

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2020.05.009

核电厂基础开挖爆破振动监测与数据分析^{*}

顾 云 孙 飞 李广洲 唐 毅
核工业南京建设集团有限公司(江苏南京,211102)

[摘 要] 结合福建漳州核电厂一期工程场地平整土石方工程施工实例,为取得厂区岩体爆破施工时的振动能量分布,优化核电站二期工程爆破技术方案设计,对爆破振动数据进行采集,应用小波变换方法对具有短时非平稳特点的爆破振动信号进行了特征分析。基于小波变换的时-频特性和分层分解分析对比可知,爆破振动持续时间在不同方向上存在差异,且振动持续时间表现出与频率的反相关关系;振动信号的频率分布在不同振动方向上也呈现差异性;由于地形及岩性的因素作用,核电厂区爆破振动的能量分布主要集中在10~50 Hz 范围内。

[关键词] 爆破振动信号;小波变换方法;短时非平稳;相对能量分布;爆破参数

[分类号] TD235

Blasting Vibration Detection and Data Analysis of a Nuclear Power Foundation Excavation

GU Yun, SUN Fei, LI Guangzhou, TANG Yi
Nuclear Industry Nanjing Construction Group Co., Ltd. (Jiangsu Nanjing, 211102)

[ABSTRACT] Construction of site leveling earthwork for the first-stage construction of the Zhangzhou Nuclear Power Plant in Fujian Province was studied. In order to optimize the design of the blasting technical scheme for the second-stage engineering of the nuclear power plant, vibration energy distribution during the blasting construction of the rock mass in the plant area was obtained by collecting blasting vibration data. Characteristics of blasting vibration signals with short-term non-stationary characteristics were analyzed. Based on the analysis and comparison of time-frequency characteristics and layered decomposition of wavelet transform, it was found that the duration of blasting vibration is varied in different directions, and the duration of blasting vibration is inversely related to the frequency. The frequency distribution of vibration signal also differs in different vibration directions. Due to the effect of topography and lithology, the energy distribution of blasting vibration is mainly concentrated in the range of 10-50Hz.

[KEYWORDS] blasting vibration signal; wavelet transform method; short-term nonstationary; relative energy distribution; blasting parameters

引言

随着国民经济的高速发展,我国的核电建设事业加快了发展的步伐。核电站建设规模大、机组多,只能进行多机组分期建设装配。而后期机组建设时,必须保证已建机组安全稳定地运行,尤其要考虑爆破施工对其产生的振动影响^[1-4]。因此,对后期建设爆破施工的振动信号进行严密监测和多方位分析至关重要。

传统变换方法(如傅里叶变换)是建立在平稳随机过程基础上的。而爆破振动属于典型的短时非平稳随机过程,传统方法无法反映爆破振动信号的本质性特点。而小波变换方法为非平稳随机信号特征提取提供了可能^[5-16]。

在福建漳州核电厂一期施工中,针对爆破振动信号的特征,利用小波变换的多分辨分解和分层重构信号与原始信号之间的基本关系,分析了爆破能量分布的特征,取得了爆破振动信号能量分布的规律。以期为核电厂二期工程爆破技术方案的设计与

^{*} 收稿日期:2019-12-11
第一作者:顾云(1986-),男,本科,工程师(采矿工程),研究方向为爆炸作用机理研究及其应用。E-mail:252936221@qq.com
通信作者:孙飞(1989-),男,硕士,工程师(采矿工程),研究方向为爆炸作用机理研究及其应用。E-mail:1326662880@qq.com

优化提供参考。

1 工程概况

福建漳州核电厂项目规划建设 6 台 AP1000 核电机组(I #、II #机组为华龙一号),总装机容量约 750 万 kW。其中,一期工程建设 4 台机组,装机容量 500 万 kW。

厂址区上部地层为第四系,包括残积层(含残坡积层)、冲洪积层、海积层和人工堆积层等。其下为中生代形成的岩石,主要分布有早白垩纪形成的中细粒黑云母二长花岗岩和中细粒正长花岗岩、早侏罗纪形成的中细粒花岗闪长岩和石英二长岩;岩脉主要为辉绿岩,局部见有花岗细晶岩、花岗伟晶岩及石英岩脉。岩性以中硬岩、硬岩为主,对地震波的衰减作用不如软岩或黏土介质。

一期工程施工区域以 V #、VI #机组及其厂区西侧为界,功能设施为 V #、VI #机组主生产区和厂前区。开挖后场平标高 13.5 m,土方 60.32 万 m³,石方 587.83 万 m³,回填方 357.33 万 m³;挖沟槽土方 648 m³,石方 1 513 m³,边坡预裂面积 39 600 m²。

平面图如图 1 所示。图 1 中,施工坡道采用半挖半填的方式修筑,路面宽 10 m,道路内侧设排水沟,外侧设置块石挡墙;施工道路主坡道纵坡为原有

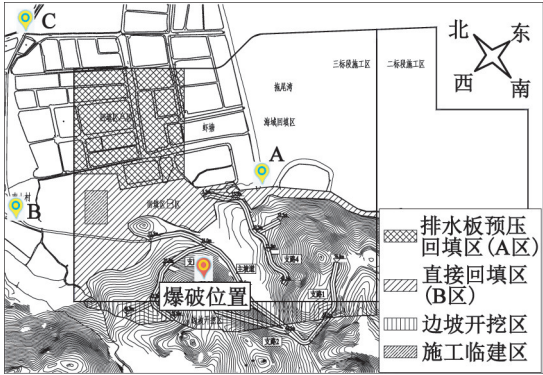


图 1 施工平面布置示意图

Fig.1 Schematic diagram of construction layout

县道拓宽,纵坡约 6%;其余各支路纵坡不大于 10%。

2 爆破振动测试设计和数据采集

2.1 测点布设及爆破参数

爆破区域位于施工区,高程为 44.0 m(孔口)。爆破振动监测点设置在相邻两个村庄以及近处的水坝闸门处,相对位置布置见表 1。

表 1 测点布设相对位置信息

Tab.1 Relative position information of measuring points

测点	高程/ m	与爆区相 对高差/m	距爆区 距离/m	相对位置
水坝闸门 监测点 A	4.0	40.0	317	爆破区域 北偏东 69°
南山村 监测点 B	3.8	40.2	544	爆破区域 北偏西 44°
人家村 监测点 C	2.9	41.1	770	爆破区域 北偏东 8°

选取三标段爆破实例,爆破技术参数见表 2。

2.2 仪器选择及参数设置

土石方振动监测与试验测点多、分布散,为了有效采集爆破振动信号,测试仪器选用 TC-4850 爆破测振仪及配套的国产 891-II 型速度/加速度传感器。每一测点测试 3 个分量,即 1 个垂直分量和 2 个水平分量。设置仪器时,X 轴沿南北向,Y 轴沿东西向,Z 轴为垂直向。

仪器的技术参数为:频率 5 ~ 500 Hz,量程 < 35 cm,分辨率 0.01 cm/s,读数精度 0.1%,设置采样率 8 kHz,触发阈值 0.050 8 cm/s。结果见表 3、表 4。

3 信号处理与分析

采用小波分解的方法对信号进行分析处理。小

表 2 爆破参数

Tab.2 Blasting parameters

孔距/m	排距/m	孔径/mm	孔数	孔深/m	孔药量/kg	总药量/kg	爆破类型
5.5	3.2	115	47	13.0	85	3 984	深孔、找平爆破
孔底标高/m	填塞长度/m	抵抗线/m	炸药种类	抛掷方向	最大段药量/ kg	雷管段别/ ms	单耗/ (kg · m ⁻³)
31.0	2.5	2.2	乳化 90	北	170.0	3,5 ~ 13,15	0.37 ~ 0.40

表 3 峰值测量结果

Tab. 3 Measurement results of peak value

测点	Z 向	Y 向	X 向
A	0.280	0.388	0.160
B	0.209	0.136	0.181
C	0.105	0.163	0.131

cm/s

表 4 主频测量结果

Tab. 4 measurement results of the main frequency

测点	Z 向	Y 向	X 向
A	21.1	13.7	20.7
B	19.0	11.5	12.1
C	24.5	12.8	14.4

Hz

波变换是信号时-频分析领域中较为成熟的一种方法,其不同于传统的傅里叶变换,不仅可以得到信号的频率分布信息,同时也能定位信号的时间分布。也不同于 DFFT 方法,小波变换具有可变的频率窗,其窗口大小恒定但形状可以改变。在对频率分辨率需求较大的低频部分,小波变换具有较高的频率分辨率;而在对时间分辨率要求较高的高频部分,小波变换具有较高的时间分辨率。因此,小波变换方法的这些特性决定了其十分适合用于处理爆破振动信号这类的非平稳随机过程。

3.1 信号的分解与重构

信号经过小波变换处理后,得到按指数等间隔分布的频带,其分解过程是将原始信号分解为高频部分 d1 和低频部分 a1;多层小波分解的过程为将得到的低频成分继续分解为高频部分 d2 和低频部分 a2,循环往复,直至达到设定的分解层数,见图 2。

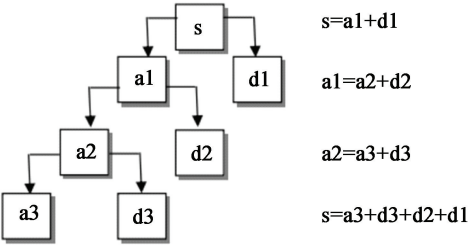


图 2 小波变换处理信号流程

Fig. 2 Signal processing flow

选取与起爆点距离最近的 A 测点的振动信号进行分析,对所监测信号的南北向(X 轴)分量,即垂直振动信号 $s(T)$ 进行小波分解,综合考量对称性、紧支性、正交性和消失矩几项性能^[9]。采用爆炸振动信号分析领域运用较成熟的“db8”小波基,

分析选择分解尺度 $j=7$ 。
 $s(T)=a7+d7+d6+d5+d4+d3+d2+d1$ 。(1)
分解结果如图 3 所示。得到重构信号(图 4),并计算得出重构信号与原始信号的相对误差(图 5)。由图 5 可以看出,相对误差在 10^{-12} 左右,完全满足工程计算的要求。

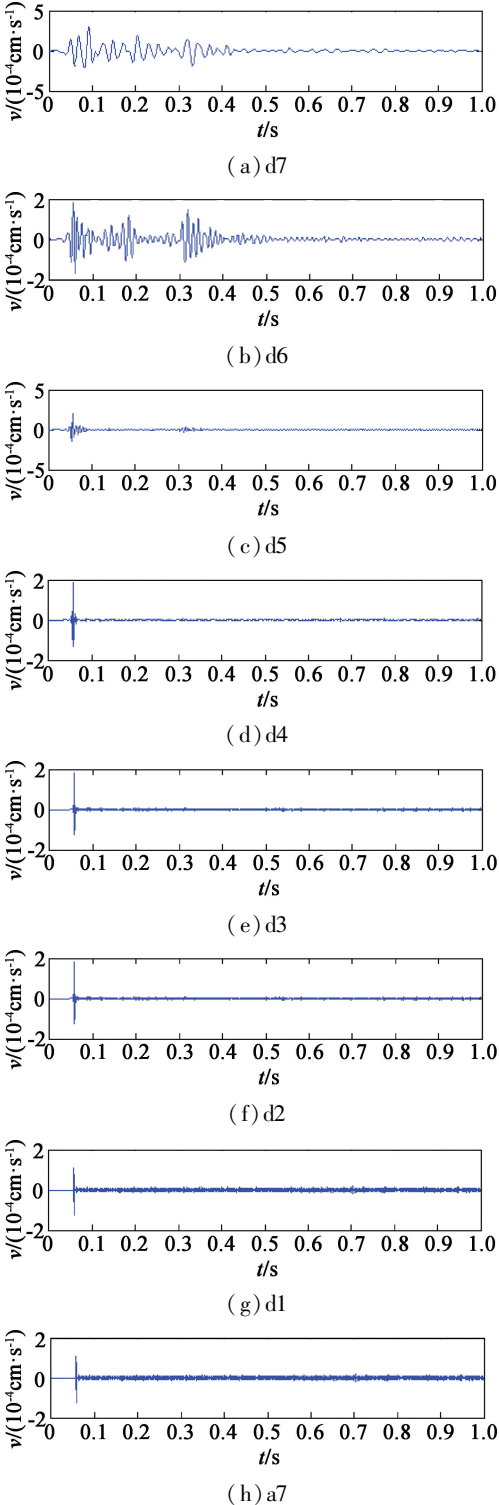


图 3 A 测点振动信号的小波分解

Fig. 3 Wavelet decomposition of vibration signals at Point A

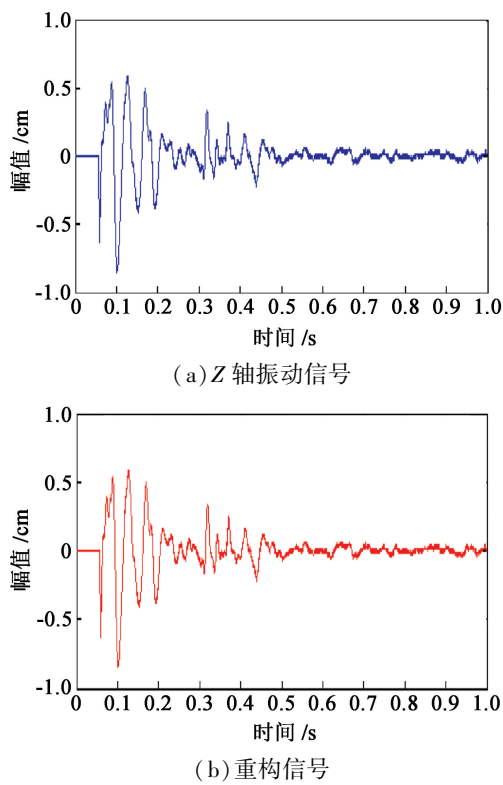


图 4 原始信号与重构信号

Fig. 4 Original signal and Reconstructed signal

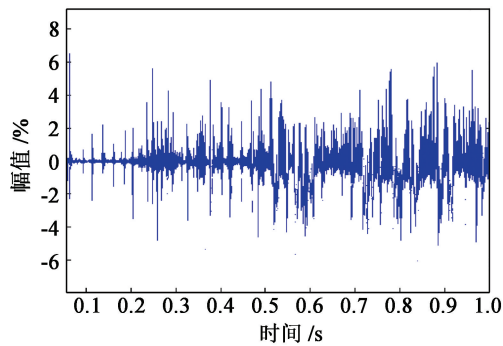


图 5 重构信号与原始信号的相对误差

Fig. 5 Relative error between reconstructed signal and original signal

本次爆破监测采样频率为 8 000 Hz,依据奈奎斯特采样定理,其奈奎斯特频率为 4 000 Hz。根据小波分析原理及爆破振动信号特征,分解频带宽度为 $4\,000/2^7 = 31.25$ Hz。对分解得到的各个分量进行频谱分析,如图 6。

由图 6 分析可以看出,振动信号分布的频率范围较宽,但其主要分布在 a7 和 d7 所在的 0 ~ 31.25 Hz 频带以及 31.25 ~ 62.50 Hz 频带。

设信号分解到第 j 层的部分能量为 E_j ,则有

$$E_j = \int_{-\infty}^{+\infty} |s^j(T)|^2 dt = \sum_{i=1}^n X_{i,j}^2 \quad (2)$$

式中: $X_{i,j}$ 为重构信号离散点的幅值。设信号总能量

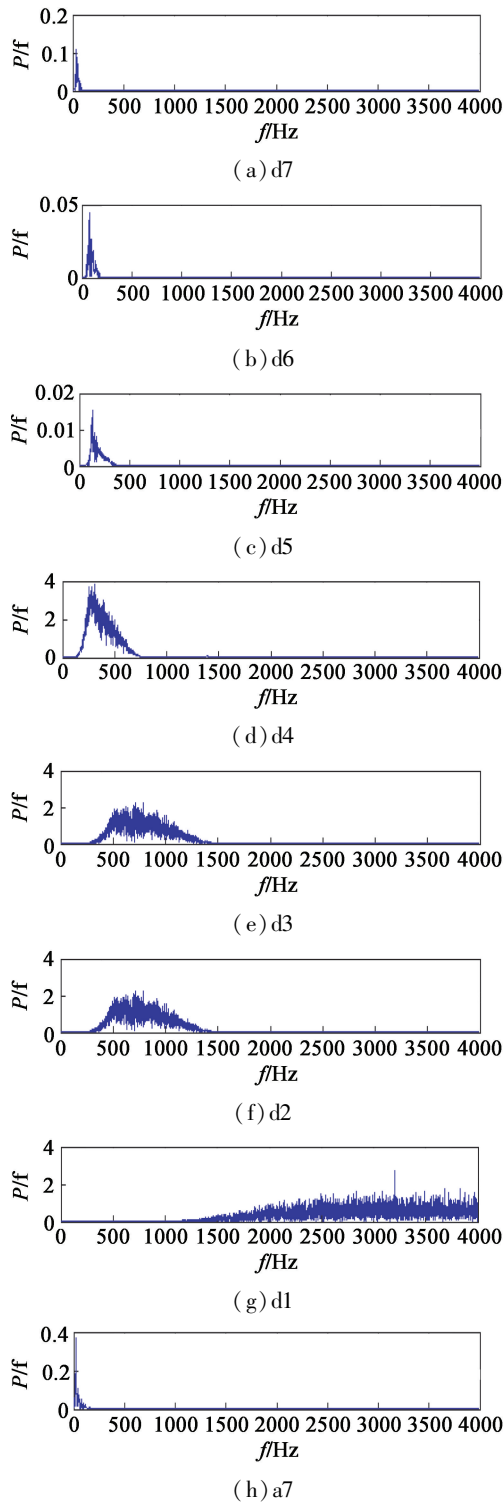


图 6 各分量的频谱分析

Fig. 6 Spectral analysis of each component

为 E_0 ,则有各频带的相对能量分布为:

$$C_j = \frac{E_j}{E_0} \times 100\% \quad (3)$$

图 7 为信号能量频带分布情况。

图7(a)中可以具体地看出, X 轴信号在1[#](0 ~ 31.25 Hz)频带上的能量占总能量的70%以上,2[#](31.25 ~ 62.50 Hz)频带的能量约占总能量的20%,

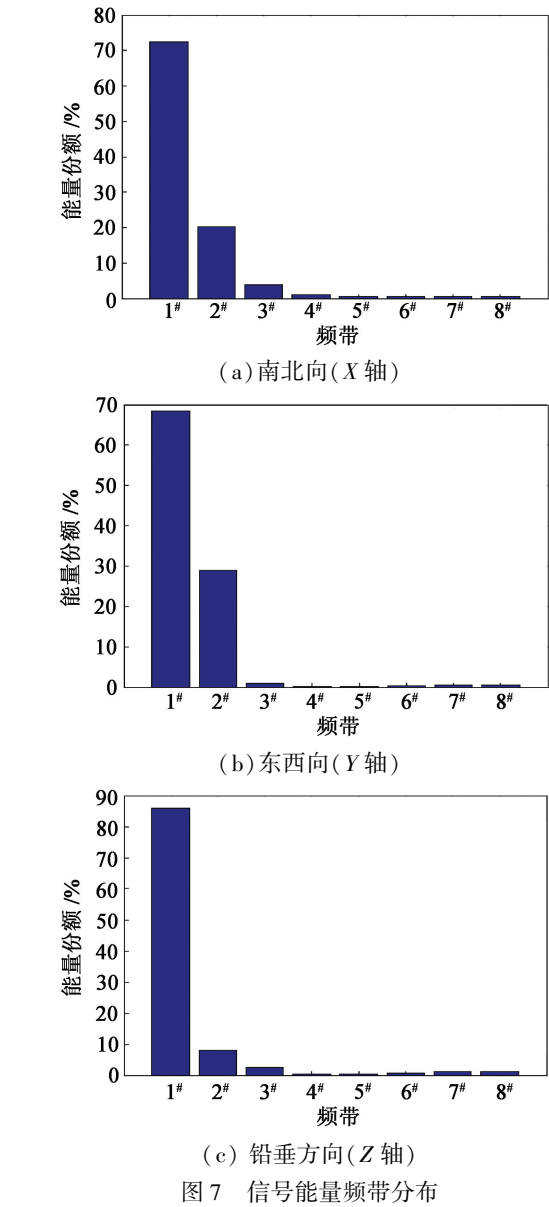


图7 信号能量频带分布

Fig. 7 Energy frequency band distribution of signals

62.50 Hz 以上的频带能量总和占比不足 10%。

对于 Y 轴信号,1[#](0 ~ 31.25 Hz) 频带能量占比约为 68%,2[#](31.25 ~ 62.50 Hz) 频带的能量占比约为 30%,62.50 Hz 以上频带总能量占比小于 3%。

对于 Z 轴信号,1[#](0 ~ 31.25 Hz) 频带能量占比约为 87%,2[#](31.25 ~ 62.50 Hz) 频带的能量占比约为 9%,62.50 Hz 以上频带总能量占比小于 5%。

从能量集中程度来看,铅垂方向的振动能量集中程度最高,其次为南北向。

3.2 时频特性分布

进一步分析,将小波变换的结果绘制在时频域上,得到其能量时频分布情况,如图 8 所示。由时频分布图可以看出:

1)南北向(X 轴)信号的频率中心为 22 Hz 左右,其他频带上也有能量,但份额极少;

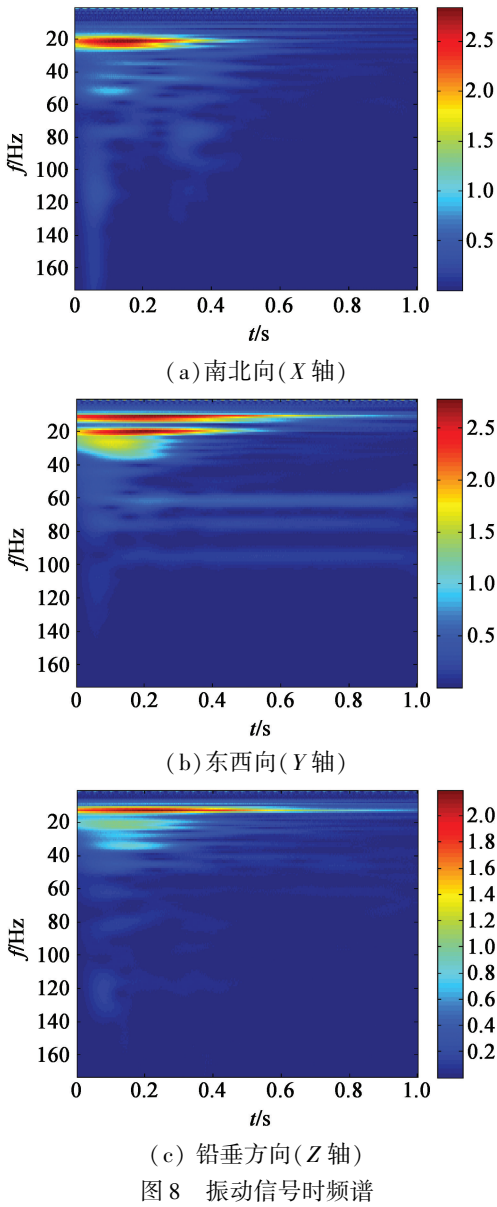


图8 振动信号时频谱

Fig. 8 Time-frequency spectrum of vibration signals

2)东西向(Y 轴)信号分别在 13、22 Hz 和 30 Hz 处出现了 3 个幅值较大的频率中心;

3)铅垂方向(Z 轴)信号的主要能量分布在 13 Hz 左右,同时在 15 ~ 40 Hz 范围内也有分布;

4)持续时间与频率反相关,即低频分量到达时间早、衰减慢,高频分量到达时间晚、衰减快;

5)南北向(X 轴)振动持续时间最短,0.6 s 以后几乎衰减殆尽,东西向(Y 轴)和铅垂方向(Z 轴)振动持续时间都在 1.0 s 左右。

将时频谱对时间做积分,得到小波功率谱密度,更精确直观地反映能量在频率轴上的全局分布情况,如图 9 所示。

由图9中数据可以精确定位振动能量所在的频率,在国家标准GB6722—2014《爆破安全规程》中规定了不同频段中相应类别建筑物的安全允许振

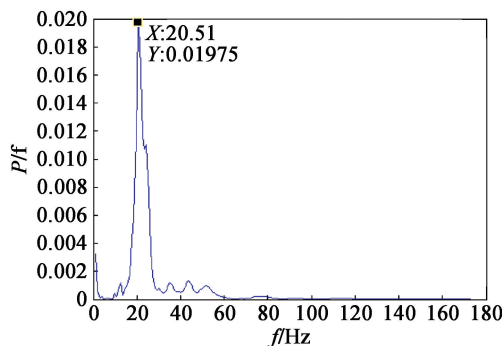
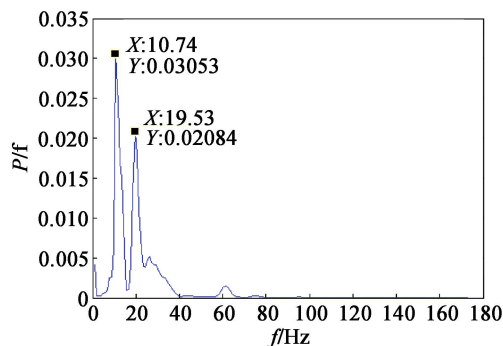
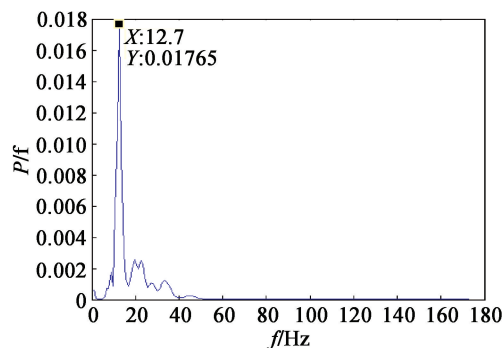
(a) 南北向(X 轴)(b) 东西向(Y 轴)(c) 铅垂方向(Z 轴)

图 9 小波功率谱密度

Fig. 9 Wavelet power spectral density

速。通过信号分析得到的结论来看,选取安全允许振速阈值时应参照 10 ~ 50 Hz 对应的数值,在二期施工时,应考虑到一期机组正在运行,其安全允许振速为 0.6 ~ 0.7 cm/s (10 ~ 50 Hz)。

4 结论

1) 本次爆破监测振动持续时间在不同振动方向上存在差异。南北向(X 轴)振动持续时间最短,东西向(Y 轴)和铅垂方向(Z 轴)振动持续时间较长,都在 1.0 s 左右。且振动持续时间表现出与频率的反相关关系,低频分量到达时间早、衰减慢,高频分量到达时间晚、衰减快。

2) 振动信号的频率分布在不同振动方向上也

呈现差异性。南北向(X 轴)振动频率成分相对单一、分布较为集中,东西向(Y 轴)振动频率成分相对复杂,出现了多个子频率中心。

3) 由于地形及岩性的因素作用,核电厂区的爆破振动的能量分布主要集中在 10 ~ 50 Hz 的范围内,在后期建设二期机组时应当考虑到一期机组的最大安全允许振速。

参 考 文 献

- [1] 鞠逸,邵光强,王平春. CAP1400 核电工程主厂房负挖爆破振动监测与安全分析[J]. 工业建筑,2015,45(增刊):288-291.
JU Y, SHAO G Q, WANG P C. Monitoring and analysis of blasting vibration of negative excavation in CAP1400 nuclear power plant[J]. Industrial Construction, 2015, 45 (Suppl.):288-291.
- [2] 郭涛,谢全民,刘强,等. 运行核电设施在爆破振动激励下新安全标准探讨[J]. 振动与冲击,2015,34(2):20-24.
GUO T, XIE Q M, LIU Q, et al. New safety standards for running nuclear power facilities under blasting vibration [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(2):20-24.
- [3] 陶刘群,于亚伦. 爆破振动安全判据三大核心问题研究[J]. 金属矿山,2012(10):127-129.
TAO L Q, YU Y L. Research of three key issues on safety standards of blasting vibration [J]. Metal Mine, 2012 (10):127-129.
- [4] 谢全民,龙源,钟明寿,等. 小波与分形组合分析技术在爆破振动信号分析中的应用[J]. 振动与冲击,2011,30(12):120-124,169.
XIE Q M, LONG Y, ZHONG M S, et al. Blasting vibration signal analysis with wavelet and fractal portfolio analysis technique[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30 (12):120-124,169.
- [5] 罗忆,卢文波,陈明,等. 爆破振动安全判据研究综述[J]. 爆破,2010,27(1):14-22.
LUO Y, LU W B, CHEN M, et al. View of research on safety criterion of blasting vibration[J]. Blasting, 2010, 27(1):14-22.
- [6] 傅倬,方向,郭涛,等. 田湾核电二期深孔台阶爆破振动监测与分析[J]. 工程爆破,2008,14(3):74-76,56.
FU Z, FANG X, GUO T, et al. Monitoring and analysis on vibration of bench long hole blasting in phase two construction of Tianwan nuclear power station[J]. Engineering Blasting, 2008, 14(3):74-76,56.
- [7] 温尊礼,韩文红,徐全军. 核电设施附近基坑开挖爆破

振动控制方法初探[J]. 工程爆破,2007,13(3):82-84, 81.

WEN Z L, HAN W H, XU Q J. Rough investigation of control of blasting vibration from excavation of foundation pit near nuclear power plant[J]. Engineering Blasting, 2007,13(3):82-84,81.

[8] 中国生. 基于小波变换爆破振动分析的应用基础研究[D]. 长沙:中南大学,2006.

[9] 史秀志,薛剑光,陈寿如. 爆破振动信号双线性变换的二次型时频分析[J]. 振动与冲击,2008,27(12):131-134.

[10] 王林台,高文学,张发财,等. 爆破地震作用下建筑物振动响应研究[J]. 兵工学报,2018,39(增刊):121-134.

WANG L T, GAO W X, ZHANG F C, et al. Research on blasting vibration response of high-rise buliding based on model simplifiction [J]. Acta Armamentarii, 2018, 39 (Suppl.):121-134.

[11] 陈作彬,李兴华,范磊,等. 基于小波包变换的爆破地震反应谱分析[J]. 爆破器材,2018,47(5):59-64.

CHEN Z B, LI X H, FAN L, et al. Analysis of blasting seismic response spectrum based on wavelet packet transform[J]. Explosive Materials, 2018,47(5):59-64.

[12] 张胜,王智德,黎永索,等. 基于模式自适应连续小波能量谱的爆破振动信号特征分析[J]. 爆破,2019,36(2):105-110,125.

ZHANG S, WANG Z D, LI Y S, et al. Characteristics analysis of blast vibration signals based on pattern adapted continuous wavelet energy spectrum [J]. Blasting, 2019,36(2):105-110,125.

[13] 吴从师,徐荣文,张庆彬. 自由面对爆破振动信号能量分布特征的影响[J]. 爆炸与冲击,2017,37(6):907-914.

WU C S, XU R W, ZHANG Q B. Influence of free surface on energy distribution characteristics of blasting vibration [J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37 (6):907-914.

[14] 龙坤,田益琳,周宝刚,等. 研山铁矿爆破振动信号能量分布特征[J]. 现代矿业,2017(9):225-228.

[15] 李振刚,方君涵. 湖北某核电站爆破振动监测与分析[J]. 四川建材,2017,43(9):77-78.

LI Z G, FANG J H. Monitoring and analysis of blasting vibration of nuclear power station project in Hubei[J]. Sichuan Buliding Materials, 2017,43(9):77-78.

[16] 张云鹏,杨曦. 基于小波包能量谱的多台阶地形爆破振动信号能量分布分析[J]. 矿业研究与开发,2017,37(5):69-73.

ZHANG Y P, YANG X. Analysis on the energy distribution of blasting vibration signal in multi-bench terrain based on wavelet packet energy spectrum [J]. Mining Research & Development, 2017,37(5):69-73.