

基于 MUSIC 算法的复合材料近场冲击源定位

钟永腾, 袁慎芳*

(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: 为了提高算法在近场冲击源的定位精度, 提出了基于多重信号分类 (MUSIC) 算法的复合材料近场冲击源定位方法。首先通过 Fresnel 近似将一维远场模型扩展到二维近场模型; 接着应用 Gabor 小波变换从冲击的宽带信号中提取某一中心频率的窄带波; 最后应用二维近场 MUSIC 算法, 扫描整个监测区域, 可以同时得到冲击源的距离和方位角。复合材料层合板的冲击实验结果表明该方法能够精确有效地对冲击源进行定位, 距离的定位误差不超过 0.94 cm, 方位角误差不超过 1°。

关键词: 低速冲击; 定位; 多重信号分类 (MUSIC); 复合材料; 近场

中图分类号: TB330.1 **文献标志码:** A

MUSIC algorithm based impact localization in the near-field of composite structure

ZHONG Yongteng, YUAN Shenfang*

(The State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures,
Nanjing University of Aeronautic and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To improve the location precision of foreign object impact in the near-field, the multiple signal classification (MUSIC) based localization algorithm was presented for the impacts estimating. Firstly, classical far-field MUSIC algorithm was extended to near-field version using the Fresnel approximation. Then Gabor transform was applied to extract the narrow-band signal at a center frequency from the impact signal. After scanning over the whole interest direction of the structure, the signal source parameters including range and direction from the peak of spatial spectrum were obtained. The experiment on the epoxy laminates plate was established to verify the validity of the proposed method. Results show that the distance error and the direction error are less than 0.94 cm and 1°, respectively.

Keywords: low velocity impact; localization; multiple signal classification (MUSIC); composite structure; near-field

复合材料具有高比模量、比强度等优势, 可以有效地减轻飞机的质量并提高飞机的安全性和存活力, 在航空领域具有良好的应用前景^[1-2]。目前在国内外的军用、民用飞机上复合材料的使用越来越多, 如 B787、A350XWB 的用量分别占总质量的 50% 和 52%, 国内自主研发的大型客机 C919 的用量也达到了 20%。然而复合材料在遭遇低速冲击时很容易造成复合材料的凹陷、脱层、裂纹等微小损伤, 导致复合材料性能下降^[3-5]。因此, 冲击监测成为结构健康监测中一个很重要的课题。

冲击监测技术的算法主要可以分为三大类: 第一类是基于时差定位技术算法^[6], 它通过适当的距离角度和波达时间来实现冲击定位, 然而在噪声的存在下很难精确获得信号的波达时间。第二类是基于系统建模的方法^[7], 通过建模得到结构的动态性能响应与实验得到的响应进行比较建立优化模型, 循环迭代, 实现冲击定位, 然而这种方法对于复杂结构的应用不仅计算量大, 而且由于建模的误差增大导致较大的定位误差。第三类是基于多种机器学习算法和拟合技术的方法^[8], 它可以很好地建立复

杂结构的数据输入输出关系实现冲击定位,不足之处在于该类方法需要大量冲击试验数据作为训练样本,而在工程实践中很难实现。

Schmidt 等^[9]提出了基于特征值分解技术和子空间理论的多重信号分类(MUSIC)算法。由于该算法具有很高的分辨力、估计精度及稳定性,吸引了大量的学者对其进行深入的研究和分析,目前主要应用于声波、电磁波等领域^[10-12],而且针对这些领域的近场问题也进行了探讨^[13-14]。Lamb 波作为超声波具有与声波类似的特点,属于非平稳信号。因此,可以考虑将 MUSCI 算法运用于复合材料的低速冲击监测中,然而 Lamb 波传播时存在频散和多模式等特性,在结构健康监测应用中更加复杂^[15]。本课题组将阵列信号处理技术引入到复合材料板结构健康监测领域,运用远场 MUSCI 算法实现了冲击源的波达方向的估计,较好地提高了定位精度和结构监测的实时性^[16]。阵列信号处理算法中传感器阵列布置属于密集阵,可以有效地减小复合材料各向异性对冲击定位的影响;MUSIC 算法是基于特征值分解技术,可以有效地分离高斯白噪声,更好地提取特征信号;它不需要建模,用相当简单的公式完全描述了冲击源与阵列的几何关系。然而算法仅针对远场的冲击源定位,在远场情况下可以忽略信号源的波前曲率,即近似为平面波,而在近场区域,信号源波前的曲率不能忽略,即需要用球面波来描述,此时信号源的位置信息由方位角 θ 、距离 r 两个参数来确定。

本文中提出了基于近场 MUSIC 算法的复合材料冲击源定位方法。首先通过 Fresnel 近似将一维远场模型扩展到二维近场模型;接着应用 Gabor 小波变换从冲击的宽带信号中提取某一中心频率的窄带波,应用近场 MUSIC 算法,扫描整个监测区域可以同时得到冲击相对于参考位置的距离和方位角。最后对复合材料层合板进行了冲击定位算法的实验验证。

1 冲击定位算法原理

1.1 信号模型

考虑 N 个远场的窄带信号入射到均匀线阵上,其中阵列天线有 M 个阵元组成。在理想情况下,假设阵列中各阵元是各向同性的且不存在通道不一致、互耦等因素的影响,则输入信号可以表示为

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1(\theta_1) & a_1(\theta_2) & \cdots & a_1(\theta_N) \\ a_2(\theta_1) & a_2(\theta_2) & \cdots & a_2(\theta_N) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_M(\theta_1) & a_M(\theta_2) & \cdots & a_M(\theta_N) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ \vdots \\ N_M \end{bmatrix}$$

简化为

$$X(t) = A(\theta)S(t) + N(t) \tag{1}$$

式中:矩阵 A 的第 j 列向量 $a(\theta_j)$ 表示第 j 个角度为 θ_j 的信号响应; $a_i(\theta_j)$ 为信号波达方向角 θ 和阵元位置的函数,它取决于第 i 个阵元相对于参考位置的距离和第 j 个波达信号;入射信号 S 可以某一参考位置(如坐标原点)幅值和相位来表示; N 向量表示随信号一起产生或者由仪器产生噪声。

根据信号源与接收阵列的距离,可以分为远场和近场(如图 1 所示)。一般情况,以下式来划分远场和近场:

$$r \leq \frac{2l^2}{\lambda} \tag{2}$$

式中: l 为阵列孔径(阵列的长度); λ 为信号源的波长。

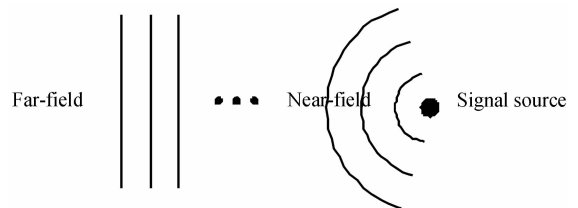


图 1 信号传播示意图

Fig. 1 Diagram of signal transmission

在远场情况下,通常可以忽略信号源的波前曲率,即波前可以近似为平面波,此时只需要用方位角就可以表示出信号源的位置。然而在近场区域,信号源波前的曲率不能忽略,即需要用球面波来描述,这时信号源的位置信息需要由方位角 θ 、距离 r 两个参数来确定。近场信号源的阵列接收几何模型如图 2 所示。

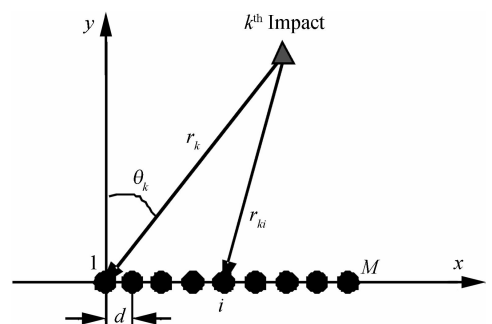


图 2 近场源的阵列接收几何模型

Fig. 2 Near-field model

假设有 D 个信号源射入由 M 个阵元组成的均匀线性阵列上, 阵元间距为 d , 以阵列第一个阵元为参考点, 则近场模型下输入信号可以表示为

$$x_i(t) = \sum_{k=1}^D a_i(r_k, \theta_k) S_k(t) + N_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, L \quad (3)$$

简化为

$$X(t) = A(r, \theta)S(t) + N(t) \quad (4)$$

其中:

$$X(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_M(t)]^T$$

$$A = [a(r_1, \theta_1), a(r_2, \theta_2), \dots, a(r_D, \theta_D)]$$

$$S(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_D(t)]^T$$

$$N(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_M(t)]^T$$

导向矢量 $a_i(r_i, \theta_i)$ 可以表示为

$$a(r_i, \theta_i) = [a_1(r_i, \theta_i), a_2(r_i, \theta_i), \dots, a_M(r_i, \theta_i)]^T$$

1.2 冲击源定位

1.2.1 经典 MUSIC 理论

由 M 个 PZT 组成的阵列对每次冲击事件进行了 M 次采集, 阵列协方差矩阵为

$$R = E[XX^H] = AE[SS^H]A^H + \sigma^2 I = AR_S A^H + \sigma^2 I \quad (5)$$

由于信号与噪声相互独立, 数据协方差矩阵可分解为与信号、噪声相关的两部分, 其中 R_S 为信号的协方差矩阵, 对 R 进行特征值分解

$$R = U_S \Sigma_S U_S^H + U_N \Sigma_N U_N^H \quad (6)$$

式中: Σ_S 为信号子空间对应的大特征值; Σ_N 为噪声子空间对应的小特征值; U_S 为信号子空间; U_N 为噪声子空间。

在理想条件下, 信号子空间与噪声子空间是相互正交的, 即

$$a^H(\theta)U_N = 0 \quad (7)$$

考虑到实际接收数据矩阵是有限长的, 因此用 R 的最大似然估计 \hat{R} 代替:

$$\hat{R} = \frac{1}{L} X X^H \quad (8)$$

式中, L 为数据的快拍数。并对 \hat{R} 进行特征值分解得到噪声子空间 U_N 。由于噪声的存在, 导向矢量和噪声子空间不能完全正交, 实际上求 DOA 是以最小化搜索实现的, 即谱估计的公式为

$$P_{\text{MUSIC}}(\theta_k) = \frac{1}{a^H(\theta_k)U_N U_N^H a(\theta_k)} \quad (9)$$

1.2.2 近场冲击定位算法

根据图 2 所示的近场信号源接收几何模型中信号源到各个阵元的几何关系, 第 k 个信号源到达第 i 个阵元的输入信号可以表示为

号源到各个阵元的几何关系, 第 k 个信号源到达第 i 个阵元的输入信号可以表示为

$$a_i(r_k, \theta_k) = \frac{r_{ki}}{r_k} \exp(-j\tau_{ik}), \quad k = 1, 2, \dots, D \quad (10)$$

其中: r_{ki} 、 r_k 分别为第 k 个信号源到达第 i 个阵元、参考阵元的距离; r_{ki}/r_k 表示幅度衰减因子^[17]。 τ_{ik} 为波程差, 它可以用方位角 θ 、距离 r 两个参数表示为

$$\tau_{ik} = \frac{2\pi f[\sqrt{r_k^2 + (id)^2 - 2r_k id \cos\theta_k} - r_k]}{c} \quad (11)$$

其中: f 为频率; c 为波速; d 为阵列间距。

当冲击源处于 Fresnel 区域时, 为了简化计算, 等式(11)可以根据泰勒公式改写为

$$\tau_{ik} = \left(-\frac{2\pi d}{\lambda} \sin\theta_k\right)i + \left(-\frac{\pi d^2}{\lambda r_k} \cos^2\theta_k\right)i^2 + O\left(\frac{d^2}{r_k^2}\right) \quad (12)$$

其中, λ 为信号波长。

根据上节的分析, 可以将基于子空间法的远场定位方法扩展到近场信号源问题中, 将近场导向矢量 $a_k(r, \theta)$ 代替式(9)中导向矢量 $a_k(\theta)$, 可以得到近场谱估计的公式

$$P_{\text{MUSIC}}(r_k, \theta_k) = \frac{1}{a^H(r_k, \theta_k)U_N U_N^H a(r_k, \theta_k)} \quad (13)$$

其中

$$a(r_k, \theta_k) =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{r_1}{r_0} \exp(-j((-\frac{2\pi d}{\lambda} \sin\theta_k) + (-\frac{\pi d^2}{\lambda r_k} \cos^2\theta_k))) \\ \vdots \\ \frac{r_k}{r_0} \exp(-j((-\frac{2\pi d}{\lambda} \sin\theta_k)k + (-\frac{\pi d^2}{\lambda r_k} \cos^2\theta_k)k^2)) \\ \vdots \\ \frac{r_M}{r_0} \exp(-j((-\frac{2\pi d}{\lambda} \sin\theta_k)M + (-\frac{\pi d^2}{\lambda r_k} \cos^2\theta_k)M^2)) \end{bmatrix}$$

2 实验研究

2.1 实验装置

实验对象为玻璃纤维/环氧树脂复合材料层合板, 如图 3 所示, 板的尺寸为 $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$, 板的铺层顺序为 $[0_2/90_4/0_2]_{2S}$, 各层的厚度为 0.125 mm 。四边螺钉固支。在板的正下方布置 PZT 压电陶瓷线性均匀阵列, 阵列个数为 7 (按照从左到右的顺序编号为 PZT1~PZT7), PZT 的直径为 8 mm , 厚度为 0.48 mm , 阵列间距 d 为 10 mm , 阵列长度 L 为 60 mm 。

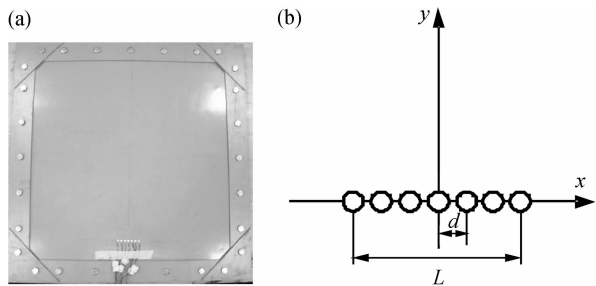


图3 玻璃纤维/环氧树脂层合板及其传感器布置示意图

Fig. 3 Epoxy laminates plate and its sensors array layout diagram

实验设备使用的是南京航空航天大学智能所自主研发的集成压电多通道扫查系统^[18], 该系统可以8通道同时采集。实验采样频率设置为2 MHz, 数据采样长度为10000, 预采集点数为2000, PZT传感器阵列接收以PZT1为触发通道, 触发电压为3 V。实验中采用冲击锤模拟外界低速冲击, 冲击源的位置坐标如表1所示, 按照不同角度、不同距离选取了5个冲击点进行实验验证。

表1 冲击源的位置坐标

Table 1 Actual impact position coordinates

Impact points	Impact coordinates	
	<i>r</i> / mm	<i>θ</i> / (°)
1	150	45
2	200	56
3	123.6	75
4	200	90
5	150	145

Note: *r* is the distance from impact to reference element; *θ* is the direction of impact and array sensors.

2.2 典型信号的冲击定位分析

以第4次冲击时PZT1的信号分析, 冲击源的极坐标为(200 mm, 90°), 图4给出了其冲击响应的时域信号和频谱图, 可以看出冲击响应较复杂, 为宽带信号。为了满足MUSIC算法的窄带前提条件, 在运用该算法之前必须将宽带信号转换为窄带信号。小波变换在时域和频域都具有良好的局部分析特性, 非常适合声发射信号的分析。在本文中选用Gabor小波变换^[19]提取冲击响应中某一中心频率作为传感器阵列的接收信号(如图5所示), 其函数表达式为

$$g(t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi}} \sqrt{\frac{\omega_0}{\gamma}} \exp\left[-\frac{(\omega_0/\gamma)^2}{2} t^2 + i\omega_0 t\right] \quad (14)$$

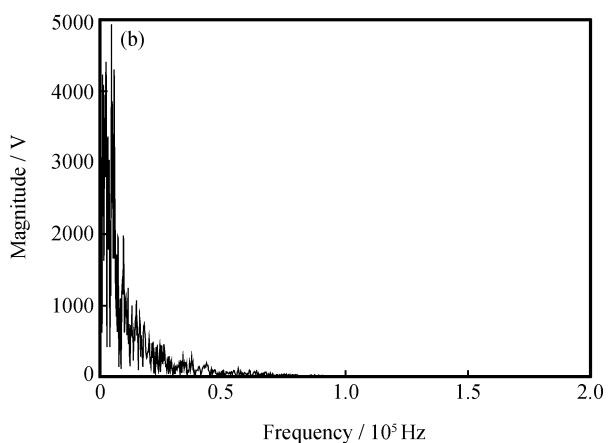
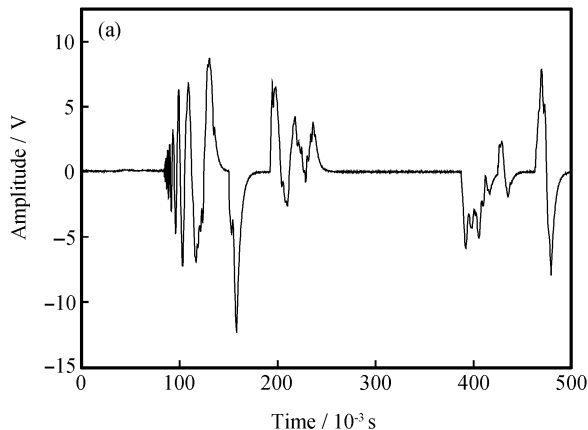


图4 第4次冲击时PZT1的信号响应和频谱

Fig. 4 PZT1 sensor stain signal and frequency spectrum of the 4th impact

以及傅里叶变换为

$$\hat{g}(\omega) = \frac{\sqrt{2\pi}}{\sqrt{4\pi}} \sqrt{\frac{\omega_0}{\gamma}} \exp\left[-\frac{(\omega_0/\gamma)^2}{2} (\omega - \omega_0)^2\right] \quad (15)$$

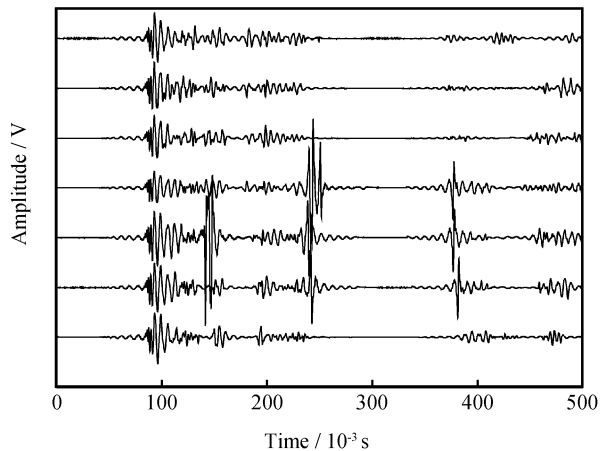


图5 中心频率为45 kHz时的阵列信号时域瀑布图

Fig. 5 Waterfall plot of stain signal extracted at the center frequency of 45 kHz

由于边界反射以及传感器本身的问题, 传感器阵列所接收的信号比较复杂, 而且冲击事件一般都出现在信号的最前端, 因此考虑截取信号的前 0.125 s 的数据作为传感器阵列的输入信号 $X(t)$, 如图 6 所示。

应用二维近场 MUSIC 算法, 并在区域内进行方位角 θ 、距离 r 的二维搜索, 方位角和距离的搜索步长分别为 1° 、1 mm, 可以得到二维空间谱的图 (如图 7 所示), 本次搜索时间为 5.423594 s。在空间谱图中存在一个明显的波峰, 即表示信号源的位置 (横坐标表示信号源的波达方向, 纵坐标表示信号源与参考阵元的距离)。由图可以读出第 4 次冲击的定位为 $(202 \text{ mm}, 90^\circ)$, 与实际冲击源位置误差很小, 距离 r 误差为 0.2 cm, 波达方向 θ 误差为 0, 定位精度较高, 且定位时间较短。

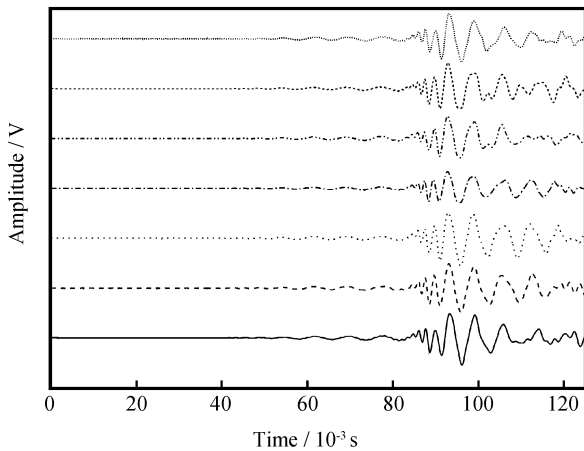


图 6 截取前 0.125 s 的 45 kHz 窄带阵列信号

Fig. 6 First 0.125 s of signals at the center frequency of 45 kHz

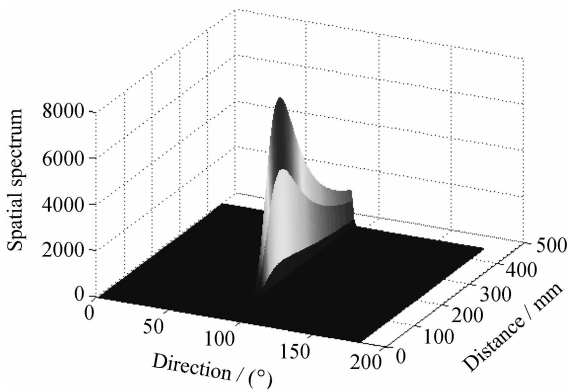


图 7 冲击源坐标为 $(200 \text{ mm}, 90^\circ)$ 时距离和方位角的定位结果

Fig. 7 Predicted result of distance and direction at the impact source of $(200 \text{ mm}, 90^\circ)$

2.3 冲击定位结果与讨论

实验中按照不同距离、不同角度选取了 5 个冲击位置作为二维近场 MUSIC 算法的冲击定位方法验证实例, 其冲击点的位置坐标如表 1 所示。根据公式(2)可以计算出近场的符合标准为 255.12 mm, 因此 5 个冲击实验均为近场冲击源情况。

表 2 给出了 5 个冲击实验的定位结果, 分别为 $(145 \text{ mm}, 44^\circ)$ 、 $(194 \text{ mm}, 56^\circ)$ 、 $(113 \text{ mm}, 74^\circ)$ 、 $(202 \text{ mm}, 90^\circ)$ 、 $(146 \text{ mm}, 144^\circ)$ 。冲击定位精度较高, 其中距离 r 误差均不超过 0.94 cm, 波达方向 θ 误差均不超过 1° 。

表 2 冲击定位结果统计表

Table 2 Predicted results and relative errors

Actual position		Predictive position		Error	
r / mm	$\theta / (^\circ)$	r / mm	$\theta / (^\circ)$	E_r / cm	$E_\theta / (^\circ)$
150	45	145	44	0.5	1
200	56	194	56	0.6	0
123.6	75	113	74	0.94	1
200	90	202	90	0.2	0
150	145	146	144	0.4	1

Note: r is the distance from impact to reference element; θ is the direction of impact and array sensors; E_r , E_θ is the errors of distance and direction respectively.

在本文中进行了近场单冲击源的试验验证, 针对 MUSIC 算法在解决多个不相干声源的定位问题上的优势, 下一步的工作将重点研究二维近场 MUSIC 算法在多个冲击源同时发生时的定位问题。

3 结论

(1) 提出了基于二维近场 MUSIC 算法的复合材料冲击定位方法, 该方法不需要复杂的系统建模和提取信号波达时间, 减少了复合材料的各向异性对冲击定位的影响, 较好地提高了复合材料中近场冲击源的定位精度。

(2) 在玻璃纤维/环氧树脂复合材料层合板上进行了该方法实验验证, 实验结果表明该方法有较好的定位精度, 距离的定位误差不超过 0.94 cm, 信号波达方向误差不超过 1° , 谱峰的搜索时间均在 10 s 以内, 较好地实现了定位的实时性。

参考文献:

- [1] Diamanti K, Soutis C. Structural health monitoring techniques for aircraft composite structure[J]. Progress in Aerospace

- Sciences, 2010, 46(8): 342-352.
- [2] 袁慎芳. 结构健康监测[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 1-18.
Yuan Shenfang. Structural health monitoring and damage control [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2007: 1-18.
- [3] 朱炜焘, 许希武. 复合材料层合板低速冲击损伤的有限元模拟[J]. 复合材料学报, 2010, 27(6): 200-207.
Zhu Weiyao, Xu Xiwu. Finite element simulation of low velocity impact damage on composite laminates [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2010, 27(6): 200-207.
- [4] Staszewski W J, Mahzan S, Traynor R. Health monitoring of aerospace composite structures—Active and passive approach [J]. Composites Science and Technology, 2009, 69(11/12): 1678-1685.
- [5] Yang F J, Cantwell W J. Impact damage initiation in composite materials [J]. Composites Science and Technology, 2010, 70(2): 336-342.
- [6] Salehian A. Identifying the location of sudden damage in composite laminates using wavelet approach [D]. Massachusetts: Worcester Polytechnic Institute, 2003.
- [7] Hu N, Fukunaga H, Matsumoto S, et al. An efficient approach for identifying impact force using embedded piezoelectric sensors [J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 34: 1258-1271.
- [8] Ghajari M, Sharif K Z, Aliabadi M H. Impact detection using artificial neural networks [J]. Key Engineering Materials, 2012, 488-489: 767-770.
- [9] Schmidt R O. Multiple emitter location and signal parameter estimation [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1986, 34(3): 276-280.
- [10] 王永良, 陈辉, 彭应宁, 万群. 空间谱估计理论与算法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 82-98.
Wang Yongliang, Chen Hui, Peng Yingning, Wan Qun. Spatial spectrum estimation theory and algorithm [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 82-98.
- [11] Bencheikh M L, Wang Y. Joint DOD-DOA estimation using combined ESPRIT - MUSIC approach in MIMO radar [J]. Electronics Letters, 2010, 46(15): 1081-1083.
- [12] Chen X D, Zhong Y. MUSIC electromagnetic imaging with enhanced resolution for small inclusions [J]. Inverse Problems, 2009, 25(1): 1-12.
- [13] Zeng W J, Li X L, Zou H X, Zhang X D. Near-field multiple source localization using joint diagonalization [J]. Signal Processing, 2009, 89: 232-238.
- [14] 殷作亮, 孟维晓. 近场声源方位和距离联合估计算法[J]. 吉林大学学报: 信息科学版, 2008, 26(3): 248-252.
Yin Zuoliang, Meng Weixiao. Joint estimation algorithm for DOA and range of sound source in near-field [J]. Journal of Jilin University: Information Science Edition, 2008, 26(3): 248-252.
- [15] Giurgiutiu V. Structural health monitoring with piezoelectric wafer active sensors [M]. USA: Academic Press, 2008: 503-504.
- [16] 苏永振, 袁慎芳, 王瑜. 基于多重信号分类算法的复合材料冲击定位[J]. 复合材料学报, 2010, 27(3): 105-110.
Su Yongzhen, Yuan Shenfang, Wang Yu. Impact localization in composite using multiple signal classification method [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2010, 27(3): 105-110.
- [17] Pierce S G, Culshaw B, Manson G, et al. The application of ultrasonic Lamb wave techniques to the evaluation of advanced composite structures [C]//Smart Structures and Materials 2000. California: Proceedings of SPIE, 2000, 3986: 93-103.
- [18] Qiu L, Yuan S F, Wang Q, et al. Design and experimental research of a PZT network based structural health monitoring scanning system [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2009, 22(5): 505-512.
- [19] Chui C K. An introduction to wavelets [M]. San Diego: Academic Press, 1992: 49-74.