

基于概率成像的二维波束聚焦冲击定位方法研究

常 琦, 孟 瑶, 赵 恒

(西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西西安 710048)

摘 要: 冲击损伤监测是结构健康监测的主要研究内容之一. 本文提出了一种基于十字型传感器布置方法的二维波束聚焦概率成像定位算法, 采用十字阵列型的传感器布置方法减小了系统盲区, 通过二维波束聚焦概率成像方法提高了冲击定位的精度. 在二维波束聚焦算法中, 波速的准确性是影响结构冲击损伤定位的主要因素, 本文通过统计分析得到波速的概率分布函数, 带入二维波束聚焦概率成像定位算法中对冲击损伤进行监测, 分别得到横向阵列与纵向阵列的概率分布图, 对两者进行融合成像可以得到更为精确、科学且直观的冲击损伤定位结果. 通过实验研究验证了该方法的有效性与实用性.

关键词: 冲击损伤; 结构健康监测; 概率成像; 十字阵列; 二维波束聚焦算法; 数据融合

中图分类号: V214.3+3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2021) 07-1339-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20200208

Research on Two-Dimensional Beam Focusing Impact Location Based on Probability Tomography

CHANG Qi, MENG Yao, ZHAO Heng

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: Impact is one of the main damage types involved in structural health monitoring research. To improve the impact localization accuracy, a two-dimensional beam-focusing probabilistic imaging localization algorithm based on the cross-shape sensor arrangement is proposed. The blind zone of impact detection can be reduced through the cross-shape sensor arrangement. And the accuracy of impact localization can also be improved by two-dimensional beam-focusing probabilistic imaging method. In the two-dimensional beam focusing algorithm, the accuracy of the impact wave speed testing has high influence on the effect of the impact localization. The probability distribution of the wave velocity is obtained through statistical analysis. The distribution is brought into the two-dimensional beam focusing probabilistic imaging localization algorithm to localize the impact. The probability distribution image of the horizontal sensor array and the vertical sensor array are obtained separately and further fused into one more accurate, scientific and intuitive probability distribution image. The validity and practicability of the method are verified through experimental research.

Key words: impact damage; structural health monitor; probability tomography; cross array; two-dimensional beam focusing algorithm; data fusion

1 引言

冲击损伤是影响飞行器安全运行的主要结构损伤形式之一, 可以分为低速冲击与高速冲击, 两者之间一般没有准确的定义界限. 通常按照冲击所造成的损伤的不同来区分两者, 高速冲击的特点是穿透引起的结构断裂, 其造成的损伤易被检测并采用相应的手段进行维修, 属于可视冲击损伤 (Visible Impact Damage, VID); 而低速冲击造成的损伤肉眼难以发现的, 属于不可

可视冲击损伤 (Barely Visible Impact Damage, BVID)^[1], 大多由起飞时碎石的迸溅以及维修工具的掉落^[2]等引起. 其极易在结构内部产生基体损伤, 这种基体损伤在结构运行的过程中极易产生应力集中从而导致结构失效^[3]. 因此对冲击损伤的监测十分必要, 及时发现冲击发生的位置可以对此区域进行重点检测, 以保证飞行器的安全性^[4].

目前, 关于大型结构的低速冲击定位技术的研究开

展的比较广泛. 犹他大学的 Paul Tikalsky^[5]等人提出了一种一维波束聚焦定位算法, 将一维阵列传感器对向布置在结构的边缘, 对 6.04m² 的大型结构进行冲击定位实验, 取得了较好的定位结果. Pratik Shrestha 等人^[6]采用六个光纤光栅传感器组成线性阵列, 基于误差异常估计冲击定位算法, 对 30cm×30cm 的飞机机翼结构进行了低速冲击定位实验, 最终定位结果的平均误差在 2.9cm. Prasanna Rajbhandari 等人^[7]提出了一种适用于各向同性板材的双曲线冲击检测与定位方法, 解决了由于温度变化或其他原因引起的波速变化的问题, 可以在结构波速未知的情况下对结构进行准确定位. Shizeng Lu 等人^[8]研究了基于光纤布拉格光栅传感器的低速冲击定位算法. 利用小波变换对信号进行去噪处理并计算各导波的到达时间差, 构建了 FBG 冲击定位系统并通过实验验证其有效性. 以上方法对整个系统定位精度较高, 且整体的定位性能较为一致, 但其大部分采用分散化布置传感器, 布线较为繁杂^[9], 不利于后续的信号采集. 同时以上文章均使用确定性参数(坐标的位置)对冲击定位结果进行描述^[10], 这种确定性描述无法准确反映定位位置与真实冲击位置的趋近程度, 通过概率图对冲击源进行描述可以利用一个较小的区域来描述真实冲击源可能出现的位置^[11], 从概率的角度描述损伤定位位置与真实冲击源的趋近程度. 因此本文基于一维波束聚焦定位算法加以改进提出一种基于概率成像的二维波束聚焦冲击定位方法.

基于概率的诊断成像技术^[12]作为一种结构健康检测的损伤识别技术^[13], 利用比较直观的图像^[14]对结构的当前损伤进行可视化描述^[15], 概率图中的像素点对应被测结构空间点, 像素点的值表示对应结构空间点出现损伤的概率. 以概率的大小来表示损伤识别的结果是对传统定位技术的一种改进^[11]. 本文提出了一种基于十字型传感器布置方法的二维波束聚焦概率成像定位算法, 该算法利用大量数据对波速进行拟合得到波速的概率密度函数, 采用十字阵列型的传感器布置方法, 基于二维波束聚焦定位算法对冲击损伤进行监测. 在横向阵列与纵向阵列各生成一个关于冲击源的概率分布图, 将横纵阵列得到的概率分布图进行叠加融合, 得到了更为精确且科学的冲击损伤结果^[16]. 通过实验验证了本文所提方法与传统的定位监测方法相比具有较高的定位精度与较好的科学性.

2 基于概率成像的二维波束聚焦定位方法

2.1 声发射监测基本原理

冲击信号是一种典型的声发射信号, 因此可以基于声发射技术对冲击损伤进行监测. 当被测结构部件受到应力时会在结构内部产生微小形变, 微小形变不

断地在结构中累积并形成缺陷, 此时会在材料中产生应力波, 从而产生声发射. 声发射技术的基本原理是通过在结构表面布置高灵敏度的压电传感器实时采集结构的声发射信号, 通过对声发射信号的分析实现对损伤的监测^[17].

2.2 波束聚焦理论

2.2.1 一维波束聚焦理论

在各向同性的板材中, 假设冲击信号波从冲击源开始沿各个方向以一定速度行进. 如图 1 所示, 冲击源到各个传感器的距离为 R_i , 冲击信号以冲击源为圆心以同心圆向外传播, 同心圆分别与各个传感器相交, 半径为 R_i .

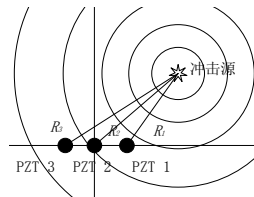


图1 一维线性传感器阵列示意图

假设冲击源坐标位置为 (X, Y) , 传感器坐标为 (a_i, b_i) , 则依据图 2 可以得出各个传感器与其对应圆半径 R_i 之间关系如下所示:

$$R_i^2 = (X - a_i)^2 + (Y - b_i)^2, i = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

阵列中两个传感器与冲击源之间的半径差 δ_{ij} 为:

$$|R_i - R_j| = \delta_{ij}, i \neq j \quad (2)$$

假设波速恒定为 v , ΔT_{ij} 为两传感器接收到冲击信号的延迟, 有:

$$\delta_{ij} = v \cdot \Delta T_{ij} \quad (3)$$

由于上述方程未知数个数大于方程个数即方程为不定方程, 所以要在二维平面上用线性传感器阵列准确定位冲击源最少需要三个传感器, 联立式(1)~(3)得到其解为如图 2 所示的一组双曲线. 单一一组不定方程的解为其对应双曲线上任意一点, 因此要准确定位冲击源至少需要两组双曲线, 两组双曲线交点为实际计算所得冲击源所在位置.

但一维线性传感器仍存在如下弊端:(1)虚假定位, 通过计算得出在传感器所在坐标轴两边各有一个冲击源, 即同时在 y 轴对称区域分布两个定位源(如图 2

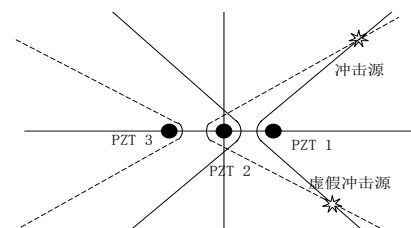


图2 一维波束聚焦传感器定位冲击图

所示);(2)存在定位盲区,经过大量实验验证,波束聚焦算法由于其自身特性在靠近自身阵列所在轴即0°与180°附近不能够准确定位^[17](如图3所示),即存在定位盲区.这是由于该方法采用两条双曲线的交点作为冲击定位结果导致的,当冲击源坐标靠近x轴时,其两圆的半径差 δ_{ij} 发生微小波动时,其双曲线的两臂会发生大幅度的偏移,从而导致定位结果不准确.

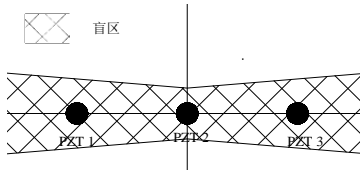


图3 一维波束聚焦传感器定位冲击图

2.2.2 二维波束聚焦理论

为了解决一维波束聚焦定位算法中存在的问题,本文提出了二维波束聚焦定位方法,其传感器布置方法如图4所示:

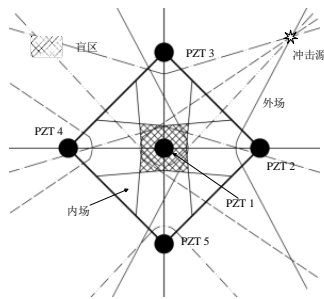


图4 二维波束聚焦传感器定位冲击图

如图所示,通过横向阵列与纵向阵列相互补充可以将一维阵列传感器的盲区大大减小.通过一维波束聚焦理论可根据传感器1、传感器2(表示为传感器1-2)相对于冲击源的半径差可得到一组双曲线,同理根据传感器1-3;1-4;1-5相对于冲击源的半径差可得到三组双曲线.假设冲击源坐标位置为 (X, Y) ,冲击源与传感器之间的半径差为 δ_{ij} ,传感器坐标为 (a_i, b_i) ,PZT 1与PZT i 之间时延为 ΔT_{ij} 、距离为 L ,则冲击源坐标 (X, Y) 可由式(4)、(5)求解得到.

$$\begin{cases} \delta_{12} = \sqrt{(X - L)^2 + Y^2} - \sqrt{X^2 + Y^2} \\ \delta_{13} = \sqrt{X^2 + (Y - L)^2} - \sqrt{X^2 + Y^2} \\ \delta_{14} = \sqrt{(X + L)^2 + Y^2} - \sqrt{X^2 + Y^2} \\ \delta_{15} = \sqrt{X^2 + (Y + L)^2} - \sqrt{X^2 + Y^2} \end{cases} \quad (4)$$

其中:

$$\delta_{ij} = v \cdot \Delta T_{ij} \quad (5)$$

2.3 基于概率成像的二维波束聚焦冲击定位方法

基于二维波束聚焦理论对结构进行冲击可以分为

四个主要步骤,首先对传感器获得的冲击信号进行小波变换,取得其主频包络线.其次,对小波变换后的两路信号进行互相关处理得到两路信号的时间延迟.再次,将波速的概率分布带入二维波束聚焦算法中分别可求出横向阵列与纵向阵列的冲击点概率分布图.最后,将两者融合可得到最终的冲击源概率分布图.整个算法流程如图5所示:

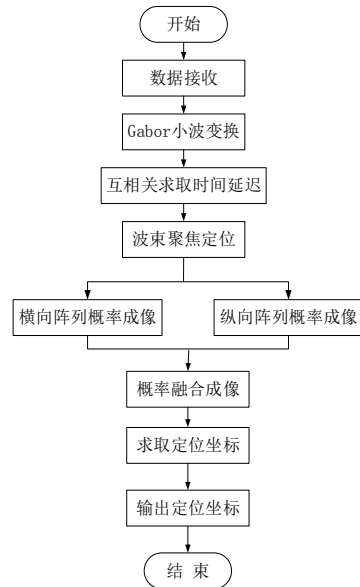


图5 基于概率成像的定位算法流程图

2.3.1 基于波速概率分布函数的成像方法

在冲击定位的过程中,波速测量直接影响定位的准确度.影响波速测量的误差来源包括传感器自身面积带来的误差、信号处理过程中由波达时间的微小波动带来的误差以及温度波动带来的误差等^[11].传统的定位算法采用多次测量波速求取平均值进行损伤定位,定位结果是由波速采样的质量决定的确定性结果,其精度随波速测量而波动.本文采用基于概率分布的方法对波速进行测量,从而得到对冲击定位的概率分布图,实现更加科学、合理的冲击定位的概率描述.

利用阵列中的相邻三个传感器接收不同距离的冲击信号,每一距离点进行多次冲击,计算所得波速 v 为:

$$v = \frac{s_i - s_j}{t_i - t_j}, i \neq j \quad (6)$$

其中: i, j 分别为传感器对应编号; s 为冲击源与传感器之间的距离, t 为对应传感器的波达时间.

假定传感器接收的冲击信号为: $m_i=(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{is}), i=1, 2, \dots, k$,其为非平稳的随机信号,具有较多的频率和模式,因此要求冲击信号的滤波技术要具有时频分析能力.而对信号小波变换可以得到信号的最佳时频信息^[18],首先经过频谱分析得到信号主要能量所

在的区间即信号的主频所在区间,其次采用Gabor小波对冲击信号进行变时窗分析,滤掉不相关的频率信息,提取出所需的主频信号所在的时域信息^[19]. 经过小波变换后得到的主频信号包络为: $m_i'=(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{i5}), i=1, 2, \dots, k$. 其中小波变换表达式为:

$$\Psi_g(t) = \frac{1}{\sqrt[4]{\pi}} \sqrt{\frac{\omega_0}{\gamma}} \exp\left[-\frac{(\omega_0/\gamma)^2}{2} t^2 + i\omega_0 t\right] \quad (7)$$

其Fourier变换为:

$$\hat{\Psi}_g(\omega) = \frac{\sqrt{2\pi}}{\sqrt[4]{\pi}} \sqrt{\frac{\gamma}{\omega_0}} \exp\left[-\frac{(\gamma/\omega_0\gamma)^2}{2} (\omega - \omega_0)^2\right] \quad (8)$$

$$\begin{cases} Z_x(\bullet) = -\frac{(L^2 - \Delta T_{li} \times \Delta T_{lj} \times (V(\bullet))^2) \times (\Delta T_{li} + \Delta T_{lj})}{2L \times (\Delta T_{li} - \Delta T_{lj})} \\ Z_y(\bullet) = \pm \frac{\sqrt{(k^2 - (\Delta T_{li})^2) \times (k^2 - (\Delta T_{lj})^2) \times (2k - (V(\bullet)) \times \Delta T_{li} - (V(\bullet)) \times \Delta T_{lj}) \times ((V(\bullet)) \times \Delta T_{li} + (V(\bullet)) \times \Delta T_{lj})}}{2L \times (V(\bullet)) \times (\Delta T_{li} - \Delta T_{lj})} \end{cases} \quad (10)$$

通过式(10)可以得到冲击源的x轴与y轴的一维分布函数 $Z_x(\bullet), Z_y(\bullet)$,将其带入到式(11)中通过联合分布函数可以得到冲击源的二维分布函数 $Z_{xy}(x=x_i|y=y_i)$ 记之为: $Z_{xy}(\bullet)$. 其中:

$$Z_{xy}(x=x_i|y=y_i) = \frac{Z_x(x=x_i) \cap Z_y(y=y_i)}{Z_y(y=y_i)} \quad (11)$$

$Z_{xy}(\bullet)$ 为该阵列计算所得冲击源的二维概率分布函数,通过该函数构图可以得到该阵列的概率成像图.

2.3.2 基于概率的成像融合

通过二维波束聚焦算法分别在横向阵列与纵向阵列生成对应阵列的概率成像图,称其为源像^[11]. 源像的定位结果不仅包含了不确定的波速信息,而且还包含了测量噪声与结构边界反射回波等我们并不关注的干扰信息,呈现在概率图中表现为估计定位区域的扩大. 为了突出冲击位置的信息,至少需要两个不同传感器阵列的源像相互融合. 假设传感器阵列为 $K_i(i=1, 2, 3, \dots)$ 每个传感器独立判断冲击源的概率为 E ,则其单独阵列源像为 $P(E|K_i)$,其融合图像表示为 $P(S_1, S_2, \dots, S_N)$ 如下所示:

$$P(S_1, S_2, \dots, S_N) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P(E|S_i) \quad (12)$$

融合图中包含了各个源图的冲击位置信息,通过求和加强了源图中损伤的重叠部分,使得图像在两者结合部分更加突出^[9]. 同时由于测量噪声是随机信号,通过取平均可以抑制其在融合图中的存在信息,并且采用的传感器阵列越多,抑制噪声效果越明显^[11]. 本文采用纵横两个阵列的源图进行融合,则式(12)中 $N=2$,

对小波变换得到的信号进行归一化处理之后进行互相关运算得到信号: $m_i''=(\hat{R}_{x_1, x_2}(\hat{\tau}), \hat{R}_{x_1, x_3}(\hat{\tau}), \dots, \hat{R}_{x_1, x_5}(\hat{\tau}))$.

$$\text{式中: } \hat{R}_{x_1, x_2}(\hat{\tau}) = \int_{-\infty}^{+\infty} P_{x_1, x_2}(f) e^{2\pi i f \hat{\tau}} df \quad (9)$$

取两路互相关信号 $\hat{R}_{x_1, x_2}(\hat{\tau})$ 的峰值 $\hat{\tau}$,所得 $\hat{\tau}$ 即为互相关计算所得两传感器接收数据的波达时间 t 的差值,记为: ΔT_{ij} . 带入式(6)中可以得到所要求的波速 v .

通过 N 次试验获得 N 组波速的信息,对其进行统计分析可有波速的概率分布符合正态分布 $V \sim N(\bullet)$,记为: $V(\bullet)$. 当时间延迟为 ΔT_{li} 及 ΔT_{lj} ,波速为 $V(\bullet)$ 时根据式(4)、(5)中可求得冲击源 x 坐标与 y 坐标概率分布(分别记为: $Z_x(\bullet), Z_y(\bullet)$)如式(10)所示:

通过式(10)可以得到最终的冲击概率分布图. 为表定位的精度和质量,本文采用定位冲击源位置与真实冲击源位置之间的距离对定位的准确性进行描述,其中记定位冲击源坐标为 (a, b) ,真实冲击源对应点坐标 (k, l) ,其距离 D 表示为:

$$D = \sqrt{(a - k)^2 + (b - l)^2} \quad (13)$$

3 实验研究

3.1 冲击试验系统

本文对基于十字阵列传感器的波束聚焦冲击定位算法进行了实验研究,实验系统组成如图6所示,采用了飞机中常用的LY12-CZ的航空铝材平板(100cm×100cm×0.25cm),四边采用螺钉固支^[14]. 结构中的PZT传感器布置如图7所示,在图示坐标原点处粘贴一个PZT, x 轴与 y 轴的正负半轴距坐标原点20cm处各粘贴一个PZT. 结构冲击能量通过断铅进行标定. 冲击信号

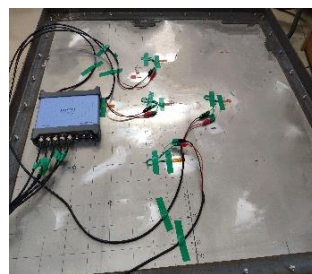


图6 冲击系统示意图

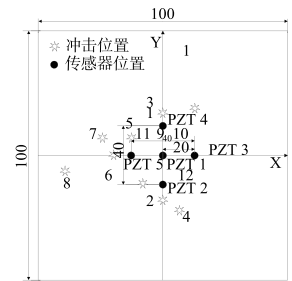


图7 传感器粘贴示意图

采用PicoScope-4824示波器进行采集。

3.2 波速测量

本文在实验板材的如图8所示的五个星号位置共进行了100次波速标定实验,利用式(6)可计算得到波速数据,并对计算得到的波速数据进行统计分析得到波速的概率分布函数为 $V \sim N(1591.8, 41.74)$,其概率分布图如图9所示。

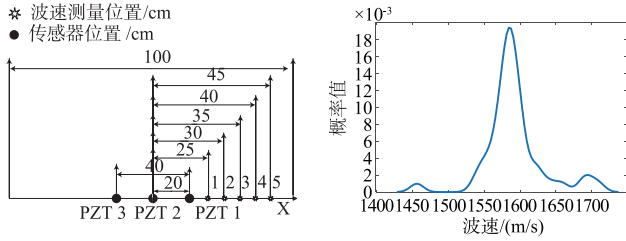


图8 波速试验点选取图 图9 波速概率分布图

3.3 冲击信号分析

在如图7所示冲击位置(20,30)处进行断铅实验,传感器接收到的信号如图10所示:

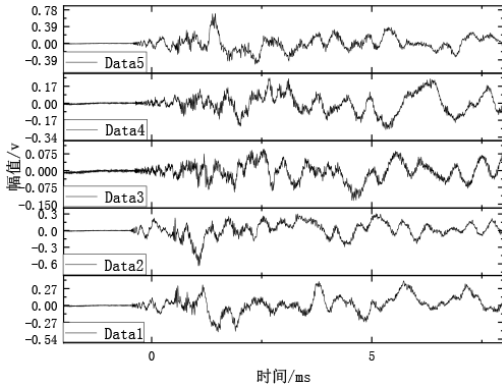


图10 原始信号时域图

本文采用基于广义互相关^[20]的方法提取信号的时间参数,声发射信号的主要能量分布^[21]在0kHz~80kHz,且在20kHz~40kHz之间能量最为集中,因此本文以30kHz作为信号的中心频率对信号采用Gabor小波进行变时窗分析提取特征值.对Gabor小波变换后的信号取其包络线采用互相关算法对信号进行求取时间延迟,其时间延迟图如图11所示。

得到其时间延迟如下表所示(其中2-1表示传感器2数据与传感器1数据之间的时间延迟):

表1 互相关得到时间延迟(10⁻⁴s)

	2-1	3-1	4-1	5-1
时间延迟	1.1	-0.875	0.81	0.38

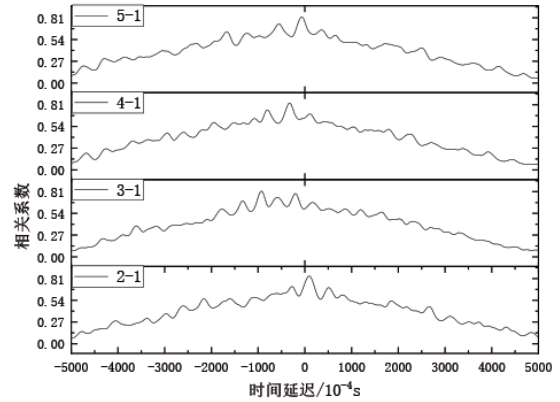
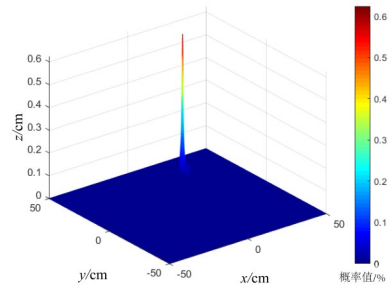


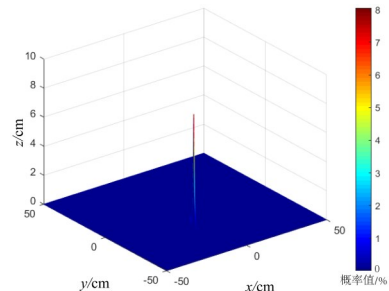
图11 广义互相关求取时间延迟

4 定位结果与成像分析

分别对(20,30)点与(-10,-20)点进行冲击定位实验研究,将波速的概率分布函数和经过Gabor小波变换与广义互相关处理后得到的时间延迟带入二维波束聚焦算法的式(10)中,分别可求出x坐标与y坐标的概率分布函数 $x(\bullet)$ 、 $y(\bullet)$.将x坐标与y坐标的概率分布函数相结合可得到该阵列所估计的冲击源概率分布图.通过式(11)将横向阵列与纵向阵列所估计的冲击源概率图融合得到融合图像如图12(a)、12(b)所示,其概率图峰值所在位置为冲击源估计位置.其定位成像概率分布图如图13(a)、13(b)所示。



(a) (20,30)点



(b) (-10,-20)点

图12 冲击源概率成像图

将(20,30)点概率分布图局部放大后如图14所示,其概率分布等高线由颜色区分,表示冲击源的估计区

表2 冲击定位结果

	冲击坐标/cm	时间延迟/ 10^{-4} s (2-1,3-1,4-1,5-1)	横向阵列定位坐标/cm	纵向阵列定位坐标/cm	二维阵列定位坐标/cm	距离 D/cm
1	(00,25)	(4.40,4.22,11.3,12.1)	NULL	(00,25.6)	(00,25.6)	0.60
2	(-30,00)	(12.55,12.3,3.61,17.4)	(-29.1,0.15)	NULL	(-29.1,0.15)	0.91
3	(00,35)	(3.20,3.24,11.4,12.5)	NULL	(-0.5,35.9)	(-0.5,35.9)	1.03
4	(20,30)	(0.38,0.81,0.87,1.1)	(20.6,31.3)	(19.5,28.77)	(20.1,30.35)	1.11
5	(-10,-20)	(0.03,0.86,0.85,0.03)	(-8.94,20.11)	(-10.84,21.2)	(-10.5,20.8)	0.94
6	(-25,-10)	(10,12.0,0.56,7.85)	(-26.91,-11.3)	(-24.68,-8.67)	(-25.7,-10.4)	0.81
7	(-35,10)	(11.2,11.9,0.11,5.98)	(-36,10.6)	NULL	(-36,10.6)	1.17
8	(-40,-10)	(11.4,12.3,0.01,4.94)	(-41.1,-11.1)	NULL	(-41.1,-11.1)	1.50

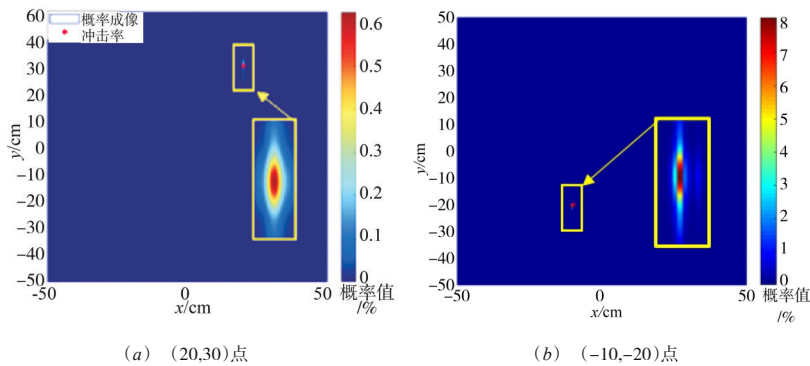


图13 冲击源概率成像分布图

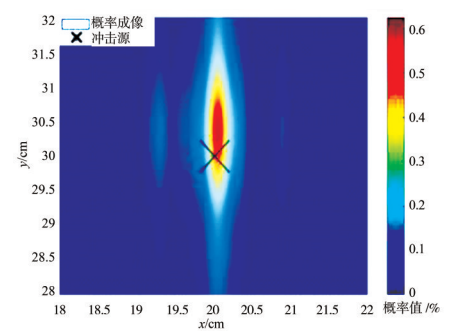


图14 冲击源概率成像分布放大图

域. 其中黑色×号所标记位置为真实冲击所发生位置, 概率图中峰值点坐标(20.05, 30.35)为所求冲击源坐标, 其绝对误差为0.353cm; 相对误差 $D=1\%$.

本文冲击实验断铅点取如图7所示星号所在位置, 其中8个点平均分布在四个象限. 对以上8个点进行冲击定位实验研究, 其横向一维阵列、纵向一维阵列、以及融合之后的二维波束聚焦定位坐标如表2所示, 其中NULL代表由于该定位点处于一维阵列的盲区, 无定位结果.

其中时间延迟中(i, j, \dots)代表传感器*i*与传感器*j*间的时间延迟. 由表2而可见: 一维阵列波束聚焦定位算法在各自阵列所在方向存在定位盲区, 在盲区内无法进行准确定位. 采用二维阵列的传感器布置方法可以有效避免一维阵列的盲区对定位结果的影响. 同时, 本文通过概率图对阵列传感器得到的定位结果进行描述, 其横向阵列与纵向阵列生成的概率分布图相互融合可以得到最终的冲击定位结果分布, 融合后得到的坐标与冲击源坐标之间的最大距离 D 为1.5cm, 相较于两个一维阵列的定位结果误差更小, 表明通过概率图融合所得定位结果准确性较高, 以冲击发生概率分布描述冲击定位位置, 冲击定位结果表示更加直观, 更加科学.

5 结论

本文提出了一种基于十字型传感器布置方法的二

维波束聚焦概率成像定位算法, 基于此传感器布置方法大大增加了有效定位区域, 减少了定位盲区, 采用基于小波理论的广义互相关方法可以更加准确的求取出传感器采集到的声发射信号之间的时延参数, 将波速测量的误差通过概率分布的方式进行表示, 进而反映在定位坐标的概率分布当中, 可以实现更加完整、准确的冲击定位表述, 更加具有科学性. 通过针对大型航空铝板的冲击监测实验研究, 证明了该方法具有较高的冲击定位精度和较好的可靠性, 基于概率成像的冲击损伤表示方法更加直观与科学, 定位算法高效, 具有较好的实用性.

参考文献

- [1] Damghani M, Ersoy N, Piorkowski M, et al. Experimental evaluation of residual tensile strength of hybrid composite aerospace materials after low velocity impact[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 179: 107537.
- [2] Baluch A H, Falco O, Jimenez J L, et al. An efficient numerical approach to the prediction of laminate tolerance to barely visible impact damage [J]. Composite Structures, 2019, 225: 111017.
- [3] Qiu L, Yuan S, Zhang X, et al. A time reversal focusing based impact imaging method and its evaluation on complex composite structures [J]. Smart Materials and Structures, 2011, 20(10): 105014.

- [4] Dziendzikowski M, Dragan K, Katunin A. Localizing impact damage of composite structures with modified RAPID algorithm and non-circular PZT arrays[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2017, 17(1): 178 – 187.
- [5] Papulak T S. An Inverse Acoustical Phased Array Technique for Impact Detection and Location [D]. Salt Lake City: The University of Utah, 2012. 133.
- [6] Shrestha P, Park Y, Kim C-G. Low velocity impact localization on composite wing structure using error outlier based algorithm and FBG sensors[J]. Composites Part B: Engineering, 2017, 116: 298 – 312.
- [7] Rajbhandari P, Tautges K, Chatradi S, et al. Impact location in an isotropic plate without training[J]. Procedia Engineering, 2017, 188: 170 – 177.
- [8] Lu S, Jiang M, Sui Q, et al. Low velocity impact localization system of CFRP using fiber Bragg grating sensors[J]. Optical Fiber Technology, 2015, 21: 13 – 19.
- [9] Dziendzikowski M, Kurnyta A, Dragan K, et al. In situ barely visible impact damage detection and localization for composite structures using surface mounted and embedded PZT transducers: A comparative study [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 78: 91 – 106.
- [10] Yuan S, Ren Y, Qiu L, et al. A multi-response-based wireless impact monitoring network for aircraft composite structures [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(12): 7712 – 7722.
- [11] Zhou C, Su Z, Cheng L. Quantitative evaluation of orientation-specific damage using elastic waves and probability-based diagnostic imaging[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011, 25(6): 2135 – 2156.
- [12] 张海燕, 孙修立, 曹亚萍, 等. 基于时间反转理论的聚焦 Lamb 波结构损伤成像[J]. 物理学报, 2010, 59(10): 7111 – 7119.
- Zhang Hai-Yan, Sun Xiu-Li, Cao Ya-Ping, et al. Structural damage imaging based on time-reversal theory for focusing of Lamb waves[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(10): 7111 – 7119. (in Chinese)
- [13] Yuan S, Lai X, Zhao X, et al. Distributed structural health monitoring system based on smart wireless sensor and multi-agent technology[J]. Smart Materials & Structures, 15(1): 1 – 8.
- [14] Gao F, Shao Y, Hua J, et al. Enhanced wavefield imaging method for impact damage detection in composite laminates via laser-generated Lamb waves [J/OL]. Measurement, 2020: 108639, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108639>.
- [15] Kudela P, Radzienski M, Ostachowicz W. Impact induced damage assessment by means of Lamb wave image processing [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 102: 23 – 36.
- [16] Li G, Battistelli G, Yi W, et al. Distributed multi-sensor multi-view fusion based on generalized covariance intersection [J/OL]. Signal Processing, 2020, 166, <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2019.107246>.
- [17] Zhang W, Jia H, Gao G, et al. Backing layers on electroacoustic properties of the acoustic emission sensors [J]. Applied Acoustics, 2019, 156: 387 – 393.
- [18] Hanteh M, Rezaifar O. Damage detection in precast full panel building by continuous wavelet analysis analytical method[J]. Structures, 2021, 29: 701 – 713.
- [19] Dziejciech K, Staszewski W J. Wavelet-based transmissibility for the analysis of time-variant systems[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 145: 106918.
- [20] Hanus R. Time delay estimation of random signals using cross-correlation with Hilbert transform [J]. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 2019, 146: 792 – 799.
- [21] Wang Y, Li P, Zhang J, et al. Distributed optical fiber vibration sensor using generalized cross-correlation algorithm[J]. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 2019, 144: 58 – 66.

作者简介



常 琦(通信作者) 男, 1979年2月生于陕西延安. 现为西安理工大学机械与精密仪器工程学院讲师. 主要研究方向为结构健康检测、信号处理.

E-mail: cqhardrocker@163.com



孟 瑶 男, 1996年11月生于陕西咸阳. 现为西安理工大学机械与精密仪器工程学院硕士研究生. 主要研究方向为结构健康检测、信号处理.

E-mail: 1024489351@qq.com



赵 恒 男, 1979年10月出生与陕西汉中. 现为西安理工大学机械与精密仪器工程学院副教授. 主要研究方向为光机耦合系统设计.

E-mail: 540238946@qq.com