

DOI:10.16356/j.1005-2615.2023.03.015

## 基于超声导波波束成形的缺陷反演方法研究

武靖昌<sup>1</sup>, 张应红<sup>1</sup>, 钱智<sup>1</sup>, 马智勇<sup>1,2</sup>, 李鹏<sup>1</sup>, 李翔宇<sup>3</sup>, 钱征华<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学航空航天结构力学及控制全国重点实验室, 南京 210016; 2. 海装驻南京地区第四军事代表室, 南京 211100; 3. 西南交通大学应用力学与结构安全四川省重点实验室, 成都 610031)

**摘要:** 利用超声导波对板结构中的缺陷进行反演可以确定缺陷的位置和形状信息, 针对走时成像方法在低频范围内效果不佳的问题, 提出一种基于波动场的超声导波缺陷反演成像方法。根据波动方程推导出波束成形成像原理, 利用 Born 近似下的散射场数据对成像区域像素点的值进行相干叠加, 得到缺陷的位置和形状。再通过波束成形与傅里叶衍射定理在频域的映射关系, 将波束成形的结果转化为衍射层析成像图像, 得到了更为清晰的反演图像。针对衍射层析成像中存在伪影和噪声的问题, 利用二维变分模态分解 (Two-dimensional variational mode decomposition, 2D-VMD) 方法对图像进行降噪处理, 有效去除了伪影和缺陷轮廓边缘的毛刺, 进一步提高了成像分辨率。反演结果表明该方法可以较为准确地重构出铝板上减薄缺陷的位置、大小和形状, 具有较高的分辨率。

**关键词:** 固体力学; 超声导波; 缺陷反演; 波束成形; 衍射层析成像; 二维变分模态分解

**中图分类号:** TB559 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2023)03-0497-10

## Defect Inversion Method Based on Ultrasonic Guided Wave Beamforming

WU Jingchang<sup>1</sup>, ZHANG Yinghong<sup>1</sup>, QIAN Zhi<sup>1</sup>, MA Zhiyong<sup>1,2</sup>, LI Peng<sup>1</sup>,  
LI Xiangyu<sup>3</sup>, QIAN Zhenghua<sup>1</sup>

(1. National Key Laboratory of Aerospace Structural Mechanics and Control, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. The Fourth Military Representative Office of the Naval Armament Department Stationed in Nanjing, Nanjing 211100, China; 3. Applied Mechanics and Structure Safety Key Laboratory of Sichuan Province, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** The position and shape information of defects can be determined by using ultrasonic guided wave to invert the defects in the plate structures. Aiming at the problem that the travel time imaging method is not effective in the low frequency range, an ultrasonic guided wave defect inversion imaging method based on wave field is proposed. According to the wave equation, the imaging principle of beamforming is derived, and the scattering field data in Born approximation are used to coherently stack the values of pixels in the imaging area to obtain the position and shape of defects. Through the mapping relationship between beamforming and Fourier diffraction theorem in frequency domain, the results of beamforming are transformed into diffraction tomography images, and some clearer inversion images are obtained. Aiming at the problems of artifact and noise in diffraction tomography, the two-dimensional variational mode decomposition (2D-VMD) method is used to denoise the images, which can effectively remove the artifact and the burr of defect contour edge, and

**基金项目:** 南京航空航天大学研究生创新基地 (实验室) 开放基金 (kfj20200105); 国家自然科学基金 (11972276, 12061131013, 12172171); 航空航天结构力学及控制全国重点实验室自主课题 (MCMS-I-0520G01); 广西制造系统与先进制造技术重点实验室项目 (17-259-05-005Z); 应用力学与结构安全四川省重点实验室开放课题 (SZDKF-202002)。

**收稿日期:** 2021-05-11; **修订日期:** 2021-08-06

**通信作者:** 钱征华, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: qianzh@nuaa.edu.cn。

**引用格式:** 武靖昌, 张应红, 钱智, 等. 基于超声导波波束成形的缺陷反演方法研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(3): 497-506. WU Jingchang, ZHANG Yinghong, QIAN Zhi, et al. Research on reconstruction method based on guided wave beamforming imaging[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(3): 497-506.

further improve the imaging resolution. The inversion results show that the proposed method can accurately reconstruct the location, size and shape of the thinning defects on the aluminum plate with high resolution.

**Key words:** solid mechanics; ultrasonic guided wave; defect inversion; beamforming; diffraction tomography; 2D-VMD

超声导波在材料内部传播时,材料的声学特性和内部组织变化会对声波的传播产生一定影响,而超声导波本身并不会对材料造成破坏,因而可将超声导波应用于对结构进行快速和大范围的无损检测<sup>[1]</sup>。随着技术发展,将检测的缺陷信息以直观、可视化的方式呈现出来成为无损检测技术新的发展方向,因此缺陷的反演理论也随之发展起来,受到国内外研究人员的广泛关注。

层析成像是缺陷反演的关键技术之一,传统的层析成像方法将声波在结构内部的传播看作直线传播,忽略声波传播过程中的衍射现象,利用导波的频散特性,通过走时来反演缺陷。国内方面,张海燕等<sup>[2]</sup>采用压电超声换能器激发 Lamb 波,利用代数重建技术(Algebraic reconstruction technique, ART)对金属薄板中的通孔缺陷进行了超声 Lamb 波层析成像实验。许成等<sup>[3]</sup>研究了稀疏重建算法,在较少探头的环境下重构出缺陷的位置。张海燕等<sup>[4]</sup>采用 PZFlex 软件模拟超声相控阵全矩阵捕获功能,使用频率-波数域成像算法重构了铝板缺陷,并在实验中验证。魏争等<sup>[5]</sup>采用了新型结构的全向电磁超声换能器(Electromagnetic acoustic transducer, EMAT)激发 Lamb 波,利用伪 Wigner-Ville 分布(Pseudo Wigner-Ville distribution, PWVD)对新型换能器进行走时提取,根据走时信号反演出铝板上的减薄缺陷。罗宏建等<sup>[6]</sup>通过使用激励频率为 2 MHz 的 S1 模态检测中厚度铝制焊接容器的缺陷,并通过超声导波成像系统得到容器全壁厚图像,清晰地识别出容器的缺陷。王强等<sup>[7]</sup>采用概率损伤重构算法(Reconstruction algorithm for probabilistic inspection of damage, RAPID)对结构进行损伤监测,通过校正信号差异系数值(Signal difference coefficient, SDC)强化重构图像的信息,并根据 SDC 分布评估裂纹的长度。张海燕,魏争等在反演的过程中将声波传播认为直线传播,忽略了波的衍射现象,而在较高频率下这种方法也可以准确地反演出缺陷的信息;而 RAPID 算法依赖于信号差异系数的定义,该系数的定义可以直接影响反演的结果。

而在国外方面,Leonard 等<sup>[8-9]</sup>基于直线传播理论深入研究了基于导波走时层析成像的缺陷厚度测量方法,并对弯曲射线成像与直线成像,结果表明弯曲射线成像的结果更好。Malyarenko

等<sup>[10]</sup>认为在低频范围内,波的衍射现象是不可忽略的,而衍射是影响导波走时层析成像的一个主要问题。Kak 等<sup>[11]</sup>证明了当波长接近 0 时直线层析成像和衍射层析成像是等同的,从另一个方面说明了低频范围内考虑波衍射现象的重要性。Rohde 等<sup>[12]</sup>研究了弯曲不均匀性的衍射层析成像,在结构健康监测中通过板结构厚度、密度、弹性模量或剪切模量的变化反演缺陷的信息。这些学者发现了低频范围内考虑波的衍射现象的重要性,且 Kak 等人从理论上证明了低频范围内考虑波的衍射现象的重要性。

为了能够在无损检测中得到高分辨率的缺陷轮廓和位置信息,本文以铝板为研究对象,利用 ABAQUS 有限元软件对铝板的导波缺陷检测进行仿真,通过激发较为纯净的反对称(A0) Lamb 波模态来采集波场数据,并利用仿真数据进行波束成形成像,实现了缺陷的反演。再通过频域映射将波束成形结果转化为衍射层析成像,并引入了二维变分模态分解法对图像进行降噪处理,提高了缺陷反演图像的质量。

## 1 波束成形成像原理

不考虑密度变化的情况下,各向同性弹性材料中波动方程<sup>[13]</sup>如下

$$\nabla^2 p(\mathbf{r}) - \frac{1}{c^2(\mathbf{r})} \cdot \frac{\partial^2 p(\mathbf{r})}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

式中: $p(\mathbf{r})$ 为 $\mathbf{r}$ 处的物理场幅值; $c(\mathbf{r})$ 为声速。对式(1)做时频变换可以改写为

$$(\nabla^2 + k_u^2)\varphi = -O\varphi \quad (2)$$

式中: $\varphi$ 为波场的标量散射势能(等于物理场的傅里叶变换); $k_u = 2\pi f/c_u$ 为均匀背景介质的波数, $f$ 为频率, $c_u$ 为均匀背景介质的相速度。目标函数 $O(\mathbf{r})$ 的数学表达式<sup>[14]</sup>如下

$$O(\mathbf{r}) = k_u^2 \left[ \left( \frac{c_u}{c(\mathbf{r})} \right)^2 - 1 \right] \quad (3)$$

式中 $O(\mathbf{r})$ 为需要重构的目标函数。从式(3)可以看出,目标函数是可以由相速度分布来表达。

为了求解方程(2),定义 $\varphi_u$ 为无缺陷均匀场的解,则 $\varphi_u$ 可以作为方程(4)的解。

$$(\nabla^2 + k_u^2)\varphi_u = 0 \quad (4)$$

引入 Green 函数,  $G_u$  作为方程(5)的解。

$$(\nabla^2 + k_u^2) G_u = \delta \quad (5)$$

式中  $\delta$  为 Dirac 算子。方程(5)在二维和三维情况下数值解分别为

$$G_u^{2D}(x, y) = -\frac{i}{4} H_0^{(1)}(k_u |x - y|) \quad (6)$$

$$G_u^{3D}(x, y) = \frac{\exp(ik_u |x - y|)}{4\pi |x - y|} \quad (7)$$

式中  $x$  和  $y$  分别为测量点和源点;  $H_0^{(1)}$  为 0 阶第一类 Hankel 函数。

联立方程(2,4,5)并结合板中的 Green 函数可以导出经典 Lippmann-Schwinger 方程

$$\varphi = \varphi_u - \int_{\Omega} G_u O \varphi dx' \quad (8)$$

式中  $x'$  为计算的场点位置。从式(8)可以看出,总场可以看作均匀场和散射体所造成的“源”的叠加。

为了求解方程(8),引入 Born 近似,  $\varphi \approx \varphi_u$ , 式(8)改写为

$$\varphi \approx \varphi_u - \int_{\Omega} G_u O \varphi_u dx' \quad (9)$$

由于本文所采用的缺陷比较小,因此适用于 Born 近似的弱散射条件。

定义散射场为  $\varphi_s = \varphi - \varphi_u$ , 由式(9)可得

$$\varphi_s(x, y) \approx - \int_{\Omega} G_u(x, x') O(x') \varphi_u(y, x') dx' \quad (10)$$

式中  $x$  为接收换能器坐标,  $y$  为发射换能器坐标,如图 1 所示。

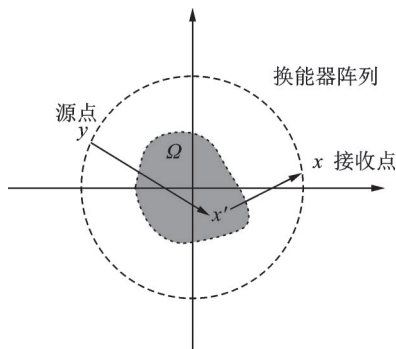


图 1 波束成形成像物理模型图

Fig.1 Physical model of beamforming imaging

将从  $y$  点的入射波场用等效的 Green 函数代替,式(10)可以修正为

$$\varphi_s(x, y) \approx - \int_{\Omega} G_u(x, x') O(x') G_u(y, x') dx' \quad (11)$$

若考虑均匀介质中仅有一个点散射体,则式(11)修改为

$$\varphi_s(x, y) = G_u(x, x') q G_u(y, x') \quad (12)$$

式中  $q$  为  $x'$  处点散射体的散射势能。所以单次测

量下已知位置的点散射体的散射势能可以精确表述为

$$q = \frac{\varphi_s(x, y)}{G_u(x, x') G_u(y, x')} \quad (13)$$

式(13)仅是单发单收情况下的表达式,实际情况中环形换能器阵列采用单发多收,且每一个换能器都要发射一次入射波,所以式(13)改写为

$$J_{BF}(x') = \iint_S \frac{\varphi_s(x, y)}{G_u(x, x') G_u(y, x')} dx dy \quad (14)$$

式(14)即为波束成形理论的表达式,式中  $S$  为环形换能器路径,  $J_{BF}$  为  $x'$  处总的散射势能。由式(14)可以看出,若  $x'$  处存在缺陷,不同组合的换能器在该点的散射势能将会叠加,从而得到与无缺陷区域有差异的值。

## 2 从波束成形到衍射层析成像

Simonetti 等<sup>[15]</sup>通过引入物空间坐标和像空间坐标证明对于环形阵列而言,波束成形和衍射层析成像(Diffraction tomography, DT)在波数域存在一种线性映射关系

$$I_{BF}(\Omega) = G(\Omega) I_{DT}(\Omega) \quad (15)$$

式中  $I_{BF}(\Omega)$  为波束成形图片的二维傅里叶变换;  $I_{DT}(\Omega)$  为衍射层析成像图片的二维傅里叶变换;  $G(\Omega)$  为滤波函数,其表达式为<sup>[16]</sup>

$$G(\Omega) = \frac{8\pi^2 \Pi}{k_u |\Omega| \sqrt{1 - |\Omega|^2 / 4k_u^2}} \quad (16)$$

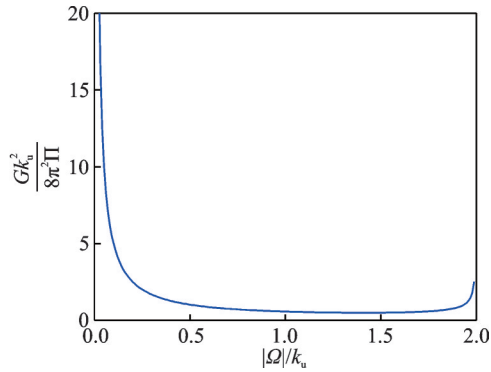
$$\Pi = \frac{\exp(i\pi/4)}{\sqrt{8\pi k_u}} \quad (17)$$

由式(15)可以看出,通过滤波函数  $G(\Omega)$  可以将衍射层析成像图片转化为波束成形图片。从滤波函数  $G(\Omega)$  的无量纲图中(图 2)可以看出,  $G(\Omega)$  在低频区域的值比较大,而在高频区域的值远小于低频区域。因此,波束成形图像与衍射层析成像图像相比,其在不同的空间频率处具有不同的权重,如果将权重移除则可以得到衍射层析成像图像。

如果已知  $I_{BF}(\Omega)$  的情况下,通过式(18)求得  $I_{DT}(\Omega)$ 。

$$I_{DT}(\Omega) = \frac{I_{BF}(\Omega)}{G(\Omega)} \quad (18)$$

得到  $I_{DT}(\Omega)$  后对其进行二维逆傅里叶变换即可得到衍射层析成像图像。本文中,求解衍射层析成像图像分两步,首先求得波束成形图像,将其转化到波数域,然后通过式(18),再进行二维逆傅里叶变换得到衍射层析成像图像。

图2 滤波函数  $G(\Omega)$  无量纲示意图Fig.2 Dimensionless diagram of the filter function  $G(\Omega)$ 

### 3 数值仿真及数据处理

使用ABAQUS有限元软件进行建模仿真,模拟铝板(弹性模量、密度、泊松比分别为70 GPa、2 700 kg/m<sup>3</sup>和0.33)的缺陷检测,并提取仿真数据用于波束成形成像理论。有限元模型采用

150 mm×150 mm×4 mm的铝板,在板表面布置一个直径为100 mm的环形阵列,并在环形阵列上布置64个探头,如图3所示。仿真时间步长设置为 $1 \times 10^{-7}$  s,总时间为 $1 \times 10^{-4}$  s,单元类型采用C3D8R单元,网格大小约为波长的1/9。分别对圆形、矩形、三角形、椭圆不同形状的缺陷进行仿真,缺陷的位置设置包括正中心、偏心、对角线等几种情况,如表1所示。

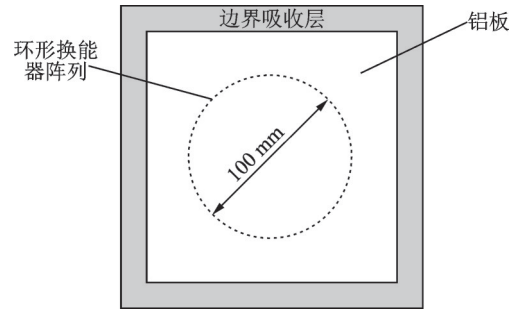


图3 仿真模型示意图

Fig.3 Diagram of simulation model

表1 数值仿真中不同缺陷信息

Table 1 Different defects information in finite element simulation

缺陷类型	位置	尺寸
圆形	中心 偏心(中心偏右20 mm)	半径10 mm,深2 mm
双圆形	对角线分布,圆心相距41 mm	大圆半径10 mm,小圆半径5 mm,深2 mm
矩形	中心	相邻两边长均为20 mm,深2 mm
三角形	中心	边长20 mm的等边三角形,深2 mm
椭圆	中心	长轴20 mm,短轴10 mm,深2 mm

为减少板边缘反射波的影响,在边界上设置吸收层模拟无限大的板,便于信号分析和采集。并对一组无缺陷模型的计算,将其作为均匀场 $\varphi_u$ ,含有缺陷的模型采集到的数据为总场 $\varphi$ ,由散射场的定义就可以计算出散射场。在给定的探头位置处施加垂直于板面的载荷激发Lamb波,其他63探头作为信号的接收点,采集垂直于板面的位移信号。激励源为时间域内一个汉宁窗调制的5周期余弦信号,其表达式如下

$$F(t) = 5 \times 10^{-3} \times \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi ft}{5}\right)\right) \times \cos(2\pi ft) \quad (19)$$

本文选取中心频率 $f$ 为250 kHz。由上述可知仿真铝板的频厚积为1 MHz•mm,通过铝板频散曲线可知对应的相速度为2 327 m/s,群速度为3 130 m/s。

环形换能器阵列<sup>[17]</sup>设置旨在采集尽可能多的波场信息,通过轮流改变激发和接收探头来获得全方位的波场信息。第一个探头激发Lamb波,其余

63个探头接收波场信息,然后第二个探头激发Lamb波,剩下的63个探头接收,依次类推激发点遍历所有探头。

由于Lamb波存在频散现象,为了激发较为纯净的A0模态Lamb波,避免S0模态信号的干扰,仿真中通过在激励点处的上下板面施加垂直于板面的反对称激励载荷来激发Lamb波,激发出的波形如图4所示。从图中可以看出存在2个模态,但是第1个模态的幅值与第2个模态的幅值比为40 dB,因此,本文忽略S0模态的影响。为了验证仿真中激发出的Lamb波是否为A0模态,选取一个采样点上的信号进行验证。

通过对激发点和样本点的时域信号进行小波变换<sup>[18]</sup>,如图5所示,通过计算可以得到信号的群速度为3 053 m/s,因此,可以判断所激发的主要模态为A0模态。

将无缺陷模型采集的数据作为均匀场 $\varphi_u$ ,含有缺陷模型采集的数据作为全场 $\varphi$ ,由散射场的定义: $\varphi_s = \varphi - \varphi_u$ ,可以计算得到散射场 $\varphi_s$ 的数据,

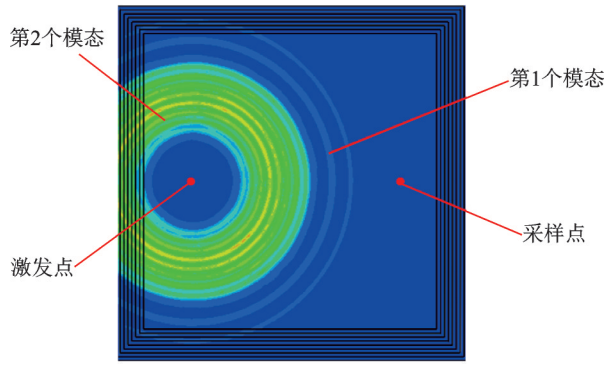
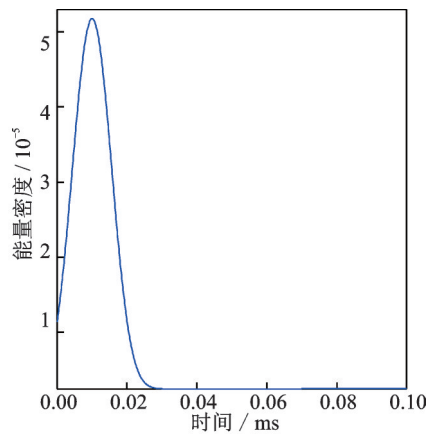
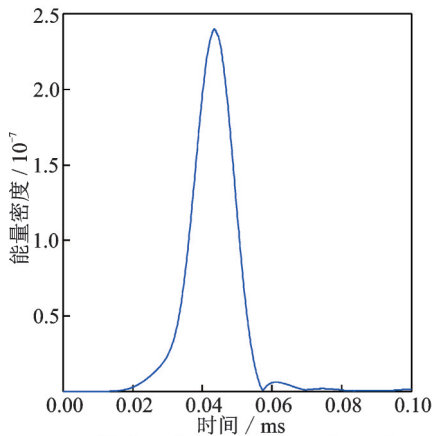


图 4 铝板中 Lamb 波传播示意图

Fig.4 Diagram of Lamb wave propagation in aluminum plate



(a) Excitation point image of wavelet



(b) Sampling point image of wavelet

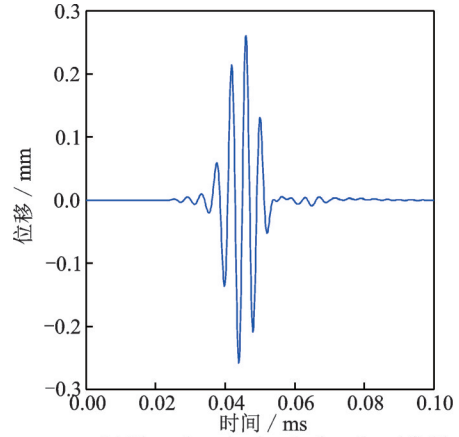
图 5 激发点和采样点小波变换图像

Fig.5 Wavelet transform curve of excitation point and sampling point

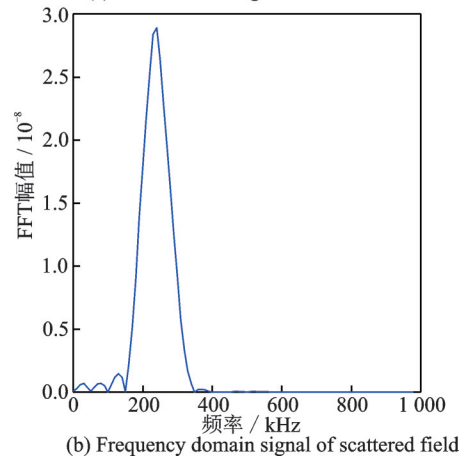
将  $\varphi_s$  代入式(14)就可以求得波束成形图像。

本文选取接收点处的离面位移作为波场信号,而在仿真软件中直接采集得到的是时域信号,但是时域信号表示缺陷特征的能力较弱,因此将散射场的时域信号转换为频域信号来表征散射场。单个点的散射场时域信号和频域信号如图 6 所示。

从图 6 可以看出,将散射场数据转化到频域后,散射场在频域范围内是具有一定带宽的,本文



(a) Time-domain signal of scattered field



(b) Frequency domain signal of scattered field

图 6 散射场时域和频域信号

Fig.6 Time domain and frequency domain signal of scattering field

选取与激发频率相同的中心频率 250 kHz 的对应值作为散射场数据。通过不断地更换激发点和接收点便可以获得整个换能器阵列所采集的散射场数据。本文所采用的 64 个探头的环形换能器阵列所对应的整个散射场矩阵是一个  $64 \times 63$  的复数矩阵,激发点的信号不作为接收信号,且复数矩阵保留了信号的相位信息。Simonetti 等<sup>[19]</sup>证明了环形阵列的下完全采集波场信息的探头数量满足

$$N \geq \frac{2\pi D}{\lambda} \quad (20)$$

式中: $D$ 为成像区域直径, $\lambda$ 为入射波波长。由式(20)可得,本文中探头数量需大于 51,综合考虑本文选取了 64 个探头。

## 4 缺陷反演

如果在成像点  $x'$  处存在缺陷,则导波在经过缺陷时会产生散射现象,那么  $x'$  处式(14)的求和会出现相干求和而导致该点出现一个较大的散射强度值;如果该成像点  $x'$  没有缺陷,那么该点的求和不相干,并且这些点的值会自行抵消,该点的散射强度较小,通过计算成像区域的各个像素点的散射强

度就可以反演出整个区域的缺陷分布图。

由式(14)可知成像点  $x'$  选取会影响图像的反演结果,本文选用的成像区域为直径 100 mm 的圆形区域,成像区域外的像素值统一置为 0。波束成形和 DT 的缺陷反演结果如图 7 所示。图

7 中高亮的区域表示该区域的散射强度较大,存在缺陷;蓝色的区域与背景场颜色相近,表示该区域的散射强度较小,无缺陷;图中红色的线框表示实际模型缺陷的轮廓,以显示缺陷位置、形状和大小。

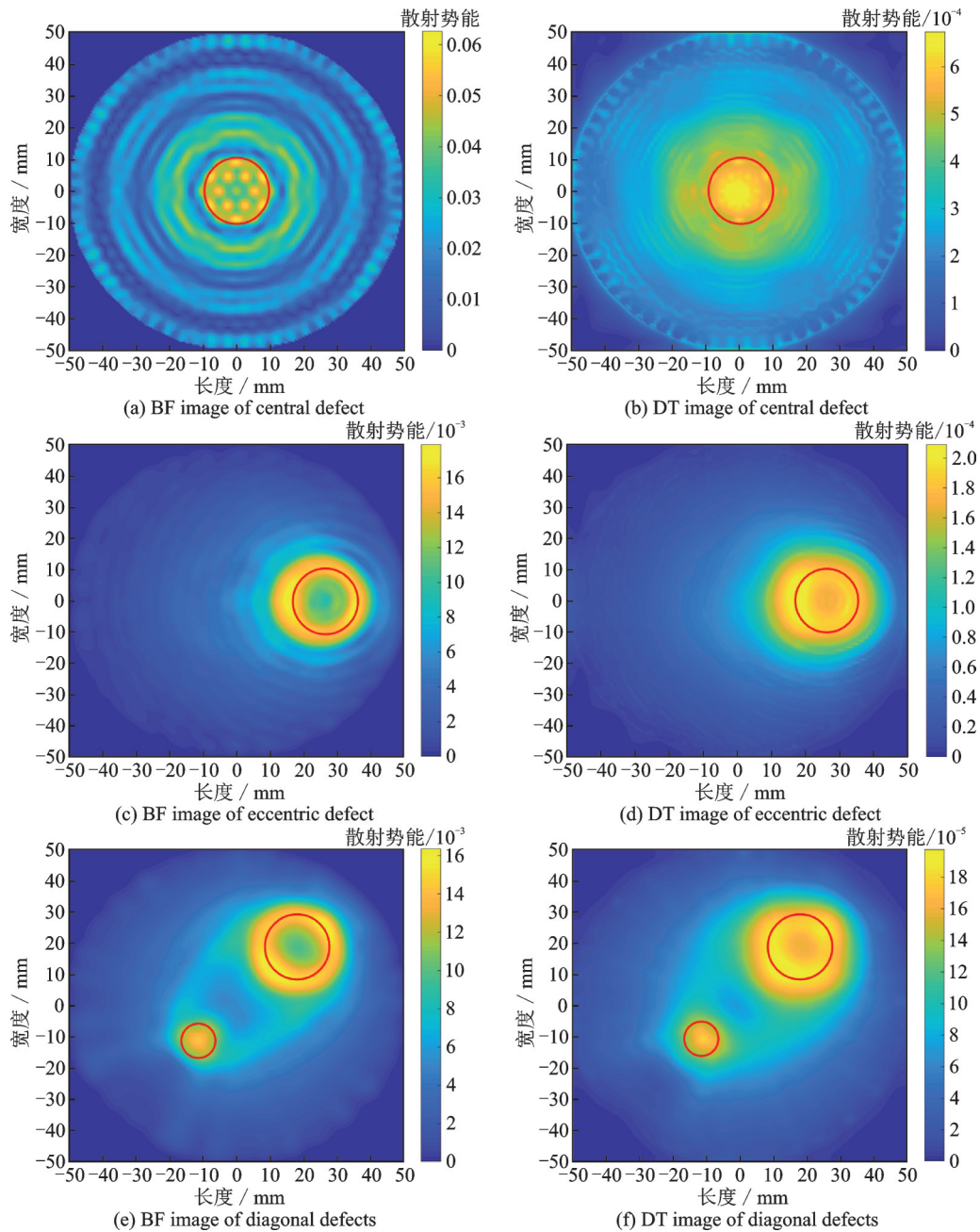


图7 不同位置的缺陷成像结果

Fig.7 Defect imaging results at different positions

从图7可以看出,两种成像方法均可以较好地重构出缺陷的位置和大小,重构出的缺陷位置与仿真模型的缺陷位置相符,但反演出的缺陷尺寸略大于实际缺陷尺寸。二者相比,波束成形图像的噪声更大且在缺陷内部会形成空心,造成这种结果的原因可能是因为波在缺陷内部边界之间来回反射。而衍射层析成像图像去除了波束成形在不同频率处的不均匀权重,降低了图像的噪声,提高了反演

的效果。

上述3种不同位置的缺陷均为圆形,而圆形缺陷形状较为规整,是一种简单的缺陷,而实际结构的缺陷较为复杂。为了检验本文成像算法对较为复杂的缺陷反演效果,进一步对方形、三角形及椭圆缺陷模型进行仿真和缺陷反演,缺陷的形状、位置和大小如图8(a, b, e)所示,波束成形方法反演结果如图8(b, d, f)所示。

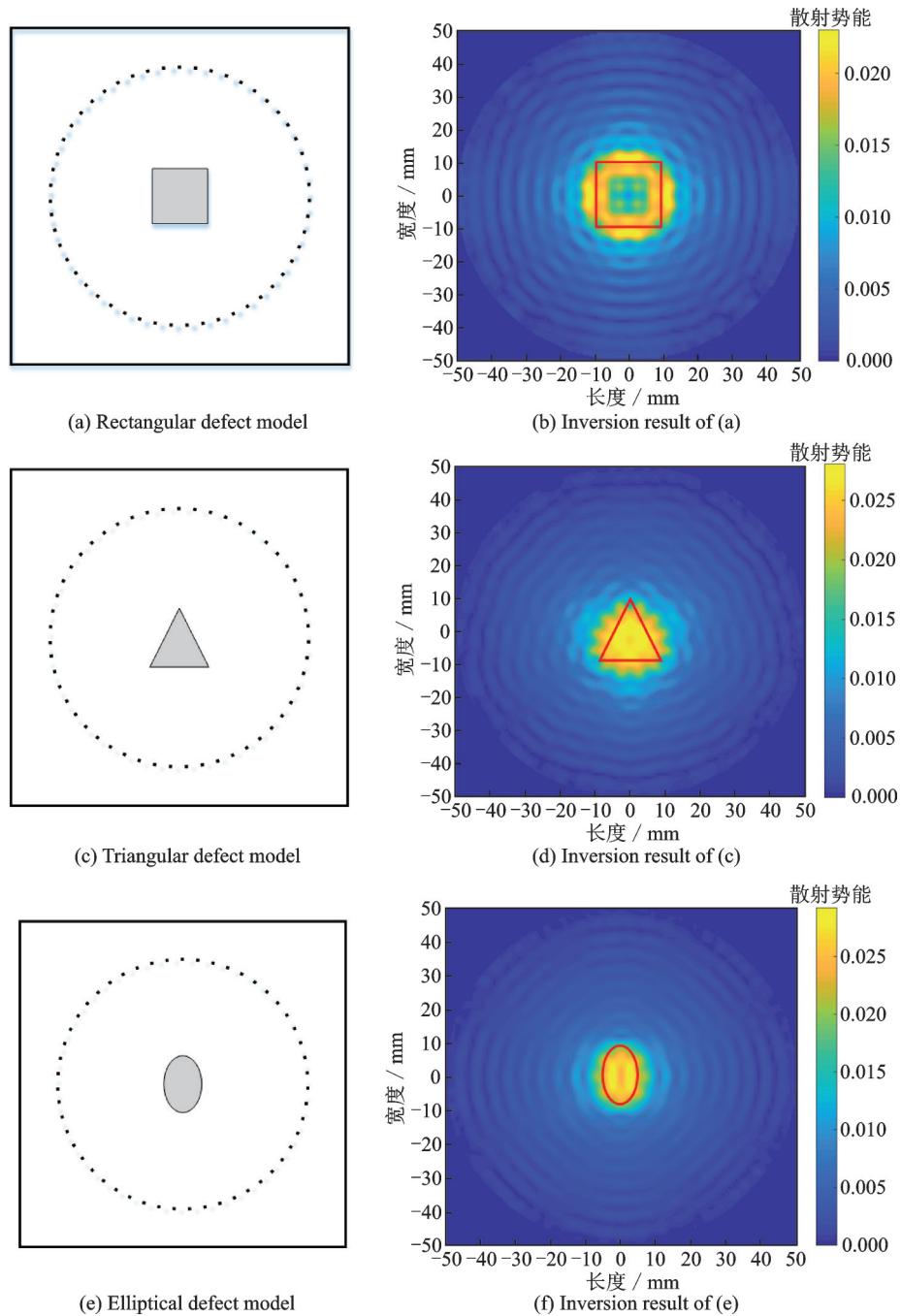


图 8 其他形状缺陷波束成形反演结果

Fig.8 Inversion results of beamforming for other shape defects

从图 8 可以看出,波束成形方法可以有效地反演方形、三角形和椭圆形的缺陷,而且可以分辨出缺陷的形状。但是反演出的结果略大于实际尺寸,且对于有尖锐拐角的缺陷无法反演出其拐角部分,并且图像存在波浪状的伪影。对于具有尖锐拐角的缺陷,将其波束成形图像映射为衍射层析成像图像后效果如图 9 所示,从图中可以看出,矩形和三角形缺陷形状变得难以分辨。为了进一步提高图像成像效果,减小图像的伪影,获得更好的缺陷轮廓图像,下面引入二维变分模态分解法(2D-VMD)来提高图像的质量。

## 5 二维变分模态分解法(2D-VMD)

二维变分模态分解法<sup>[20]</sup>是一种基于一维变分模态分解法<sup>[21]</sup>(Variational mode decomposition, VMD)衍生出来的图像处理方法。该方法利用了自身的自适应性和非递归性,在分解图像的时候可以维持自身的特征,并且分解后的每种模态对应着一定中心频率的带宽,将这种方法应用于图像降噪,可以去除图像中的多余噪声。

广义 2D-VMD 公式如式(20)所示,该公式由二维解析信号定义,式(21)为求解该公式在约束

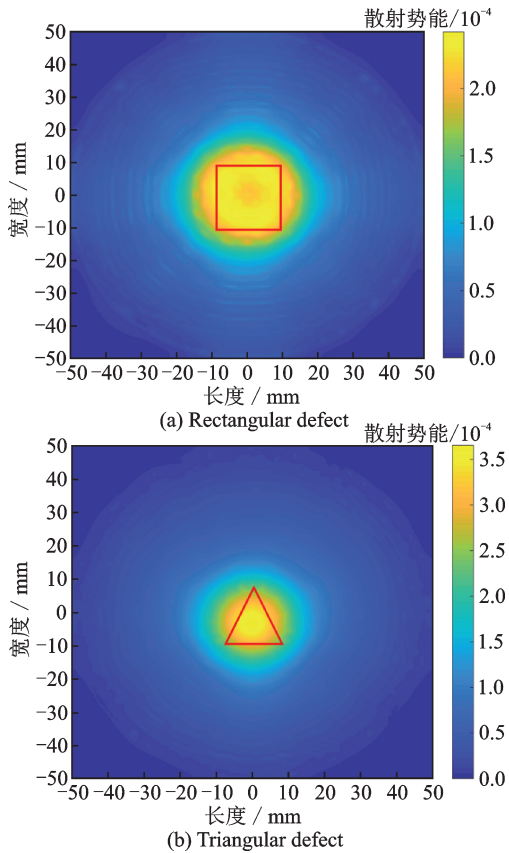
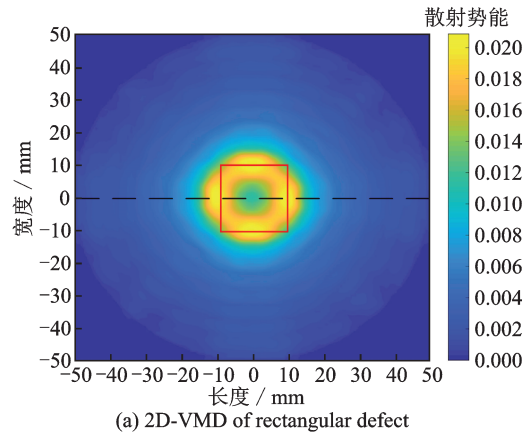


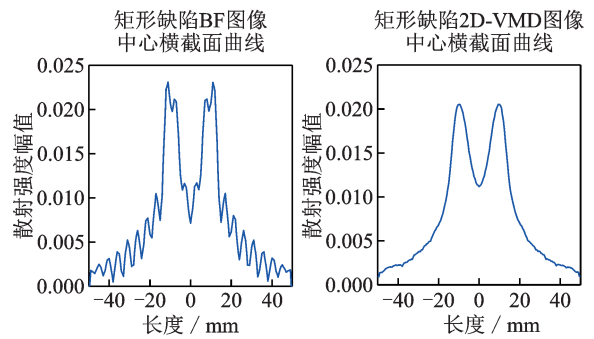
图9 矩形和三角形缺陷衍射层析图像

Fig.9 Diffraction tomography images of rectangular and triangular defects

消除掉边界处锯齿状的凸起,让缺陷轮廓更加光滑,使得反演的缺陷形状和尺寸更加接近真实情况。



(a) 2D-VMD of rectangular defect



(b) Scattering intensity curve of central cross section of rectangular defect image before and after noise reduction

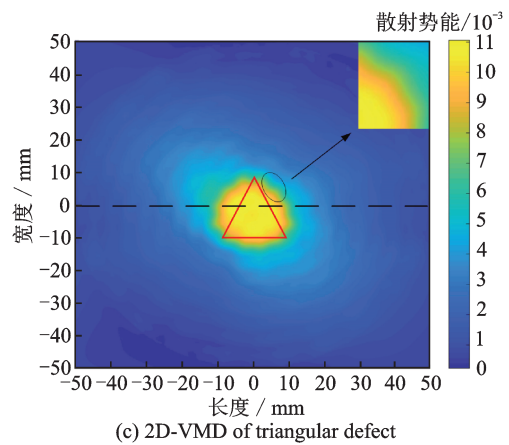
条件下的最小值。

$$\begin{cases} \min_{u_k, \omega_k} \left\{ \sum_k \alpha_k \left\| \nabla \left[ u_{AS,k}(x) e^{-j\langle \omega_k, x \rangle} \right] \right\|_2^2 \right\} \\ \text{s.t. } \forall x : \sum_k u_k(x) = f(x) \end{cases} \quad (21)$$

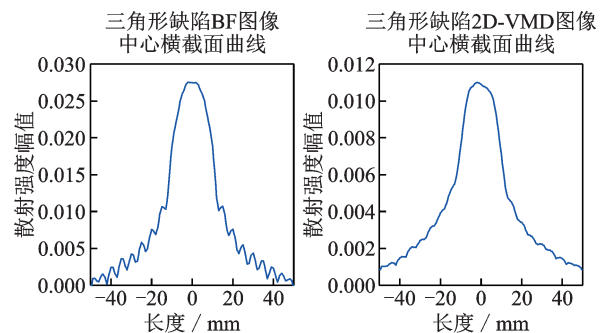
式中: $u_{AS,k}(x)$ 为该模式的解析信号; $u_k(x)$ 为待分解模式; $\omega_k$ 为该模式下的中心频率; $f(x)$ 为原始二维信号。

通过引入二次罚函数和拉格朗日乘子代替约束,并采用交替方向乘子法<sup>[22]</sup>对式(20)进行优化,通过不断在频域内更新 $\omega_k$ 和 $u_k$ ,直到达到收敛要求,求解出不同阶次的模式。在图像中低频信号代表了图像的主体轮廓,而高频信号代表了图像的细节和噪声,因而噪声存在于图像的高频信息中,2D-VMD算法由多个Wiener滤波器构成,可以抑制图像信号中的高频成分,所以重构回去的图像就可以达到去除高频噪声的目的,去噪结果如图10所示,其中(a,c,e)为2D-VMD结果,图10(b,d,f)为黑色虚线处的降噪前后的散射强度幅值曲线。

从图10的2D-VMD分解和中心横截面曲线结果中可以看出,该方法可以有效地降低图像中伪影,



(c) 2D-VMD of triangular defect



(d) Scattering intensity curve of central cross section of triangular defect image before and after noise reduction



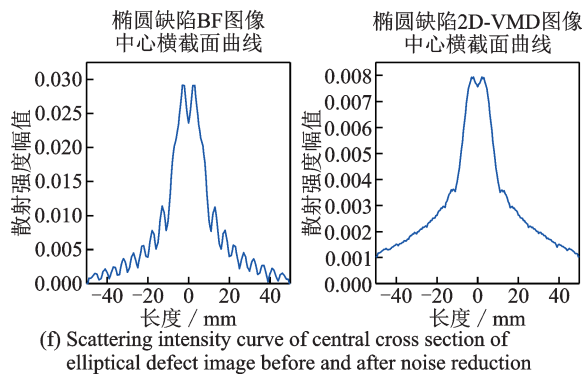
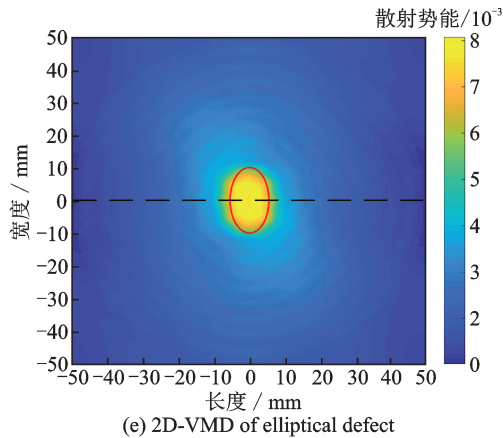


图10 二维变分模态分解法降噪结果及降噪前后中心横截面曲线

Fig.10 Noise reduction results of 2D-VMD and central cross sections curves before and after noise reduction

## 6 结 论

本文分析了导波无损检测中波束成形缺陷反演算法,并通过其与衍射层析成像算法之间的映射关系,利用ABQUAS有限元软件对含有表面缺陷的铝板进行了Lamb波检测的仿真,通过采集的仿真数据实现了缺陷反演,并采用2D-VMD方法对反演结果进行降噪,反演和降噪结果表明:

(1) 波束成形算法在用于Lamb波导波无损检测时,可以较为准确反演出缺陷的位置信息,但是缺陷轮廓不够准确。

(2) 通过波束成形和衍射层析成像之间的映射关系,可以得到衍射层析成像的图像,其噪声会更小,反演的结果也更好一些,但是对于有尖角的缺陷,映射过来的衍射层析成像图像则无法分辨其形状,且存在大量的噪声和伪影。

(3) 2D-VMD可以有效地降低图像的噪声,提高反演成像的分辨率,使得反演的缺陷轮廓特征更为明显。

(4) 本文所采用的方法利用缺陷信号的相位信

息来实现缺陷的反演,考虑了导波在传播过程中的衍射现象,更符合真实导波的传播特性。

基于导波的缺陷反演受很多因素的影响,现有的缺陷反演方法都各有优缺点,实际应用时需要根据检测对象和目的来选择检测手段和反演算法。如果只是需要获得缺陷的大致位置和形状,那么采用波束成形方法或者采用射线方法就可以。而如果想要对缺陷的深度等信息进行量化评估,那么本文所提出的方法提供了一个有意义的方案。但是,本文在理论推导中采用了Born近似,而Born近似的适用范围有限仅适用于弱散射情况,这使得大缺陷、强散射情况下本文所采用的理论方法失效。因此,具有普适性的缺陷反演算法需要进一步研究。

## 参 考 文 献:

- [1] 何存富,吴斌,范晋伟. 超声柱面导波技术及其应用技术进展[J]. 力学进展, 2001(2):203-214.  
HE Cunfu, WU Bin, FAN Jinwei. Research progress of ultrasonic cylindrical guided wave technology and its application[J]. Advances in Mechanics, 2001 (2) : 203-214.
- [2] 张海燕,周全,吕东辉,等. 各向同性薄板中横穿孔缺陷的超声Lamb波层析成像[J]. 声学学报, 2007(1): 83-90.  
ZHANG Haiyan, ZHOU Quan, LV Donghui, et al. Ultrasonic Lamb wave tomography of transverse perforation defects in isotropic thin plates[J]. Acta Acustica, 2007(1): 83-90.
- [3] 许成,张海燕. 稀疏重建的兰姆波结构损伤定位[J]. 声学技术, 2016, 35(6): 537-541.  
XU Cheng, ZHANG Haiyan. Damage localization with Lamb waves via sparse reconstruction[J]. Technical Acoustics, 2016, 35(6): 537-541.
- [4] 张海燕,段伟华. 频率-波数域的薄铝板缺陷检测研究[J]. 声学技术, 2020, 39(4): 434-438.  
ZHANG Haiyan, DUAN Weihua. Defect detection of thin aluminum plates in frequency-wavenumber domain [J]. Technical Acoustics, 2020, 39(4): 434-438.
- [5] 魏争,黄松岭,王坤,等. 基于全向EMAT的金属板缺陷Lamb波层析成像方法[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2014, 54(12): 1609-1614, 1620.  
WEI Zheng, HUANG Songling, WANG Shen, et al. Lamb wave tomography method to identify metallic plate defects based on omni-directional EMAT[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technol-

- ogy, 2014, 54(12): 1609-1614,1620.
- [6] 罗宏建,周重回,王炯耿,等.铝制焊接容器超声导波成像检测[J].应用声学,2014,33(6):520-527.  
LUO Hongjian, ZHOU Chonghui, WANG Jionggeng, et al. Ultrasonic guided waves imaging testing on aluminum welded shell[J]. Applied Acoustics, 2014, 33(6): 520-527.
- [7] 王强,胥静,王梦欣,等.结构裂纹损伤的Lamb波层析成像监测与评估研究[J].机械工程学报,2016,52(6):30-36.  
WANG Qiang, XU Jing, WANG Mengxin, et al. Lamb Wave tomography technique for crack damage detection[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(6): 30-36.
- [8] LEONARD K R, HINDERS M K. Guided wave helical ultrasonic tomography of pipes[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2003, 114 (2) : 767-774.
- [9] LEONARD K R, HINDERS M K. Lamb wave tomography of pipelike structures[J]. Ultrasonics, 2005, 43(7): 574-583.
- [10] MALYARENKO K V, HINDERS M K. Ultrasonic Lamb wave diffraction tomography[J]. Ultrasonics, 2001, 39(4): 269-281.
- [11] KAK A, SLANEY M. Principles of computerized tomography imaging[M]. Piscataway: IEEE Press, 1988: 203-223.
- [12] ROHDE A H, VEIDT M, L R ROSE, et al. A computer simulation study of imaging flexural inhomogeneities using platewave diffraction tomography[J]. Ultrasonics, 2008, 48(1): 6-15.
- [13] HUTHWAITE P E. Quantitative imaging with mechanical waves[D]. Paris: Imperial College London, 2012.
- [14] BORN M, WOLF E. Principles of optics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999: 77-78.
- [15] SIMONETTI F, HUANG L. From beamforming to diffraction tomography[J]. Journal of Applied Physics, 2008, 103(10): 103-110.
- [16] LUKE Y L. The integration of bessel functions[J]. IMA Journal of Applied Mathematics, 1968, 4(3) : 315-319.
- [17] BELANGER P, CAWLEY P, SIMONETTI F. Guided wave diffraction tomography within the born approximation[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, 2010, 57(6): 1405-1418.
- [18] 曹毅,张榆锋,毛选珍.小波分析及其在信号处理中的应用[J].现代电子技术,2003(15):35-37.  
CAO Yi, ZHANG Yufeng, MAO Xuanzhen. Wavelet analysis and its application for signal processing[J]. Modern Electronics Technique, 2003(15):35-37.
- [19] SIMONETTI F, HUANG L, DURIC N. On the spatial sampling of wave fields with circular ring apertures[J]. Journal of Applied Physics, 2007, 101(8) : 83-103.
- [20] KONSTANTIN D, ZOSSO D. Two-dimensional variational mode decomposition [C]//Proceedings of International Workshop on Energy Minimization Methods in Computer Vision and Pattern Recognition. Hong Kong, China: Springer, 2015:197-208.
- [21] KONSTANTIN D, ZOSSO D. Variational mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3):531-544.
- [22] BERTSEKAS D P. Multipler methods: A survey[J]. IFAC Proceedings Volumes, 1975, 8(1): 351-363.

(编辑:夏道家)