

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2006125

# 基于时间反转的玻璃钢复合板材声发射源定位方法<sup>\*</sup>

齐添添<sup>1</sup>, 陈尧<sup>1</sup>, 李昕<sup>2</sup>, 卢超<sup>1</sup>, 李秋锋<sup>1</sup>

(1. 南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室 南昌 330063;  
2. 南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室 南京 210016)

**摘要:**玻璃钢复合材料在许多工业领域得到了广泛应用,但是对于该复合材料的声发射动态监测还存在很多问题有待解决。针对玻璃钢复合材料的强各向异性特征,提出一种基于时间反转原理的虚拟加载聚焦增强技术,可应用于声发射源定位。首先按照时间反转原理,推导出虚拟加载过程中的信号聚焦增强技术的理论模型;然后在复合材料上布置传感器阵列,并在监测区域内不同位置进行声速测量,获得材料平均声速为 2 432.32 m/s;最后将实验采集的模拟声发射源信号按照理论模型进行处理,计算监测区域内每一个像素点的振动幅值,重建波动幅值图,并以最大幅值处确定为声源位置,同时将波动图经过阈值处理后,可从图中直接看出声发射源的位置。实验结果证明,该方法相对现有声发射仪器,定位精度在 4% 以内,能够满足工程应用要求。

**关键词:**玻璃钢复合材料; 声发射检测; 时间反转; 损伤成像; 波动图重建

**中图分类号:** TH87TB5      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 510.40

## An acoustic emission source location method based on time reversal for glass fiber reinforced plastics plate

Qi Tiantian<sup>1</sup>, Chen Yao<sup>1</sup>, Li Xin<sup>2</sup>, Lu Chao<sup>1</sup>, Li Qiufeng<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Non-destructive Testing Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 2. State Key Lab of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Glass fiber reinforced plastics (GFRP) has been widely used in many industrial fields. However, there are still many problems to be solved in acoustic emission (AE) dynamic monitoring of the composites. A focusing enhancement technique with virtual loading based on time reversal theory is proposed for the strong anisotropy of GFRP, which can be applied to locate the sound source. First, the theoretical model of signal focusing enhancement technique in the process of virtual loading is derived according to the principle of time reversal. Then, the sensor array are arranged on GFRP, and the sound velocity is measured at different positions in the monitoring area for obtaining the material average sound velocity 2 432.32 m/s. Finally, the simulated AE signals collected in experiment are processed by the proposed model. The vibration amplitude of each pixel in the monitoring area is calculated and fluctuation image is reconstructed. The position of the AE source is determined by the maximum amplitude. After threshold processing, the location of AE source can be seen intuitively from the figure. Compared with the existing AE instrument, experimental results show that this method has positioning accuracy within 4%, which can meet the requirements of engineering application.

**Keywords:** glass fiber reinforced plastics; acoustic emission testing; time reversal; damage imaging; fluctuation image reconstruction

收稿日期: 2020-02-26      Received Date: 2020-02-26

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家自然科学基金(11764030, 51705232)、江西省优势科技创新团队建设专项计划(20171BCB24008)、江西省自然科学基金项目(20192BAB216026)、江西省质监局科技计划项目(GZJKE201810)、江西省教育厅科技项目(GJJ170577)资助

## 0 引言

玻璃钢复合材料又称玻璃纤维增强复合塑料(glass fiber reinforced plastics, GFRP),由玻璃纤维材料和合成树脂材料经一定的工艺复合在一起制成,相比金属材料,该材料质地轻,机械强度高,具有较好的抗疲劳性、电绝缘性、耐腐蚀性及耐热性,且制造时间短、成本低、性价比高,适合大规模生产。玻璃钢复合材料近几十年得到了高度重视,在航空航天、石油化工、运输、船舶制造、建筑等工业领域被广泛应用<sup>[1-3]</sup>。随着 GFRP 应用越来越广泛,其在制备、服役过程中出现的质量问题受到了很大关注,特别是在使用过程中,GFRP 损伤的不断扩展甚至失效将造成严重的后果。而目前常用的超声、涡流和射线等检测手段只能进行静态检测,对于 GFRP 在役使用过程中出现的损伤无法进行监测<sup>[4-5]</sup>。

近年来声发射(acoustic emission, AE)检测技术应用越来越广泛。这种检测技术可通过实时接收材料损伤过程中发射的应力波,实现对材料在役使用过程中的动态监测<sup>[6-9]</sup>。国外的 GFRP 声发射检测研究已经开展数十年,1989 年 Hill 等<sup>[10]</sup>对拉伸状态下的 GFRP 在腐蚀环境中的声发射现象进行了研究,不仅可以发现腐蚀开裂的起始点,而且发现 AE 事件数随施加应力而产生变化,GFRP 残余强度与检测到的 AE 事件累计总数之间存在近似线性关系;Balan 等<sup>[11]</sup>采用声发射实时监测技术进行三点弯曲实验,研究 GFRP 板在不同环境温度下,受到反复冲击作用后的损伤性质和程度,实现材料残余强度的定量评价;Kumar 等<sup>[12]</sup>采用声发射监测技术,研究 GFRP 板在海水环境中不同时间的老化效应,可根据不同时间段声发射信号参数的变化,结合广义回归神经网络定量评价材料强度。国内在玻璃钢声发射检测研究方面仍处于起步阶段,且受到检测技术水平和仪器开发能力限制,与国外有一定差距<sup>[13]</sup>。研究主要集中在玻璃钢复合材料的声发射现象分析和声发射特征描述方面,取得了一些相关研究成果,王从科等<sup>[14]</sup>用声发射技术研究了玻璃钢的弯曲损伤过程,得出 AE 信号随玻璃纤维含量的增加呈减少的趋势;李伟等<sup>[15]</sup>通过纤维增强塑料拉伸断裂在线监测实验研究,系统分析了该材料在拉伸过程中的力学性能和声发射性能,得出声发射特性,并利用小波变换方法对纤维增强复合材料在拉伸损伤和断裂时发出的声发射信号进行了滤波分析;周伟等<sup>[16]</sup>以风电叶片玻璃纤维增强单向复合材料和多层复合材料为研究对象,探讨声发射波在复合材料中的传播、衰减特性和定位精度;闫河等<sup>[17]</sup>采用声发射检测技术,通过对 GFRP 进行衰减测试、实际应用检测以及对比玻璃钢材料和金属材料的衰减差异,探讨声发射检测技术在 GFRP 应用中

的有效性和适用性;陶然等<sup>[18]</sup>通过对 GFRP 拉伸加载,在加载过程中用声发射设备采集数据,利用声发射计数与载荷、时间的相互关系对 GFRP 进行评价,得到 GFRP 声发射的临界载荷以及强度等信息与声发射撞击计数之间的关系;李昕等<sup>[19]</sup>对预置纤维断裂和弱粘接缺陷的 GFRP 进行拉伸实验,并利用声发射技术实时监测其破坏过程,获得复合材料拉伸损伤的力学性能、破坏特性和声发射响应行为,探讨了不同损伤机制下的声发射特征。

但是,在作为声发射检测重要评价依据之一的声源定位方面,仍然没有更好的办法,主要是因为复合材料的非均匀性和强各向异性,导致各个方向声速不同,各传播路径的传递函数差异较大。刘增华等<sup>[20]</sup>通过布置传感器阵列的方式,提高了复合材料板中的声发射源区域定位精度;叶荣耀<sup>[21]</sup>等利用互易性时间反转定位法,采用单传感器实现了大范围内的声源聚焦能力,提高了区域定位准确性。但是这些属于区域定位范畴,该方法只能粗略确定声源区域,无法确定声源准确位置。一般要对声源准确定位,需采用时差定位方法,Eaton 等<sup>[22]</sup>使用 Delta T 成像技术对纤维增强复合材料进行了声发射源定位实验研究,证实该技术具有很好的性能和鲁棒性,与热弹性应力分析系统结果比较,定位精度更准确,且更利于发现材料的早期损伤;Niri<sup>[23]</sup>提出非线性卡尔曼滤波算法应用于估计声发射源位置,并采用稀疏压电换能器阵列在复合材料板上进行了实验验证,结果表明该算法能够估计声发射源位置的置信区间。

本次研究提出采用基于时间反转原理的虚拟加载聚焦增强技术,开展玻璃钢复合材料的时差定位方法研究。TR 是指声源发出声发射信号后被分布在不同位置的传感器接收到,然后按照时间历程将这些接收信号在相应传感器上反相激励,即先到后发、后到先发,必将在声源处聚焦<sup>[24-26]</sup>。由于这种方法利用了声互易性原理,即接收和反相激励途径相同,除了衰减外,可不需要考虑介质对信号的影响,中科院声学所汪承灏等<sup>[27-28]</sup>验证了时间反转理论在固体中的自适应聚焦作用,在水下通信、被动检测等领域取得了一定的应用成果。目前时反处理方法在频散严重的导波检测中也得到了广泛应用,南京航空航天大学袁慎芳教授团队在复合材料和板材 lamb 波检测中应用了时反处理,取得了显著效果<sup>[29-30]</sup>。李昕和 WEI 等<sup>[31-32]</sup>将时间反转理论应用到金属材料的声发射源定位中,取得了良好的效果,定位精度得到了极大提高。本文提出将时间反转方法应用于各向异性较强的 GFRP 板材检测中,根据时反理论减小传播路径差异与强各向异性带来的影响,且通过虚拟加载方式推导出一种传感信号的聚焦增强方法,从而提高信噪比,取得更准确的声源定位结果。

## 1 定位算法

### 1.1 时间反转理论

时间反转方法根据传感器接收到的信号利用声的互易性可以得出在介质中的聚焦状态,依据信号与系统的理论,可以在数学理论上推导其在频域上的聚焦状态。声源、传输介质和传感器组成一个完整的信号传输系统。假设频域上声源发出的信号为  $x(\omega)$ , 路径传递函数为  $h(\omega)$ , 则可用式(1)描述传感器接收到的信号  $d(\omega)$ 。

$$d(\omega) = x(\omega) \cdot h(\omega) \quad (1)$$

式中:  $\omega$  表示频率。根据时间反转和信号处理理论可知, 时域信号时反处理就是频域上取共轭, 即可用式(2)描述。

$$d^*(\omega) = x^*(\omega) \cdot h^*(\omega) \quad (2)$$

式中:  $x^*(\omega)$  为  $x(\omega)$  的共轭形式, 表示为声源信号的时反信号,  $h^*(\omega)$  为  $h(\omega)$  的共轭形式。将该时反信号  $x^*(\omega)$  反向加载到传感器上, 声波沿着原路径可以到达声源处, 按照声学的互易性原理, 声波在传感器与声源间传播时, 传播方向不会造成传递函数变化。根据信号处理理论, 在声源处接收到的信号  $E(\omega)$  则可以表示如下:

$$E(\omega) = d^*(\omega) \cdot h(\omega) = x^*(\omega) \cdot h^*(\omega) \cdot h(\omega) \quad (3)$$

式中: “ $h^*(\omega) \cdot h(\omega)$ ” 表示声波在介质中的传播函数与其共轭函数的积, 利用复变函数、信号处理理论可知, 一个函数与其共轭函数相乘后期结果必定是一个正的实偶函数, 而且其值成几何倍数增长。而该函数在时域上也表示为一个实偶函数, 而且会在时间零点处产生同相叠加, 出现一个主相关峰值。

而在实际定位检测中, 监测区域周围布置了多个传感器进行监测, 因此在每个传感器上进行反向加载后, 信号将会在声源处形成聚焦和叠加增强, 但噪声不会产生叠加增强, 从而信噪比获得提高。

### 1.2 虚拟加载聚焦增强算法

但是在实际的运用当中, 要进行物理上的反向加载是一件较为困难的事, 由于直接使用信噪比较低的实际采集信号进行直接时间反转成像, 使得定位精度较差<sup>[33-34]</sup>。因此, 结合声发射信号采集特点, 分析聚焦的实际过程, 本文提出一种用数字信号处理的方法来实现信号聚焦增强。

如图1所示, 如果声源发出信号仍用  $x(\omega)$  表示, 声源到达第  $i$  个传感器的路径传递函数用  $h_i(\omega)$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) 表示, 则第  $i$  个传感器接收到的信号  $d_i(\omega)$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) 可表示为:

$$d_i(\omega) = x(\omega) \cdot h_i(\omega) \quad (4)$$

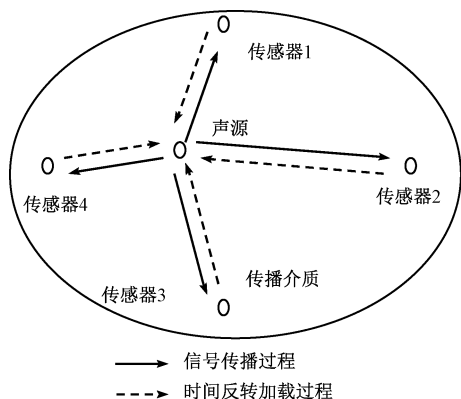


图1 声发射检测信号时间反转

Fig. 1 Diagram of the time reversal of acoustic signal

假如将各传感器接收信号反向加载后, 则在损伤处得到的信号  $X(\omega)$  可表示如下:

$$X(\omega) = \sum_i x^*(\omega) \cdot h_i^*(\omega) \cdot h_i(\omega) \quad (5)$$

很明显经过式(5)的计算, 将在损伤处形成聚焦和叠加增强, 得到的  $X(\omega)$  幅值比  $x(\omega)$  大得多。但声源位置未知, 无法获得该聚焦信号。因此, 仍继续深入考虑。如果将各传感器接收信号反向加载后, 这些信号都会在损伤声源处产生散射, 这样又会被各传感器再次接收到, 则各传感器再次接收到的信号  $D_j(\omega)$  ( $j = 1, 2, 3, 4$ ) 又可由式(6)表示。

$$D_j(\omega) = X(\omega) \cdot h_j(\omega) = \sum_i x^*(\omega) \cdot h_i^*(\omega) \cdot h_i(\omega) \cdot h_j(\omega) \quad (6)$$

式中:  $h_i(\omega)$  和  $h_j(\omega)$  分别表示第  $i$  和第  $j$  个传感器接收路径的传递函数。但是传递函数也是未知的, 并且随着路径的变化而发生改变, 因此, 对式(6)做进一步处理。在式(6)两端同时乘以 “ $x(\omega) \cdot x(\omega)$ ”, 左侧处理后传感器的信号用  $D'_j(\omega)$  表示, 则式(6)可整理得:

$$\begin{aligned} D'_j(\omega) &= D_j(\omega) \cdot x(\omega) \cdot x(\omega) = \sum_i x^*(\omega) \cdot h_i^*(\omega) \cdot h_i(\omega) \cdot h_j(\omega) \cdot x(\omega) \cdot x(\omega) \\ &= \sum_i (x^*(\omega) \cdot h_i^*(\omega)) \cdot (x(\omega) \cdot h_i(\omega)) \cdot (x(\omega) \cdot h_j(\omega)) = \sum_i d_i^*(\omega) \cdot d_i(\omega) \cdot d_j(\omega) \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)可理解为由声源信号 “ $x(\omega) \cdot x(\omega) \cdot x(\omega)$ ” 激励被第  $j$  个传感器接收到的信号。而从式(7)后推导结果看, 右侧物理意义非常明确, 其中  $d_i(\omega)$  和  $d_i^*(\omega)$  分别表示第  $i$  个传感器接收到的声源信号及其共轭信号, 而  $d_j(\omega)$  则为第  $j$  个传感器接收到的声源信号。由于声源信号  $x(\omega)$  与 “ $x(\omega) \cdot x(\omega) \cdot x(\omega)$ ” 具有相同的频率特性, 对后续处理不会产生影响。

### 1.3 成像方法

按照上述方法对各传感器接收信号进行处理, 可计算

出在每个传感器上形成的聚焦增强信号,因此,只需以波动幅值或能量作为参数,重建监测区域内各个像素点的波动图,在声源处将由于各个传感器信号的聚焦叠加而产生最大波动幅值,而其他地方无法形成有效叠加,波动幅值变小,所以在重建波动图中,最大幅值处即为声源处<sup>[35-36]</sup>。

如果由  $N$  个传感器组成声发射检测阵列,假设声源发出时刻为  $t_0$ ,距离声源最远的传感器接收到信号时间为  $t_a$ ,取时间窗口  $t_e > t_a$ ,将时间窗口  $(t_e - t_0)$  内的传感信号做时反处理,可得信号  $r_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 。如果将  $r_i$  同时反向加载到相应第  $i$  个传感器上激励,并定义聚焦时刻为  $t_s$ ,即声源处必然会在  $t_s$  时刻产生聚焦,且有如下关系:

$$t_s = t_e - t_0 \quad (8)$$

以每个质点的波动幅值作为像素值,重构聚焦时刻介质中各个质点处的波动图。质点振动能量成像如图2所示,如果以 1 mm 为一个像素点的尺寸,那么监测区域内任一像素点  $Q(x, y)$  在聚焦时刻波动幅值可表示为:

$$A_{xy} = \sum_{i=1}^N r_i(t_{ixy}) \quad (9)$$

式中:  $r_i$  表示第  $i$  个传感器接收到的时域信号;  $t_{ixy}$  是指声源到达第  $i$  个传感器的时间,可按下式计算:

$$t_{ixy} = t_s - R_{ixy}/v \quad (10)$$

式中:  $v$  表示声速;  $R_{ixy}$  为监测区域内任意点到第  $i$  个传感器的声程,可通过下式计算:

$$R_{ixy} = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (11)$$

式中:  $p$  表示像素点的尺寸;  $x_i$  和  $y_i$  表示第  $i$  个传感器在监测区域内的平面坐标值。

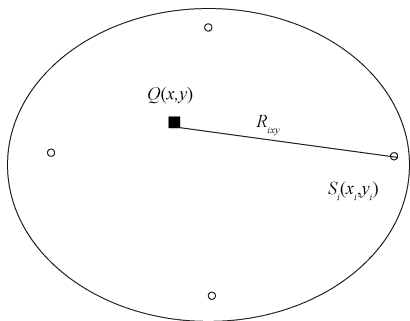


图2 声源成像算法

Fig. 2 Diagram of the time reversal imaging of the AE source

而本次实验并不需实际反转加载,而是通过信号处理方法完成时间反转并实现信号增强,因此只需将增强信号中  $(t_0 + R_{ixy}/v)$  时刻的信号幅值代替时反信号中  $t_{ixy}$  时刻的信号幅值即可完成。而声源发出时刻  $t_0$  未知,可利用四点圆弧定位方法计算得到,如图3所示。

假设4个传感器的位置分别为  $S_i(x_i, y_i) (i = 1, 2, 3, 4)$ , 声源处坐标为  $W(x_w, y_w)$ , 到达第  $i$  个传感器的时间为  $t_i (i = 1, 2, 3, 4)$ , 声速为  $v$ 。分别以4个传感器位置为圆

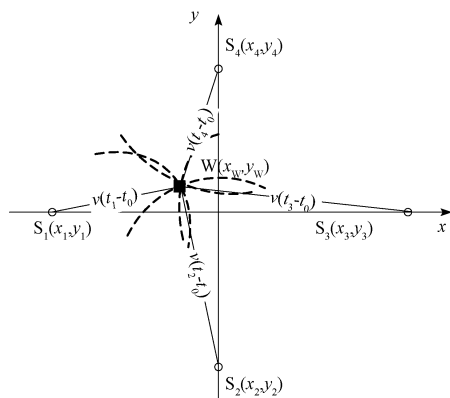


图3 四点圆弧定位方法

Fig. 3 Diagram of the four-point arc localization method

心,以  $v \cdot (t_i - t_0) (i = 1, 2, 3, 4)$  为半径画圆,波动幅值为各传感器相应位置的幅值叠加,则形成的4个圆弧交点即为声源的位置,可表示为:

$$(x_w - x_i)^2 + (y_w - y_i)^2 = v^2(t_i - t_0)^2 \quad (12)$$

求解该方程,即可得出声发射源的发出时间  $t_0$ 。

## 2 实验测试与分析

### 2.1 试样制备

本次实验采用的玻璃钢试样基体为 430 树脂,编织玻璃纤维布为增强纤维,采用  $[0^\circ/90^\circ]$  铺层,试样形状为边长为 600 mm 的正方形,厚度为 6.7 mm,如图4所示。该试样的设计与制作方案是参考《纤维增强塑料试验方法总则》(GB/T 1446-2005)完成的。



图4 玻璃钢试样制备照片

Fig. 4 The photo of preparing GPRF specimen

### 2.2 测试系统

本次声发射检测实验设备为美国物理声学公司生产的 PCI-2 型声发射监测系统,如图5所示。

该系统总共有 8 通道,由 4 块采集卡所组成。该设备所使用的软件为 AEWIN,能实现对模拟信号的采集、放大、滤波、特征参数提取以及波形显示等功能。本次实验采用 R80D 声发射传感器,其中心频率为



图5 声发射检测系统  
Fig. 5 AE testing system

800 kHz,有效接收频率带宽达到0.1~1 MHz。

2.3 平均声速测定

首先将一个传感器固定在试样中间位置,采用铅笔断芯的方式在试块上从距离试块100 mm开始,以100 mm为步长测量不同距离处声波的衰减,通过衰减实验确定两探头间的最佳间距为300 mm。

在试样上安装好传感器阵列,各传感器距离原点均为150 mm,即各轴上的两个传感器都相距300 mm。在传感器阵列包围的区域内设定一个坐标系,以中心为原点,4个传感器坐标分别为 $S_a(-150,0)$ 、 $S_b(0,150)$ 、 $S_c(150,0)$ 、 $S_d(0,-150)$ ,具体如图6所示。

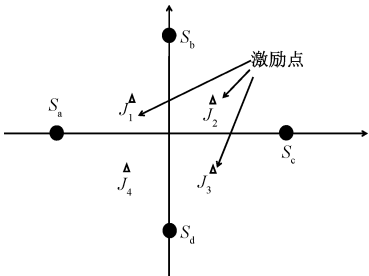


图6 传感器分布及模拟激励点位置  
Fig. 6 Diagram of sensors distribution and simulated excitation location

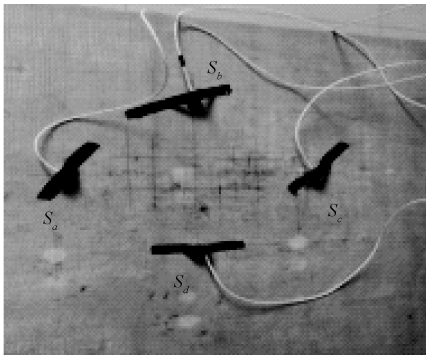
由于复合材料存在各向异性,导致材料各处声速差异较大,而声速是影响定位精度的一个主要参数,所以本次实验中在图6中每个象限内选一个模拟激励点,根据各传感器接收信号的时间差,分别计算各个象限的声速,并计算出试样的平均声速,具体过程如下。

在图6所示坐标系的各个象限内,设定4个激励点编号坐标分别为 $J_1(-50,50)$ 、 $J_2(50,50)$ 、 $J_3(50,-50)$ 、 $J_4(-50,-50)$ 。如在点 $J_1$ 处激励,信号到传感器a和d与到传感器c、b距离差计算约为94.4 mm;同理,计算其他3个激励点的距离差也均约为94.4 mm。从各激励点到4个传感器的传播方向来看,覆盖了大部分的传播角度,具有一定的代表性。然后分别在4个激励点采用断

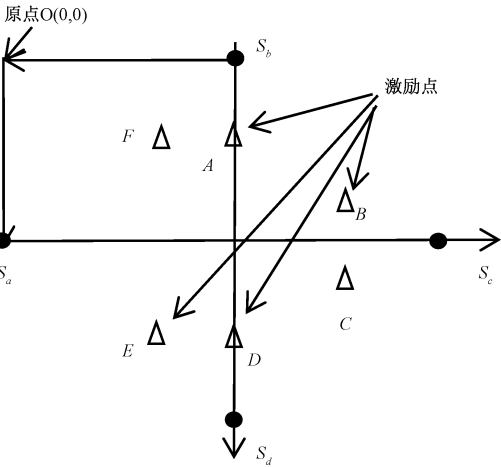
铅的方式发出模拟声发射信号,每次激励点发出信号都由4个声发射传感器采集到,并将信号按照式(7)进行时间反转处理,分别计算得到各个传感器反向加载后由声源处散射回来的信号,取得各信号包络线的最大值处的时间,然后分别计算出 $J_1$ 到传感器a和d、a和c、b和d、b和c的时间差为45.7、38.64、42.42、35.36  $\mu\text{s}$ ,平均时间差为40.53  $\mu\text{s}$ ,根据距离差94.4 mm可计算出点 $J_1$ 所在象限的平均声速约为2 329.14 m/s。同理,分别求出 $J_2$ 、 $J_3$ 、 $J_4$ 所在象限的平均声速约为2 530.68 m/s、2 447.3 m/s、2 422.15 m/s。因此,整个试样的平均声速约为2 432.32 m/s。

2.4 实验测试与信号处理

实验仍然采用断铅方式模拟声发射源发出声发射信号,为了验证不同声速区内的声源定位效果,在检测区域选择了6个激励点进行实验测试,具体如图7所示。为了方便冲击检测区域波动图,将坐标原点定在检测区域左上角位置,纵坐标方向朝下,因此4个传感器坐标分别为 $S_a(0,150)$ 、 $S_b(150,0)$ 、 $S_c(300,150)$ 、 $S_d(150,300)$ ,6个测试激励点坐标如表1所示。



(a) 试样上激励点分布  
(a) Distribution of excitations on the specimen



(b) 激励点分布  
(b) Diagram of excitations distribution

图7 实验测试模拟激励点分布

Fig. 7 Distribution of simulated excitations in the experiment

表 1 实验测试 6 个模拟激励点坐标

Table 1 The coordinates of six excitations in the experiment

| 激励点 | 激励点坐标/mm  |
|-----|-----------|
| A   | (150,80)  |
| B   | (220,120) |
| C   | (220,180) |
| D   | (150,220) |
| E   | (120,220) |
| F   | (120,80)  |

实验测试及信号处理成像过程具体以 A 点为例进行说明。在 A 点激励模拟声发射信号后,4 个传感器分别采集收到声发射源信号,将信号全部归一化处理波形如图 8 所示。将各传感器接收信号按照式(7)分别进行时间反转增强处理,即首先对各传感器接收信号进行时反处理,得到相应时反信号;然后依次将各传感原信号与其时反信号进行卷积并求和,得到损伤处聚焦信号;最后将该聚焦信号分别与各传感器接收信号进行卷积,分别得到各传感器接收到时反增强信号,为了避免采样点不同造成的时间传递和相位误差,取每个增强信号的包络线,如图 9 所示。

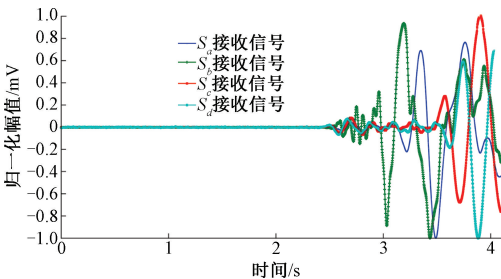
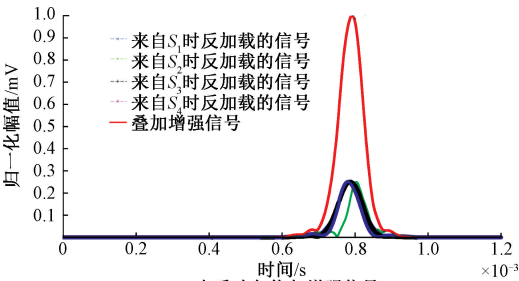
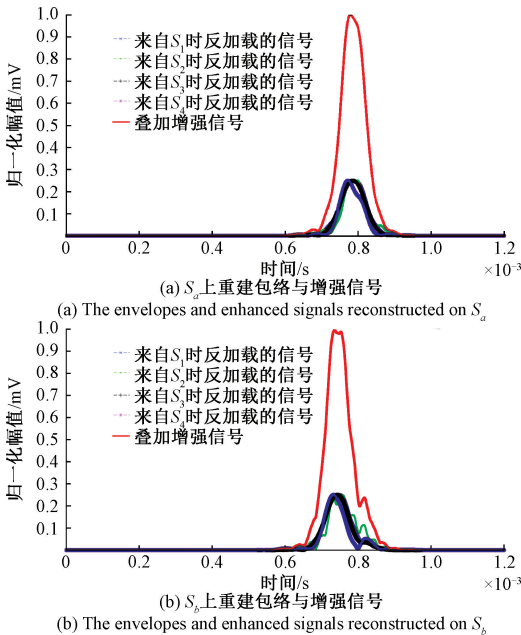
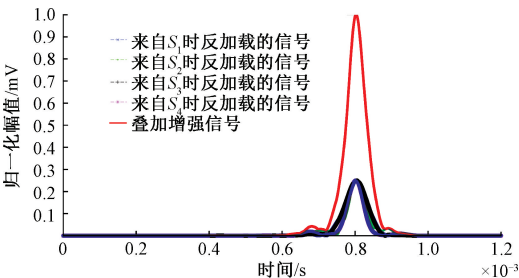


图 8 各传感器接收信号归一化波形(A 点)

Fig. 8 Signal waveforms received from all sensors at point A



(c) The envelopes and enhanced signals reconstructed on  $S_3$



(d) The envelopes and enhanced signals reconstructed on  $S_4$

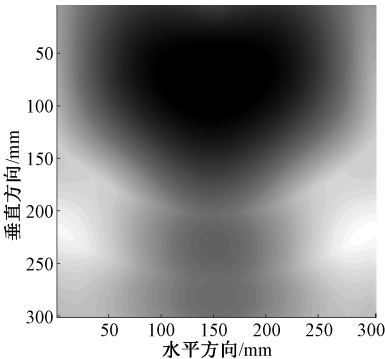
图 9 各传感器包络线和增强信号重建(A 点)

Fig. 9 The envelopes and enhanced signals reconstructed on all sensors at point A

2.5 定位结果与分析

图 9 中包络线峰值对应的时间,即为各传感器经过时间反转加载后,在声发射源处散射被重新接收的时刻  $t_i$ 。

采用平均声速 2 432.32 m/s、各传感器坐标值及  $t_i$  代入式(12)计算出不同声速条件下,损伤处再次发出信号时间  $t_0$ 。再根据前文所述的成像方法,计算监测区域内各像素点的振动幅值,重建波动图,其中监测区域像素尺寸取 1 mm×1 mm。经计算,监测区域波动图如图 10 所示。



(a) 重建波动幅值成像结果

(a) Reconstructed fluctuation amplitude imaging result

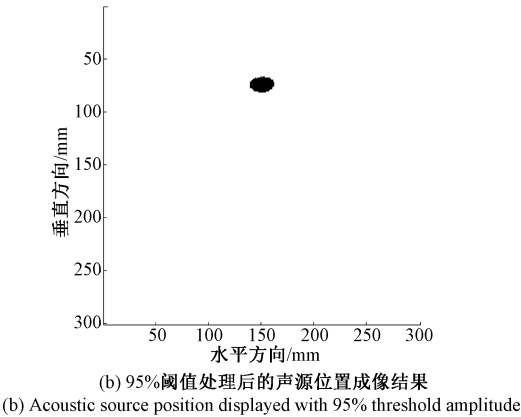


图 10 监测区域最终定位成像图(A点)

Fig. 10 For excitation at point A, the final positioning image of the monitoring area

其中图 10(b)所示为经过 95% 的阈值处理后的成像定位结果,最大幅值处的坐标为(147,76),即为最终对声发射源的定位结果,以传感器间的最大间距 300 mm 来计算,误差约为 1.7%。按照同样的步骤,依次完成其他 5 个激励点的信号采集、数据处理、重建波动图及声源定位,详细定位结果和误差如表 2 所示,所有激励点定位结果相对误差都在 4% 以内,能够满足工程应用中声发射定位误差要求。

表 2 6 个模拟激励点时反处理定位结果

Table 2 The positioning results of the six simulated excitations after TR processing

| 激励点 | 激励点坐标<br>/mm | 定位坐标<br>/mm | 相对误差<br>/% |
|-----|--------------|-------------|------------|
| A   | (150,80)     | (147,76)    | 1.7        |
| B   | (220,120)    | (215,128)   | 3.1        |
| C   | (220,180)    | (216,179)   | 1.4        |
| D   | (150,220)    | (153,215)   | 1.9        |
| E   | (120,220)    | (123,213)   | 2.5        |
| F   | (120,80)     | (112,77)    | 2.8        |

与上述定位结果对比,现在的声发射仪器定位结果偏差相对较大,同样采用平均声速 2 432.32 m/s 进行定位计算,定位结果如表 3 所示,其中最大相对误差达到 9%。

仪器定位误差主要有两个主要来源:1)仪器通常是按照第 1 次超过门槛值的时刻确定为声发射信号到达时刻,而这种确定方法是不准确的,如果叠加环境干扰,将产生一定误差;2)仪器也是采用时差定位方法,计算时是按照统一的平均声速完成,而由于 GFRP 的强各向异性,直接计算的定位结果中存在着由于不同传播路径的声速

表 3 模拟激励点仪器定位结果

Table 3 The positioning results of the six simulated excitations from the AE instrument

| 激励点 | 激励点坐标<br>/mm | 定位坐标<br>/mm | 相对误差<br>/(%) |
|-----|--------------|-------------|--------------|
| A   | (150,80)     | (156,69)    | 4.3          |
| B   | (220,120)    | (242,117)   | 7.3          |
| C   | (220,180)    | (246,170)   | 9            |
| D   | (150,220)    | (158,228)   | 3.6          |
| E   | (120,220)    | (106,231)   | 6            |
| F   | (120,80)     | (101,65)    | 8            |

差异带来的较大误差。而本次提出的基于时间反转理论的虚拟加载聚焦增强方法中,通过全部传感器接收信号融合聚焦和叠加增强处理,不仅有效避免了由于门槛设置不当引起的误差,而且通过虚拟时反加载过程处理,将不同传播路径的传感信号进行融合处理,一方面降低了传播路径对定位结果的影响,另一方面,通过来自不同路径信号的叠加,在提高信噪比的同时,使得每个传感器上重建信号中的声速更趋于各条传播路径的平均声速,与测量得到的平均声速相近,从而获得了更准确的定位结果。

3 结 论

本文针对玻璃钢复合材料声发射动态检测需要,提出一种基于时间反转原理的虚拟加载聚焦增强方法,只需通过信号处理方式即可完成声发射信号的时间反转和叠加增强处理,可有效提高信号幅值和信噪比。在进行玻璃钢复合材料定位成像实验时,在定位成像处理阶段,根据不同声速区域的平均声速测量,计算出试样平均声速。通过实验验证,采用虚拟加载聚焦增强方法能够降低复合材料强各向异性对定位结果的影响,与声发射仪器定位结果比较,定位精度更高。该处理方法可为其他强各向异性材料的声发射源准确定位提供了有效参考。

参考文献

[1] WANG C G, GE S Q, SUN M Y, et al. Comparative study of vortex-induced vibration of FRP composite risers with large length to diameter ratio under different environmental situations [J]. Applied Science, 2019, 9:517.

[2] BEDON C, LOUTER C. Numerical investigation on structural glass beams with GFRP-embedded rods including effects of pre-stress [J]. Composite Structures. 2018, 184:650-661.

- [3] 陆铭慧, 刘磨, 张雪松, 等. RTM 玻璃纤维/E51 环氧树脂复合材料孔隙含量对超声特征参数的影响[J]. 复合材料学报, 2018, 35(2): 291-297.  
LU M H, LIU M, ZHANG X S, et al. Effect of void content on ultrasonic characteristic parameters of RTM glass fiber/epoxy composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(2): 291-297.
- [4] KIM K B, HSU D K, BARNARD D J. Estimation of porosity content of composite materials by applying discrete wavelet transform to ultrasonic back scattered signal[J]. NDT & E International, 2013, 56(11): 10-16.
- [5] 黄展鸿, 黄春芳, 张鉴炜, 等. 声发射技术在纤维增强复合材料损伤检测和破坏过程分析中的应用研究进展[J]. 材料导报, 2018, 32(7): 1122-1128.  
HUANG ZH H, HUANG CH F, ZHAN J W, et al. Acoustic emission technique for damage detection and failure process determination of fiber-reinforced polymer composites: An application review [J]. Materials Review, 2018, 32(7): 1122-1128.
- [6] TSAI S T, WANG L M, HUANG P P, et al. Acoustic emission from breaking a bamboo chopstick[J]. Physical Review Letters 2016, 116:035501.
- [7] 龙小江, 李秋锋, 何才厚, 等. 不同拉伸速率下钢材损伤的声发射监测评价[J]. 振动与冲击, 2017, 36(7): 219-225.  
LONG X J, LI Q F, HE C H, et al. Acoustic emission monitoring and evaluation of steel damage under the condition of different tensile velocity [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(7): 219-225.
- [8] 张勇, 周昀芸, 王博, 等. 基于声发射信号的铝合金点焊裂纹神经网络监测[J]. 机械工程学报, 2016, 52(16): 1-7.  
ZHANG Y, ZHOU Y Y, WANG B, et al. Neural network monitoring of aluminum alloy spot welding crack based on acoustic emission signal [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(16): 1-7.
- [9] 罗奕, 郭瑜, 伍星, 等. 基于声发射信号的行星轮轴承内圈故障包络分析方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(5): 164-170.  
LUO Y, GUO Y, WU X, et al. Envelope analysis scheme for inner race fault planetary bearing based on acoustic emission signal [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(5): 164-170.
- [10] HILL R, COWKING A, CARSWELL W SAN. Acoustic emission study of stress-corrosion in a chopped strand mat GFRP composite [J]. Composites, 1989, 20(3): 215-232.
- [11] BALAN R, ARUMUGAM V, RAUF K, et al. Estimation of residual flexural strength of unidirectional glass fiber reinforced plastic composite laminates under repeated impact load[J]. Journal of Composite Materials, 2015, 49(6): 713-722.
- [12] SURESH K C, ARUMUGAM V, SENGOTTUVELUSAMY R, et al. Failure strength prediction of glass/epoxy composite laminates from acoustic emission parameters using artificial neural network[J]. Applied Acoustics, 2017, 115: 32-41.
- [13] 卢超, 丁鹏, 陈振华, 等. 不同拉伸速度下的碳布/环氧树脂复合材料声发射评价[J]. 失效分析与预防, 2012, 7(1): 15-18.  
LU CH, DING P, CHEN ZH H, et al. Damage behavior of carbon-cloth /epoxy resin composite in tensile test based on acoustic emission [J]. Failure Analysis and Prevention, 2012, 7(1): 15-18.
- [14] 王从科. 环氧/玻纤复合材料弯曲损伤过程的声发射研究[J]. 工程塑料应用, 1996, 24(6): 46-48.  
WANG C K. AE study on warp damage process of glass fiber reinforced epoxy composite [J]. Engineering Plastics Application, 1996, 24(6): 46-48.
- [15] 李伟, 王宇, 吴超群, 等. 基于声发射检测技术的FRP 复合材料损伤试验研究[J]. 化工机械, 2011, 38(2): 692-696.  
LI W, WANG Y, WU CH Q, et al. Experimental study on FRP composite material damage based on acoustic emission testing technology[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2011, 38(2): 692-696.
- [16] 周伟, 田晓, 张亭, 等. 风电叶片玻璃钢复合材料声发射衰减与源定位[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2012, 32(1): 100-104.  
ZHOU W, TIAN X, ZHANG T, et al. Acoustic emission attenuation and source location of glass fiber composites for wind turbine blades[J]. Journal of Hebei University (Natural Science Edition), 2012, 32(1): 100-104.
- [17] 闫河, 王十, 邢述. 声发射检测技术在玻璃钢管道检测中的应用[J]. 无损检测, 2015, 37(7): 67-70.  
YAN H, WANG SH, XING SH. FRP pipe inspection using acoustic emission technique [J]. NDT, 2015, 37(7): 67-70.
- [18] 陶然, 夏美玲, 丁鹏, 等. 玻纤增强树脂基复合材料声发射研究[J]. 航空制造技术, 2015(8): 89-91.  
TAO R, XIA M L, DING P, et al. Acoustic emission research on glass fiber reinforced composites [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(8): 89-91.
- [19] 李昕, 康正亮, 胥凯晖, 等. GFRP 不同损伤情况下声

- 发射检测信号特征研究[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版), 2016, 30(4): 75-79.
- LI X, KANG ZH L, XU K H, et al. Characteristics research for acoustic emission testing signal of different damage of GFRP [J]. Journal of Nanchang Hangkong University(Natural Sciences), 2016, 30(4): 75-79.
- [20] 刘增华, 董拓灿, 彭秋玲, 等. 碳纤维复合材料板的声发射源定位[J]. 无损检测, 2016, 38(10): 48-52.
- LIU Z H, DONG T C, PENG Q L, et al. Acoustic emission source localization of carbon fiber composite plate[J]. NDT, 2016, 38(10): 48-52.
- [21] 叶荣耀, 王强, 范昕炜, 等. 基于时间反转法的单传感器复合材料声发射源定位研究[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(12): 22-26.
- YE R Y, WANG Q, FAN X W, et al. Acoustic emission source location of composite materials using one channel sensor based on time reversal method [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36 ( 12 ): 22-26.
- [22] EATON M J, PULLIN R, HOLFORD K M. Acoustic emission source location in composite materials using Delta T mapping [J]. Compos. Part A-Appl. S. 2012, 43(6): 856-863.
- [23] NIRI E D, FARHIDZADEH A, SALAMONE S. Nonlinear Kalman filtering for acoustic emission source localization in anisotropic panels [J]. Ultrasonics, 2013, 54(2): 486-501.
- [24] MATHIAS F. Time-reversal of ultrasonic field-part I: basic principles [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1992, 39(5): 555-566.
- [25] WU F, THOMAS J L, MATHIAS F. Time reversal of ultrasonic fields-part II: experimental results[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Freq., Contr., 1992, 39(5): 567-578.
- [26] 李秋锋, 陈建娟, 何才厚, 等. 基于时间反转聚焦的声发射源定位算法[J]. 传感技术学报, 2015, 28(11): 1659-1663.
- LI Q F, CHEN J J, HE C H, et al. Location algorithm for source of acoustic emission based on time reversal[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2015, 28(11): 1659-1663.
- [27] 汪承灏, 魏炜. 改进的时间反转法用于有界面时超声目标探测的鉴别[J]. 声学学报, 2002, 27(3): 193-197.
- WANG CH H, WEI W. Distinguishing between target and interface in ultrasonic detection by a modified time reversal method [J]. Acta Acustica, 2002, 27(3): 193-197.
- [28] 陆铭慧, 张碧星, 汪承灏. 时间反转法在水下通信中的应用[J]. 声学学报, 2005, 30(4): 349-354.
- LU M H, ZHANG B X, WANG CH H. Application of time reversal in underwater communication [J]. Acta Acustica, 2005, 30(4): 349-354.
- [29] 王强, 袁慎芳. 无参考主动 Lamb 波结构损伤时反成像监测方法[J]. 航空学报, 2010, 31(1): 178-183.
- WANG Q, YUAN SH F. No baseline time reversal imaging method for active lamb wave structural damage monitoring [J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2010, 31(1): 178-183.
- [30] 蔡建, 石立华, 袁慎芳. 基于虚拟时间反转的高分辨率复合材料板结构损伤成像[J]. 复合材料学报, 2012, 29(1): 183-189.
- CAI J, SHI L H, YUAN SH F. High-resolution damage imaging for composite plate structures based on virtual time reversal [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2012, 29(1): 183-189.
- [31] 李昕, 罗更生, 龙盛蓉, 等. 钢板声发射时间反转聚焦增强定位方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 1792-1799.
- LI X, LUO G SH, LONG SH R, et al. Location method of acoustic emission by time reversal focusing and enhancing for steel plate [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1792-1799.
- [32] WEI X, CHEN Y, LU C, et al. Acoustic emission source localization method for high-speed train bogie[J/OL]. Multimed ToolsAppl, 2020, 79: 1-17. <https://doi.org/10.1007/s11042-019-08580-3>.
- [33] 符浩, 吴斌, 何存富. 基于虚拟时间反转聚焦的管道超声导波检测新方法[J]. 机械工程学报, 2013, 49(12): 17-23.
- FU H, WU B, HE C F. Ultrasonic guided wave pipe inspection based on synthetic time-reverse method[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(12): 17-23.
- [34] 马方慧, 陈尧, 戴雪梅, 等. 基于时间反转理论的航空管板铸件声源定位算法研究[J]. 仪器技术与传感器, 2019, (12): 98-102.
- MA F H, CHEN Y, DAI X M, et al. Research on acoustic emission sources location algorithm of aviation board-tube casting based on time reversal theory [J]. Instrument Technique and Sensor, 2019, (12): 98-102.
- [35] 王强, 袁慎芳, 邱雷, 等. 基于时间反转理论的结构损伤图像表征方法[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(9): 1816-1821.

WANG Q, YUAN SH F, QIU L, et al. Image representation based on time reversal theory for structure health monitoring [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(9):1816-1821.

[36] DIRK A, ALEX C, STEVE W, et al. Acoustic emission source location on large plate-like structures using a local triangular sensor array [ J ]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012(30):91-102.

作者简介



**齐添添**,2017 年于南昌航空大学科技学院获得学士学位,现为南昌航空大学硕士研究生,主要研究方向为声学检测技术。  
E-mail: 494144240@ qq. com

**Qi Tiantian** received her B. Sc. degree from Science and Technology College of Nanchang Hangkong University in 2017. She is currently a Master student at Nanchang Hangkong University. Her main research interest is acoustic testing technology.



**陈尧**,分别于 2008 年和 2011 年于辽宁工业大学获得学士和硕士学位,2016 年于大连理工大学获博士学位,现为南昌航空大学讲师,主要研究方向为弹性各向异性及非均质材料的超声成像检测及信号处理。  
E-mail: chen Yao1984@ foxmail. com

**Chen Yao** received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Liaoning University of Technology in 2008 and 2011, and

received his Ph. D. degree from Dalian University of Technology in 2016. He is currently a lecturer at Nanchang Hangkong University. His main research interests include ultrasonic imaging test and signal processing for the elastic anisotropic and heterogeneous materials.



**李昕**,2018 年于南昌航空大学获得硕士学位,现为南京航空航天大学博士研究生,主要研究方向为声学检测技术。  
E-mail: 478967251@ qq. com

**Li Xin** received his M. Sc. degree from Nanchang Hangkong University in 2018. He is currently a Ph. D. candidate at Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His main research interest is acoustic testing technology.



**李秋锋**(通信作者),2008 年于南京航空航天大学获得博士学位,现在为南昌航空大学教授、硕士生导师,主要研究方向为声学检测技术及检测信号处理等方面的研究。  
E-mail: qiufenglee@ nchu. edu. cn

**Li Qiufeng** (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2008. He is currently a professor and a master advisor at Nanchang Hangkong University. His main research interests include acoustic testing technology, test signal processing, etc.