

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2016.05.011

# 核电站扩建工程爆破开挖 振动信号的 HHT 分析\*

马华原<sup>①</sup> 李斌利<sup>①②</sup> 郭 涛<sup>①</sup>

①解放军理工大学野战工程学院(江苏南京,210007)

②中国人民解放军 96518 部队(湖南怀化,418000)

[摘 要] 通过对田湾核电站二期扩建工程爆破施工的振动监测,得到了大量的试验数据,经由 Hilbert-Huang 变换(HHT)方法处理,分析论证了此方法运用于爆破地震波处理的科学性和可行性。第一步,用经验模态分解信号,得到了振动信号的固有模态分量,考虑到噪声信号的干扰,又对信号进行了改进算法的滤波处理;之后,对各个分量进行 Hilbert 变换,得到了信号的时频能量谱;针对时频能量谱分析,得到了信号的时频特性;从得到的瞬时能量谱中得到了 3 段微差起爆的间隔时间,为检测雷管的质量提供了新方法;而边际谱分析提供了一个频域分析的新角度。

[关键词] 爆破振动;Hilbert-Huang 变换;Hilbert 谱;瞬时能量

[分类号] TD235.1;O382

## 引言

核电站建设规模大,机组多,无法进行多机组同时建设装配,往往都是先建成部分机组投入商运,利用回流资金继续建造后期机组。而在后期机组建设施工时,需保证已建机组的安全稳定,尤其要考虑爆破施工对已建机组产生的振动影响<sup>[1]</sup>。因此,需要对后期爆破施工的振动信号进行严密检测和多方位分析,以确保其不会对已建机组的运行安全产生影响<sup>[2]</sup>。

Hilbert-Huang 变换(HHT)是信号分析领域相对比较常见的方法之一。不同于经常出现的傅里叶变换及其改进算法以及小波分析等方法,HHT 方法没有固定的、先验的基底,它的基底有着自适应性,因此,也就有着更强的局部特性。本文中,通过对田湾核电站扩建过程爆破振动信号进行 HHT 分析,验证了该方法的科学性、可行性,为研究爆破振动危害提供一些理论参考。

## 1 HHT 方法的原理及特点

HHT 是 Huang 等人于 1998 年提出的一种数据处理方法,它能够自适应地处理非平稳随机信号,已经在天然地震波分析、机械结构振动、生物信号分析等领域获得了广泛应用<sup>[3]</sup>。

HHT 分为两步:

1)对信号进行经验模态分解(EMD),获得一系列表征信号的特征时间尺度的本征模态函数(IMF);

2)对每个 IMF 分量作 Hilbert 变换,得到瞬时振幅-瞬时频率-时间的分布。

### 1.1 EMD 算法

定义满足两个条件的函数为固有模态函数:

1)对于每次分离出来的分量,极值点的数量与过零点的数量相等或至多相差 1;

2)信号的上、下包络线的均值均为 0,即信号关于时间轴局部对称。

### 1.2 Hilbert 变换

对 IMF  $c(t)$  作 Hilbert 变换:

$$H[c(t)] = \frac{1}{\pi} V_p \int_{-\infty}^{\infty} \frac{c(t')}{t-t'} dt' \quad (1)$$

式中: $V_p$  代表柯西主值(Cauchy principal value)。

因此构造解析信号  $z(t)$ :

$$z(t) = c(t) + jH[c(t)] = a(t) e^{j\Phi(t)} \quad (2)$$

式中: $a(t)$  为幅值函数。

$$a(t) = \sqrt{c^2(t) + H^2[c(t)]}; \quad (3)$$

$$\Phi(t) = \tan^{-1} \frac{H[c(t)]}{c(t)} \quad (4)$$

把信号表示在极坐标系中,如式(2)~式(4)。

\* 收稿日期:2015-10-15

作者简介:马华原(1992-),男,硕士研究生,主要从事爆破技术研究工作。E-mail:503812350@qq.com

通信作者:李斌利(1973-),男,硕士研究生,主要从事兵器与爆破技术研究。E-mail:blastingcaptain@163.com

这样,便可清晰地看到信号中包含的瞬时变化,有了这样的特性,便可以利用 Hilbert 变换单独定义幅值和相位。式(1)表现出了函数的局部特征,由后面的变形可以看出,它是一个幅值和相位变化的三角函数的最好局部近似。

经过 Hilbert 变换,可以得到幅值在时间-频率空间内的函数分布,也可以是等高线的形式。把信号经过 Hilbert 变换并表示在时频平面上所得到的函数分布称为 Hilbert 时频谱,即 Hilbert 谱。本文采用三维空间图形表示。Hilbert 谱的表达式为:

$$H(\omega, t) = \operatorname{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j\omega_i(t)t} \quad (5)$$

如果对时间积分,就得到 Hilbert 边际谱:

$$h(\omega) = \int_0^T H(\omega, t) dt \quad (6)$$

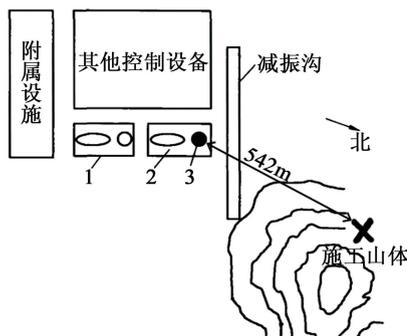
边际谱是每一个频率成分幅度在时间全局上的积分,也就是所有幅值的累加求和。这一点,不同于傅里叶变换得到的幅频曲线,傅里叶幅频曲线只能说明此频率信号在时间全局上一直存在,而边际谱则说明此频率成分有存在的可能。同时,作为边际谱的副产品,还可以求得信号的瞬时能量谱<sup>[4]</sup>:

$$E(t) = \int_{\omega} H^2(\omega, t) d\omega \quad (7)$$

瞬时能量谱在时间轴上精细地刻画了信号能量随时间的变化过程。

## 2 工程概况

对连云港田湾核电站扩建土石方爆破施工过程中监测得到的振动数据进行分析。该工程是田湾扩建 W2 区土石方工程爆破,2#核岛的位置是距离施工放炮点最近的,因此,2#核岛也就成了重要保护对象之一。所以,监测点的位置设置在 2#核岛烟囱底座上。施工现场的各目标相对位置如图 1。



1-1#核岛;2-2#核岛;3-测点(2#核岛烟囱基础)。

图 1 各目标的相对位置

Fig. 1 Relative position of the targets

具体工程参数如表 1。

数据采集选用 TC-4850 爆破测振仪及配套的 891-II 型速度/加速度传感器,测点测试 3 个分量,

表 1 工程参数表

Tab. 1 Engineering parameters

项目	参数
炸药类型	粉状乳化炸药
总装药量/kg	3 025
孔数/个	38
孔深/m	14
孔距/m	5
排距/m	3
单孔药量/kg	130
起爆方式	1~3 段非电毫秒雷管起爆

即 1 个垂直分量和 2 个水平分量。

## 3 振动信号 HHT 分析

$x, y$  轴两个方向的信号强度和信噪比太小, $z$  轴方向的振动对建筑物的破坏作用更大,因此,针对  $z$  轴信号进行分析。测得的原始波形如图 2 所示。

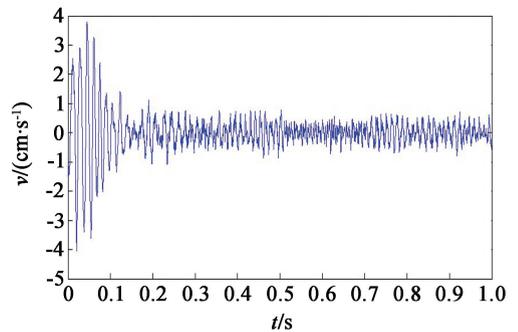


图 2 测点  $z$  轴方向的振动波形

Fig. 2 Vibration wave at the  $z$  axis of the measuring point

### 3.1 信号分解

利用 EMD 方法对原始信号进行分解,得到的 IMF 分量分别如图 3 所示。从图 3 中可以看出:

1) 经过 EMD 算法,原始数据被分解为 15 个 IMF 分量。分量的先后顺序是由自身的时间尺度(相邻的两个波峰间的时间)比较决定的,由小至大一个一个地被分离出来;从频率的角度,就是先分解高频的,再分解低频的。从各个分量的时频谱可以看出,从 IMF1 到 IMF15,分量的频率越来越低,波长也就越来越长;到最后得到了频率最低的 IMF15 分量,可能是由仪器温漂引入的无效信号。各个分量有着不同的频率分布,这一点就证明了 EMD 算法的分辨率的自适应性,相对于小波分析的可变频率窗, HHT 方法的频率窗的变化更加灵活,更加适合随机非稳态信号。

2) 上文已经指出过,用 EMD 方法分解信号并没有先验的、固定的一组基,每一个分量的取得都是

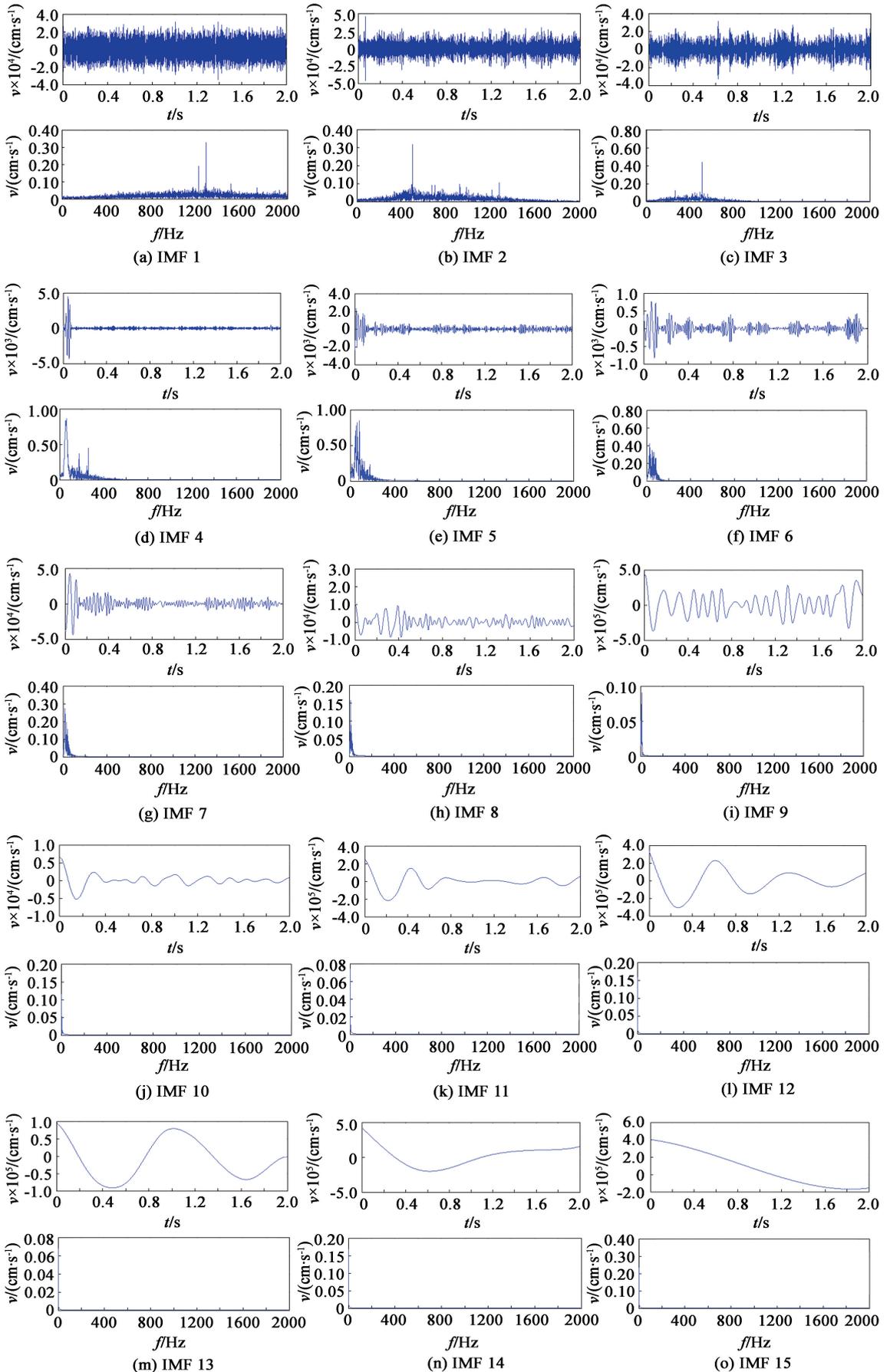


图 3 z 轴方向振动信号的各个 IMF 分量及其幅频曲线

Fig. 3 IMF components and their amplitude frequency curves of vibration wave at the z axis

结合信号本身的特性,即所谓的自适应性<sup>[5-6]</sup>。相比较而言,常用的傅里叶分析及其改进方法或者小波分析方法都需要预先设定一组基底,因为选用的基函数本身并不完全适应该信号,这就引入了误差;另一方面,选用不同的基底得到的结果也会有所不同,在一些情况中,这些偏差是不可以被忽略的,同时也不可避免地引入了频率扩散。

3)得到的各个 IMF 分量都有着明确的物理意义。前4个分量的频率明显高于后面分量,而且幅值或者能量也远远不如后续分量,因此可以判定,它们是检测系统引入的噪声,须在下一步进行去噪处理。分量 IMF5 ~ IMF8 频率也是依次递减,与前几个分量相比较,它们的幅值大了 1 ~ 2 个数量级,能量组分也是绝对优势,应该说这几个分量是有效信号的主要成分。要研究爆破振动对建筑物的破坏作用,需着重对这部分信号进行处理。之后的 IMF9 ~ IMF14,从频率上,它们的频率更低,而且能量也不占优势,因此不好判断其性质,可能是信号有效成分,也可能是其他不明原因造成的。IMF15 分量在时间全局上只有半个周期,幅度很小,可能是仪器的温漂或者是信号的微小波动。经过 EMD 算法,取得了信号当中的主成分,为下一步分析奠定了基础。

### 3.2 EEMD 滤波

由图3可以看出,IMF1 ~ IMF4 的信噪比非常小,因此,可以判断在高频范围噪音较大。因为 EMD 分解是根据信号本身的特性进行的,分解出的 IMF 分量的高低频也是相对的,有很好的自适应性。然而,EMD 滤波仍有局限性,如果单纯地把高频分量舍去,那么夹杂在高频分量中的有效信号就会被忽略,因此,采用改进的 EEMD 算法。其原理就是在每一轮筛选 IMF 分量的时候,人工加入白噪声,由于加入的白噪声频率高于细节信号频率,因此有效信号得以保留下来。处理结果如图4、图5所示。

### 3.3 瞬时频率

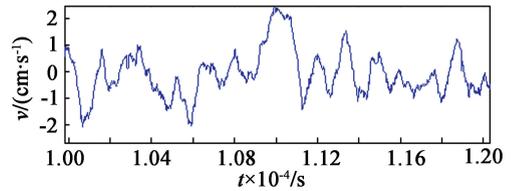
Hilbert 变换能够非常精确地表达瞬时频率和瞬时相位。

定义瞬时频率为:

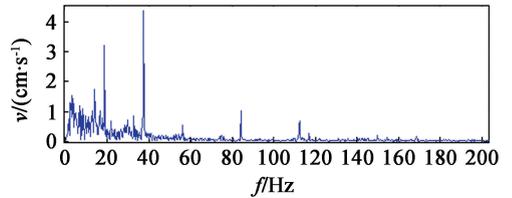
$$f(t) = \frac{d\Phi(t)}{dt} \quad (8)$$

由式(8)可得,瞬时频率可以被表示为时间的一个函数,其物理意义就是对于一个特定的时刻,信号能量在频率上的集中程度。被测信号的瞬时频率如图6所示。

众所周知,在数字信号采集处理系统中,信号的频谱或其频宽将直接影响着测试系统的设计标准。



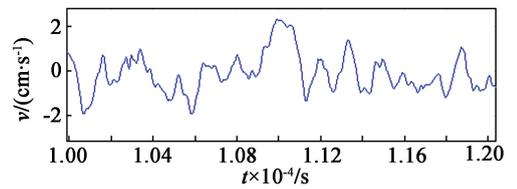
(a) 原始信号



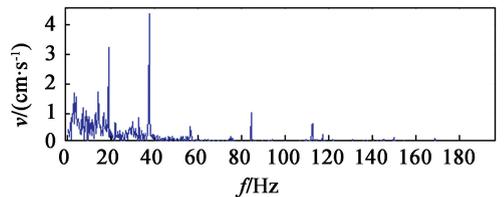
(b) 原始信号幅频曲线

图4 z轴方向的原始信号及其幅频曲线

Fig. 4 Original signal and its amplitude frequency curve of vibration wave at the z axis



(a) 滤波后信号



(b) 滤波后信号幅频曲线

图5 滤波后 z 轴方向振动信号及其幅频曲线

Fig. 5 Filtered signal and its amplitude frequency curve of vibration wave at the z axis

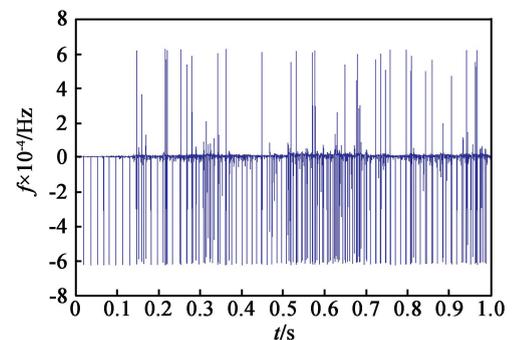


图6 z轴方向振动信号的瞬时频率谱

Fig. 6 Instantaneous frequency spectrum of vibration wave at the z axis

通过 Hilbert 变换得到了振动信号的瞬时频率,可以实时地调节测试系统的频宽,最大效率地利用硬件资源。

### 3.4 Hilbert 时频能量谱

经由第一步 EMD 分解得到的 IMF 分量,带入

Hilbert 变换后,即可得到信号的 Hilbert 谱,也就是信号的时频能量谱,以时频谱为研究对象,便可进行清晰的时频分析。而且,Hilbert 谱避免了窗函数带来的能量泄漏以及小波基选取造成的误差。

图 7 为爆破振动 z 轴方向振动信号的 Hilbert 能量谱,它精确地表明了各 IMF 分量的能量分布。从图 7 中可以看出,爆破能量的主要分布频段为 0 ~ 40 Hz,20 Hz 左右为一个频率中心。而高于 40 Hz 的频段,能量分布很少。各个 IMF 分量被表示在图 7 中,可以清楚地看到各分量的时频能量分布的局部细节特征。因此可得,HHT 的时间尺度和频率尺度都可以自适应地变化,并不受经典的测不准原理限制,对于突变信号的检查 and 寻找能力很强。

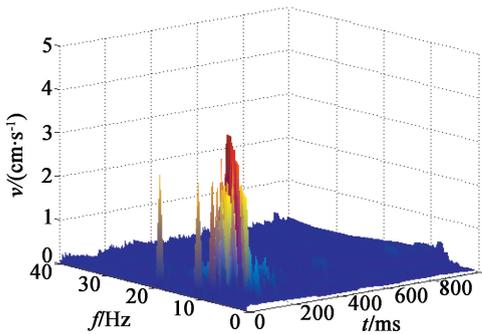


图 7 z 轴方向振动信号的时频能量谱  
Fig. 7 Time-frequency energy spectrum of vibration wave at the z axis

### 3.5 爆破振动信号的边际谱和瞬时能量

HHT 方法从原理上讲就是对原信号的平稳化处理,把原始信号中不同尺度的信号用 EMD 算法逐层分离出来<sup>[7]</sup>,得到一系列 IMF 分量;再对得到的分量进行 Hilbert 变换;最终画出 Hilbert 能量谱,对结果进行进一步处理,得到边际谱和瞬时能量谱。爆破振动 z 轴方向振动信号的边际谱如图 8 所示。

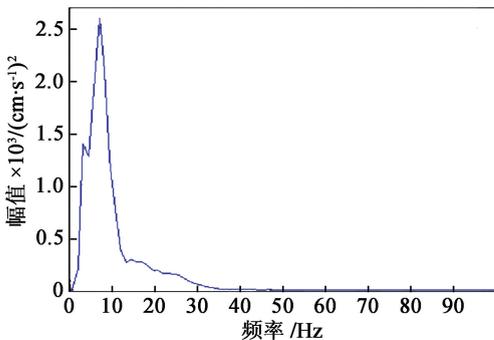


图 8 z 轴方向振动信号的边际谱图

Fig. 8 Marginal spectrum of vibration wave at the z axis

边际谱表征的是所有的频率成分在全局的积分,即能量之和。与快速傅里叶变换(FFT)谱相比

较,区别在于,FFT 谱表征的是某频率成分的正弦信号在整个时间范围内一直存在,而边际谱只是说此成分在时间范围内的某个时刻存在过。图 8 表示的是信号能量在频率上的集中情况,由图 8 可以看出,此次监测的振动能量主要分布在 0 ~ 30 Hz 主振频域范围内,主振带为 7 Hz。

边际谱只能从频率上刻画信号的能量分布,而瞬时能量谱则可以从时间上直观地反应信号的能量分布。由图 9 可以算出,1 ~ 2 段雷管发火时间间隔为 22 ms;2 ~ 3 段雷管发火时间间隔为 17 ms。而国标要求中,毫秒延期雷管 1 ~ 4 段延期时间均为 25 ms,因此第 3 段雷管出现了较大程度的早爆。

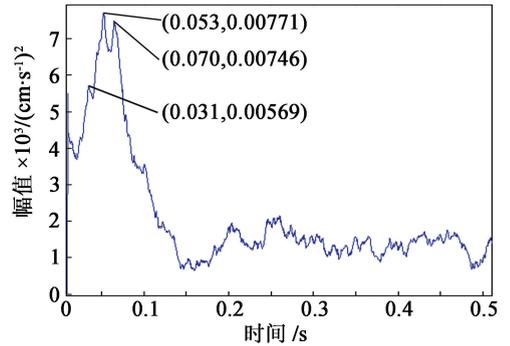


图 9 z 轴方向振动信号的瞬时能量谱  
Fig. 9 Instantaneous energy spectrum of vibration wave at the z axis

决定瞬时能量大小的,既不是单一的频率因素,也不是单一的质点振动速度因素,而是由两者共同影响的。由 HHT 方法得到的瞬时能量谱,更全面地结合了振幅、频率、持续时间 3 个要素,分析振动对建筑的综合影响<sup>[8-10]</sup>。

### 4 结论

1) 从此次监测信号的边际谱分析结果可知,信号的主振频带在低频部分(0 ~ 30 Hz),这个频率的能量输入对部分建筑物有破坏作用,容易引起周围砖混设备厂房、3 层框剪结构的建筑物等发生共振现象,而对核岛这样的大跨度钢混结构体的共振作用并不强。

2) 分析得到的信号的瞬时能量谱,可清楚地看到,此次爆破所采用的 3 段微差爆破中,第 3 段出现了早爆,而且前、后两次爆破信号的波峰稍微出现了迭加。采用多段微差爆破时,如果分段微差爆破时间间隔选择合理,可避免爆破振动的迭加。在合理设计的同时,也要监控雷管的延期误差,从而检验所选用的雷管质量是否稳定。

3) HHT 方法得到的瞬时能量谱能从时间上更加清晰地反应振动的输入能量变化。在工程上,可

结合现有的安全允许标准,有效地控制爆破振动危害。Hilbert 能量谱不同于以振动主频、振速来评价爆破振动的标准,其将时间因素考虑在内,综合速度和频率因素。因此,HHT 方法更加科学和可行。

### 参 考 文 献

- [1] 汪旭光,于亚伦.关于爆破震动安全判据的几个问题[J].工程爆破,2001,7(2):88-92.  
WANG X G, YU Y L. On several problems of safety criterion for blasting vibration [J]. Engineering Blasting, 2001,7(2): 88-92.
- [2] 马华原,龙源,郭涛.田湾核电站基础开挖爆破振动检测与数据分析[J].爆破,2015,32(3):85-90.  
MA H Y, LONG Y, GUO T. Monitoring and analysis of blasting vibration of foundation excavation of Tianwan Nuclear Power Plant [J]. Blasting, 2015, 32(3):85-90.
- [3] 丁康,陈健林,苏向荣.平稳和非平稳振动信号的若干处理方法及发展[J].振动工程学报,2003,16(1):1-10.  
DING K, CHEN J L, SU X R. Development in vibration signal analysis and processing methods [J]. Journal of Vibration Engineering, 2003,16(1): 1-10.
- [4] 凌同华,李夕兵.爆破振动信号不同频带的能量分布规律[J].中南大学学报(自然科学版),2004,34(2):310-315.  
LING T H, LI X B. Laws of energy distribution in different frequency bands for blast vibration signals [J]. Journal of Central South University (Natural Science), 2004,34(2): 310-315.
- [5] 张义平,李夕兵,赵国彦,等.爆破震动信号的时频分析[J].岩土工程学报,2005,27(12):1472-1477.  
ZHANG Y P, LI X B, ZHAO G Y, et al. Time-frequency analysis of blasting vibration signals [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005,27(12): 1472-1477.
- [6] 张义平,李夕兵,左宇军,等.爆破振动信号的HHT分析与应用[M].北京:冶金工业出版社,2008.
- [7] 李夕兵,凌同华,张义平.爆破震动信号分析理论与技术[M].北京:科学出版社,2009.  
LI X B, LING T H, ZHANG Y P. Analysis of blast vibration signals-theories and methods [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [8] 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.
- [9] 陈作彬.田湾核电站扩建山体爆破工程爆破质量控制[J].探矿工程:岩土钻掘工程,2009,36(3):76-78.  
CHEN Z B. Quality and safety control on blasting of mountain for Tianwan Nuclear Power Plant extension project [J]. Exploration Engineering: Rock & Soil Drilling and Tunneling, 2009,36(3):76-78.
- [10] 赵恩让,胡胜利.田湾核电站扩建工程土石方爆破安全控制[J].电力安全技术,2011,13(11):13-15.

## HHT Analysis on Vibration Signal of Blasting Excavation in Expansion of Nuclear Power Station

MA Huayuan<sup>①</sup>, LI Binli<sup>①②</sup>, GUO Tao<sup>①</sup>

<sup>①</sup>College of Filed Engineering, PLA University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210007)

<sup>②</sup>Unit 96518 (Hu'nan Huaihua, 418000)

[ABSTRACT] Based on the blasting vibration monitoring in second-phase expansion project of Tianwan Nuclear Power Station, a lot of experimental data were obtained. Through the Hilbert-Huang Transform (HHT) method, the scientific and technical feasibility of this method using on treatment of blasting seismic wave were verified. At first, the EMD method was used to decompose the signal to get the IMF, and the interference of the noise signal was considered and filtered. From Hilbert transform for each component, the time-frequency energy spectrum of the signal was derived. According to the time-frequency energy spectrum analysis, time-frequency characteristic of the signal was represented. Intervals of differential initiation were obtained from instantaneous energy spectrum, which provides a new method to test the quality of detonator. Furthermore, marginal spectrum provides a new perspective in frequency-domain analysis.

[KEYWORDS] blasting vibration; Hilbert-Huang transform; Hilbert spectrum; instantaneous energy