

声发射信号特征分析中的小波变换应用方法

庆光蔚^{1,2}, 岳 林¹, 冯月贵², 王会方²

(1. 南京航空航天大学, 南京 210016; 2. 南京市特种设备安全监督检验研究院, 南京 210002)

摘 要:对声发射信号进行分析与处理是目前获取声发射源信息的唯一有效途径,也是声发射技术发展的难点和瓶颈。针对声发射信号的特点,对小波变换用于声发射信号的特征分析问题进行了研究,总结出了适用于声发射信号的小波变换信号特征提取方法,并对未来小波变换在声发射领域的应用与研究方向进行了探讨。

关键词:声发射;小波变换;特征提取;信号处理

中图分类号: TG115. 28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2012)11-0048-04

Analysis of Acoustic Emission Signal Features Based on Wavelet Transform

QING Guang-Wei^{1,2}, YUE Lin¹, FENG Yue-Gui², WANG Hui-Fang²

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Nanjing Special Equipment Inspection Institute, Nanjing 210002, China)

Abstract: Acoustic emission signal processing is the only effective method to acquire the acoustic emission source information by now and is also the bottleneck that affects its positive development. According to the characteristic of acoustic emission signal, a wavelet-based method of signal feature analysis was presented. The developing tendency of the application of wavelet transform in acoustic emission was discussed finally.

Keywords: Acoustic emission(AE); Wavelet transform; Feature extraction; Signal processing

声发射检测技术以其独特的优点(高灵敏度、实时在线、非破坏、操作简便、信息量丰富、在役检测等),已经在监视刀具破损和磨损、评价压力容器结构完整性、大型起重设备的应力状态测试以及旋转机械和飞机结构监视系统研究、泄漏检测等方面取得了一定成果^[1]。由于材料组织结构变化的动态信息,如开裂、裂纹扩展等,能够通过声发射信号的特征和强弱予以反映,因此声发射技术是评价结构完整性、分析结构破坏全过程和预报构件使用过程中的形变、疲劳、失稳等危险信息动态检测的有效手段。而如何准确捕捉到声发射信号,并从中提取反映声发射源性质的特征,从而精确识别材料结构变化信息并准确定位,是声发射技术应用中需要解决

的重要问题。

由于受声发射源自身多样性、声发射信号传播路径不稳定性、环境干扰噪声等多重复杂因素的影响,声发射传感器输出的电信号属于一种非平稳随机信号。且材料结构变化释放能量具有突发性,即声发射信号同时也是一种瞬态信号。因此需要利用合适的信号处理技术才能从中有效提取出声发射源的信息。声发射信号处理方法主要有波形分析法、特征参数分析法等。特征参数分析法所记录的信号信息量大,检测仪器的实时分析性强,是目前声发射检测中使用的主要方式^[2-4],但是其无法解决时间和频率分辨力的矛盾。而作为波形分析法之一的小波变换的良好时频局部化特性,可以使此问题得以有效的解决^[5-6],十分适合分析具有突发瞬态性和非平稳特点的声发射信号,具有深入研究的价值。

1 声发射信号本质特点

声发射信号的本质是材料或结构内部受外力作

收稿日期: 2012-09-14

基金项目: 国家质检总局科技计划资助项目(2009QK149)

作者简介: 庆光蔚(1985—),女,博士生,主要研究方向为电梯、起重机械检验检测技术。

用发生形变、断裂时突然释放能量而产生的一种弹性应力波,因此本质上声发射信号是一种机械波,具有波的基本特性:波动性和衰减性。

声发射信号的简单物理模型为:

$$s(t) = A(t)e^{j\theta(t)} \quad (1)$$

式中: $A(t)$ 和 $\theta(t)$ 分别是声发射信号的波形包络幅值调整公式与频率调整公式。一般地,这两个公式均是未知的,并遵循随机分布的规律。

声发射信号具有以下基本特点:

(1) 瞬态随机性。声发射信号具有随机性,只有当外部条件满足一定条件时,材料内部才会出现一个瞬态弹性应力波,释放能量,然后迅速衰减。此过程类似于一个瞬态的冲击信号,由于能量释放的瞬态性,而使声发射信号具有时变性,声发射信号属于非平稳随机信号。

(2) 多态性。机械波在固体介质中传播是一个复杂的过程,在此过程中不但包括多种模式的波,如纵波、横波、表面波等,而且还会发生模式的转换。此外,声发射信号在传播介质内还会发生波的反射、折射等,此种影响随着传感器与声发射源的位置不同而不同。这些传播过程中产生的影响也可能是一种干扰,且难以去除。

(3) 对于突发性信号而言,声发射信号前端的时域波形具有近似为指数衰减的波形特征,持续时间往往只占整个信号采样时间的很少一部分。

如前所述,声发射信号表现为一种多模态、非平稳、非线性的信号。对于这种复杂信号,常规的特征提取方法难以对声发射源进行科学和准确的解释。需要新型的声发射信号特征提取技术来解决,而小波分析是目前分析该类信号最有效的方法之一,它可以把声发射信号分解成不同频率范围内的系列子信号,通过对小波分解的各个子信号的分析等来获取声发射源的特征。

2 小波分析在声发射信号处理领域的引入

将小波引入到声发射信号处理中始于 20 世纪 90 年代。1996 年, Qi^[7]在其博士论文中研究了小波在复合材料中的应用,主要讨论了不同的小波基的声发射信号分解特征,认为 db 小波是符合声发射信号特点的。1998 年,崔岩^[8]等研究了基于声发射小波分析的非连续增强金属复合材料界面特征。

随后小波被迅速应用到多种材料的声发射领域。Ni^[9]研究了小波在单纤维合成物破坏时声发射

处理中的应用。Chen^[10]将小波应用到焊接上。Jeong^[11]用小波研究了在复合材料中板波传播特性。Yang^[12]研究了隔热层拉伸时声发射信号的 db 小波去噪。Ng^[13]和 Qi^[14]等人研究了材料疲劳破坏时丙烯酸粘结陶瓷声发射信号和炭纤化合物声发射信号的小波分解特征。Wang 和 Chu 用小波对轴承转子的微小摩擦点声发射信号进行了定位^[15]。Liao^[16]用小波对磨轮声发射信号进行了监控。何和金等人分别研究了小波在岩石声发射信号中的特征提取应用^[17]和小波基的选择^[18]。总的来说,目前小波分析在声发射技术方面的研究工作主要集中在以下三个方面:声发射信号的特征分析,声发射源的定位分析和声发射信号的传播特性、衰减特性等性质的研究。其中,信号特征量的提取是定位分析和传播衰减特性分析的基础,也是声发射技术工程应用中需要突破的关键点。

3 小波变换声发射信号特征提取理论基础

3.1 小波变换的概念

设 $f(t) \in L^2(R)$, 连续小波变换^[19]是将 $\phi(t)$ 作平移 b , 在不同伸缩尺度 a 下与被分析信号 $x(t)$ 作内积运算, 得到:

$$W_x(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{\mathbb{R}} x(t) \phi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (2)$$

式中 a 称为尺度因子; b 称为时间因子; ϕ^* 为 ϕ 的共轭函数。

在应用中将 a 和 b 取做整数离散形式。选择 $a = a_0^m$ ($a_0 > 1$)、 $b = na_0^{-m}b_0$ ($b \in \mathbb{R}; m, n \in \mathbb{Z}$), 就得到 $x(t)$ 的离散小波变换:

$$W_f(m, n) = \langle f(t), \phi_{m,n}(t) \rangle = \int_{\mathbb{R}} f(t) \phi_{m,n}^*(t) dt \quad (3)$$

3.2 多分辨率分解算法

特征提取基于的多分辨率分解算法(Mallat 算法)是 S Mallat 提出的。该算法并不直接计算离散小波变换的积分式(式(3)),而是根据正交小波基函数 $\phi(t)$ 与尺度函数 $\phi(t)$ 构造一个低通滤波器 $H(\omega)$ 和一个高通滤波器 $G(\omega)$ (冲击响应函数分别对应 $h(n)$ 和 $g(n)$), 其分别满足:

$$|H(\omega)|^2 + |H(\omega + \pi)|^2 = 1, H(0) = 1 \quad (4)$$

$$G(\omega) = e^{-j\omega} \bar{H}(\omega + \pi) \quad (5)$$

设声发射信号的离散采样序列为 $f(n)$, 并令 $f(n)$ 为尺度 0 上的近似信号, 则具体分解算法为:

$$\begin{cases} A_0^d f = f(n) \\ D_j^d f = \sum_k g_{k-2n} A_{j-1}^d f \\ A_j^d f = \sum_k h_{k-2n} A_{j-1}^d f \end{cases} \quad (6)$$

即在每一个小波分解尺度 j 上,对上一尺度的近似信号与低通滤波器和高通滤波器分别做卷积运算。其中 $D_j^d f$ 为分解尺度 j 上的小波分解高频系数, $A_j^d f$ 为分解尺度 j 上的小波分解低频系数, g_{k-2n} 和 h_{k-2n} 分别为高通滤波器冲击响应函数 $g(n)$ 和低通滤波器冲击响应函数 $h(n)$ 中每相邻两系数间插入 $j-1$ 个零点构成的新冲击响应函数。由于基于小波变换的信号多分辨率分解是完备无冗余的分解,因而可以由分解结果 $\{A_j(n)\} \cup \{D_j(n) | 1 \leq j \leq J\}$ 在分解尺度 j 上对信号进行低频成分和高频成分的重构。算法如下:

$$\begin{cases} D_j f(n) = \sum_k \bar{g}_{n-2k} D_j^d f \\ A_j f(n) = \sum_k \bar{h}_{n-2k} A_j^d f \end{cases} \quad (7)$$

由此,信号 $f(n)$ 经过 J 尺度的小波分解后的表达式为:

$$f(t) = A_J f(t) + \sum_{j=1}^J D_j f(t) \quad (8)$$

由式(8)可见,基于 Mallat 算法的小波分析是通过把信号分解成不同频率范围内的时域信号分量来实现的,反应低频的局部信息表现在分解尺度较高的分解分量中,反应高频的局部信息表现在分解尺度较低的分解分量中。此种把信号分解成不同频率范围成分的多分辨率分析思想是目前应用小波变换分析研究声发射信号特征的理论基础。

4 小波变换声发射信号特征提取的基本方法

对于一个给定的声发射信号 $f(n)$,利用小波变换 Mallat 算法,以较小的维数描述其特征,可按以下步骤实现:

(1) 选择合适的小波基。结合声发射信号的特点及工程中对声发射信号分析的要求,用于声发射信号分析的小波基应满足以下条件:① 对于大数据量信号能够满足快速处理要求。② 小波基应对缺陷信号敏感,而对结构噪声不敏感,即变换后的尺度上应较好地包含和表征缺陷信息。③ 至少应具有—阶消失矩。④ 有效的增强有用信息,压制无用信息。⑤ 良好的时频分析性能。综合考虑以上几方面的要求,在目前工程中常用的小波基中可选用对

称的双正交小波(如 B 样条小波)和有一定近似对称性的正交小波(如 Coiflet 小波、Symlets 小波、Daubechies 小波)。

(2) 确定小波分解的级数 J 。若信号中需分析的最低有效频率成分 f_{\min} 为已知,则要求:

$$\frac{f_s}{2^{J+1}} \leq f_{\min} \quad (9)$$

式中 f_s 为采样频率。

即级数 J 应满足:

$$J \geq \log_2 \frac{f_s}{f_{\min}} - 1 \quad (10)$$

同时还需满足基于 Mallat 小波分解的最大分解尺度公式:

$$J_{\max} = \min \left[\text{int}(\log_2 N), \text{int} \left(\log_2 \frac{N}{L_f} + 1 \right) \right] \quad (11)$$

式中 L_f 为冲击响应函数的系数个数, \min 表示取最小值, int 表示取整数。

只有满足式(11),对信号进行小波变换的每个分解尺度才具有明确的物理意义,在此基础上对信号的特征分析才有意义^[19]。

(3) 采用式(6)对信号 $f(n)$ 进行尺度 J 的小波分解,并利用式(7)对小波分解后的 $J+1$ 个频率范围的成分进行重构。

(4) 对各重构时域信号进行傅立叶变换,获取各个分解尺度上的详细频谱信息。

$$\begin{aligned} A_J F(\omega) &= \sum_{n=0}^{N-1} [A_J f(n)] e^{-j \frac{2\pi}{N} n \omega}, \\ 0 &\leq \omega \leq (N-1) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} D_j F(\omega) &= \sum_{n=0}^{N-1} [D_j f(n)] e^{-j \frac{2\pi}{N} n \omega}, \\ 0 &\leq \omega \leq (N-1), j = 1, 2, \dots, J \end{aligned} \quad (13)$$

由于信号小波分解的分量中蕴含着信号的特征,对信号每个小波分解尺度上的时域信号和频谱进行分析,就能够提取出反映声发射信号特征的特征值。

5 工程应用与未来研究方向

小波分析给声发射信号处理技术带来了新的生机,大量文献表明,它在声发射信号特征提取研究中被广泛采用,涉及桥梁拉索疲劳损伤、刀具磨损监测、新型材料和金属裂纹等领域。如,李冬生^[20]等将待分析的声发射能量与时间参数信号进行小波奇异性分析,利用 db3 小波经过 5 级分解并降噪,能够

清晰地了解各阶段信号突变情况,以进一步确定对应多龄期斜拉索损伤发生的时刻及特征;李录平^[21]等发现,将声发射信号经绝对值解调后实行二进小波变换,得到的变换信号的波峰个数就等于声发射信号的事件数,不需要对原信号设置阈值电平,也不需要原始信号进行低通滤波,大大简化了信号的处理过程,提高了声发射信号特征参数检测的准确率。文献[22—24]以声发射信号能量作为刀具磨损的特征参数,对所关注的某一频带的信号作小波分解,根据分解信号的能量判断刀具磨损的程度。KWON^[25]等利用小波分析方法提取针对复合材料不同损伤的声发射波相应的单一频率或某一很窄的频率段内的波形,选择形成波形的峰值,对衰减信号进行有效的补偿,从而实现声发射源的准确定位。随着已有的小波和小波包分析方法在信号处理领域应用的不断深入,以及新的第二代小波“提升法”理论^[26]的提出,小波分析理论在声发射信号处理中将会得到更为广泛、深入的应用。

目前还有许多尚待解决的课题:

(1) 声发射的物理基础研究方面一直没有取得根本性的突破,缺乏有关“小波分析在声发射信号检测中应用”的物理模型实验研究,仍然需要深入探讨小波分析所起的作用,获取对不同类型的声发射信号小波处理的共性特点。

(2) 声发射检测仪器已经进入了参数和波形混合分析的发展阶段,不过仍然是以参数分析为主,以小波变换为典型代表的波形分析技术的优势仍未得到完全发挥,还需要从广度和深度上进行一定的拓展。

(3) 小波分析应用于声发射信号处理的研究已经有相应的理论基础,取得了一些有意义的研究结果。但大多数研究都只是处于实验室条件下,将其应用于实际工程检测中尚经验不足。目前声发射信号小波分析的重要研究目标和发展方向就是如何把小波分析引入到声发射检测工程中,解决实际工程问题。

(4) 鉴于工程实际的复杂性和研究对象的多样性,仍然需要在小波分析的基础上,把其与分形理论、模式识别、人工智能、控制理论和材料结构等多学科技术结合起来,构建有效的声发射信号特征信息提取算法,以实现声发射源更精确的定性、定量和定位分析。

参考文献:

- [1] Droulliard T F. A history of acoustic emission[J]. Journal of Acoustic Emission, 1996, 14(1): 1—34.
- [2] 王海丽, 张广鹏, 翁德玮, 等. 刀具破损状态的特征提取及自动识别[J]. 制造技术与机床, 2001(12): 23—25.
- [3] 沈功田, 耿荣生, 刘时风. 声发射信号的特征分析方法[J]. 无损检测, 2002, 24(2): 72—77.
- [4] 耿荣生, 沈功田, 刘时风. 声发射信号处理和分析技术[J]. 无损检测, 2002, 24(1): 23—28.
- [5] Sung D U, Kim C G, Hong C S. Monitorin of impact damage in composite laminates using wavelet transform[J]. Composites Part B: Engineering, 2002, 33(1): 35—44.
- [6] Jeong H, Jang Y S. Fracture source location in thin plates using the wavelet transform of disperse waves[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2000, 47(3): 612—619.
- [7] Qi G. Wavelet-based acoustic emission analisis of composites[D]. Texas Tech University, 1996.
- [8] 崔岩, 李小仰, 彭华新. 基于声发射小波分析的非连续增强金属基复合材料界面表征[J]. 科学通报, 1998, 43(6): 656—657.
- [9] Ni QQ, Iwamoto M. Wavelet transform of acoustic emission signals in failure of model composites[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2002, 69: 717—728.
- [10] Chen C, Kovacevic R, Jandgric D. Wavelet transform analysis of acoustic emission in monitoring friction stir welding of 6061 aluminum[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003, 43: 1383—1390.
- [11] Jeong H, Jang YS. Wavelet analysis of plate wave propagation in composite laminates[J]. Composite Structures, 2000, 49: 443—450.
- [12] Yang Li, Zhou Yi-Chun. Wavelet analysis of acoustic emission signals from thermal barrier coatings[J]. Trans. Nonferrous Met. Soc, 2002, 16: 270—275.
- [13] Ng E T, Qi G. Material fatigue behavior characterization using the wavelet-based AE technique—a case study of acrylic bone cement[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2001, 68: 1477—1492.
- [14] Qi G, Barhorst A, Hashemiet J. Discrete wavelet decomposition of acoustic emission signals from carbon-fiber-reinforce composites[J]. Composites Science and Technology, 1997, 57: 389—403.
- [15] Wang Q, Chu F. Experimental determination of the rubbing location by means of acoustic emission and

(下转第 65 页)

处 A 级有效声发射源,不需要进行复验,与风洞动态调试,流场标测,标模试验及型号试验的验证和实体检查结果相一致,认定上述结构安全可靠,各项指标均符合相关标准的要求。

4 存在的问题

由于定位方法、筋板结构、承压壳体形状不规则、支座较大等原因,导致定位困难,稳压段局部实现面定位,大开角段、收缩段只能实现区域定位;部分升压阶段存在人员巡视、检查等噪声信号源;水压试验后经内部宏观检查发现脚手架等内部构件和点焊部位多处变形和拉裂,这些变形与拉裂同样引起了声发射检测信号,造成干扰;增压试验升压速度太快,没有与之匹配的声发射检测标准;增压试验过程中,现场噪声较高,引起声发射信号较多,需通过一定的滤波程序予以剔除。

5 结论

针对某风洞承压壳体及主进气管道水压试验、DN2400/DN600 中压管道改造工程竣工通气试验及某风洞承压壳体增压试验下的声发射状态检测,可以得出以下结论:

(1) 通过干扰噪声排除、常规无损检测复验等措施,风洞承压壳体及其中压气源管道等规则薄壁典型结构在耐压试验状态下能够有效开展声发射检

测,实现缺陷监控和结构完整性评价。

(2) 声发射检测能够对风洞承压壳体及其中压气源管道等的耐压试验过程进行实时监控,对结果实现有效、可靠的评价。

(3) 风洞承压壳体在役状态下增压试验时能够通过声发射检测,实现对风洞承压壳体状态进行有效评估和结构完整性评价。

(4) 声发射检测能够对风洞承压壳体耐压试验时内部构件的变形和拉裂等,进行实时监控。

(5) 由于结构复杂等原因,风洞承压壳体各检测区域全部实现声发射源平面定位存在难度;增压及耐压试验过程中,噪声干扰源较多;增压试验升压速度过快等,影响了声发射检测的可靠性。

参考文献:

- [1] 姚力. 大型结构主进气管道的声发射监测[C]. 中国第十二届声发射学术研讨会论文集, 南京, 2009.
- [2] GJB 4253—2001 增压风洞水压试验技术标准[S].
- [3] 姚力. 大型结构承压壳体水压试验的声发射监测[J]. 无损检测, 2011, 33(12): 48—50.
- [4] GB/T 18182—2000 金属压力容器声发射检测及结果评价方法[S].
- [5] 姚力. 16Mn 钢疲劳裂纹的声发射信号检测[C]. 第八届全国无损检测学术会议论文集, 成都, 2003.
- [6] 姚力. 几种典型声发射信号的特征参数分布[J]. 无损探伤, 2004, 28(2): 19—22.
- [7] 李录平, 邹新元, 唐月清. 小波变换在声发射信号特征参数检测中的应用[J]. 振动与冲击, 2001, 20(2): 67—68.
- [8] 王希, 肖毅, 龚廷凯, 等. 干切削过程刀具磨损、破损监测与分析[J]. 机械科学与技术, 2009, 28(3): 350—355.
- [9] 龚廷凯, 王细洋. 基于声发射信号的高速铣削过程监测技术[J]. 航空制造技术, 2009(7): 80—83.
- [10] 谢剑峰. 铣刀切入切出阶段声发射信号特征的研究[J]. 制造技术与机床, 2011(9): 94—97.
- [11] Yang K O, Chan J Y. Source location in plate by using wavelet transform of AE signals[C]. 14th International AE Symposium & 5th AE World Meeting. Hawaii, 1998: 9—14.
- [12] Sweldens W. The lifting scheme: a construction of second generation wavelets[J]. SIAM Journal on Mathematical Analysis, 1998, 29(2): 511—546.
- [13] 何建平, 王宁. 基于小波变换的岩体 AE 波形特征研究[J]. 工矿自动化, 2007, 4: 14—18.
- [14] 金解放, 赵奎, 王晓军. 岩石声发射信号处理小波基选择的研究[J]. 矿业研究与开发, 2007, 27(2): 12—16.
- [15] Jaideva C. Goswami. 小波分析理论、算法及其应用[M]. 许天周, 黄春光, 译. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [16] 李冬生, 胡倩, 李惠, 等. 多龄期桥梁斜拉索疲劳损伤演化声发射监测技术研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(4): 67—71.
- [17] Liao Warren, Tian Chi-Fen, Qu J, et al. A wavelet-based methodology for grinding wheel condition monitoring[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47: 580—592.

(上接第 51 页)

wavelet transform[J]. Journal of Sound and Vibration, 2001, 248(1): 91—103.