

doi: 10.3963/j.issn.1001-487X.2013.04.006

小波包分析技术在地震勘探中的应用研究^{*}

付 军¹ 郝亚飞¹ 李名松¹ 周桂松¹ 朱根华¹ 李海波²

(1. 葛洲坝易普力股份有限公司, 重庆 401122;

2. 中国科学院 武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘 要: 采用离散元程序 UDEC 建立了含一条节理岩体的数值计算模型, 并借助小波包分析技术研究了地震信号的频带能量分布特征和信噪比。分析表明, 经小波包分析技术处理后的振动信号的不同频带能量可以得到很好地表达, 并将振动信号分为低频干扰信号(0~20 Hz)、有效信号(20~80 Hz)和 高频噪声信号(大于 80 Hz)。同时, 探讨了直达波和反射波各频带能量所占总能量的百分比与爆源距离的关系。

关键词: 小波包分析技术; UDEC; 节理岩体; 振动信号; 频带能量

中图分类号: TU47 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2013)04-0025-07

Application Research of Wavelet Packet Analysis in Seismic Exploration

FU Jun¹ HAO Ya-fei¹ LI Ming-song¹ ZHOU Gui-song¹ ZHU Gen-hua¹ LI Hai-bo²

(1. Gezhouba Explosive Co Ltd, Chongqing 401122, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The numerical model of rock mass with one joint was established by using discrete element method, and the energy distribution of frequency band and signal-to-noise ratio of seismic signal were studied by using wavelet packet analysis. The comparative analysis showed that the different frequency band energy of seismic signal after treatment with wavelet packet analysis was well expressed, and the vibration signals were divided into low-frequency interference signal(0~20 Hz), effective signal(20~80 Hz) and high frequency noise signal(greater than 80 Hz). Meanwhile, the percent of each frequency band energy of direct wave and reflect wave occupied by total energy and relationship to the distance of explosion source were investigated.

Key words: wavelet packet analysis; UDEC; jointed rock mass; vibration signal; frequency band energy

评价地震勘探的炸药激发效果时, 不仅要比较地震信号的能量大小, 更重要的是对比地震信号的频带能量分布特征及信噪比的高低。目前对地震信号的频带能量分析采用较多的是传统的 Fourier 变换, 但是地震信号本质上是短时非平稳信号, 与

Fourier 变换建立的理论基础并不一致, 同时该方法不能实现频率和时间同时定位。

近年来, 在数值信号分析中提出并得到广泛应用的小波包变换理论在处理非平稳随机信号方面具有十分突出的特点^[1], 它继承和发展了 Fourier 变换局部化思想, 同时克服了窗口大小随频率变化、缺乏离散正交基等特点, 是比较理想的非平稳信号局部时频分析的有力工具^[2-4]。而非平稳信号的小波包分析技术是在小波变换基础上发展起来的, 它克服

收稿日期: 2013-10-17

作者简介: 付 军(1971-), 男, 湖北仙桃人, 硕士研究生, 主要从事爆破振动方面的研究 (E-mail) hyf19830110@163.com。

项目基金: 国家 973 计划项目(2010CB732001); 国家杰出青年基金(51025935)

了小波变换中高频信号频率分辨率差、低频信号时间分辨率弱的问题,是一种更为精细的非平稳信号的分析方法。小波包分析技术已广泛应用于爆破振动信号的研究^[5-7],并取的了一定的研究成果,包括:采用小波包分析技术提取爆破振动信号中不同频带下的振动分量、各频带下爆破振动分量的衰减规律以及各频带小波包系数与爆破条件、场地介质特性、爆源与测点位置条件等因素的关系研究等。

基于上述理论,将小波包分析技术应用于地震勘探中。采用离散元程序 UDEC 建立含一条节理岩体的数值计算模型,对地震信号进行分析,确定地震信号的频带能量分布特征及信噪比,其研究思路和结果可为地震勘探资料品质的分析方法提供一定的借鉴作用。

1 计算模型及参数的选取

1.1 计算模型

采用二维模型网格计算半无限平面中的岩体的爆炸激发模型,考虑对称性,取模型的一半(右边)进行模拟分析。为了能够很好地辨别直达波和反射波,在保证计算精度和计算效率的前提下,适当地增大计算区域,取 150 m × 150 m。计算模型含一条节理,节理距模型上表面 145 m,且平行于模型表面。模型的左边界为对称边界,为减少动荷载作用下边界反射波的影响,其余三个边界均设 UDEC 中的无反射边界也称粘性边界^[8],如图 1 所示。

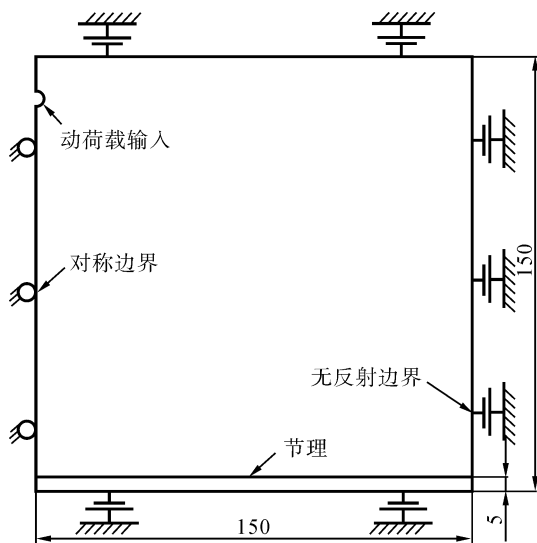


图 1 计算模型(单位: m)
Fig. 1 Calculation model (unit: m)

根据实际装药情况,在左边界表面下部 2 m 处的半圆形炮孔均布施加爆炸冲击波荷载。假设炮孔孔壁受冲击波压应力和剪应力作用,爆炸冲击波应

力时程曲线如图 2 所示。

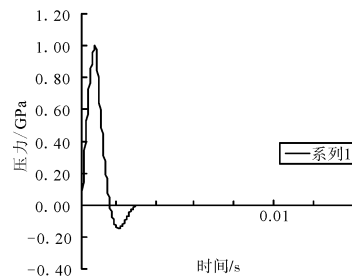


图 2 爆炸冲击波应力时程曲线
Fig. 2 Stress time-history curves of blast wave

对于岩石,采用理想弹塑性模型, Mohr-Coulomb 强度准则作为其屈服准则,屈服函数如下

$$f^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\phi + 2c \sqrt{N_\phi} \quad (1)$$

$$f^t = \sigma^t - \sigma_3 \quad (2)$$

式中: σ_1 、 σ_3 分别为最大、最小主应力; ϕ 为摩擦角; c 为粘聚力; σ^t 为岩石抗拉强度。

$$N_\phi = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (3)$$

当岩体内某一点应力满足 $f^s > 0$ 时,发生剪切破坏;当满足 $f^t > 0$ 时,发生拉伸破坏。对于岩体节理,使用弹性模型,屈服准则为 Coulomb 滑动准则。

$$f = \tau - \sigma \tan \phi - c \quad (4)$$

式中, σ 、 τ 分别为节理面上所受的正应力和剪应力,其它参数的意义同前。

1.2 岩土物理力学指标

一般而言,岩石材料和节理的动态物理力学特性参数都是与应变率相关的,但对于岩体的变形模量和泊松比等参数随应变率的变化幅度很小,通常采用相应的静态参数表示。为了能够清晰地分辨直达波和反射波,避免两者相互叠加,要尽量降低地震波在岩石中的传播速度,根据式(5),选取的岩石弹性模量较小。岩石各项物理力学指标见表 1。

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}} \quad (5)$$

式中: v 为纵波在岩石中的传播速度; E 为岩石弹性模量; μ 为岩石泊松比; ρ 为岩石密度。

表 1 物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical indexes					
密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ Pa	泊松比	粘聚力/ Pa	摩擦角/ ($^\circ$)	抗拉强度/ Pa
2000	5e9	0.3	27.7e6	45	6e6

节理对地震波的传播影响显著。文献[9]研究表明,岩体中节理的存在使地震波衰减很快;节理刚度在描述节理变形特性方面是一个重要参数,低刚

度节理对地震波造成较大的衰减,但同时可获得较明显的反射波。因此为了获得较好的反射波,岩石节理的法向刚度和切向刚度取值较小。节理各项物理力学指标见表 2。

表 2 节理力学特性

Table 2 Mechanical properties of joint

法向刚度/ Pa	切向刚度/ Pa	粘聚力/ Pa	抗拉强度/ Pa	摩擦角/ (°)
2e9	2e9	0	0	20

1.3 阻尼的确定

介质阻尼直接影响地震波在地层中传播过程中的能量衰减,因此为了保证计算结果的可靠性,必须合理选取。然而,自然界中阻尼的耗散能量机理非常复杂,目前不能通过理论计算求的。一般通过物理现象简化,建立阻尼模型,利用原型振动试验测得相应模型参数,从而近似再现能量耗散过程。在数值计算中要精确地模拟岩体振动的阻尼效应很困难,一般通过反复试算并和已知实测结果对比确定。通过反复试算并参照文献 [10] 的研究成果,取临界阻尼比 $\xi = 0.05$ 、中心频率 $f = 100$ Hz。

2 地震信号的小波包分析技术

凌同华应用小波包分析技术对爆破振动信号的频带能量分布规律进行了系统研究^[11],并详细介绍了基于小波包分析的信号不同频带能量分布规律的分析方法的原理和应用。采用凌同华提出的基于小波包分析技术的频带能量分析方法。

2.1 地震信号小波包分解层数的确定

对地震信号进行小波包分析时,首先需要确定小波包分解的层数。本文在模型上表面距左边界每间隔 10 m 布置一个监测点,地震信号的采样频率随模型的网格划分精细程度而变化,经分析计算确定地震信号采样频率 30 666 Hz,根据香农(Shannon)采样定理^[12],其奈奎斯特(Nyquist)频率为 15 333 Hz。根据小波包分析原理,将地震信号分解到第 11 层,共有 $2^{11} = 2048$ 个小波包,这样原始信号在整个频域被划分 2048 个子频带,每个频带带宽为 7.4869 Hz,对应最低频带为 0 ~ 7.4869 Hz。根据小波包分解算法,采用二进尺度变换,对其信号分解后各层重构信号的频带范围见表 3。

表 3 小波包分解系数重构信号各层频带范围

Table 3 The range for frequency band of reconstructed signal by wavelet packet coefficients

层数	$S_{i,0}$	$S_{i,1}$	$S_{i,2}$...	$S_{i,j-1}$	$S_{i,j}$
1	0 ~ 7666.5					7666.5 ~ 15333
2	0 ~ 3833.25	3833.25 ~ 7666.5	7666.5 ~ 11499.75			11499.75 ~ 15333
3	0 ~ 1916.63	1916.63 ~ 3833.25	3833.25 ~ 5749.88	...	11499.75 ~ 13416.38	13416.38 ~ 15333
4	0 ~ 958.31	958.31 ~ 1916.63	1916.63 ~ 2874.94	...	13416.38 ~ 14374.69	14374.69 ~ 15333
5	0 ~ 479.16	479.16 ~ 958.31	958.31 ~ 1437.47	...	14374.69 ~ 14853.84	14853.84 ~ 15333
6	0 ~ 239.58	239.58 ~ 479.16	479.16 ~ 718.73	...	14853.84 ~ 15093.42	15093.42 ~ 15333
7	0 ~ 119.79	119.79 ~ 239.58	239.58 ~ 359.37	...	15093.42 ~ 15213.21	15213.21 ~ 15333
8	0 ~ 59.89	59.89 ~ 119.79	119.79 ~ 179.68	...	15213.21 ~ 15273.11	15273.11 ~ 15333
9	0 ~ 29.95	29.95 ~ 59.89	59.89 ~ 89.84	...	15273.11 ~ 15303.05	15303.05 ~ 15333
10	0 ~ 14.97	14.97 ~ 29.95	29.95 ~ 44.92	...	15303.05 ~ 15318.03	15318.03 ~ 15333
11	0 ~ 7.49	7.49 ~ 14.97	14.97 ~ 22.46	...	15318.03 ~ 15325.51	15325.51 ~ 15333

注:表中 $S_{i,j}$ 表示第 i 层第 j 个小波包分解系数重构信号; $j=0,1,2,\dots,2^{i-1}$; $i=1,2,3,\dots,11$ 。

2.2 小波包基的选择

地震信号小波包分析的首要问题就是最优小波基的选择。在实际应用中,应选择衰减较快、波形与被分析信号有较好相似性的函数作为小波基函数,

所以小波基的选择与被分析信号的性质、特征密切相关。

从图 3 常用的小波函数可看出, Daubechies 小波系列具有较好的紧支撑性、光滑性以及近似对称

性^[13] 并已成功地应用于分析爆破地震在内的非平稳信号问题^[7]。目前在振动信号的处理中用的最多的是 db5 和 db8, 这里选用 db5 作为本文地震信号小波包分析的基函数。

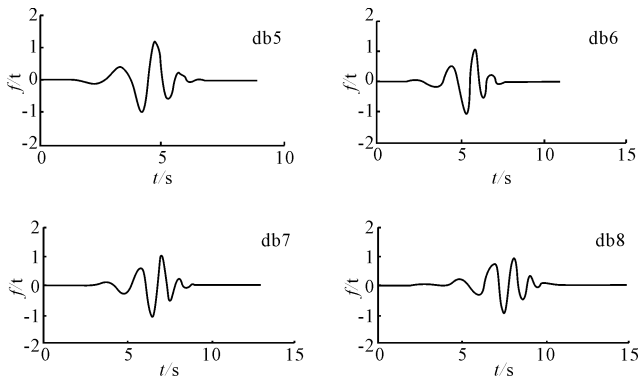


图 3 几种常用于地震信号分析的小波函数

Fig. 3 Several wavelet function used in the analysis of seismic signal

2.3 频带能量的表征

将地震信号分解到第 11 层, 设 S_{11j} 对应的能量为 E_{11j} , 则有

$$E_{11j} = \int |S_{11j}(t)|^2 dt = \sum_{k=1}^m |x_{jk}|^2 \quad (6)$$

式中, x_{jk} ($j=0, 1, 2, \dots, 2^{11}-1; k=1, 2, \dots, m; m$ 为信号的离散采样点数) 表示重构信号 S_{11j} 的离散点的幅值。

设地震信号的总能量为 E , 则有

$$E = \sum_{j=0}^{2^{11}-1} E_{11j} \quad (7)$$

各频带能量占总能量的比例为

$$E_j = \frac{E_{11j}}{E} \times 100\% \quad (8)$$

式中, $j=0, 1, 2, \dots, 2^{11}-1$ 。

由式(6)、式(7)、式(8)可得到地震信号经小波包分解后不同频带的能量分布及能量所占频带总能的百分比, 从而可以确定地震信号的最优信噪比。

3 计算结果及分析

地震勘探中振动信号的有效信号频率主要集中在 20 ~ 80 Hz, 其他频段波为噪声信号。振动信号经小波包分析后, 将振动信号分为低频干扰信号(0 ~ 20 Hz)、有效信号(20 ~ 80 Hz)和 高频噪声信号(大于 80 Hz)。在地震勘探中, 有效信号频带能量所占总能量的百分比越大, 则信噪比越大, 炸药激发效果越好。

3.1 振动速度波形图

图 4 为模型上表面距震源 10 m、50 m、90 m 和

130 m 处质点振动速度波形图。由图 4 知, 首先到达质点的为直达波; 波向下传播至节理处发生反射, 经一定距离传播后到达质点的为反射波。

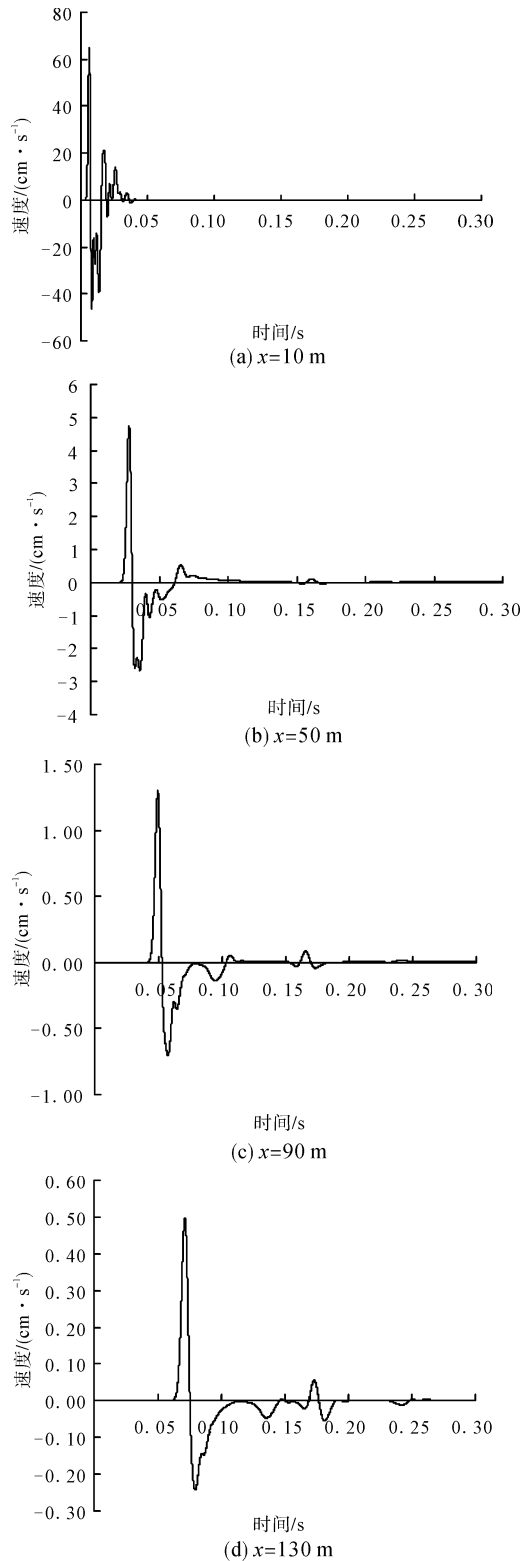


图 4 模型上表面距震源不同位置处质点振动速度曲线

Fig. 4 The curve of particle vibrating velocity at different location of model

3.2 频带能量分布

将各质点振动速度的直达波和反射波分别分离进行分析。根据式(6)、式(7)、式(8)对模型的各监测点进行小波包分析,得到各监测点的频带能量分布图。图5为爆源距离10 m、50 m、90 m、130 m处的质点直达波频带能量分布图,图6为对应的反射波频带能量分布图。可见经过小波包分析后,振

动信号不同频带的能量可以很好地表达出来。

由图5知,爆源近区,直达波振动信号能量分布广泛,集中在0~500 Hz;随着爆源距离的增大,高频迅速衰减,当爆源距离大于100 m后,能量主要集中在100 Hz以内。由图6知,高频能量衰减后,反射波振动能量主要集中在100 Hz以内,且分布较均匀。

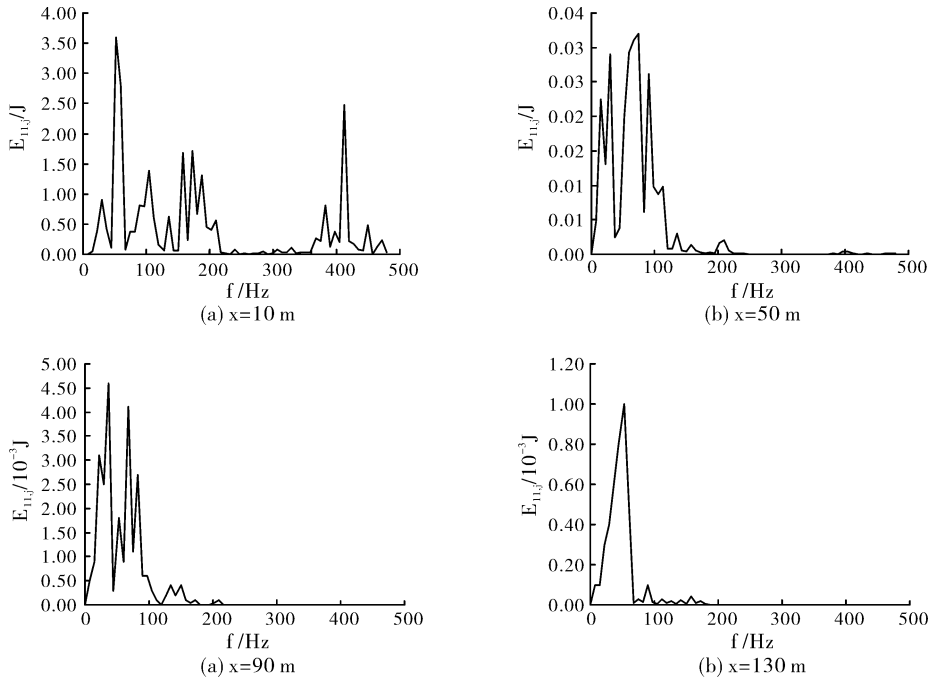


图5 直达波振动信号的频带能量分布

Fig. 5 The energy distribution of vibration signal of direct wave

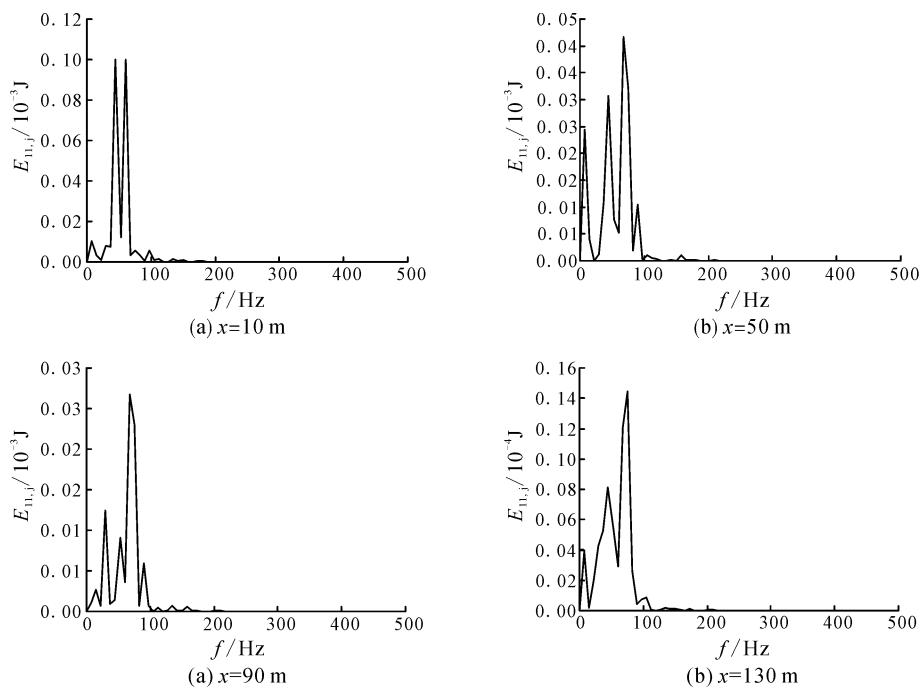


图6 反射波振动信号的频带能量分布

Fig. 6 The energy distribution of vibration signal of reflect wave

图 7、图 8 分别为直达波和反射波的各监测点三个频带能量所占频带总能百分比随爆源距离的变化曲线。由图 7 知,直达波高频噪声信号能量所占百分比随爆源距离的增加而减小,即高频噪声信号衰减较严重;有效信号和低频干扰信号随爆源距离的增加而增大,爆源距离小于 80 m 时,两者增长幅

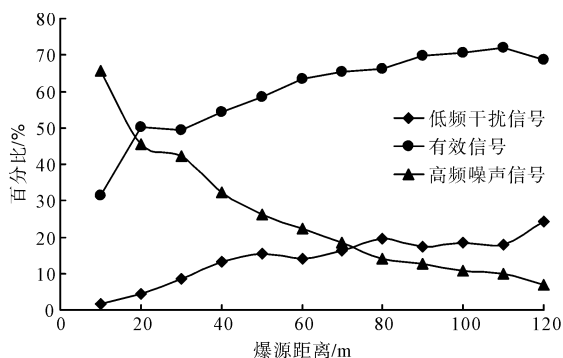


图 7 直达波不同频带能量所占百分比随爆源距变化曲线

Fig. 7 The change curve of the percentage of different frequency band energy of direct wave with distance of explosion source

度较大;当爆源距离大于 80 m 后,增长逐渐趋于平缓。由图 8 知,三个频带能量所占百分比随爆源距离的增大变化不大,其中有效信号能量所占百分比较大,高频噪声信号和低频干扰信号能量所占百分比基本相等。

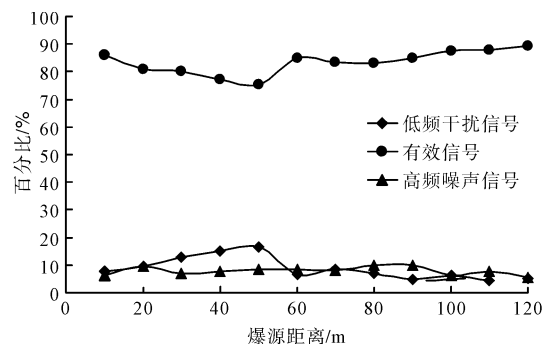


图 8 反射波不同频带能量所占百分比随爆源距变化曲线

Fig. 8 The change curve of the percentage of different frequency band energy of reflect wave with distance of explosion source

4 结语

(1) 采用离散元程序 UDEC 建立的含一条节理岩体的数值计算模型可以得到明显的直达波和反射波,且经小波包分析技术处理后的振动信号的不同频带能量可以得到很好地表达。

(2) 振动信号经小波包分析后,将振动信号分为低频干扰信号(0~20 Hz)、有效信号(20~80 Hz)和高频噪声信号(大于 80 Hz)。

(3) 直达波振动信号能量分布广泛,集中在 0~500 Hz;反射波振动能量分布较均匀,主要集中在 100 Hz 以内。

(4) 直达波的高频噪声信号衰减较严重,有效信号和低频干扰信号随爆源距离的增加而增大;反射波的两个频带能量所占百分比受爆源距离的影响较小。

参考文献(References)

- [1] 陈逢时. 子波变换理论及其在信号处理中的应用[M]. 北京:国防工业出版社,1998.
- [1] CHEN Feng-shi. The wavelet transform theory and its applications in signal processing [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998. (in Chinese)
- [2] 林大超,施惠基,白春华,等. 基于小波变换的爆破振动时频特征分析[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(1):101-106.
- [2] LIN Da-chao, SHI Hui-ji, BAI Chun-hua, et al. Time-frequency characteristic analysis of blasting vibration based on wavelet transform [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(1): 101-106.

frequency characteristic analysis of blasting vibration based on wavelet transform [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(1): 101-106. (in Chinese)

- [3] 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.
- [3] YAN Jun-wei, LONG Yuan, FANG Xiang, et al. Analysis on features of energy distribution for blasting seismic wave based on wavelet transform [J]. Explosion and Shock waves 2007 27(5): 405-410. (in Chinese)
- [4] 中国生,徐国元,江文武. 基于小波变换的爆破地震信号去噪的应用[J]. 中南大学学报(自然科学版),2006,37(1):155-159.
- [4] ZHONG Guo-sheng, XU Guo-yuan, JIANG Wen-wu. Application of de-noising in blasting seismic signals based on wavelet transform [J]. J Cent South Univ (Science and Technology) 2006 37(1): 155-159. (in Chinese)
- [5] 晏俊伟,龙源,方向,等. 基于小波包变换的爆破地震波时频特征提取及分析[J]. 振动与冲击,2007,26(4):25-29.
- [5] YAN Jun-wei, LONG Yuan, FANG Xiang, et al. Time-frequency characteristics extracting and analysis of blasting seismic wave based on wavelet packet transformation [J]. Journal of Vibration and Shock 2007 26(4): 25-29. (in Chinese)
- [6] 凌同华,李夕兵. 多段微差爆破振动信号频带能量分布特征的小波包分析[J]. 岩石力学与工程学报,

- 2005 24(7):1117-1122.
- [6] LING Tong-hua ,LI Xi-bing. Analysis of energy distributions of millisecond blast vibration signals using the wavelet packet method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2005 24(7):1117-1122. (in Chinese)
- [7] 宋光明,曾新吾,陈寿如,等. 爆破条件对爆破震动信号分析中小波包时频特征的影响[J]. 工程爆破, 2002 8(3):5-12.
- [7] SONG Guang-ming ,ZENG Xin-wu ,CHEN Shou-ru. Influence of blasting condition on time-frequency characteristics of blasting vibration signals with wavelet packets analysis[J]. Engineering Blasting 2002 8(3):5-12. (in Chinese)
- [8] UDEC (Universal Distinct Element Code) user's manual Version 3.0 [M]. Itasca Consulting Group Inc ,1996.
- [9] 赵坚,陈寿根,蔡军刚,等. 用 UDEC 模拟爆炸波在节理岩体中的传播[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(2):111-115.
- [9] ZHAO Jian ,CHEN Shou-gen ,CAI Jun-gang ,et al. Simulation of blast wave propagation in jointed rock mass using UDEC [J]. Journal of China University of Mining & Technology 2002 31(2):111-115. (in Chinese)
- [10] 夏祥,李俊如,李海波,等. 爆破荷载作用下岩体振动特征的数值模拟[J]. 岩土力学, 2005, 26(1):50-56.
- [10] XIA Xiang ,LI Jun-ru ,LI Hai-bo ,et al. Udec modeling of vibration characteristics of jointed rock mass under explosion[J]. Rock and Soil Mechanics 2005 26(1):50-56. (in Chinese)
- [11] 凌同华. 爆破震动效应及其灾害的主动控制[D]. 长沙:中南大学, 2004.
- [11] LING Tong-hua. Blast vibration effect and initiative control of vibrational damage [D]. Changsha: Central South University 2004. (in Chinese)
- [12] 邹云屏,李潇. 信号变换与处理[M]. 武汉:华中科技大学出版社,1994.
- [12] ZOU Yun-ping ,LI Xiao. Signal transform and process [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology ,1994. (in Chinese)
- [13] DAUBECHIES I. The wavelet transform ,time-frequency localization and signal analysis [J]. IEEE transactions on information theory ,1990 36(5):961-1005.

(上接第24页)

- [9] SHANG Jun-long ,HU Jian-hua ,MO Rong-shi ,et al. Predication model of game theory-matter-element extension for blastability classification and its application [J]. Journal of Mining & Safety Engineering ,2013 ,30(1):86-92. (in Chinese)
- [10] 李蓉,宋娟,何永延. 基于属性识别理论的岩体可爆性分级方法[J]. 金属矿山, 2008(5):32-34.
- [10] LI Rong ,SONG Juan ,HE Yong-yan. Classification for rockmass blastability based on attribute recognition theory [J]. Metal Mine ,2008(5):32-34. (in Chinese)
- [11] 薛剑光,周健,史秀志,等. 基于熵权属性识别模型的岩体可爆性分级评价[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(1):251-256.
- [11] XUE Jian-guang ,ZHOU Jian ,SHI Xiu-zhi ,et al. Assessment of classification for rock mass blastability based on entropy coefficient of attribute recognition model [J]. Journal of Central South University(Science and Technology) ,2010 ,41(1):251-256. (in Chinese)
- [12] 饶运章,何少博,陈辉,等. 基于未确知测度理论的采矿方法优选[J]. 中国矿业, 2012, 21(S1):337-342.
- [12] RAO Yun-zhang ,HE Shao-bo ,CHEN Hui ,et al. Optimization of mining method based on uncertainty measurement theory [J]. China Mining Magazine , 2012 , 21(S1):337-342. (in Chinese)
- [13] 赵国彦,吴浩. 未确知聚类方法及其在松动圈厚度预测中的应用[J]. 科技导报, 2013, 31(2):50-55.
- [13] ZHAO Guo-yan ,WU Hao. Application of unascertained clustering method in the thickness prediction of excavation damaged zone [J]. Science and Technology Review , 2013 ,31(2):50-55. (in Chinese)
- [14] 张园园,张巨伟,刘俊亨. 基于未确知测度理论的矿井通风系统外部优化[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(19):4748-4752.
- [14] ZHANG Yuan-yuan ,ZHANG Ju-wei ,LIU Jun-heng ,et al. External optimization of mine ventilation system based on unascertained measure Theory [J]. Science Technology and Engineering , 2012 , 12(19):4748-4752. (in Chinese)
- [15] 王新民,王石,鄢德波,等. 基于未确知测度理论的充填管道堵塞风险性评价[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(4):151-156.
- [15] WANG Xin-min ,WANG Shi ,YAN De-bo ,et al. Risk Assessment on blocking of filling pipeline based on uncertainly measurement theory [J]. China Safety Science Journal ,2012 ,22(4):151-156. (in Chinese)
- [16] 李军霞,王常明,王钢城. 基于组合赋权-未确知测度理论的滑坡危险性评价[J]. 岩土力学, 2013, 34(2):468-474.
- [16] LI Jun-xia ,WANG Chang-ming ,WANG Gang-cheng. Landslide risk assessment based on combination weighting-unascertained measure theory [J]. Rock and Soil Mechanics ,2013 ,34(2):468-474. (in Chinese)