

基于 FBG 传感网络和时间反转聚焦成像方法的 声发射定位技术研究

赛耀樟¹ 姜明顺^{1,2*} 隋青美¹ 路士增¹ 贾磊¹

(¹ 山东大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250061)

(² 兖矿集团博士后工作站, 山东 邹城 273500)

摘要 针对传统声发射定位系统存在的结构复杂、难以组网、定位精度低等问题,设计了一种基于光纤布拉格光栅(FBG)传感器网络和时间反转聚焦成像的声发射定位方法。在对时间反转聚焦定位原理分析的基础上,利用四个 FBG 传感器构建四点定位系统,并采用窄带激光边缘滤波技术实现信号解调。利用 Morlet 小波提取信号中特定频率成分,并计算模值和时差。通过建立时间反转聚焦模型实现声发射源定位,并在铝合金板结构上对整套成像定位方法进行验证。实验结果表明,该方法能有效地对 400 mm×400 mm 监测区域进行声发射定位成像,定位误差小于 20 mm,耗时小于 2 s。为声发射检测和定位提供了一种新的方法。

关键词 测量; 光纤布拉格光栅; 声发射定位; 时间反转聚焦; Morlet 小波

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0805003

Acoustic Emission Location Technology Research Based on FBG Sensor Network and Time Reversal Focusing Imaging Method

Sai Yaozhang¹ Jiang Mingshun^{1,2} Sui Qingmei¹ Lu Shizeng¹ Jia Lei¹

(¹ School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China)

(² Postdoctoral Work Station, Yanzhou Coal Mining Group, Zoucheng, Shandong 273500, China)

Abstract For the problems of complicated structure, difficult to networking and low accuracy of traditional acoustic emission localization system, an acoustic emission localization based on fiber Bragg grating (FBG) sensor network and time reversal focusing imaging technology is designed. Based on the analysis of the principle of time reversal focusing, positioning system by four FBG sensors is built and narrow band laser edge filter technology is used to realize signal demodulation. Morlet wavelet transform is used to extract specific frequency component signal, and calculate the modulus value and time lag. Through the establishment of time reversal focusing model, acoustic emission location is realized. The localization method is verified in the aluminum alloy plate. The experimental result shows that this method can effectively realize localization and imaging of acoustic emission source, and localization error is less than 20 mm, and time consumption is less than 2 s. A new method is provided for acoustic emission detection and localization.

Key words measurement; fiber Bragg grating; acoustic emission localization; time reversal focusing; Morlet wavelet

OCIS codes 040.1880; 060.2370; 230.0040

收稿日期: 2014-01-13; 收到修改稿日期: 2014-03-08

基金项目: 中国博士后基金(20110491620)、国家自然科学基金(61174018)、山东省自然科学基金(ZR2011FQ025)、山东省博士后创新项目专项基金(201103024)

作者简介: 赛耀樟(1983—),男,博士研究生,主要从事光纤传感及结构健康监测等方面研究。

E-mail: saiyaozhang@163.com

导师简介: 隋青美(1963—),女,教授,博士生导师,主要从事光纤传感,检测理论及应用等方面的研究。

E-mail: qmsui@sdu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: sdujiangmingshun@163.com

1 引 言

声发射(AE)技术是结构安全监测的重要手段之一,相对于其他无损监测方法具有实时、动态和覆盖面广等优点。声发射技术的关键是通过信号处理得到对声发射源的描述,即源的位置,性质和严重程度。确定源的位置是声发射检测需解决的首要问题。

目前,声发射定位方法主要包括时差定位、区域定位和基于人工智能的定位方法。时差定位是根据信号到达各个传感器之间的时间差,通过双曲线算法,确定定位区域内源的位置。声发射波在介质中传播存在频散效应,不同频率波的波速不同,时差较难确定,定位精度还受信号衰减影响^[1-3]。区域定位的实现是根据声发射波传播过程产生的信号衰减特性,信号强度随着测量点与源距离的增加而衰减,声发射源位于响应信号强度最大的传感器所监测区域,区域定位只能判断所在区域,且对检测材料要求较高^[4]。基于人工智能的定位法是从响应信号中提取特征值,如到达时间、幅值、振铃等,并利用神经网络或支持向量机等算法对样本进行训练,然后根据样本来估计源位置。该方法需要大量前期样本,制约了其实用性^[5-6]。

本文设计了一种基于光纤布拉格光栅(FBG)传感网络和时间反转聚焦成像定位的声发射定位方法。光纤光栅传感器具有重量轻、抗干扰性强和易组网等优点,利用窄带激光器构建滤波解调系统,并使用具有高时频分辨率的 Morlet 小波来提取测试信号中特定频率成分,计算模值和时差。依据时间反转聚焦原理可实现声发射源的搜索及成像,获得了良好的实验效果。

2 检测系统原理

2.1 声发射光纤光栅传感器原理

FBG 声发射传感器是通过反射波长的变化来实现声发射信号检测的。对满足 FBG 相位匹配条件的反射波长为^[7-10]

$$\lambda_{B0} = 2n_{\text{eff0}}\Lambda_0, \quad (1)$$

式中 λ_{B0} 是 FBG 的反射波长, n_{eff0} 是有效折射率, Λ_0 是光栅周期。 n_{eff0} 和 Λ_0 在外界条件作用产生变化时会产生反射波长的漂移,通过测量波长变化来检测物理量的变化。在检测声发射信号时,当声发射波传递到 FBG 传感器时,FBG 反射波长变化方程为^[11]

$$\Delta\lambda = \lambda_{B0}\epsilon_m \left\{ 1 - \left(\frac{n_{\text{eff0}}^2}{2} \right) [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \right\}, \quad (2)$$

式中 ϵ_m 为声发射波的幅值变化, P_{ij} 为应力光学系数, ν 为泊松比。声发射波是一种高频动态应变,由(2)式表明,当作用于光栅上时,会使光栅反射波长发生变化,通过监测波长的变化从而实现声发射信号的获取。

2.2 时间反转聚焦原理

时间反转聚焦原理是所有传感器将同一声发射信号的响应信号经时间反转,沿原方向反推,所有的时间反转信号会在声源处产生叠加,即聚焦。时间反转聚焦原理如图 1 所示,在结构上布置 n 个传感器。其中, H_{AEi} 与 H_{AEi} 分别是声发射信号从声源处传播到第 i 个传感器及其反向传播的传递函数频谱。第 i 个传感器响应信号频谱可表示为

$$E_i = H_{AEi}E_{AE}, \quad (3)$$

式中 E_{AE} 为声发射信号频谱。将响应信号进行时间反转可表示为 E_i 的复共轭。依据声波传播的互易性,即 $H_{AEi} = H_{AEi}$ 。将时间反转信号传回信号源处,可得^[12]

$$E_{AEs} = H_{AEi}E_i^* = H_{AEi}H_{AEi}^*E_{AE}^*, \quad (4)$$

式中 $H_{AEi}H_{AEi}^*$ 为实、偶、正函数,它在时间零点的逆傅里叶变换是同向叠加的,因此会得到主相关峰值。多个传感器将接受的同一个声发射信号 E_{AE} 的响应信号进行时间反转,并聚焦,聚焦方程为^[13]

$$E_{AE1} = \sum_{i=1}^n H_{AEi}E_i^* = \sum_{i=1}^n H_{AEi}H_{AEi}^*E_{AE}^*, \quad (5)$$

由(5)式可见,时间反转聚焦是多个时间反转信号在声源处叠加的结果,其关键点是传感器响应信号的传递函数。确定传递函数必然会增加系统的复杂性及计算量,因此需要简化聚焦算法。

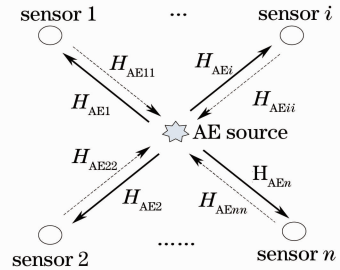


图 1 时间反转聚焦原理图

Fig. 1 Illustration of time reversal focusing process

声发射响应信号的传递函数 H_{AEi} 包括幅值项和相位项。在时间反转聚焦过程中相位项是信号能否在声源处聚焦的关键,因此在时间反转聚焦过程中可忽略传递函数的幅值项,而保留相位相。由此得出的近似时间反转聚焦,其实质是将各个传感器的声发射响应信号在时域上进行时间反转并将时间延迟。由

(5)式得,时间反转聚焦模值的时域方程为^[13]

$$|e_i(t)| \approx \left| \sum_{i=1}^n e_i \left(\tau - t + \frac{d_i}{C} \right) \right|, \quad (6)$$

式中 $e_i(t)$ 为对应传感器的声发射响应信号 E_i 中的窄带信号, τ 为所取信号时长, d_i 为声发射源到相第 i 个传感器的距离, C 为窄带声发射信号的群速度, $\frac{d_i}{C}$ 为延迟时间。模值可以反映信号的变化趋势,时间反转聚焦可将各个信号的模值进行叠加,叠加程度可直接反映出声发射源位置。(6)式中,聚焦模值的最大值即为聚焦信号主峰的最大值。依据上述方法,只需对时间反转信号进行时间延迟,从而实现时间反转聚焦,极大地简化了聚焦算法。

2.3 聚焦成像定位原理

依据时间反转信号只有在声源处产生聚焦的原理,将时间反转聚焦成像定位设计为一个搜索定位的过程。定位前,依据精度及计算耗时的要求,将监测区域划分成一定数量的搜索点,计算所有搜索点到各个传感器之间的距离,根据声发射波传播的速度,计算出时间延迟。依据(6)式对所有搜索点进行时间反转聚焦模值计算,将模值的最大值作为此点的像素值。所有搜索点计算完毕以后。依据搜索点的像素值进行成像。所有像素值中最大值点即为声发射源点^[14-15]。

2.4 Morlet 小波变换

声发射波在板内传播存在频散效应,因此需要提取信号的特定频率成分进行分析,并计算聚焦模值。利用 Morlet 小波变换可对所需频率成分进行提取。

Morlet 小波函数定义为^[16]

$$\psi_m(t) = \exp(j\omega_0 t) \exp(-t^2/2), \quad (7)$$

式中 ω_0 为小波中心频率,小波的傅里叶变换为

$$\Psi_m(\omega) = \sqrt{2\pi} \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2}\right]. \quad (8)$$

由(8)式可见, $\Psi_m(\omega)$ 为高斯窗函数,可用于提取中心频率为 ω_0 的窄带信号。

声发射信号可以考虑为沿 x 方向传播,由相同单位幅度但角频率略有不同的两个谐波构成

$$u(x, t) = \exp[-j(k_1 x - \omega_1 t)] + \exp[-j(k_2 x - \omega_2 t)]. \quad (9)$$

信号 $u(x, t)$ 的小波变换定义为

$$W_T(x, a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} u(x, t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt, \quad (10)$$

式中 $*$ 为复函数的共轭变换, a 为尺度因子, b 为时

间因子。假设

$$\begin{cases} \Psi^*(a\omega) = \Psi^*(a\omega_1) = \Psi^*(a\omega_2) \\ \frac{k_2 - k_1}{2} = \Delta k \\ \frac{\omega_2 - \omega_1}{2} = \Delta \omega \end{cases}, \quad (11)$$

使用 Morlet 复数小波对 $u(x, t)$ 做小波变换,并计算模值为^[17]

$$|W_T(x, a, b)| = \sqrt{2a} |\Psi(a\omega)| \sqrt{1 + \cos(2\Delta kx - 2\Delta \omega b)}, \quad (12)$$

式中模值在 $b = \frac{\Delta k}{\Delta \omega} = \frac{x}{C}$ 时取最大值, C 为群速度。

因此,通过 Morlet 小波可提取窄带信号,计算信号模值。

3 监测系统及定位方法验证

3.1 实验对象及装置

实验在尺寸为 $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 的 6061 铝合金板上进行。依据图 2 进行布局,监测区域为 FBG 传感器间的 $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 区域,采用四个高灵敏度同波长的 FBG 声发射传感器,FBG 栅区长度为 10 mm ,中心波长设计为 1565.250 nm (粘贴后各传感器之间的中心波长差小于 0.02 nm ,可以与滤波解调光源良好匹配)。实验使用断铅作为声发射信号源。实验装置组成及实体图如图 3 和图 4 所示。系统主要可调窄带激光光源,耦合器,环形器,FBG 传感器,光电转换(O/E),放大器(AMP)及数据采集系统(AD card & computer)组成。数据采集系统为美国物理声学(PAC)公司的 Micro-II 声发射系统,设置采样频率为 1 MHz 。可调窄带激光光源发出后经耦合器和环形器到达光纤光栅,当粘贴在铝合金板上的光纤光栅受到声发射信号的扰动时,光纤光栅心波长就会发生变化,通过光纤光栅

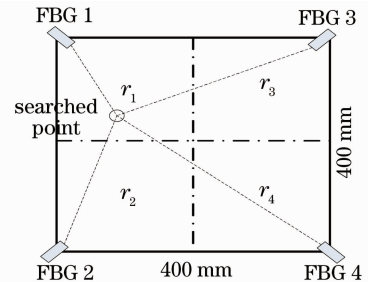


图 2 时间反转聚焦成像定位原理及判定区域图
Fig. 2 Illustration of time reversal focusing imaging localization and the determining area

反射谱与可调窄带激光光源光谱的重叠面积的变化,即输出光功率的变化来实现信号解调。

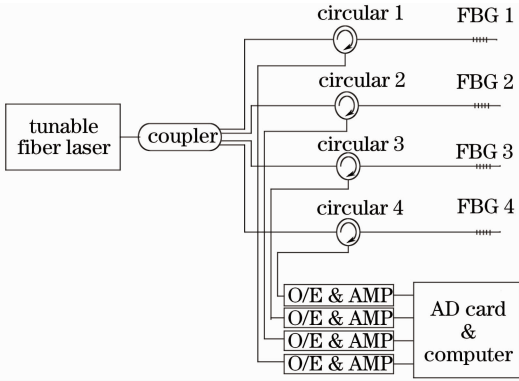


图 3 系统组成图
Fig. 3 System diagram

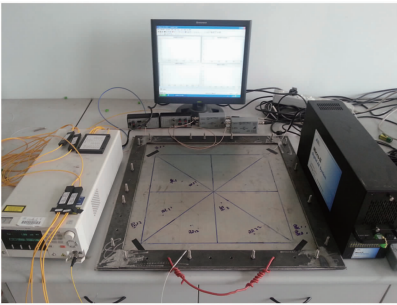


图 4 实验系统图
Fig. 4 Experimental system diagram

3.2 速度计算

依据(6)式可知,速度是聚焦的关键之一。速度实验示意图如图 5 所示。FBG 传感器之间距离为 700 mm,选择距离 FBG1 传感器 100 mm 的位置进行三次断铅实验。FBG 的典型声发射响应信号及频谱如图 6 所示。信号的主要能量集中在 150 kHz,因此利用 Morlet 小波变换提取中心频率为 150 kHz 的窄带信号并计算模值。依据模值获取信号时差,如图 7 所示。根据 $v = \frac{d_2 - d_1}{\Delta t}$, 分别计算出三次断铅实验的速度,然后将三组速度值求平均,得出断铅信号在铝合金板的中心频率的群速度约为 2888.4 m/s。

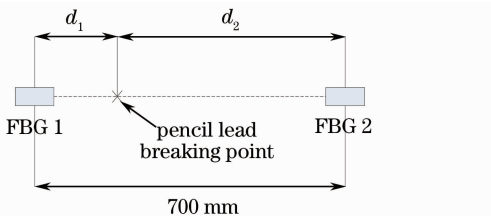


图 5 速度实验示意图
Fig. 5 Velocity measurement schematic diagram

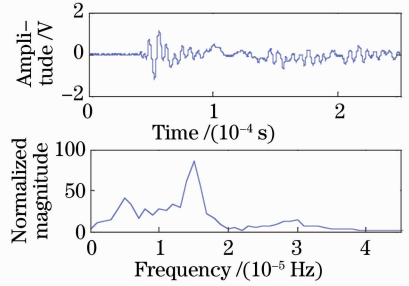


图 6 声发射信号及频谱图
Fig. 6 AE signal and frequency spectrum

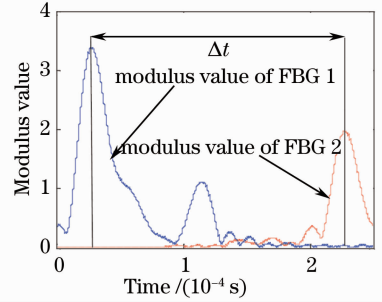


图 7 小波变换提取时差图
Fig. 7 Time difference extracting using wavelet transform

3.3 声发射定位实验

群速度确定后,依据图 2 所示系统进行声发射定位实验,定位实验方法流程如下:

- 1) 为保证精度及计算耗时,将监测区域划分为 6400 搜索点,每个搜索点间隔为 5 mm。选择坐标 (100,250)和(350,150),分别进行断铅实验。
- 2) FBG 接收声发射信号,并对接收到的声发射信号进行 Morlet 小波变换提取中心频率为 150 kHz 的窄带信号,并计算模值 $M(t) = [m_1(t), m_2(t), m_3(t), m_4(t)]$ 。
- 3) 为提高搜索效率,可首先进行区域判定,再进行搜索。依据传感器位置划分声发射源判断区域。判断 FBG 接收信号的先后顺序,确定出声发射源所在区域,即需要定位计算的区域。如图 2 所示,如果 FBG1 先接收到声发射信号,声发射源应在 FBG1 所在的 r_1 区域内, r_1 为判定区域。由此只需搜索原来整个区域的 1/4,极大地减少了计算量。

4) 在判定的区域内,计算所有搜索点到各 FBG 之间的距离,从而依据所计算的群速度及 $\Delta t_i = \frac{d_i}{C}$, 可得出时间延迟。

5) 依据(6)式,将 $M(t)$ 进行时间反转,然后再时间延迟,从而得到 $S(t) = \sum_{i=1}^4 m_i(\tau - t + \Delta t_i)$,将

$S(t)$ 的最大值作为搜索点的像素值。

6) 计算出所有搜索点像素值,完成判定区域内的声发射源搜索。非声发射源判定区域内的像素值设为上述计算中的最小值。

7) 依据像素值进行成像,最大像素值坐标即为声发射源点。

依据时间反转聚焦成像及判定区域算法得出的成像定位图如图 8 和图 9 所示。计算的定位坐标分别为(100,250)和(350,150),定位径向误差分别为 10 mm 和 5 mm。表 1 为多次声发射定位实验误差表,从表中可以看出误差基本保持在 20 mm 以内。计算成像定位过程用时小于 2 s。与时差法、区域定位法和人工智能定位法相比较^[3-5],基于 FBG 传感网络的时间反转聚焦成像定位法精度提高 5~30 mm,并且无需复杂信号分析及处理。由上述可以说明时间反转聚焦成像定位可实现声发射定位,并具有较高的精度和实时性。

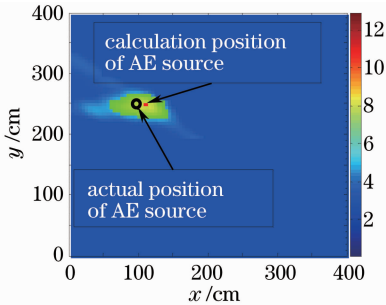


图 8 (100,250)声发射源定位成像图

Fig. 8 AE source localization imaging diagram (100,250)

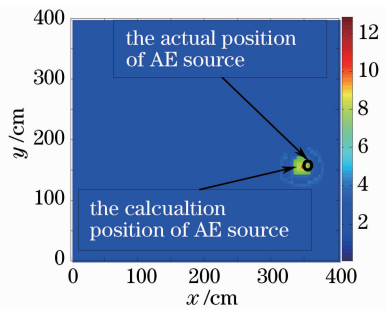


图 9 (350,150)声发射源定位成像图

Fig. 9 AE source localization imaging diagram (350, 150)

表 1 定位误差表

Table 1 Localization error table

AE source number	Actual coordinate / mm	Calculation coordinate / mm	Radial error / mm
1	(100,100)	(90,950)	11
2	(105,50)	(115,50)	10
3	(302,353)	(300,345)	8
4	(250,200)	(235,190)	18

4 结 论

利用 FBG 传感器构建声发射检测及定位系统,通过 Morlet 小波变换和时间反转聚焦信号成像定位法实现声发射信号源定位,在 6061 铝合金板上 400 mm×400 mm 监测区域验证了方法的可行性,结果表明在监测区域内的声发射定位误差小于 20 mm。同时根据时间到达先后顺序判定声发射源区域法极大地减少了定位方法的计算量和计算时间,搜索定位过程耗时小于 2 s,提高了监测系统的实时性。

参 考 文 献

- Chen Guohua, Liang Jun, Wang Xinhua. TDOA-based location and its correction of acoustic emission source with slewing ring [J]. Journal of South China University of Technology, 2013, 41(4): 142-146.
陈华国, 梁 峻, 王新华. 基于线性时差的回转支承声发射源定位及修正[J]. 华南理工大学学报, 2013, 41(4): 142-146.
- Manindra Kaphle, Andy C C Tan, David P Thambiratnam, 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.
- Wang Weikui, Zeng Zhoumo, Li Yibo. Study on acoustic emission source location algorithm of large tank bottom [J]. Computer Engineering and Applications, 2013, 49(17): 230-234.
王伟魁, 曾周末, 李一博. 大型原油储罐罐底声发射源定位算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(17): 230-234.
- Shen Gongtian, Geng Rongsheng, Liu Shifeng. Location sources of continuous acoustic emission [J]. Nondestructive Testing, 2002, 24(4): 164-167.
沈功田, 耿荣生, 刘时风. 连续声发射信号的源定位技术[J]. 无损检测, 2002, 24(4): 164-167.
- Yu Jintao, Ding Mingli, Wang Qi. Planar location of acoustic emission source based on multi-output support vector regression [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(9): 2139-2145.
于金涛, 丁明理, 王 祁. 基于多输出支持向量回归的声发射源平面定位[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(9): 2139-2145.
- Gu Haibei, Liu Wugang, Sun Fei, et al.. Locating of acoustic emission source on composite plate based on neural network[J]. Missiles and Space Vehicles, 2012, (1): 49-52.
顾海贝, 刘武刚, 孙 飞, 等. 基于神经网络算法的复合材料板声发射源定位[J]. 导弹与航天运载技术, 2012, (1): 49-52.
- Chen Zheming, Chen Jun, Wu Xiaodong, et al.. Time-domain demodulation technique for active fiber Bragg grating sensor system[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(9): 1230-1234.
陈哲敏, 陈 军, 吴晓东, 等. 基于布拉格光纤光栅谐振频率的实时测量[J]. 中国激光, 2005, 32(9): 1230-1234.
- Tian Shizhu, Wen Ke, Wang Dapeng. Study on damage location of steel beam based on long-gage fiber grating sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(4): 040603.
田石柱, 温 鹏, 王大鹏. 基于长标距光纤光栅传感器的钢梁损伤定位研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(4): 040603.
- Tian Shizhu, Cao Changcheng, Wang Dapeng. Experimental study on fiber grating sensor monitoring the crack of concrete[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0114001.
田石柱, 曹长城, 王大鹏. 光纤光栅传感器监测混凝土简支梁裂缝的实验研究[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0114001.

- 10 Lu Shaowei, Zhang Haijun, Li Zhaohua, *et al.*. Damage monitoring of the double-notched carbon fiber reinforced polymers with surface bonded chirped fiber Bragg grating sensor [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(11): 1105004.
卢少微, 张海军, 李朝华, 等. 外贴啁啾光栅监测带双缺口复合材料静态拉伸损伤[J]. 中国激光, 2012, 39(11): 1105004.
- 11 Jiang Mingshun, Sui Qingmei, Jia Lei, *et al.*. FBG-based ultrasonic wave detection and acoustic emission linear location system[J]. Optoelectron Lett, 2012, 8(3): 0220-0223.
- 12 Sheng Xueli, Hui Junying, Liang Guolong. Study on passive detecting technology based on an acoustic time-reversal mirror [J]. Applied Acoustics, 2005, 24(6): 351-357.
生雪莉, 惠俊英, 梁国龙. 时间反转镜用于被动检测技术的研究[J]. 应用声学, 2005, 24(6): 351-357.
- 13 Qiu Lei, Yuan Shengfang, Liu Menglong. A time reversal focusing based impact imaging method and its evaluation on complex composite structures [J]. Smart Materials and Structures, 2011, 20(10): 105014.
- 14 Wang Qiang, Yuan Shengfang. Amplifying signal and imaging damage method for active Lamb wave structure health monitoring [J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2008, 29(4): 1601-1607.
王 强, 袁慎芳. 主动 Lamb 波结构健康监测中信号增强与损伤成像方法[J]. 航空学报, 2008, 29(4): 1601-1607.
- 15 Sun Yajie, Yuan Shengfang, Qiu Lei, *et al.*. Structural health monitoring based on lamb wave phased array and image enhancement [J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2009, 30(7): 1325-1330.
孙亚杰, 袁慎芳, 邱 雷, 等. 基于 Lamb 波相控阵和图像增强方法的损伤监测[J]. 航空学报, 2009, 30(7): 1325-1330.
- 16 Cheng Wei, Xu Guoqing, Mu Longhua. Study of Morlet complex wavelet based phasor estimation algorithm for traction line [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(2): 108-113.
程 伟, 徐国卿, 牟龙华. 基于 Morlet 复小波的牵引网故障相量估算法研究[J]. 电工技术学报, 2006, 21(2): 108-113.
- 17 Jiao Jingpin, He Cunfu, Wu Bin, *et al.*. A new acoustic emission source location technique based on wavelet transform and mode analysis [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(5): 482-485.
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.

栏目编辑:何卓铭