



爆破振动小波包分析 理论与应用研究

宋光明 著

Blasting Vibration Wavelet Analysis:
Theory and Applications

国防科技大学出版社

爆破振动小波包分析理论与应用研究

Blasting Vibration Wavelet Analysis: Theory and Applications

宋光明 著

国防科技大学出版社

湖南·长沙

图书在版编目(CIP)数据

爆破振动小波包分析理论与应用研究/宋光明著. —长沙:国防科技大学出版社,2008.7
ISBN 978-7-81099-468-2

I. 爆… II. 宋… III. 爆破—振动—研究 IV. TB41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 185882 号

国防科技大学出版社出版发行
电话:(0731)4572640 邮政编码:410073

<http://www.gfkdcbs.com>

责任编辑:文 慧 责任校对:耿 筠

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

*

开本:787×1092 1/16 印张:10.5 字数:243 千

2008 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数:1-1500 册

ISBN 978-7-81099-468-2

定价:19.00 元

前 言

爆破振动危害控制一直是国内外爆破安全技术的重大研究课题,其行业领域涉及矿业、铁道、公路、水电、建筑、国防等国民经济重要部门。爆破振动分析是研究爆破振动危害控制的基础,也是控制爆破振动危害的前提。

美国矿务局(USBM)于1980年发布的8507号调查报告(RI8507)指出:在加拿大、捷克、瑞典及美国等地的研究与调查表明,建筑结构在共振频率范围内的质点振速最大破坏极限为1.27~1.905 cm/s。但近几年的研究发现(RI8896-RI9226),由于爆破振动低频效应、结构预应力及疲劳损伤的存在影响,上述质点振速极限较建筑结构本身所承受的振速极限还要小。德国、瑞典的研究者也注意到了振动频率对设施物破坏的影响,分别在其安全标准中考虑了质点振速与振动频率的共同作用。这也就迫使研究者不得不更加细致地研究爆破振动特征(特别是低频部分)、结构预应力及疲劳损伤在建筑结构损伤破坏过程中所起的作用。在地下岩体结构爆破振动损伤破坏标准上,针对峰值质点振速单一判据的不足,加拿大T. R. Yu博士等人通过多年研究和调查,结合爆破振动质点振速、岩体强度特征、现场地质条件及岩体结构支护系统等因素,利用爆破损伤系数(BDI)来评价爆破振动对地下岩体结构的损伤破坏作用,建立了不同地下结构的BDI评价标准。边坡的爆破振动破坏标准沿袭峰值质点振速单一判据,根据不同的地质条件、岩体性质等因素而采用不同量值的标准,如L. L. Oriard(1982年)推荐大部分岩体损伤破坏极限在63.5 cm/s,而国内爆破安全规程(GB6722-86)中规定了边坡不受损伤破坏的质点振速下限为2.7~5.5 cm/s。这些爆破振动危害标准,是在专家学者和现场工程人员无数次振动监测、成千上万个振动数据处理与分析基础上,通过建立合理的预测、控制数理模型,采用一定的数学分析方法而获得的。

对于峰值质点振速的预测,大多采用基于现场数据线性回归方法得到的萨氏公式及其变形,如佟锦岳等(1983年)在水电站工程爆破振动监测中采用的公式;E. Jannoulakis(1999年)在边坡爆破振动评价中采用的公式;陈寿如等(1998年)在露天矿爆破振动控制中考虑高差影响采用的公式;韩子荣等(1985年)考虑振动主频与结构自振频率影响采用的折合速度公式等。在爆破振动模拟方面,D. A. Anderson(1983年)、R. M. Wheeler(1988年)、吴从师等(1990年)、何蕴龙(1996年)从理论与经验的角度作了相应的工作,其中R. M. Wheeler采用单一频率的基波对多段多孔爆破振动波形进行模拟,而吴从师等人则从实测单段波形出发按单段数字波形进行多段波形的模拟,何蕴龙按二维动力有限元进行岩质边坡爆破振动动力响应分析。爆破振动信号分析经历了从傅氏分析(FT)到快速傅氏分析(FFT),从短时傅氏分析(STFT)到小波分析(WT)的转变,其中小波分析的关键在于选取合适的小波基函数,如何军等(1998年)选取的复小波基函数,赵明阶等(1999年)采用的样条小波基函数。

在控制手段方面发展了预裂爆破、微差干扰降振等方法,其相关文献见N. Djord-

jevic (1997 年) 等人的论文。但在爆破振动危害机制方面, 除沿袭岩土动力学、结构动力学及断裂力学相关破坏理论外, 无其它进展。上述这些研究均从一定角度对相关工程实践问题进行了一定程度的解决, 进一步深化了对爆破振动及其危害的认识。

过去发生较多的爆破振动危害以及众多研究者的科研实践表明: 爆破振动主要通过振动强度、振动主频、振动持时对结构或设施物产生危害。但是, 由于缺乏对爆破振动特征更为精细的研究以及爆破振动对结构或设施物危害作用机制的不明确性, 爆破振动危害控制所面临的形势仍很严峻。要彻底有效地解决爆破振动危害问题, 尚需在振动信号特征分析与预测、危害机制、振动破坏判据 (评价标准)、降振方法等方面进行更深入地探讨。

关于爆破振动危害控制的相关文献散见于 Annual Conference on Explosives and Blasting Technique, Annual Symposium on Explosives and Blasting Research, Annual Symposium on Rock Mechanics, Mining Engineering, CIM Bulletin, Pit and Quarry, International Journal for Blasting and Fragmentation, U. S. Bureau of Mines Report of Investigation, International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Journal of Geotechnical Engineering, Mining Engineering Handbook, Computer Applications in the Mineral Industry, 《爆炸与冲击》、《振动与冲击》、《工程爆破》、《金属矿山》、《岩土工程学报》、《岩石力学与工程学报》、《矿冶工程》等刊物及著作中, 相关专业领域的一些大学学报如《北京科技大学学报》、《东北大学学报》、《中南工业大学学报》、Journal of Central South University of Technology、中国矿业大学学报、Journal of Colorado School of Mines 或学会会刊, 如《中国有色金属学报》、《煤炭学报》、《有色金属》中偶尔有之。

本研究工作分三部分:

第一部分是爆破振动特征研究。旨在通过对现场监测的爆破振动信号进行时频分析, 进一步探明信号特征与爆破条件、传播介质特性、爆源与测点位置条件等因素的联系, 为深入探讨结构或设施物的动态响应及其预测提供前提条件和数据基础。

第二部分是爆破振动动态响应与波形预测研究。旨在通过建立结构或设施物的爆炸冲击、爆破振动动态响应模型及其求解, 探讨爆炸冲击动力响应演化以及爆破振动产生机制, 进而探讨裂隙岩体边坡爆破振动特性与机理; 从小波包主振频带下细节信号现象学特征入手, 建立细节信号现象学描述模型, 进而建立单段、多段波形的模拟及预测模型, 并且应用于最优段微差时间间隔的选择。

第三部分是爆破振动危害机制与危害评价标准研究。旨在根据现场爆破振动危害调查及理论分析, 初步探讨爆破振动危害机制; 综合爆破振动水平及振动频率特性、传播介质特性、结构或设施物动态特征及其岩土支护系统等因素及其影响水平, 建立结构或设施物的爆破振动损伤破坏判据。

作者

2008 年 5 月

摘要：爆破振动分析是研究爆破振动危害控制的基础，也是控制爆破振动危害的前提。研究工作基于铜山口铜矿东部边坡、姑山铁矿临近青山河堤边坡及海南铁矿北一采场南部边坡爆破振动监测试验，针对爆破振动信号特点，选择和构造了合适的小波基函数，并对现场监测的爆破振动信号进行了小波分析（包括小波包分析），探讨了爆破条件、传播介质特性、爆源至测点位置条件等因素对振动时频特征的影响；研究了裂隙岩体爆炸冲击动力响应及其演化，分析了裂隙岩体边坡爆破振动响应特性与机理；研究了基于小波包细节信号描述模型的单段、多段波形预测以及合理段微差时间间隔的选择；初步探讨了在小波包主振频带背景下的爆破振动危害机制与评价标准；取得如下创新性研究成果：

(1) 选择了适宜对爆破振动信号进行小波分解及重构的小波基函数；构造了能够对段微差时间间隔进行精确识别的指数型衰减小波基。

(2) 首次采用小波包分析技术对爆破振动信号进行时频分析，揭示了爆破振动波形的多主振频带特性以及爆破条件、传播介质特性、爆源至测点的位置条件等因素对爆破振动信号时频特征的影响规律。

(3) 从结构动力响应角度探讨了爆炸冲击响应演化及爆破振动产生机制，探讨了边坡裂隙岩体的爆破振动特性及其机理。

(4) 建立了细节信号现象学描述模型以及爆破振动波形预测小波包分析模型，并且运用该模型对微差干扰降振中的最优段微差时间间隔进行了选择。

(5) 初步建立了建（构）筑物基于小波包分析的爆破振动危害评价判据以及边坡等连续性设施物的动态应力比爆破振动危害评价方法。

关键词：爆破振动；小波包分析；裂隙岩体边坡；动态响应；危害判据

Abstract: Blasting vibration analysis constitutes the foundation for studying the control of blasting vibration damage and provides the precondition of controlling blasting vibration. Based on the monitoring experiments of blasting vibration induced by production or excavation blasts at three open pit sites (the eastern slope in Tongshankou Copper Mine, the slope near the bank of Qingshan in Gushan Iron Mine and the southern slope of No. 1 northern quarry in Hainan Iron Mine), the time-frequency characteristics of blasting vibration were investigated by means of the wavelet and wavelet packet analysis technique, the dynamic response of the jointed rock-mass slope to blasting vibration and the prediction models to blasting vibration waveforms were studied, and the damage mechanism of blasting vibration and the criterion for the damage were discussed. Some innovative achievements are summarized as follows:

(1) The wavelet bases suitable for the wavelet transforming and reconstructing to blasting vibration signal were selected and the exponential attenuation wavelet base capable of precisely identifying the millisecond delay time was constructed.

(2) For the first time, the multi-dominant-frequency-band characteristic was revealed via the time - frequency analysis of the wavelet packet technique. The rules of the time - frequency characteristics of blasting vibration signal varied with blasting conditions, transmission medium characters and location circumstance from the blasting origin to the monitoring points were ascertained.

(3) From the point of the dynamic structure response, the evolving rule of blasting impact response and the producing mechanism of blasting vibration were discussed, and the characteristics and mechanism of the jointed rock-mass response due to blasting vibration were researched.

(4) The phenomenological characterization models for the detailed signals of single delay waveforms and the wavelet-packet-based prediction models for blasting vibration waveforms were constructed, and its application to select the optimization millisecond delay time in wave interference takes on good effects.

(5) A preliminary criterion for the structure building damage induced by blasting vibration were deduced considering the different action and response effects of each detailed vibration signal. The criteria of Dynamic Stress Ratio for the continuous installations (such as slope) damage due to blasting vibration were constructed.

Key words: blasting vibration; wavelet packet analysis; jointed rock-mass slope; dynamic response; criterion for damage induced by blasting vibration

目 录

第 1 章 研究综述	(1)
1.1 监测系统智能化	(1)
1.2 信号分析技术	(2)
1.2.1 傅立叶变换	(3)
1.2.2 短时傅立叶变换	(4)
1.2.3 小波变换	(5)
1.3 爆破振动预测模型	(8)
1.3.1 峰值质点振速的预测	(8)
1.3.2 振动波形的预测	(10)
1.4 控制模型与方法	(12)
1.5 破坏判据	(15)
1.5.1 单一质点振速安全判据	(16)
1.5.2 结合振动主频的质点振速安全判据	(16)
1.5.3 动态抗拉应力判据	(17)
小 结	(19)
第 2 章 小波包分析技术	(20)
2.1 小波基的选择与构造	(20)
2.2 小波包算法	(26)
2.2.1 小波包定义与物理考虑	(26)
2.2.2 小波包算法	(29)
2.3 最优小波包基	(30)
2.4 Matlab 5.3 计算语言及编程	(32)
小 结	(32)

第3章 爆破振动信号特征研究	(34)
3.1 爆破振动波形小波分析	(35)
3.1.1 单段波形时频特征	(37)
3.1.2 多段微差波形时频特征	(49)
3.2 爆破条件对振动时频特征的影响	(53)
3.2.1 段药量的影响	(53)
3.2.2 段微差间隔时间的影响	(57)
3.3 传播介质、位置条件对振动时频特征的影响	(59)
3.3.1 传播介质的影响	(59)
3.3.2 位置条件的影响	(64)
小 结.....	(71)
第4章 爆破振动边坡动态响应研究	(73)
4.1 爆炸冲击动力与响应特性	(73)
4.1.1 单自由度系统爆炸冲击响应	(77)
4.1.2 岩体介质爆炸冲击动力响应特征	(82)
4.1.3 岩体爆炸冲击响应的演化	(86)
4.2 裂隙岩体边坡爆破振动特性与机理	(87)
4.2.1 边坡裂隙岩体爆破振动特性	(88)
4.2.2 边坡裂隙岩体爆破振动机理	(90)
4.2.3 边坡爆破振动岩块模型	(93)
小 结.....	(99)
第5章 爆破振动波形预测小波包分析模型及其应用	(101)
5.1 爆破振动波形预测模型	(102)
5.1.1 细节信号的现象学描述	(102)
5.1.2 单段波形的预测模型	(104)
5.1.3 多段波形的预测模型	(105)
5.2 波形预测实例分析	(106)
5.2.1 波形预测基本步骤	(106)
5.2.2 波形预测实例	(107)
5.2.3 波形预测与实测的对比分析	(113)

5.3 基于波形预测小波包分析模型的微差干扰降振	(115)
5.3.1 两段叠加效果	(116)
5.3.2 多段叠加效果	(117)
小 结	(118)
第 6 章 爆破振动危害机制与评价标准的探讨	(120)
6.1 爆破振动危害机制	(121)
6.1.1 建(构)筑物的爆破振动危害	(121)
6.1.2 边坡等连续性设施物的爆破振动危害	(123)
6.1.3 爆破振动危害控制方法	(125)
6.2 基于小波包分析的爆破振动危害评价标准	(126)
6.2.1 波形多主振频带特征的困扰	(126)
6.2.2 不同细节信号的危害效果	(127)
6.2.3 基于小波包分析的爆破振动危害评价标准	(128)
6.3 裂隙岩体边坡的爆破振动危害判据	(130)
6.3.1 动态应力比	(130)
6.3.2 现场调查与判据计算	(131)
小 结	(136)
第 7 章 结论	(137)
附录一 指数衰减型小波基函数相关证明	(140)
附录二 作者攻博期间发表的学术论文	(145)
参考文献	(147)
致 谢	(157)

第1章

研究综述

爆破振动危害控制的研究内容主要集中于监测系统的研制与改进、振动特征分析、强度预测、危害机制探讨、危害判据（评价标准）的制定、降振方案的设计等方面^[1-20]。随着计算机技术在科学领域的纵深发展，爆破振动危害控制在监测系统智能化、数据采集与分析、数理模型的建立与求解等方面取得了较大的进步^[21-30]。但对于爆破振动非平稳信号分析、整体性设施物系统振动控制的理论与应用及其破坏判据等方面的研究仍很不够^[35-41]。

1.1 监测系统智能化

爆破振动监测系统包括振动传感器（拾震器）、放大器、A/D转换器、记录仪、数据处理器等设备。目前，使监测系统向智能化、小型化发展的动力主要源于A/D转换器的分辨率和采样频率的提高以及记录仪、数据处理器数字化。

A/D转换器的分辨率从8位到12位，极大地提高了监测系统转换爆破振动信号变化的敏感程度，扩大了其监测范围；A/D转换器的采样频率决定了监测系统的最高采样频率，当前某些系统可达1000kHz，一般，系统在1kHz就基本能够满足爆破振动监测的硬件要求，例如TOPBOX爆破振动自记仪、DSVM测震仪、YBJ系列爆破振动自记仪和SSU系列测震仪^[31-34]。从传统的光线示波器、磁带记录仪到目前的自记仪及其相应的数据通讯存储设备（如便携式计算机、可切换式数据存储器等），爆破振动监测系统实现数字化传输与存储，为进一步快捷、高效分析处理振动数据提供了前提条件。

采用以自记仪为核心的爆破振动自记系统集成放大器、A/D转换器和记录仪为一体，代表了爆破振动监测系统向智能化发展的先进方向，兼具体积小、重量轻、灵敏度高、功能齐全、数据传输方便、自动化程度高、内存容量大、应用范围广等优点。图1-1所示为一典型爆破振动自记系统。

20世纪90年代推出的PCM磁带数据记录仪采用脉冲编码调制（Pulse-code modulation），将模拟信号转换为数字信号，然后记录在VHS（Video Home System）或DAT（Digital Audio Tape）磁带上，从根本上解决了传统调频（Frequency modulation）模拟磁带机动态范围小、精度较低的缺点，其A/D或D/A转换器的分辨率可为12~16位，动态范围可达70~80dB以上，测量通道一般可扩展到64~128，频率范围5~20kHz，磁带存储容

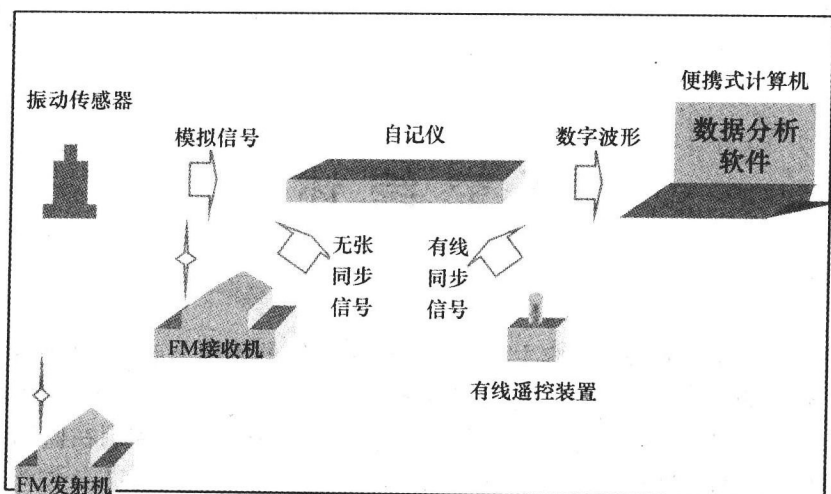


图 1-1 典型爆破振动自记系统图示

量 4 ~ 25GB。典型产品有美国 Metrum - Datatape 公司的 RSR - 512 以及日本 Sony 公司的 PC200AX 系列、SIR - 1000 高速数据记录仪等^[45]。

监测系统对于爆破振动信号的高效、精确采集和后处理具有十分重要的意义，其整体性能主要通过最高采样率、A/D 分辨率、通道数以及量程范围等参数来衡量。监测仪器（振动传感器、放大器、自记仪等）的选择应当根据测试信号频率、幅值特征以及现场工程监测要求来确定。

1.2 信号分析技术

从众多爆破振动实地监测来看，爆破振动信号具有持续时间短、信号突变快等特点，属于非平稳信号^[1,7-9,42,47]。其分析技术（包括相应的分析仪器）的发展主要依靠信号分析数学方法的进步以及研究者对爆破振动信号认识的深刻程度。

傅立叶变换（Fourier Transform Algorithm）是分析振动信号的有力工具，特别是 1965 年 Cooley J W 和 Tukey J W 在《机器计算傅立叶级数的一种算法》一文提出离散傅立叶变换（Discrete Fourier Transform）的快速算法即 FFT 变换（Fast Fourier Transform）后，振动信号（包括爆破振动）分析技术在硬件设施与软件算法方面均产生了质的飞跃。1967 年第一台基于 FFT 变换的动态信号分析仪 Time/Data100 由美国的 Time/Data 公司开发成功并应用于分析机翼振动测试信号；随后 HP、Necolet 及 Spectrum Dynamics 公司相继推出其 FFT 分析仪，如 HP5450、SD360。其中 HP 公司开发了细化（Zoom）技术，GenRand 公司研制了时序语言（Time Series Language）编程系统。早期的 FFT 分析仪以小型计算机为基础，整个仪器体积庞大，价格昂贵，其应用范围受限。随后发展的 FFT 分析仪采用了 CPU 芯片以代替计算机，其分析频率范围在 0 ~ 50kHz，动态范围为 80dB，精度可

达 0.2dB, 广泛应用的型号有 HP 公司的 HP5420/3582/3562、SD 公司的 SD375/380、B&K 公司的 BK2031/2032/2034/2035、小野测器公司的 CF910/920/930、Instantel 公司的 Blast-Mate III 系列等。随着 PC 仪器化进程以及短时傅立叶变换 (Short Time Fourier Transform)、小波变换 (Wavelet Transform) 等分析方法在振动信号时频分析中的成熟应用, 多通道、高性能动态信号分析仪如 HP3565/3566、ZONIC7000 系列、BK3550/3551、CATAS 系统、国产 DTAS-8 等在分析复杂结构与设施物振动响应信号方面具有强大的优势^[43-44]。对于平稳信号, FFT 分析具有良好的效果; 但是针对像爆破振动这样变化剧烈的非平稳信号, FFT 分析不能满足要求, 而基于变尺度、多分辨率时频分析方法的小波分析则表现出良好的应用前景, 商用软件及一些动态分析仪中的小波分析模块已经出现, 如 Matlab 中的 Wavelet Tool Box。

1.2.1 傅立叶变换

函数 $f(t) \in L^1(R)$ 的连续傅立叶变换 (Fourier Transform) 定义为^[47]:

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

在实际计算傅立叶变换时需要用数值积分, 即 $f(t)$ 在 R 范围的离散点上的值来计算该积分。为了信号频谱分析及其他处理的计算机实现, 被分析信号应在时域及频域内是离散的且为有限长。为此采用离散时间傅立叶变换 (Discrete Fourier Transform): 给定离散时间序列 f_0, f_1, \dots, f_{N-1} , 且 $\sum_{n=0}^{N-1} |f_n| < \infty$ 满足条件, 则下式称为序列 $\{f_n\}$ 的离散傅立叶变换 (DFT)^[48]:

$$X(k) = F(f_n) = \sum_{n=0}^{N-1} f_n e^{-i\frac{2\pi nk}{N}} \quad (k = 0, 1, \dots, N-1) \quad (1-2)$$

令 $e^{-i\frac{2\pi nk}{N}} = W_N^{nk}$ 成立, 而 W_N^{nk} 具有对称性和周期性, 即:

$$(W_N^{nk})^* = W_N^{-nk} \quad (1-3)$$

$$W_N^{nk} = W_N^{(n+N)k} = W_N^{n(k+N)} \quad (1-4)$$

根据式 (1-3) 和式 (1-4), DFT 运算中某些项可以合并, 并且长序列的 DFT 可分解为短序列的 DFT, 从而可实现 FFT 算法, 为计算机处理振动信号提供了数学运算基础。

FFT 算法基本可分为两大类: 按时间抽取 (Decimation-In-Time) 法和按频率抽取 (Decimation-In-Frequency) 法。当前较为流行的 FFT 分析软件大部分采用按时间抽取法 (DIT), 如 Matlab 计算语言中的基本 FFT 函数、CRAS 振动分析软件中的频率分析等。

傅立叶变换是从时域到频域互相转化的工具, 其实质是把 $f(t)$ 这个信号波形分解成许多不同频率的正弦波的叠加和。这样就把对原信号 $f(t)$ 的研究转化为对其权系数即 FFT 变换 $F(\omega)$ 的研究, 它的标准基由正弦波及其高次谐波组成, 在频域内是局部化的。虽然从 FFT 变换可以了解爆破振动信号的时域及频率特征, 但并不能将两者有机地结合起来, 即从信号时域得不到频率信息, 从频域又不能知道时域信息, 如图 1-2 (a)、

1-2 (b)所示, 爆破振动信号优势频率(振动主频)很明显, 但是从两图中并不能确切地知道其优势频率发生的时段, 信号时程与频域是独立的。在进行爆破振动信号特征分析的软件与应用实例中大部分采用的是 FFT 变换^[8-13,30,40-41], 这就促使人们去寻找一种能将时域和频域结合起来的描述信号时频特征的新方法, 短时傅立叶变换 (STFT) 就是一种尝试。

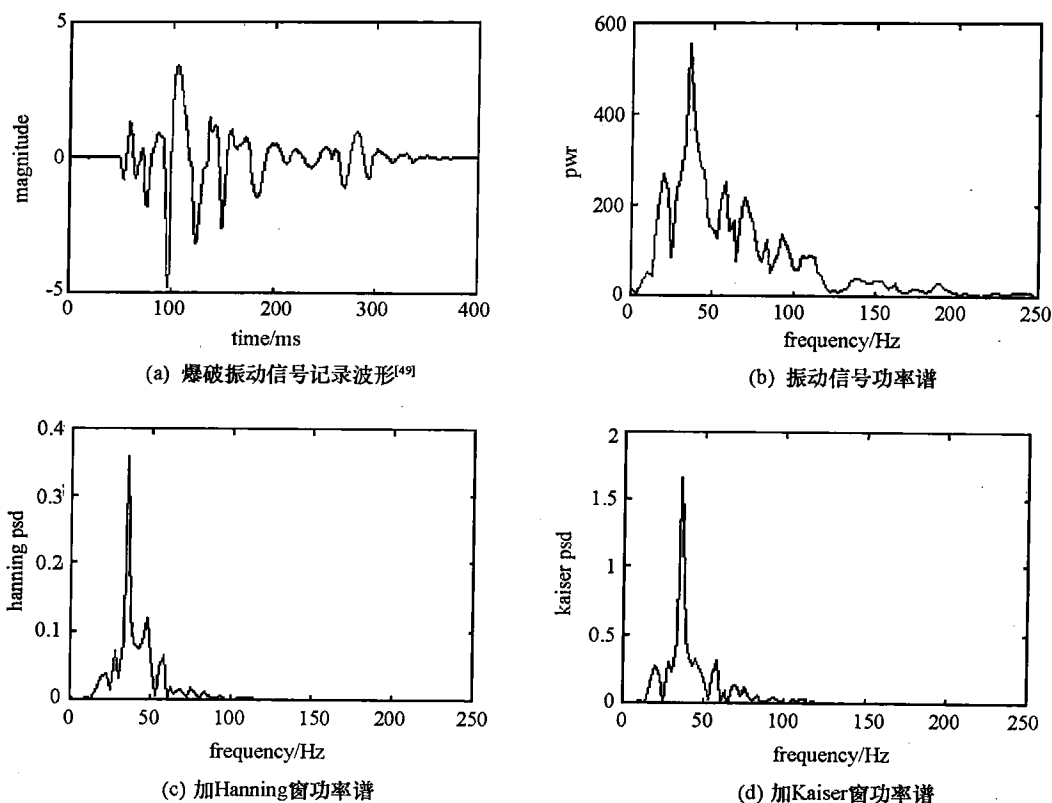


图 1-2 爆破振动信号时程及其不同 FFT 变换功率谱

1.2.2 短时傅立叶变换

短时傅立叶变换 (Short Time Fourier Transform) 的基本思想是把信号划分成许多小的时间间隔, 用傅立叶变换分析每一个小时间间隔, 以便确定该时间间隔存在的频率。其数学表达式为:

$$S(\omega, \tau) = \int_R f(t) g^*(\omega - \tau) e^{-i\omega t} dt \quad (1-5)$$

在这个变换中, $e^{-i\omega t}$ 起着频限作用, $g(t)$ 起着时限作用, 随着时间 τ 的变化, $g(t)$ 所确定的“时间窗”在 t 轴上移动, 对 $f(t)$ “逐渐”进行 FFT 分析, $S(\omega, \tau)$ 大致反映了 $f(t)$ 在时刻 τ 、频率为 ω 的信号成分的相对含量。该变换表示了信号在

$[\tau - \delta, \tau + \delta]$, $[\omega - \epsilon, \omega + \epsilon]$ 区域的状态, δ 、 ϵ 分别是窗函数的时宽和频宽, 表示时频分析中的分辨率, 窗口越小则分辨率越高。很显然, δ 、 ϵ 越小, 得到的时频分析效果越好。但海森堡 (Heisenberg) 测不准原理 (Uncertainty Principle) 指出 δ 与 ϵ 是互相制约的, 两者不可能同时任意小。由此可见该变换的缺陷在于: 当窗函数 $g(t)$ 确定后, 矩形窗口形状就决定了, ω 、 τ 只能改变窗口在相平面的位置, 其实质是一种单一分辨率的分析; 若要改变分辨率, 只能改变窗函数。因此短时傅立叶变换用于分析平稳信号尚可, 但对于爆破振动这一非平稳信号而言, 在信号变化剧烈的时刻, 其主频为高频, 要求较高的时间分辨率 (即 δ 要小), 而波形变化平缓时主频为低频, 要求较高的频率分辨率 (即 ϵ 要小)。可见短时傅立叶变换不能兼顾两者。图1-2(c)、1-2(d)为加了某种窗函数后的短时傅立叶分析对比 (magnitude 表示电压幅值, pwr 表示功率谱, psd 表示功率谱密度)。

从对比来看, 在矩形窗、Hanning 窗及 Kaiser 窗各自的频谱图上, 爆破振动信号优势频率均很明显, 但矩形窗的频率分辨率较高, Kaiser 窗次之, Hanning 窗较低; 对于谱幅值分辨性则相反, 其幅值分辨率高低依次为 Hanning 窗、Kaiser 窗和矩形窗。

1.2.3 小波变换

小波分析方法是窗口大小 (即窗口面积) 固定但其形状可改变, 时间窗和频率窗都可改变的时频局部分析方法^[50]。在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率, 在高频部分具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率, 因此小波变换 (Wavelet Transform) 具有对信号的自适应性。其优于各种 FFT 变换的地方是, 在频域及时域同时具有良好的局部化性质。

设

$$\Psi(t) \in L^2(R)$$

$L^2(R)$ 表示平方可积的空间, 即能量有限的信号空间。其 FFT 变换为 $\hat{\Psi}(\omega)$ 式。当其满足如下允许条件:

$$C_{\Psi} = \int_R \frac{|\Psi(\omega)|}{|\omega|} d\omega \quad (1-6)$$

则称 $\Psi(t)$ 为一个基本小波或母小波 (Mother Wavelet)。将其经伸缩和平移后得到一个小波序列。对于连续情况, 小波序列为:

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a, b \in R; a \neq 0 \quad (1-7)$$

对于离散情况, 小波序列为:

$$\Psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \Psi(2^{-j}t - k) \quad j, k \in Z \quad (1-8)$$

对于任意的函数, 其连续小波变换为:

$$W_f(a, b) = \langle f, \Psi_{a,b} \rangle = |a|^{-1/2} \int_R f(t) \Psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1-9)$$

$$f(t) = \frac{1}{C_{\Psi}} \int_{R^+} \int_R \frac{1}{a^2} W_f(a, b) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) da db \quad (1-10)$$

其逆变换为:

$$\frac{\Delta\hat{\Psi}}{a} \quad a\Delta\Psi$$

$$[b - a\Delta\Psi, b + a\Delta\Psi] \times [\pm\omega_0 - \Delta\hat{\Psi}/a, (\pm\omega_0 + \Delta\hat{\Psi})/a]$$

小波变换的时频窗口特性与 STFT 变换的时频窗口不一样,窗口中心为 $(b, \pm\omega_0/a)$, 其窗口形状为两个矩形: 频窗和时窗宽分别由 a 和 b 量化。其中 b 仅仅影响窗口在相平面时间轴上的位置, 而 a 不仅影响窗口在频率轴上的位置, 而且影响窗口形状。这样小波变换对不同的频率在时域上的取样步长是调节性的, 对于爆破振动信号而言, 正好适应高频时需较高的时间分辨率、低频时需较高的时间分辨率的要求。所以用小波变换分析爆破振动信号比短时傅立叶变换具有更好的时频窗口特性。

在实际计算机实现及其运用中, 用到的是针对连续的尺度参数 a 和连续平移参数 b 离散化的离散小波变换。取 $a = a_0^j$, $b = k a_0^j b_0$, 其中 $j \in Z$, 扩展步长 $a_0 > 1$, 则对应的离散小波函数 $\Psi_{j,k}(t)$ 为:

$$\Psi_{j,k}(t) = a_0^{-j/2} \Psi\left(\frac{t - k a_0^j b_0}{a_0^j}\right) a_0^{-j/2} \Psi(a_0^{-j} t - k b_0) \quad (1-11)$$

而离散化小波变换系数则表示为:

$$C_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi_{j,k}^*(t) dt = \langle f, \Psi_{j,k} \rangle \quad (1-12)$$

其重构公式为:

$$f(t) = C \sum_{-\infty}^{\infty} \sum_{-\infty}^{\infty} C_{j,k} \Psi_{j,k}(t) \quad (1-13)$$

C 是一个与信号无关的常数。

只有网格点尽可能地密, 即 a_0 和 b_0 尽可能小, 才能保证重构信号的精度; 如果网格点较稀疏, 使用的小波函数和离散小波系数就越少, 信号重构的精度就低。为了使小波变换具有可变化的时间和频率分辨率, 以适应待分析信号的非平稳特性, 须改变 a 、 b 的大小, 使小波变换具有“变焦距”的功能。在实际中, 最常用的是二进动态采样网格, 即 $a_0 = 2$, $b_0 = 1$, 每个点对应的尺度为 2^j , 平移 $2^j k$ 。其小波函数(二进小波, Dyadic Wavelet)为:

$$\Psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \Psi(2^{-j} t - k) \quad j, k \in Z \quad (1-14)$$

该二进小波变换为下式:

$$W_2 f(k) = \langle f(t), \Psi_2(k) \rangle = \frac{1}{2} \int_R f(t) \Psi^*(2^{-j} t - k) dt \quad (1-15)$$

上式相应的逆变换为:

$$f(t) = \sum_{j \in Z} W_2 f(k) \Psi_2(t) = \sum_{j \in Z} \int W_2 f(k) \Psi_2(2^{-j} t - k) dk \quad (1-16)$$

二进小波不同于连续小波的离散化小波, 它只对尺度参数离散化, 而对时间域上的平移参量保持连续变化, 因此其不破坏信号在时间域上的平移不变量。

运用小波变换对非平稳信号进行工程应用分析, 一个十分重要的问题就是最优小波基的选择, 因为以不同的小波基分析同一个信号会产生不同的结果。目前主要是通过用

小波分析方法处理信号的结果与理论结果的误差来判定小波基的好坏，并由此选定小波基^[51,52]。

针对爆破振动信号小波变换的小波基选择，国外学者如法国地球物理学家 Morlet 在分析人工振动勘探信号时提出了 Morlet 小波函数^[50,53]，如图 1-3 (a) 所示为其小波函数图形；北京科技大学的何军等人基于对 Morlet 小波进行改进，提出了一个正交复小波基^[46]，其小波函数图形以及重构对比如图 1-3 (b)、(c)、(d) 所示。从图上原始振动信号与小波分析重构信号对比来看，在时间 $t = 0.2\text{s}$ 附近的信号幅值两者相差较大，波形也有一些差异，说明该正交小波基对于分析这种爆破振动信号不很合适，需要选择更优的小波函数来对其进行变换。

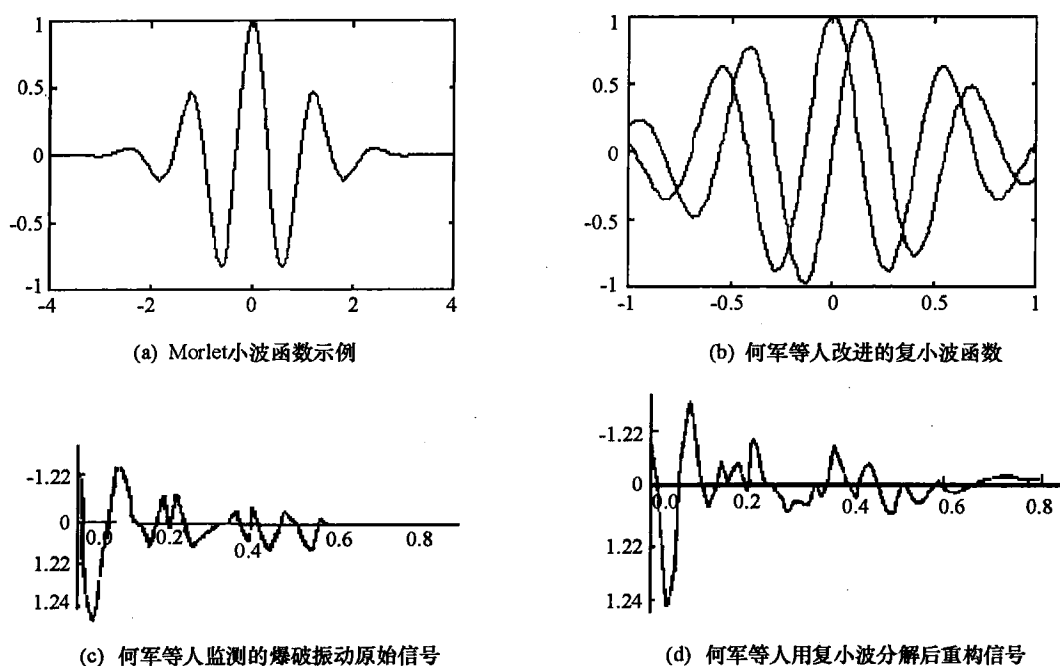


图 1-3 过去分析爆破振动的小波函数及其重构效果对比^[46,51]

实际上，不同的爆破振动信号波形，由于其产生的机制和条件不一样，因而具有不同的时频特征，应当根据具体的信号波形选择小波函数来进行变换。

对信号进行小波分解的最终目的是力求构造在频率上高度逼近 $L^2(R)$ 空间的正交小波基。小波变换多分辨率分析只是对信号低频部分进行进一步分解，而对高频部分则不予考虑，其尺度是按二进制变化，在信号高频段，其频率分辨率高，在信号低频段，其时间分辨率较差，即小波变换时间分辨率高时频率分辨率低，频率分辨率高时时间分辨率低。小波分析对于信号分析的频率局部程度是不同的，其比较适宜于检测突变或边缘信号的存在。为解决这个问题，又发展了小波包分析技术 (Wavelet Packet Analysis)。小波包分析能够为信号提供更加精细的分析方法，它将频带进行多层次划分，对小波分析中没有细分的高频部分进一步分解，并能够根据被分析信号的特征自适应选择频带，使之