

信号处理
专题综述

曲面和三维结构的声发射源定位方法

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

摘要: 曲面和三维结构的声发射源定位方法主要有时差定位法、区域定位法、相关关系定位法和模式识别定位法。详细介绍曲面和三维结构的时差声发射定位方法。

关键词: 声发射检验; 曲面; 三维结构; 定位技术; 信号处理

中图分类号: TG115.28 文献标识码: A 文章编号: 1000-6656(2002)05-0205-07

LOCATION OF ACOUSTIC EMISSION SOURCE ON CURVED SURFACES AND THREE-DIMENSION STRUCTURES

JIN Zhong-shan LIU Shi-feng GENG Rong-sheng¹⁾, SHEN Gong-tian²⁾

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

Abstract: There are mainly four methods for locating acoustic emission sources on curved surface and three-dimension structures including time arriving, zone, correlation and pattern recognition. Time arriving method is introduced in detail.

Keywords: Acoustic emission testing; Curved surface; Three dimension structure; Location technique; Signal processing

声发射源定位方法按测试对象或测试定位要求主要可分为线定位、面定位和三维定位。其中面定位又可分为平面定位和二维定位。按实现定位的方法原理, 声发射源定位又可分为时差定位法、区域定位法、相关关系定位法和模式识别定位法。

时差定位法^[1] 根据同一声发射源所发出的声发射信号到达不同传感器的时间上的差异以及传感器布置的空间位置, 通过它们的几何关系列出方程并进行求解, 可得到声发射源的精确位置。时差定位法通常假定材料声传播各向同性, 声速为常数, 是目前线性、平面应用最普遍的声发射源定位方法。时差定位法在复杂结构、各向异性材料以及声速不为单一常数情况时误差较大, 应用有困难。另外, 曲面时差定位法和三维声发射源时差定位法由于相对于线性平面时差定位法计算较复杂, 目前实际应用较少。在此, 将对曲面时差定位法和三维声发射源时

差定位法进行介绍。

区域定位法^[1] 不是通过求解方程组来确定声发射源的坐标, 而是根据接收到声发射源信号的传感器个数和相对时差次序来判断声发射源所在的小区域。区域定位法首先根据传感器以及检测材料的属性, 以传感器为圆心划分出半径逐步增大的圆环, 然后逐一在各圆环区域内产生模拟声发射信号, 建立各区域的边界准则。实际检测时, 将各个传感器检测到的信号与边界准则相比较, 相符合时则认为该声发射源在该圆环区域内。同样, 每个传感器都可以定位出这样的圆环区域, 声发射源的位置就在这些圆环的重复区域中。区域定位法简洁、不易误定位, 但定位精度低。

信号相关关系定位法^[2] 根据同一声发射源同一时刻信号的相关特性来进行定位, 主要用于连续声发射源信号定位, 例如泄漏源声发射检测等。

声发射源位置还可通过模式识别的算法来实现^[3], 即将不同声发射源位置认为是不同模式, 对应声发射波形信号为相对应数据(可为一个传感器

收稿日期: 2002-01-14

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 锅检中心, 北京 100013

或多个传感器),应用模式识别的方法建立数据与模式(声发射源定位)的对应映射关系。模式识别定位法特别适用于材料各向异性、结构复杂的情况。

模式识别定位法通过对结构中已知的声发射信号从声源到传感器的传播规律进行统计,建立一个经验模型。这个模型的结构类似于径向基函数神经网络。建立模型包括两个步骤,首先,任意布置传感器的位置,把待检测的结构划分为很多小区域,采用已知的声发射源信号在各区域对传感器进行标定,在模型中记录传感器中的信息。然后,在检测的过程中,模型把检测到的信号与“记忆”中的信息(合成的位移-时间信息)按预先规定的标准比较,可以确定声发射源的位置信息。

1 曲面结构

1.1 原理和讨论

在大型曲面结构中,对于声发射的研究主要是声发射源的定位问题,如何提高声源的定位精度,最大限度地减少漏定位和伪定位,是声发射检测与评定的主要目的。使用时差定位法是根据声源信号到达同一阵列内不同传感器时所形成的一组时差,经过几何关系的计算确定声源位置。该方法定出的声源为一确定点,可靠性高,大多数试验和声发射仪器都用这种方法来确定声发射源位置。

在一般的声发射定位过程中,通常涉及到线定位和平面定位,这些定位算法相对简单,在大型曲面结构中,由于结构特点,需要进行比较复杂的计算,下面以大型球罐表面声发射定位为例来对其主要算法进行说明。

大型压力球罐是实际检测过程经常遇到的构件,我们采用球面三角网络算法⁴来定位声发射源。如图1所示,设球罐的球心为O,球罐半径为R,球罐表面上取任意两点A,B,我们采用球面坐标分别表示为A(α₁,β₁),B(α₂,β₂),其中α=0°~360°,β=0°~180°;那么球面上AB两点对应的最

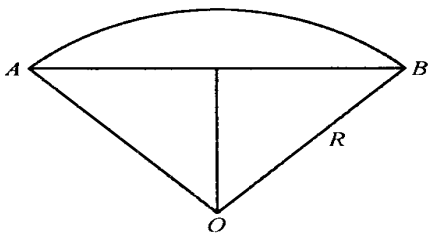


图1 球面弧长示意图

短(即直线)距离为

$$AB^2 = R^2 (\sin \beta_1 \sin \alpha_1 - \sin \beta_2 \sin \alpha_2)^2 + R^2 (\sin \beta_1 \cos \alpha_1 - \sin \beta_2 \cos \alpha_2)^2 + R^2 (\cos \beta_1 - \cos \beta_2)^2 \quad (1)$$

AB两点对应的弧长为

$$AB = R \left[\pi - 2 \arccos \left(\frac{AB}{2R} \right) \right] \quad (2)$$

由式(1)和(2)解得弧长为

$$AB = R \arccos [\sin \beta_1 \sin \beta_2 \cos (\alpha_1 - \alpha_2) + \cos \beta_1 \cos \beta_2] \quad (3)$$

当判断出一个声源(设为P)来自球面上的一个三角形(设为△ABC)内部,设声源P到达A和B点的时间差为Δt₁,到达C与A点的时间差为Δt₂,声波在球面上的传播速度为V,声源与A点的距离为L,则声源位置由下面三个方程决定

$$\begin{cases} PA = L \\ PB = L + V\Delta t_1 \\ PC = L + V\Delta t_2 \end{cases} \quad (4)$$

把式(3)代入(4)得出计算方程

$$\begin{cases} \sin \beta_2 \sin \beta \cos (\alpha - \alpha_2) + \cos \beta_2 \cos \beta - \cos \frac{L + \Delta t_1 \times V}{R} = 0 \\ \sin \beta_1 \sin \beta \cos (\alpha - \alpha_1) + \cos \beta_1 \cos \beta - \cos \frac{L}{R} = 0 \\ \sin \beta_3 \sin \beta \cos (\alpha - \alpha_3) + \cos \beta_3 \cos \beta - \cos \frac{L + \Delta t_2 \times V}{R} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

上述方程为三元非线性方程的超越方程组,使用解析法很难求解。如果需要声发射系统实时地计算出声源位置,就要选择合适的数值解法。非线性方程组的数值解法很多,牛顿迭代法有较快的收敛速度和很好的稳定性。其基本原理是

$$x^{k+1} = x^k - F'(x^k)^{-1} F(x^k)$$

式中 x^{k+1}——第k+1次迭代的结果矩阵

x^k——第k次迭代结果的矩阵

F'(x^k)⁻¹——F(x^k)的导数矩阵的逆矩阵

F(x^k)——第k次迭代结果的方程组矩阵

把上式简单地变形,可得到

$$F'(x^k) \times (x^{k+1} - x^k) = -F(x^k)$$

这样,解三元方程组问题就变为解线性方程组问题,可以采用高斯消去法等多种方法求解。方程(5)满足牛顿迭代法条件,它的导数矩阵为

$$\begin{bmatrix} -\sin\beta_1\sin\beta\sin(\alpha-\alpha_1) & \sin\beta_1\cos\beta\cos(\alpha-\alpha_1) - \cos\beta_1\sin\beta & \frac{1}{R}\sin\frac{L+\Delta t_1\times V}{R} \\ -\sin\beta_2\sin\beta\sin(\alpha-\alpha_2) & \sin\beta_2\cos\beta\cos(\alpha-\alpha_2) - \cos\beta_2\sin\beta & \frac{1}{R}\sin\frac{L}{R} \\ -\sin\beta_3\sin\beta\sin(\alpha-\alpha_3) & \sin\beta_3\cos\beta\cos(\alpha-\alpha_3) - \cos\beta_3\sin\beta & \frac{1}{R}\sin\frac{L+\Delta t_1\times V}{R} \end{bmatrix}$$

在△ABC内选定源位置计数初始值,代入上述方程中可得到源位置。通过以上算法,在球罐表面均匀布置传感器,就可得到球罐表面不同位置声发射源的位置。同样,在不同的曲面结构上,可用相同的计算方法和迭代方法来确定声发射源的位置。

由于上述算法较复杂,在实际工程中,可把球面近似扩展成平面简化计算。假设放置三个传感器组成任意三角形(图2),传感器分别放在 $S_0(x_0, y_0)$, $S_1(x_1, y_1)$ 及 $S_2(x_2, y_2)$ 点上,在 $P(x, y)$ 上有一声发射源距 S_0 点的距离为 R ,则声源距 S_1, S_2 与距 S_0 的距离差 ΔS_1 和 ΔS_2 为

$$\begin{aligned} \Delta S_1 &= PS_1 - PS_0 = \Delta T_1 \cdot V \\ \Delta S_2 &= PS_2 - PS_0 = \Delta T_2 \cdot V \end{aligned}$$

式中 V ——声信号在介质中的传播速度
 ΔT_1 ——信号到达传感器 S_1, S_0 的时间差
 ΔT_2 ——信号到达传感器 S_2, S_0 的时间差

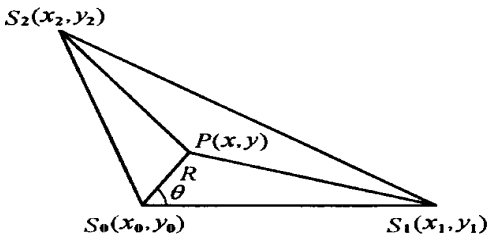


图2 平面定位解析法

由图2可以得到如下方程组

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = R^2 \\ (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = (R + \Delta S_1)^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = (R + \Delta S_2)^2 \end{cases} \quad (6)$$

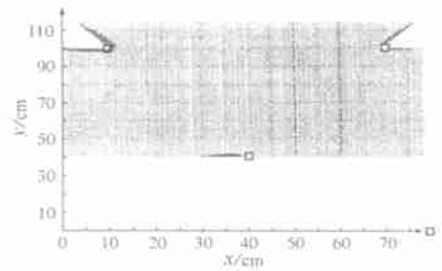
解此方程组可以有两种方法,即解析法和牛顿迭代法。用牛顿迭代法进行数值求解的迭代矩阵是

$$\begin{bmatrix} 2x & 2y & -2R \\ 2(x - x_1) & 2(y - y_1) & -2(R + \Delta S_1) \\ 2(x - x_2) & 2(y - y_2) & -2(R + \Delta S_2) \end{bmatrix}$$

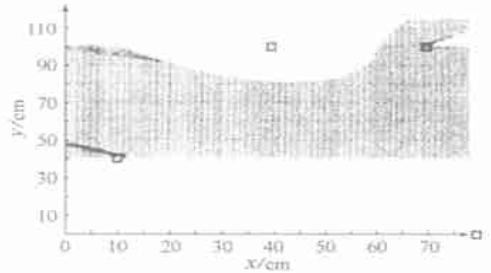
可以采用软件技术模拟传感器组成的三角形内部以及附近的矩形区域范围内声发射源信号到达各个传感器的时间,以此检验解析法和牛顿法的准确性和收敛性。

下面以锐角和钝角三角形为例说明源定位情

况。图3中锐角三角形模拟传感器顶点坐标分别为 $S_1(10, 100), S_2(40, 40), S_3(70, 100)$,钝角三角形模拟传感器顶点坐标为 $S_1(10, 40), S_2(40, 100), S_3(70, 100)$ 。图中白色表示此处为无源定位,颜色较浅处表示有一源定位,而颜色较深的说明此处至少有两次源定位(我们定义该区域为二次定位区域)。采用解析法直接计算声发射源位置。



(a) 锐角三角形



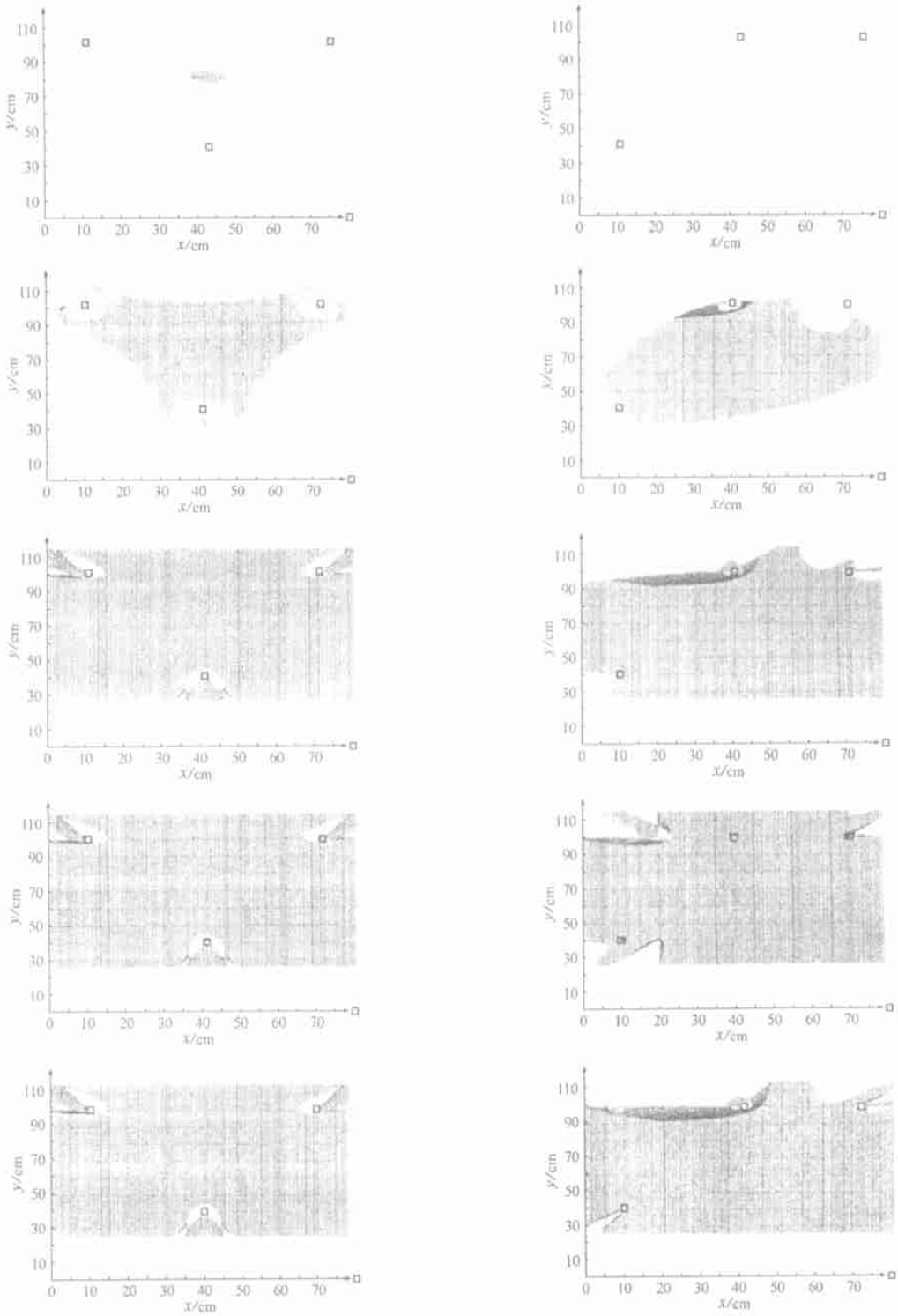
(b) 钝角三角形

图3 解析法

从以上数值模拟结果来看,在锐角和钝角三角形内甚至其周围都可求得解。但在钝角三角形内,由于 θ 值选择的限制,在 S_2 附近存在一定盲区,三角形越大,此盲区有进一步发展的趋势。因此,如采用解析法求解声发射源位置,将产生一定的误差。

图4是用牛顿迭代法求解一定区域内几种不同情况的声发射源位置数值模拟计算结果,迭代精度为1mm,计算变量类型为double类型32位,迭代次数分2,4,6,10和100五种。模拟源区域为 $x=-5 \sim 80\text{cm}, y=25 \sim 110\text{cm}$;迭代步长为 $x=0.6\text{cm}, y=0.3\text{cm}$ 。

当迭代次数为4时,三角形内部大部分区域基本上能计算出源位置;当迭代次数为6时,三角形内



(a) 锐角三角形

(b) 钝角三角形

图4 牛顿迭代法

部包括外部边缘区域大部分能计算出源位置；当迭代次数超过 10 时，源定位区域已经基本稳定下来。因此，在迭代计算时，迭代次数选择 6 即可，如要考虑三角形外部可定位，则适当增加迭代次数。无论

是锐角或钝角三角形，迭代法使得三角形顶点附近有一定大小的盲区，不同三角形的不同顶点，盲区的大小也不同，如锐角三角形各顶点附近都存在着或大或小的盲区，钝角三角形的钝角顶点附近存在着

明显的盲区,而其它两锐角附近盲区很不明显,甚至可能不存在。此外,我们也可以看出,盲区和三角形顶点角度有关,角度越大盲区有向三角形内部壮大的趋势,反之则有向三角形外部收缩的趋势。

1.2 传感器的布置

综合考虑传感器的数量、灵敏度范围、算法和计算精度以及球罐的几何形状等因素,简单的传感器布置显然不能满足这些要求,所以要在球面上布置多个传感器,这些传感器之间构成的三角网络要覆盖整个球面,并且任意的声源位置都可以被包含在某个锐角三角形的内部。球罐的几何形状使得这种布置很方便,根据球体的经度、纬度坐标给各个传感器定位,传感器布置的对称性也使得编程实现对三角网络的布置更加方便。对一般的 $200 \sim 1\,000\text{m}^3$ 的压力球罐,通常要布置 16 或 32 个传感器。下面介绍球面上传感器的布置方法(图 5)。

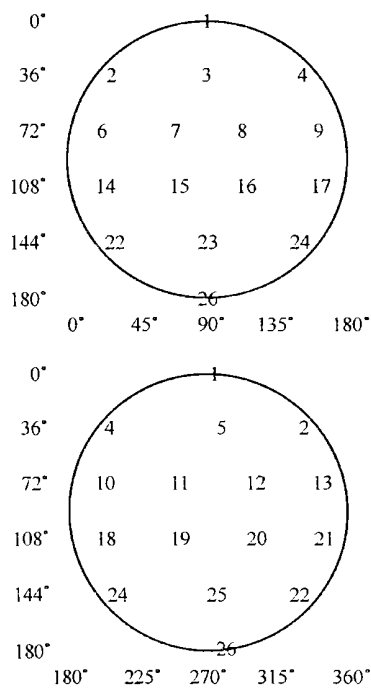


图 5 球面上传感器的布置方法

图中所示为 26 个传感器的布置方式,采用的是 $1/4/8/8/4/1$ 阵列形式,这些传感器在经度和纬度方向上都是等间距的。如果要布置 32 个传感器可以采用 $1/5/10/10/5/1$ 阵列形式。尽量使得传感器在球面上均匀布置,而且声源对每个传感器的灵敏度大小几率接近。

1.3 相关组的判断

声发射信号最先到达某一通道时,各个通道同时进行采集,找到信号最先到达的传感器标号,以该

传感器为中心找到附近的传感器并组成相关组。

判断相关组的原则是:

(1) 以传感器位置按一定的高度或纬度给整个传感器分组,图 5 就分成六组,其中第一组传感器的个数为一个,第二、五组为四个,第三、四组为八个,第六组为一个,记下各组中的传感器位置和编号等参数。

(2) 以声发射信号最先到达的传感器为中心,查找出该传感器所在组,并分别在该传感器所在组和上下相邻的两组中,查找出左右(球面上以经度表示)离该传感器最近的几个传感器且记下传感器的有关参数。

(3) 根据该传感器和找出的该区域组中的其它几个传感器,按不重叠的特定规则判别出该传感器的定位相关组,并以该传感器号为关键字放到定位相关表中。

当图 5 中 3 号传感器最先接收到声发射信号时,找到其所在的第二组,接下来查找相邻的 1, 2, 4, 7, 8 号传感器,记录各通道信号。然后,把存储的相关参数代入到相关组的传感器中,计算并定位。

1.4 现场模拟测试

在一个 400m^3 的球罐下半球上如图 6 布置 11 个传感器,组成不规则曲面三角网络,底部为 1 号传感器,在 1 号传感器上方 1.74m 处布置第二层四个传感器,分别为 2, 3, 4, 5 号,传感器间距为 2.64m,在第二层上方 2.1m 处布置第三层六个传感器,分

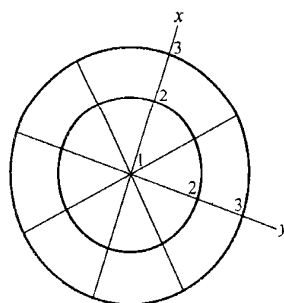
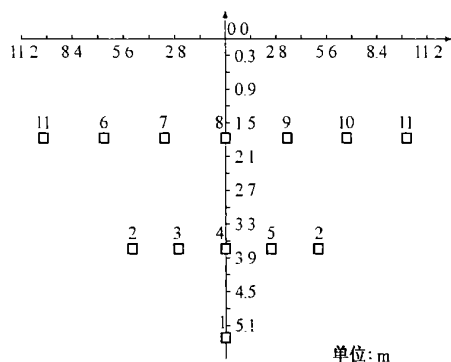


图 6 球罐传感器布置示意图

别为 6, 7, 8, 9, 10, 11 号, 传感器间距为 3.42m。在组成球面三角网络的每个曲面三角形中各给出模拟声源 2~4 个, 声源位置在曲面三角形中偏向传感器的中间部位。本试验主要目的是测试曲面三角网络中相关组的判断及球面算法计算源定位情况。

由图 7 测试结果可见声源位置比较均匀地分布于平面中, 定位结果比较准确。但同时也可以看出, 有的声源位置误差较大, 如 6 号传感器附近点。

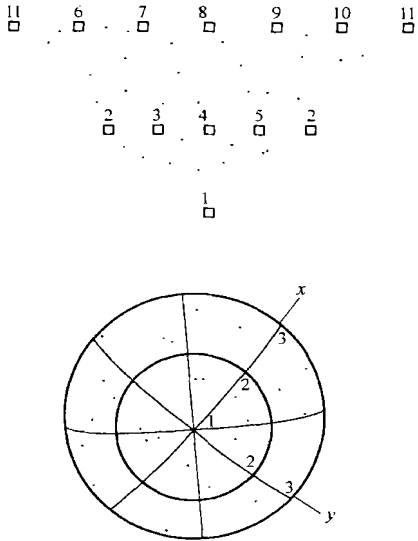


图 7 定位结果显示

2 三维结构

建立一个三维坐标系, 以四个传感器 $T_0 \sim T_3$ 中的 T_2 为基准, 测量其它三个传感器与基准信号的时间差。为了简化说明, 假设声发射信号在该三维空间的传播速度已知为恒定值, 根据空间的几何关系列方程得出声源到各个传感器的距离差, 进而计算出声源的相对空间坐标 (图 8)。

四个传感器位于同一平面内 (z 轴坐标均为 0), S 为声源的位置。设 T_2 坐标为 $(0, 0, 0)$, T_0 为 (x_0, y_0, z_0) , T_1 为 (x_1, y_1, z_1) , T_3 为 (x_3, y_3, z_3) , S 为 (x, y, z) , 则可列出距离差

$$\begin{aligned} |ST_0| - |ST_2| &= d_{02} \\ |ST_1| - |ST_2| &= d_{12} \\ |ST_3| - |ST_2| &= d_{32} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x &= \frac{(d_0 - c_{01}d_1)(y_0 - c_{03}y_3) - (d_0 - c_{03}d_3)(y_0 - c_{01}y_1)}{(x_0 - c_{01}x_1)(y_0 - c_{03}y_3) - (x_0 - c_{03}x_3)(y_0 - c_{01}y_1)} \\ y &= \frac{(d_0 - c_{01}d_1)(x_0 - c_{03}x_3) - (d_0 - c_{03}d_3)(x_0 - c_{01}x_1)}{(y_0 - c_{01}y_1)(x_0 - c_{03}x_3) - (y_0 - c_{03}y_3)(x_0 - c_{01}x_1)} \end{aligned}$$

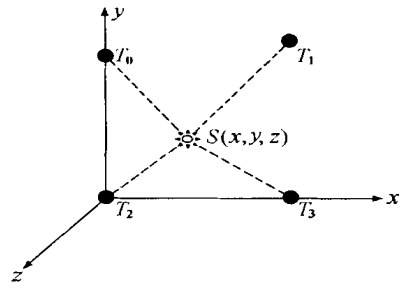


图 8 三维坐标系中传感器和声源的位置

于是有

$$\begin{aligned} \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2} - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} &= d_{02} \\ \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} &= d_{12} \\ \sqrt{(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 + (z-z_3)^2} - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} &= d_{32} \end{aligned}$$

化简后可得

$$\begin{cases} 2(x_0x + y_0y + z_0z) + 2d_{02} \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 - d_{02}^2 \\ 2(x_1x + y_1y + z_1z) + 2d_{12} \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - d_{12}^2 \\ 2(x_3x + y_3y + z_3z) + 2d_{32} \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = x_3^2 + y_3^2 + z_3^2 - d_{32}^2 \end{cases} \quad (7)$$

令

$$\begin{aligned} x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 - d_{02}^2 &= 2d_0 \\ x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - d_{12}^2 &= 2d_1 \\ x_3^2 + y_3^2 + z_3^2 - d_{32}^2 &= 2d_3 \end{aligned}$$

将上两式相比较后得到一组独立方程组

$$\begin{aligned} \frac{x_0x + y_0y + z_0z - d_0}{x_1x + y_1y + z_1z - d_1} &= c_{01} \\ \frac{x_0x + y_0y + z_0z - d_0}{x_3x + y_3y + z_3z - d_3} &= c_{03} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (x_0 - c_{01}x_1)x + (y_0 - c_{01}y_1)y + (z_0 - c_{01}z_1)z - d_0 + c_{01}d_1 &= 0 \\ (x_0 - c_{03}x_3)x + (y_0 - c_{03}y_3)y + (z_0 - c_{03}z_3)z - d_0 + c_{03}d_3 &= 0 \end{aligned}$$

代入初始条件 $z_0 = z_1 = z_3 = 0$, 得到

$$z = \sqrt{\left[\frac{d_0 - (x_0x + y_0y)}{d_{02}} \right]^2 - (x^2 + y^2)}$$

由以上表达式共可得到两个解, 两个解在 z 方向坐标为相反数。可根据实际情况取得其中一个正确解。虽然以上从空间解析几何关系可以获得推导, 但工程应用中因实际存在各种干扰, 使得延时估计有偏差, 因此由上式往往无法定位。另外, 还可以采用牛顿迭代法来解方程(7)。

由以上可知该种算法需要布置四个传感器, 而且在解方程的过程中会出现错误解, 所以通过该种传感器布置方法一般来说要布置七八个传感器。因此, 根据传感器个数的选择就可以得到不同的算法和程序。

首先, 可以采用固定的传感器布置, 方式主要有两种(图9), 一种为四传感器布置, 一种为八传感器布置, 当然可以根据三维物体的实际尺寸来选择传感器的数目, 可以更多地增加传感器数目, 以缩小定位传感器间距来提高精度。就图9两种传感器布置方法, 四传感器布置可以使得实验设备简化, 同时可以更加容易地获得定位信息, 因为传感器数目少所

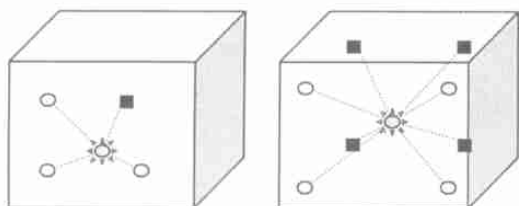


图9 传感器布置示意图

以定位解唯一。而第二种方法可以获得更多实体内部的信息, 因此更精确。

另外, 还可灵活设置可以自由移动的探头, 通过移动的探头来获得不同的初始值, 最后逐步达到精确定位。

3 结论

概要介绍了声发射源定位的几种方法。以球面结构为例, 详细介绍了曲面结构声发射定位主要根据时差定位的算法, 以及程序的实现。根据实际数值模拟对该方法的可行性和准确性进行讨论, 在实践中也取得了很好的效果。还阐述了三维结构的时差声发射定位方法。

参考文献:

- [1] Milker RK, McIntire P, eds. Nondestructive Testing Handbook(Vol. 5) Acoustic Emission Testing[M]. Second edition, Columbus: American Society for Nondestructive Testing, 1987.
- [2] Grabec I. Application of correlation technique for localization of acoustic emission sources[J]. Ultrasonics, 1978, 16: 111-115.
- [3] Xiaorong Lu, Wolfgang Sachse, Igor Grabec. Use of an automatic modeler and a small receiver array for acoustic emission(AE) source location[J]. Ultrasonics, 1998, 36: 539-547.
- [4] 胡 斌. 多通道波形声发射检测系统的研制[D]. 北京: 清华大学, 2000.

辽宁省无损检测学会 2002 年探伤培训班招生通知

1 II级探伤培训班

根据 GB 9445 标准关于无损检测人员的培训考核规则, 辽宁省无损检测学会于 2002 年 5 月上旬开始继续举办各类探伤方法 II 级培训班(含 I 级)。考试合格者将颁发中国无损检测学会 II 级人员证书。

2 小径管超声探伤培训班

我会于 2002 年继续举办小径管对接焊缝超声波探伤培训班, 并随时出售由我会专家设计的小径管超声探伤专用试块和探头。

3 漏磁探伤培训班

磁粉探伤的缺点是肉眼直接评判检验结果, 难以实现自动化探伤。而漏磁探伤在原理上与磁粉探伤相同, 但信号获得和显示则不靠人工, 而是利用电

子技术和计算机技术, 因此几乎 100% 是自动探伤, 速度极快, 适用于大批量材料的大范围检验, 如管、棒、线材, 高压管线, 锅炉换热气管, 地下油气管, 抽油杆及钢丝绳等表面探伤, 特别适于检测表面油污不易清洗及结构复杂的器件。我会定于 2002 年举办漏磁探伤培训班, 将由专业研究员授课并展示先进的漏磁探伤设备。

欲参加者请速与我会培训部联系报名。

联系地址: 辽宁省丹东市春三路 23 号辽宁仪表研究所省学会培训部, 邮编: 118002, 联系人: 赵友杉, 电话: (0415)6161157, 手机: 13904956780, 宅电: (0415)3155636, 电子信箱: lnndti@online.ln.cn。

(辽宁省无损检测学会)