

信号处理  
专题综述

# 连续声发射信号的源定位技术

沈功田, 耿荣生<sup>1)</sup>, 刘时风<sup>2)</sup>

(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:** 介绍连续型声发射信号的区域定位方法、衰减测量定位方法、互相关式时差定位方法和干涉式定位方法, 分析影响连续型声发射信号源定位精度的因素。

**关键词:** 声发射检验; 信号处理; 声发射源定位

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1000-6656(2002)04-0164-04

## LOCATING SOURCES OF CONTINUOUS ACOUSTIC EMISSION

SHEN Gong-tian, GENG Rong-sheng<sup>1)</sup>, LIU Shi-feng<sup>2)</sup>

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

**Abstract** The zone location, signal amplitude measurement, cross correlation and interference techniques for continuous acoustic emission sources are systematically introduced. Those factors producing error in continuous acoustic emission source location are analyzed.

**Keywords:** Acoustic emission testing; Signal processing; Acoustic emission source location

声发射信号分为突发型和连续型发射, 如信号由区别于背景噪声的脉冲组成, 且在时间上可分开, 这种信号就叫突发型声发射信号; 如信号的单个脉冲不可分辨, 这些信号就叫连续型声发射信号。

流体的泄漏和某些材料在塑性变形时均产生连续型声发射信号。对于连续型声发射信号, 突发型声发射信号常用的声发射参数(计数、计数率、上升时间、持续时间、幅度分布、时差等)已变得毫无意义。突发型声发射信号采用的时差定位方法, 连续型声发射信号也无法应用。根据连续型声发射信号的特点, 人们发展了基于信号衰减幅度测量的区域定位方法、基于波形互相关式时差测量的定位方法和基于波形干涉的定位方法<sup>[1]</sup>, 本文详细介绍这些连续型声发射信号源的定位方法。

## 1 区域定位方法

声发射波传播过程引起能量损失的主要因素包

括波前的延伸、热效应、反射、衍射和波型转换等, 这些因素的综合作用可引起波的衰减, 即声发射信号的强度随测量点与声发射源距离的增加而减弱。在结构发生共振的特定情况下可产生驻波, 此时信号幅度无明显下降, 但衰减仍会发生。根据这一声发射信号衰减普遍存在的原则简单识别声发射信号的衰减, 可粗略确定声发射源所在区域; 通过分析衰减特性, 可得更精确的连续型声发射信号源定位位置。

在安装许多探头的物体上产生一个连续型声发射信号源, 若每个探头的灵敏度是相同的, 探头离声发射源越近, 衰减越小, 因此探测到最大幅度声发射信号的探头将最靠近声发射源(图1)。如果再进一步考虑接收到第二大幅度信号的探头, 可以缩小声发射源存在的区域, 提高定位精度(图2)。

在许多情况下, 图2所示的二次定位法得到的定位区域仍很不精确, 有时需密集布置大量探头, 才能使定位区域的尺寸减小到可接受的程度。然而, 如果预先测得被测物体的衰减特性, 声发射源的位置可以通过考虑各探头的输出计算得到。值得强调的是, 区域定位方法只适用于被测物体具有合适衰减程度的情况, 衰减太大时, 这一方法并不适用。

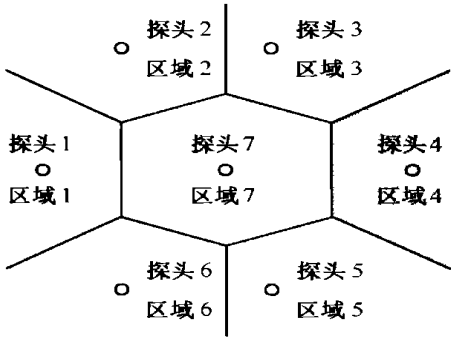
收稿日期: 2002-02-25

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

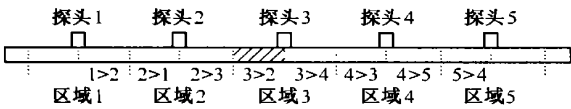


(a) 一维定位, 探头 2 具有最大输出信号, AE 源位于区域 2

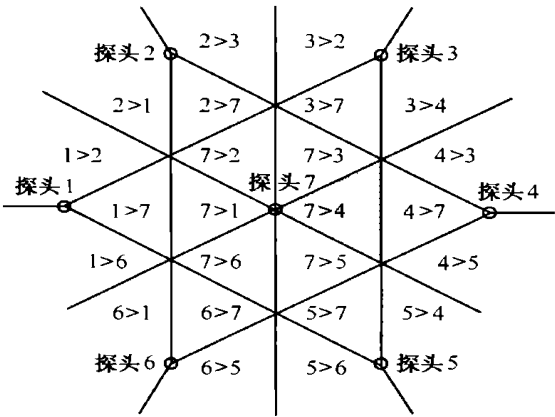


(b) 平面定位, 探头 4 具有最大输出信号, AE 源位于区域 4

图 1 基于最高输出探头的 AE 源区域定位



(a) 一维定位, 探头 3 具有最大输出信号, 探头 2 具有第二大输出信号



(b) 平面定位, 探头 7 具有最大输出信号, 探头 4 具有第二大输出信号

图 2 基于最高和第二大输出探头的 AE 区域定位 (图中数字代表该区域传感器的两个探头 AE 信号的比较结果)

## 2 衰减测量方法

区域定位法只需确定最大和第二大输出信号的探头, 十分简便, 但该方法的缺点是得到的定位区域太大, 有时无法接受。如果除了对声发射信号的大小进行排序外, 还测量声发射信号的幅度及被测物

体的衰减特性, 则可得到泄漏源较精确的定位。

连续声发射源定位的幅度测量法包括如下三个步骤:

(1) 通过识别最高和第二高声发射输出信号, 从声发射探头阵列中找到最靠近泄漏源的两个探头。探头阵列外的泄漏源不能用幅度测量法定位。

(2) 以分贝来确定两个探头输出的差值, 并与被测物体的衰减特征进行比较。

(3) 对于二维平面, 两个探头确定了一条通过泄漏源的双曲线, 因此需要第三个探头来得到另一条双曲线, 两个双曲线的交点即为泄漏源部位。此方法与突发型声发射信号的时差定位原理一致。

下面给出一个一维定位例子来进一步说明这一过程。被测物为一直径 150mm、长 84m 的充满气体的钢管, 图 3 为实测的衰减特征曲线<sup>3</sup>。采用 100kHz 探头, 两探头间的衰减  $\approx 25$ dB。实际测量采用九个探头, 探头间距为 10.5m, 衰减为 24.3dB。图 4 给出了 3 号和 4 号探头间几个任意泄漏源的情况, 如泄漏源位于两探头的正中间, 则两个探头输出的信号幅度相同, 幅度差为 0dB。

幅度测量法定位与两个探头之间的相对幅度值紧密相关, 而与探头输出的绝对幅度值无关。然而, 这些测量必须基于两个先决条件, 即① 将所有通道

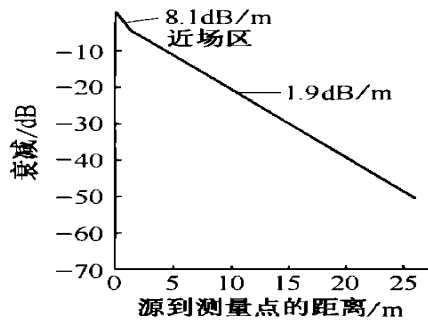


图 3 直径为 150mm 钢管的声衰减特性

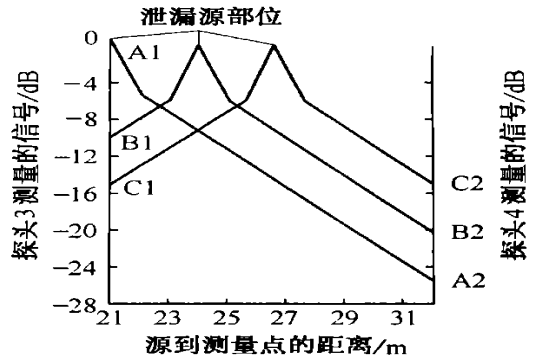


图 4 10.5m 探头间距几个泄漏源的衰减模式

(包括探头和放大器)的灵敏度调整为相同。② 无任何电子或机械背景噪声。将各通道灵敏度调成一致易于达到,而彻底消除背景噪声是不可能的。

噪声的存在将引起定位源计算的误差,测量信号的方均根电压值(rms)  $S_{测}$  与噪声的 rms 值  $n$  和真实信号 rms 值  $S_{真}$  的关系为

$$S_{测} = (S_{真}^2 + n^2)^{1/2} \quad (1)$$

如果噪声已知,则可计算出真实的信号。通常,在泄漏发生前预先测量信号的电平或者观察与泄漏源相距很远的探头都可测到背景噪声信号。后一种方法不适用于仅采用两个探头的情况或探头阵列中的背景噪声为不均匀的情况。

### 3 互相关式定位方法

常用的测量两个突发型声发射波之间时差的技术不适用于连续型声发射源,而互相关技术既适用于断续波之间的时差或时间延迟测量,也适用于连续波之间的时差或时间延迟测量<sup>[3]</sup>,这一技术已被成功地应用于管道声发射检测的泄漏源定位<sup>[4]</sup>。

任意一个波  $A(t)$  和另一个延迟时间为  $\tau$  的波  $B(t+\tau)$  之间的互相关函数(CCF)可由下式给出

$$R_{AB}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T A(t)B(t+\tau)dt \quad (2)$$

式中  $T$ ——一个有限的时间间隔

从方程(2)可见,如果  $\tau$  是变化的,则互相关函数是  $\tau$  的函数。 $R_{AB}(\tau)$  的特性可以通过将  $A(t)$  和  $B(t)$  分为  $n$  个小的相等时间段的积来观察。

令  $t=t_i, A(t)=a_i, B(t)=b_i, i=0, 1, 2, \dots, n$ , 如果  $B(t)$  相对于  $A(t)$  有一时间延迟  $\tau'$ , 则

$$\begin{cases} R_{AB}(\tau_j) = \sum_{i=0}^n a_i b_{i+j} \\ j = 0, 1, 2, \dots, n \\ R_{AB}(\tau_j) = \sum_{i=0}^n a_i b_{i-j} \\ j = -1, -2, \dots, -n \\ R_{AB}(\tau_j) = \sum_{i=0}^n a_i b_i \quad j = 0 \end{cases} \quad (3)$$

方程(3)中  $a_{i+j}$  和  $b_{i-j}$  的下标随  $R_{AB}(\tau_j)$  中  $\tau_j$  的变化而变化。

互相关函数是在有限时间范围内的积分。在实际应用中,数据采样仅利用了每个波的有限部分,而在被利用部分之外的波幅为零,即如果  $i > n, a_i = b_i = 0$ 。如果  $j > 0$  且  $i+j > n$ , 则  $a_{i+j} = 0$ 。如果  $j < 0$  且  $i-j > n$ , 则  $b_{i-j} = 0$ 。因此,当  $|j|$  增加时,  $i$

$+j$  增加,方程(3)中的某些求和项将为零。随着  $|j|$  的增加,求和项数将越来越少,  $R_{AB}(\tau_j)$  的幅值逐渐下降。最终,当  $|j| > n$ , 所有  $a_{i+j}$  和  $b_{i-j}$  项为零,  $R_{AB}(\tau_j) = 0$ 。当  $\tau = \tau'$  时,由于  $A$  和  $B$  为同相位,则  $R_{AB}(\tau')$  达到最大值。因此,从  $R_{AB}(\tau_j)$  的最大峰值部位可以获得  $B(t)$  相对于  $A(t)$  的时差或时间延迟  $\tau'$ 。

现举一例来说明互相关函数的计算步骤和特性。假设  $A(t)$  和  $B(t)$  是正弦函数,  $A(t) = A_0 \sin \omega t$  和  $B(t) = B_0 \sin[\omega t - (\pi/6)]$ ,  $A_0 = B_0 = 1$ 。如图 5a 和 b 所示,将  $A(t)$  和  $B(t)$  的  $\omega t$  轴上的一个周期分为 12 等份,则对应  $A(t) = a_0, a_1, a_2, \dots, a_{12}$  和  $B(t) = b_0, b_1, b_2, \dots, b_{12}$ 。在  $j = -12, -11, \dots, 0, \dots, 11, 12$  时,运用方程(3)可计算出互相关函数  $R_{AB}(\tau_j)$ , 计算结果如图 5c 所示。从图 5c 可见,当  $\omega\tau = \omega\tau_{-1} = -\pi/6$  时,  $R_{AB}(\tau_{-1})$  为最大值。随着  $\omega\tau$  的增加,  $R_{AB}(\tau)$  的峰值绝对值下降,当  $-2\pi \geq \omega\tau \geq 2\pi$  时,  $R_{AB}(\tau) = 0$ 。这一例子说明了在有限时间间隔内的互相关函数的特征,如果积分时间的间隔趋于无限大,互相关函数  $R_{AB}(\tau)$  将成为无最大峰值的连续余弦波,这也是互相关选择有限

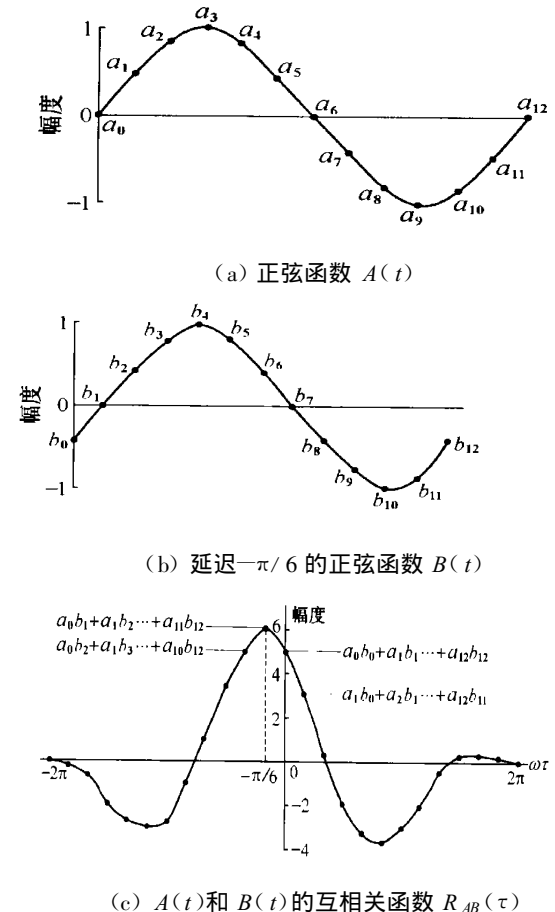


图 5 互相关函数计算示意图

时间间隔的原因。

对于任意一函数  $A(t)$  和时间延迟为  $\tau'$  的函数  $B(t)$ , 两个函数  $A(t)$  和  $B(t+\tau')$  在有限时间间隔内的互相关函数  $R_{AB}(\tau)$  在  $\tau=\tau'$  时肯定包含一个最大值, 这一互相关方法可用于连续型声发射源的定位。如探头 A 接收到来自连续 AE 源的波  $A(t)$ , 探头 B 接收到来自 AE 源的波  $B(t+\tau')$ , 相对于波  $A(t)$  的时间延迟为  $\tau'$ , 那么 AE 波从源传播到两个探头间的时差可以从其互相关函数  $R_{AB}(\tau)$  的最大峰值部位来得到, 即  $\Delta t_{AB}=\tau'$ 。

图 6 给出了由两个声发射探头探测的来自一个连续声发射源的两个波的典型互相关函数, CCF 从  $-40 \sim 40\text{ms}$  的  $80\text{ms}$  时间间隔内作为  $\tau$  的函数被绘出。当  $\tau=-3.05\text{ms}$  时, CCF 的峰值最大。另外, 为了降低可能存在的噪声影响, 图 6 曲线实际为来自同一源相同探头的 16 个 CCF 的平均值。

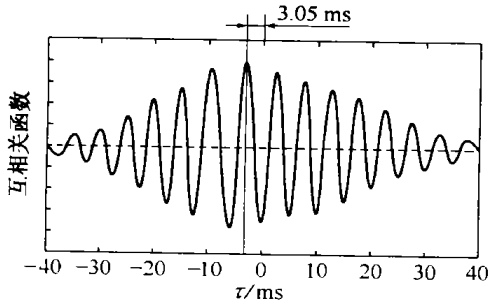


图 6 典型的互相关函数图形

一旦由互相关技术测量得到连续源的时差, AE 源定位的时差计算方法与本刊上一期文章中<sup>[5]</sup> 突发型 AE 信号的时差定位方法相同, 但应使用正确的波速, 尤其需对复杂结构中传播的复合波模式给予注意。

通常可以应用双通道快速傅里叶(FFT)变换分析来实现互相关函数分析。从频域  $\nu$  中互相关谱  $G_{AB}(\nu)$  的逆傅里叶变换可以得到时域  $\tau$  中的互相关函数  $R_{AB}(\tau)$

$$R_{AB}(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{+\infty} G_{AB}(\nu) \exp(i2\pi\nu\tau) d\nu \quad (4)$$

式中  $G_{AB}(\nu)$  ——  $A(t)B(t+\tau)$  的傅里叶变换

#### 4 干涉式定位方法

上述衰减测量方法和互相关方法都是先探测到泄漏, 然后确定泄漏源位置。然而, 在某些情况下可以反向进行, 即通过源定位处理的结果来指出泄漏的存在。这一方法已被人们用于液态金属热交换器泄漏的定位和探测<sup>[6]</sup>。

假设由探头阵列探测到的泄漏信号是相干的, 这一方法在无泄漏的情况下探测的信号是噪声, 相干性很低。干涉式定位方法的步骤是① 在感兴趣的二维或三维空间内定义一个位置。② 计算信号从定义位置到所有探头之间的传播路径长度, 通过已知波速计算波到达阵列中所有探头的传播时间和各个探头的时间延迟。③ 按预定的时间同时捕捉每一个探头的输出, 按照第二步计算的延迟时间推迟各通道的采样时间。④ 确定所有延迟探头间的相干性, 高水平的相干性指出在假设的源部位有泄漏发生。⑤ 如果相干性较低, 假设另外一个部位从第二步重复进行。

这一处理过程依赖于源位置的预定义, 然后再验证声发射信号是否与泄漏一致。

#### 5 结论

连续声发射源的定位是流体介质泄漏检测的最重要方法之一, 本文介绍的区域定位方法、衰减测量定位方法、互相关式时差定位方法和干涉式定位方法都有一定的优点和不足, 使用时具体选用哪种方法应根据被检测对象和定位精度的需要加以选择。

#### 参考文献:

- [1] Miller Ronnie K, McIntire Paul eds. Nondestructive Testing Handbook (Vol. 5) Acoustic Emission Testing [M]. Second edition, Columbus; American Society for Nondestructive Testing 1987.
- [2] Kitajima A, et al. Acoustic Leak Detection in Piping Systems[R]. Tokyo, Japan; Central Research Institute of Electric Power Industry, 1984.
- [3] Bendat JS, Piersol AG. Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis[M]. New York: John Wiley and Sons Publishing, 1980.
- [4] Kupperman DS, et al. Acoustic leak detection for light water reactors [A]. Proceedings of Qualtest 1 [C]. Columbus OH; American Society for NDT, 1982.
- [5] 沈功田, 耿荣生, 刘时风. 声发射源定位技术[J]. 无损检测, 2002, 24(3): 114-117.
- [6] Greene DA, et al. Acoustic leak detection/ location system for solid heated steam generators [A]. Proceedings of the Second International Conference on Liquid Metal Technology in Energy Production [C]. La Grange Park IL; American Nuclear Society, 1980.