

信号处理
专题综述

声发射源特征识别的最新方法

李光海, 刘时风, 耿荣生¹⁾, 沈功田²⁾
(清华大学 机械系, 北京 100084)

摘要: 介绍多传感器数据融合、时频能量模式分析及分形理论识别声发射源特征的方法, 说明基于波形分析的现代信号处理技术是揭示声发射源及信号传播规律的重要手段。

关键词: 声发射检验; 多传感器数据融合; 时频能量模式; 分形理论; 信号处理

中图分类号: TG115. 28 文献标识码: A 文章编号: 1000-6656(2002)12-0534-05

THE UP-TO-DATE METHODS FOR ACOUSTIC EMISSION SOURCE RECOGNITION

LI Guang-hai LIU Shi-feng GENG Rong-sheng SHEN Gong-tian

(Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The methods of multi-sensor data fusion, time-frequency-energy (TFE) pattern analysis and fractal theory for recognizing acoustic emission (AE) sources are described. Contemporary signal processing techniques are important to extract the characteristics of AE sources and the law of wave propagation.

Keywords: Acoustic emission testing; Multi-sensor data fusion; Time-frequency-energy pattern; Fractal theory; Signal processing

与其它无损检测方法相比, 声发射 (AE) 检测技术有其自身优点, 尤其是对大型构件的整体性检测, 更能表现出其经济、快速和合理的特点。工程上无损检测的目的是为了对缺陷进行定位、定量和定性分析。人们对声发射源的定位 (线性、平面和空间) 和定量 (能量、幅度和活性等) 方面都进行了较深入的研究, 并已制订了相应的判别标准 (如 GB/T18182 等)。但对声发射源的定性方面研究较少, 其中的主要原因之一是声发射仪器的制约, 使人们无法对声发射信号进行全波形采集。随着计算机软、硬件技术的飞速发展, 基于计算机的测量技术也有了质的提高。已经出现了全波形数字化采集的声发射仪器, 这给声发射源的定性识别带来了可能, 也有人开始进行声发射模式识别方面的研究^[1,2]。对于声发射波形的分析, 根据采集到的波形进行合理的软硬件设置, 以提取任何感兴趣的声发射参数, 而

这已经大大超越传统意义上的声发射参数技术。另外, 通常工程上使用的构件都是一个方向的尺寸远小于另外两个方向尺寸的板状构件, 而从板波理论可知, 声发射信号在传播过程中会产生多种模式的波, 而不同模式波的传播速度不同, 若能针对某一模式的波进行时差和波速计算, 就能实现声发射源更精确的定位。以下简述声发射源识别的最新研究成果, 即声发射源的多传感器数据融合识别技术、时频能量模式分析技术和声发射信号的分形处理技术。

1 声发射源多传感器数据融合识别技术^[3~5]

在声发射检测中, 为了达到较为精确的定位, 通常采用时差定位方法, 这就需要两个或两个以上的传感器组合使用。如平面三角形定位, 用三个传感器为一个定位组。而以前所进行的声源特性识别方面的研究, 都只是针对某一传感器的信号进行分析识别。由于声发射信号具有瞬态性和随机性, 属于非平稳的随机信号, 并且是由一系列频率和模式丰富的信号组成, 而且在声波的传播过程中, 又存在着衰减、反射、折射与模式转换, 所以对同一声发射源的分析识别, 定位组的各个传感器的结果可能不

收稿日期: 2002-11-06

1) 北京航空工程技术研究中心, 北京 100076

2) 国家质量监督检验检疫总局锅炉压力容器检测研究中心, 北京 100013

同。在这种情况下,要想获得较高的识别可信度,就必须有一种方法对所获得的矛盾信息进行处理,对检测到的信号进行合理支配和使用,把多个传感器关于同一声发射源冗余或互补信息依照某种准则进行组合,减少识别过程中的不确定性,才能获得对声发射源的正确判断。尤其是对同一检测对象,采用不同类型的声发射传感器(如宽带和谐振等),到底更应该相信那个传感器的结果;更复杂的是,当同时存在超声或者应力应变等传感器的检测结果时,如何利用所有类型和不同位置传感器的信息,得到最为真实的结果,就显得非常重要。

1.1 基于 D-S 理论的声发射源识别方法

从声发射源发出的信号经过传输介质到达传感器,信号会发生变化或损失,各个传感器检测到的波形信号一般是不完整、不精确、模糊的,甚至可能是矛盾的,即包含着过程的不确定性。我们只能根据这些不确定性信息进行分析推理,最终得出声发射源的定性判别。不确定性推理最常用的方法有 Bayes 方法和 D-S 证据理论两种。与 Bayes 方法相比, D-S 证据理论有一个非常突出的优点,就是无需先验概率和条件概率,这对声发射检测这类几乎没有先验知识和专家库的新型技术显得非常有用,而且各个传感器之间的证据是相互独立的,每个定位组的探头数一般为三四个,推理链不长,使用 D-S 规则非常方便。

对于声发射源识别的数据融合模型结构按数据抽象的层次划分主要有三类,即数据级融合、特征级融合和决策级融合。根据声发射信号的特点,一般选择最高层次的融合方法,即决策级融合。由于球罐和桥梁等大型构件通常采用数十个通道同时进行信号采集,而且一般声发射检测持续的时间较长,当进行全波形采集时数据量非常大,要对所有定位相关组的传感器进行集中决策处理会大大降低系统的效率和实时性。所以,在各个传感器局部目标识别的基础上,进行全局决策的结构比较适合声发射检测的特点,操作起来非常灵活,也有利于减少系统的复杂程度,使整个决策系统清晰可靠。在一个或几个传感器判断失效的情况下仍能继续工作,即系统具有一定的容错能力,总能得到一个唯一的识别结果。这对保证工程检测结果能够得到一个最终的安全性评价十分必要。此外,在工程上对于同一个声发射源还可能进行其它检测方法(如超声和射线等)的复验,以保证最终结果可靠。采用这种决策级的

融合结构可以方便地对不同类型传感器或者检测方法的局部识别结果进行扩充融合,而不必对已有的系统结构作过多的修改。

应用 D-S 证据理论的关键是如何构造基本概率分布函数。D-S 理论本身并没有现成的表达式,使用者应根据经验或具体的统计证据构造。对声发射检测的具体情况,构造如下概率分布函数^[4]。设 N 为同一定位组中传感器的数目(对于三角形定位 $N=3$), M 为声发射源的种类(如裂纹、泄漏、外部噪声等)数,则

$$m_i(j) = \frac{C_i(j)}{\sum_j C_i(j) + N(1-R_i)(1-\alpha_i\beta_i\check{\alpha}_i)} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

$$m_i(\theta) = \frac{N(1-R_i)(1-\alpha_i\beta_i\check{\alpha}_i)}{\sum_j C_i(j) + N(1-R_i)(1-\alpha_i\beta_i\check{\alpha}_i)} \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (2)$$

式中 $C_i(j)$ ——传感器 i 与声发射源类别 j 之间的属性测度

R_i ——置信度

$\check{\alpha}_i$ ——位置权重

α_i ——传感器 i 与各目标的最大相关系数

$\alpha_i = \max\{C_i(j)\}$

β_i ——传感器 i 与各目标相关系数的分布函数

$\beta_i = \frac{\alpha_i}{\sum_j C_i(j)}$

$m_i(j)$ ——传感器 i 赋予目标类别 j 的基本概率分布值

$m_i(\theta)$ ——传感器 i 赋予识别框架 Θ 的基本概率值,即传感器 i 的不确定性概率值

式中的 $\alpha_i\beta_i\check{\alpha}_i$ 项,其物理意义是传感器与识别声发射源之间的置信测度,与传感器本身的可靠性无关,主要是声发射源发出的信号在传播过程所造成的影响,与具体的检测对象以及所采用的定位阵列有关。 $C_i(j)$ 是单个传感器的识别结果,一般通过小波及神经网络的处理获得属性测度值。当使用不同类型的传感器时,可以根据试验结果对 R_i 进行赋值,如采用宽带传感器和谐振传感器,可以赋予不同的置信度,通常在实际检测中,都使用同一种类型的传感器,那么将忽略此项。由于实际声发射检测中各传感器分布在构件的不同区域,局部结构的不连

续都会给波的传播模式带来影响, 从而影响声发射源识别的正确性, 此时用 α_i 修正。

1.2 识别过程

在声发射源识别过程中, 以平面三角形定位为例, 当定位组中有声发射信号发生时, 信号的波形分别被该定位组中的三个传感器接收, 经放大并进行一定的滤波调理后, 由高速 A/D 转换器将模拟信号数字化, 然后存储于计算机中, 可供事后分析。在实时采集时, 只提取一些主要参数供检测时监控使用, 对于有定位要求的还要显示定位的事件。采集时一般不进行识别过程的处理, 主要是保证不丢失声发射信号, 在信号量较少的情况下, 可以选择实时识别。对信号和通道数较多, 且需进行实时识别时, 可采用分布式系统, 下位机实现信号的采集与传输, 上位机进行实时处理, 并及时显示结果。识别时, 为了提高神经网络局部识别的能力, 需对原始信号进行预处理以提取信号特征。小波分析对瞬态信号有较好的局部时频特性, 所以采用小波分析的方法进行信号特征提取。提取特征的信号送入神经网络进行单个传感器的局部目标分类。输出的值用于构造 $m_i(j)$ 和 $m_i(\theta)$ 函数, 再按 Dempster 合并规则, 得到最终的基本可信度的分配值。最后, 依照各命题的可信度和似然度等指标, 用全局决策规则得到目标识别的结果, 其实现过程见图 1。

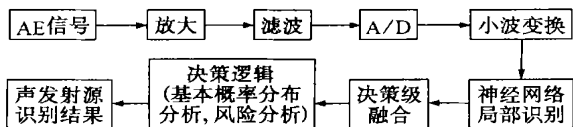


图 1 声发射源识别的实现过程

2 声发射信号时频能量模式分析技术

从声源发出的声发射信号在固体材料中传播时, 声波会发生形态变化和模式转化。由于传播速度不同, 传感器接收信号的时频特征也各不相同。很显然, 声发射源的特征和传播过程都会影响接收信号的时频能量分布模式 (TFE 模式), 反过来, 能不能通过接收信号的时频能量分布模式来推断声源以及传播过程的特征, 最新文献表明人们已经开始进行这方面的研究, 并取得令人鼓舞的成果^[9]。对于一个特定的研究对象, 上述问题可表述成通过对传感器信号的 TFE 模式分析, 可进行声源特征和声源位置的推断, 这也是声发射技术研究的关键问题, 即对声发射源进行定性和定位。下面介绍声发射信号

时频能量提取的原理和方法。

2.1 板波理论

锅炉压力容器等领域的检测对象一般是板状结构。板状结构声波的传播满足 Lamb 方程, 其方程的解称为 Lamb 波。它由无限多个不同阶次的波组成, 称为高阶板波理论。在工程上, 通常通过一些假设来简化方程的解, 即对板厚远小于波长的薄板, 声发射源在板中主要激励起不同阶次的对称波和反对称波, 但通常低阶的对称波和反对称波占主导作用, 只取低阶模式的波作为研究对象。对于给定厚度的材料用板波理论, 很容易求各阶次波的群速度。图 2 给出了 5mm 钢板 (纵波速度为 5 900m/s, 横波速度为 3 100m/s) 0~4 阶的对称波和反对称波的群速度。这些不同模式的群速度曲线图通常被称为频散曲线。

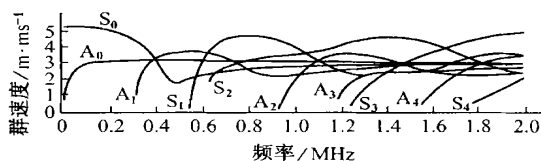


图 2 板中对称波和反对称波的群速度

频散曲线图是通过理论计算得出的声发射波在板中传播的频率、板厚和速度关系, 但它并没有包含各种模式波的能量分布。说到不同时频区间的能量分布关系, 使我们很容易想到加窗傅里叶变换和小波变换方法。

2.2 基于小波变换的时频能量模式分析^[3,6]

小波函数是具有良好的时频局部化特性的窗函数, 说一个小波基函数在时域和频域上都具有很好的局部化性质, 是指该函数在时域上集中于某一点 τ 附近, 而在频域上集中于某一点 ω 附近。信号 $f(t)$ 在此窗函数处的展开就可以显示信号在 (τ, ω) 这一点附近的状态信息。对一小波函数 $\psi(t)$, 它的时域和频域中心为

$$t^* = \frac{1}{\|\psi\|^2} \int_R t |\psi(t)|^2 dt \quad (3)$$

$$\omega^* = \frac{1}{\|\psi\|^2} \int_R \omega |\psi(\omega)|^2 d\omega \quad (4)$$

在具有显式表达的常用小波系中, 基于高斯函数的各种小波系应用非常广泛, 可以根据高斯函数选用一种小波^[9], 使其时域中心在 $t=0$ 时, 频域中心在 $\omega=\omega_0$ 。这样的窗函数有如下表达式

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{\omega_0}{\gamma_0}} \exp\left[-\frac{\left(\frac{\omega_0}{\gamma_0}\right)^2}{2} t^2\right] \exp(i\omega_0 t) \quad (5)$$

对式(4)进行傅里叶变换, 有

$$\phi(\omega) = \langle \omega(t), e^{i\omega t} \rangle = \frac{\sqrt{2\pi} \gamma_0}{\sqrt{4\pi} \omega_0} \exp \left[-\left(\frac{\gamma_0}{\omega_0} \right)^2 (\omega - \omega_0)^2 \right] \quad (6)$$

式中 ω_0, γ_0 为正常数, γ_0 取适当的值可以使式(5)满足相容性条件。对于式(5)小波基构成的伸缩系 $\psi_{a,b}(t)$, 其时域中心位于 $t=b$, 其傅里叶变换后得到的频域中心为 $\omega = \omega_0/a$, 那么声发射信号经过小波系 $\psi_{a,b}(t)$ 的变换, 其表达的时频特性是 $t=b$ 和 $\omega = \omega_0/a$ 附近的一个窗口的信息。可以令 $\omega_0 = 2\pi$, 那么, $f = \frac{1}{a} = \frac{\omega}{2\pi}$ 。也就是说通过小波变换后, 可以得到声发射信号在时间为 $t=b$ 和频率为 f 附近信息。图3就是一声发射信号经过式(5)小波变换后的 TFE 分布图。

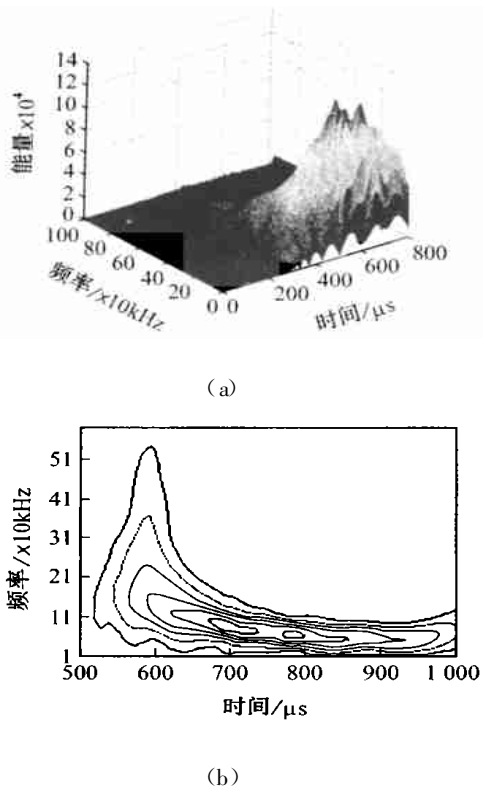


图3 声发射信号小波变换的 TFE 分布图及能量等高线图

M Takemoto 等^[7]研究过不同的声发射源以及同一种声发射源在板中不同的深度, 其 TFE 模式图是不同的, 也就是说能量在不同时间和不同模式波上的分布不同, 可以用这个分布来进行声源的特征识别。当然, 还需进行大量实验去积累不同领域内的专家知识, 以达到对声源更可靠的识别。但 TFE 分布方法至少提供了一种新的声发射源识别手段。

某一模式的波在特定频率下, 其波速可由板波理论求出(图2), 这个速度在整个传播过程中是不变的。那么, 对比不同的传感器, 同一模式、同一频率的波其不同的到达时间, 就可以实现声源更为精确的时差定位。由于这时波的速度是不变的, 从 TFE 图中计算的时差是精确的, 所以定位计算的结果就更加精确。用 TFE 分析技术还可实现更少传感器的定位, 如进行线性定位只用一个传感器即可。对于线性定位, 可用两个传感器中同一模式和频率的波来计算时差进行定位, 进行 TFE 分析后, 也可用一个传感器接收到的不同模式和频率的波的到达时间的不同来进行定位计算。有所区别的是, 前者用于计算的波速是相同的, 而后者利用不同的波速进行计算。

3 声发射信号的分形处理技术

分形理论建立了规则、光滑形体与粗糙、破碎形体之间的联系, 以分形维数作为定量描述手段。根据分形理论, 一个形体的(整体或局部)分形维数取决于它的(整体或局部)光滑程度, 通常用分形维数来无标度地定量描述形体不规则的程度, 具有特征尺度的规则连续形体则可看成是不规则形体的一个特例。也就是说, 分形维数定量描述了形体的光滑性。那么, 也可用分形维数来表征不同声发射波形信号的特征。在不同的声发射过程或同一过程的不同状态下, 接收到的声发射信号有明显区别, 但又有某种相似性, 已有实验证明^[8], 不仅声发射信号在时域上的分布是分形的, 而且声发射事件在空间上的分布也是分形的。图4给出了三种典型信号的分形特征。

在声发射技术的各种应用中, 泄漏检测是一个相当重要的方面。下面结合管道的泄漏检测技术来

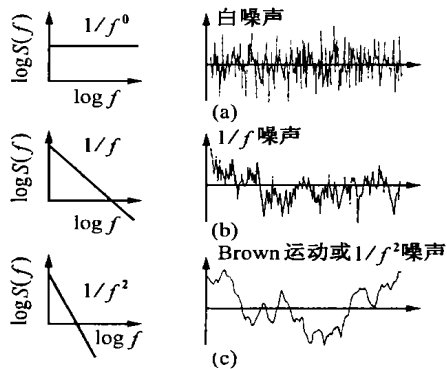


图4 典型信号的分形特征

描述分形技术在声发射信号处理中的应用^[9]。

流体泄漏的主要特征是在泄漏处形成多相湍射流,这一湍射流不但使流体的正常流动发生紊乱,而且与管道相互作用,在管壁上形成宽频应力波。检测此应力波是发现泄漏的一个有效途径,也正是声发射检漏的原理。要识别泄漏信号,必须找到与泄漏信号密切相关的特征。在实际工程检测中,一般要求两传感器所能监测的距离尽量远,但由于信号的衰减和外界噪声的干扰,常常会造成误判,所以要采取一些特殊而实用的处理手段进行声发射信号分析,分形技术不失为一种好方法。

令 $r(t)$ 表示时域泄漏信号,对于有限时间域 $[0, T]$, 功率谱密度为

$$S(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} |r(t)|^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2\pi} \left| \int_0^T r(t) e^{2\pi i f t} dt \right|^2 \quad (7)$$

若 $r(t)$ 具有分形特征,则存在一无标度区间(某个频段)其功率谱密度与频率间存在幂指数关系

$$S(f) = K \cdot f^{-\beta} \quad (8)$$

式中 K ——常系数

而幂指数 β 与分形维数 D 有如下关系

$$D = \frac{5-\beta}{2} \quad (9)$$

从现场实验中采集了噪声信号和泄漏信号,并对其进行了功率谱分析。噪声信号的功率谱分析结果见图5,泄漏信号的功率谱分析结果见图6。将对数功率谱曲线用最小二乘拟合直线可得到斜率 β ,再根据式(9)求得分形维数 D ,因为 β 与 D 是简单的线性关系,所以可将 β 视为等价的分形特征数

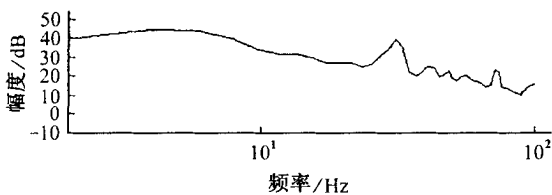


图5 背景噪声的对数功率谱及分形特性 $\beta = -0.3984$

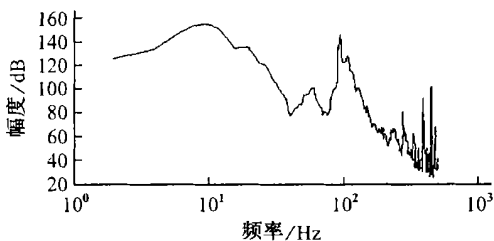


图6 泄漏信号的对数功率谱及分形特征 $\beta = -5.63434$

(与分形特征维数 D 区别)。那么,根据泄漏声发射信号存在频段上的分形特征可对泄漏进行识别。具体步骤是①假定 AE 信号 $r(t)$ 是宽平稳信号,取某时段的信号进行功率谱估计。②选取合适的无标度区间(某一频段),对功率谱密度进行曲线拟合。③计算信号的分形维数 $D(\beta)$,若 $D > D_0$ ($\beta < \beta_0$) 则泄漏存在。

经过实验测定^[11],选取频段 $[15, 40]$ kHz,泄漏信号的分形特征数为 $\beta_0 = -3.5$,能准确识别 0.56MPa 内压下 1mm 泄漏孔所造成的气体泄漏的存在,最远检测距离可达 100m。

4 结论

声发射信号的全波形采集技术给我们提供了更多的空间去探索声发射源的特征和声发射信号在介质中的传播规律,不断地应用现代信号分析方法去揭示声发射现象的本质是声发射技术的主要发展方向。

参考文献:

- [1] 刘时风. 焊接缺陷声发射检测信号谱估计及人工神经网络模式识别研究[D]. 北京: 清华大学, 1996.
- [2] 沈功田, 段庆儒, 周裕峰, 等. 压力容器声发射信号人工神经网络模式识别方法的研究[J]. 无损检测, 2001, 23(4): 144—146.
- [3] 李光海. 声发射源识别技术的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2002.
- [4] 李光海, 刘正义. 声发射源多传感器数据融合识别技术[J]. 计算机测量与控制, 2002, 10(5): 345—348.
- [5] Surgeon M, Buelens C, Wevers M, et al. Waveform based analysis techniques for the reliable acoustic emission testing of composite structures[A]. 24th European Conference of Acoustic Emission Testing[C]. Cetim, France; 2000.
- [6] Gang Qi. Wavelet based AE characterization of composite materials[J]. NDT&E International, 2000, 33: 133—144.
- [7] Takemoto M, Nishino H, Ono K. Wavelet transform——applications to AE signal analysis; acoustic emission——beyond the millenium[A]. Elsevier[J/O]. 2000. 35—56.
- [8] 纪洪广, 蔡美峰. 混凝土材料断裂的声发射自相似性识别特征[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 157—160.
- [9] 崔建. 管道泄漏声发射检测方法及系统研究[D]. 北京: 清华大学, 2000.