

文章编号 1004-924X(2015)11-3012-06

基于光纤光栅阵列和 MVDR 算法的声发射定位

赛耀樟, 姜明顺, 隋青美*, 路士增, 贾磊
(山东大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 基于光纤光栅(FBG)传感器网络构建了声发射检测系统,并提出了最小方差无失真响应(MVDR)的声发射源定位方法。构建的系统由 7 个 FBG 传感器组成传感器线阵列,采用未经平坦的放大自发辐射(ASE)光源边缘滤波实现信号解调。利用 Shannon 小波变换从频散复杂的声发射信号中提取窄带信号,并基于 MVDR 算法扫描整个监测区域获取空间谱。根据空间谱函数计算输出值,并将计算的输出值作为像素值。最后,通过提取空间谱中的最大值的坐标确定声发射源的位置。在 LY12 铝合金板上进行了实验验证。结果表明,该方法在 400 mm × 400 mm 的区域内,声发射定位的最大误差为 9.4 mm,平均误差为 7.2 mm,耗时小于 3 s。该系统具有较高的实时性和定位精度,是一种声发射源定位的新方法。

关键词: 声发射定位; 光纤光栅; 最小方差无失真响应(MVDR); Shannon 小波变换

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152311.3012

Acoustic emission location based on FBG array and MVDR algorithm

SAI Yao-zhang, JIANG Ming-shun, SUI Qing-mei*, LU Shi-zeng, JIA Lei

(School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

* Corresponding author, E-mail: qmsui@sdu.edu.cn

Abstract: An Acoustic Emission (AE) detection system based on a Fiber Bragg Grating (FBG) network was constructed and an AE location system by using Minimum Variance Distortionless Response (MVDR) algorithm was designed. In this system, linear FBG array constituted by seven FBGs was used to detect AE signals, and the edge filter technology using an unflatted Amplified Spontaneous Emission(ASE) source was applied to signal demodulation. Shannon wavelet transform was employed in extracting narrow signals of AE signals with complex frequency dispersion and the spatial spectrum could be obtained by scanning over the monitoring area with the MVDR algorithm. The spatial spectrum function was used to calculate output values and the values were used as pixels. Finally, the AE source location was determined by the peak of spatial spectrum of MVDR. The system was verified on a LY12 aluminum alloy plate. The result shows that the maximum error and average error are 11.4 mm and 8.2 mm in a 400 mm × 400 mm monitoring area, respectively, and the average consumed time is less than 3 s. The system has higher real time ability and location accuracy, and is a new AE location technology.

Key words: Acoustic Emission(AE) location; fiber Bragg grating; Minimum Variance Distortionless Response(MVDR); Shannon wavelet transform

收稿日期: 2015-05-28; 修订日期: 2015-07-08.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61174018); 山东大学基本科研业务费专项资金资助项目(No. 2014YQ009)

1 引言

声发射(Acoustic Emission, AE)技术是结构健康监测的重要手段之一。AE 是材料中局部快速释放能量产生瞬态弹性波的现象,材料的变形、裂纹的产生和扩展、摩擦和撞击等都会产生 AE。AE 源位置判定是实现材料损伤检测的首要环节^[1]。近年来,光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感器以其灵敏度高、抗干扰能力强及易于组网等优势^[2-4],在 AE 信号检测领域中得到了广泛的应用^[5-7]。朱永凯^[8]等人使用强度型光纤传感技术和三角定位法确定 AE 源的位置,在 110 mm×60 mm 的检测范围内的定位误差为 4.63 mm。Fu^[9]等人采用新型的光纤传感器结合双曲线法定位冲击产生的 AE 源,最大误差为 10 mm,平均误差为 6.2 mm。Qin^[10]等人利用时差和传感器坐标建立源坐标方程,计算出 AE 源的位置,最大误差为 14.5 mm,平均误差为 8.2 mm。但这些方法都需要提取 AE 信号的到达时间,而在实际的工况下,由于噪声和频散效应的影响,精确提取信号的到达时间是比较困难的。随着人工智能算法的发展,智能算法被引入 AE 定位邻域。Jiang M^[11]等人提出使用 FBG 传感器和支持向量机的方法定位 AE 源,误差不超过 10 mm。Park^[12]等人提出使用 FBG 和神经网络算法在机翼上定位冲击产生的 AE 源,误差不超过 16.11 mm。这些算法需要大量的培训样本,而在实际应用中样本很难提取,因此这些算法很难被推广应用。

综上所述,AE 检测需要一种无需时差和样本的定位方法。本文采用 FBG 传感器组成简单方便的线性传感器阵列,并提出了最小方差无失真响应(Minimum Variance Distortionless Response, MVDR)的 AE 源定位方法。该方法可以通过成像定位 AE 源的位置,具有较高的实时性和定位精度。系统使用 Shannon 小波转换提取 AE 信号的窄带信号,通过 MVDR 算法扫描监测区域获取空间谱,从而获得 AE 源位置。该定位系统无需计算信号时差或培训样本,是一种高精度的 AE 源定位系统。

2 定位原理

2.1 MVDR 原理

如图 1 所示,AE 源位于 M 个传感器组成的

线阵列上方,传感器间距为 d 。传感器 S_0 位于坐标原点,并被设为参考传感器。AE 源与传感器 S_i 的距离为 r_i ,第 i 个传感器与 S_0 的时差为:

$$\tau_i = \frac{r_i - r_0}{c}, \quad (1)$$

其中 c 为信号的波速。设 AE 源的坐标为 (x_{AE}, y_{AE}) ,传感器 S_i 的坐标为 $(id, 0)$ 。则式(1)可变为:

$$\tau_i = \frac{\sqrt{(x_{AE} - id)^2 + y_{AE}^2} - \sqrt{x_{AE}^2 + y_{AE}^2}}{c}. \quad (2)$$

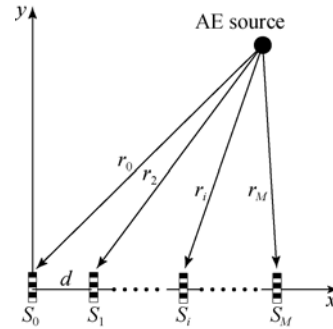


图 1 定位原理图

Fig. 1 Localization principle

以 S_0 为基准,则第 i 个传感器接受的信号可表示为:

$$x_i(t) = e^{-j\omega\tau_i} s(t) + n_i(t), \quad (3)$$

其中: $s(t)$ 为射入的窄带信号, $n_i(t)$ 为噪声信号。设 $\mathbf{a}_i(x_{AE}, y_{AE})$ 为信号的方向向量,则 $\mathbf{a}_i(x_{AE}, y_{AE}) = e^{-j\omega\tau_i}$ 。由式(3)得到传感器阵列输出信号的矩阵形式为:

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{a}(x_{AE}, y_{AE}) s(t) + \mathbf{n}(t). \quad (4)$$

其中:

$$\mathbf{X}(t) = [x_0(t), x_1(t), \dots, x_M(t)]^T,$$

$$\mathbf{a}(x_{AE}, y_{AE}) = [a_0, a_1, \dots, a_M]^T,$$

$$\mathbf{n}(t) = [n_0(t), n_1(t), \dots, n_M(t)]^T.$$

AE 信号到达各传感器时,由于声程差,各传感器的输出之间存在相对时延 τ_i 。如果对阵元信号做适当的时延补偿,再对补偿后的信号进行叠加,则在声源点处会输出最大值,而其他点的输出相对比较小时。叠加输出可以表示为:

$$y(t) = \mathbf{W}^H \mathbf{X}(t), \quad (5)$$

其中 \mathbf{W} 为加权向量。输出功率为:

$$p = E[|y(t)|^2] = \mathbf{W}^H \mathbf{R} \mathbf{W}, \quad (6)$$

其中 \mathbf{R} 为阵列信号的协方差矩阵, $\mathbf{R} = E[\mathbf{X}\mathbf{X}^H]$ 。MVDR 算法是保持期望信号能量不变的条件下,

使整个系统的输出能量最小,即将系统所受干扰及噪声的能量降至最低^[13]。实际上是求解以下约束最小化问题:

$$\min(\mathbf{W}^H \mathbf{R} \mathbf{W}) \text{ 且 } \mathbf{W}^H \mathbf{a}(x_{AE}, y_{AE}) = 1, \quad (7)$$

求解得到的最佳加权向量为:

$$\mathbf{W} = \frac{\mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}(x_{AE}, y_{AE})}{\mathbf{a}^H(x_{AE}, y_{AE}) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}(x_{AE}, y_{AE})}. \quad (8)$$

MVDR 形成的空间谱函数为^[14]:

$$P(x_{AE}, y_{AE}) = \mathbf{W}^H \mathbf{R} \mathbf{W} = \frac{1}{\mathbf{a}^H(x_{AE}, y_{AE}) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}(x_{AE}, y_{AE})}. \quad (9)$$

由于实际接收的数据矩阵是有限长的,因此使用最大似然估计 $\hat{\mathbf{R}}$ 代替 \mathbf{R} 。 $\hat{\mathbf{R}}$ 为:

$$\hat{\mathbf{R}} = \frac{\mathbf{X} \mathbf{X}^H}{L}, \quad (10)$$

式中 L 是数据的快拍数。将式(10)代入式(9)中,通过对监测区域进行逐点扫描得到相关的空间谱。当扫描点为 AE 源点时,空间谱函数输出最大值,由此可以定位 AE 源。

2.2 小波变换

AE 波在板内传播存在频散效应,为满足 MVDR 算法分析的需求,需提取窄带 AE 信号。这里使用具有良好时频分析特性的 Shannon 小波变换提取所需频率成分的窄带信号^[15]。Shannon 小波的函数表达式为:

$$\psi_m(t) = \sqrt{f_b} \sin c(f_b t) e^{2\pi i f_c t}, \quad (11)$$

其中: f_b 为小波带宽参数, f_c 是小波中心频率参数。小波的傅里叶变换为:

$$\Psi_m(\omega) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2\pi}{\omega_b}}, & \omega_c - \frac{\omega_b}{2} < \omega \leq \omega_c + \frac{\omega_b}{2} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (12)$$

由式(12)可见, $\Psi_m(\omega)$ 为矩形窗函数,可用于提取中心频率为 ω_c 的等幅频率成分的窄带信号。

考虑 AE 波由沿 x 方向传播,相同单位幅度但角频率略有不同的两个谐波构成,所以有:

$$u(x, t) = e^{-j(k_1 x - \omega_1 t)} + e^{-j(k_2 x - \omega_2 t)}. \quad (13)$$

信号 $u(x, t)$ 的小波变换定义为:

$$WT(x, a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} u(x, t) \psi^* \left[\frac{t-b}{a} \right] dt, \quad (14)$$

其中:“*”为复函数的共轭变换; a 为尺度因子, b 为时间因子。因此,通过 Shannon 小波变换可以提取相应的窄带 AE 信号。

3 声发射定位试验

3.1 实验装置

实验对象为四边固支的 LY12 铝合金板,尺寸为 600 mm×600 mm×3 mm。在板中心设置 400 mm×400 mm 的监测区域,如图 2 所示,在监测区域建立坐标系,在 x 轴上粘贴 7 个 FBG 传感器,传感器的间距为 10 mm。实验使用 7 个高灵敏度同波长的 FBG 传感器,栅区长度为 10 mm,反射波长为 1 534. 995 nm(此波长处于未平坦 ASE 光源的斜率最大的边缘上,使系统具有较高的解调灵敏度),粘贴后各传感器之间的中心波长差小于 0.02 nm。实验系统如图 3 所示,系统主要包括未经平坦的 ASE 光源、耦合器、FBG 传感器、光电探测器、放大器及数据采集系统,采样率为 5 MHz。在高频动态应力波的作用下,FBG 的反射波长会发生变化^[16],通过输出光功率的变化来实现 AE 信号的解调。实验使用断铅激励出 AE 信号。

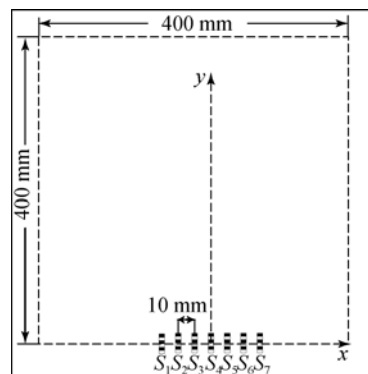


图 2 实验图
Fig. 2 Experimental item

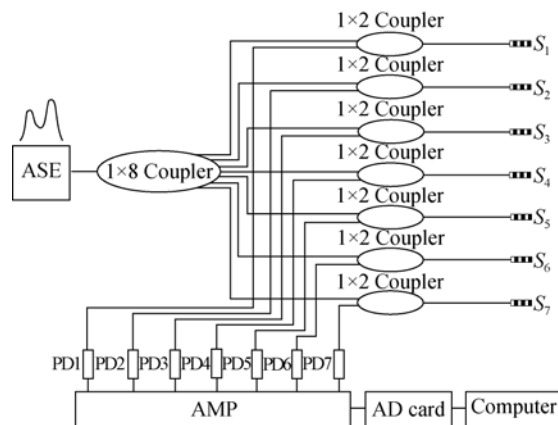


图 3 AE 定位系统图
Fig. 3 Scheme of AE location system

3.2 定位实验

在监测区域内随机选取一个激励点 (-93,295) 进行断铅实验。FBG 传感器检测到的 AE 信号如图 4 所示。可以看出,FBG 传感器可以良好地实现声发射信号的检测。

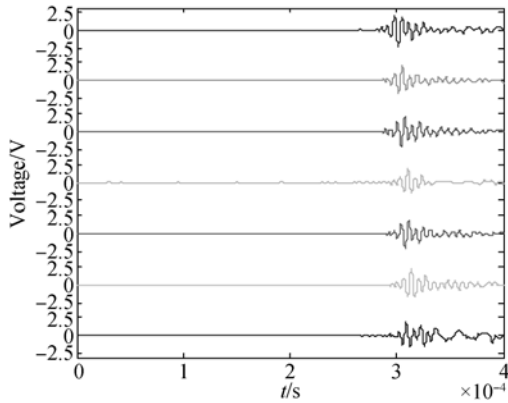


图 4 FBG 传感器检测的声发射信号

Fig. 4 AE signals detected by FBG sensor

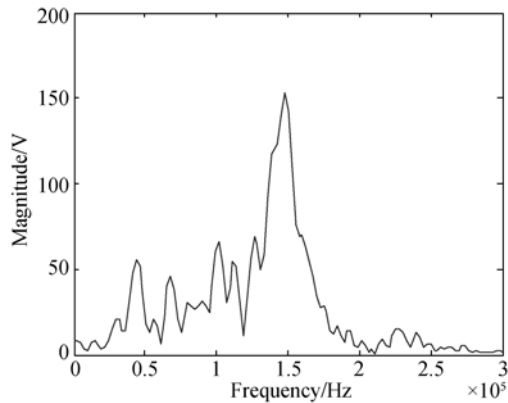


图 5 声发射信号频谱

Fig. 5 Frequency spectrum of AE signals

图 5 为传感器 S_1 的频谱,从频谱图可以看出,声发射信号为 0~250 kHz 的宽频信号,其主频为 150 kHz。为满足 MVDR 算法分析的需求,提取中心频率为 150 kHz 的窄带信号进行定位。根据时差法计算出铝合金上 150 kHz 的窄带弹性波的群速度^[17]为 3 125.2 m/s。

利用 Shannon 小波变换提取中心频率为 150 kHz 的窄带信号,结果如图 6 所示。使用窄带信号计算出协方差矩阵的最大似然估计。将整个监测区域划分为 160 000 个搜索点,每个搜索

点的间隔为 1 mm。根据 MVDR 方法扫描所有搜索点,得到二维空间谱,如图 7 所示。根据 MVDR 方法预测处于波峰的 (-95,302) 为 AE 源坐标。径向定位误差为 7.3 mm,计算用时小于 3 s。为进一步验证系统的定位性能,在监测区域内随机选取 10 个激励点进行 AE 定位实验,实验结果如表 1 所示。定位的最大误差为 9.4 mm,平均误差为 7.2 mm。由此可知,在待测区域底部布置 FBG 线性传感器阵列并结合 MVDR 算法,可实现 AE 信号的高精度定位。

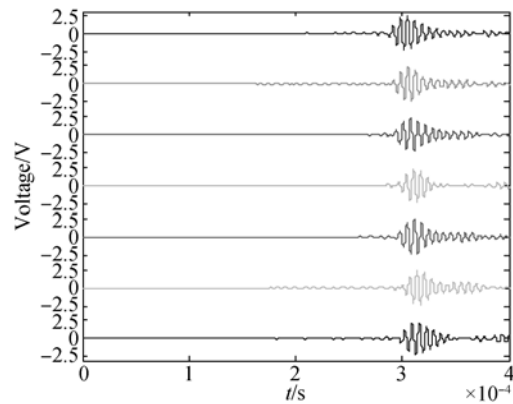


图 6 中心频率为 150 kHz 的窄带信号

Fig. 6 150 kHz narrow-band signals

表 1 定位结果

Tab. 1 Location results

AE 源 编号	实际源 坐标/mm	预测源 坐标/mm	径向 误差/mm
1	(-166,137)	(-172,135)	6.3
2	(-105,50)	(-113,54)	8.9
3	(-132,357)	(-126,351)	8.5
4	(-63,216)	(-63,218)	2.8
5	(78,321)	(87,328)	7.1
6	(168,136)	(162,129)	9.2
7	(113,65)	(108,63)	5.4
8	(96,78)	(96,86)	9.4
9	(137,372)	(132,371)	5.1
10	(185,239)	(189,247)	8.9

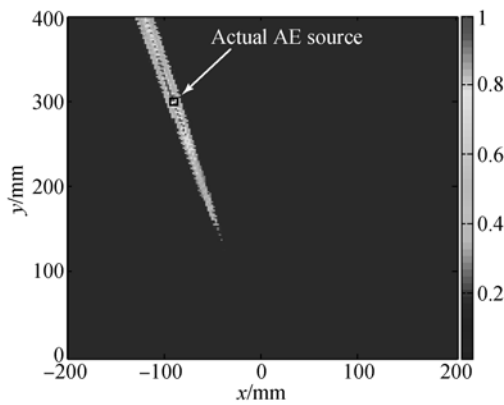


图 7 声发射定位图
Fig.7 AE source location

参考文献:

- [1] KAPHLE M, TAN A C C, THAMBIRATNAM D P, *et al.*. Identification of acoustic emission wave modes for accurate source location in plate-like structures [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2012, 19(2):187-198.
- [2] 吴晶, 吴晗平, 黄俊斌, 等. 用于船舶结构监测的大量程光纤布拉格光栅应变传感器 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(2):311-317.
- WU J, WU H P, HUANG J B, *et al.*. Large rang FBG sensor for ship structure health monitoring [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(2):311-317. (in Chinese)
- [3] 杨淑连, 何建廷, 魏芹芹, 等. 强度调制的光纤布拉格光栅磁场传感器 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(3):597-601.
- YANG SH L, HE J T, WEI Q Q, *et al.*. Intensity-modulated magnetic field sensor based on optical fiber Bragg grating [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(3):597-601. (in Chinese)
- [4] 吴入军, 郑百林, 贺鹏飞, 等. 埋入式光纤布拉格光栅传感器封装结构对测量应变的影响 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(1):24-30.
- WU R J, ZHENG B L, HE P F, *et al.*. Influence of encapsulation structures for embedded fiber-optic Bragg grating sensors on strain measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(1):24-30. (in Chinese)
- [5] GAO X, ZHANG X P, LI N, *et al.*. Research on fiber Bragg grating acoustic emission technology applied in helicopter bearing detection [J]. *Procedia Engineering*, 2015, 99:1203-1212.
- [6] PANG D D, SUI Q M. Response analysis of ultrasonic sensing system based on fiber Bragg gratings of different lengths [J]. *Photonic Sensors*, 2014, 4:281-288.
- [7] AZMI A I, RAJU R, PENG G D, *et al.*. Failure monitoring of E-glass/vinylester composites using fiber grating acoustic sensor [J]. *Photonic Sensors*, 2013, 3:184-192.
- [8] 朱永凯, 崇博, 林啸鸣, 等. 基于强度型光纤传感技术的复合材料薄板损伤声发射定位法 [J]. *无损检测*, 2011, 33:54-61.
- ZHU Y K, CHONG B, LIU X M, *et al.*. Composites sheet damage acoustic emission localization method based on optical fiber intensity sensing technology [J]. *Nondestructive Testing*, 2011, 33:54-61. (in Chinese)
- [9] FU T, LIU Y, LAU K, *et al.*. Impact source identification in a carbon fiber reinforced polymer plate by using embedded fiber optic acoustic emission sensors [J]. *Compos. Part B Eng.*, 2014, 66:420-429.
- [10] QIN Y X, LIANG Y J, ZHANG Y H, *et al.*. Experimental study on an optical fiber acoustic emission sensor array [C]. *Harbin, ASOT*, 2010:299-302.
- [11] JIANG M S, LU S Z, SAI Y Z, *et al.*. Acoustic emission source localization technique based on least squares support vector machine by using FBG sensors [J]. *Journal of Modern Optics*, 2014, 61:1634-1640.
- [12] PARK C Y, KIM J H, JUN S M, *et al.*. Localizations and force reconstruction of low-velocity impact in a composite panel using optical fiber sensor [J]. *Adv Compos. Mater.*, 2013, 21:357-369.
- [13] CHEN H, WAN Q, ZHANG X, *et al.*. Robust beamforming with inter-atom-interference mitiga-

4 结 论

本文提出了基于 FBG 传感网络和 MVDR 方法的 AE 定位系统。该系统使用 FBG 线阵, 并通过边缘滤波解调, 利用 MVDR 方法通过扫描监测区域来构建空间谱, 通过空间谱中的峰值确定 AE 源的位置。然后在铝合金板上进行了系统验证实验。结果表明, AE 定位的最大误差为 9.4 mm, 平均误差为 7.2 mm, 计算耗时小于 3 s。该系统为 AE 射源定位提供了一种快速、有效的方法。

- tion approach for uniform circular arrays [J]. *International Journal of Electronics and Communications*, 2015, 69: 236-241.
- [14] CHANG J. Combining genetic algorithm and Taylor series expansion approach for DOA estimation in space-time CDMA systems [J]. *Applied Soft Computing*, 2015, 28: 208-216.
- [15] 张伟, 师奕兵, 卢涛. 基于抗混叠 Shannon 小波包变换的声波测井曲线高分辨率处理方法 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2009, 23(5): 63-68.
- ZHANG W, SHI Y B, LU T. High-resolution processing of acoustic well logs based on anti-aliasing Shannon wavelet packet transform [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2009, 23(5): 63-68. (in Chinese)
- [16] HONGO A, KOJIMA S, KOMATSUZAKI S. Applications of fiber Bragg grating sensors and high-speed interrogation techniques [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2005, 12: 269-282.
- [17] 邵翔, 张士晶, 欧阳未, 等. 飞机蜂窝复合材料板压缩过程的声发射定位研究 [J]. *失效分析与预防*, 2013, 8(3): 151-155.
- SHAO X, ZHANG SH J, OUYANG W, *et al.*. Acoustic emission location on compression process of aircraft cellular composite materials [J]. *Failure Analysis and Prevention*, 2013, 8(3): 151-155. (in Chinese)

作者简介:



赛耀樟(1983—),男,博士研究生,主要从事结构健康监测及光纤传感的研究。
E-mail: saiyaozhang@126.com

通讯作者:



隋青美(1963—),女,山东东营人,教授,博士生导师,主要从事光纤传感、检测理论及应用等研究。E-mail: qmsui@sdu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)