

信号处理
专题综述

声发射源定位技术

沈功田, 耿荣生¹⁾, 刘时风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)

摘要: 综述声发射源的定位技术, 详细介绍基于声发射信号时差测量的线定位和面定位技术, 并分析影响声发射源定位精度的因素。

关键词: 声发射检验; 线性定位; 面定位; 探头

中图分类号: TG115.28 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6656(2002)03-0114-04

ACOUSTIC EMISSION SOURCE LOCATION

SHEN Gong-tian, GENG Rong-sheng¹⁾, LIU Shi-feng²⁾

(Centre of Boiler & Pressure Vessel Inspection and Research, State General Administration
for Quality Supervision and Inspection and Quarantine, Beijing 100013, China)

Abstract: Acoustic emission (AE) source location technique was reviewed. The linear and two-dimensional AE source location methods based on time difference were systematically introduced. The factors producing error in discrete acoustic emission source location were analyzed.

Keywords: Acoustic emission inspection; Linear location; Planar location; Sensor

所有无损检测方法的共同目的都是为了发现缺陷, 而声发射(AE)技术的核心问题是由接收的信号反推到声发射源的问题, 即所谓的“反向源”或“逆源”问题。声发射信号处理的最终目的是得到对声发射源的描述, 其主要内容是源的位置、源的性质和源的严重性程度。

源的严重程度是对声发射源进行的定量评价, 目前基本上以各种声发射信号参数来加以衡量, 如以信号的幅度、能量和计数等来衡量源的强度, 以产生声发射信号的发射频率和能量释放速率来衡量源的活度, 或者综合评定声发射信号的幅度、能量等参数随载荷或时间的变化等, 这些方法已在本刊第2期进行了详细介绍^[1]。

声发射源的定性问题, 即确定所测得的声发射信号是由什么性质的源产生的, 最直接的方法是在声发射检测后, 对发现的声发射源部位经磁粉、渗透、超声和射线探伤等常规无损检测方法进行复验。

通过直接分析识别声发射信号来确定声发射源的性质, 是目前声发射检测中最难解决的问题, 也是研究热点。迄今为止, 人们广泛采用了波形分析技术^[2]、频谱分析技术^[3]和人工神经网络模式识别技术等^[4], 均取得了初步成功, 这些技术在后续的文章中将逐步介绍。

声发射源的定位需由多通道声发射仪器来实现, 也是多通道声发射仪最重要的功能之一。对于突发型声发射信号和连续型声发射信号需采用不同的声发射源定位方法, 图1列出了目前人们常用的声发射信号源定位方法。

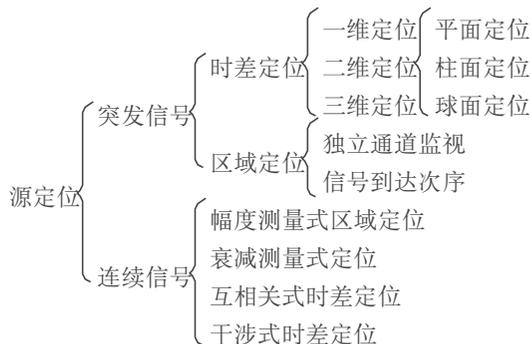


图1 声发射源定位方法分类

收稿日期: 2002-01-17

1) 北京航空工程技术研究中心, 北京 100076

2) 清华大学机械系, 北京 100084

时差定位是经对各个声发射通道信号到达时间差、波速和探头间距等参数的测量及一定的算法运算,来确定声源的坐标或位置。时差定位是一种精确而又复杂的定位方式,广泛用于试样和构件的检测。但它易丢失大量的低幅度信号,其定位精度又受波速、衰减、波形和构件形状等许多易变量的影响,因而,在实际应用中也受到种种限制。

区域定位是一种处理速度快、简便而又粗略的定位方式,主要用于复合材料等由于声发射频度过高、传播衰减过大或检测通道数有限而难以采用时差定位的场合。

连续声发射信号源定位主要用于带压力的气液介质泄漏源的定位。

本文将详细介绍突发型声发射信号时差定位方法中的一维线定位和二维平面定位技术^[5],其它定位技术将在后续文章中介绍。

1 声发射源的时差线定位技术

当被检物体的长度与半径之比非常大时,可采用线定位进行声发射检测,如管道、棒材以及钢梁等。时差线定位至少需要两个声发射探头,其定位原理如图 2a 所示。如在 1 号和 2 号探头之间有一个声发射源产生声发射信号,到达 1 号探头的时间为 t_1 ,到达 2 号探头的时间为 t_2 ,因此,该信号到达两个探头之间的时差 $\Delta t = t_2 - t_1$,如以 D 表示两探头间的距离,以 V 表示声波在试样中的传播速度,则声发射源距 1 号探头的距离 d 可由下式得出

$$d = \frac{1}{2}(D - \Delta t V) \quad (1)$$

由上式可知,当 $\Delta t = 0$ 时,声发射信号源位于两探头的正中间;当 $\Delta t = D/V$ 时,声发射源位于 1 号探头处;当 $\Delta t = -D/V$ 时,声发射源位于 2 号探头处。

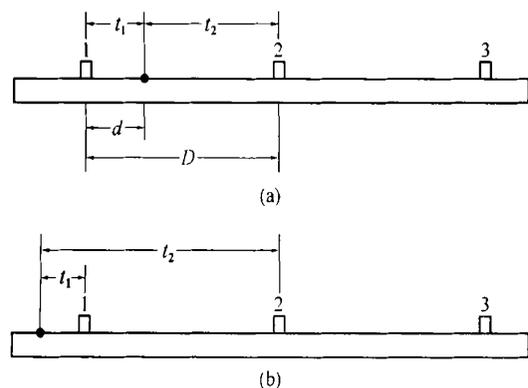


图 2 声发射源时差线定位原理图

图 2b 所示为声发射源在探头阵列外部的情况,此时,无论信号源距 1 号探头有多远,时差 $\Delta t = t_2 - t_1 = D/V$,声发射源被定位在 1 号探头处。

2 声发射源的时差平面定位技术

2.1 两个探头阵列的平面定位计算方法

考虑将两个探头固定在一个无限大平面上,假设应力波在所有方向的传播均为均匀声速 V ,两个探头的定位结果如图 3 所示,由此得到如下方程

$$\Delta t V = r_1 - R \quad (2)$$

$$Z = R \sin \theta \quad (3)$$

$$Z^2 = r_1^2 - (D - R \cos \theta)^2 \quad (4)$$

由上面三个方程可以导出如下方程

$$R = \frac{1}{2} \times \frac{D^2 - \Delta t^2 V^2}{\Delta t V + D \cos \theta} \quad (5)$$

式(5)是通过定位源(X_s, Y_s)的一条双曲线,在双曲线上的任何一点产生的声发射源到达两个探头的次序和时差是相同的,且两个探头位于这一双曲线的焦点上。

2.2 三个探头阵列的平面定位计算方法

图 3 中两个探头的 AE 源定位显然不能满足平面定位的需要,如果增加第三个探头即可以实现平面定位。如图 4 所示,可获得的输入数据为三个探头的声发射信号到达次序和到达时间及两个时差,

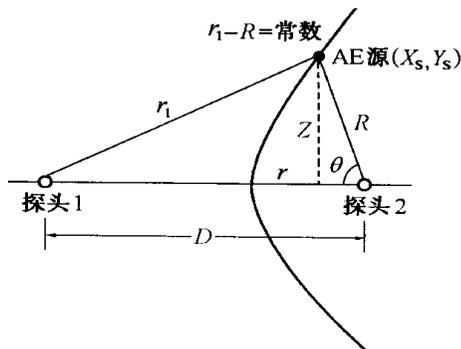


图 3 在无限大平面内两个探头的 AE 源定位

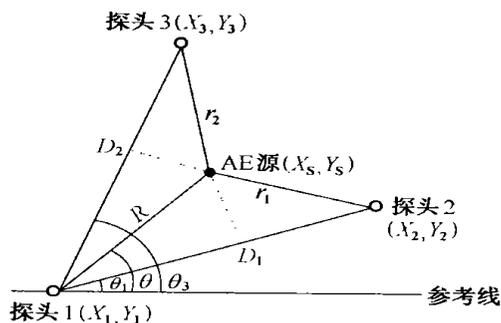


图 4 三个探头阵列的 AE 源平面定位

由此可以得到如下系列方程

$$\Delta t_1 V = r_1 - R \quad (6)$$

$$\Delta t_2 V = r_2 - R \quad (7)$$

$$R = \frac{1}{2} \times \frac{D_1^2 - \Delta t_1^2 V^2}{\Delta t_1 V + D_1 \cos(\theta - \theta_1)} \quad (8)$$

$$R = \frac{1}{2} \times \frac{D_2^2 - \Delta t_2^2 V^2}{\Delta t_2 V + D_2 \cos(\theta_3 - \theta)} \quad (9)$$

式(8)和(9)为两条双曲线方程,通过求解就可以找到这两条双曲线的交点,也就可以计算出声发射源的部位。

2.3 四个探头阵列的平面定位计算方法

对任意三角形探头阵列平面声发射源定位,求解式(8)和(9)有时得到双曲线的两个交点,即一个真实的 AE 源和一个伪 AE 源,但如采用图 5 所示的四个探头构成的菱形阵列进行平面定位,则只得到一个真实的 AE 源。

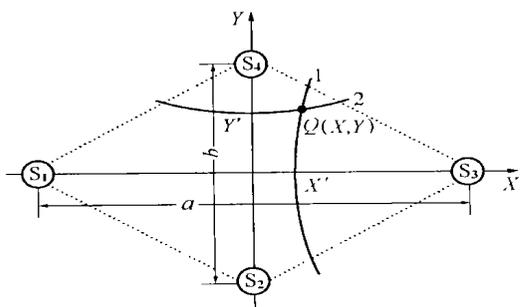


图 5 四个探头阵列的 AE 源平面定位

若由探头 S₁ 和 S₃ 间的时差 Δt_X 得到双曲线 1, 由探头 S₂ 和 S₄ 间的时差 Δt_Y 得到双曲线 2, AE 源为 Q, 探头 S₁ 和 S₃ 间距为 a, S₂ 和 S₄ 的间距为 b, 波速为 V, 那么, AE 源就位于两条双曲线的交点 Q(X, Y) 上, 其坐标可表示为

$$X = \frac{L_X}{2a} \left[L_X + 2 \sqrt{\left(X - \frac{a}{2}\right)^2 + Y^2} \right] \quad (10)$$

$$Y = \frac{L_Y}{2b} \left[L_Y + 2 \sqrt{\left(Y - \frac{b}{2}\right)^2 + X^2} \right] \quad (11)$$

式中 $L_X = \Delta t_X V$
 $L_Y = \Delta t_Y V$

2.4 声发射检测中常用的时差平面定位探头阵列

由于目前多通道声发射仪所采用的计算机硬件和软件功能都较强,因此在实际进行声发射检测过程中,人们最常用的平面 AE 源定位探头阵列为三角形,在被检对象几何形状规则的情况下,采用等腰三角形探头阵列,如图 6 和 7 所示;在被检对象几何形状不规则的情况下,采用任意三角形探头阵列,如

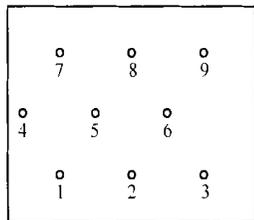


图 6 平面等腰三角定位探头阵列

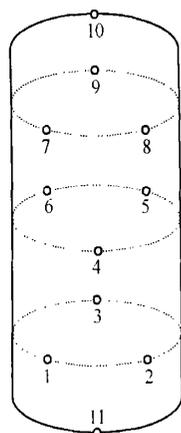


图 7 圆柱形容器的等腰三角定位探头阵列

图 8 所示,但一般情况下推荐采用锐角三角形。图 9 为压力容器焊缝表面裂纹和深埋裂纹在升压过程中扩展产生的声发射定位源图,图 10 为 400m³ 石油液化气罐在声发射检测过程中未熔合和未焊透缺陷产生的声发射源定位图。

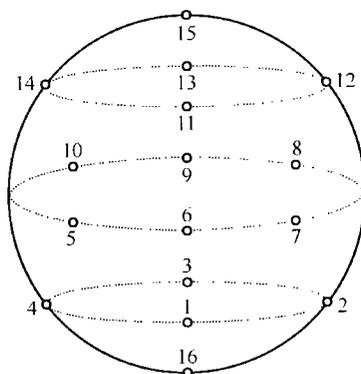


图 8 球形容器的任意三角定位探头阵列

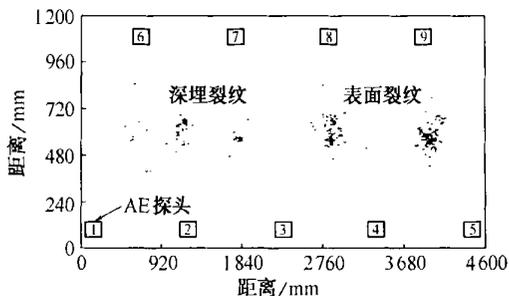
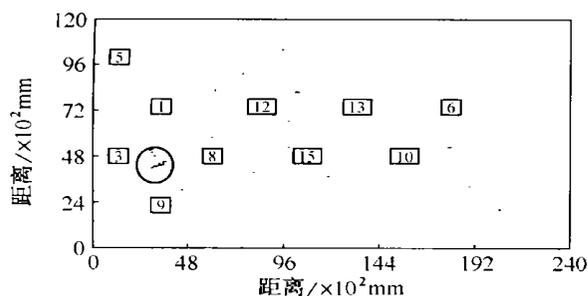


图 9 压力容器裂纹扩展 AE 定位源图

3 影响声发射信号定位源精度的因素

引起突发型声发射信号定位源误差的原因有两大类,即信号处理过程产生的误差和自然现象产生

图 10 400m³ 石油液化气罐焊接缺陷 AE 源定位图

的误差。处理过程误差可以通过调整探头的数量和间距、采用合适的时钟频率以及用三个以上的通道判断定位源的位置等来进行控制,但诸如波的衰减、波型转换、反射、折射和色散等自然现象引起的误差是不可控制的。总之,由单一源产生的声发射信号逐次计算得到的定位源不是一个单一的点,而是围绕真实源部位的一个定位集团,这一定位集团的大小和集中度依赖于定位源在探头阵列中的位置以及以上提到的所有影响因素。下面分别对一些主要影响因素加以介绍。

3.1 不唯一解

对于任何一个给定的由三个探头组成的阵列,解方程(8)和(9)可能得到双曲线的两个交点,即一个真实的声发射定位源和一个伪声发射定位源,如图 11 所示。为了判别两个声发射源的真伪,一般采用增加第四个探头以到达次序来识别。图 11 中真实定位源的声发射信号到达次序为 1, 2, 3 号探头,而伪定位源部位如产生声发射信号的到达次序为 1, 4, 3 号探头。另外,如采用诸如图 7 和图 8 的探头布置阵列对整个结构进行整体监测,则可以只考虑三角阵列内部的定位源。

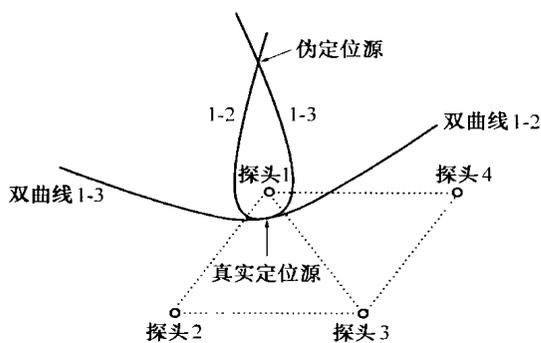


图 11 两个双曲线交点产生的真实定位源和伪定位源示意图

3.2 图形畸变

进行声发射检测时,通常在计算机内画一个图

形来表示真实的被检测物体,除平板和管道等线状结构不产生畸变外,其它大部分三维物体被展开放到二维平面上进行定位都将产生畸变。例如将图 7 的圆柱形容器或图 8 的球形容器展开为平面图,上下部位的畸变就很严重。另外,在这些压力容器上还存在一些人孔、接管等开孔,从而使声波不能按直线进行传播,导致定位源的精度有偏差。

为解决这一问题,在实际检测中一般采用断铅信号等模拟声发射源校核的方法,在被检物体上找到真实的声发射源部位。

3.3 弱声发射源

对于大型结构的声发射检测和监测,声发射探头间都有一定距离,例如对压力容器检测时,声发射探头间距一般为 35m。对于弱信号的声发射源,由于衰减的原因,如不能被至少三个探头探测到,则声发射仪器不能计算出声发射定位源。在某些应用情况下,这一因素是导致声发射定位源误差的主要原因。

3.4 探头位置

在声发射检测中,探头自身几何尺寸几乎不影响定位精度。然而,探头阵列覆盖了很大的区域,探头位置的精确程度严重影响定位源的精度。因此,在进行声发射检测时,应该尽量将声发射探头布置成等腰或等边三角形,而且在探头安放时应尽可能准确。

3.5 波速

目前采用所有声发射仪最基本的计算过程是输入一个假设已知的常数波速,如钢板为 3 000m/s。如果被检物体的真实波速为常数,但不同于已输入的波速,计算的位置误差将依赖于测量的时差值。在探头阵列的中间部位,探头间的时差很小,波速的差异不易被发现;然而,声发射信号源越靠近探头,时差越大,声发射定位源的误差也越大。为解决这一问题,推荐在进行声发射检测时实测声速。

在实际的声发射检测中,变声速的情况也常被遇到,例如一个探头收到的是纵波,而另一个探头收到的是瑞利波分量;另一种情况是色散,即波速为声波频率的函数。在波的传播过程中如遇到焊缝、开孔接管以及外焊附件等不连续结构,可以引起声波传播路径的变化,并最终引起声速的变化。

总之,目前的多通道声发射系统还不能处理变声速的情况,因此,在检测过程中必须引起操作者的

(下转第 125 页)

$$0.915 N + 7.4) \text{MPa}$$

式中 N ——回弹值

通过调节公式前面的系数来确定。

意大利对 30150MPa 混凝土利用超声、回弹、拔出和取芯等方法进行试验, 拟合公式如下(单位 MPa):

$$\text{超声法 } f_c = 10^{-28} V^{8.127 2}$$

$$\text{回弹法 } f_c = 0.000 135 N^{3.442 4}$$

$$\text{拔出法 } f_c = 0.017 14 N^{1.638 3}$$

$$\text{取芯法 } f_c = 29.326 + 0.614 4 R_{c28}$$

$$f_c = 19.893 8 + 0.763 3 R_{c50}$$

式中 R_{c28}, R_{c50} —— $\phi 28$ 和 50mm 芯样混凝土强度

7 计算机在土木工程无损检测技术发展中的作用

无损检测技术是一种信息技术, 它是一个获取信号、提取信息、导出结论的过程, 因此, 发展新型高性能的换能器, 采用先进的信号处理技术是重要发展方向。计算机对土木工程无损检测技术的发展是至关重要的, 主要表现在①对公式进行数字计算。②检测控制和检测自动化。③采用人工智能、神经网络、模式识别和图像识别等信号处理技术。④数据处理, 综合判断信息。⑤数值模拟和成像技术。

8 结语

从第 15 届世界无损检测会议论文来看, 在土木

工程无损检测技术方面已取得较大进展, 特别是随着计算机技术的发展, 新的智能化、小型化仪器不断推出, 而且在干耦合和成像方面也取得了进展。

冲击回波法的仪器, 在换能器上作了很大改进; 空气耦合检测在木材和瓷砖等方面的在线自动检测是一个重大突破; 混凝土裂缝检测和内部缺陷检测又有了新发展; 声发射、红外线、微波和雷达等新技术在应用上也取得了可喜的成绩, 值得借鉴。

参考文献:

- [1] Kovalev AV, Samokrutov AA, Shevaldykin VG, et al. Instruments and means for reinforced concrete structures inspection[A]. Proc of 15th WCNDT [M/CD]. Roma: 2000. 458.
- [2] Cheng CC, Yu CP. An investigation of the transfer function of the impact-echo response and its application[A]. Proc of 15th WCNDT [M/CD]. Rome: 2000. 517.
- [3] Santos JB. Dry coupling ultrasonic characterisation of flooring tiles and pavements[A]. Proc of 15th WCNDT [M/CD]. Rome: 2000. 112.
- [4] Lin Yiching, Kuo Shih-Fang, Chang Chiafeng. Use of stress waves for measuring surface-opening crack in mass concrete[A]. Proc of 15th WCNDT [M/CD]. Rome: 2000. 516.
- [5] Giovanni Pascale, Antonio Di Leo, Roberto Carli, et al. Evaluation of actual compressive strength of high strength concrete by NDT [A]. Proc of 15th WCNDT [M/CD]. Rome: 2000. 527.

(上接第 117 页)

注意, 一般采用折中方案。

3.6 时差测量

现代声发射仪的时差测量是基于各通道的到达时间, 而每个通道到达时间的测量与触发电平的设置和仪器的时钟频率有关。目前仪器的采样时间可精确到 250ns 以上, 因此对时差测量已不会产生大的影响。然而, 仪器触发电平设置不同, 可以引起几微秒到几十微秒以上的误差, 从而导致测量时差的误差, 最终影响定位源的计算精度。

4 结论

声发射源的定位是多通道声发射仪最重要的功能之一, 也是声发射检测发现活动性缺陷部位的唯一途径。时差定位可以较精确地确定声发射源的部位, 虽然其定位精度受到许多因素的影响, 但目前和

将来它都会是工程检测中使用的主要方法。

参考文献:

- [1] 沈功田, 耿荣生, 刘时风. 声发射信号的参数分析方法[J]. 无损检测, 2002, 24(2): 72—77.
- [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] 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.
- [4] 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.
- [5] Miller Ronnie K, McIntire Paul, eds. Nondestructive Testing Handbook (Vol. 5) Acoustic Emission Testing [M]. Second edition, Columbus: American Society for Nondestructive Testing, 1987.