

# 爆破振动信号的时频分析

马瑞恒<sup>1</sup> 时党勇<sup>2</sup>

(1.南京解放军理工大学工程兵工程学院,南京 210007;

2.徐州工程兵指挥学院,徐州 221004)

**摘要** 爆破振动信号的研究方法已由单纯的频域分析过渡到时频联合分布分析。在讨论 Fourier 变换(FT)和短时 Fourier 变换(STFT)不足的基础上,论述了基于连续小波变换(CWT)和离散小波变换(DWT)在爆破振动信号分析中的应用。作为一种严格的时频分析方法,论文尝试利用二次型时频分布来进行爆破振动信号的时频联合分析;通过几种二次型时频分布的对比分析,认为 CWD 在具有较强的时频聚集性的同时又较好的对交叉项进行了抑制,适合于进行爆破振动信号的时频分析。

**关键词:** Fourier 变换,小波变换,二次型时频分布,爆破振动信号

**中图分类号:** TN911.7

**文献标识码:** A

## 0 引言

对爆破振动信号进行分析具有重要意义。黄忆龙讨论了工程爆破中的一些主要危害及其控制方法<sup>[1]</sup>;林秀英、李彤华、李孝林和范磊等人讨论了爆破地震波频谱特性<sup>[2,3]</sup>,主要集中在特征频率和频率相关方法的研究;而龙源、娄建武等人在讨论仅对爆破振动信号的频域进行研究的局限的基础上,提出了基于小波分析的能量分析法,并建立了输入建筑物的振动能量与小波分析的关系,从而拓宽了爆破振动信号的研究范围,为工程爆破提出了更有指导意义的建议<sup>[4]</sup>。作为上述方法的推广,宋光明讨论了爆破条件与爆破振动信号的小波包特性之间的关系<sup>[5]</sup>。可见,随着信号处理技术的进步,对爆破振动信号的分析已经由单纯的频域分析过渡到时频联合域分析。本文将利用短时 Fourier 变换(STFT)、连续小波变换(CWT)、离散小波变换(DWT)以及二次型时频分布的(TFD)等时频分析方法,对爆破振动信号进行分析,并着重对比上述方法的时频特性即时频聚集性的优劣。

## 1 爆破振动信号的 STFT 分析

**定义 1:** 信号(函数) $f(x)$ 在函数空间  $L^2(R)$  上的 Fourier 变换为

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-i\omega x} dx \quad (1)$$

Fourier 变换是时域到频域的转换工具,其实质是把  $f(x)$  分解为许多不同频率的正弦波的叠加和。它能够有效检测出平稳信号中的周期成分,但对于非平稳信号,虽然也能够显示出信号的频谱范围,但却无法显示出这些频率分量发生的时刻(时间段),这对处理非平稳信号却是至关重要的,而爆破振动信号就是典型的非平稳信号。

为了克服 Fourier 变换的缺陷,Gabor 引入了短时 Fourier 变换(Short-Time Fourier Transform)。其基本思想是把信号划分成许多小的时间间隔,用 Fourier 变换分析每一个时间间隔,以便确定该时间间隔存在的频率。

**定义 2:** 一般地,对任意的  $f(t) \in L^2(R)$ , 它的窗口 Fourier 变换的定义为

$$C_f(b, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} g^*(t-b) dt \quad (2)$$

其中,  $g(t)$  是一个窗函数,  $*$  表示复共轭。

可见,作为信号分析的工具,短时 Fourier 变换发展了 Fourier 变换,能够满足特别是信号处理的某些特殊需求。但是,短时 Fourier 变换没有离散正交基,这决定了他在进行数值计算时没有像离散 Fourier 变换计算之 FFT 那样的快速有效的算法;另一方面,当窗口函数选定之后,时-频窗的窗口形状是固定的,时频分辨率单一,而非平稳信号包含丰富的频率成分,故它对非平稳信号的分析能力是有限的,如图 1 所示。

从图 1 中可看出:(1)爆破振动信号为典型的非平稳信号,爆破参数(炸药性质、药量、段延时间等)和场地介质决定了爆破振动信号的形状和性质,同时信号还受到各种干扰信号源的影响,如重型车辆、打桩机等,因此信号的频率成分复杂。(2)其功率谱仅仅能够大致显示出信号的频率范围,时域信息无法展现。(3)STFT 谱图中的等高线显示了信号具体的能量范围,可以看出信号的能量主要集中在 50~250 点之间的时间范围内;频率主要集中在 0.05~0.15 的归一化范围内。正如上文所述,STFT 虽然显示了一定的时频信息,但其聚集性不高,因此等高线堆积在一起,无法显示出每次爆破冲激的能量细节,因此 STFT 不适合类似爆破振动信号的时频分析。

## 2 爆破振动信号的小波分析

收稿日期:2004-04-05 修改稿收到日期:2005-05-19

第一作者 马瑞恒 男,博士生,1977 年生

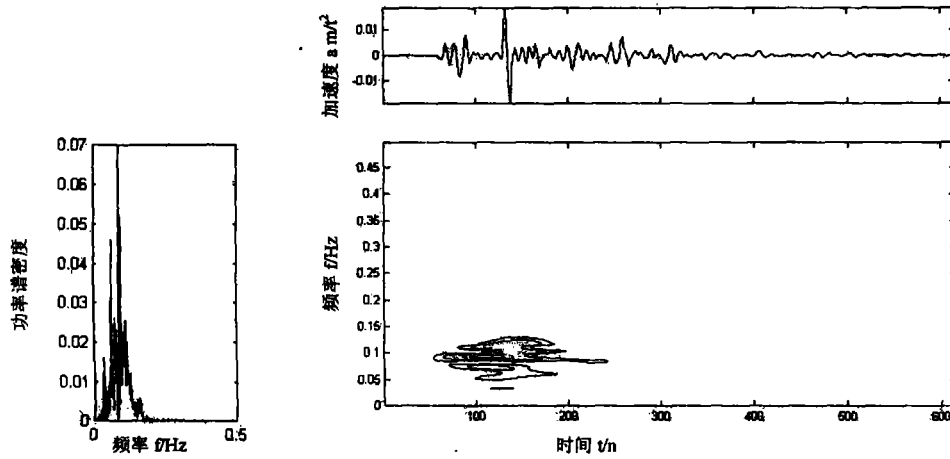


图 1 爆破振动信号的功率谱及其 STFT 谱(右上为原始信号;右下为 STFT 谱;左下为功率谱)

包含大量的冲击成分是爆破振动信号的时域特征, Fourier 变换和短时 Fourier 变换对此类信号的分析均不太理想。小波分析则因为其时频窗能够根据信号频率的变化而自适应的调整, 从而在此类信号的分析中具有不可替代的优势<sup>[6,7]</sup>。爆破振动信号的小波分析主要包括连续小波变换(CWT)、离散小波变换(DWT)、多分辨分析(MA)以及小波包分析(WPA); 本文主要关注连续小波变换(CWT)和离散小波变换(DWT)。

**定义 3:** 一般地, 对任意的  $f(t) \in L^2(R)$ , 其连续小波变换的定义为

$$W_f(a, b) = \int_R f(x) \psi^*(a, b)(x) dx = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_R f(x) \psi^*\left(\frac{x-b}{a}\right) dx \quad (3)$$

**定义 4:** 一般地, 对任意的  $f(t) \in L^2(R)$ , 其离散小波变换的定义为

$$W_f^k(b) = W_f(2^{-k}, b) = \int_R f(x) \psi_{(2^{-k}, b)}^* dx \quad (4)$$

其中

$$\psi_{(2^{-k}, b)} = 2^{\frac{k}{2}} \psi[2^k(x-b)] \quad (5)$$

仍选用图 1 中给出的爆破振动信号, 其 CWT 和 DWT 谱如图 2 所示。

从图 2 中可得到如下结论: (1) 无论是 CWT 还是 DWT 均较准确的表现了信号的能量分布, 其 CWT 谱中可清晰的看到信号中的冲击信号所对应的能量带分布, 特别是 130 点处的特征冲击信号表现的更好, 其对应的频率范围在 30~120 之间。而信号开始阶段的冲击信号也能看出了。(2) 利用 DB10 正交小波进行 DWT, 分解 7 层, 信号的能量谱已较全面的表现出来。信号的能量主要集中在 1~4 层内, 4 层以上的高频信号能量较弱。(3) 通过 CWT 和 DWT 分析, 能够较全面了解信号能量分布以及信号成分频率分布情况, 可见小波分析能够较好的来进行爆破诊断信号的分析。(4) 从图 2 中又可看出, CWT 存在一定的冗余; 而 DWT 则存在一定的频率重叠, 这给信号能量的分析带来了一定的困难; 本质上说, 小波分析是一种基于时间-频段的方法, 无法给出精确的频率值, 但某些情况下, 具体的频率值能够更好的指导爆破工程实践, 例如主频和段延时间等参数的确定, 故频率的不精确性也是小波分析的不足。

### 3 爆破振动信号的二次型时频分布分析

二次型时频分布是一种精确的时频分析方法, 它

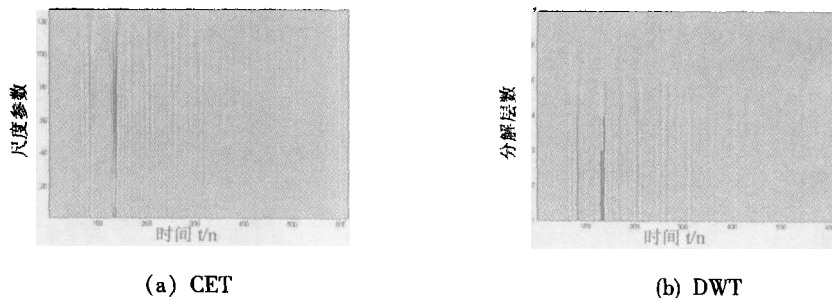


图 2 CWT 和 DWT 谱

能够准确的将信号在时频平面的能量分布表现出来。40年来人们已经提出各种性能优良的时频分布著名的有:Winger-Ville分布(WVD)、Choi-Williams分布(CWD)、Page分布等等。Cohen发现,众多的二次型时频均可表示为WVD的某种函数,从而给出了统一的时频分布表达式,即

$$P(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} z(u + \frac{\tau}{2}) z^*(u - \frac{\tau}{2}) \varphi(\tau, v) e^{-j2\pi(v + f - uv)\tau} d\tau dv \quad (6)$$

其中 $\varphi(\tau, v)$ 称为核函数。

(6)式即为Cohen类时频分布的定义,也即为二次型时频分布的表达式。

最著名的二次型时频分布是WVD,定义如下

$$P(t, f) = W_z(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} z(t + \frac{\tau}{2}) z^*(t - \frac{\tau}{2}) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (7)$$

其中 $z(t)$ 为信号 $f(t)$ 的解析信号, $j = \sqrt{-1}$ , $*$ 表示复共轭。

WVD对线性调频信号具有最强的时频聚集性,但对于多成分信号却存在严重的交叉项,这给信号能量的正确分析观察带来诸多不便。为了抑制交叉项,人们提出了各种各样的核函数,相当于对信号在模糊域内进行低频过滤,但根据Heisenberg测不准定理,必然导致信号时频聚集性的下降,造成信号能量分布的可读性大大下降。另一方面,邹红星等人又在理论上证明了没有交叉项的二次型时频分布是不存在的,这就要求在进行信号分析时要在交叉项和时频聚集性之间进行某种折中。事实上,到目前为止还没有一种时频分布能够适合任何场合,人们总是根据自己的工作实际,选择

较好的时频分布进行分析<sup>[8]</sup>。图3给出了图1中所示的爆破振动信号的几种典型的二次型时频分布图。

从图3中可得到如下结论:(1)WVD中的能量分布杂乱,没有正确的显示出信号的能量分布,这主要是因为WVD中包含大量的交叉项,这些交叉项的幅值甚至超过了真正的信号项的幅值,因此严重干扰了信号能量的正确分布。(2)在谱图分布中,虽然仅有很少的交叉项分布,但由于其时频聚集性较差,因此信号成分之间相互重叠干扰,同样没有很好的显示信号项的正确分布。WVD和谱图似乎处于二次型时频分布的两个极端。可见,为了正确的显示信号项的分布,必须使聚集性和交叉项进行较好的折中。(3)在(c)SPWVD(平滑伪WVD)中,与WVD相比虽然交叉项得到一定的抑制,与谱图相比时频聚集性有所提高,但折中效果不明显,仅仅能大概看出信号的能量分布,突出的一点是,原信号在130处的冲击信号所对应的能量分布还很发散。以上说明该时频分布在交叉项和时频聚集性的折中效果不好,即选择此类型的核函数是不合适的。(4)在(d)CWD中,可明显看出信号的时频聚集性得到了很大的提高,原信号的几次明显的冲击都表现出来。特别是130点处的冲击信号的能量表现的非常集中,其归一化频率范围主要0.02~0.2之间。同时信号间的交叉项也被较好的抑制。以上描述似乎和Heisenberg测不准定理相悖,其实不然,大量的交叉项被“赶”到距离信号项较远的区域,无需关心,这主要是因为CWD采用了指数型核函数。

通过以上的对比分析可知,选择合适的二次型时频分布就能够较好的表现出爆破振动信号的能量分

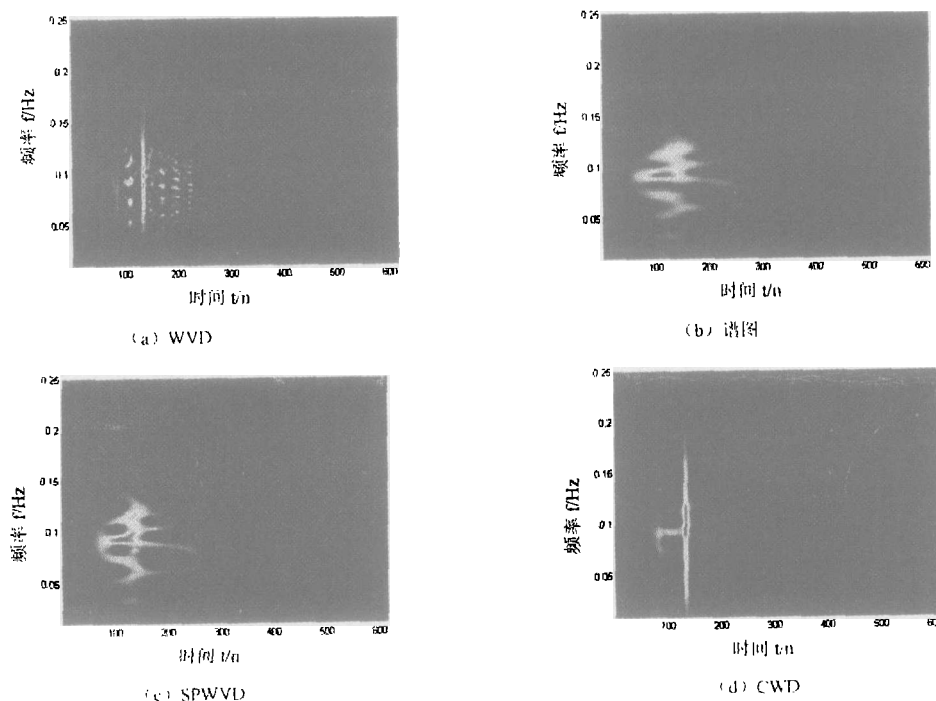


图3 几种典型的二次型时频分布

布。大量的数据表明,CWD能够较好的展现大部分的爆破振动信号的能量分布,只不过计算时间稍长一些。

## 4 结论

综上所述,可得到如下结论。

(1) 爆破振动信号的特点决定了,仅仅利用 Fourier 变换和 STFT 无法准确的显示出信号的能量分布,前者仅能看出信号的频率的大致范围,无法提供具体的时域信息;后者由于其时频聚集性低下,从而无法满足分析的要求。

(2) 连续小波变换(CWT)和离散小波变换(DWT)是一种基于时间-频段的分析方法,能够较好的表现出爆破振动信号的能量分布,但 CWT 中的 DWT 中的频段的重叠对信号能量的准确分布存在一定的干扰。

(3) 二次型时频分布为爆破振动信号的时频分析提供了一种全新的思路,它提供了一个准确的时频联合分布,能够将信号能量在时频平面准确展开,从而观察到信号细节成分的准确的能量分布。

(4) 二次型时频分布中的交叉项可采用合适的核函数进行抑制,但同时聚集性会有所下降,这就需要在两者之间进行折中;既要保持较高的时频聚集性,即信号项不能太发散,又要对信号项之间的交叉项进行抑制;或者将交叉项“赶”到不需要关心的区域,从而保持

较高的时频聚集性。对于爆破振动信号,CWD 是一种值得尝试的二次型时频分布。

(5) 在实际工作中,可灵活地将小波分析方法与二次型时频分布相结合,相信必然会对更好的指导工程爆破人员进行爆破设计,从而达到最佳的爆破效果及降低爆破振动效应的目的。

### 参考文献

- 1 黄忆龙等.工程爆破中的灾害及其控制[J].西部探矿工程,2002(2):90—91
- 2 林秀英等.爆破地震波的频谱分析[J].中国矿业,2000(9):77—80
- 3 李彤华等.爆破振动的频谱特征及其工程应用[J].工程爆破,2000(2):6:1—5
- 4 龙源等.小波分析在结构物对爆破振动响应的能量分析法中的应用[J].爆破器材,2001(6):1—5
- 5 宋光明等.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].有色金属,2001(2):115—121
- 6 Munoz A, Ertle R, Unser M. Continuous Wavelet transform with arbitrary scales and  $O(N)$  complexity[J]. Signal Processing 2002 (82): 749—758
- 7 马瑞恒等.基于连续小波变换的气密性故障诊断[J].内燃机学报,2003,21(1):91—95
- 8 马瑞恒等.基于一种新的时频分布的机械故障诊断[J].振动与冲击,2003,22(3):68—70

(上接第 83 页)

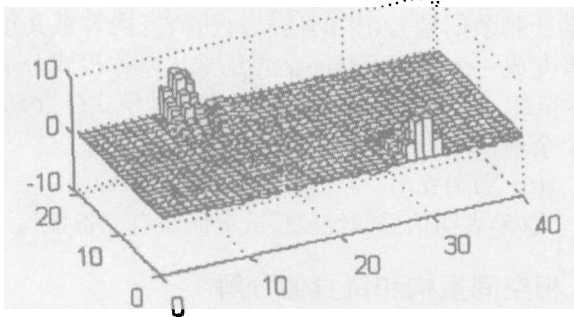


图9 四号板由曲率变化计算所得的损伤位置示意图

本文所用损伤判据的有效性。

## 3 结论

采用激光测振仪对薄板的损伤检测进行研究,并通过实验进行验证。研究得出如下结论:

(1) 模态的曲率变化可以准确地探测出损伤的位置,并且对于同一结构上的多处损伤也能准确地识别出损伤的位置。

(2) 在模态没有明显变化时,模态曲率可以准确地探测出损伤的位置。

(3) 损伤程度较小时,可以适当增加叠加的模态阶数,从而可以得到更好的测量结果。

### 参考文献

- 1 Waldron K, Ghoshal A, Schulz M, Sundaresan M, J, Ferguson F, Pai P F, Chung J H. Damage detection using finite element and laser operational deflection shapes. Finite Element in Analysis and Design, 2002, 38: 193—226
- 2 Khan A Z, Stanbridge A B, Ewins D J. Detecting damage in vibrating structures with a scanning LDV. Optics and Lasers in Engineering, 2000, 32: 583—592
- 3 Anindya Ghoshal, Mannur J, Sundaresan, Mark J, Schulz, Pai P F. Structural health monitoring techniques for wind turbine blades. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2000, 85: 309—324
- 4 邓焱, 严普强. 梁及桥梁应变模态与损伤测量的新方法. 清华大学学报(自然科学版), 2000, 40(11): 123—127
- 5 徐芝纶. 弹性力学. 北京: 高等教育出版社, 1990

the acceleration response of each floor is smaller, the inter-floor displacements of super-structure are smaller, and the maximum displacement of the bearings under bilateral components is much larger than that under unilateral component, so that the influence of bilateral inputs should be considered as to ascertain the maximum displacement of the bearings.

**Key words:** sliding-friction bearing, friction force, bilateral coupled effect, bilateral seismic response

## STUDY ON NON-CONSERVATIVELY COUPLED LOSS FACTOR OF JOINTS BETWEEN SHIP MECHANIC EQUIPMENT

*Li Xiangnan Lin Ze*

(Department of Naval Architecture, Dalian University of Technology, Dalian 116024)

**Abstract** The joints will not only transfer the force, energy and power, but also transform the vibration energy into sound and heat, dissipating the energy. non-conservatively coupling loss factor (CLF) is an important Statistical Energy Analysis (SEA) parameter for characterizing energy transmission between these systems. Up to now, damping models and analysis methods can't be efficient and absolute enough to characterize some complex structures' damp. There is not an example to do experiment on expensive mechanic structure, so it is very important to explicitly compute CLF and estimate the structure' response, conduct the design efficiently, litter the time and the expenses of study. In this paper, SEA method is applied to analysis the power flow, dissipating and transmission of the joints. The SEA model of the whole structure was build up, and the computation equation of non-conservatively CLF is deduced out based on the structure' power equality. Based on these, simulate mathematics calculate and analysis of an actual mechanic equipment joint are given explicitly, including some valuable conclusion on structural apply.

**Key words:** statistical energy analysis(SEA), coupling loss factor(CLF), joint, non-conservatively coupled systems

## TIME-FREQUENCY ANALYSIS OF BLASTING VIBRATION SIGNAL

*Ma Ruiheng<sup>1</sup> Shi Dangyong<sup>2</sup>*

(1. Engineering Institute of Engineering Corps, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007;

2. Commanding Institute of Engineer Corps, Xuzhou 221004)

**Abstract** At present time, the investigation methods of blasting vibration signals have been gradually changed from pure frequency domain analysis to time-frequency analysis. Based on the drawbacks of FFT and STFT, the applications of continuous wavelet transform (CWT) and discrete wavelet transform (DWT) in analyzing blasting vibration signals are discussed. And the quadratic time-frequency distribution as a precise time-frequency analysis method is tried to deal with the blasting vibration signals. Through comparing several kinds of time-frequency distributions, CWD is considered as a perfect distribution, which is very fit for time-frequency analysis with high resolution and can compress cross terms effectively.

**Key words:** short time Fourier transform (STFT), wavelet transform, quadratic time-frequency distribution, blasting vibration signal