]. Buliding Structure,2022(Suppl.1):2866-2870.