



声发射信号处理和分析技术

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:介绍声发射技术发展简况、声发射信号处理面临的困难及目前所用的各种处理和分析方法。还介绍了声发射仪器的发展概况。

关键词:声发射检验; 信号处理; 分析; 声发射仪器

中图分类号: TG115.28; O42 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6656(2002)01-0023-06

AN OVERVIEW ON THE DEVELOPMENT OF ACOUSTIC EMISSION SIGNAL PROCESSING AND ANALYSIS TECHNIQUE

GENG Rong-sheng, SHEN Gong-tian¹⁾, LIU Shi-feng²⁾

(Beijing Aeronautical Technology Research Centre, Beijing 100076, China)

Abstract: The development of acoustic emission (AE) signal processing and analysis technique was reviewed. Some challenging problems confronted and various methods in use were also outlined. The general state of AE instrument development was also described.

Keywords: Acoustic emission testing; Signal processing; Analysis; Acoustic emission instrument

声发射(AE)可以定义为物体或材料内部迅速释放能量而产生瞬态弹性波的一种物理现象,而AE信号则表示一个或多个AE事件经传感器接收并经系统处理后以某种形式出现的电信号^[1]。当材料遇到“麻烦”时,它们会“讲话”,我们可以利用声发射设备来“听”诸如裂纹扩展、纤维断裂以及材料其它形式损伤所发出的“声音”。AE相应的弹性波并不局限于可听声域,在绝大多数情况下,其有效频谱范围可伸展到数兆赫甚至数十兆赫频段。所以严格地讲,声发射应当被称为应力波发射,但由于历史的原因,人们已习惯于将其称为声发射。AE的源机制是各式各样的,如固体内裂纹的形成和扩展(裂纹的传播)、塑性形变、晶体内位错的移动和位错在钉扎点上的分离、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。不同的源机制对应不同的发射声波,因而也对应不同的AE信号。尽管引起声

发射的外部原因是多种多样的,但其共同点都是由外部条件的变化(应力、温度和电磁场等),引起物体或结构某一局部或某些部分变得不稳定并迅速释放出能量。AE是正在扩展的材料缺陷(裂纹)的指示器,没有扩展,裂纹或材料的缺陷处于静止状态,就没有能量的重新分配,也就没有声发射。换句话说,只有当物体受到了永久性形变或永久性损伤时才会产生声发射。正因为这样,AE技术是检测材料损伤,特别是早期损伤的有力工具,也是对材料或结构状态进行动态监测的重要方法。与此相适应,声发射信号处理的主要任务则应当包括AE源识别、AE源定位和损伤评价等内容。

1 声发射信号及信号处理的困难所在

与其它无损检测方法不同的是,AE信号处理技术面临的重大难题,或最大困惑首先是AE源的多样性、信号本身的突发性和不确定性。在进行超声或涡流检测时,人们可准确知道注入被检材料中信号的特征(幅度、频率和波形等),并由此可知接收信号的相应特征或应当发生的变化。而对于AE检

收稿日期:2001-08-30

1) 国家质量技术监督局 锅检中心,北京 100027

2) 清华大学 机械系,北京 100084

测技术而言,情况却完全不同。不同的 AE 源机制可以产生完全不同的 AE 信号,而人们对 AE 源机制的认识总是受到很多条件的限制。因此,说极端一点,检测人员有时几乎不知道真正的 AE 信号究竟应是什么样子。其次,AE 信号传输途径的影响也是一个完全不容忽视的因素,但问题在于,传输途径又与 AE 源位置、被检对象性质(材质、形状和几何尺寸)、声耦合剂特征以及接收传感器位置等诸多因素有关。图 1 可以说明这一问题。

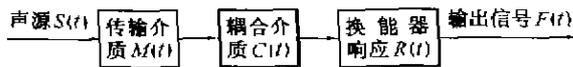


图 1 影响声发射信号的诸多因素

由图 1 可见,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

$$F(t) = S(t) * M(t) * C(t) * R(t) \quad (1)$$

式中 $S(t)$ ——声源的时域函数

$M(t)$ ——传输介质的脉冲响应函数(格林函数)

$C(t)$ ——耦合介质的脉冲响应函数

$R(t)$ ——换能器的脉冲响应函数

*——卷积

在频率域,上式可简化为

$$F(\omega) = S(\omega)M(\omega)C(\omega)R(\omega) \quad (2)$$

式中 $S(\omega)$ ——声源的频率响应函数

$M(\omega)$ ——传输介质的频率响应函数

$C(\omega)$ ——耦合介质的频率响应函数

$R(\omega)$ ——换能器的频率响应函数

ω ——角频率

$S(t)$ 和 $C(t)$ 的不确定性以及 $M(t)$ 和 $R(t)$ 的复杂性使 AE 信号处理面临巨大困难。可以说,既使对一个长期从事 AE 技术研究的人来讲,有时也很难回答类似“AE 信号究竟是什么样子”这样的问题。各种文献列举的 AE 信号可以是图 2 中的任何一种,也可以是其它样式,显然,其差异十分巨大。图 2a 是典型的连续型 AE 信号,完全类似于白噪声;图 2b 是目前最常用的谐振频率为 150kHz AE 传感器的突发型输出信号,可明显看到边界反射产生的回波叠加效应和 AE 传感器的振铃效应;图 2c 是利用宽带 AE 传感器在薄板上获得的垂直激励产生的 AE 信号,可分辨出弯曲波和扩展波信号^[2];图 2d 是在厚板上用电容传感器(其频率响应极宽)测出的相应于固体内一个阶跃变化力 AE 源在“震中”位置

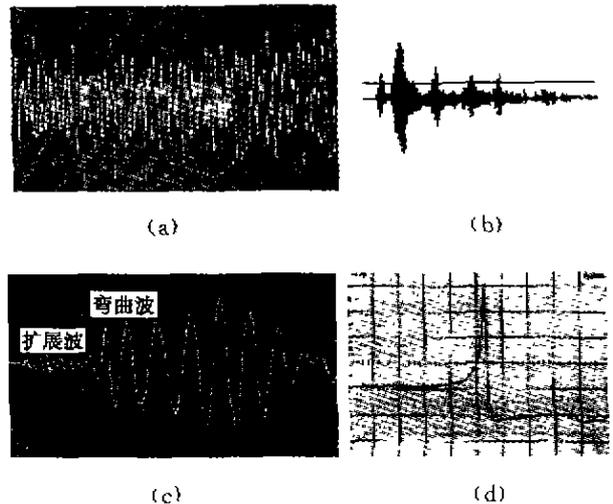


图 2 不同形式的 AE 信号

产生的表面位移^[3,4]。AE 信号的这种差异可能让初学者很难理解,甚至无所适从。

AE 信号处理技术面临的另外两大困难是 AE 信号的微弱性(但又完全可以是宽动态范围)和干扰噪声的多样性。因此,在 AE 技术发展史上,各种可能的信号处理技术都被尝试过。可以毫不夸张地说,在现有的各种无损检测方法中,AE 检测技术所涉及到的信号处理内容应当是最广泛、最全面的。在了解了这一点之后也就不难理解为什么有如此众多的 AE 信号处理方法。本系列专题综述拟就一些最主要和最常用的 AE 信号处理技术展开讨论,它们是参数分析、定位技术、波形分析技术、模态声发射、谱分析、小波分析、神经网络及一些特殊技术。

2 声发射信号处理技术

如前所述,声发射检测和声发射信号处理的目的是获得有关声发射源的信息,进而获取同材料或结构损伤相关的信息,包括损伤位置、损伤程度和剩余寿命等。人们对 AE 的认识随理论研究的发展而加深,另一方面,AE 作为实用诊断技术,每前进一步都是同信号处理技术和测试仪器的发展分不开的。可以毫不夸张地说,一部 AE 技术的发展史也就是 AE 信号处理技术的发展史。

在研究 AE 信号的处理技术之前,先阐述一下 AE 技术发展史上的两个重要的事件,因为它们都对 AE 信号的处理技术和 AE 技术的发展起了重要作用。第一是德国人凯撒(J Kaiser)观察到的 Kaiser 效应^[5]。20 世纪 50 年代初,凯撒研究了多晶金属材料如锌、铜、铝和铅等的声发射特性,发现在加

载时,这些材料都产生了声发射,且是不可逆的。AE 现象仅在第一次加载时产生,第二次加载及以后各次加载所产生的 AE 信号变得微不足道,除非后面所加外应力超过前面各次加载的最大值。这一现象后来又在多种金属材料试验中得到证实,并被命名为凯撒效应。这一效应在 AE 信号处理方面得到广泛应用,成为克服噪声干扰的主要手段之一,因而也成为用 AE 技术监测结构完好性的依据。例如,在加载试验时,可先在小应力下进行几次循环加载试验以克服试验机夹具和试件之间摩擦噪声的影响,然后再进行正式加载试验。如试件完好无损,则在加载循环中不应得到明显的 AE 信号,反之,任何突然增大的 AE 信号都极有可能是该试件发生疲劳或内部有断裂的预兆。这种利用不可逆效应降噪和获取有用信息的方法为 AE 技术所独有。

同 AE 信号处理技术直接有关的另一重要事件是,20 世纪 60 年代美国学者 Dunegan 提出,可把观察和记录 AE 信号的频率移至超声段($>20\text{kHz}$)以降低外界干扰噪声的影响^[6]。在此之前,人们为了观察和记录声发射信号的变化,试验不得不在夜深人静的时候进行,并经常事倍功半甚至半途而废,声发射试验工作之苦可见一斑。由于观察频率的这一“简单移动”极大地克服了环境干扰噪声的影响,它所带来的是 AE 理论和应用研究的革命性进展。

2.1 干扰噪声

虽然各种检测方法都面临干扰噪声问题,但由于声发射是以被动检测的方式用于动态监测,它所面临的噪声干扰问题就特别严重,甚至是其它方法无法比拟的。在许多情况下,如利用 AE 进行疲劳裂纹扩展监测、运行设备状况监测以及对行驶中的汽车的传动轴和转向节进行动态监视时,外部干扰噪声都可能远远大于人们感兴趣的 AE 信号。AE 检测面临的干扰噪声主要有下面几种:

2.1.1 电气干扰噪声

(1) 前置放大器输入端的白噪声 这是一种自然的不可避免的噪声,确定了系统灵敏度的最终极限。使用设计良好的前置放大器,该噪声可以很小并接近理论极限。

(2) AE 系统内部所产生的噪声 目前所用的结构紧凑型计算机化的声发射仪器一般都有阴极射线管(CRT)显示屏幕和磁盘系统,各部件间很容易产生“拾取”噪声。在一个设计良好的系统内,这一噪声应当很低并在极限之内。

(3) 接地回路噪声 这是由系统或结构的不恰当接地引起的。为避免这一噪声,声发射换能器的电气连接必须与结构绝缘。

(4) 电磁干扰信号 一般由电源开关或其它邻近电磁设备引起。必要时,设备应加上电磁屏蔽。

2.1.2 机械噪声源

主要包括① 实验室中试验机的噪声。② 外场测试时的设备运转噪声,包括来自容器内部的噪声和连接管道的噪声。③ 泵和阀门的流体噪声。④ 所有的摩擦过程,如加载引起的移动以及容器的支撑物等都会引起噪声。⑤ 机械撞击引起的噪声,如在户外测试时灰尘、雨点和雪花等都会引起噪声。⑥ 人类本身和周围的动物都可能引起噪声。

2.1.3 声波传播途径引起的声信号畸变和衰减

通常在声发射源处,大多数声发射信号都具有比较简单的宽带和阶跃形特征,但在材料或结构中经多次反射、衰减以及波型转换后,其波形将发生很大畸变,这一点无疑给声发射信号的分析带来很大困难。因为利用 AE 技术监测的对象绝大多数是固体,而固体中有不同的波型存在,如压缩波、切变波、板波和表面波等,这些波的传播速度各不相同,在边界处还会发生波型转换。源发出的声波除直达波外还可以经多种路径到达传感器,因此,所探测到的声信号波形是不同路径到达传感器声波的叠加(混响效应),这种不同波形的叠加使问题趋于复杂。此外,传感器本身还有所谓“振铃”效应(传感器的响应),从而导致输出信号更加复杂。在许多情况下,如何从这样一个比较复杂的信号中获取有用信息就成了问题的关键。

2.2 克服干扰噪声的常用方法

在详细叙述 AE 信号处理方法前,简单介绍 AE 检测技术中克服干扰噪声常用的方法十分必要。在某种程度上,它们也就是 AE 信号的处理方法。

(1) 选择适当的工作频率 早期进行声发射研究时,人们试图利用可听声频段($<20\text{kHz}$)并利用话筒作为传感器。这样,必须在夜深人静时观察声发射信号,以尽量避免外面交通和人群等的噪声干扰。直到 20 世纪 60 年代,一些声发射工作者,特别是美国学者 Dunegan 意识到,声发射信号可延伸至较高频段,即数兆赫甚至数十兆赫,高频段环境噪声的影响比较小。由于绝大多数机械噪声的频率范围最多只能达到几十千赫,因此选择谐振频率为 150~300kHz 或更高的传感器能有效克服干扰噪声的

影响。对于类似飞机机翼裂纹扩展产生的 AE 信号,选择更高一点的频率(500~600kHz)可能会更有利。

(2) 利用差动传感器 这种传感器由两块相反极性的晶片组成,其输出送入差动放大器的两个输入端。AE 信号产生相反极性的信号,它们的差值被放大;电磁干扰信号的极性相同,由于前置放大器的共模抑制被大大削弱。

(3) 进行特殊的频率滤波 有些干扰来自周围的一些固定无线电设备,如在利用声发射进行管道泄漏测试时,发现有调制干扰信号,其载波频率为 100kHz,它是由附近的发射机引起的。滤波后,这种干扰即被抑制。

(4) 引入电压阈值或降低测试灵敏度 该方法可同时去除低于阈值的 AE 信号和噪声信号。由于幅度大的 AE 事件对材料损伤的“贡献”大,这一方法得到广泛应用。

(5) 在源处阻止噪声产生。

(6) 噪声源和传感器间引入屏蔽或衰减介质。

(7) 使设备适当接地或屏蔽。

(8) 时间闸门 应把这种闸门控制电路同后面的负载控制闸门和基于噪声的闸门相区别。利用该闸门的一个最典型例子是焊接质量测试和控制电路。为抑制来自电源开关的噪声,测试电路在噪声活跃的大部分时间内关闭,它仅在焊接区固化,即在产生有用 AE 信号时才工作。

(9) 负载控制的闸门 在疲劳试验中这一点特别有用。在周期性疲劳试验中,当负载从张应力变为压缩应力经过零负荷点时,“后冲”会引起严重干扰噪声;另外,即使在中间负荷段,裂纹表面的摩擦也会引起强烈的干扰噪声。虽然后者在某些情况下可能会引起人们的研究兴趣,但当仅对裂纹扩展进行研究时,它又会产生很大负面影响。为此,人们常采用电子闸门电路,使仅在负荷接近最大值时才记录 AE 数据。这一方法已成为疲劳试验监测能否成功的一个关键。

(10) 基于噪声的闸门 对一些特别噪声,如雨水等,可使用一外加传感器去专门探测,并在它出现时关闭主要测试电路。大型储油罐的 AE 监测常用到这种闸门电路。

(11) 护卫传感器和空间滤波 这对构件如飞机翼段某一特定区域监测特别有用。在接有测试传感器的区域之外装上几个护卫传感器,凡是护卫传

感器先接收到的信号都被当作噪声而拒收;空间滤波则是基于被监测区域产生的裂纹信号到达两个或几个传感器的时差应在一定范围(窗口)之内,只有符合这一条件的数据才被记录,否则拒收。

(12) 进行前沿滤波。

(13) 数据分析(模式识别、相关分析及聚类分析等) 由于典型的 AE 信号总是由发生在很短时间内的阶跃式位移脉冲引起,又由于在很多情况下,结构和传播路径基本都是固定的,所以接收到的 AE 信号参数间的关系一般也是固定的,而其它干扰信号的源性质与声发射总是不同。这样,利用参数相关图可以有效识别信号。在一些更复杂的场合,可以利用自适应滤波法,即从一组训练过的数据中,利用经验型模式识别方法,提取声发射源的特征。迄今为止,自适应法的应用尚不是很成功,原因是很难得到现成的、确定的噪声,如裂纹摩擦噪声引起的声发射源的数据;其次,训练数据常同传播路径和传感器有关,而同源本身无关。

2.3 常用 AE 信号处理技术介绍

声发射信号处理技术所涉及的内容十分广泛,其技术复杂程度相差很大,它可以用最简单的有效值作为分析参数,也可以是一个十分复杂的神经网络分析系统或专家系统。在 AE 技术发展初期,人们就试图仿效其它无损检测方法,利用 AE 波形或频谱分析来获取有用信息,因为从理论上讲,波形分析应当能给出任何所需的信息,因而也是最精确的方法,并可导致对 AE 的定量认识。但是,得到真实的 AE 信号本身是一件相当困难的工作,而对一畸变信号进行频谱、相关分析等可能会导致一些错误结论。因此,在 AE 技术发展初期,用得更多的是参数分析方法,并经历了从简单参数分析到复杂参数分析的漫长过程。近十几年来,随着模态声发射理论和技术的逐渐成熟,人们又开始对波形分析技术产生浓厚兴趣^[7~9]。与此同时,小波分析、现代谱分析和神经网络分析等技术也得到应用,并取得很好的效果^[10~13]。各种 AE 信号处理方法示于图 3。

2.4 测量系统概述

人们对声发射的认识随理论研究的发展而加深,另一方面,声发射作为实用诊断技术,它每前进一步都是同测试仪器的发展分不开的。因此,在阐述 AE 信号处理技术发展时,我们必须同时叙述 AE 仪器的发展。

所有的 AE 测试系统都由传感器、放大器和分

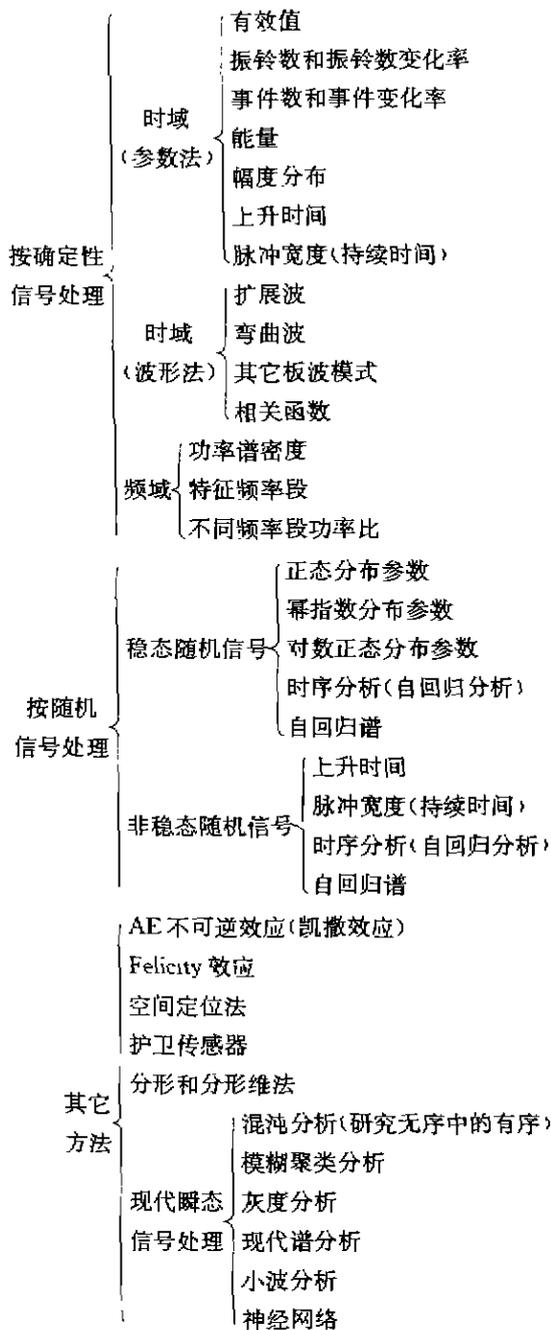


图3 AE 信号处理方法汇总

析系统三个基本部分组成, AE 仪器的发展也集中表现在这三个系统上。近几十年来, 这三部分的内容(质量)都在不断更新, 特别是 AE 传感器和分析系统的发展。AE 仪器的发展经历了五个不同时期, 差不多相应于 20 世纪后五个年代。最早出现的声发射仪, 可以简单到仅仅是一个测量信号有效值的毫伏表, 或者是一个脉冲计数器, 这是第一代 AE 仪器, 代表了 20 世纪 50~60 年代的水平。70 年代的声发射仪器已使用计算机技术, 它把形成各种

AE 特征量输出的多通道硬件模块插在一个机箱内, 通过内部总线与一台标准小型计算机相连。除工作速度和存储能力不足外, 其最大缺点来自性能很差的总线结构, 各个通道的声发射信号的采集、传递、计算、存储和显示都要占用中央处理单元(CPU)的时间, 不但速度慢, 而且系统极易出现闭锁状态。稍后的第三代声发射仪有所改进, 它把数据采集功能和显示、存储及计算相分离, 并利用 IEEE488 标准总线和直接内存存取, 系统在信号处理速度和实时显示上有了改进。80 年代后期出现了利用并行处理技术解决实时采集和处理的仪器, 如 PAC 公司的 SPARTAN AT 和 LOCAN320 等, 使仪器在 AE 数据处理能力上有了较大提高(每秒数千个声发射事件)。在这类仪器中, 为保证 AE 数据的实时采集, 把数据采集和信号的分析、显示分开。设计时, 每两个通道形成一个单元, 配有专用微处理器, 形成独立通道控制单元(ICC), 完成实时数据采集, 而数据处理任务比较合理地分配给一些并行的计算单元, 这样, 仪器的实时性得到大大增强。这应属于第四代 AE 仪器。

90 年代后, AE 检测系统进入了全数字式的第五代。它是在高速 A/D 转换及有关集成电路(IC)芯片性能大幅度提高, 价格又大幅度下降的背景下形成的。全数字化 AE 仪器的问世标志着声发射仪器的研制进入一个全新的阶段, 它在系统结构和软件配置上保留了第四代产品的优点, 但放大后的 AE 信号不必再经过一系列的模拟、数字电路形成数字特征量, 而是直接进行高速 A/D 转换, 提取相应特征量。这样做的好处是数字信号有良好的抗干扰特性, 信息能够准确地发送、传递而无畸变, 没有模拟器件因存在噪声或饱和带来的失真以及因器件离散等因素产生的数据不一致, 从而使仪器的可靠性得到更好的保证。另外, 由数字化的 AE 信号中提取特征量比模拟方法容易实现, 如采用模拟方法很难在严格的意义上给出 AE 信号的能量和有效值, 而在数字信号的基础上却容易实现。数字化后的信号保留了更多的 AE 信息, 也为信号分析和特征提取提供更大的开发潜力。

图 4 是一个典型的全数字式 AE 系统图, 它具有如下特点:

(1) 采用 PC 机的插板方式, 只要把用于 AE 信号采集的 AE DSP-32/16 卡插入 ISA(PC/AT)总线, 配一台性能良好的 PC 机, 就可构成 2~256 通

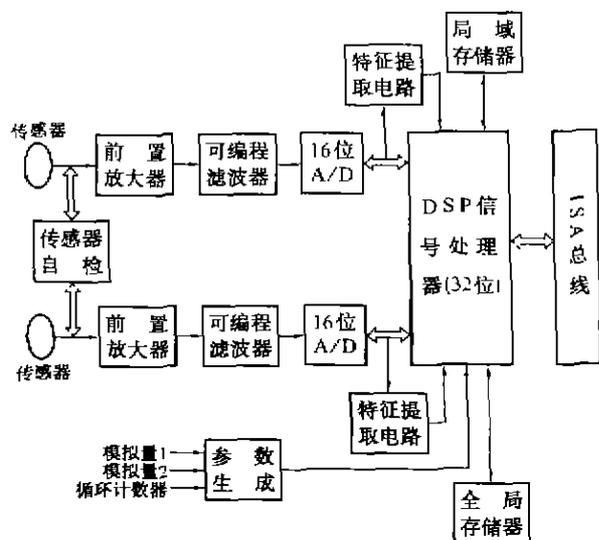


图4 使用DSP卡的全数字式声发射仪结构图

道 AE 检测系统。仪器的模块化结构进一步简化。

(2) 数字信号处理器(DSP)卡采用了包括高速DSP(TMS320C40)和现场可编程门阵列(FPGA)在内的最新器件,一块卡包括两个独立的AE通道,由一个DSP进行管理,DSP从主机取得程序和设置命令,在硬件提取传统AE特征参数的同时,还可计算出附加的波形特征(频率特征、信号波形特征、组合特征和由用户开发的其它特征)。由于DSP具有高速的并行处理、数据传送和寻址能力,可在近乎实时的意义下完成数据记录和附加特征的提取,这在以往AE仪器中是难以设想的。全数字式AE仪器的问世为AE信号处理技术提供了一个全新的舞台。

使用DSP卡的第五代全数字式声发射仪虽然比前几代有了很大进步,但本质仍是参数声发射仪,即硬件的输出或显示记录存储的数据仍是实际声发射信号波形基础上提取的声发射参数。DSP卡声发射仪也都可配有波形采集,但波形采集平行于参数生成,计算机总线或总线技术应用的限制不能实时多通道传送波形数据到计算机,声源定位信号分析等实时显示分析的功能仍然只能由硬件输出的参数完成。21世纪出现了硬件的输出或显示记录存储的数据为声发射波形的全波形声发射仪,它的基本结构是在DSP卡的第五代全数字式声发射仪基础上去掉DSP,改用高速计算机总线PCI,直接高速地将经A/D转换后的全数字全波形声发射数据送到功能强大的计算机,由计算机软件完成参数生成及波形分析声源定位等任务。这种全数字全波形声

发射仪最大限度地应用了现代电子和计算机高速数据采集和高速软件处理的技术,使得多通道声发射波形采集和分析不再困难,同时保留了参数声发射仪的全部功能,为声发射技术研究和应用提供了良好的工具。我国技术人员设计研制生产了世界上第一台多通道全波形声发射仪。

3 结论

AE源机制的多样性、声波传播途径的复杂性、AE信号本身的突发性和不确定性以及干扰噪声的严重性等因素都使AE信号的处理和分析面临极其严重的挑战。尽管如此,目前人们还是有了一整套比较有效的AE信号处理和分析方法。了解并掌握这些方法对AE技术的推广应用具有重要意义。

参考文献:

- [1] ASTM E1316—1996, Terminology for Nondestructive Examination[S].
- [2] 耿荣生. 声发射波形分析技术及其在复合材料故障评价中的作用[J]. 无损检测, 1999, 21(7): 289—293.
- [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]. JASA, 1975, 57(3): 626—631.
- [5] Kaiser J. Untersuchungen über das Auftreten von Geräuschen beim Zugversuch [D]. Munich: Technische Hochschule, 1950.
- [6] Dunegan HL, Harris DO. Acoustic emission, a new non-destructive tool[J]. Ultrasonics, 1969, 7(7): 160—166.
- [7] Gorman MR. Plate wave acoustic emission[J]. JASA, 1991, 90(1): 358—364.
- [8] Prosser WH, Gorman MR. Plate mode velocities in graphite/epoxy plates[J]. JASA, 1994, 96(2): 902—907.
- [9] 刘松平, Gorman MR, 等. 模态声发射检测技术[J]. 无损检测, 2000, 22(1): 38—41.
- [10] 秦前清, 杨宗凯. 实用小波分析技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1994.
- [11] 刘时凤. 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.
- [12] 李家林, 董云朝, 等. 声发射源特征的神经网络模式识别研究[J]. 无损检测, 2001, 23(6): 231—233.
- [13] 沈功田, 段庆儒, 等. 压力容器声发射信号人工神经网络模式识别方法研究[J]. 无损检测, 2001, 23(4): 144—146.