

金属材料中声发射源定位精度优化方法研究

(侯东明¹, 郝文晓²)

(1. 美国物理声学公司北京代表处, 北京 100000;

2. 北京交通大学机械与电子控制工程学院, 北京 100000)

摘要: 为实现金属材料中声发射源的精确定位, 提出一种优化定位方法。该方法首先对基于时差定位算法主要影响因素(噪声干扰、信号衰减、波速变化、传感器布置以及尺寸效应)的影响机理进行理论分析, 然后找到声发射源定位算法与各影响因素之间的对应关系, 完成相应的源定位参数优化设置, 最后以金属铝板为研究对象, 分别对源定位参数优化设置进行对比实验验证。实验结果表明该优化定位方法通过对各影响因素对应的参数优化设置, 能有效地减小声发射源定位的误差, 提高声发射源的定位精度, 为反演声发射源提供了一种有效途径。

关键词: 声发射; 定位算法; 定位精度; 影响因素; 参数优化

中图分类号: TH878

文献标识码: A

Study on the optimization method of acoustic emission source positioning accuracy in metal materials

(HOU-Dongming¹, HAO-Wenxiao²)

(1. Physical Acoustics Company Beijing Office, Beijing 100000, China;

2. School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiao tong University, Beijing 100000, China)

Abstract: In order to achieve accurate location of acoustic emission sources in metal materials, an optimized location method is proposed. Firstly, the mechanism of the main influencing factors (noise interference, signal attenuation, wave velocity variation, sensor layout and size effect) is theoretically analyzed based on time difference location algorithm., then the correspondence between AE location algorithm and various factors is found, and the optimal setting of the corresponding source location parameters is completed. Finally, metal aluminum plate is taken as the research object, and experimental verification is carried out to optimize the source location parameters. Experimental results show that the optimal locating method based on the influencing factors of the corresponding parameters optimization settings can effectively reduce the source location error and improve the location accuracy of the acoustic emission source, It provides that it's an effective method for the inversion of acoustic emission sources

Keywords: Acoustic emission; Location algorithm; Positioning accuracy; Influence factors; Parameter optimization

1 引言

发射源定位是进行声发射检测与评定的一项重要工作和指标, 其准确程度反映了声源检测位置与实际出现的活动缺陷位置的吻合程度。目前, 定位方法主要有区域定位法、时差定

位法两大类。其中,区域定位法是根据声发射信号的传感器个数和相对时差时序来判定声发射源所处的区域,是一种快速、简便而粗略的定位方法^[1-6]。区域定位法具有传感器安装灵活、检测范围大及检测结果可靠等特点,但声源的位置仅表示为一区域,具有一定的不确定性。时差定位法根据声同一声发射源所发出的声发射信号经波速、传感器间距等参数的测量和算法运算,通过它们的几何关系列出方程并进行求解确定声源的精确位置,是一种精确而复杂的定位方法,而平面三角形定位法是目前声发射检测中常用的声源定位方法^[7-15]。

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结果的关键。笔者将根据多年来对声发射技术理论及实验研究成果、现场声发射检测的经验,以平面金属板为研究对象对声发射检测中的声源定位问题进行探讨,主要针对三角形平面定位法对定位误差进行分析,并提出相应的优化方法。

2 声发射源定位原理及误差机理分析

2.1 平面定位原理

当被检测对象为平面结构时,可采用时差平面定位方法。若仅采用2个传感器进行声发射源平面定位,会得到一条关于声发射源的双曲线,两传感器分别位于该双曲线的两个焦点上。声发射源则位于该双曲线的某一点,无法得出声发射源的具体位置,无法现实声发射平面定位。如果再增加一个传感器,可以实现声发射源的平面定位,如图2.1所示。

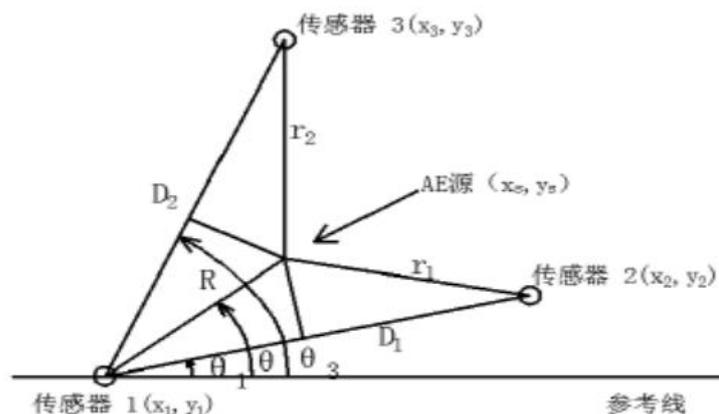


图 2.1 声发射源平面定位原理图

在布置三个传感器的平面声发射源定位中,可以获得三个传感器接收到的声发射信号及到达次序、到达时间,并计算得出两组时差,依据几何关系可以得到以下关系式:

$$\Delta t_1 \cdot v = r_1 - R \quad (2-1)$$

$$\Delta t_2 \cdot v = r_2 - R \quad (2-2)$$

$$R = \frac{1}{2} \cdot \frac{D_1^2 - \Delta t_1^2 \cdot v^2}{\Delta t_1 \cdot v + D_1 \cos(\theta - \theta_1)} \quad (2-3)$$

$$R = \frac{1}{2} \cdot \frac{D_2^2 - \Delta t_2^2 \cdot v^2}{\Delta t_2 \cdot v + D_2 \cos(\theta_3 - \theta)} \quad (2-4)$$

式 (2-3)、(2-4) 表示经过声发射源的两条双曲线，声发射源所在位置即为这两条双曲线的交点。对于使用三个传感器确定的声发射源平面定位，求解过程中得到的会是两个解，其一是真实声发射源而另一个是伪声发射源。为了得到真实声发射源，可采用 4 个传感器进行平面定位。如图 2-2 所示。

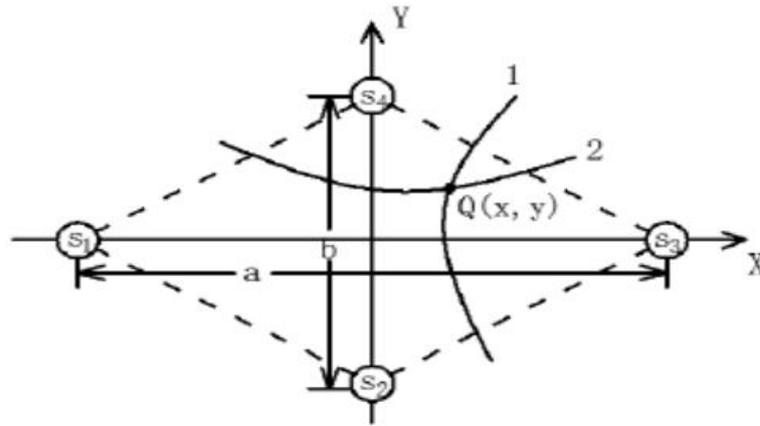


图 2.2 四个传感器声发射源平面定位原理图

假设由传感器 S_1 和传感器 S_3 之间的时间差 Δt_x 所求的双曲线为 1，由传感器 S_2 传感器 S_4 之间的时间差 Δt_y 所求的双曲线为 2，且传感器 S_1 、 S_3 之间的距离为 a ， S_2 、 S_4 传感器之间的距离为 b ，假设声波在介质中的传播速度为 v ，则由几何关系可知，声发射源就位于双曲线 1、2 的交点 $Q(x, y)$ ，其坐标可表示为：

$$x = \frac{L_x}{2a} \left[L_x + 2\sqrt{\left(X - \frac{a}{2}\right)^2 + Y^2} \right] \quad (2-5)$$

$$y = \frac{L_y}{2a} \left[L_y + 2\sqrt{\left(Y - \frac{b}{2}\right)^2 + X^2} \right] \quad (2-6)$$

$$\begin{cases} L_x = \Delta t_x \cdot v \\ L_y = \Delta t_y \cdot v \end{cases} \quad (2-7)$$

以上公式推导都是在理想均匀材质条件下得出的，即声波在均匀介质中以恒定速度传播，各个通道之间的时差准确，根据解析几何关系进行推得到到的声源位置。但是在实际工程应用中，源定位精度会受到各种外界因素干扰。

2.2 误差机理分析

通过对平面定位原理的公式推导，可以看出影响源定位精度的因素包括两个方面，即波在介质中的传播速度、各个通道接收到的时差的准确性。针对这两个方面，下面分别对各自的影响因素进行分析，从而实现源定位精度误差分析。

2.2.1 时差测量误差

计算各通道之间的时差的关键就是要找到各个通道信号到达时间，最常用信号到达时间方法为首次超过阈值时间、峰值时间或 n 次振铃时间作为信号到达时间。图 2.3 为声发射信号波形，图 2.4 为定位事件各通道的时差。影响时差准确性因素主要包括噪声干扰、信号衰减、尺寸效应、材料局部结构缺陷等，下面对主要影响因素进行分析。

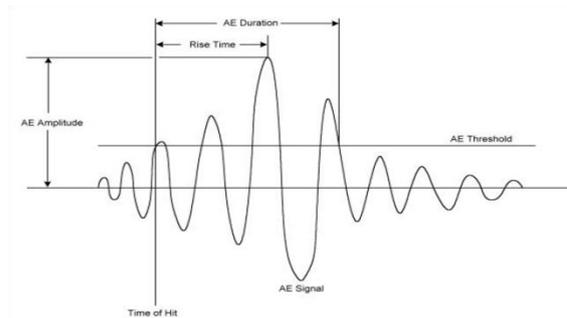


图 2.3 典型声发射波形

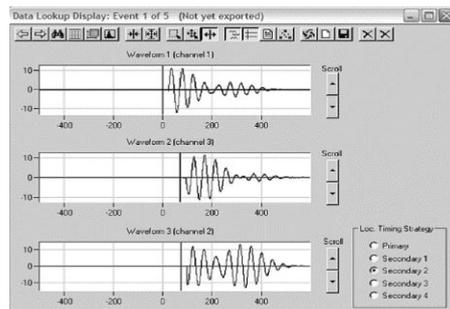


图 2.4 定位事件各通道时差

声发射信号的幅值随着传播距离增加而逐渐减小的特性就是声发射信号的衰减特性。它在一定程度上影响了声发射源定位的准确度，衰减能够引起信号幅值的下降、能量的丢失，声源到各传感器的距离差很大时，声波经长距离传播后幅值衰减至阈值以下；同时如果存在噪声干扰，当噪声较大时或者阈值较低时，声发射系统也会把噪声当作有用的声发射信号来处理，从而给信号到达时间的判断带来误差。

由于材料非均质性、各向异性以及孔洞等局部结构的存在使得声发射源信号传播到传感器的最短途径发生改变，进而使得根据时差定位法进行计算时产生误差。如图 2.5 所示，当声源 F 产生的声波向声发射接收点 A 、 B 、 C 传播时，声波均将以最近途径进行传播到 A 、 C 点，而由于孔洞的存在，声波不能以直线 FB 传播，而只能曲线 FSB 传播。

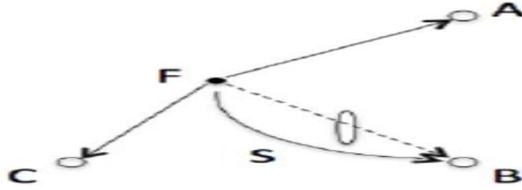
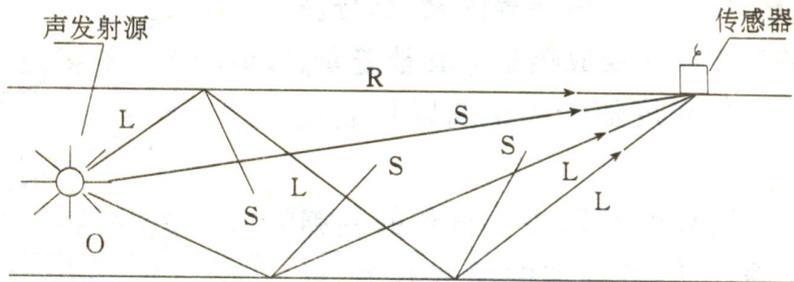


图 2.5 局部结构对定位影响

声发射波以多种传播模式在材料介质中进行传播，根据波的传播方向和质点振动方向的不同，可以分为横波（S 波）、纵波（P 波）、表面波等不同传播模式的波，各种波在固体中传播时遇到不同界面及孔洞等局部结构时均会发生反射、折射及波形转换等现象，各自以不同路径、不同波速、同时间到达传感器，如图 2.6 所示。如果不同传感器所接收到的是来自同一声发射源的不同波形的声波时，所测得时差与真实值必定会产生一定程度的误差。



o-波源；L-纵波；S-横波；R-表面波

图 2.6 平板中波速传播示意图

2.2.2 波速测量误差

波的传播速度是与介质的弹性模量和密度有关的材料特性，因而材料不同，波速也不同，不同的传播模式也具有不同的传播速度。在均匀介质中，纵波与横波的速度可分别用下式表达：

$$v_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\sigma}{2(1+\sigma)(1-2\sigma)}} \quad (2-8)$$

$$v_s = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\sigma)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2-9)$$

其中， V_l 为纵波速度； V_s 为横波速度；E 为杨氏模量；G 为切变模量； σ 为泊松比； ρ 为密度。实际情况中，材料的结构、形状、尺寸、各项异性、内部介质属性都会影响到弹性波的传播速度。

3 实验验证

3.1 实验装置选择

试验用声发射设备为美国物理声学公司(PAC)生产的 PCI-2 声发射系统(如图 2.6 所示)。主要由前置放大器、声发射传感器、声发射卡、声发射采集分析软件(AEwin)四部分组成。声发射的作用是把传送到物体表面的弹性波转换成电信号,对于不同材料,其发出的声发射信号的频率相差很大,本实验选择 R15a 传感器,即峰值频率为 150KHz;传感器输出信号一般是很微弱的,必须经过放大处理,信号才能通过导线传输,并且满足信号处理的需要本实验选择增益为 40dB 放大器;通常测量仪器周围存在很多噪声源,必须用滤波器尽可能将噪声才能去除掉,本实验选择 100KHz-400Hz 滤波范围。实验板材选择金属铝板,规格为 300mm*300mm*10mm,如图 2.7 所示。

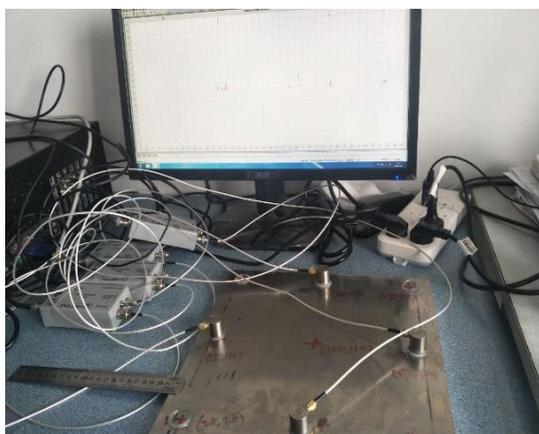


图 2.6 PCI-2 声发射系统

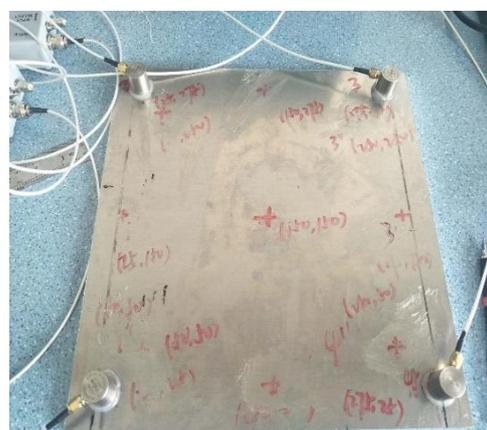


图 2.7 实验金属铝材

3.2 实验内容及实验步骤

(1) 断铅实验测试各个通道的耦合质量。将金属铝板平放在实验台上,在金属板各个预定位置安装好传感器,设置好声发射系统参数,然后在各个传感器附近进行断铅测试其耦合质量是否良好,测量结果如表 1 所示。

表 1 各通道断铅幅值矩阵

CH#		接收通道			
		1	2	3	4
发射通道	1	99	64	75	64
	2	66	99	64	77
	3	76	62	99	78
	4	60	74	77	99

(2) 波速测量。首先测量外界噪声大小，得到外界噪声值以后，然后将阈值设置为稍稍高于外界噪声值，最后利用 AEwin 中的材料声学特征矩阵自动测试功能测出波速在材料中的平均值，见表 2。

表 2 各通道之间波速矩阵

CH#		接收通道			
		1	2	3	4
发射通道	1	0	4545454.50	4419417.50	4385965.00
	2	4555458.40	0	4429437.90	4398968.00
	3	4418418.58	4399426.20	0	4459447.50
	4	4365467.70	4405962.10	4469427.60	0

(3) 断铅实验。首先，设置不同阈值进行断铅实验，测试噪声对定位精度影响，然后更换传感器的布置位置探究信号衰减、尺寸效应等因素对定位精度的影响，最后对金属铝板进行破坏探究结构缺陷、传播方式对定位精度影响。三种传感器布置方案如图所示。

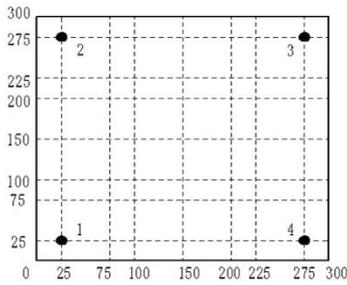


图 2.8 布置方案 1

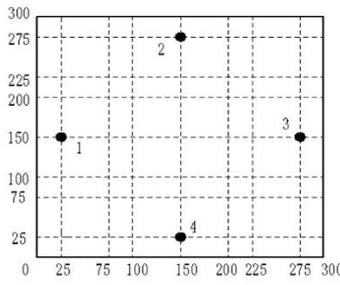


图 2.9 布置方案 2

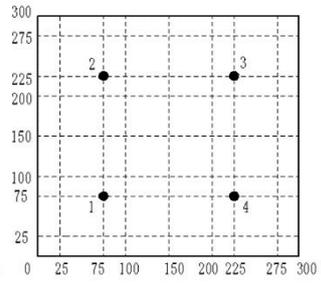


图 2.10 布置方案 3

4 实验结果分析

分析波速对定位精度的影响（此次实验传感器布置见布置方案 1）。本次实验在测量波速之前首先将阈值调到 20dB，通过 AEwin 采集软件进行数据采集，可以在幅值界面得到外界噪声的大小为 25dB，知得到外界噪声值以后，根据外界噪声值的大小然后将阈值调节到 30dB 进行材料声学特征矩阵自动测试（将阈值调到稍稍高于外界噪声的目的是更好的找到各个通道信号波形的起跳时间，从而更准确的找到各个通道之间的时差关系，进而得到更准确波速），根据材料声学矩阵测量结果计算出波速在金属铝板中传播的平均速度值，求出平均波速为 4437737.6mm/s，最后在 AEwin 软件定位设置中将波速改为 4437737.6mm/s。

如果不进行平均波速测量，通常情况下在做定位实验时都会根据理论以及经验将波速设置为 5000000mm/s 进行声发射源定位计算。下面进行断铅实验，分别测试两个波速的定位精度，设以波速 5000000mm/s 为定位组 1，设以波速 4437737.6mm/s mm/s 为定位组 2，分别进行 5 组实验，测量结果如表 3 所示。

表 3 两种波速定位精度比对

编号	断铅位置	定位位置 1	误差 1	定位位置 2	误差 2
1	(150, 150)	(154.4, 154.2)	6.0	(152.4, 151.3)	2.7
2	(150, 150)	(154.6, 152.9)	4.6	(151.3, 151.9)	2.3
3	(150, 150)	(155.2, 147.2)	5.9	(153.7, 148.8)	3.8
4	(150, 150)	(145.5, 153.8)	5.8	(149.3, 148.2)	1.9
5	(150, 150)	(155.5, 154.4)	7.1	(152.2, 150.3)	2.2

从表 3 可以看出，以测得的平均值为定位设置波速比根据理论经验设置的波速定位精度高，这样能够在一定程度上避免材质不均匀、结构缺陷等影响，进一步提高定位精度。

分析噪声对定位的影响（此次实验传感器布置见布置方案 1）。本次实验设置不同阈值来研究噪声对定位精度影响，从而找到合适设置阈值。此次实验分别以 30dB、45dB、60dB 为阈值进行断铅实验，设以 30dB 阈值为定位组 1，设以 45dB 阈值为定位组 2，设以 60dB 阈值为定位组 3，分别进行 5 组实验，测量结果如表 4 所示。

表 4 不同阈值定位精度比对

编号	断铅位置	定位位置 1	误差 1	定位位置 1	误差 2	定位位置 3	误差 3
1	(150, 150)	(152.4, 151.3)	2.7	(153.6, 150.2)	3.6	(153.6, 151.3)	3.8
2	(150, 150)	(151.3, 151.9)	2.3	(151.6, 151.6)	2.3	(153.2, 152.9)	4.3
3	(150, 150)	(153.7, 148.8)	3.8	(149.7, 147.9)	2.1	(152.7, 146.3)	4.5
4	(150, 150)	(149.3, 148.2)	1.9	(148.3, 149.4)	1.8	(145.1, 147.7)	5.4
5	(150, 150)	(152.2, 150.3)	2.2	(151.5, 150.7)	1.6	(151.2, 156.4)	6.4

从表 4 可以看出，设置不同阈值得到的定位精度各部相同，阈值 30dB 与阈值 45dB 时得到的定位精度相差不大，但是阈值为 30dB 时噪声干扰很大，会出现多个伪定位，当阈值设置为 60dB 时，各通道波形起跳时间会出现漏算，同样会造成定位精度误差增大，所以在

选择阈值时需要根据材质大小、外界噪声综合考虑阈值设置，最好先做实验验证以找到最合适阈值从而避免噪声干扰以及阈值过高导致各通道定位时差偏差来提高定位精度。

分析传感器布置对定位的影响（此次实验阈值设置为 45dB）。本次实验设置不同传感器布置方式对定位精度影响。此次实验分别以布置方案 1、布置方案 2、布置方案 3 进行断铅实验，设以布置方案 1 为定位组 1，设以布置方案 2 为定位组 2，设以布置方案 3 为定位组 3，分别进行 5 组实验，测量结果如表 5 所示。

表 5 不同布置方式定位精度比对

编号	断铅位置	定位位置 1	误差 1	定位位置 1	误差 2	定位位置 3	误差 3
1	(150, 150)	(152.4, 151.3)	2.7	(151.5, 150.2)	1.5	(150.5, 150.3)	0.6
2	(150, 150)	(151.3, 151.9)	2.3	(151.5, 151.5)	2.1	(151.2, 150.2)	1.2
3	(150, 150)	(153.7, 148.8)	3.8	(149.8, 147.7)	2.3	(150.9, 149.6)	0.9
4	(150, 150)	(149.3, 148.2)	1.9	(149.1, 151.3)	1.6	(149.2, 148.7)	1.6
5	(150, 150)	(152.2, 150.3)	2.2	(151.6, 151.4)	2.1	(151.0, 151.3)	1.4

从表 5 可以看出，不同传感器布置方式得到的定位精度各部相同，各个传感器与断铅点距离越远，信号衰减越大一些，所以定位精度误差就越大，目前实验所用铝板规格有限，如果使用较大规格实验板效果会更明显。

分析结构缺陷、传播方式改变对定位的影响（此次实验阈值设置为 45dB，此次实验传感器布置见布置方案 1）。本次实验将金属铝板进行破坏（打洞、弯折）来研究结构变化、传播方式变化对定位精度影响。此次实验分别以完好板材、破坏板材进行断铅实验，设以破坏板材实验为定位组 1，设以完好板材实验为定位组 2，测量结果如表 6 所示。

表 6 完好板材与破坏后板材定位精度比对

编号	断铅位置	定位位置 1	误差 1	定位位置 2	误差 2
1	(150, 150)	(159.4, 165.3)	17.8	(152.4, 151.3)	2.7
2	(150, 150)	(167.5, 145.8)	18.1	(151.3, 151.9)	2.3
3	(150, 150)	(155.4, 137.5)	13.8	(153.7, 148.8)	3.8
4	(150, 150)	(135.6, 143.7)	15.7	(149.3, 148.2)	1.9
5	(150, 150)	(158.5, 157.4)	11.3	(152.2, 150.3)	2.2

从表 6 可以看出，金属铝板在被破坏后，其内部结构以及波在板中的传播路径都会发生改变，这就导致了定位精度误差显著增大，所以在做金属板定位实验时尽量保持板材的完好。

5 结论

通过声发射源定位原理及误差机理分析,找到影响声发射源定位精度的主要参数,对主要参数进行分析得出该参数准确性的主要影响因素,然后对实验进行设计来完成实验验证,最后对实验结果进行分析得出提高定位精度的优化方法。本研究主要结论如下:

(1)通过利用波速声学矩阵求解波速矩阵的均值来代替传统的根据理论、经验设置的波速进行声发射源定位,可以在一定程度上克服材料结构、形状、尺寸、各项异性、内部介质属性对波速影响,提高定位精度,实现定位优化。

(2)通过合理阈值值的设置来提高各通道时差的准确性,可以在一定程度上克服阈值过低导致噪声影响时差准确性以及阈值过高导致由于信号较弱而错漏的情况,从而提高时差计算的准确性,实现定位精度优化。

(3)通过合理布置传感器的位置及个数,可以在一定程度上克服信号衰减、尺寸效应等因素对定位准确性的影响,从而提高时差计算的准确性,实现定位优化。

(4)实验材质的完好性也是影响定位精度非常重要的因素,所以在实验室研究前一定要检查材质质量,以及在实验过程中保持实验材质的完好性,从而提高时差计算的准确性,实现定位优化。

参考文献 (References) :

- [1] 沈功田,耿荣生,刘时风. 声发射源定位技术[J]. 无损检测, 2002(03):114-117+125.
- [2] 陈园园. 声发射信号处理及源定位方法研究[D]. 东南大学, 2017.
- [3] Kundu T, Nakatani H, Takeda N. Acoustic source localization in anisotropic plates[J]. Ultrasonics, 2012, 52(6):740-746.
- [4] Kundu T. Acoustic source localization[J]. Ultrasonics, 2014, 54(1):25-38.
- [5] Burks B, Kumosa M. A modal acoustic emission signal classification scheme derived from finite element simulation[J]. International Journal of Damage Mechanics, 2014, 23(1):43-62.
- [6] Matt H, Scalea F L D. Macro-fiber composite piezoelectric rosettes for acoustic source location in complex structures[J]. Smart Materials & Structures, 2007,16(4):1489-1499.
- [7] 尹莘新. 基于三角时差技术的二维板声发射源定位方法研究[D]. 吉林大学, 2017.
- [8] 许江,李伊等. 声发射定位精度尺寸效应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(S1):2826-2835.
- [9] 刘腾飞. 煤岩声发射信号处理与定位方法的研究[D]. 中国矿业大学, 2014.

- [10] 刘艳. 声发射检测中传感器布置及声源定位的研究[D]. 中国海洋大学, 2011.
- [11] 刘富君, 胡东明等. 厚壁压力容器声发射技术声源定位误差分析[J]. 无损检测, 2009, 31(11):842-846+850.
- [12] Kundu T, Das S, Jata K V. Detection of the point of impact on a stiffened plate by the acoustic emission technique[J]. Smart Materials & Structures, 2009,18(3):035006.
- [13] Kundu T, Das S, Martin S A, et al. Locating point of impact in anisotropic fiber reinforced composite plates[J]. Ultrasonics, 2008, 48(3):193-201.
- [14] Agcaoglu S, Akkus O. Acoustic emission based monitoring of the microdamage evolution during fatigue of human cortical bone[J]. Journal of Bio mechanical Engineering, 2013, 135(8):81005-81008.
- [15] Andreea-Manuela Z, Hamstad M A, Sause M G R. Modeling of Acoustic Emission Signal Propagation in Waveguides[J]. Sensors, 2015,15(5):11805-11822.

作者简介: 侯东明(1989-), 男, 硕士, 现为美国物理声学公司北京代表处 AE 工程师, 主要从事声发射无损检测方面工作及研究。

E-mail: hdm@pacndt.cn; **Telephone:** 18301631738

邮寄地址: 北京市朝阳区北辰西路 69 号峻峰华亭 C 座 2206; **邮编:** 100029