

基于超分辨率超声图像的缺陷量化方法*

樊程广, 余孙全, 高斌, 杨磊

(国防科技大学空天科学学院, 湖南长沙 410073)

摘要:以相位相干多信号分类(phase-coherent multiple signal classification, PC-MUSIC)方法为例,研究基于超分辨率超声图像的缺陷量化方法。利用全矩阵采集方法从被测对象获取超声阵列数据,对数据进行时域预处理,提取缺陷散射信号;利用PC-MUSIC方法处理缺陷散射信号,获取超分辨率超声图像;分析超声图像特征,提取横向强度曲线,定义-6 dB主瓣宽度作为缺陷的评估长度。搭建实验系统,选择铝试块作为被测对象,在其内部加工1个长度为10 mm的刻槽作为缺陷。实验结果表明,在信号子空间维度选择合适的情情况下,PC-MUSIC方法能够准确评估缺陷长度,误差在10%以内。

关键词:缺陷量化;超分辨率;超声图像;无损检测

中图分类号:TG115.28+5 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1001-2486(2022)05-187-06



Defect quantification based on super-resolved ultrasonic image

FAN Chengguang, YU Sunquan, GAO Bin, YANG Lei

(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: PC-MUSIC (phase-coherent multiple signal classification) was introduced to study the defect quantification based on the super-resolved ultrasonic image. The ultrasonic array data can be collected via full matrix capture process, and pre-processed in time domain to extract the scattered signals related with defect. The scattered signals were post-processed by PC-MUSIC to obtain the ultrasonic image with super resolution. The ultrasonic image was analyzed to extract the lateral cross section, the -6 dB main lobe width of which was defined as the assessed length of defect. The experimental system had been built, and a block of Al with a 10mm-long slot which had been machined was chosen as the tested object. It is shown that the PC-MUSIC can accurately assess the length of defect with an error less than 10% when the proper dimension of signal subspace.

Keywords: defect quantification; super resolution; ultrasonic image; nondestructive evaluation

超声相控阵成像检测是一种高新无损检测方法,其基本原理是相位控制,具有声束的角度可控和动态聚焦的特点。与常规超声检测方法相比,其在检测速度、缺陷定量准确性及降低作业强度等方面有着明显的优势。尤其是在缺陷量化方面,利用传统单晶片超声探头进行检测时,通常以A扫信号的时域幅值作为缺陷尺寸的判断参考量。由于声波的幅值容易受到耦合剂以及缺陷形状等因素影响,导致定量结果通常会有较大的误差,而基于超声相控阵获取超声图像是一种有效的解决方法^[1-2]。当前,超声相控阵成像检测技术已经在航空航天^[3]、核工业^[4]、基础设施^[5]等工业领域展现出良好的应用前景。在实际应用过程中,受安装环境、检测要求等条件制约,超声相控阵传感器通常只能与被测对象的一侧接触,其

工作在脉冲回波模式,即使用相同的传感器进行信号的激励和接收。为了最大限度获取被测对象的信息,通常使用全矩阵采集方法获取超声阵列数据^[6]。该方法利用传感器的任意一对阵元组合获取超声回波信号。相同的数据经过不同的后处理成像技术,得到不同质量的超声图像^[7]。通过分析图像特征可以实现对被测对象不同程度的评估,即所谓的基于超声图像的缺陷量化方法,这是主要的缺陷量化技术^[8]。

在超声相控阵成像检测领域,常见的成像技术包括扫描技术^[9]、延迟叠加技术^[10]、超分辨率技术^[11]。分辨率是评价和比较不同超声成像技术的重要技术指标,定义为成像系统区分相邻点目标的能力^[12]。扫描技术和延迟叠加技术的分辨率受到声波衍射限制,遵守瑞利准则,基于其成像

* 收稿日期:2021-06-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61601489)

作者简介:樊程广(1985—),男,河南新乡人,讲师,博士,E-mail:chengguangfan@nudt.edu.cn

结果无法辨识缺陷的细节信息(即尺寸小于超声波波长)。因此,利用上述方法进行缺陷量化评估,由于其成像分辨率低,导致超声图像质量不高,缺陷量化精度有限。为了解决这一问题,基于超声时间反转理论的超分辨率成像方法得到研究,其典型代表有相位相干多信号分类(phase-coherent multiple signal classification, PC-MUSIC)方法。

2011 年, Asgedom 等首次提出了 PC-MUSIC 成像方法,并利用其实现对水槽中相邻两条线目标的定位^[13]。Huang 等在成像过程中补偿了传感器阵元的相位响应,提高了 PC-MUSIC 的定位精度,并将其用于医学成像领域^[14]。上述研究主要聚焦 PC-MUSIC 方法对点状目标的成像定位。然而,在实际应用领域,缺陷通常是具有一定尺寸的,无法视为点状目标。此外,在对缺陷准确定位的基础上,进一步提取缺陷尺寸等关键信息,有助于准确评估缺陷的严重程度,制定科学应对措施。基于上述原因,初步探讨了 PC-MUSIC 方法对扩展目标(即尺寸大于超声波波长)的成像^[15]。但是,当前的研究缺少对量化方法的系统阐述,需要进一步研究基于超分辨率超声图像的缺陷量化方法。因此,本文主要的研究目的是通过对超分辨率超声图像进行特征分析,实现对缺陷的量化评估。

1 原理介绍

基于超分辨率超声图像的缺陷量化方法原理示意图如图 1 所示,图中选择笛卡尔坐标系。线性阵列传感器与被测对象直接耦合,其包含的 N 个阵元沿 x 轴方向均匀分布,被测对象中包含长度为 L (大于超声波波长)的扩展目标作为缺陷。

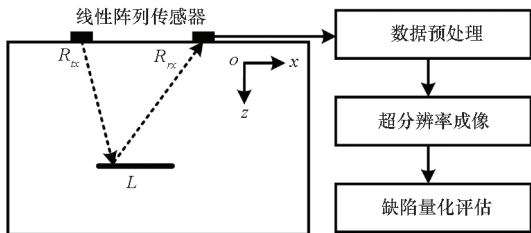


图 1 缺陷量化流程

Fig. 1 Flow diagram of defect quantification

首先,由激励阵元 R_{tx} 激发的信号在 xoz 平面传播,在传播过程中遇到缺陷发生散射,信号由接收阵元 R_{rx} 接收。对信号进行时域加窗预处理,其目的在于从中提取与缺陷相关的散射信号用于后续成像处理^[16]。其次,利用超分辨率成像技术对缺陷散射信号进行后处理,获取超声图像,图像具

备超分辨率特性。最后,分析超分辨率超声图像的特征,提出缺陷量化方法,用于评估缺陷长度,并进行误差分析。

2 超分辨率成像和缺陷量化方法

2.1 超分辨率成像

超分辨率成像(super resolution imaging)是一类能够克服声波衍射限制的方法,典型代表如 PC-MUSIC 方法。该方法基于时间反转声学理论,通过对阵列响应矩阵进行奇异值分解实现成像目的,具体步骤如下。

步骤 1:对超声阵列数据进行时域-频域转换,构建阵列响应矩阵。

阵列响应矩阵 \mathbf{K} 描述了超声相控阵不同阵元之间的脉冲响应。对于一个工作在脉冲回波模式的 N 元阵列,其任意阵元均可用于激励和接收声波信号,依次激励阵列中的阵元,由其引起的声波信号同时被阵列的 N 个阵元接收,即可得到阵列响应矩阵。

在实际执行过程中,通常通过对经过时域预处理的超声阵列数据进行时域-频域转换,提取给定频率点 ω 对应的值来构建阵列响应矩阵 $\mathbf{K}(\omega)$,其为 $N \times N$ 复矩阵。

步骤 2:对阵列响应矩阵进行奇异值分解,获取奇异值及其对应的奇异向量。

在给定工作频率点 ω ,矩阵 $\mathbf{K}(\omega)$ 的奇异值分解方程如式(1)所示。

$$\mathbf{K}(\omega) = \mathbf{U}(\omega)\mathbf{\Sigma}(\omega)\mathbf{V}^H(\omega) \quad (1)$$

式中, $\mathbf{U}(\omega)$ 和 $\mathbf{V}(\omega)$ 由奇异向量组成, $\mathbf{\Sigma}(\omega)$ 由奇异值组成,上标 H 表示复矩阵的共轭转置。

步骤 3:基于奇异值的分布特征,将奇异向量划分为信号子空间和噪声子空间。

根据奇异值分布特征,将奇异向量($\boldsymbol{\mu}_i$ 和 $\boldsymbol{\nu}_i$)划分为信号子空间($\mathbf{U}_s(\omega), \mathbf{V}_s(\omega)$)和噪声子空间($\mathbf{U}_N(\omega), \mathbf{V}_N(\omega)$),如式(2)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{U}(\omega) = [\mathbf{U}_s(\omega) | \mathbf{U}_N(\omega)] \\ \quad = [\boldsymbol{\mu}_1(\omega), \dots, \boldsymbol{\mu}_n(\omega), |\boldsymbol{\mu}_{n+1}(\omega), \dots, \boldsymbol{\mu}_N(\omega)] \\ \mathbf{V}(\omega) = [\mathbf{V}_s(\omega) | \mathbf{V}_N(\omega)] \\ \quad = [\boldsymbol{\nu}_1(\omega), \dots, \boldsymbol{\nu}_n(\omega), |\boldsymbol{\nu}_{n+1}(\omega), \dots, \boldsymbol{\nu}_N(\omega)] \end{cases} \quad (2)$$

其中, n 定义为信号子空间的维度。在实际成像过程中,信号子空间维度 n 的确定与成像目标相关。对于点状缺陷,在不考虑噪声的情况下, n 值通常选取点状缺陷的数目。对于非点状缺陷,奇异值的分布复杂,无法直接确定。通常比较不同

n 值下的超声图像质量来选取合适的信号子空间维度 n 。

步骤4:定义方向向量,结合信号子空间定义 PC-MUSIC 成像函数。

给定成像区域,对于成像区域中的任意像素点 r ,定义方向向量 $\mathbf{g}(r, w)$,如式(3)所示。

$$\mathbf{g}(r, w) = [G(R_1, r, w), \dots, G(R_N, r, w)]^T \quad (3)$$

式中, $R_l (l = 1, 2, \dots, N)$ 表示阵元位置,上标 T 表示复矩阵的转置。 G 为格林函数,具体定义如式(4)所示。

$$G(R, r, w) = \frac{-i}{4H_0^{(1)}(k|R-r|)} \quad (4)$$

式中, k 为波数, $H_0^{(1)}$ 为一阶汉克函数。

在给定频率带宽 $\Delta\omega$ 范围内,根据方向向量和信号子空间,定义 PC-MUSIC 成像函数如式(5)所示。

$$I(r, \Delta\omega) = \left| \left\{ 1 - \sum_{\Delta\omega} \frac{[\mathbf{g}^H(r, \omega)\mathbf{U}_s][\mathbf{g}^H(r, \omega)\mathbf{U}_s]^T}{\|\mathbf{g}(r, \omega)\|^2} \right\}^{-1} \right| \quad (5)$$

式中: $\|\cdot\|$ 表示范数;强度值 $I(r, \Delta\omega)$ 与 $\mathbf{g}^H(r, \omega)\mathbf{U}_s$ 相关, $\mathbf{g}^H(r, \omega)\mathbf{U}_s$ 为一维复向量,其与本身转置的相乘为一复数。因此,PC-MUSIC 在成像过程中,保留并利用了相位信息。

2.2 缺陷量化方法

基于超声图像的缺陷量化方法通过不同成像技术时将域信号转化为超声图像,分析图像特征进而提取缺陷关键参数,完成缺陷的量化评估。

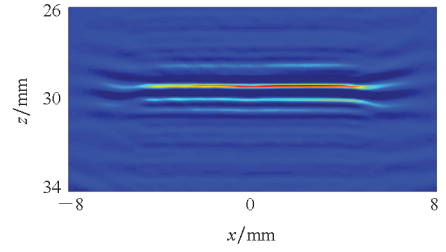
在超声测量领域,半波高度法(6 dB drop technique)是一种常用的缺陷测量方法^[17]。在该方法基础上,结合超分辨率超声图像具体特征,提出了一种缺陷量化方法,如图2所示。以铝试块的内部刻槽缺陷量化为例,具体过程阐述如下:

首先,设定信号子空间维度,利用 PC-MUSIC 成像方法获取实际被测对象的超声图像,如图2(a)所示;然后,寻找超声图像中强度最大值的坐标位置,提取对应的横向强度曲线,如图2(b)所示;最后,设定 -6 dB 阈值线,计算 -6 dB 主瓣宽度,作为缺陷的评估长度,通过与缺陷实际长度进行比较,计算误差。

3 实验验证

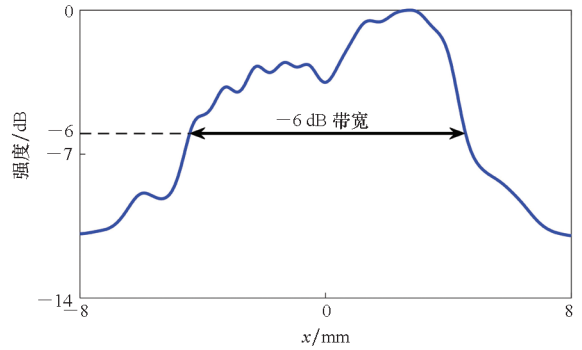
3.1 实验设置

本部分搭建超声相控阵成像检测实验系统,用于获取超声阵列数据。系统包括阵列控制器、阵列传感器以及试块,试块实物图如图3所示。其中,阵列控制器与阵列传感器相连,控制信号的



(a) PC-MUSIC 图像

(a) PC-MUSIC image



(b) 横向强度曲线

(b) Lateral strength curve

图2 缺陷量化

Fig.2 Defect quantitation

激励和接收,从试块中获取超声阵列数据。

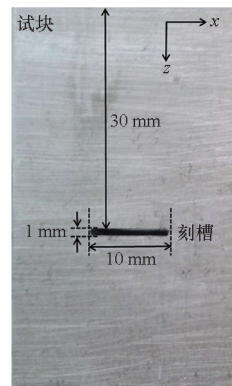


图3 实验试块

Fig.3 Experimental block

阵列控制器选择英国 Peak NDT 公司的 MicroPulse 5PA,它包括 128 个独立通道,用于进行数据传输,其中每一个通道可以进行 16 位的数据采集。线性阵列传感器选择法国 Imasonic 公司的 5 MHz、64 元线性阵列,其 -6 dB 带宽为 3 ~ 7 MHz。测试对象选择铝试块,在其内部加工宽度为 1 mm、长度为 10 mm 的刻槽作为缺陷。超声波在铝试块中的传播速度为 6 150 m/s,在阵列传感器中心频率点 5 MHz 处,其对应的波长为 1.23 mm,远小于缺陷长度,故缺陷可视为扩展目标。值得注意的是缺陷宽度为 1 mm,小于超声波

波长,可视为点状目标,通常利用成像方法实现对点状目标的定位。

3.2 实验分析

第一,利用全矩阵采集方法从试块获取超声阵列数据。超声波在固体介质中传播时,存在超声纵波、横波、波型转换等,因此,对于超声阵列数据中的每一个时域信号,包含了丰富的信息。在数据预处理阶段,采用时域加窗函数的方法从原始信号中提取与缺陷相关的散射信号,如图 4 所示。

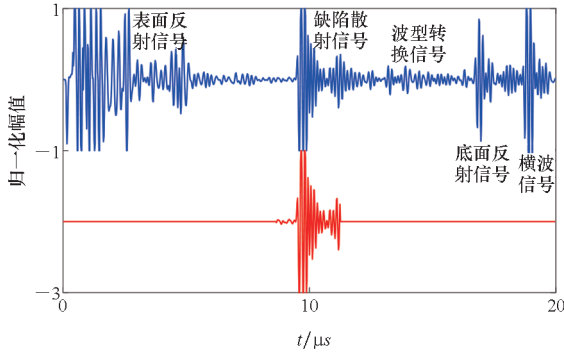
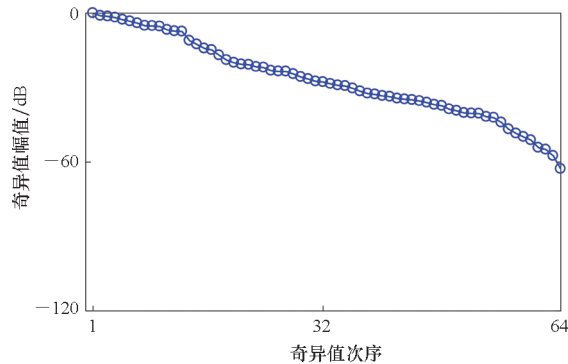


图 4 原始信号和缺陷散射信号

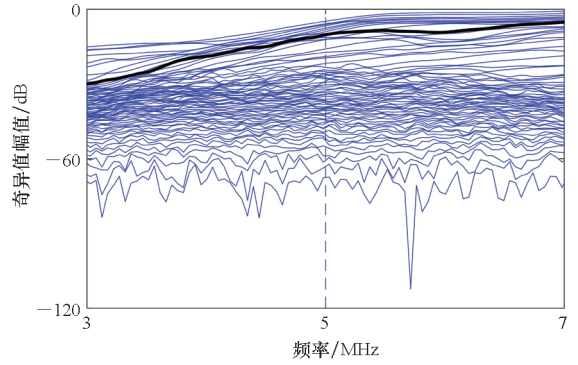
Fig. 4 Original signal and scattered signal related with defect

第二,对缺陷散射信号进行时域-频域转换,构建给定频率带宽范围内的阵列响应矩阵,并对其进行奇异值分解。图 5 (a) 给出了阵列传感器中心频率处(5 MHz)的奇异值分布曲线,图 5 (b) 给出了频率带宽(3 ~ 7 MHz)范围内的奇异值分布曲线。由图 5 可知,对于扩展目标,不存在明显的奇异值,信号子空间和噪声子空间之间没有明显的界线。因此,在 PC-MUSIC 成像过程中,需要考虑不同维度的信号子空间,如图 5 (b) 中黑线所示。



(a) 阵列中心频率处的奇异值分布

(a) Distribution of singular values at the central frequency



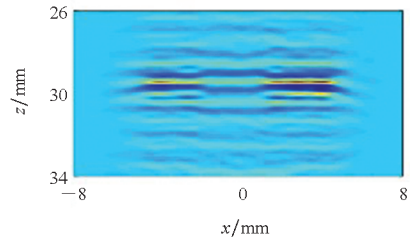
(b) 频率带宽范围内的奇异值分布

(b) Distribution of singular values over the given frequency bandwidth

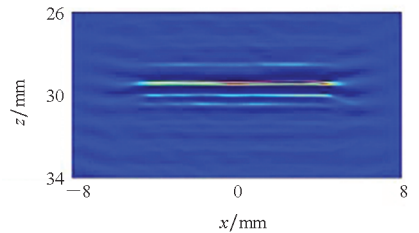
图 5 奇异值分布

Fig. 5 Distribution of singular values

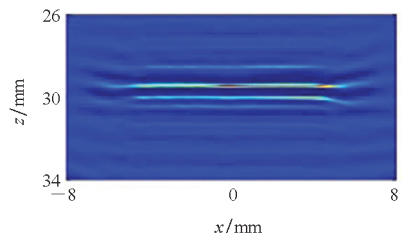
第三,设定成像区域 $x = [-8, 8]$ mm 和 $z = [26, 34]$ mm,划分网格,对于其中的任意像素点,定义方向向量。设定信号子空间维度分别为 5、10、15、20、30、40,获取的 PC-MUSIC 图像如图 6 所示。由图 6 可知:当 n 为 5 时,仅缺陷局部可被识别;当 n 为 10 和 15 时,缺陷整体可被识别;当 n 为 20、30 和 40 时,超声图像中出现伪像,如虚线框所示区域。



(a) $n = 5$



(b) $n = 10$



(c) $n = 15$

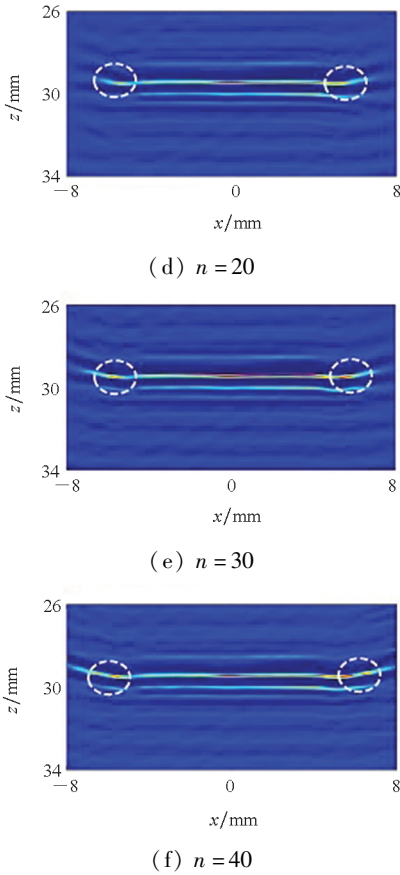


图 6 试块的 PC-MUSIC 图像

Fig. 6 PC-MUSIC images of tested object

为了更好地评估缺陷长度,从 PC-MUSIC 图像中提取强度最大值所对应的横向强度曲线,如图 7 所示。由图 7 可知:当 n 为 5 时,曲线中出现两个波峰,无法判断缺陷长度;当 n 为 20、30 和 40 时,曲线中除了主瓣,同时出现了旁瓣,如虚线框所示,并且信号子空间维度值 n 越大,旁瓣强度越大。

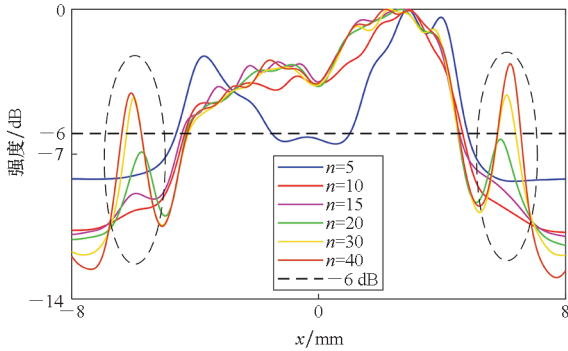


图 7 横向强度曲线

Fig. 7 Lateral cross sections

基于上述曲线以及定义的缺陷量化方法,计算缺陷长度,结果如表 1 所示。由表 1 可知,当信号子空间的维度设置为 10 时,基于 PC-MUSIC 成像方法可以准确评估缺陷长度,误差在 10%

以内。

表 1 缺陷的评估长度及误差

Tab. 1 Assessed length and error for defect

信号子空间维数	评估长度/mm	误差/%
5		
10	9.029	9.71
15	9.028	9.72
20	9.028	9.72
30	8.777	12.23
40	8.877	11.23

此外,对于给定的超声相控阵成像系统,若缺陷与阵列传感器的距离变大,则其成像分辨率变低,导致超声图像质量变差,基于图像特征分析准确进行缺陷量化评估的能力变弱。

4 结论

本文研究基于超分辨率超声图像的缺陷量化方法,用于实现对缺陷的准确量化评估。系统阐述了基于超声图像的缺陷量化原理;定义了超分辨率成像技术 PC-MUSIC,提出了缺陷量化方法;搭建了实验系统,通过实验验证方法的可行性。实验在铝试块上完成,在其内部加工 1 个长度为 10 mm 的刻槽作为缺陷。实验结果表明,在信号子空间维度设定合适的情况下,PC-MUSIC 方法能够准确评估缺陷长度,实现缺陷的量化评估。

参考文献 (References)

[1] DRINKWATER B W, WILCOX P D. Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: a review [J]. NDT & E International, 2006, 39(7): 525-541.

[2] 靳世久, 杨晓霞, 陈世利, 等. 超声相控阵检测技术的发展及应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(9): 925-934.

JIN S J, YANG X X, CHEN S L, et al. Development and application of ultrasonic phased array inspection technology[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(9): 925-934. (in Chinese)

[3] 周正干, 李尚凝, 李洋. 相控阵超声检测方案设计关键技术及其在航空航天领域的应用[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(4): 461-467.

ZHOU Z G, LI S N, LI Y. Key techniques of ultrasonic phased array testing solution design and its application in aerospace[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(4): 461-467. (in Chinese)

[4] 张侃, 杨力, 王学权, 等. 超声相控阵技术的发展及其在

- 核工程无损检测中的应用[J]. 无损检测, 2017, 39(5): 42 - 48.
- ZHANG K, YANG L, WANG X Q, et al. Development of ultrasonic phased array technology and applications in nondestructive testing of nuclear engineering [J]. Nondestructive Testing, 2017, 39 (5): 42 - 48. (in Chinese)
- [5] TSENG C W, CHANG Y F, WANG C Y. Total focusing method or phased array technique; which detection technique is better for the ultrasonic nondestructive testing of concrete? [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, 30(1): 1 - 10.
- [6] HOLMES C, DRINKWATER B W, WILCOX P D. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation [J]. NDT & E International, 2005, 38(8): 701 - 711.
- [7] VELICHKO A, WILCOX P D. An analytical comparison of ultrasonic array imaging algorithms [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2010, 127(4): 2377 - 2384.
- [8] FELICE M V, FAN Z. Sizing of flaws using ultrasonic bulk wave testing: a review [J]. Ultrasonics, 2018, 88: 26 - 42.
- [9] Wilcox P D. Ultrasonic arrays in NDE: beyond the B-scan [C] // Proceedings of AIP Conference, 2013: 33 - 50.
- [10] SAFARI A, ZHANG J, VELICHKO A, et al. Assessment methodology for defect characterisation using ultrasonic arrays [J]. NDT & E International, 2018, 94: 126 - 136.
- [11] SIMONETTI F. Breaking the resolution limit: a new perspective for imaging in NDE [C] // Proceedings of AIP Conference, 2006: 700 - 707.
- [12] NG A, SWANEVELDER J. Resolution in ultrasound imaging [J]. Continuing Education in Anaesthesia Critical Care & Pain, 2011, 11(5): 186 - 192.
- [13] ASGEDOM E G, GELIUS L J, AUSTENG A, et al. Time-reversal multiple signal classification in case of noise: a phase-coherent approach [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2011, 130(4): 2024 - 2034.
- [14] LABYED Y, HUANG L J. Super-resolution ultrasound imaging using a phase-coherent MUSIC method with compensation for the phase response of transducer elements [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2013, 60 (6): 1048 - 1060.
- [15] FAN C G, YANG L, ZHAO Y. Ultrasonic multi-frequency time-reversal-based imaging of extended targets [J]. NDT & E International, 2020, 113: 102276.
- [16] FAN C G, YANG L, ZHAO Y. Preprocessing of the full matrix capture data for time-reversal-based super-resolution imaging [J]. Insight -Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2017, 59(11): 586 - 590.
- [17] FELICE M V, VELICHKO A, WILCOX P D. Accurate depth measurement of small surface-breaking cracks using an ultrasonic array post-processing technique [J]. NDT & E International, 2014, 68: 105 - 112.