信号处理
专题综述

基于波形分析的声发射信号处理技术

耿荣生，沈功田[1)]，刘时风[2)]
（北京航空工程技术研究中心，北京 100076）

摘 要：论述基于波形分析的声发射信号处理技术的原理及面临困难，介绍这一技术在声发射基本理论研究和工程实践中的应用前景。

关键词：声发射；波形分析；信号处理
中图分类号：TG115.28 文献标识码：A 文章编号：1000-6656(2002)06-0257-05

ACOUSTIC EMISSION SIGNAL PROCESSING TECHNIQUE BASED ON WAVEFORM ANALYSIS

GENG Rong-sheng, SHEN Gong-tian[1)], LIU Shi-feng[2)]
(Beijing Aeronautical Technology Research Centre, Beijing 100076, China)

Abstract: The principle of acoustic emission (AE) signal processing based on waveform analysis and the difficulties confronted were described. The future development of AE waveform analysis in both theory and engineering applications was also reviewed.

Keywords: Acoustic emission; Waveform analysis; Signal processing

基于波形分析的声发射信号处理技术是指根据所记录信号的时域波形（及与此相关联的频谱和相关函数等）来获取有关声发射源信息的一种方法。由于声发射（AE）技术的一个最本质、最重要的问题就是根据AE信号来获得有关声源或材料损伤的信息，因此，早在声发射技术的发展初期，人们就意识到波形和频谱分析在识别声发射故障源及评价材料性能中的重要作用，并对此进行了大量研究，也取得过某些成功[1]。由于AE传感器技术和仪器硬件技术的限制，早期的声发射仪器很少具备对AE信号进行瞬态波形捕捉和实时处理的能力，因此，用得较为广泛并为大家所认可的一直是参数分析方法，它是基于谐振式AE传感器输出信号的参数来获取有关AE源的信息。常用参数有振铃数、能量、事件、事件率、撞击（或称波击）数、上升时间、脉冲持续时间和幅度分布等，其意义和获取方法在前几期的综述中已作了详细论述。目前确实已形成一套较为完整的参数分析技术，它能为我们解决大量工程实践问题，并且由于基于参数分析的仪器实时性总是较好，它在AE检测领域获得了最广泛的应用。

参数分析方法的最大缺点是有关AE源本质的信息往往被谐振式传感器自身的特点所掩盖或模糊掉，因为由这种谐振式传感器所获得的AE信号基本是一衰减的正弦波，由这样的波形得到的各种参数与真正的物理量（位移、速度、加速度等）之间缺少必然的联系并往往随所用传感器谐振频率和测试系统（放大倍数、阈值的不同）而变化，因此，实验结果的重复性还很差。此外，传统参数分析方法认为AE信号是以某一固定速度传播的假设也与实际情况有很大出入，这一方法在新型材料，特别是具有较强声各向异性的复合材料检测中受到严重挑战。同时，利用传统的参数分析方法来区分诸如复合材料基体破裂、纤维断裂和分层等缺陷总是十分困难，而利用波形分析技术却有可能比较容易地解决这一问题。因此，在声发射技术发展的历史上，研究人员始终没有放弃对声发射波形分析技术的探讨和研究。

波形分析一词比最近广泛使用的模态声发射

收稿日期：2002-04-18

1）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
2）清华大学 机械系，北京 100084

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(MAE)或板波声发射具有更深刻内涵，因为后者更多地用在薄板型传输介质场合，而波形分析可用于半无限空间、厚板、薄板及杆状介质等不同场合。

1 实施波形分析的基本要求及面临的困难

需要指出的是，对声发射检测技术而言，波形分析一词有其专门的含义。我们知道，即使是参数分析方法，除了比较简单的有效值外，绝大多数参数都是从波形获得的，即先有波形，后有参数。AE 波形分析技术的特定含义及核心是了解所获得的声发射波形的物理本质，其研究重点是将 AE 波形与 AE 源机制相联系，其主要研究对象是声发射的源机制、声波的传播过程和传播介质的响应[2]。没有这些先决条件，单纯使用瞬态波形记录仪捕捉 AE 信号并进行分析并不是真正意义的波形分析技术。由于声发射是一种被动检测技术，而声源本身一般都十分微弱，因此，波形分析技术面临很多难题。

首先研究一下进行波形分析的一些最基本条件。第 1 期的专题综述中已经指出，从声源到传感器，至少需要经过传输介质和耦合介质等一系列中间过程(图 1)，因此，AE 传感器所获得的信号至少是声源、传输介质、耦合介质和换能器响应等因素的综合结果，在数学上可表示为

$$F(t)=S(t)*M(t)*C(t)*R(t) \tag{1}$$

式中 $S(t)$——声源的时域函数

$M(t)$，$C(t)$——传输介质和耦合介质的脉冲响应函数(格林函数)

$R(t)$——换能器的脉冲响应函数(格林函数)

$*$——卷积

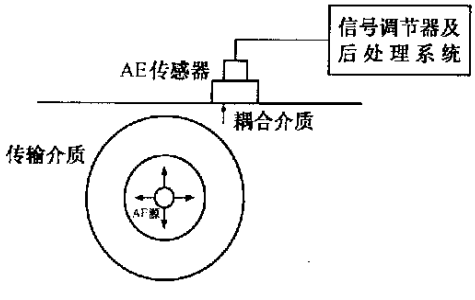


图 1 AE 检测原理示意图

如果用传输函数 $G(t)$代表 $M(t)$，$C(t)$和 $R(t)$的卷积结果，即 $G(t)=M(t)*C(t)*R(t)$，则式(1)可表示为

$$F(t)=S(t)*G(t)=\int_{-\infty}^{t}S(\tau)G(t-\tau)\mathrm{d}\tau \tag{2}$$

或

$$S(t)=F(t)*G^{-1}(t)=\int_{-\infty}^{t}F(\tau)G^{-1}(t-\tau)\mathrm{d}\tau \tag{3}$$

在频率域，上式可简化为

$$F(\omega)=S(\omega)G(\omega)=S(\omega)M(\omega)C(\omega)R(\omega) \tag{4}$$

据此，可由 $S(\omega)$得到声源函数。式(2)～(4)给出的一个重要结论是，从波形获得源信息的首要条件是知道传输函数 $G(t)$或 $G(\omega)$。

从上面的分析可知，未知因素太多是我们面临的主要困难。首先是 AE 的源机制，有各式各样产生声发射的源，它们产生的声波性质不可能相同。固体内裂纹的形成和扩展(裂纹的传播)、塑性形变、孪晶边界的移动、复合材料内基体或夹杂物的破裂、分层或纤维的断裂，以及物质结构的变化(包括相变)等都可以产生声发射。不同的 AE 源究竟产生什么性质的声波，这是首先需要弄清的问题，但这并非易事。其次，AE 源发出的声波要经过传输介质到达传感器所在位置，声波在介质中的传播特性如何，中间可能已发生了什么样的波型转换，这又是一个需要解决的问题。还有，声波必须经过耦合介质才能被传感器有效接收，所以还必须知道耦合介质的传输函数。最后，传感器本身的影响也必须考虑。为了不让所接收到的波形产生畸变，传感器必须具有很宽的频率响应范围，而这又导致其灵敏度过低而无法实际使用。早期的 AE 传感器几乎毫无例外地是谐振式、高灵敏度型的，它相当于一个窄带滤波器，其输出信号基本都是一个窄带信号，并可近似地看成是一个衰减的正弦波(频率等于传感器谐振频率)。如工程上用得最广泛的 R15 型 AE 传感器，其灵敏度响应曲线示于图 2。在 150kHz 附近，其灵敏度最大，因此，它类似于一个窄带滤波器。这样，大量同波的形状有关系的信息都已被滤除，其结果是即使对性质十分不同的 AE 源，系统的输出波形都具有类似的形状，而它留给我们的最重要信息可能就是声发射事件的有无(尽管这一点有时往往很重要)。因此，从传统谐振式 AE 传感器输出波形获

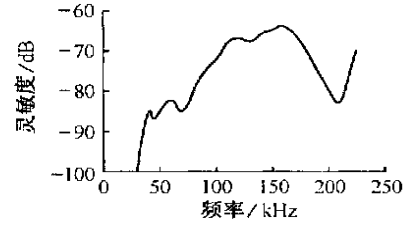


图 2 典型窄带 AE 传感器(R15)的频率响应曲线

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

取参数的研究方法并不是真正意义下的波形分析方法，不采取特别措施对这样的信号进行波形分析，很难获得比参数分析更多的信息。

人们真正感到有必要应用 AE 波形分析技术来解决实际问题是在复合材料损伤评价方面。复合材料，诸如碳纤维增强塑料(CFRP)、玻璃纤维复合材料(GFC)和 Kevlar 等以其优越的性能在航空和航天技术中得到广泛应用。首先，复合材料的损伤一般发生得比较突然，如何使用无损检测法评价其性能或监测在它内部所产生的损伤和缺陷，一直是人们非常关心的问题。其次，人们希望能利用 AE 技术来识别复合材料的不同损伤机理，诸如纤维断裂、基体破损、分层和脱粘等，而参数式分析方法很难做到这一点。利用 AE 参数分析方法对复合材料进行检测还面临不少难题，例如，对声源进行定位误差特别大，这是因为不同损伤源往往产生不同特性的声波，其波速相差很大。其次，复合材料的声衰减系数很大，而且又有较强的声各向异性，不同方向，声传播速度不一样。同一定位阵列中的传感器，由于离声源距离远近和方位的不同，接收到的(超过阈值、用于定位的)声波往往不属于同一种模式，其声速相差很大，如使用固定声速来进行计算，会给定位带来相当大误差。因此，使用经典的声发射参数方法判据，检测结果误差总是很大。

随着宽带、高灵敏度 AE 传感器的问世，在实际工程问题中采用宽带传感器成为可能，这样，在波形分析技术中，至少可以少掉一个未知因素的影响。如果再假设使用稳定不变的耦合介质，且其厚度十分薄，使我们有可能在研究中忽略它的影响。这样，AE 信号主要由 AE 源和传输介质决定，因此，如能知道传输介质的响应函数，即可由仪器记录的信号获得 AE 源的信息，或反之。另外，在 AE 源和传输介质响应都已知的场合，可利用仪器记录的信号来获得传感器的响应，这正是波形分析技术早期用得最广泛的主要原因之一。一个典型的 AE 波形分析系统见图 3，使用贝塞尔滤波器是为了保证相移与频率成线性关系，不让 AE 波形畸变。

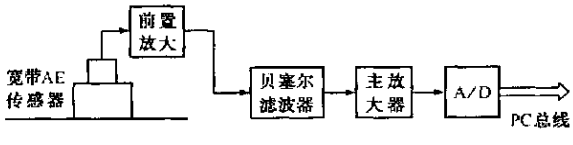


图 3　最基本的波形分析系统框图

2　AE 波形分析技术的典型应用——半无限空间或厚板问题

阶跃脉冲力源 $F_0H(t)$ 作用于板时，板表面将产生相当复杂的运动。Knopoff 给出了在力作用点对面的垂直方向质点位移[3]

$$U_z(b,0)=\frac{F_0}{2\pi\mu b}\cdot\left[\frac{w^2(2w^2-2+a^{-2})H\left(t-\frac{b}{\alpha}\right)}{(2w^2-2+a^{-2})^2-4(w^2-1)w(w^2-1+a^{-2})^{\frac{1}{2}}}-\frac{2y(y^2-1)(y^2-1+a^2)^{\frac{1}{2}}H\left(t-\frac{b}{\beta}\right)}{(2y^2-1)^2-4(y^2-1)y(y^2-1+a^2)^{\frac{1}{2}}}\right]$$

$$w=\frac{\alpha t}{b}$$

$$y=\frac{\beta t}{b}$$

$$a=\frac{\beta}{\alpha}$$

式中　β——切变波速度

α——纵波速度

μ——剪切模量

b——板厚

式中括号内第一项是纵波贡献分量，而第二项是横波贡献，在板中来回反射的波的贡献(第三项之后)在式中略去。最先到达的纵波(P 波)的幅度为

$$U_z=\frac{F_0}{2\pi\mu b}\left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^2$$

对于具有一般形状的短脉冲力源 $f(t)$，该处的速度响应为

$$v=\frac{\partial U_z}{\partial t}=\frac{1}{2\pi\mu b}\left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^2 f'\left(t-\frac{b}{\alpha}\right)-\frac{4\alpha}{2\pi\mu b^2}\left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^2 f\left(t-\frac{b}{\beta}\right)$$

可以看出，纵波的速度响应与力的变化率成正比，而切变波的速度响应与力的大小成正比。由此获得的厚板正对力源位置的垂直位移应当有如图 4 所示的形状，其纵坐标归一化到 $F_0/2\pi\mu b$。

Breckenridge 等对上述结果进行了实验验证，并获得与上述理论分析极为一致的结果。他们所用的试验装置成为人们后来校验声发射传感器瞬态响应的基础[4]，其示意见图 5。这样获得的(模拟)AE 波形与经典 AE 信号有本质上的不同。如果 AE 传感器是速度型的，则所接收到的信号应与上述曲线的变化率有关，即波形又会发生很大变化。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

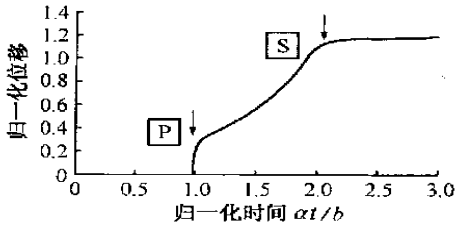


图 4　表面阶跃力源在厚板对面产生的垂直位移
P, S 分别相应于纵波、横波到达时刻

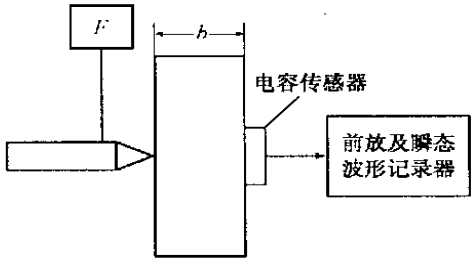


图 5　厚板中的 AE 波形分析问题

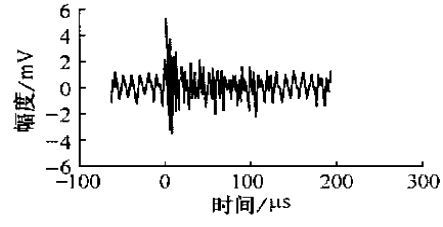
英国原子能研究所无损检测小组利用电容传声器的原理，在一些经过特殊设计的试件上（所谓 Yobell试件，它使反射波的影响大大削弱）捕捉声发射真实波形获得某些成功[5]。将被测试固体表面作为电容传声器的一个极板，来自 AE 源的声波传到固体表面时，表面产生位移，改变电容器的电容量。如果事先加有极化电压＋E_0 的话，电容器会有相应于声波频率的交流信号输出。据称，利用这样真实 AE 波形的上升时间，可以很容易地区分金属材料的不同变形（脆性、韧性等）。由于这种方法要求固体表面有很高的抛光度，实用上有一定困难，但它已在 AE 波形分析技术方面迈出了一大步。

3　薄板问题

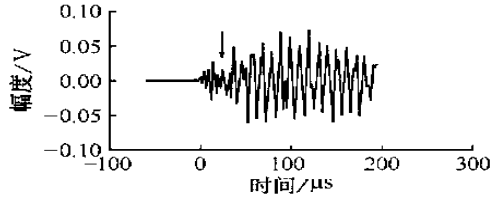
数字式声发射仪的问世及处理方法的改进为波形识别技术的应用打下了良好基础，而最近提出的板波声发射（模态声发射）理论[6,7]，对促进波形分析技术发展起重要作用。模态声发射理论问题及应用，将在以后论述。在此简单介绍其基本原理。

Gorman 等根据经典板波理论详尽分析了各种声源，尤其是复合材料板状试件中的不同损伤源产生声发射信号的特征，从而达到利用声发射信号波形来识别这些不同损伤源的目的。这一理论的基本点是对经典板波理论进行了简化，忽略高阶模式板波的作用，而主要考虑最低阶对称波 S_0 和反对称波 A_0 的作用，并将前者定义为扩展波（纵波），它没有频散效应；而后者是一种弯曲波，它有频散效应。两种波的形状不同、主要频率区域不同，而其相对幅度同激励方式有关。Gorman 等利用这一方法成功地将飞机结构件搭接接头（铆钉与铆孔，螺栓与螺孔等）处裂纹扩展产生的声发射信号与其它噪声源信号相区分，同时还利用波形识别方法研究了复合材料中纤维断裂和分层等声发射信号特征。根据他们所建立的模型，纤维断裂，由于力源作用方向是在薄板平面内，所激发产生的声发射波应以扩展波为主；而分层故障，由于力源作用方向垂直于板平面，激发的声波应以弯曲波为主。由于这两类不同声波的时域波形具有明显的不同特征，利用波形分析技术可以很容易地区分它们[5~7]。

利用波形分析技术从背景噪声中识别出真实 AE 信号的另一例子是金属点蚀过程的 AE 监控[8]。点蚀过程能在板中产生十分明显的扩展波和弯曲波，而且由于钝化膜破裂产生的力作用方向主要发生在与板平面垂直方向，由此产生的弯曲波幅度应当远大于扩展波幅度，而干扰噪声没有这种特性。图 6a 是典型的噪声信号，它是在试验进行到将近 3h 时捕捉到的，其幅度很小（最大 6mV，约为 36dB），而图 6b 示出了当试件在腐蚀液中浸泡数小时后获得的声发射波形，可很清晰地看到先行到达的扩展波以及后到的弯曲波，而且后者的幅度要远大于前者。图中箭头指向扩展波部分，它的幅度较低，但由于传播速度快，它先到达传感器，其高频成分要比后来到达的弯曲波丰富得多。后来到达的弯曲波频率低、幅度较大（最大达 60mV，约为 56dB），且有频散现象。



（a）背景噪声



（b）声发射信号波形

图 6　背景噪声与典型腐蚀过程中的 AE 信号

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

4 波形分析技术在工程中的典型应用

波形分析看似复杂，但在一些情况下，它又可以将十分复杂的工程问题变得大为简单，这可能就是了解AE源机制能为我们带来的巨大利益。飞机疲劳裂纹的AE监测、AE腐蚀监测都属于这类例子。

一般认为，由于数据量太大而且自动识别仍有困难，波形分析技术的实用化十分困难。但是，在一些情况下，如果我们采用一种折中的办法，即利用模态声发射的合理内核——对声发射源产生AE信号的物理本质的认识，加上参数识别的简单、快捷、实用，可以解决一些十分复杂的问题。例如，Dunegan工程咨询公司研制了一种能在高背景噪声下检测疲劳裂纹扩展声发射信号的仪器[9,10]。其基本设想是，由于疲劳裂纹的扩展发生在板平面内，它产生的AE信号应当以频率较高的扩展波为主。因此，可以先捕捉AE波形，即用宽带AE传感器接收AE信号。但紧接着，不是直接对波形进行存储或分析，而是使接收到的AE信号经过两路不同的滤波器，一路是高通滤波器（低频截止频率100kHz），获得扩展波分量HF，另一路是带通滤波器（带通范围20～70kHz），获得低频弯曲波分量LF，再利用（简单的、单参数量）两者比值HF/LF作为诊断（判据）参数，见图7。图中仅示出了一个通道，而同步触发信号是为了能保证每次处理的是同一声发射事件。据说，这样研制出的仪器已为美国航空公司和美国空军解决了很多实际问题，并获得专利。虽然使用了宽带传感器捕捉AE信号，但由于仪器处理的是两个模拟量的比值，所需的处理速度可很低，对存储量也基本没有太高要求。这样研制的仪器可以看成是一个专用仪器，它利用了模态AE的合理内核（物理本质），又利用了参数式AE仪器的快速、简捷和实用。当然，其前提条件是应当对疲劳裂纹的AE源机制有比较深刻的了解。另外，其隐含条件是传感器最好能对平面内位移（扩展波）和平面法向方向位移有相同的灵敏度，另外，它应当能在20kHz～1MHz以上范围内有比较平滑的响应（据称，Dunegan工程咨询公司研制的SE9125-M型AE传感器满足这一要求）。

点蚀过程声发射信号的特征正好与疲劳裂纹相反，它主要产生弯曲波信号，而不是以扩展波为主。类似地，也可以利用图7所示的电路，不同的是，应当利用比值LF/HF进行类似的判别。

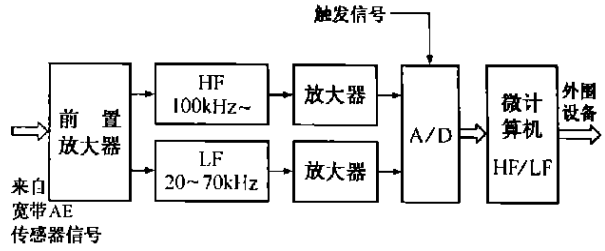


图7 飞机疲劳裂纹AE监测系统原理图

5 结论

基于波形分析的AE信号处理技术，其关键是对AE源机制及从AE源到接收传感器的声波传播过程（即结构的响应特性）有比较清晰的了解。这一技术对于识别诸如疲劳裂纹扩展和腐蚀产生的微弱AE信号有重要意义。

参考文献：

[1] Stephens RWB, Pollock AA. Waveforms and frequency spectra of acoustic emission[J]. J Acoust Soc Am, 1971, 50: 904－910.

[2] 耿荣生. 声发射信号的波形分析技术[A]. 中国无损检测学会第七届年会/国际无损检测技术交流研讨会论文集[C]. 汕头: 1999. 566－569.

[3] Knopoff L. Surface motion of a thin plate[J]. J of Appl Phys, 1958, 29(4): 661－670.

[4] Breckenridge FR. Acoustic emission: some application of Lamb's problem[J]. J Acoust Soc Am, 1975, 57(3): 626－631.

[5] Scruby CS. A new technique for the measurement of acoustic emission transient and their relationship to crack propagation [J]. J Phys D, 1978, 11: 2359－2369.

[6] 刘松平, Gorman M, 陈积懋. 模态声发射检测技术[J]. 无损检测, 2000, 22(1): 38－41.

[7] Gorman MR. Plate wave acoustic emission[J]. JASA, 1991, 90(1): 358－364.

[8] Geng RS. Corrosion-related acoustic emission and its identification[A]. Proc of 10th APCNDT[M/CD]. Brisban, Australia: 2001. 1143.

[9] Dunegan HL. Modal analysis of acoustic emission signals[J]. Journal of Acoustic Emission, 1998, 15: 1－4.

[10] Dunegan HL. Use of plate wave analysis in acoustic emission testing to detect and measure crack growth in noisy environments[A]. Proceedings of Structural Materials Technology——An NDT Conference[C]. San Diego California: 1996. 20－23.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net