

# 某核电站控界保护性开挖爆破信号小波包分析

李付安, 王学兵

(中国核工业华兴建设有限公司, 江苏 南京 210019)

**摘要:**使用 TC4850 便携式振动监测仪,对某核电站控界保护性开挖爆破工程进行振动测量,基于 MATLAB 编程分析,对原始信号进行去噪,并分析其能量特性;采用小波包分析方法研究了振动幅值、频谱特性和能量频带分布特征.结果表明:在既定研究条件下,该区域的爆破振动主要频率范围为 7.812 5 ~ 23.437 5 Hz,频带能量约占总能量的 70%. 研究结论为工程技术人员优化该核电站爆破参数,降低爆破振动,控制边坡损伤提供了依据.

**关键词:**爆破振动;小波包分析;频带能量;主频带

**中图分类号:**TD235.1      **文献标志码:**A      **文章编号:**1672-9102(2016)01-0001-05

## The wavelet packet analysis of control boundary protective excavation blasting signal in a nuclear power plant

LI Fu'an, WANG Xuebing

(China Nuclear Huaxing Mechanized Construction, Nanjing 210019, China)

**Abstract:** The paper tests the blasting signal for a nuclear power plant control boundary protective excavation by using TC4850 portable vibration monitor. Based on the MATLAB program, the original signal is de-noising, and the energy characteristics are analyzed. Then the amplitude, spectral characteristics and energy distribution characteristics are discussed. Results show that the main frequency range of the region is 7.812 5 ~ 23.437 5 Hz, and the band energy accounts for about 70% of the total energy. The conclusions can provide the gist for optimizing the nuclear power plant blasting parameters, reducing blasting vibration and controlling slope damage.

**Key words:** blasting vibration; wavelet packet analysis; frequency band energy; main frequency band

在目前的工程技术背景下,爆破依然是矿山开采、石方开挖、铁路、水利、水电站、公路路基修筑以及各类建筑物拆除的主要手段.在实施爆破作业点附近一定范围内,当爆破振动速度达到一定强度,就可能导致滑坡、建(构)筑物破坏等一系列危害现象<sup>[1]</sup>.爆破振动能量是造成爆破振动有害效应的能量来源,同时,爆破振动频率与建筑物结构的固有频率差对危害效应的显现有重要影响.爆破振动能量频带分布特征的研究是分析爆破振动危害控制的前提和基础,对指导工程实践具有十分重要的价值<sup>[2]</sup>.

爆破振动信号处理方法主要有 FFT 分析法、HHT 分析法和小波(包)分析法(Wavelet Analysis),工程技术人员运用于时频分析和延时识别<sup>[3-5]</sup>.FFT 分析法在信号处理上无法将信号的时域、频域分析结合起来进行研究,对于傅立叶谱中的某一频率,无法了解该频率出现的时间<sup>[6]</sup>.HHT 分析法不但在理论基础研究上不足,而且在边界常出现数据端部的“飞翼”现象,边界区域数据分解结果的精度很差<sup>[7]</sup>.相对于 FFT 分析法和 HHT 分析法,小波(包)分析法(Wavelet Analysis)在低频部分具有较低的时间分辨率和较高的频率分辨率,在高频部分具有较低的频率分辨率和较高的时间分辨率,能够实现信号在频域和时域上互相

结合,具备信号的自适应性特性<sup>[8]</sup>.为克服小波分析在高频段频率分辨率较差的缺点,R R Coifman 和 M V Wickerhauser 等人在小波变换的基础上提出小波包概念,将频率进行多层次划分,进一步对划分小波分析没有细分的高频部分进行信号分析,并能够根据信号频谱匹配,提高时频分辨率.

由于小波包分析法在爆破振动信号分析方面存在的优越性,本文拟通过监测某核电站控界保护性开挖爆破振动信号,运用小波包分析方法对测得的爆破信号数据进行分析,研究爆破振动特性及其频带能量分布特点,为边坡保护及基底损伤控制提供参考.

## 1 爆破振动监测

本次测量选用中科测控生产的 TC4850 便携式振动记录仪.该系统由集成三维传感器、中间交换器(放大器)及记录装置组成.该设备主要可用于地震波、机械振动、各种冲击、撞击中产生的信号源进行信号记录与数据分析、结果输出、数据再分析、显示打印而设计的便携式信号记录仪.该设备可同时 3 通道并行采集,采样率区间为 1 ~ 50 kHz, A/D 分辨率 16 Bit.信号记录仪可直接与加速度、速度、位移、压力、温度、湿度等各种传感器相连,进行动态过程所产生信号的监测、记录、报警和分析处理,并将模拟电信号转换成数字信号进行存储.通过 USB 接口和计算机传输数据,借助爆破振动分析软件(Blasting Vibration Analysis)进行波形显示、谱图显示、波形的各种特征参数及测试结果的表格显示、打印和存盘等.

本次测试现场的岩性为花岗岩.爆破采用的孔径为 90 mm,使用直径为 70 mm 的乳化炸药,钻孔深度为 12 m,抵抗线为 3.5 m,孔距为 4.0 m,单孔的装药系数为 60%.孔口段用岩粉炮泥进行堵塞.设计的段起爆药量为 97.2 kg,采用导爆管雷管起爆.测点距离爆破点 84.2 m.在现场实测取得了近 15 组数据.为分析该区域既定爆破条件下爆破振动的能量特征,选取了其中的一个波形进行分析.

## 2 小波包分析

### 2.1 爆破信号小波包分解

爆破振动信号频率一般低于 200 Hz.根据香农采样原理,信号采样频率可设置为 8 000 Hz.将测得的振动信号逐次分解到第 9 层,对应的最低频率为 0.000 0 ~ 7.812 5 Hz.根据小波包算法,采用二进尺度进行变换,信号分解之后重构信号频带范围如表 1 所示.表中  $S_{i,j}$  表示第  $i$  层第  $j$  个小波包分解系数重构信号; $j=0,1,2,\dots,2^{i-1};i=1,2,3,\dots,n$ .

表 1 小波包重构信号频带范围

层数	$S_{i,0}$	$S_{i,1}$	$S_{i,2}$	$S_{i,j-1}$	$S_{i,j}$
1	0 ~ 2 000				2 000 ~ 4 000
2	0 ~ 1 000	1 000 ~ 2 000	2 000 ~ 3 000		3 000 ~ 4 000
3	0 ~ 500	500 ~ 1 000	1 000 ~ 1 500	...	3 000 ~ 3 500
4	0 ~ 250	250 ~ 500	500 ~ 725	...	3 500 ~ 3 750
5	0 ~ 125	125 ~ 250	250 ~ 375	...	3 750 ~ 3 875
6	0.0 ~ 62.5	62.5 ~ 125.0	125.0 ~ 187.5	...	3 875.0 ~ 3 937.5
7	0.00 ~ 31.25	31.25 ~ 62.50	62.50 ~ 93.75	...	3 937.50 ~ 3 968.75
8	0.000 ~ 15.625	15.625 ~ 31.250	31.250 ~ 46.875	...	3 968.750 ~ 3 984.375
9	0.000 0 ~ 7.8125	7.812 5 ~ 15.625 0	15.625 0 ~ 23.437 5	...	3 984.375 0 ~ 3 992.187 5

### 2.2 爆破振动信号降噪处理

爆破振动信号监测过程中难免会监测到一些噪声信号,不但为爆破振动信号分析增加了难度,并且降低了其准确性. MATLAB 小波降噪过程一般分为信号分解过程、作用阈值过程和重建过程 3 个步骤.在光滑性方面,要求降噪信号与初始信号具有同等的光滑性;在相似性方面,降噪信号和测试信号的方差估计最小.小波降噪可通过抑制细节系数、FFT、部分阈值和全部阈值的方法进行降噪.根据董长虹<sup>[9]</sup>的研究,全局阈值方法能够很好地保留信号发展初期的高频特征,保持与测试信号的相似性,性能参数优于 FFT 和抑制细节系数方法.本研究中,对初始信号使用全局阈值方法降噪,结果如图 1.

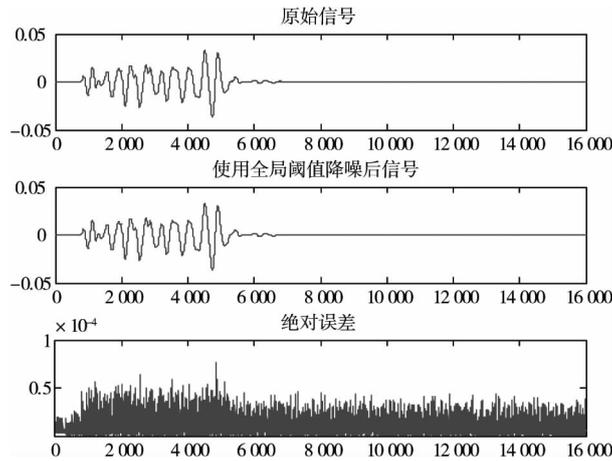


图 1 初始信号与降噪信号分析

### 2.3 小波基选择及误差分析

宋光明<sup>[8]</sup>通过分析各种小波基的主要性质以及爆破振动信号对小波基的要求,认为 Haar 基、Daubechies 系列、Coiflet 系列基本符合爆破信号分析要求.但 Haar 基光滑性太差,不适合进行较高尺度的小波分解及重构,Coiflet 系列虽然具有比 Dauberchies 系列更好的对称性,但有效支撑长度比 Dauberchies 宽,局部特性稍差.所以, Dauberchies 在同等条件下,对于爆破振动信号分析比其他小波基具有更好的局部分析能力和重构精度.为选取最优小波基,调用 MATLAB 语言,依据自相似原则、判别函数原则和支集长度原则,对爆破原始信号使用 db3, db4, db5, db8 分解和重构,绝对误差如图 2.

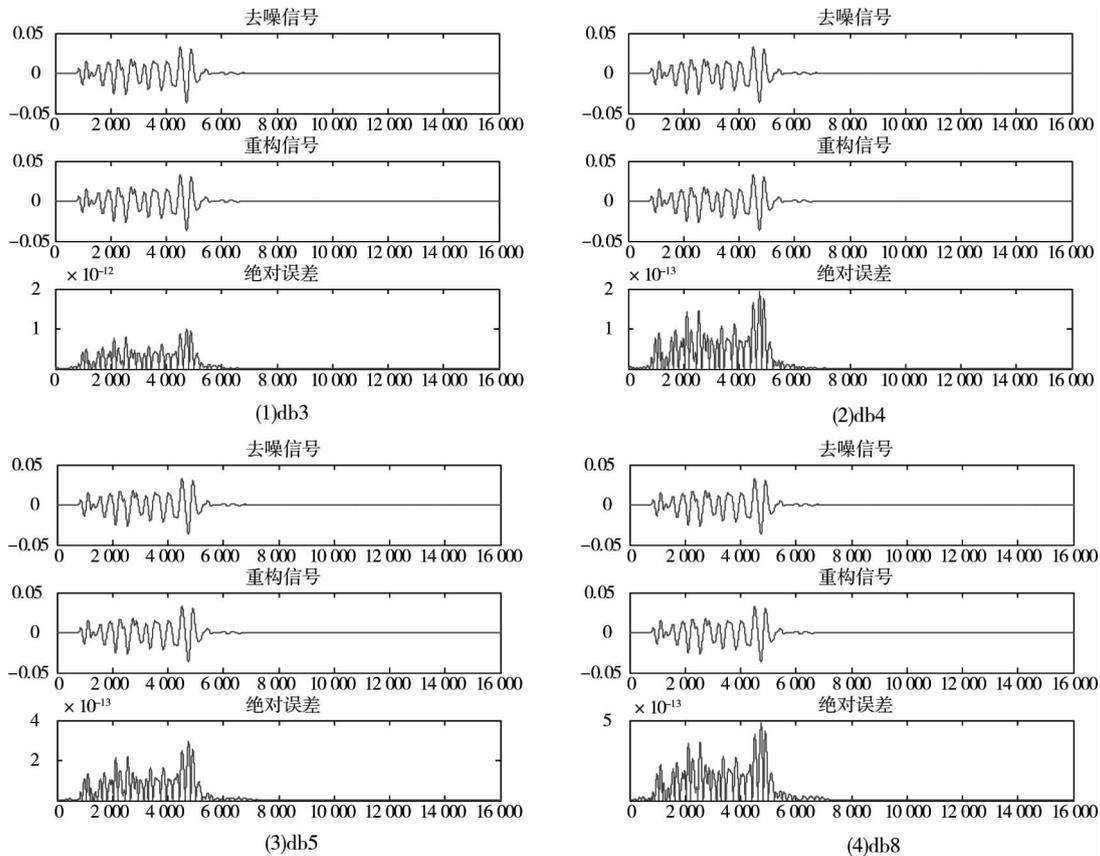


图 2 原始与重构信号绝对误差分析

由图 2 可知,使用 db3, db4, db5 和 db8 对信号进行重构最大绝对误差分别为  $1.0111 \times 10^{-12}$ ,  $1.9248 \times 10^{-13}$ ,  $2.9617 \times 10^{-13}$  和  $4.8388 \times 10^{-13}$ ,综合考虑支集长度与消失矩和正则性的关系,选取 db4 作

为小波基对信号进行分解和重构能够使原始信号与重构信号之间绝对误差最小.

### 2.4 频带能量分析

进行爆破振动信号分析时重点分析 150 Hz 以内的信号,选取分级尺度为 9,使用 db4 小波基对爆破振动信号进行小波包分解,然后根据小波包分解系数对第九层前 16 个节点上的振动信号进行重构,对频带能量进行编程计算,前 16 节点小波包分解系数及频带能量如图 3 所示.

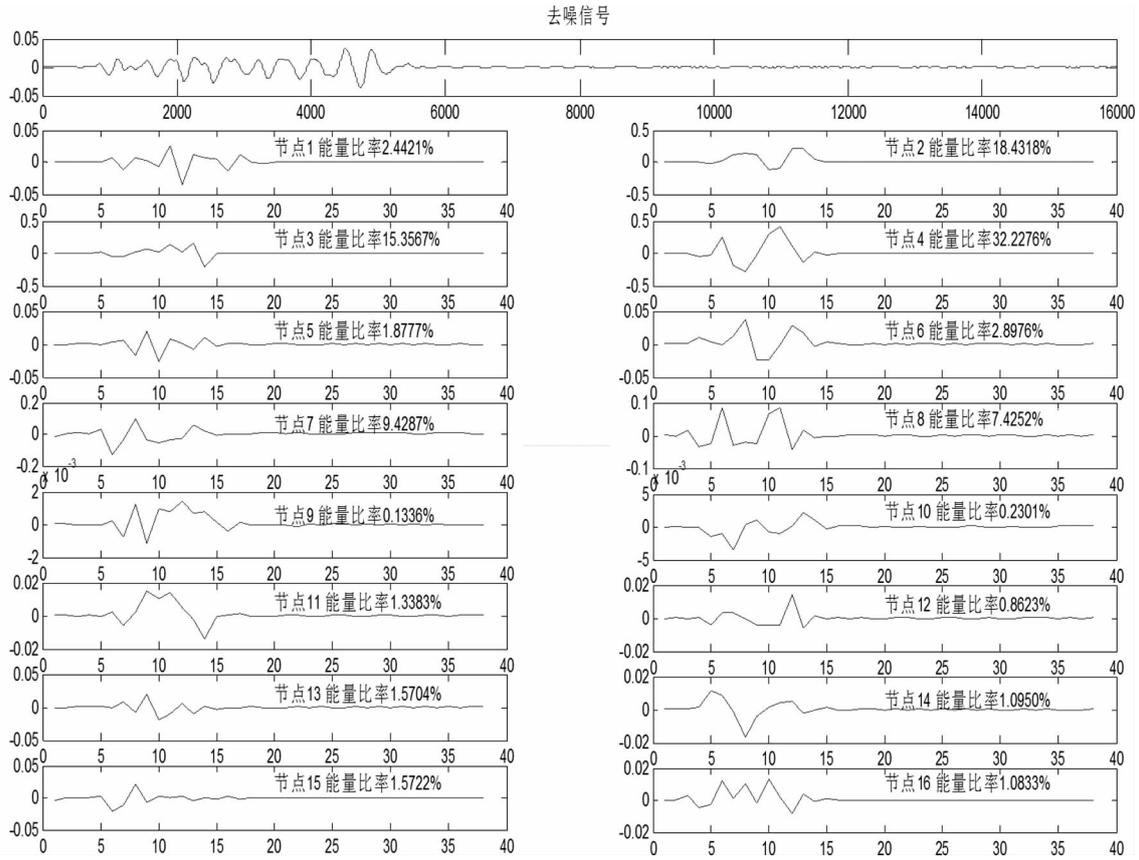


图 3 爆破信号小波包分解系数

由图 3 可知,信号能量在整个频带范围内均有分布,但呈现不均匀性,爆破振动能量主要集中在第 2~4 频带中,主要频率范围为 7.812 5~23.437 5 Hz,约占总能量的 70%,125~4 000 Hz 范围内小波频带能量所占比例极小.鉴于爆破振动波的瞬态冲击振动性,提取爆破信号频率和振幅信息如图 4,进行基于 db4 小波函数连续小波变换,变换结果如图 5,横轴为时间采样点,纵轴为尺度.

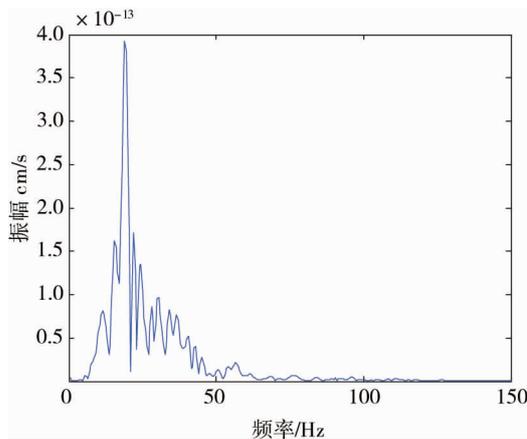


图 4 爆破信号频谱

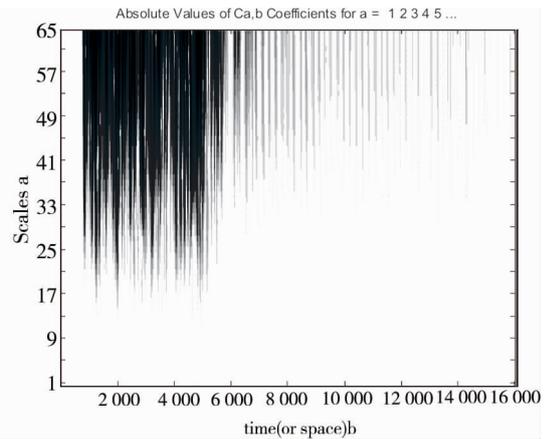


图 5 去噪信号基于 db4 的小波谱

由频谱图可知小波能量在频域上主要集中在 10 ~ 40 Hz, 爆破信号频谱图与 MATLAB 编程分析所得频带能量分布结果一致; 小波谱上亮度代表能量的大小, 亮度越大, 能量越大<sup>[10]</sup>. 信号能量在时域上主要集中于 1 000 ~ 5 000 采样点区域. 分析结论与频带能量计算结果呈现良好的一致性.

### 3 结论

- 1) 可以通过小波包分析的方法得出振动信号的能量分布特征, 文中振动信号能量主要分布于 10 ~ 40 Hz.
- 2) 工程技术人员可以利用分析结果调整爆破参数减少或避免损伤.

#### 参考文献:

- [1] 汪旭光. 爆破设计与施工[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012.
- [2] 凌同华, 李夕兵. 爆破振动不同频带的能量分布规律[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2004, 35(2): 310 - 315.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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, 02: 21 - 23.
- [6] 林大能. 平巷掏槽爆破空孔尺寸效应及围岩频繁震动损伤累积特性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2006.
- [7] 杨军伟, 林大能, 艾德春. 基于小波方法的露天矿台阶爆破振动信号分析[J]. 工程爆破, 2012, 18(2): 18 - 22.
- [8] 宋光明. 爆破振动小波包分析理论与应用研究[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2008.
- [9] 董长虹. 小波分析工具箱原理与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [10] 吴湘晖, 张亦农. 基于爆破信号的小波分析[J]. 采矿技术, 2005, 5(1): 74 - 75.