

引用格式: 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, 39(4): 434-438.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2020.04.009

频率-波数域的薄铝板缺陷检测研究

张海燕, 段伟华

(上海大学通信与信息工程学院, 上海 200444)

摘要: 文章将频率-波数域成像算法应用于薄铝板内圆形穿孔缺陷的检测。采用 PZFlex 软件建立多阵元线性阵列仿真模型, 在薄铝板内激发出 Lamb 波, 模拟超声相控阵全矩阵捕获功能。实验中使用 M2M 公司的超声相控阵仪器对带有通孔缺陷的薄铝板进行全矩阵捕获。基于全矩阵数据完成自发自收模式下的频率-波数法损伤重建, 对全矩阵数据进行三维傅里叶变换, 利用所有阵列的全部信息完成损伤重建。实验结果表明: 频率-波数域成像法能够精确地表征出圆孔损伤的大小和形状, 对单缺陷及不同大小、距离的双缺陷均具有良好的检测效果。相对于全聚焦成像法, 频率-波数域成像法具有更高的分辨率。

关键词: 频率-波数域; Lamb 波; 损伤重建; 全矩阵

中图分类号: TB559

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2020)-04-0434-05

Defect detection of thin aluminum plates in frequency-wavenumber domain

ZHANG Haiyan, DUAN Weihua

(School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: In this paper, the frequency-wavenumber (F-W) domain imaging algorithm is used to detect circular perforation defects in thin aluminum plate. A simulation model of multi-element linear array is established by PZFlex software, and the Lamb wave excited in a thin aluminum plate is used for simulating the full matrix capture function of ultrasonic phased array. In the experiment, the ultrasonic phased array instrument of M2M Company is used to capture the full matrix data of the thin aluminum plate with perforation defects. Based on the full matrix data, the F-W domain imaging method is used to reconstruct the defect damage in the self-transmitting and self-receiving mode. The 3D Fourier transform is performed on the full matrix data, and all the information of the array is used to complete the damage reconstruction. Experimental results show that the F-W domain imaging method can accurately characterize the size and shape of the circular damage, and has a good detection effect for a single defect and double defects of different sizes and distances. Compared with the total focusing method (TFM), the F-W domain imaging method has higher resolution.

Key words: frequency-wavenumber (F-W) domain; Lamb wave; damage reconstruction; full matrix

0 引言

铝具有质量轻、抗腐蚀能力强以及易于加工等特点, 因此铝制品被广泛应用于航空航天、汽车制造、电子产品制造等技术领域。伴随着国民生活水平的不断提高, 人们对铝板表面质量的要求也越来越高, 但由于制造技术、原材料质量以及设备老化等原因, 铝板表面容易出现各种各样的缺陷。通过人工的方式来检测这些缺陷, 劳动强度大, 而且效

率低下, 不利于高效率生产^[1]。近年来, 无损检测技术得到了快速的发展, 与人工检测方法相比, 利用无损检测技术对铝板表面缺陷进行检测, 具有成本低、效率高等优势。Lamb 波, 即薄板中的超声导波, 具有传播能量衰减小、对结构表面及内部损伤均敏感等特点, 被认为是最具潜力的无损检测工具之一, 在板状复合材料结构的损伤检测及结构健康监测中得到了越来越广泛的关注^[2]。在实际应用中, Lamb 波经常被用于检测飞机机翼板条、船体、桥梁支撑板等板类设备在生产制造或投入使用后期产生的孔洞、裂纹、分层等缺陷^[3]。

本文采用有限元软件建立三维仿真模型, 为了避免 Lamb 波的多模态和频散现象对缺陷重建的影响, 选择低频率模态(S0、A0 模态) 导波进行检测。S0 模态导波比 A0 模态导波更适合厚度方向缺陷的

收稿日期: 2019-04-08; 修回日期: 2019-05-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11674214、11874255)、上海市科委重点支撑项目(16030501400)。

作者简介: 张海燕(1970—), 女, 山东菏泽人, 博士, 教授, 研究方向为超声检测。

通讯作者: 张海燕, E-mail: hyzh@shu.edu.cn

检测。因此，本文利用双元激励法产生单一模态的 Lamb 波(S0 模态)，根据散射系数矩阵实现了频率-波数域成像算法在超薄铝板上的损伤检测应用。在实验中，采用 16 个阵元的超声相控阵传感器、以一定的入射角度激励出的 Lamb 波检测薄铝板，并利用全矩阵捕获技术采集回波信号。在获取薄铝板表面缺陷图像时，受实验环境、设备等因素的影响，采集到的回波信号容易存在噪声。而这些噪声对铝板表面缺陷的检测会造成一定的干扰，严重时还可能引起检测错误。因此，在对铝板表面缺陷图像进行检测时，必须对回波信号进行去噪。本文采用 Stolt 插值实现散射信号从频率到波数域的转换，利用二维傅里叶反变换(Inverse Fourier Transform, IFFT)完成数据域到图像域的转换，能够准确重建损伤^[4]。

1 频率-波数域成像算法

1.1 原理

频率-波数域成像算法采用图 1 所示的相控阵收发模型。图 1 中 $(u, 0)$ 为发射阵元的坐标， $(v, 0)$ 为接收阵元的坐标。 r_{out} 和 r_{in} 分别表示发射阵元和接收阵元到目标缺陷的距离。

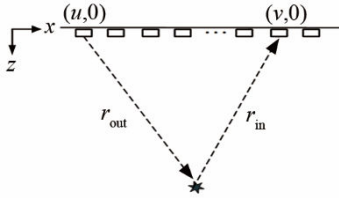


图 1 相控阵收发模型
Fig.1 Phased array transceiver model

将每个发射接收对的频率响应记为 $E(w, u, v)$ ^[5-6]，表达式为

$$E(w, u, v) = P(w) \iint f(x, z) G(r_{in}, w) G(r_{out}, w) dx dz \quad (1)$$

其中： $f(x, z)$ 为每个成像网格点 (x, z) 的散射信号； $P(w)$ 为发射阵元信号的频谱； $G(w, x, z)$ 为传播的格林函数^[7]，表达式为

$$G(w, x, z) = \frac{-j}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(jk_x x - j|z| \sqrt{k^2 - k_x^2})}{\sqrt{k^2 - k_x^2}} dk_x \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)中，则频率响应 $E(w, u, v)$ 可写作：

$$E(w, u, v) = \frac{-1}{(4\pi)^2} \iint \frac{\exp(jk_x u + jk_y v)}{\sqrt{k^2 - k_u^2} \sqrt{k^2 - k_v^2}} \left[\iint f(x, z) \times \exp(-j(k_u + k_v)x - j(\sqrt{k^2 - k_u^2} + \sqrt{k^2 - k_v^2})z) \right] \times dx dz dk_u dk_v \quad (3)$$

进行二维傅里叶变换，得到频率-波数域的频率

响应函数：

$$E(w, k_u, k_v) = \frac{-F(k_u + k_v, \sqrt{k^2 - k_u^2} + \sqrt{k^2 - k_v^2})}{(4\pi)^2 \sqrt{k^2 - k_u^2} \sqrt{k^2 - k_v^2}} \quad (4)$$

式中： F 是散射信号 $f(x, z)$ 的傅里叶变换； k_u 和 k_v 对应于阵列发射接收信号的波数域； $k_u \approx k \sin \theta_1$ ， $k_v \approx k \sin \theta_2$ 。

频率-波数域中的数据分布不均匀，而重建图像的过程中需对所有阵元接收到的信号进行二维傅里叶反变换，因此要对 F 中的数据进行 Stolt 插值，得到均匀的数据分布^[8-9]。式(5)、(6)为 Stolt 插值，它进行了非线性坐标变换，将波数 k_u 、 k_v 和 k 映射到 k_x 和 k_z 中，实现了从数据域到图像域的转换：

$$k_x = k_u + k_v \quad (5)$$

$$k_z = \sqrt{k^2 - k_u^2} + \sqrt{k^2 - k_v^2} \quad (6)$$

假如保持激励信号的波数 k_u 为常量不变，散射信号 $F(k_x, k_z | k_u)$ 表达式为

$$F(k_x, k_z | k_u) = -(4\pi)^2 S^{-1} \left\{ \sqrt{k^2 - k_u^2} \sqrt{k^2 - k_v^2} E(w, k_v | k_u) \right\} \quad (7)$$

其中：

$$k_v = k_x - k_u \quad (8)$$

$$k = \pm \frac{1}{2k_z} \left\{ k_z^4 + 2[k_u^2 + (k_x - k_u)^2] k_z^2 + \right.$$

$$\left. k_u^4 + (k_x - k_u)^4 - 2k_u^2 (k_x - k_u)^2 \right\}^{1/2} \quad (9)$$

式(8)、(9)中： k_v 、 k 是对于常量 k_u 的 Stolt 插值的反变换^[5]。在正演传播模型下，散射分布与发射接收阵元和像点之间的夹角无关。因此，入射波波数 k_u 的选择是任意的。为每个 k_u 重新计算其二维傅里叶变换，并取平均，以减少噪声和旁瓣包络的干扰：

$$\hat{F}(k_x, k_z) = \int_{-\infty}^{\infty} F(k_x, k_z | k_u) dk_u \quad (10)$$

式(10)同样可以减少由于空间采样数据不足而导致的光栅瓣效应。最后，通过计算二维傅里叶反变换得到散射声场的图像域^[5,10]：

$$\hat{f}(x, z) = \frac{1}{(2\pi)^2} \iint \hat{F}(k_x, k_z) \exp(jk_x x + jk_z z) dk_x dk_z \quad (11)$$

1.2 Stolt 插值

本文成像算法采用全矩阵形式存储接收信号 $e(t, u, v)$ 。为了提高分辨率，减少伪像，对原接收信号 $e(t, u, v)$ 进行三维补 0。然后进行三维傅里叶变换，将 $e(t, u, v)$ 转换到 $E(w, k_u, k_v)$ ，即频率-波数域。最后进行 Stolt 非线性插值实现后期图像的有效重建。

Stolt 插值步骤为：(1) 取切片数据 $E(w, k_v | k_u)$ ，根据式(7)将 $E(w, k_v | k_u)$ 插值得到 $F(k_x, k_z | k_u)$ ；(2) 把插值后的二维切片数据 $F(k_x, k_z | k_u)$ 根据式(10)合成，得到 $\hat{F}(k_x, k_z)$ ；(3) 对 $\hat{F}(k_x, k_z)$ 通过式(11)进行二维傅

里叶反变换, 将频率-波数域转换到图像域, 获得图像结果 $\hat{f}(x, z)$ 。

2 仿真结果及分析

本文使用 PZFlex 进行有限元仿真, 创建如图 2 所示的三维模型。模型为 40 mm×80 mm×2 mm 大小的铝板, 中间通孔缺陷的圆半径设为 2 mm, 圆心位置在长度方向 7.5 mm、宽度方向 48 mm 处, 右侧为 16 个传感器阵元, 单个阵元宽为 1.8 mm, 相邻阵元间隔 0.2 mm, 模型的边界设置为吸收边界, 以减少反射波的影响。利用双元激励法激励出中心频率为 1 MHz 的 S0 模态 Lamb 波^[11-14]。双元激励法的示意图如图 3 所示, 沿离面位移激励出对称 S0 模态的 Lamb 波。由于仿真环境下信号比较纯净, 所以选取如图 4 所示的自发自收的信号进行处理。图 4 中散射信号干净而有序地分布在激励信号后面。图 5 为频率-波数域成像算法重建后的图像, 目标缺陷的大小、形状及具体位置被精确地重构出来。可以看出单缺陷模型下, 此算法能很好地重建出缺陷信息。

鉴于实际应用中多缺陷普遍存在, 且多缺陷的散射场互相影响。因此, 有必要建立多缺陷模型, 以验证这种算法的适用性。仿真铝板尺寸不变, 设置两个通孔缺陷, 直径分别为 2、3 mm, 两圆心位置分别设置在长度方向 4 mm 和 11 mm 处, 宽度方向都在 48 mm 处, 缺陷圆心相距 9.5 mm。图 6 为双缺陷的 Matlab 软件重建图, 可见缺陷的大小、形状及相对位置能够被很好地呈现出来。为了研究缺陷距离对重建效果的影响, 建立近距离缺陷仿真模型, 将缺陷圆心距设置为 4 mm, 其余参数不改变。图 7 为近距离的双缺陷 Matlab 软件重建图, 两缺陷相邻处边界有一定程度上的混叠, 但是缺陷的相对

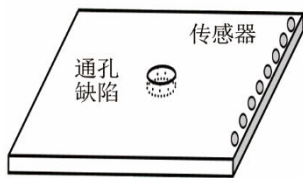


图 2 有限元仿真的三维模型

Fig.2 Three-dimensional model for finite element simulation

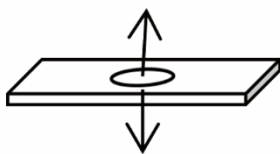


图 3 双元激励法示意图

Fig.3 Schematic diagram of the dual excitation method

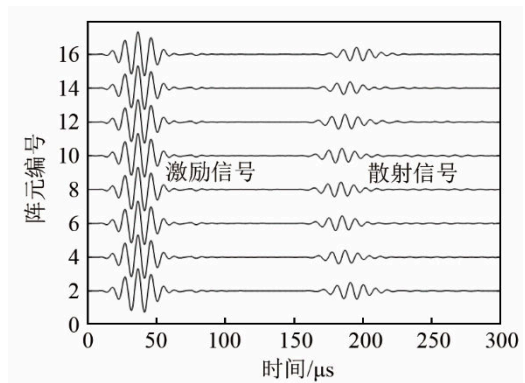


图 4 单缺陷自发自收信号

Fig.4 The self-transmitting and self-receiving signals of the single defect

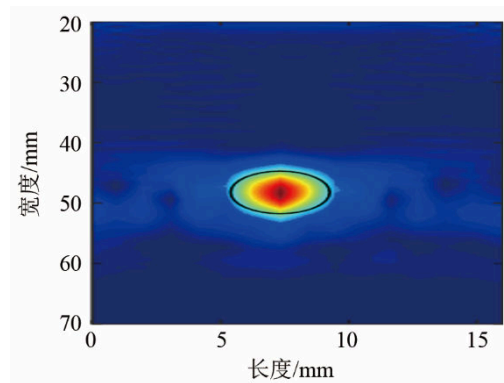


图 5 单缺陷重建图像

Fig.5 Reconstructed image of a single defect

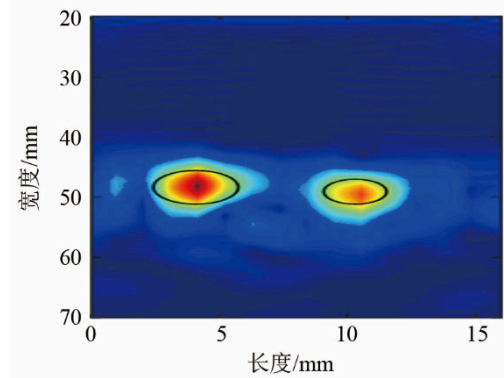


图 6 双缺陷重建图像

Fig.6 Reconstructed image of double defects

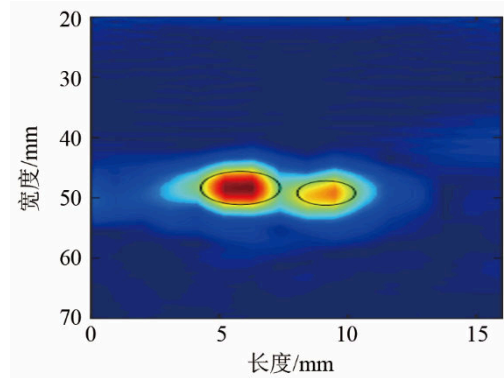


图 7 近距离双缺陷重建图像

Fig.7 Reconstructed image of two adjacent defects

大小和位置信息能够准确地重建出来。因此，在仿真环境下该算法具有较好的成像效果。

3 实验结果及分析

3.1 实验结果

本文实验使用 16 阵元探头的多收多发相控阵仪器，对尺寸为 150 mm×80 mm×1 mm 的薄铝板进行检测。实验采用有两个穿孔缺陷的薄铝板，如图 8 所示。缺陷的直径分别为 4 mm 和 6 mm，两个缺陷的圆心相距 15 mm。探头以一定的角度入射，激发出单一模态的 Lamb 波(S0 模态)。这里设置的入射激励信号是 5 个周期的加汉宁窗的正弦函数。为了减少 Lamb 波多模态效应的影响，实验选取的中心频率为 1 MHz，并且不考虑其余高模态信号^[15-16]，只考虑 S0 模态在铝板中的传输，传播速度是 5 300 m·s⁻¹。最后使用全矩阵捕获形式采集每个激励接收对的信号数据，实验中测试了多组数据，采用较好的一组用 Matlab 软件进行成像处理。首先对实验数据进行去噪处理，如使用补 0 方式去除表面波的影响，然后去除零点漂移以及直达波的相互干扰等，并且进行滤波，保留了中心频率附近的主要信号，最后进行缺陷图像域的重建。图 9 为频率-波数域成像算法重建后的图像，可以看出，受旁瓣效应的影响，使两缺陷相邻的边界会互相干扰，而且由于产生散射的区域为缺陷圆与空气的交

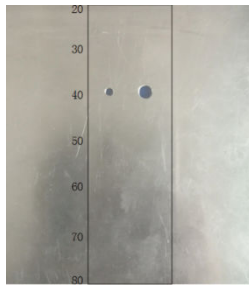


图 8 双缺陷薄铝板

Fig.8 The thin Al-plate with double defects

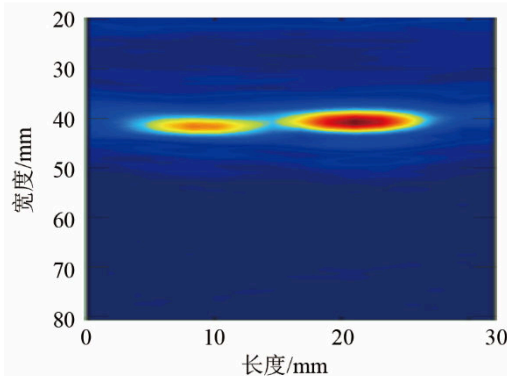


图 9 频率-波数域重建图像

Fig.9 Reconstructed image in F-W domain

界处，两个缺陷的圆心稍微有点不在同一水平线上。但是还是可以很清楚地重建出两个缺陷的具体位置及相对大小和形状。

3.2 两种成像算法对比

为了体现频率-波数成像算法的优越性，选取较简单的全聚焦算法(Total Focusing Method, TFM)进行成像对比。全聚焦成像算法是在时域中进行的，它具有成像原理简单、易操作等优点。但它的缺点是计算时间长、聚焦点分布不均匀。图 10 为全聚焦算法的实验数据重建图像。从图 10 可以看出，全聚焦算法的横向分辨率较低，聚焦效果较差，重建缺陷在纵向被拉长且离散间隔分布，并不能重建出缺陷的轮廓信息^[5]。

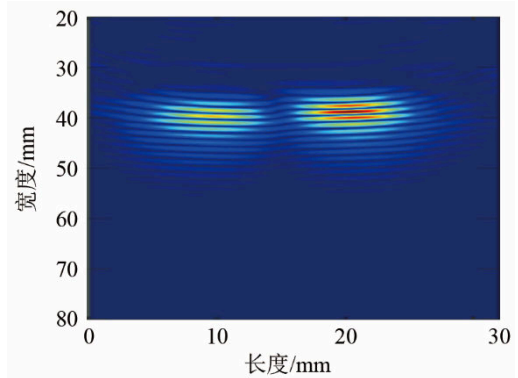


图 10 全聚焦算法重建的图像

Fig.10 Reconstructed image by TFM

3.3 不同大小缺陷成像对比

在实际应用中，不同大小的缺陷也会对成像结果产生影响，有些细微缺陷因为在实际无损检测中容易被忽略而产生严重的后果。为了验证频率-波数域成像算法对细微缺陷的检测效果，本文选取了两组缺陷大小不同的铝板进行成像对比。小缺陷组的缺陷直径分别是 1 mm 和 3 mm；大缺陷组的缺陷直径分别是 6 mm 和 7 mm。成像结果如图 11 和图 12 所示，大缺陷组成像效果清晰，小缺陷组效果稍微

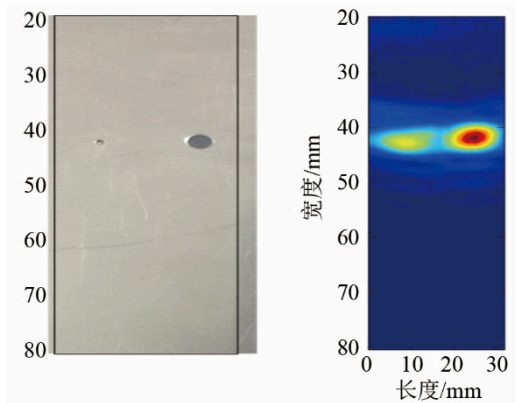


图 11 小缺陷及重建的图像

Fig.11 Small defects and reconstructed image

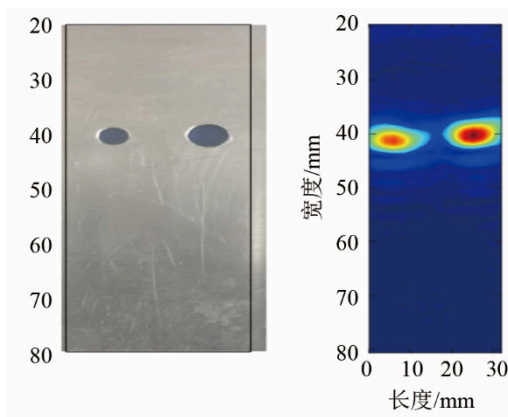


图 12 大缺陷及重建的图像

Fig.12 Large defects and reconstructed image

差一点,但小缺陷组左边细小的通孔缺陷还是能够准确地成像,可见此成像算法对不同大小的缺陷都具有高敏感性,并且成像的准确度很高。

4 结 论

本文将频率-波数域成像算法应用在薄铝板缺陷检测上,取得了良好的缺陷重建效果,能很好地展现出圆孔缺陷的形状、位置及大小信息,验证了这种算法在薄铝板缺陷检测上的有效性。

(1) 从理论上分析了频率-波数域的成像原理,介绍了该算法的 Stolt 插值以及图像重建的基本原理。并使用有限元软件仿真了 Lamb 波在薄铝板中的传播,采集 Lamb 波传播过程中遇到通孔缺陷后产生的散射声场,利用散射声场信息进行图像的重建,获得了良好的重建图像。

(2) 将此成像算法应用到实验中,对实验中捕获的全矩阵数据进行成像,实验结果表明:频率-波数域成像法能够精确地表征出圆孔损伤的大小和形状,对单缺陷及不同大小、距离的双缺陷均具有良好的检测效果。相对于全聚焦成像法,频率-波数域成像法具有更高的分辨率。

(3) 由于仿真环境比较理想,而且干扰较少,所以成像过程中只采集自发自收的数据也能够得到良好的效果,而在实验中,存在难以消除的干扰,所以需要使用全矩阵数据进行图像重建。

参 考 文 献

[1] 石坤泉,魏文国.采用双边滤波的冷轧铝板表面缺陷图像去噪方法的研究[J].表面技术,2018,47(9):317-323.
SHI Kunquan, WEI Wenguo. Bilateral filtering method for image denoising of surface defects of cold rolled aluminum plates[J]. Surface Technology, 2018, 47(9): 317-323.

[2] 王梦欣.基于频率-波数域处理的Lamb波结构健康监测[D].南京:

南京航空航天大学,2017:1-13.
WANG Mengxin. Lamb wave structural health monitoring based on frequency-wavenumber domain processing[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017: 1-13.

[3] ZHANG H L, QI X G, LI X T. Research on key technology of cold-rolled aluminum plate surface defect detection system[J]. Applied mechanics and materials, 2013, 433(1): 915-918.

[4] 刘建全,张海燕,徐梦云.钢轨缺陷的超声相控阵波数成像算法[J].应用声学,2018,37(6):835-842.
LIU Jianquan, ZHANG Haiyan, XU Mengyun. Ultrasonic phased array wave-number imaging algorithm for rail defects[J]. Applied acoustics, 2018, 37(6): 835-842.

[5] HUNTER A J, DRINKWATER B W, WILCOX P D. The wave-number algorithm for full-matrix imaging using an ultrasonic array[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2008, 55(11): 2450-2462.

[6] CALLOW H J, HAYES M P, GOUGH P T. Wavenumber domain reconstruction of SAR/SAS imagery using a single transmitter and multiple receiver geometry[J]. IEEE Electron. Lett., 2002, 38(7): 336-338.

[7] CHEW W C. Waves and fields in inhomogeneous media[D]. Illinois: University of Illinois, 1995.

[8] 严刚,周丽.基于频率-波数域偏移的损伤被动成像识别研究[J].固体力学学报,2011,32(S1):273-279.
YAN Gang, ZHOU Li. Frequency-wavenumber domain migration in passive damage imaging identification[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2011, 32(S1): 273-279.

[9] 周子超,苏小敏.基于 Stolt 插值的微波近场成像方法研究[J].现代电子技术,2011,34(17):28-30.
ZHOU Zichao, SU Xiaomin. Near-field microwave imaging based on Stolt interpolation[J]. Modern Electronics Technique, 2011, 34(17): 28-30.

[10] MOGHIMIRAD E, VILLAGÓMEZ H C A, MAHLOOJIFAR A, et al. Synthetic aperture ultrasound fourier beamformation using virtual sources[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2016, 63(12): 2018-2030.

[11] MOGHIMIRAD E, MAHLOOJIFAR A, ASL B M. Computational complexity reduction of synthetic aperture focus in ultrasound imaging using frequency domain reconstruction[J]. Ultrasonic Imaging, 2015, 38(3): 175-193.

[12] 应崇福.超声学[M].北京:科学出版社,1990:88-106.
YING Chongfu. Ultrasonics[M]. Beijing: Science Press, 1990: 88-106.

[13] 郑阳,周进节.兰姆波在裂纹处的模态转换及散射特性研究[J].工程力学,2014,31(6):21-29.
ZHENG Yang, ZHOU Jinjie. Mode transformation and scattering characteristics of lamb wave at crack[J]. Engineering mechanics, 2014, 31(6): 21-29.

[14] SU Z, YE L. Selective generation of Lamb wave modes and their propagation characteristics in defective composite laminates[J]. Journal of Materials Design and Applications, 2004, 218(2): 95-110.

[15] SU Z, ZHOU C, HONG M, et al. Acousto-ultrasonics-based fatigue damage characterization: linear versus nonlinear signal features[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2014, 45(1): 225-239.

[16] GIURGIUTIU V. Tuned lamb wave excitation and detection with piezoelectric wafer active sensors for structural health monitoring[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2005, 16(4): 291-305.