

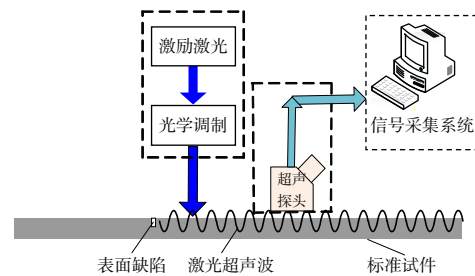


激光超声的小波包能量分析

宋 潮^{1,2}, 郑 宾^{1,2}, 郭华玲^{1,2*}, 刘 辉^{1,2},
侯 静^{1,2}

¹中北大学计算机与控制工程学院, 太原 030051;

²中北大学电子测试技术重点实验室, 太原 030051



摘要: 为了解决航空发动机原位裂纹的快速检测问题, 得到特征信息与缺陷深度之间的关系, 本文通过实验室已搭建的实验平台, 使用激光器在一系列不同深度缺陷的航空铝板上激发激光超声信号, 对收集到的信号进行小波去噪, 通过小波包研究去噪后的反射回波信号的频带能量分布特征。结果表明: 反射回波信号的能量主要集中于 $S_{80} \sim S_{87}$ 频带; 当缺陷深度为 0.2 mm 至 0.4 mm 时, 能量主要集中在相邻的两个频带上; 当缺陷深度为 0.5 mm 至 0.7 mm 时, 能量主要集中在相间的两个频带上。该分析方法为超声信号定量表征表面微缺陷提供了一种思路, 为今后从频带能量方面分析裂纹深度奠定了一定的基础。

关键词: 激光超声; 小波包分解; 频带能量; 反射回波; 缺陷深度

中图分类号: TB553

文献标志码: A

Wavelet packet energy analysis of laser ultrasonic

Chao Song^{1,2}, Bin Zheng^{1,2}, Hualing Guo^{1,2*}, Hui Liu^{1,2} and Jing Hou^{1,2}

¹School of Computer Science and Control Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China; ²National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, Taiyuan 030051, China

Abstract: In order to solve the problem of the rapid detection of aircraft engine in situ cracks, and get the relationship between feature information and detect depth, the laboratory experimental platform is built, laser is used to excite laser ultrasonic signals on a range of aviation aluminum plates with different depth defects, the collected signal is proposed by wavelet de-noising, and the band energy distribution of the reflected echo signal is studied by using wavelet packet. The results show that the energy of reflected echo signal is mainly concentrated in the $S_{80} \sim S_{87}$ band. When the depth of defect is 0.2 mm to 0.4 mm, the energy is mainly concentrated in the adjacent bands. When the depth of defect is 0.5 mm to 0.7 mm, the energy is mainly concentrated in the two bands. This method provides a way to quantify surface micro-defects by ultrasonic signals, which will lay a foundation for the future analysis of crack depth from band energy.

Keywords: laser ultrasonic; wave packet decomposition; band energy; reflection echo; defect depth

DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.06.011

Citation: *Opto-Elec Eng*, 2017, **44**(6): 638–642

1 引言

飞机上的叶片是发动机最重要的部件之一, 在服役过程中, 使用环境十分恶劣, 由于承受高温、高压、

强烈的震动以及巨大的离心力等作用, 极易因应力过大而产生疲劳性裂纹。这些裂纹通常产生在焊接部位以及根部的近表面位置, 严重影响叶片的工作强度和疲劳寿命, 甚至威胁飞机结构的安全, 带来巨大的安全隐患^[1,2], 因此必须对其进行检测。目前检测裂纹的

收稿日期: 2017-03-04; 收到修改稿日期: 2017-05-14

*E-mail: 834086353@qq.com

常规方法有涡流检测、射线检测、磁粉检测、渗透检测等^[3]。但是,常规超声在外场检测中由于空间夹角较小,不适合放置换能器,而且不易产生检测表面缺陷的声波,如声表面波;因此,需要一种新的检测方法对其进行检测。激光超声相对于常规超声是一种新型检测方法,激光超声检测技术是利用激光束激励和接收超声波,进而对材料中的缺陷进行检测的无损技术,与常规方法相比,具有非接触、高精度、高灵敏度、可产生多种声波模式的特点^[4,5],因此,激光超声检测对发动机叶片上的疲劳检测具有一定的适用性。

国内外的学者在激光超声信号的特征研究、分析识别上做了大量卓有成效的研究,取得了很多有价值的成果。Dubois 和 Drake 针对飞机复合材料结构大型复杂型面的快速检测问题,研制出可以应用于现场的激光超声系统^[6,7], Lee 提出了邻近点超声波插值法用于检测机翼中的损伤及其位置信息^[8],周正干等通过自主设计的激光超声系统对复合材料进行 C 扫描检测,可获得准确的缺陷分布信息^[9]。但是,在发动机叶片的激光超声检测方面,现有研究仍然没有分析裂纹的深度与频带能量的分布特征,针对该问题,本文开展相关研究,为这一技术的应用提供参考。

2 小波包分析原理

超声信号的小波分析,原理是通过小波包的分解与重构,提取隐含在超声信号中的特征分量,并映射到不同的频带上,通过对比分析不同频带上的分量作为超声信号的特征,用于描述不同深度缺陷的超声信号^[10],实质就是对超声信号进行分析、变换、综合、识别等处理,最终得到表征超声信号特征的目的^[11]。

2.1 超声信号小波包分解

超声信号 $S(t)$ 的小波包分解,是将 $S(t)$ 投影到小波包基上,获得一系列小波包系数,这些小波包系数用于反映超声信号的不同特征。 $S(t)$ 的表达式为

$$S(t) = \sum_{j=0}^{2^i-1} f_{i,j}(t_j) = f_{i,0}(t_0) + f_{i,1}(t_1) + \dots + f_{i,j}(t_j), \quad (1)$$

式中: $f_{i,j}(t)$ 为激光超声信号小波包分解到节点 (i,j) 上的重构信号。其中, $j=0, 1, 2, \dots, 2^i-1$; $i=1, 2, 3, \dots, 8$ 。若 S 的最低频率为 1, 最高频率为 w , 则第 i 层每个频带的频带宽度为 $w/2^i$ 。

实验的采样频率为 500 MHz; 根据采样定理,其奈奎斯特采样频率为 250 MHz。本文对激光超声信号 $S(t)$ 进行 8 层小波包分解,第 i 层将得到 2^i 个子频带,

即 256 个子频带,对应的最低频带为 0.000 ~ 0.977 Hz。

2.2 激光超声信号频带能量表达

由于小波包基函数具有正交性,所以能将信号的小波变换看做能量守恒,即信号经过小波变换后能量保持不变。由巴什瓦(Parseval)定理以及式(1)可得,第 i 层信号分量的能量定义为

$$E_{i,j}(t_j) = \int_T |f_{i,j}(t_j)|^2 dt = \sum_{k=1}^m |x_{j,k}|^2, \quad (2)$$

式中: $E_{i,j}(t_j)$ 表示激光超声信号小波包分解到第 i 层第 j 个节点的频带能量, m 为激光超声信号的采样点数, $x_{j,k}$ 为重构信号 $f_{i,j}(t)$ 离散采样点的幅值($j=0, 1, 2, \dots, 2^i-1$; $k=1, 2, \dots, m$)。

原始信号 $S(t)$ 为第 i 层所有节点上重构信号之和,其总能量等于第 i 层各节点的信号分量能量之和,可得激光超声信号 $S(t)$ 的总能量为

$$E = \sum_{j=0}^{2^i-1} E_{i,j}(t_j) = \sum_{j=0}^{2^i-1} \sum_{k=0}^m |x_{j,k}|^2. \quad (3)$$

激光超声信号各个频带内的能量占信号总能量的百分比为

$$E(n) = \frac{E_{i,j}(t_j)}{E} \times 100\%. \quad (4)$$

根据上述方法对激光超声信号中的反射回波信号进行分解处理,该信号分解到等间距的各个频段内,从而得到重构信号离散点采样的幅值,而重构信号的离散点采样幅值的平方就表示信号分解后各个频段对应的能量分布状况,因为反射回波信号中带有不同的缺陷裂纹深度的特征信息,所以导致各频率带中对应的能量应该有着不同的分布特征。同样,对于不同裂纹深度下的反射回波,如果信号在各个频带内能量分布状况各不相同,那就可以知道信号存在的缺陷问题。因此,选用此方法对缺陷反射回波信号进行能量分解,可通过信号在分解后的各个频带内能量分布特征对试件的缺陷深度进行表征。

3 实验系统

实验装置示意图见图 1,装置中的超声激励源选择纳秒级 Nd:YAG 脉冲激光器,其波长为 1064 nm,脉冲宽度为 7 ns,能量在 70 mJ ~ 220 mJ 连续可调。光路调制模块中的平凸透镜焦距为 75 mm,聚焦极限为 20 μ m。检测模块中使用的超声探头中心频率为 2.5 MHz,带宽为 5 MHz。数据采集使用 Tektronix(泰克科技)DPO3034 数字荧光示波器进行采集,每次实验重复三次,采样频率为 500 MHz,采样点数 10000 个。

为了避免其他不规则裂纹的干扰,对航空铝件进行人工加工的方式产生裂纹,铝件总体尺寸为 200 mm×80 mm×10 mm,在边界的 80 mm 处加工不同深度的缺陷,缺陷的宽度为 0.15 mm,深度为 0.2 mm ~ 0.7 mm,步长为 0.1 mm,共六块。

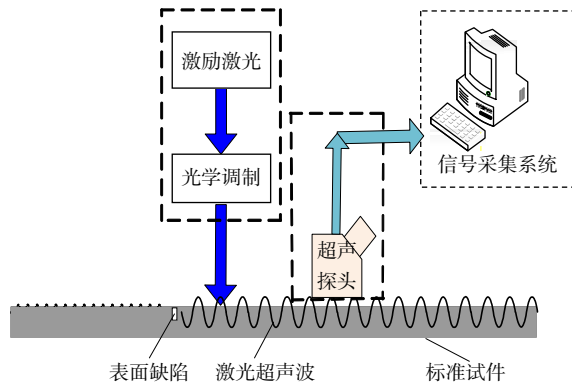


图 1 实验装置框图。

Fig. 1 Experimental device block diagram.

4 激光超声信号的小波分析

4.1 信号预处理

激光超声信号在采集过程中,受到内部和外部因素的干扰,混杂着一定的噪声,噪声的存在对实验数据的分析造成了一定的影响。因此,在进行小波包分析之前,需要对原始数据进行初步的处理,如修正波形的畸变,减少噪声的干扰,提高信噪比,并且突出信号的一些细节特征^[12]。

本文的预处理方法主要有去除趋势项、小波去噪以及平滑处理,消除混杂于信号中的噪声干扰。小波包的频带能量计算过程中,能量与波形振幅的平方成正比,故背景噪声的消除有助于更清晰地展现能量的分布情况。图 2 为激光超声反射波信号预处理前后的

对比图,可以看出预处理后的信号更加平滑,波形特征更加明显,椭圆中的信号即为反射回波信号。

4.2 小波基的选取

小波分析使用的小波函数具有多样性,应用不同的小波基函数处理的结果是不相同的。Daubechies 小波系列可以较好地反映激光超声信号在时间和频域上的非平稳变化过程,并且在爆破、地震等领域得到了广泛的应用^[13]。因此,本文选择 DB8 小波基,对激光超声反射回波信号进行 8 层小波分解。

4.3 小波包分析

通过使用 Matlab 编程,对不同深度的反射回波信号进行分析:对预处理后的信号进行 8 层小波包分解,提取分解后的小波包系数并在分解的频带内进行信号的重构;计算重构后的每个等间距频段内的信号能量占总能量的比值;求得小波包提取的频域特征向量;对三次重复实验的频带能量再求平均值,以减小随机误差的影响。通过对不同深度裂纹的反射回波信号各频带的能量分布进行统计分析,不同缺陷深度的信号在 $S_{80} \sim S_{87}$ 频带上的能量占总能量的百分比分别为 89.77%、91.82%、91.41%、90.94%、90.19%、87.86%,即反射回波的大部分能量都集中在 $S_{80} \sim S_{87}$ 频带上,因此,本文主要对这八个频段能量进行分析。

将 $S_{80} \sim S_{87}$ 频带能量投影到同一直方图中进行对比分析,见图 3,由图可知:

- 1) 反射回波信号的能量分布集中于低频带,高频成分所占比重较小。在 S_{80} 、 S_{81} 、 S_{82} 、 S_{83} 中分布尤为集中,所占的频带范围为 0 ~ 3.908 MHz,属于低频区。
- 2) 在 $S_{80} \sim S_{83}$ 频带上,能量的分布呈现从在 S_{80} 向在 S_{83} 移动的趋势;在 S_{84} 、 S_{85} 频带上能量迅速衰减;在 S_{86} 、 S_{87} 频带上能量有所提高,但是最大能量不超过

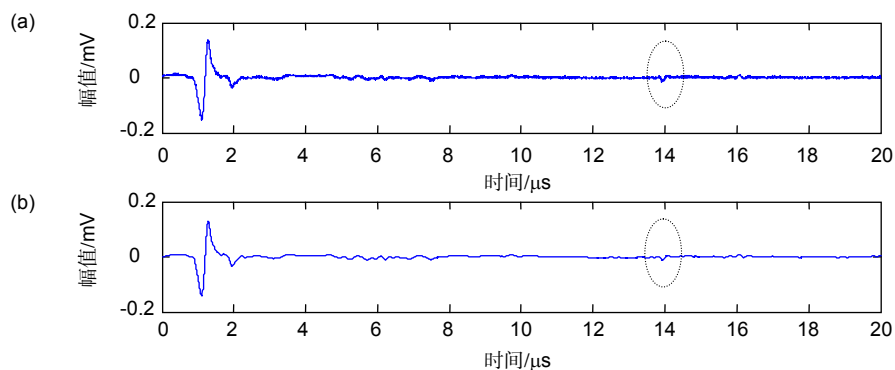


图 2 反射波信号的预处理。(a) 预处理前波形。(b) 预处理后波形。

Fig. 2 Preprocessing of reflected wave signals. (a) Wavefront before preprocessing. (b) Wavefront after preprocessing.

10%。3) 在 S_{81} 频段, 能量随着缺陷深度的增加有增加的趋势, 这是因为随着缺陷深度的增加, 反射回波信号逐渐加强, 反射回波的平频谱也因此呈现增加的趋势, 相应的能量也呈现增加趋势。

为分析不同深度缺陷与频带能量的分布特征, 将 0.2 mm~0.4 mm 缺陷深度的前四个频带能量分布绘制到图 4 中, 并对各个深度的数据绘制频谱图, 得到其中心频率分别为 3.14 MHz、2.58 MHz、2.17 MHz, 这些频率分别位于 S_{83} 、 S_{82} 、 S_{82} 频段, 都是占总能量最大的频段, 但能量分布在相邻段, S_{82} 所占的比重也较

大。当缺陷深度为 0.2 mm 时, 中心频段所在频段能量为 0.355, S_{82} 所占的频段能量为 0.2405, 这两个频段的总能量为 59.55%; 当缺陷深度为 0.3 mm 时, 中心频段所在能量为 0.32, S_{83} 所占的频段能量为 0.2853, 这两个频段的总能量为 60.53%; 当缺陷深度为 0.4 mm 时, 中心频段所占的能量为 0.3138, S_{81} 所占的频段能量为 0.2967, 这两个频段的总能量为 61.05%。

将 0.5 mm 至 0.7 mm 缺陷深度的前四个频带能量分布绘制到图 5 中, 对应的中心频率分别为 2.12 MHz、1.86 MHz、1.79 MHz, 这些频率分别位于 S_{82} 、 S_{81} 、 S_{81}

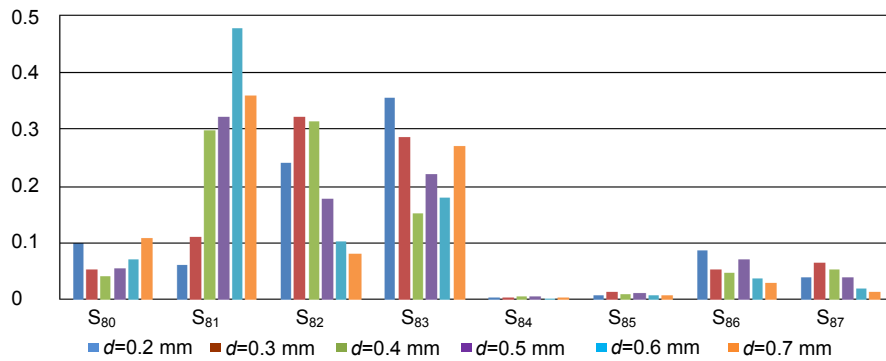


图 3 反射回波信号的频带分布图。

Fig. 3 The frequency distribution of the reflected echo signals.

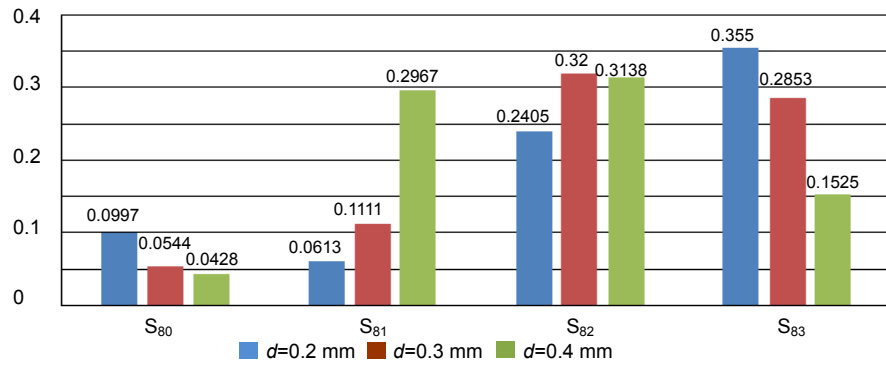


图 4 能量分布柱状图。

Fig. 4 Energy distribution histogram.

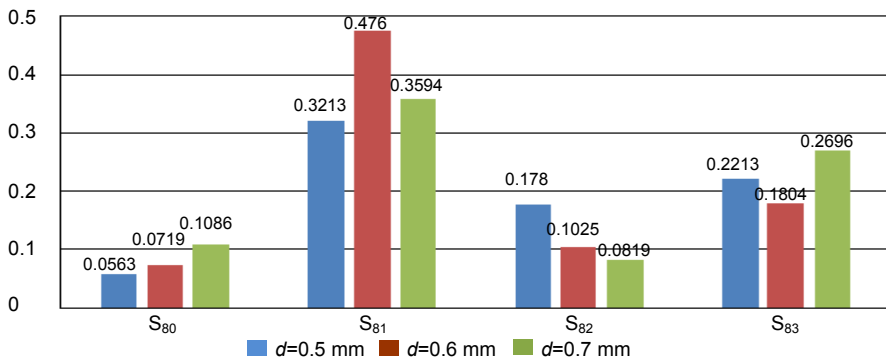


图 5 能量分布柱状图。

Fig. 5 Energy distribution histogram.

频段,除了中心频率所在频段能量较大之外,相间的 S_{83} 频段能量所占比重也较大。当缺陷深度为0.5 mm时,反射回波能量在 S_{81} 频段分布最大,能量比值为0.3213,这是因为其中心频率位于 S_{81} 和 S_{82} 分界线的边缘,导致信号能量发生波动,与其相间的 S_{83} 频带能量比值为0.2213, S_{81} 、 S_{83} 占总能量的54.26%;当缺陷深度为0.6 mm时,中心频率所在频段能量为0.476,与其相间的 S_{83} 频带能量比值为0.1804, S_{81} 、 S_{83} 占总能量的65.64%;当缺陷深度为0.7 mm时,中心频率所在频段能量为0.3594,与其相间的 S_{83} 频带能量比值为0.2696, S_{81} 、 S_{83} 占总能量的62.9%。

由以上分析可知:1)当缺陷深度从0.2 mm增加到0.4 mm时,中心频率逐渐减小,且中心频率所在频段与相邻较高能量所在频段的能量之和逐渐增加;在 S_{81} 频段,反射回波的能量随着深度的增加呈上升趋势,表明低频成分逐渐增多;在 S_{83} 频段,反射回波的能量随着深度的增加呈下降趋势,表明高频成分逐渐减少;信号能量主要集中于相邻的两个频带上。2)当缺陷深度从0.5 mm增加到0.7 mm时,中心频率对应的 S_{81} 频带能量比值最大,在 S_{80} 频段上,能量随着缺陷深度的增加逐渐增大,表示信号的低频成分增多,在 S_{82} 频段,能量随着缺陷深度的增加逐渐减小,表明信号的高频成分逐渐减少;信号能量主要集中于相间的两个频带上。

5 结论

本文在现有理论上通过搭建好的激光超声检测实验装置,进行了多次实验,通过使用小波包能量分解,研究了在不同缺陷裂纹深度下,反射回波信号所对应不同频带的能量分布情况。

实验分析结果表明:1)反射回波信号在0~7.816 MHz间的能量占到总能量的90%左右,这表明反射回波信号的能量在频域上虽然分布广,但大多数的能量集中于低频段,信号中大于7.816 MHz的高频成分对应的能量占总能量的比重较少;2)信号的能量更加集中于中心频率所在的频带附近;3)对超声表面缺陷信号的能量进行分析时,仅考虑信号的中心频率所在频带并不能很准确地分析信号的特征信息,而应综合考虑多个频带的影响。

基金项目

教育部博士点基金联合资助项目(2013142012007)资助。

参考文献

- Sun Guangkai, Zhou Zhenggan, Li Guanghai, et al. Development of an optical fiber-guided robotic laser ultrasonic system for aeronautical composite structure testing[J]. *Optik*, 2016, **127**(12): 5135–5140.
- Liu I H, Yang Chehua. A novel procedure employing laser ultrasound technique and simplex algorithm for the characterization of mechanical and geometrical properties in Zircaloy tubes with different levels of hydrogen charging[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2011, **408**(1): 96–101.
- Ayers J, Apetre N, Ruzzene M, et al. Measurement of Lamb wave polarization using a one-dimensional scanning laser vibrometer (L)[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2011, **129**(2): 585–588.
- Zeng Rongjun. Experimental research of the laser ultrasonic surface wave detection[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2012.
曾荣军. 激光超声表面波检测的实验研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2012.
- Cao Jianshu, Cao zhen, Zhao Longfei, et al. Detecting techniques of surface crack of surface crack of pipeline based on laser ultrasonic[J]. *Opto-Elec Eng*, 2016, **43**(3): 1–6.
曹建树, 曹振, 赵龙飞, 等. 激光超声管道表面裂纹检测技术[J]. *光电工程*, 2016, **43**(3): 1–6.
- Dubois M, Drake T E, Jr. Evolution of industrial laser-ultrasonic systems for the inspection of composites[J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2011, **26**(3–4): 213–228.
- Dubois M, Drake T E, Osterkamp M. Low-cost ultrasonic inspection of composites for aerospace applications with Laser UT® technology[J]. *Journal of the Japanese Society for Non-Destructive Inspection*, 2008, **57**(1): 11–20.
- Lee J R, Chia C C. Laser ultrasonic anomalous wave propagation imaging method with adjacent wave subtraction: algorithm[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, **44**(5): 1507–1515.
- Zhou Zhenggan, Sun Guangkai, Li Zheng, et al. Application of laser ultrasonic testing technique on the detection of composite structures[J]. *Journal of Harbin University of Science and Technology*, 2012, **17**(6): 119–122.
周正干, 孙广开, 李征, 等. 激光超声检测技术在复合材料检测中的应用[J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2012, **17**(6): 119–122.
- 孙延奎. 小波分析及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 245–260.
- Ling Tonghua, Li Xibing. Analysis of energy distributions of millisecond blast vibration signals using the wavelet packet method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, **24**(7): 1117–1122.
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.
- Zhu Quanjie, Jiang Fuxing, Yu Zhengxing, et al. Study on energy distribution characters about blasting vibration and rock fracture microseismic signal[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, **31**(4): 723–730.
朱权洁, 姜福兴, 于正兴, 等. 爆破震动与岩石破裂微震信号能量分布特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, **31**(4): 723–730.
- Lu Liang, Long Yuan, Xie Quanmin, et al. Decomposition and energy distribution of blasting vibration signal based on second generation wavelet packet (SGWP)[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2013, **33**(2): 140–147.
路亮, 龙源, 谢全民, 等. 爆破振动信号的提升小波包分解及能量分布特征[J]. *爆炸与冲击*, 2013, **33**(2): 140–147.