

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2021.02.016

洞室爆破振动信号时频分析及能量分布研究

王子明, 闫建文, 杨振军

(西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 为有效预测洞室爆破对振动的振动规律,减小振动对保护建筑物的不良影响,分析起爆段数对能量分布的影响规律,需要对不同段数洞室爆破振动信号能量分布规律进行研究。以汝阳泉水沟尾矿库初期坝工程坝体堆石料开采为工程背景,采用小波变换法对爆破振动信号进行处理,获得各层频带包含能量方面信息,从频率和能量方面分析爆破振动信号时频特征。得到主振频率基本落在能量集中的频带,数个频带能量集中的现象依然存在。对比不同起爆段数的振动信号的能量分布情况,发现通过增加起爆段数,能够减少同时数个频带能量集中的现象。结合 Hilbert-Huang 变换(HHT)方法能同时分析信号时频特征的优点,进一步推论起爆段数增加使得振动波相互叠加效果加强,高频段振动分量相互叠加振幅消减,从而使主频向低频率收敛。

关键词: 小波分解; 起爆段数; 能量分布; 振动主频

中图分类号: TJ410.3

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2021)02-0261-08

Time frequency analysis and energy distribution of blasting vibration signal in tunnel

WANG Ziming, YAN Jianwen, YANG Zhenjun

(School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In this paper, to study the energy distribution law of chamber blasting vibration signals for different sections, it is necessary to effectively predict the vibration law of cavern blasting on vibration, reduce the adverse effect of vibration on the protection of buildings, and analyze the law of the influence of the number of detonation sections on energy distribution. Taking the rock-fill mining of the dam body in the initial dam project of Quanshuigou Tailing Reservoir in Ruyang County as the engineering case, the wavelet transform method is used to process the blasting vibration signal to obtain information on the energy contained in the frequency bands of each layer, and then analyze the time-frequency characteristics of the blasting vibration signal from the frequency and energy aspects. It is concluded that the main vibration frequency falls basically in the energy-concentrated frequency band, and that the phenomenon of frequency band energy concentration still exists. Comparing the energy distribution of vibration signals with different numbers of initiating segments, it is found in the study that that by increasing the number of initiating segments, the phenomenon of energy concentration in several frequency bands at the same time can be reduced. Combining the advantages of the Hilbert-Huang Transform (HHT) method that can simultaneously analyze the time-frequency characteristics of the signal, it is further deduced that the increase in the number of initiation segments will enhance the mutual superposition of vibration waves, and that the superposition of high-frequency vibration components will reduce the amplitude, which will cause the main frequency to converge to low frequencies.

Key words: wavelet decomposition; number of initiation segments; energy distribution; main frequency of vibration

收稿日期: 2020-06-29; 网络出版日期: 2021-01-04

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20210104.1456.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(51679198)

第一作者: 王子明,男,硕士生,研究方向为爆破施工技术。E-mail:214249768@qq.com

通信作者: 闫建文,男,副教授,研究方向为工程爆破技术。E-mail:ynjnwn@xaut.edu.cn

洞室爆破作为一种完成大量土石方开挖或抛填任务的爆破技术,一次性起爆药量较大,爆破段数较少,振动过程中会产生大量的能量,其引起的振动效应是影响爆破生产安全和边坡岩体稳定性的一个重要因素,故需对洞室爆破振动信号中携带的能量分布及爆破段数对能量分布的影响进行研究,而运用小波变换技术能较好地对振动信号各频带包含的能量值进行分析处理^[1-6]。张耀平等^[1]通过确定小波包层数,优选小波包基,运用 MATLAB 编程,得到能量的分布规律。晏俊伟等^[2]为了深入研究爆破地震波特性,应用小波变换方法对非平稳特点的爆破振动信号进行了能量分布特征分析。路亮等^[3]结合应用实例,对实测信号进行多尺度的提升小波包分解后,得到了爆破振动各个频带的能量分布,总结了爆破振动信号频带能量的分布特征。杨智广等^[4]采用理论分析与现场试验相结合的方法对爆破质点振速时程曲线进行 EMD 分解和 Hilbert 变换得出各频带的能量百分比以及总能量与距离的关系曲线。

学者们运用不同算法对振动信号的能量分布做了丰富的研究,但其研究对象多为小药量起爆产生的振动信号。而大洞室爆破起爆药量较大,振动信号包含的能量高,对洞室爆破的信号能量分布规律研究较少。在学者们对爆破振动信号研究的基础上,本文基于小波变换计算及 Hilbert-Huang 变换 (HHT)方法,将二者对振动信号的时频分析优势相结合,运用 MATLAB 编写计算机语言,合理划分频段,计算洞室爆破引起的振动波各频段的能量及其主频的分布,对洞室爆破的振动信号的能量分布进行研究。并对比不同起爆段数对振动信号能量分布,并推论起爆段数对振动信号能量分布的作用规律。为实际工程提供一定的参考。

1 工程背景

1.1 工程概况

泉水沟尾矿库初期坝 A 标工程为堆石透水坝,由库内采石建坝,坝高 84 m,坝顶高程为 EL720 m,坝顶长度 277 m,坝顶宽度为 5 m,坝底左右宽度 60~80 m,坝底上下游长度 367 m,沟底纵向自然比降 5.5%。根据初勘报告,坝体周边的风化安山岩完整性程度属破碎岩体,岩体基本质量等级为Ⅳ级;中风化安山岩,岩体完整性程度属较破碎岩体,岩体基本质量等级为Ⅲ级。

图 1 为施工场地全貌图,东北角标记处为尾矿坝坝体材料开采爆破区域及爆破方向。图 1 中心区域标记处为观测点布置区域。本次试验共进行两次

起爆,各观测点距起爆点距离见表 1。

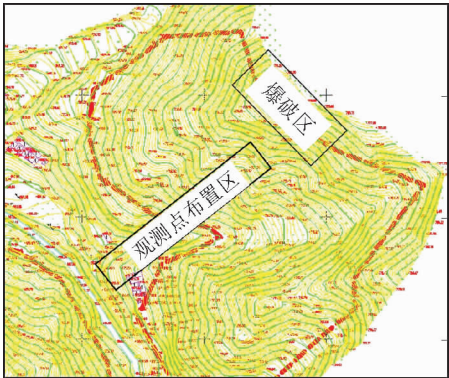


图 1 施工场地全貌图
Fig. 1 Overall view of construction site

表 1 观测点距起爆点距离

Tab. 1 Distance from observation point to initiation point

第一次起爆观测点 距离/m		第二次起爆观测点 距离/m	
1	133	1	210.0
2	176	2	234.2
3	257	3	264.3
4	305	4	303.2
5	404	5	344.0
6	452	6	382.4
7	514	7	451.2
8	638	8	448.6
9	648	9	494.6

1.2 试验炮布置

第一次洞室爆破试验炮共六条药室,上层两条,下层四条,平均每段装药量 12.6 t,装药总量 76 t。试验炮起爆顺序为上层两条药室超前下层药室 200 ms 同时起爆,下层四条药室按 100~150 ms 的时差逐一起爆。第二次爆破试验炮共分 9 个装药段,前排 5 个,后排 4 个,平均每段装药量为 9.5 t,最大单响装药量为 12.4 t,最小单响装药量为 2.67 t。调整后设计装药量为 80.6 t,实际装药总量为 80.2 t。

2 基于小波变换的信号分解

2.1 基本理论

设 $\psi(t) \in L^2(\mathbb{R})$, 其 Fourier 变换为 $\psi(\omega)$, 当 $\psi(\omega)$ 满足允许条件时^[7]:

$$C_\psi = \int_{\mathbb{R}} \frac{|\psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty$$

(1)

此时称 $\psi(t)$ 为一个基本小波或母小波。将母函数经伸缩和平移后得:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

(2)

称其为一个波序列。式中 a 为伸缩因子, b 为平移因子。对于任意的函数 $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$ 的连续小波变换为:

$$W_f(a, b) = \langle f, \phi_{a,b} \rangle = |a|^{-1/2} \int_{\mathbb{R}} f(t) \phi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

其重构公式(逆变换)为:

$$\psi_f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{a^2} W_f(a, b) \phi\left(\frac{t-b}{a}\right) da db \quad (4)$$

由于基小波生成的小波在小波变换中对被分析的信号起着观测窗的作用,所以还应该满足一般函数的约束条件:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)| dt < \infty \quad (5)$$

由于小波变换具有等距特性,即信号 $f(t)$ 的小波变换是能量守恒的,根据内积定理(Moyal 定理),有下式成立:

$$\frac{1}{C_\psi} \int_{\mathbb{R}} \frac{da}{a} \int_{\mathbb{R}} |W_f(a, b)|^2 db = \int_{\mathbb{R}} |f(t)|^2 dt \quad (6)$$

式(6)表明,小波变换幅度平方的积分同被分析信号能量成正比。但在式(6)中,可以把 $\frac{C_\psi |W_f(a, b)|^2}{a^2}$ 看作是 (a, b) 平面上的能量密度函数,因而可把 $\frac{C_\psi |W_f(a, b)|^2}{a^2}$ 看作以尺度 a 和时间 b 为中心的、尺度间隔 Δa 、时间间隔 Δb 的能量^[2]。根据能量密度的概念,式(6)可以写成:

$$\int_{\mathbb{R}} |f(t)|^2 dt = \int_{\mathbb{R}} E(b) db \quad (7)$$

实际应用中,在多分辨率分析条件下,将爆破振动信号分解到不同的频率带上,通过离散小波变换的分层分解对不同频率范围内振动分量时间变化规律加以分析,从而给出爆破振动信号能量的时-频分布特征。采用二进小波时,函数 $f(t)$ 满足如下分层分解关系:

$$f_0(t) = f_1(t) + g_1(t) = \dots = f_N(t) + g_N(t) + \dots + g_1(t) \quad (8)$$

式中: $f_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, N$) 表示函数分解出的低频部分, $g_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, N$) 表示函数分解出的高频部分,下标表示对应的分解层次。当分析对象为爆破振动的时间历史 $x(t)$ 时,有 $f_0(t) = x(t)$, 于是式(8)可以简化为:

$$x(t) = f_N(t) + \sum_{i=1}^N g_i(t) \quad (9)$$

HHT 法中 EMD 分解及 Hilbert 变换的基本理论可参考文献[8],本文不再描述。

2.2 信号的采集及频段划分

本次爆破监测使用 L20 爆破振动智能监测仪,该仪器的采样频率为 10 000 Hz,由 Shannon 定理得该信号的最大频率为 500 Hz。爆破试验中,在爆区附近一条典型测线上及工程其他典型位置,共布置 9 个测点。实测三向振动波形见图 2。

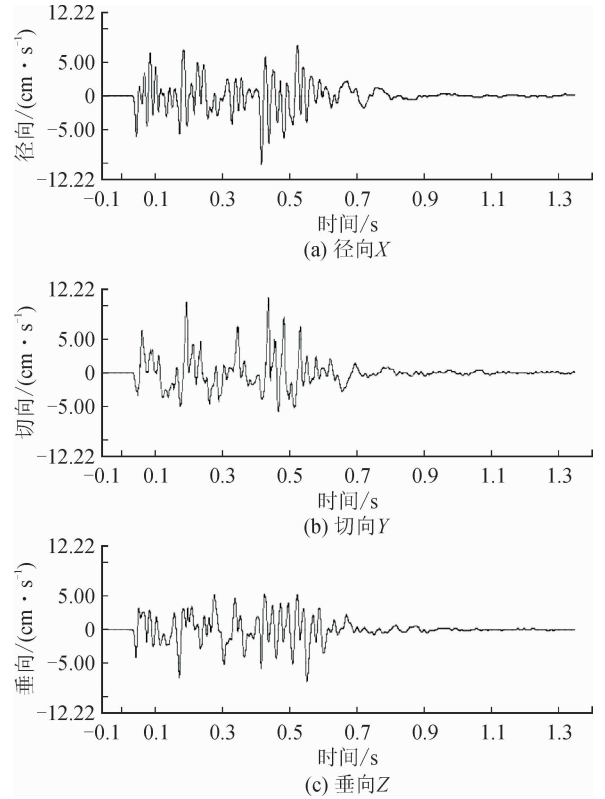


图2 实测三向振动信号波形图

Fig. 2 Waveform diagrams of the three-way vibration signal at the first observation point

在离散小波变换过程中,选取小波分解层数和小波基是关键。理论上分解可以无限制地进行下去,但事实上,分解可以进行到细节(高频)只包含单个样本为止。在实际应用中,一般依据信号的特征或者合适的标准来选择适当的分解层数,过高或过低的分解层数都不利于地震波信号的分析。当分解层数太低时,达不到精细化要求,分解层数太高又会造成信号失真的问题。由于信号的最大频率较高,且爆破振动的能量多集中在低频带区间(0~200 Hz)内,因此对原始信号进行 8 层分解,可得 1~8 级细节系数 $d1 \sim d8$ 及近似系数 $a8$ 。其中 1 级细节系数 $d1$ 代表最高频带,近似系数 $a8$ 代表最低的频带,频带从 $d1$ 到 $a8$ 逐渐降低。再对各层近似系数进行重构,得到 9 个层次不同频带范围内的振动分布规律。由于版面原因,只给出第一观测点径向振动分量的各层重构波形图,波形见图 3。

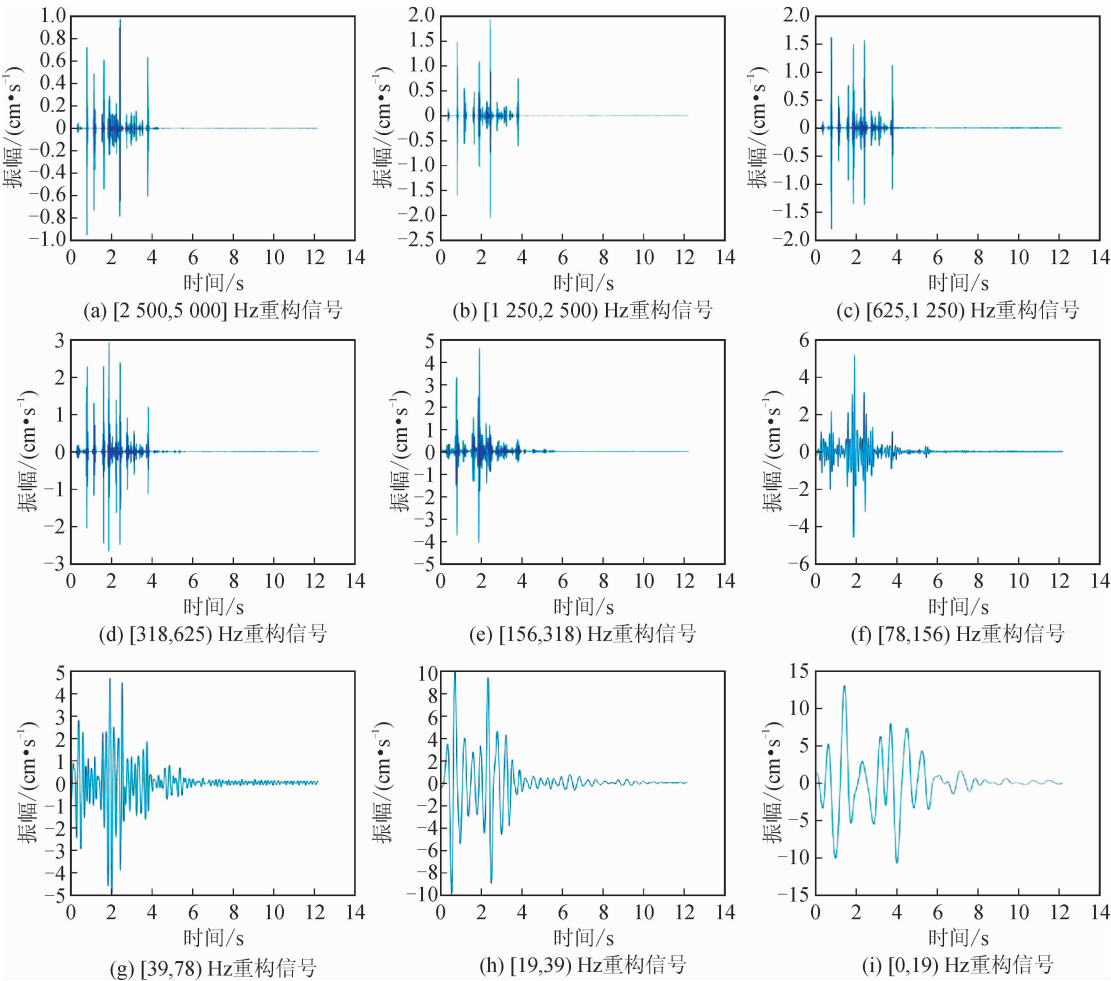


图 3 振动信号分层波形
Fig. 3 Vibration signal layered waveform

2.3 振动信号各频段能量分布计算

由于每组试验共设置 9 个振动观测点,每个观测点可收集径向、切向、垂向三组振动信号,故每组试验共收集 27 组振动信号。在 MATLAB 2018a 的编程环境下编写程序,对每个观测点所收集的信号进行小波分解及重构。计算第一观测点径向、切向、垂向三个方向振动分量的各频段能量值,其计算公式如下:

$$E_a = \sum |X_{a,k}|^2$$

$(k=1,2,3,4,\dots,13\ 000)$

(10)

式中: E_a 为第 a 层频带的信号能量; $X_{a,k}$ 为重构信号第 a 层第 k 时刻离散点的振幅。对所有观测点原始信号进行小波分解并计算各层频带内产生的能量,同时对原始信号进行快速 Fourier 变换(FFT),计算振动主频。其各频带振动信号的能量分布及主频结果见表 2、表 3 和表 4。

表 2 径向振动分量能量分布

Tab. 2 Energy distribution of radial vibration component

频带/Hz	观测点各频带内携带能量值/J								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
[78,156]	3.381E-1	5.498E-3	3.326E-3	4.553E-3	1.939E-3	1.582E-3	1.908E-2	1.183E-3	2.878E-4
[39,78]	9.770E-1	5.415E-2	4.485E-2	1.717E-2	1.408E-2	2.887E-2	8.664E-2	7.056E-3	1.934E-3
[19,39]	5.301E+0	2.188E+0	4.011E-1	4.076E-1	9.562E-2	1.867E-1	1.289E-1	5.991E-2	4.303E-3
[0,19]	1.339E+1	4.053E+0	2.391E+0	4.768E-1	9.592E-1	1.544E+0	3.051E-1	3.649E-1	7.344E-2
总计	2.020E+1	6.302E+0	2.840E+0	9.062E-1	1.071E+0	1.761E+0	5.403E-1	4.331E-1	7.997E-2
主频/Hz	13.14	13.75	13.03	17.37	6.52	5.79	6.52	5.79	5.20

表 3 切向振动分量能量分布

Tab.3 Energy distribution of tangential vibration component

频带/Hz	观测点各频带内携带能量值/J								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
[78,156)	6.989E-1	2.289E-3	4.105E-3	1.151E-3	4.905E-3	1.825E-3	2.208E-2	2.201E-4	1.257E-4
[39,78)	9.529E-1	1.004E-1	2.065E-1	9.415E-3	4.367E-3	1.121E-2	8.704E-2	2.730E-3	1.071E-3
[19,39)	4.222E+0	1.045E+0	5.915E-1	5.944E-1	1.924E-2	2.358E-1	9.179E-2	4.049E-2	1.874E-2
[0,19)	1.679E+1	3.089E+0	6.541E+0	2.213E+0	7.310E-1	3.169E-1	2.550E-1	1.033E-1	2.196E-1
总计	2.273E+1	4.256E+0	7.343E+0	2.818E+0	7.596E-1	5.658E-1	4.577E-1	1.467E-1	2.395E-1
主频/Hz	10.67	13.03	12.31	5.79	10.13	10.86	5.07	6.52	6.52

表 4 垂向振动分量能量分布

Tab.4 Energy distribution of vertical vibration component

频带/Hz	观测点各频带内携带能量值/J								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
[78,156)	6.916E-1	2.725E-2	3.561E-3	1.342E-3	1.366E-3	2.378E-3	1.488E-2	2.461E-4	1.603E-4
[39,78)	3.978E+0	1.371E-1	6.838E-2	1.419E-2	1.454E-2	1.627E-2	5.560E-2	2.138E-3	6.722E-4
[19,39)	1.848E+1	3.188E+0	7.525E-1	2.923E-1	1.097E-1	3.722E-2	1.072E-1	2.466E-2	1.607E-2
[0,19)	1.328E+1	5.437E+0	6.342E+0	1.348E+0	5.532E-1	1.280E-1	1.214E-1	1.371E-1	1.049E-1
总计	3.673E+1	8.790E+0	7.167E+0	1.656E+0	6.789E-1	1.839E-1	2.991E-1	1.641E-1	1.218E-1
主频/Hz	13.96	12.31	16.65	16.65	10.86	17.37	22.44	10.13	5.42

结合参考文献[1]研究结果,爆破振动产生的的能量基本分布于低频带内,而大于 200 Hz 的频段所携带的能量微乎其微,故只列举[0,156) Hz 频段范围内各频带的能量分布。对采样信号进行快速 Fourier 变换(FFT),计算振动主频。由表 2、表 3 和表 4 可知,试验 9 处观测点的径向振动分量在[0,39) Hz 频带内的能量值分别占总能量的 92.53%、99.03%、98.30%、97.60%、98.50%、98.27%、80.32%、98.10%、97.22%。切向振动分量在[0,39) Hz 频带内的能量占比分别为 92.45%、97.14%、97.13%、99.62%、98.77%、97.69%、75.78%、97.98%、99.50%。垂向分量相应为 86.48%、98.13%、98.99%、99.06%、97.65%、89.85%、76.40%、98.55%、99.31%。在以上 27 组计算结果中,[0,39) Hz 频段范围内携带能量占比达到 90% 以上的数据共 22 组,达到 80% 以上的共 26 组。结果表明爆破振动产生的能量基本处于低频率振动信号[0,39) Hz 内,故大于 156 Hz 的高频率的重构信号所携带的能量基本可以忽略不计。

为便于表示各测点振动分量,各振动分量信号均用数字-字母形式表示(数字 1,2,3…代表各个观测点,a,b,c 分别代表径向、切向、垂向振动分量)。经计算得 1-a 主频为 13.31 Hz,1-b 主频为 10.67 Hz,1-c 主频为 13.95 Hz。径向、切向振动主频均分布于振动信号携带能量最大的[0~19) Hz 频段内,而

垂向振动主频并不在其携带能量最大的[19,39) Hz 频带区间内。主频的分布与携带能量最大的区间并不一致,因此计算 9 处观测点各向振动的主频分布,计算结果见表 2、表 3 和表 4。

由表 2~4 可知,第一组试验中 27 组数据的主频全部分布于[0,39) Hz 频带内,径向、切向振动的主频分布区间为 5~11 Hz,而垂向振动的主频分布区间为 5~23 Hz。垂向振动的主频基本高于径向、切向振动主频,随着观测点距爆炸点距离的增加,径向、切向振动主频有逐渐减小的趋势,而垂向振动的主频与观测点距爆炸处距离的关系不明显。在以上 27 组数据中,只有 1-c,7-c 两组数据的主频未分布于其携带能量最大的区间内,因此主频基本能反映爆破振动能量比较集中的频带。但计算 1-a,2-a,4-a,2-b,6-b,1-c,2-c,7-c 振动信号[0,19) Hz 与[19,39) Hz 频带内包含能量的比值,1-a 组[0,19) Hz 包含能量为 13.39 J,[19,39) Hz 包含能量为 5.301 J,两频带内包含能量比值为 2.52。2-a 组[0,19) Hz 包含能量为 4.053 J,[19,39) Hz 包含能量为 2.188 J,两频带内包含能量比值为 1.85。依次计算其他组数据,4-a,2-b,6-b,1-c,2-c,7-c 组两频带内包含能量比值分别为 1.17、2.95、1.34、0.72、1.71、0.62。由以上计算结果可知,在[0,39) Hz 频段范围内,虽然主频所处的频带包含的能量值最高,但其相邻的子频带内亦携带大量的能量,1-c、7-c 相邻子频带

所携带的能量甚至超过了主频所处的频带。以上 8 组数据中,相邻的子频带所携带的能量占主频带携带能量值的 33.9%~161.9%,由此可见很多情况会出现几个频带能量集中的现象,这些频带内所包含的能量与主振频率所在的频带包含的能量相当,有时甚至比主振频率所在的频带能量还多,导致爆破振动信号出现多个峰值。通过小波能量分析及快速 Fourier 变换法,主振频率基本落在能量集中的频带,说明用主振频率来衡量爆破振动的安全性是可靠的。但能量在各频带均有分布,虽大多集中在主振频率附近,但很多情况都会出现几个频带能量集中的现象,这说明爆破振动安全标准中仅用 Fourier 变换计算主振频率的方法尚不够完善。

2.4 不同装药段数对爆破能量分布影响分析

第二次爆破试验的装药情况为:本次共分 9 个装

药段,前排 5 个,后排 4 个,平均每段装药量为 9.5 t,最大单响装药量为 12.4 t,最小单响装药量为 2.67 t。调整后设计装药量为 80.6 t,实际装药总量为 80.2 t。

对比第一次爆破测试装药量,本次起爆的装药量总量为 80.2 t,与第一次的 76 t 装药总量相近。不同于第一次装药结构,本次试验采用 9 段微差爆破起爆网络结构。试验同样沿起爆点每隔一定距离布设一个振动观测点,共布设 9 个,其中每个观测点距起爆点的距离与第一次起爆近似。本次试验共 9 个振动观测点,观测点位置与距起爆点距离与第一次起爆相同。每个观测点可收集径向、切向、垂向三组振动信号。全试验共收集 27 组振动信号。对所有观测点原始信号进行小波分解并计算各层频带内产生的能量。其各频带振动信号能量分布与主频结果见表 5、表 6 和表 7 所示。

表 5 第二次振动监测径向振动分量能量分布及主频

频带/Hz	观测点各频带内携带能量值/J								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
[0,19)	1.58E+1	1.58E+1	1.24E+1	2.11E+1	1.58E+1	9.04E-1	7.26E+0	5.03E-1	3.11E-2
[19,39)	1.24E+0	1.22E+0	3.77E-1	2.27E+0	1.22E+0	8.48E-1	1.21E+0	3.94E-2	9.49E-4
[39,78)	1.80E-1	1.70E-1	1.27E-1	2.01E-1	1.70E-1	2.66E+0	1.77E-1	9.47E-3	3.19E-4
[78,156)	1.03E-2	1.07E-2	5.54E-2	7.76E-2	1.07E-2	2.09E-1	3.23E-2	3.55E-4	1.39E-4
总计	1.72E+1	1.72E+1	1.29E+1	2.36E+1	1.72E+1	4.62E+0	8.68E+0	5.52E-1	3.25E-2
主频/Hz	9.0	9.0	10.6	5.8	10.6	11.3	5.1	5.8	9.0

表 6 第二次振动监测切向振动分量能量分布及主频

频带/Hz	观测点各频带内携带能量值/J								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
[0,19)	1.95E+1	1.95E+1	8.91E+0	2.33E+1	1.95E+1	1.92E+0	6.06E+0	7.09E-1	2.70E-2
[19,39)	2.61E+0	2.59E+0	1.62E+0	1.57E+0	2.59E+0	1.41E+0	1.34E+0	1.14E-1	4.89E-3
[39,78)	4.19E-1	4.25E-1	4.17E-1	3.51E-1	4.25E-1	1.47E+0	1.98E-1	9.38E-3	1.26E-3
[78,156)	1.86E-1	1.87E-1	1.22E-1	2.54E-1	1.87E-1	2.41E-1	6.75E-2	6.54E-4	3.68E-4
总计	2.27E+1	2.27E+1	1.11E+1	2.55E+1	2.27E+1	5.05E+0	7.66E+0	8.33E-1	3.35E-2
主频/Hz	7.9	7.9	7.7	8.2	8.1	8.5	8.6	8.2	7.9

表 7 第二次振动监测垂向振动分量能量分布及主频

频带/Hz	观测点各频带内携带能量值/J								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
[0,19)	2.13E+1	2.14E+1	6.09E+0	8.21E+0	2.14E+1	1.14E+0	2.03E+0	3.15E-1	1.90E-2
[19,39)	4.83E+0	4.67E+0	5.84E-1	2.35E+0	4.67E+0	9.41E-1	5.87E-1	7.30E-2	1.82E-3
[39,78)	3.72E-1	3.93E-1	9.10E-2	2.42E-1	3.93E-1	1.44E+0	2.73E-1	3.03E-3	2.83E-4
[78,156)	1.38E-1	1.23E-1	1.84E-2	5.76E-2	1.23E-1	1.03E-1	3.33E-2	5.21E-4	5.71E-5
总计	2.66E+1	2.66E+1	6.78E+0	1.09E+1	2.66E+1	3.62E+0	2.93E+0	3.92E-1	2.11E-2
主频/Hz	11.5	11.5	11.5	11.3	11.5	8.5	5.2	11.3	11.5

由表 5、表 6 和表 7 可知,由于起爆方式的变化,主频分布越加密集并且频率较低,27 组数据中主频全部位于 $[0,19)$ Hz 频段范围内。在以上 27 组计算结果可知, $[0,19)$ Hz 频段范围内携带能量值占全部能量的比值最大,爆破所产生的能量基本都位于 $[0,19)$ Hz 频带内,故主振频率亦基本落在能量集中的频带 $[0,19)$ Hz)。计算 27 组数据 $[0,39)$ Hz 频带范围内能量分布占总能量的比值,其中能量占比达到 90% 以上的共 23 组。结果表明随着起爆段数的增加,爆破主振频率越向低频区间集中,爆破产生的能量有向低频带内集中分布的趋势,且产生的能量基本分布于 $[0,19)$ Hz 频带范围内。主振频率分布区间与携带能量最大的频带基本相一致。与第一次爆破监测相比,随着起爆段数的增加,同时存在几个频带能量集中的现象有所减少。

2.5 基于 HHT 的不同段数能量分布对比

Hilbert-Huang 变换(HHT 法)可以同时从时域(持续时间)和频域(主振频带)角度反映爆破振动信号能量的变化及其分布规律,故运用 HHT 法对振动信号进行时频分析。为减小观测点与爆源的距离对能量分布的影响,从两组实验中各选取第三点处(距爆源距离分别为 257 m、264 m)收集的振动信号径向分量对比分析。经 EMD 分解后再进行 Hilbert 变换,可得两振动信号径向分量的三维时频谱图,见图 4。

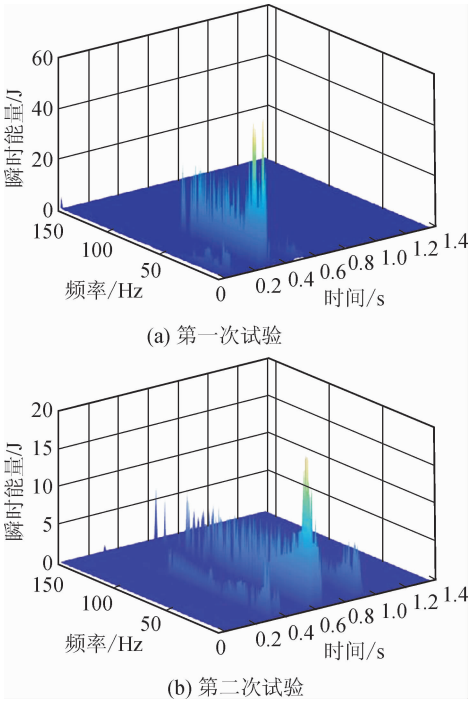


图 4 振动信号三维时频谱图

Fig. 4 Three dimensional time-frequency spectrum of vibration signal

从频域的角度分析,两次试验中能量均基本分布于低频段内, $0\sim50$ Hz 内能量分布最为集中,与上节分析结果相一致。由于第一次试验装药段数少于第二次试验,其振动能量多集中于 0.5 s 之前,而第二次试验由于装药段数的增加,瞬时能量在时域上分布较为均匀,不同起爆段波形的相互叠加削弱的作用更为明显,第二次试验中瞬时能量的最大值较前者亦有所下降。从图 4 中无法看出信号的主振频率,但由图 4(a)可以看出,在段数少的情况下,信号在频域上分布于低频段内,在时域上也集中分布在某一时段。由于不同段爆破形成振动波的相位不同,使叠加信号形成新的波峰或波谷,在段数较少的情况下主频主要受微差间隔时间的影响,段数对主频的影响较小。由图 4(b)可以看出,随着爆破段数的增多,其形成的振动波也因此增多,振动波间相互叠加的作用效果也有所提升,同时信号在高频区段分布较前者也有所增加。因此推论由于爆破段数的加大,其对主频的影响增加,产生的振动波的叠加作用效果更为明显,同时振动波的叠加部分不仅仅集中在低频的主振频率附近,高频部分之间亦相互叠加,由于振动信号的相互叠加的振幅削减作用,高频信号的振幅相应减小,从而使信号主频向低频段收敛。

3 结 论

1) 洞室爆破工程中,爆破振动信号在三个方向(径向、切向、轴向)上产生的能量基本处于低频段($0\sim39$ Hz),其包含能量占总能量的比值高达 90% 以上,而 156 Hz 以上频带所包含的能量占比不足 0.01%。故振动信号携带的能量多集中在低频段区间内。

2) 通过小波能量分析及快速 Fourier 变换法,主振频率基本落在能量集中的频带,说明用主振频率来衡量爆破振动的安全性是可靠的。但能量在各频带均有分布,虽大多集中在主振频率附近,但很多情况都会出现几个频带能量集中的现象,这说明爆破振动安全标准中仅用 Fourier 变换计算主振频率的方法尚不够完善。

3) 增加起爆段数,能使爆破主振频率分布区间与携带能量最大的频带基本趋于一致,同时存在几个频带能量集中的现象有所减少。结合 HHT 时频谱图推论,由于爆破段数增加,更多振动波参与叠加,高频段振动分量相互叠加振幅消减,从而使主频向低频率收敛,对主频作用更为明显。

参考文献:

- [1] 张耀平,曹平,高赛红. 爆破振动信号的小波包分解及各频段的能量分布特征[J]. 金属矿山,2007(11):42-47.
ZHANG Yaoping, CAO Ping, GAO Saihong. Wavelet packet decomposition of blasting vibration signal and energy distribution characteristics of frequency bands[J]. Metal Mine,2007(11):42-47.
- [2] 晏俊伟,龙源,方向,等. 基于小波变换的爆破振动信号能量分布特征分析[J]. 爆炸与冲击,2007,27(5):405-410.
YAN Junwei, LONG Yuan, FANG Xiang, et al. Analysis of the features of energy distribution for blasting seismic wave based on wavelet transform [J]. Explosion and Shock, 2007, 27(5): 405-410.
- [3] 路亮,龙源,谢全民,等. 爆破振动信号的提升小波包分解及能量分布特征[J]. 爆炸与冲击,2013,33(2):140-147.
LU Liang, LONG Yuan, XIE Quanmin, et al. Decomposition and energy distribution of blasting vibration signal based on second generation wavelet packet (SG-WP)[J]. Explosion and Shock Waves, 2013, 33(2): 140-147.
- [4] 杨智广,费鸿禄,胡刚. 隧道掘进爆破振动对围岩影响的 HHT 分析[J]. 中国安全生产科学技术,2019,15(9):121-127.
YANG Guangzhi, FEI Honglu, HU Gang. HHT analysis on influence of blasting vibration during tunnel excavation on surrounding rock[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(9): 121-127.
- [5] 钟冬望,何理,操鹏,等. 爆破振动持时分析及微差爆破延期时间优选[J]. 爆炸与冲击,2016,36(5):703-709.
ZHONG Dongwang, HE Li, CAO Peng, et al. Analysis of blasting vibration duration and optimizing of delayed time interval for millisecond blasting[J]. Explosion and Shock Waves, 2016, 36(5):703-709.
- [6] 霍丹丹,武旭. 基于小波包变换的露天深孔爆破振动信号能量分布特征分析[C]//第十届全国采矿学术会议,2015.
- [7] 余信橙,吴贤振,占飞. 回采进路中爆破振动信号的小波包能量分析[J]. 化工矿物与加工,2018,47(6):34-36,41.
YU Xincheng, WU Xianzhen, ZHAN Fei. Analysis of wavelet packet energy of blasting vibration signal in mining entrance[J]. Industrial Minerals & Processing, 2018, 47(6):34 -36,41.
- [8] 闫建文,徐传召. 梯段爆破过渡区岩体损伤的量化研究[J]. 西安理工大学学报,2014,30(2):220-224.
YAN Jianwen, XU Chuanshao. A quantitative study on the damage of rock mass in the transition zone during bench blasting[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2014,30(2):220-224.

(责任编辑 王绪迪)