

基于波束成形网阵的声源定位及影响因素探究

冯全明 陈智 李冬生

(大连理工大学土木工程学院 辽宁大连 116024)

摘要:常规波束成形技术对声发射源定位的应用日益进展。本文基于波束成形网络阵列技术实现了对声发射源一次性定位,并采用控制变量法探讨了传感器网络类型、传感器个数、波速和声源位置对定位效果的影响。

关键词:声发射 源定位 波束成形 影响因素

DOI: 10.13211/j.cnki.pstech.2015.02.005

1 引言

声发射(AE)现象经常被描述为固体材料在外力作用下局部应力重新分布而快速释放瞬态弹性波的过程。材料的单元退化、纤维断裂、塑性变形、裂纹、腐蚀等都可以产生声发射现象^[1]。对结构来说,准确定位声发射源是一个非常有意义的任务。利用特定的传感器和采集系统捕获声源信号并进行分析处理而确定源位置的过程被称为声发射源定位技术。声发射源定位技术广泛应用于压力容器、坦克和管道系统缺陷或泄漏的检测^[2,3],尤其适用于板状结构^[4,5]。

目前,这种被动损伤定位技术已被应用在各向同性或异性材料中,并从二维板^[2-6]发展到三维结构^[7,8]。具有代表性的声发射源定位技术包括三角测量技术,优化技术,波束成形技术,应变花技术和模态声发射技术^[9]。这些技术各有优劣,如简单的三角测量技术主要用于各向同性弹性板结构且波速对定位的精确性影响显著^[6]。常规波束成形技术对声发射源定位有良好的效果,但需要较多的传感器^[10,11]。模态声发射技术虽使用较少的传感器并可预测声源特征,如声源类型和强度^[12],但是这种方法不可避免地需要解决结构中的波动特性,显然,不适合复杂的各向异性结构。

一般的声发射源定位技术如三角定位技术,模态声发射技术和基于优化技术等都需要准确的

波达时间(TOA)或波达时间差(TDOA)这个关键参数^[9]。这些方法一个明显的缺点就是时差测量精度对定位精度有很大影响。为了避免这个问题,McLaskey et al.^[10]引入了一种新颖的波束成形声发射分析技术。波束成形技术的优点是它不需要确切的波达时间或波达时差,并可以处理高斯噪声信号。He et al.^[11]利用波束成形技术进行了有限元仿真和在薄钢板源定位实验。Nakatani et al.^[13]基于波束成形在一个各向异性的结构上尝试了声发射源定位技术。以上研究结果表明,波束成形技术是有效的。

值得注意的是,尽管波束成形已被许多研究人员成功地应用于声发射源定位,但这种技术是一个依赖速度的方法^[9]。Xiao et al.^[14]新颖地提出了一种配合两个相同的传感器线性阵列,在未知波速的情况下来确定声源位置。不过,定位结果在平行阵列方向上是准确的而在垂直阵列方向并不准确,必须进行二次定位。为了实现一次性定位,本文将传感器线性阵列转换成网络阵列,利用有限元仿真进行了验证。然后着重从传感器网络类型、传感器个数、波速和声源位置对定位效果的影响进行了探讨。

2 波束成形网络阵列技术

波束成形技术是一种基于延时—叠加的算法理论。图1展示了因声源事件激发弹性波而被 M 个传感器接收信号的过程。 M 个传感器构成一个

网络阵列。理论公式如下, 参数 $b(\vec{r}, t)$ 是经过 $\Delta_m(\vec{r})$ 延时一叠加算法的输出结果。

$$b(\vec{r}, t) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M w_m x_m(t - \Delta_m(\vec{r})) \quad (1)$$

$$\Delta_m(\vec{r}) = \frac{|\vec{r}| - |\vec{r} - \vec{r}_m|}{c} \quad (2)$$

$x_m(t)$ 表示的是第 m 个(m_{th})传感器 S_m 捕获的信号。 \vec{r} 表示参考点(也叫聚焦点)与基准点的距离。基准点是事先给定的, 位置理论上是任意的。 \vec{r}_m 表示传感器 m_{th} 与参考点的距离。 $\Delta_m(\vec{r})$ 是 m_m 传感器的延时时间。 c 是波速。对于不同的参考点, 延时 $\Delta_m(\vec{r})$ 是不同的。通过调整延时可将不同传感器获得的信号在时间上调整对齐后叠加, 当参考点与真正的声源重合时, 信号将被调整至同一波前, 能量输出将达到最大值。通过对比所有参考点上的能量输出大小, 确定声源位置。加权因子 w_m 为1。

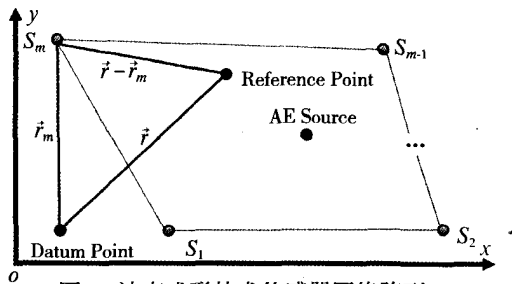


图1 波束成形技术传感器网络阵列

3 有限元仿真实验

通过有限元仿真声发射过程可以方便地提供高信噪比的数据, 用来开发先进的信号处理和分析技术。有限单元法在实际应用中称作有限元分析(FEA)。本文AE信号传播过程采用大型三维有限元分析软件ANSYS[®]完成, 因为它可以记录任意时间点各个单元或节点的计算结果并自动保存下来以便于随时提取结果, 另外本软件还具有强大的后处理功能, 方便用户操作。

3.1 有限元模型

图2展示了有限元建模的几何构型。这是一个各向同性的铝板, 几何尺寸为 $800\text{mm} \times 600\text{mm} \times 4\text{mm}$, 材料的弹性模量 $E=71\text{GPa}$, 泊松比 $\nu=0.31$, 密度 $\rho=2700\text{Kg/m}^3$ 。本模型不考虑阻尼且边界自由。为了比较传感器网络类型对定位

结果的影响, 分别布置8个声发射传感器成一个“L”形网络阵列和一个方形网络阵列, 见图2。

传感器布置位置、基准点坐标和三种不同工况下的声源位置都在图上标出, 所有传感器几何布置均匀。三种工况Case A ($360\text{mm}, 250\text{mm}$), Case B ($750\text{mm}, 550\text{mm}$)和Case C ($600\text{mm}, 50\text{mm}$)分别考虑了靠近中心、临近传感器和临近边界的不同情况。单次试验分别在声源位置进行瞬态动力加载来模拟声发射机制。一个由汉宁窗调制的五周期的正弦波作为激励波形, 中心频率设为 200KHz 。为了避免数值不稳定性, 网格划分单元为 2mm , 时间积分步长为 $0.1\mu\text{s}$ ^[15]。

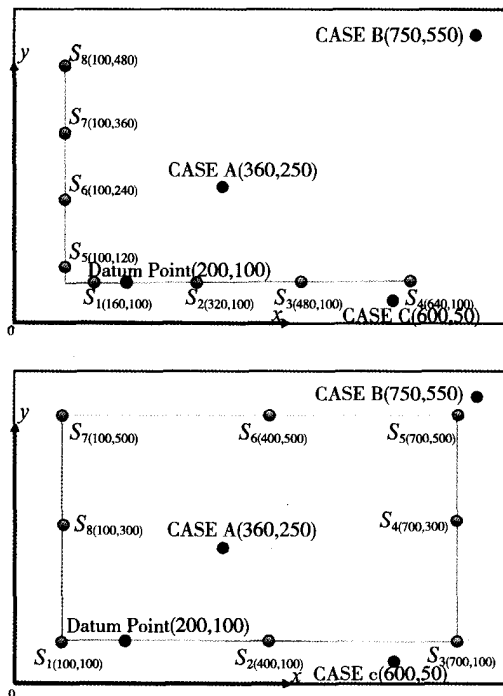


图2 基于波束成形网络阵列的有限元分析模型

一般情况下, AE波在平板中的传播多形成Lamb波, 而Lamb波大多以多模态的形式共同存在, 不同模态或不同频率的波在材料中具有不同的传播速度^[16]。因此很有必要确定同一模态的波来实现定位。根据无约束铝板的频散曲线, 见图3, 且处理信号过程中因减少边界反射而采取的截取首波, 所以本文中采用的信号模态为 S_0 模态。这是因为 S_0 模态的波速要比 A_0 模态的波速大。根据频散曲线, 200K 频率的Lamb波在 4mm

的无约束铝板中 S_0 模态波的传播速度约为5300m/s。通过提取传感器所在节点的时程位移信息作为接收信号，经信号处理后代入延时叠加算法，得到阵列能量输出定位图形。

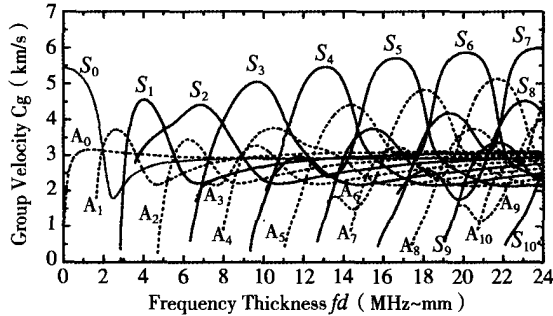


图3 无约束铝板的频散曲线

3.2 定位结果

利用控制变量法，分别在两种传感器网络类型的三种工况下进行重复性实验，继而在系列波速因子下对声源进行算法定位。表1和表2分别记录了由8个传感器构成的“L”形网络阵列和方形网络阵列三种工况在不同波速下的定位结果。表3记录了方形网络阵列下利用四个传感器 S_1 、 S_3 、 S_5 和 S_7 的定位结果。

表1 “L”形网络阵列波束成形声发射源定位结果

Wave speed c (m/s)	Case A Localization (x, y) (mm, mm)	Case B Localization (x, y) (mm, mm)	Case C Localization (x, y) (mm, mm)
3000	(348, 284)	(636, 541)	(695, 600)
3500	(349, 274)	(711, 600)	(699, 510)
4000	(351, 263)	(732, 600)	(669, 380)
4500	(351, 253)	(758, 600)	(645, 285)
5000	(352, 245)	(781, 600)	(618, 2)
5500	(348, 232)	(799, 599)	(601, 78)
6000	(343, 217)	(786, 600)	(607, 88)

表2 方形网络阵列波束成形声发射源定位结果

Wave speed c (m/s)	Case A Localization (x, y) (mm, mm)	Case B Localization (x, y) (mm, mm)	Case C Localization (x, y) (mm, mm)
3000	(377, 233)	(564, 498)	(581, 178)
3500	(344, 266)	(594, 504)	(530, 79)
4000	(353, 262)	(656, 481)	(586, 132)
4500	(364, 258)	(672, 486)	(590, 82)
5000	(362, 253)	(712, 496)	(598, 53)
5500	(360, 247)	(717, 512)	(611, 21)
6000	(362, 243)	(700, 500)	(655, 1)

表3 4传感器方形网络波束成形声发射源定位结果

Wave speed c (m/s)	Case A Localization (x, y) (mm, mm)	Case B Localization (x, y) (mm, mm)	Case C Localization (x, y) (mm, mm)
3000	(377, 264)	(572, 435)	(513, 153)
3500	(374, 258)	(599, 450)	(531, 131)
4000	(370, 252)	(627, 462)	(549, 110)
4500	(366, 246)	(654, 473)	(567, 88)
5000	(363, 240)	(800, 594)	(588, 61)
5500	(359, 234)	(709, 502)	(614, 31)
6000	(356, 229)	(700, 500)	(654, 1)

4 定位结果分析

鉴于上述结果，波束成形网络阵列技术对板状结构声发射源定位具有很好的效果，方法实现方便并具可视化。值得注意的是，在不同的控制因素下，定位结果和效果有所差别。因此，很有必要探讨各种变量因子对波束成形声发射源定位效果的影响。本文基于控制变量法着重对在声源定位中的关键因素——传感器网络类型、传感器个数、声源位置和计算波速——进行分析讨论。

4.1 传感器网络类型

本文为了探讨传感器网络阵列对定位效果的影响，采用了一个“L”形网络阵列和一个方形网络阵列进行对比分析。表1和表2的整体定位结果显示，同一工况在同一计算波速下，方形网络阵列的定位效果较“L”形网络阵列理想。这是因为，方形网络阵列传感器在被检结构上分布更为均匀，在一定程度上削减了统计上的不确定性。但在个别情况下，“L”形网络阵列优于方形阵列。因此，构建合理的传感器网络阵列，优化传感器布置，可以提升波束成形技术声发射源定位的精度和效果。

4.2 传感器个数

当被检结构几何尺寸固定时，传感器的几何布置和数量会影响信号在传播过程中的衰减，一般情况下，更多的传感器会得到更好的定位效果，提升定位精度。通过比较表2和表3的数据，可以发现8传感器网络阵列比4传感器网络阵列在同等条件定位更加精确。较多的传感器可以使能量更加集中，使旁瓣和误差降低，提高信噪比。

但值得一提的是,较多的传感器也意味着更大的经济花费,且当传感器数量超出某一临界值后,定位效果将不再随传感器数量增加而有所提升。通常来说,传感器网络类型和传感器数量在波束成形声发射源定位技术的应用中是要综合考虑的。

4.3 声源位置

由于Lamb波在板状结构中的传播特性十分复杂,在边界处常伴随信号的反射、散射和模式转换^[12],影响信号洁净度,进而影响定位效果。因此声源位置对定位效果的影响极为显著。表1、表2和表3中的数据都显示,当声源位置远离边界时,可以得到很高的定位精度;而声源位置靠近边界时,定位效果并不理想,甚至错误而不能被接收。所以,有必要对信号进行更加复杂的过滤处理,如小波分析和模态分解,以满足工程要求。

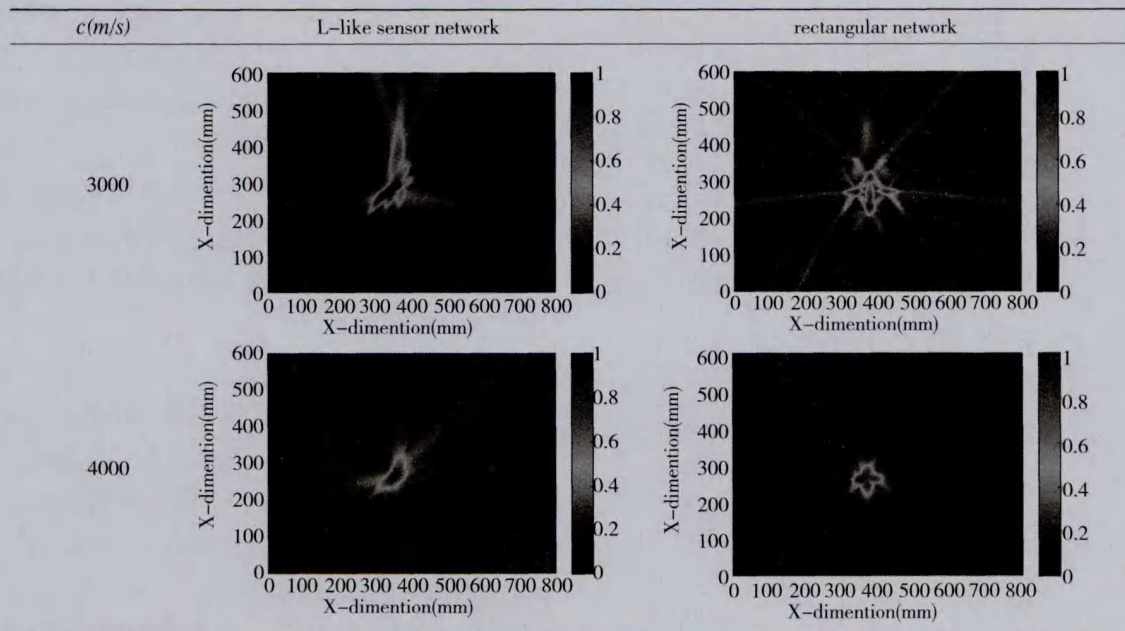
4.4 波速的影响

由公式(2)可以看出,声发射弹性波在结构中的传播速度 c 是延时叠加算法中的一个核心变量。一直以来,声发射源定位精度依赖于计算

波速^[9]。尽管Xiao et al.^[12]提出了一种不依赖波速的定位方法但并不能一次成像。对比分析表1、表2和表3的定位结果,根据无约束铝板的频散曲线获得的波速,在已知的波速下可以达到很好的定位效果。事实上,很多结构的频散曲线求解是一项繁重的工作,且随着结构的退化发生改变。本文提出的波束成形网络阵列技术可以在不依赖波速的情况下对声源进行定位。

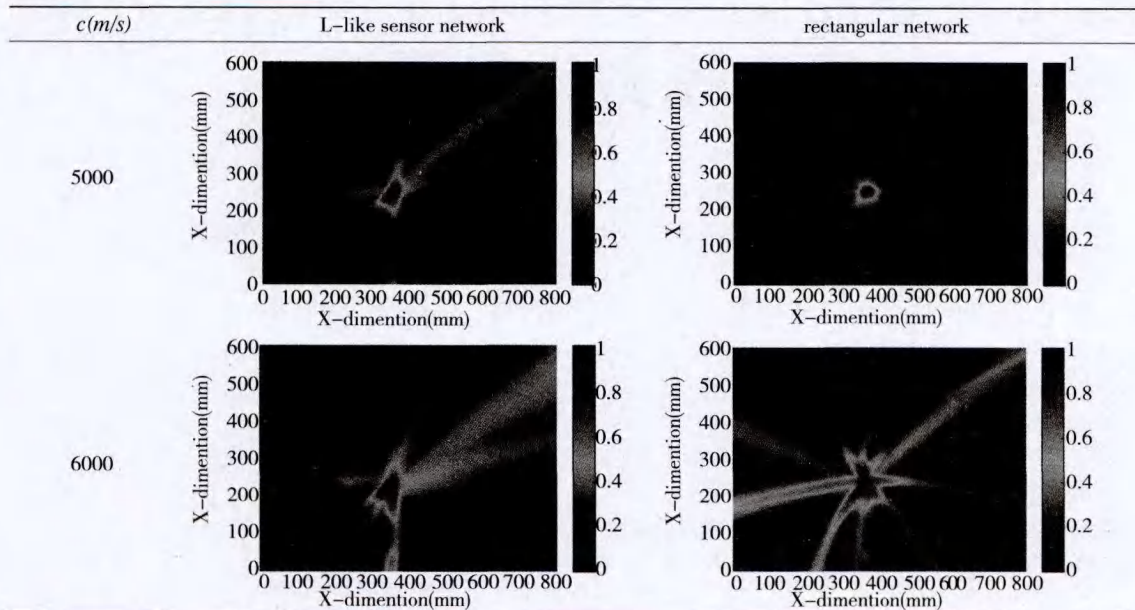
拿Case A举例来说,无论是“L”形网络阵列或方形网络阵列,在不同的计算波速下都能得到一个定位结果。当在声源中的真实位置和计算波速未知时,确定准确的定位结果将无所适从。其实,在不同的计算波速下,阵列能量输出成像是,能量的集中度和峰值有明显区别,表4展示了Case A在“L”形网络阵列和方形网络阵列不同波速下的经归一化后的定位成像。显然地,越靠近真实的波速,能量输出越集中,当信号叠加的越集中,峰值也就越大。因此,在未知波速的情况下,代入系列梯度波速,通过比较定位能量集中程度或能量峰值可以快速完成有效定位,并找到接近真实的波速。

表4 Case A在不同波速下的源定位成像效果



(续下表)

(接上表)



5 结论

本文研究了波束成形网络阵列技术在板状结构声发射源定位应用,并探讨了传感器网络阵列类型等关键因素对定位效果的影响。利用控制变量法对定位数据和结果进行经纬对比,得出以下结论。构建合理的传感器网络阵列,优化传感器布置,可以提升波束成形技术声发射源定位的精

度和效果;在一定精度要求下,选择恰当的传感器数量,可以节约经济成本;声源位置远离边界与否对定位效果影响很大,对于靠近边界或复杂的声源需要特别的信号处理方法;波速是波束成形理论中的核心变量,在未知波速的情况下,代入系列梯度波速,通过比较定位能量集中程度或能量峰值可以快速确认有效定位。

参考文献

- [1] L.D. Hall, D. Mba, Diagnosis of continuous rotor-stator rubbing in large scale turbine units using acoustic emissions, *J. Ultrasonics* 41 (2004) 765-773
- [2] A. Peter, A. Fehervary, Evaluation of acoustic emission from pressure vessels with planar flaws, *J. Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 5 (1986) 17-22
- [3] P. Pellionisz, P. Szűcs, Acoustic emission monitoring of pressure vessels, *J. International Journal of Pressure Vessels and Piping* 55 (1993) 287-294
- [4] Dirk Aljets, Alex Chong, Steve Wilcox, Karen Holford, Acoustic emission source location on large plate-like structures using a local triangular sensor array, *J. Mechanical Systems and Signal Processing* 30 (2012) 91-102
- [5] Tribikram Kundu, Hayato Nakatani, Nobuo Takeda, Acoustic source localization in anisotropic plates, *J. Ultrasonics* 52 (2012) 740-746
- [6] A. Tobias, Acoustic emission source location in two dimensions by an array of three sensors, *J. Nondestructive Testing* 9 (1976) 9-12
- [7] A. Ting, R. Zhang, J. Liu, R. Li, Space-time evolution rules of acoustic emission location of unloaded coal sample at different loading rates, *J. International Journal of Mining Science and Technology* 22 (2012) 847-854.
- [8] L. Dong, X. Li, Three-dimensional analytical solution of acoustic emission or microseismic source location under cube monitoring network, *J. Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 22 (2012) 3087-3094
- [9] Tribikram Kundu, Acoustic source localization, *J. Ultrasonics* 54 (2014) 25-38
- [10] G.C. McLaskey, S.D. Glaser, C.U. Grosse, Beamforming array techniques for acoustic emission monitoring of large concrete structures, *J. Journal of Sound and Vibration* 329 (12) (2010) 2384-2394
- [11] T. He, Q. Pan, Y. Liu, X. Liu, D. Hu, Near-field beamforming analysis for acoustic emission source localization, *J. Ultrasonics* 52 (5) (2012) 587-592
- [12] N. Toyama, J.H. Koo, R. Oishi, M. Enoki, T. Kishi, Two-dimensional AE source location with two sensors in thin CFRP plates, *J. Journal of Materials Science Letters* 20 (19) (2001) 1823-1825
- [13] H. Nakatani, T. Hajzargarbashi, K. Ito, et al. "Locating point of impact on an anisotropic cylindrical surface using acoustic beamforming technique". In 4th Asia-Pacific Workshop on Structural Health Monitoring, Melbourne, Australia, December (2012) 5-7.
- [14] D.H. Xiao, T. He, Q. Pan, X.D. Liu, et al. "A novel acoustic emission beamforming method with two uniform linear arrays on plate-like structures". *Ultrasonics* 54, (2014) 737 - 745.
- [15] F. Moser, L.J. Jacobs, J. Qu. "Modeling elastic wave propagation in waveguides with the finite element method". *NDT&E Int.* 32, (1999) 225-234.
- [16] H.K. Peng, G. Meng, F.C. Li. "Modeling of wave propagation in plate structures using three-dimensional spectral element method for damage detection". *Journal of Sound and Vibration* 320, (2009) 942-954.