

1 声发射源定位技术

1.1 声发射概念和特点

材料或结构受外力或内力作用产生变形或断裂，以弹性波形式释放出应变能的现象称为声发射^[5]。用仪器探测、记录、分析声发射信号和利用其推断声发射源的技术称为声发射技术。声发射是一种动态无损检测方法，它探测到的能量来自被检测物体的本身，对活性缺陷较为敏感，而对稳定的缺陷不产生声发射信号，可以进行结构或系统的在线检测。

1.2 系统的检测能力

声发射的检测频率范围很宽，从次声频、声频直到超声频，可包括数赫兹到数兆赫兹；检测幅度从微观的位错运动到大规模的宏观断裂，用最灵敏的传感器甚至可以探测到 10~11 mm 的表面运动^[5]。从实际应用来讲，超过检测阈值能量的撞击信号都可以被采集。

1.3 声发射时差定位原理

在声发射源定位方法中，最先研究应用的是时差定位方法。它测量各个声发射通道信号到达时间差、波速和探头间距等参数，然后通过一定的运算确定声源的坐标或位置。该法广泛应用于试样和构件的检测，但它易丢失大量的低幅度信号，其定位精度受波速、衰减、波形和构件形状等许多变量的影响。在简单结构源定位中，能够获得较好的定位精度。

2 基于最小二乘法的声发射源定位

2.1 原理算法

假设声发射源位置在 $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ ，而 n 个传感器被安装位置分别为 $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), \dots, (x_n, y_n, z_n)$ ，如图 1 所示。

在声发射发生时，声波到达任 2 个传感器的时间差是可以测量的，每个传感器与声发射源的关系为：

$$(\bar{x} - x_i)^2 + (\bar{y} - y_i)^2 + (\bar{z} - z_i)^2 = (vt_i)^2, \quad (1)$$

其中， t_i 为到达第 i 个传感器的时间； $\Delta t_i = t_i - t_1$ 为第 i 个传感器与第 1 个传感器的时间差，可以据此解出声发射源位置。

在算法上采用最小二乘法，基本思想如下。

一个 $m \times n$ 的线性方程组为：
$$| a | x = b, \quad (2)$$

其中， a 为 $m \times n$ 的矩阵； x 为 n 维的未知向量； b 为 m 维的向量。对于一个矛盾方程，其残余误差为： $R = | | a | x - b | \neq 0$ 。

m 个方程总的残余误差为：
$$\phi = \sum_{i=1}^m R_i = \sum_{i=1}^m | a_i x - b_i |, \text{ 最小二乘法即求解 } x \text{ 使得 } \phi \text{ 最小。}$$

通常取平方替代绝对值，
$$\phi = \sum_{i=1}^m | a_i x - b_i |^2. \quad (3)$$

对式 (3) 求微分：
$$\frac{\partial \phi}{\partial x_1} = 0, \frac{\partial \phi}{\partial x_2} = 0, \dots, \frac{\partial \phi}{\partial x_n} = 0, \quad (4)$$

即可生成含 n 个未知数的线性方程组，从而求出 x 。

2.2 试验及数据分析

为监测该原理的效果，进行了模拟试验。试验采用铅笔芯折断作为模拟源，在边长为 60 cm 的方板上进行，传感器布置如图 2 所示。在试验中，取 $a=100$ mm，分别在 $(0, 0), (20, 0), (40, 0)$ ，

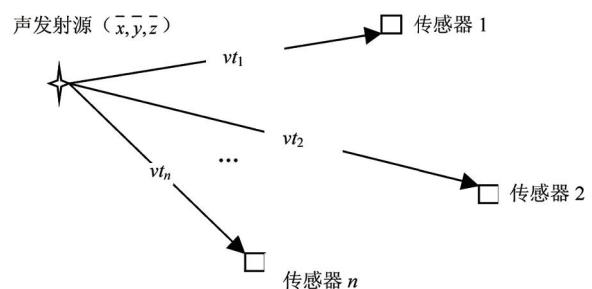


图 1 最小二乘法多探头定位原理
Fig. 1 Multi-probe localization principle based on least squares method

(70, 0), (20, 30), (40, 40), (70, 60) 处模拟声发射。测量波速为 $v=3\ 164\ 556\ \text{mm/s}$ 。声发射传感器与试样之间通过凡士林进行声耦合。

由声发射系统可以得到铅笔芯折断产生的应力波到达各个传感器的绝对时间，并可以计算出各个传感器之间的时间差，利用最小二乘法解矛盾方程组程序可以得到铅笔芯在石板试样上的折断位置坐标，如表 1 所示。

从表中数据来看，绝大部分误差在 1 mm 以内，取得了比较高的精度。但传感器数量的增加给安装及监测带来了不便，是此方法的最大缺陷。

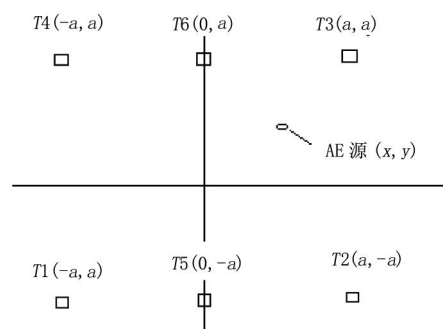


图 2 探头布置方式

Fig. 2 Arrangement of sensors

表 1 定位数据处理

Tab. 1 Localization data processing

| $(x, y) / \text{mm}$ | $\Delta t_2 / \text{s}$ | $\Delta t_3 / \text{s}$ | $\Delta t_4 / \text{s}$ | $\Delta t_5 / \text{s}$ | $\Delta t_6 / \text{s}$ | $x (\text{测}) / \text{mm}$ | $x \text{绝对误差} / \text{mm}$ | $y (\text{测}) / \text{mm}$ | $y \text{绝对误差} / \text{mm}$ |
|----------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 0, 0 | 0 | -2.00E-7 | 0 | -3.65E-6 | -3.59E-6 | -0.003 4 | 0.003 4 | 0.388 0 | 0.388 0 |
| 20, 0 | -1.24E-5 | -1.24E-5 | 0 | -4.50E-5 | -4.50E-5 | 19.310 0 | 0.690 0 | -0.056 4 | 0.056 4 |
| 40, 0 | -3.12E-5 | -3.12E-5 | 0 | -3.54E-5 | -3.54E-5 | 39.140 0 | 0.860 0 | -0.550 0 | 0.550 0 |
| 70, 0 | -5.36E-5 | -5.36E-5 | -1.00E-7 | -2.01E-5 | -2.01E-5 | 70.960 0 | 0.960 0 | -0.450 0 | 0.450 0 |
| 20, 30 | -8.6E-6 | -2.23E-5 | -1.16E-5 | -4.21E-5 | -5.81E-5 | 20.160 0 | 0.160 0 | 29.500 0 | 0.500 0 |
| 40, 40 | -1.53E-5 | -3.65E-5 | -1.53E-5 | -3.54E-6 | -3.57E-6 | 38.790 0 | 1.210 0 | 39.420 0 | 0.580 0 |
| 70, 60 | -2.28E-5 | -5.80E-5 | -1.92E-5 | -1.78E-6 | -4.35E-5 | 70.580 0 | 0.580 0 | 59.280 0 | 0.720 0 |

3 结论

- 1) 对具有门槛跨越时差测量系统的声发射仪，利用基于最小二乘思想的定位原理能够进行平面定位，具有较精确的定位结果；
- 2) 传感器数量的增加给安装及监测带来了不便，是此方法的最大缺陷。

[参考文献] (References)

- [1] 袁振明, 马羽宽, 何泽云. 声发射技术及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.
YUAN Z M, MA Y K, HE Z Y. AE technique and its application[M]. Beijing: China Machine Press, 1985. (in Chinese)
- [2] 李晓梅, 朱授祥, 孙秦明. 基于小波包分析的声发射源定位方法[J]. 武汉理工大学学报, 2003, 25 (2): 91~94.
LI X M, ZHU Y X, SUN Q M. Acoustic emission source location based-on wavelet packet analysis[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2003, 25(2): 91~94. (in Chinese)
- [3] 焦敬品, 何存富, 吴斌, 等. 基于模态分析和小波变换的声发射源定位新算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26 (5): 482~485.
JIAO J P, HE C F, WU B, et al. A new acoustic emission source location technique based on wavelet transform and mode analysis[J]. Journal of Instrument and Meter, 2005, 26(5): 482~485. (in Chinese)
- [4] 龚斌, 金志浩, 包日东, 等. 压力容器上声发射源的新型定位方法[J]. 压力容器, 2005, 22 (6): 13~14.
GONG B, JIN Z H, BAO R D, et al. Application of acoustic attenuation in abrupt acoustic emission source location[J]. Pressure Vessel Technology, 2005, 22(6): 13~14. (in Chinese)
- [5] 孙飞, 张伟, 刘武刚, 等. 高速撞击的声发射源定位[J]. 无损检测, 2008, 30 (3): 168~170.
SUN F, ZHANG W, LIU W G, et al. Acoustic emission detection and location for hypervelocity impacts[J]. Nondestructive Testing, 2008, 30(3): 168~170. (in Chinese)