

相控阵超声全聚焦成像算法的有限元仿真研究

池强强, 胡明慧

(华东理工大学承压系统与安全教育部重点实验室, 上海 200237)

摘要: 基于超声相控阵基本理论和全聚焦成像算法(Total Focus Method, TFM), 以 30 mm 厚的 Q235 钢板中的孔缺陷检测为研究对象, 使用 ABAQUS 有限元软件, 建立了相控阵 TFM 有限元检测模型。根据模拟结果, 在 MATLAB 软件中编写了相控阵 TFM 成像算法。同时, 采用超声多通道实验平台, 对构建的 TFM 有限元检测模型和编写的相控阵 TFM 算法进行实验验证。实验结果与有限元模拟结果有较好的一致性。

关键词: 超声相控阵; 全聚焦成像算法; 缺陷识别; 有限元; ABAQUS 有限元软件

中图分类号: TB553

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2020)-02-0176-08

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2020.02.009

Simulation research on finite element method based phased array ultrasonic TFM imaging algorithm

CHI Qiangqiang, HU Minghui

(Key Laboratory of Pressure Systems and Safety, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: Based on the theory of ultrasonic phased-array and the total focus method (TFM), the finite element model of phased-array TFM is established by using ABAQUS finite element software for defect detection in a 30mm-thick Q235 steel plate. According to the simulation results, the phased-array TFM imaging algorithm is programmed in MATLAB. The TFM finite element detection model and the phased array TFM algorithm are verified by using ultrasonic multi-channel experimental platform. It is shown that the finite element simulation results are in good agreement with the experimental results.

Key words: phased-array ultrasound; total focus method (TFM) imaging algorithm; defect identification; finite element method; ABAQUS finite element software

0 引 言

超声相控阵检测技术使用相控阵列探头来产生和接收超声波, 相控阵列探头的每个晶片称为一个阵元, 各阵元具有独立的发射和接收电路, 通过控制各阵元发射(或接收)脉冲的时间, 进而改变合成波束的聚焦点位置和偏转角度, 然后运用机械扫描或者电子扫描来实现超声成像^[1-2]。超声相控阵测试具有灵敏度高, 对复杂元件的适应性好等优点, 已广泛应用于关键设备的无损检测^[3]。文献[4-7]中提出了全矩阵数据采集(Full Matrix Capture, FMC)的概念, 并建立使用了基于 FMC 的全聚焦算法(Total Focusing Method, TFM)。与传统超声相控阵检测相比, TFM 可以通过对换能器阵列的全矩阵数据进行后处理来实现测量区域内任意点的聚焦^[8]。

因此, 该方法已越来越多地应用于航空, 核电, 复合材料等领域。

由于计算机计算能力的飞速发展, 原先在超声导波检测研究中应用较多的有限元法开始出现在相控阵检测研究中^[9]。陈汉新等^[10]对含有缺陷的焊缝试块的相控阵检测过程进行有限元仿真, 其模拟与实验结果相似度较高。陈振华等^[11]通过分析相控阵超声检测的声场, 对有限元模型中的采样率、载荷子步等进行了优化设计。马立印等^[12-13]通过对发动机叶片的相控阵超声检测建模, 制订了合理的发动机检测方案, 并对换能器和楔块的设计理论机型进行了可行性验证。目前, 有限元法应用于相控阵全聚焦检测的研究还不多见^[14]。一套相控阵设备的价格还较高, 使用有限元法对相控阵超声检测进行研究, 一方面对研究物的检测较为灵活, 另一方面成本更低。

本文基于全矩阵数据采集, 对相控阵超声全聚焦算法进行研究, 以 ABAQUS 软件为研究工具, 建立了 32 阵元的全聚焦成像算法模型, 通过计算得到不同时刻的声波传播声场图、不同阵元的 A 扫描信号图以及 TFM 缺陷成像图。

收稿日期: 2019-02-20; 修回日期: 2019-04-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51775188)。

作者简介: 池强强(1994—), 男, 湖北孝感人, 硕士研究生, 研究方向为基于相控阵超声成像算法的缺陷检测。

通讯作者: 胡明慧, E-mail: agile_hu@ecust.edu.cn

1 全聚焦成像原理

1.1 全矩阵数据采集

基于 FMC 的超声全聚焦成像算法(TFM), 其原理如图 1 所示, 假设超声相控阵换能器有 n 个阵元, 每个阵元作为点元单独激发, 换能器所有阵元作为接收阵元, 采集并储存超声回波时域信号, 得到 n 列回波信号 S_{ij} , 其中 $j=1, 2, 3 \dots n$; 依次激发所有阵元晶片, 即可得到 n 组回波时域信号 $S_{11} \dots S_{1j} \dots S_{1n}$, 最后采集得到 $n \times n$ 列时域超声回波信号, 全矩阵数据分布如图 2 所示。

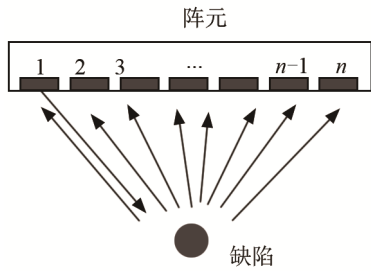


图 1 检测缺陷时的声波发射及接收示意图

Fig.1 Schematic diagram of acoustic emission and reception for defect detection

	1	...	j	...	n
1	S_{11}	...	S_{1j}	...	S_{1n}
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
i	S_{i1}	...	S_{ij}	...	S_{in}
$\vdots$	$\vdots$	...	...	...	...
n	S_{n1}	...	...	...	S_{nn}

图 2 采集到的全矩阵数据

Fig.2 The acquired full matrix data

1.2 全聚焦成像算法

采用全聚焦成像算法将全矩阵数据聚焦到被测区域内任意点, 实现区域内的图像表征^[15]。以长方形试块为研究对象, 未加装楔块, 采用如图 3 所示的 TFM 成像算法, 以相控阵探头中心为原点建立直角坐标系, P 点为待测物上任意一点, 坐标为 (x, y) , 计算 P 点到各阵元中心的距离, 从而得到 P 点在每列回波信号中的幅值, 对应全矩阵数据 S_{ij} ($i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, n$), 各信号叠加, 获得表征该点信息的幅值 $I(x, y)$ 。采用全聚焦成像算法得到检测区域内每点的成像。

各 P 点 (x, y) 的幅值 $I(x, y)$ 表示为

$$I(x, y) = \sum_j^n \sum_i^n S_{ij}[t_{ij}(x, y)] \quad (1)$$

式中, S_{ij} 为阵元 i 激励、阵元 j 接收的回波信号中

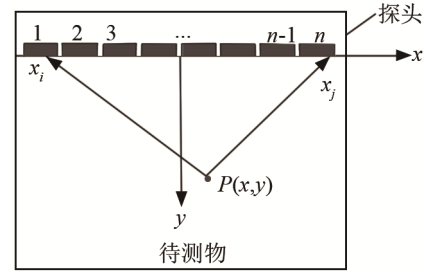


图 3 全聚焦成像算法示意图

Fig.3 Schematic diagram of TFM imaging algorithm

表征点 P 的幅值函数。而 $t_{ij}(x, y)$ 则是声波发出到点 P 后, 其回波被阵元接收整个过程的时间, 定义为

$$t_{ij}(x, y) = \frac{\sqrt{(x-x_i)^2 + y^2} + \sqrt{(x-x_j)^2 + y^2}}{c} \quad (2)$$

式中: c 为声波在被测物体中的传播速度, x_i 是发射阵元中心的横坐标, x_j 是接收信号阵元中心的横坐标。

2 有限元仿真

各向同性固体中的声场基本方程为^[16]

$$(\lambda + 2\mu)\nabla^2 u - \mu\nabla^2 u = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (3)$$

式中: λ 、 μ 为拉梅常数; u 表示质点位移; ρ 表示物体密度。由式(3)可导出系统的波动方程^[16]:

$$M\ddot{a}(t) + C\dot{a}(t) + Ka(t) = Q(t) \quad (4)$$

式中: $\ddot{a}(t)$ 、 $\dot{a}(t)$ 分别是节点加速度向量和节点速度向量; M 是结构质量矩, C 是阻尼矩阵, K 是系统的刚度矩阵, $Q(t)$ 是节点载荷向量。各参量的定义为

$$M = \sum_e M^e, C = \sum_e C^e, K = \sum_e K^e, Q = \sum_e Q^e \quad (5)$$

式中: $M^e = \int_{V_e} \rho N^T N dV$ 是单元的质量矩阵;

$K^e = \int_{V_e} B^T D B dV$ 是单元的刚度矩阵(其中 D 是单元的刚度);

$C^e = \int_{V_e} \mu N^T N dV$ 是阻尼矩阵;

$Q^e = \int_{V_e} N^T f dV + \int_{S_e} N^T N dS$ 是各个元素所受载荷的积分。

3 相控阵全聚焦成像建模

本文以 ABAQUS 软件对全聚焦成像过程进行模拟。由于相控阵反射的超声频率较高, 使得计算量过大, 因此以板的二维截面为研究对象, 进行有限元全聚焦模拟。板的材料参数如表 1 所示。

根据波动效应, 一个波长方向至少有 20 个单元^[17], 网格单元长度 l , 有限元时间步长 ΔT 应该

满足:

$$l = \frac{c}{20f} \quad (6)$$

$$\Delta T \leq 0.8 \times \frac{L}{\min(c)} \quad (7)$$

式中: f 是激励信号频率, c 是超声波在固体中的传播速度, L 是被检件的长度, $\min(c)$ 是介质中沿不同方向传播的最小波速。

表 1 材料参数
Table 1 Material parameters

材料	弹性模量/MPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)
Q235	2.06×10^5	0.283	7.9×10^3

有限元模拟中, 最大单元长度为 0.05 mm, 时间步长为 2×10^{-9} s。仿真模型如图 4 所示。模型长 100 mm, 高 30 mm, 内有一个直径 ϕ 为 2 mm 的圆孔缺陷, 孔缺陷中心坐标为 (0, -20) mm, 阵元宽为 0.4 mm, 阵元间距为 0.1 mm。在模型上边界施加 y 轴方向的瞬时位移载荷为相控阵超声探头发射时的激励源, 载荷为 4 个周期的加汉宁窗的单音频信号, 表达式为

$$\begin{cases} y = 20 \sin(2\pi f x) * [0.5 - 0.5 \cos(\frac{2\pi f x}{n})], & t \leq n/f \\ y = 0, & t > n/f \end{cases} \quad (8)$$

式中: t 是信号脉冲时间, f 为激发频率, $f = 5$ MHz。

图 5 为 4 个周期的汉宁窗激励信号波形图。

在有限元模拟过程中, 网格划分和边界条件的

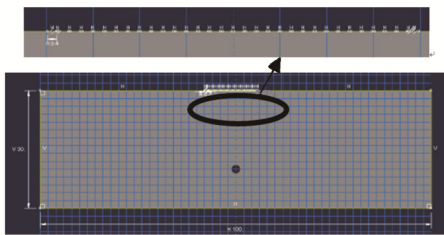


图 4 仿真模型(圈出部分为阵元晶片的局部放大图)
Fig.4 Simulation model (The circled portion is the enlarged view of array element wafer)

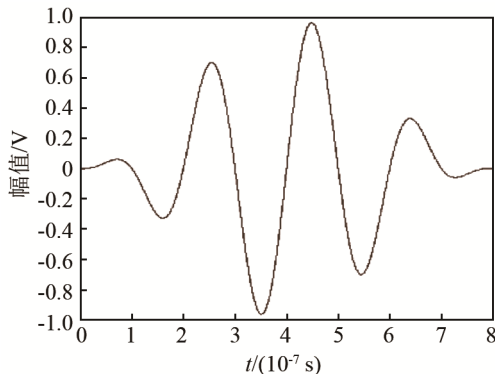


图 5 模拟超声激励信号的波形图
Fig.5 The simulated ultrasonic excitation signal waveform

设定, 关系着计算结果的准确性。在此模型中, 阵元间的边界条件设定为铰接, 即 $U_x = U_y = 0$, 当一个阵元激发时, 可减少激发阵元对其他阵元造成干扰; 两侧边界条件同样设定为铰接, 底部边界完全固定。为了提高计算效率和获得较好的计算收敛, 将待测件划分为几个规则区域, 除缺陷位置使用自由四边形网格以外, 其余部分都是均使用四边形结构网格。有限元模拟的网格划分如图 6 所示。

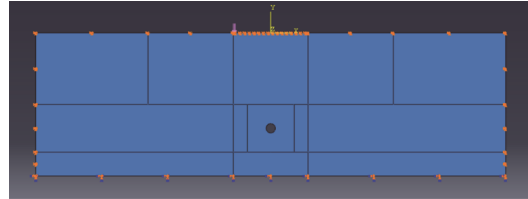
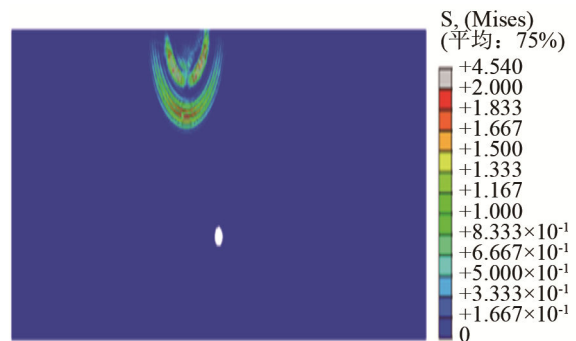


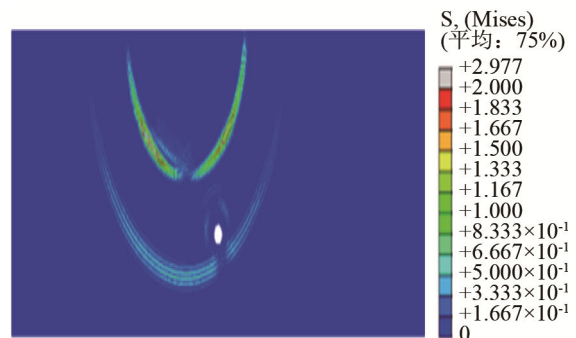
图 6 有限元模拟的网格划分
Fig.6 Mesh partition in finite element simulation

当阵元 1 激发时, 不同时刻板件内声波从激发到遇缺陷反射回波的传播过程如图 7 所示。图 7(a) 表示阵元 1 在 $t = 2 \times 10^{-6}$ s 时刻激发时, 声波中的纵波和横波都向四周传播, 阵元间上边界能量较小, 从而减少了成像干扰。图 7(b) 为 $t = 5 \times 10^{-6}$ s 时传播速度较快的纵波遇到缺陷, 产生了以缺陷为中心的反射波。图 7(c) 为 $t = 10 \times 10^{-6}$ s 时刻纵波遇到下底边界反射时, 反射声波能量较低。图 7(d) 为 $t = 15 \times 10^{-6}$ s 时刻各阵元已经接收到下底部的反射回波。图 7 中 Mises 表示等效应力, 单位为 Pa。

首先激发阵元 1, 其它阵元接收, 共得到 32 组



(a) $t = 2 \times 10^{-6}$ s



(b) $t = 5 \times 10^{-6}$ s

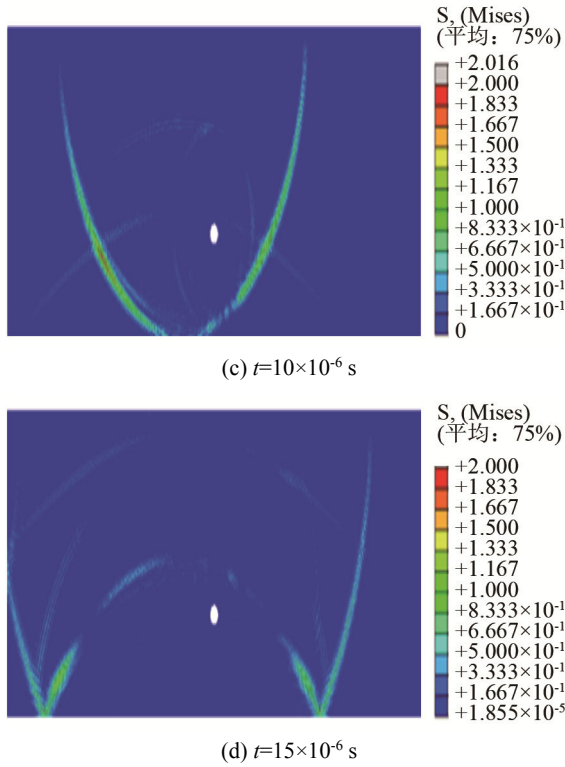


图7 阵元1激发时, 声波在板件中不同时刻的传播状态
Fig.7 The propagation state of acoustic wave in the plate at different times when Element 1 is excited

时域信号; 接着依次激发其它 31 个阵元, 共获得 32×32 组时域信号。32 个阵元接收的回波信号如图 8 所示。阵元 1 激发, 32 个阵元接收的时域回波信号如图 8(a)所示, 阵元 1 的激励波明显强于其余未激励的阵元。由于设置了边界条件, 各阵元间相互干扰很小, 回波接收过程有两个明显的波包, $8 \times 10^{-6} \text{ s}$ 附近处的波包为缺陷回波, $11 \times 10^{-6} \text{ s}$ 处的波包为底部的反射回波。由于各阵元中心的距离不同, 各阵元接收到的回波时间不同, 1、32 号阵元接收到缺陷回波时间最长, 中间阵元时间最短。缺陷回波处的放大信号如 8(b)所示, 可以明显看到, 回波信号的相位不同。

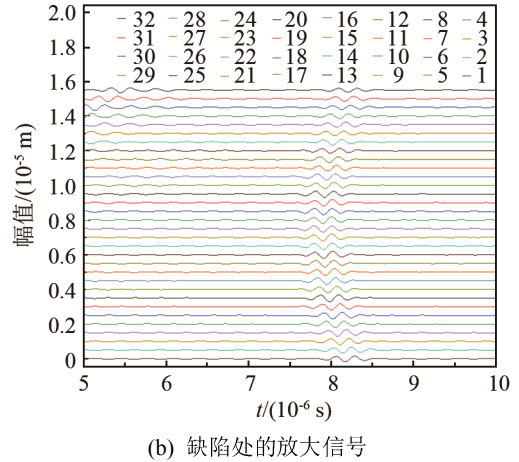
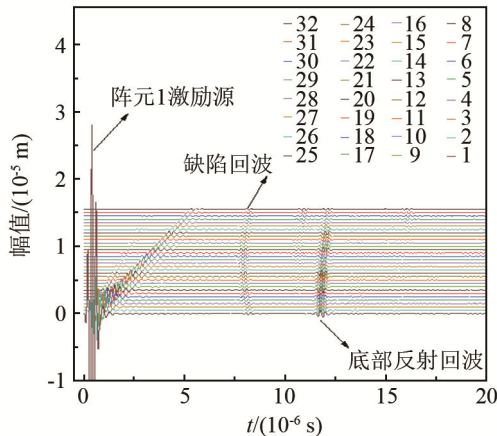


图8 阵元1激发时 32 个阵元接收的回波信号
Fig.8 Echo signals received by total 32 array elements when element 1 is excited

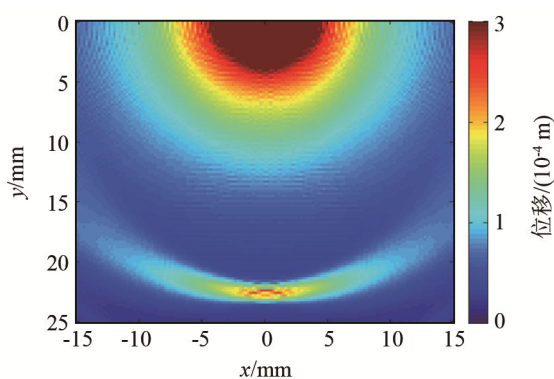
4 全聚焦成像模拟分析及实验验证

4.1 全聚焦成像模拟分析

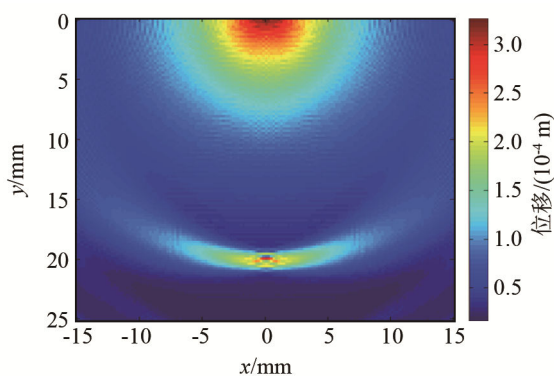
基于 MATLAB 软件编写全聚焦成像算法, 将 32×32 组 A 扫描位移信号进行图像重构为 $0.2 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$ 的正方形像素, 得到的 TFM 成像如图 9(a)所示, 能量主要集中在阵元近场区, 缺陷中心坐标为 $(0.1, 22.38)$ 。对激励波时间进行修正, 在计算成像区域的幅值时间时加上阵元激励出一个完整波形的时间 Δt ($\Delta t = 8 \times 10^{-7} \text{ s}$), 修正后的成像结果如图 9(b)所示, 缺陷中心的坐标为 $(0.1, 20.16)$ 。相较于图 9(a)而言, 图 9(b)的定位精度得到明显提升, 但缺陷的成像横向长约 10 mm , 纵向约 3 mm , 与实际缺陷 $\phi = 2 \text{ mm}$ 的圆孔相差较大。

成像区域进行网格重构时, 根据网格划分精度对每组 A 扫描信号进行分段, 从而提升成像精度, 对每一小段波包提取后再进行叠加, 取最大值作为网格像素处的信号幅值。网格像素尺寸为 $0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$, 经过改进处理后的全聚焦成像如图 10(a)所示, 其缺陷的分辨率较图 9(a)、9(b)有明显提升, 与预设的圆孔形状和尺寸一致。插值细化后的成像如图 10(b)所示, 缺陷中心坐标为 $(0.25, 20.28)$; -6 dB 法处理后的成像结果如图 10(c)所示, 提高了缺陷成像效果。图 10 中的模拟结果表明, 改进后的 TFM 成像算法对网格像素的尺寸不太敏感, 因此对于成像区域的网格适当划大后对结果进行插值细化, 可以有效地提高计算速度。

改变阵元的数目, 其它参数不变, 分别以 16、32、64 阵元进行了三组全聚焦模拟对比研究。由于阵元成像的数目影响信号强度, 采用 -6 dB 法对全聚焦成像结果进行归一化处理的结果如图 11 所示。



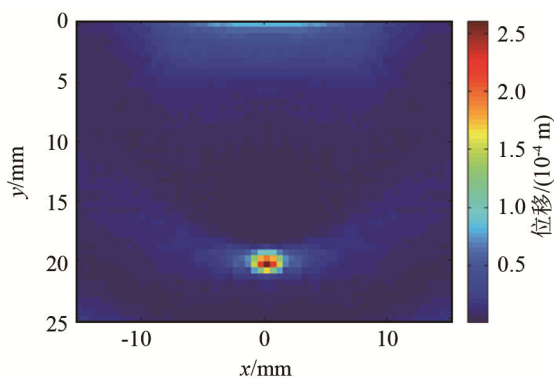
(a) 未进行时间修正的重构成像



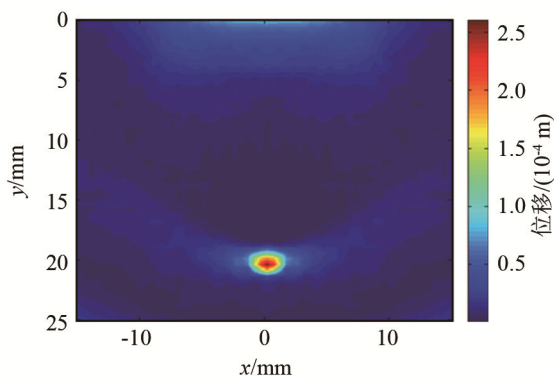
(b) 对激励时间进行修正后的图像

图 9 激励时间修正前后的全聚焦成像

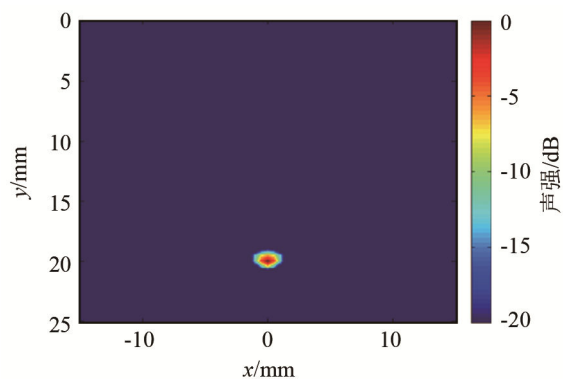
Fig.9 TFM imaging before and after excitation time correction



(a) 经改进处理后的全聚焦成像



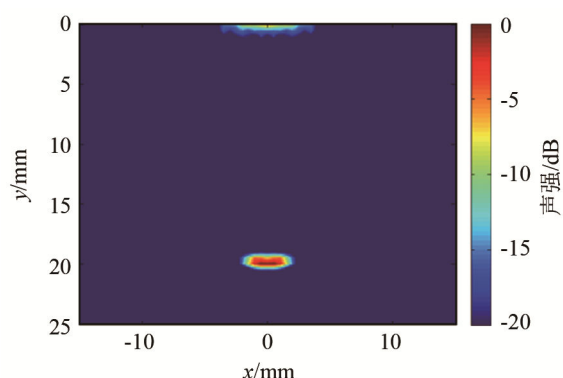
(b) 插值细化后的成像



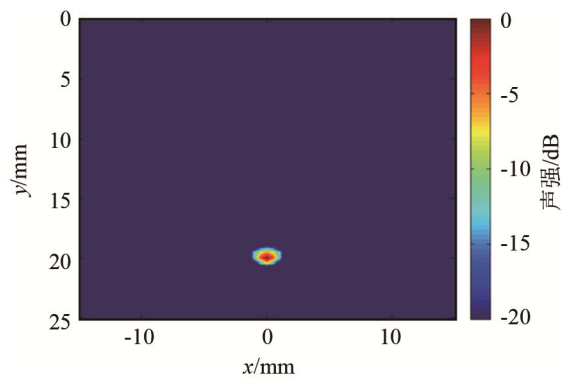
(c) -6 dB 法处理结果

图 10 网格重构改进后的全聚焦成像

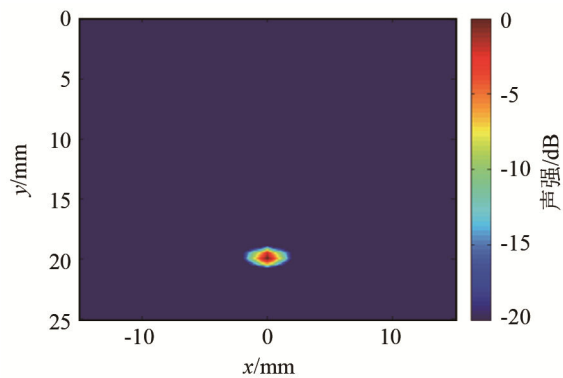
Fig.10 TFM imaging after improving mesh reconstruction



(a) 16 阵元



(b) 32 阵元



(c) 64 阵元

图 11 不同阵元归一化处理后的模拟全聚焦成像

Fig.11 The simulated TFM imaging after normalization of different array elements

对比图 11(a)~11(c), 发现图 11(a)缺陷的成像面积最大, 而图 11(c)缺陷处周围的散射能量较强, 图 11(b)的成像效果最好。在此模拟条件下, 32 阵元的全聚焦成像效果最好。

4.2 全聚焦成像实验分析

为验证本文全聚焦成像算法的可靠性, 采用美国 Verasonics 公司的 vantage 128 超声多通道仪器进行相关的验证实验, 分别以 16、32、64 阵元为激励阵元, 进行三组实验, 该实验设备系统自带 TFM 成像算法。实验材料选择与模拟中设定参数相同的 Q235 钢, 孔缺陷的深度为 20 mm, 探头中心频率为 5 MHz, 采样频率为 20 MHz, 探头各阵元的位置与模拟的阵元位置相同。

基于不同阵元的 A 扫描信号实验数据, 对其进行全聚焦成像处理, 结果如图 12 所示。其中, 图 12(d)、12(e)、12(f)分别为图 11(a)、11(b)、11(c)使用 $-6\text{ dB}^{[18]}$ 法处理后的成像结果。实验仪器自带算法的不同阵元全聚焦成像结果如图 13 所示。

如图 12(a)~12(c)所示, 32 阵元全聚焦成像效果接近实际的开口缺陷尺寸; 16 阵元对应的成像效果较差。对比分析图 12(a)和 12(d), 由于阵元数量较少, 缺陷处的信号强度远低于近场区的信号强度, 经归一化处理后, 缺陷反而不太突出; 64 阵元

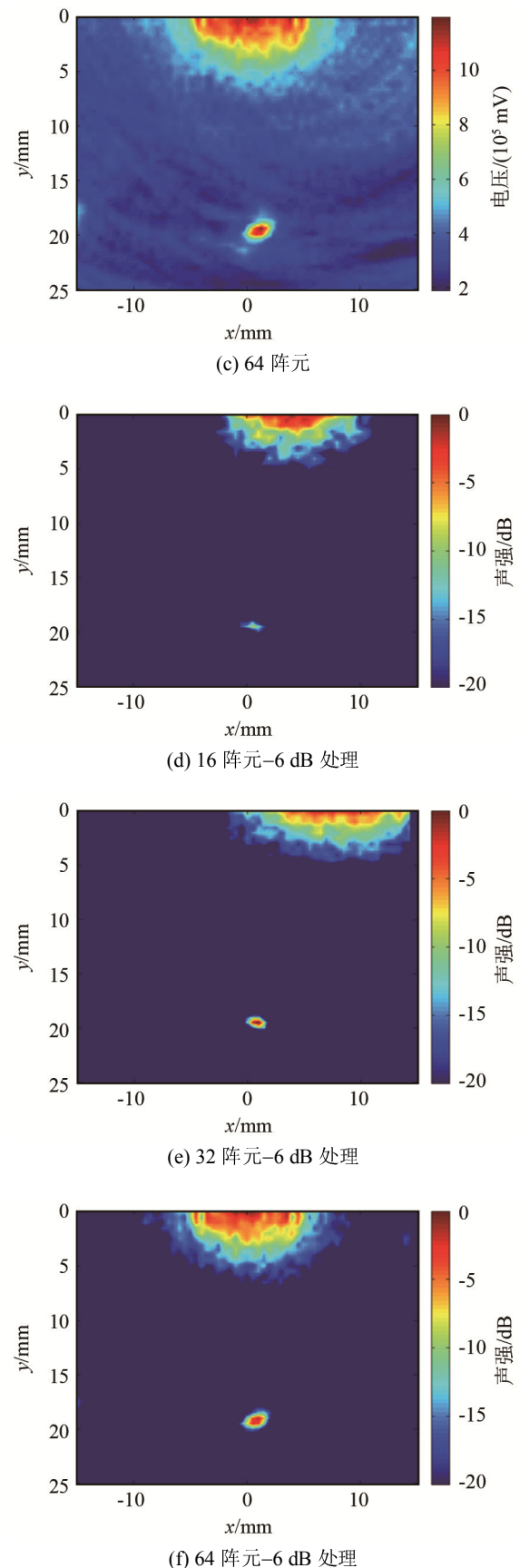
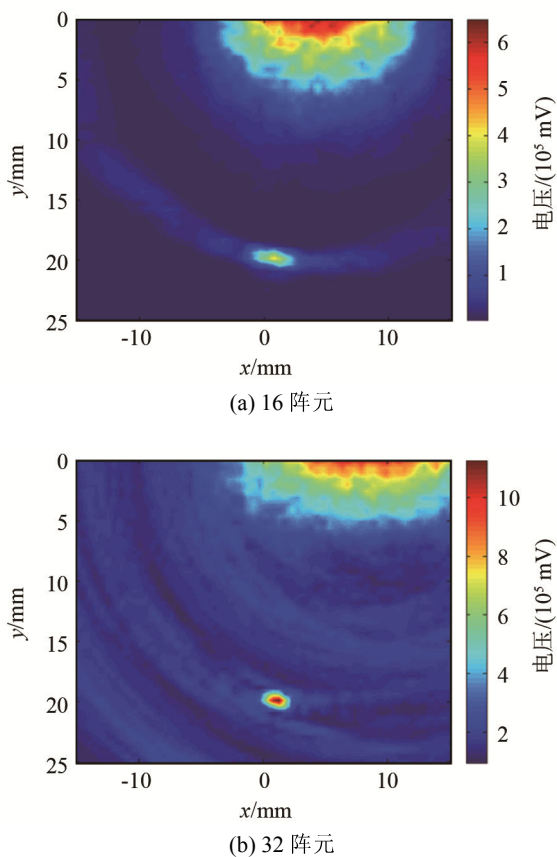


图 12 基于实验数据的不同阵元全聚焦成像
Fig.12 TFM imaging of different array elements based on experimental data

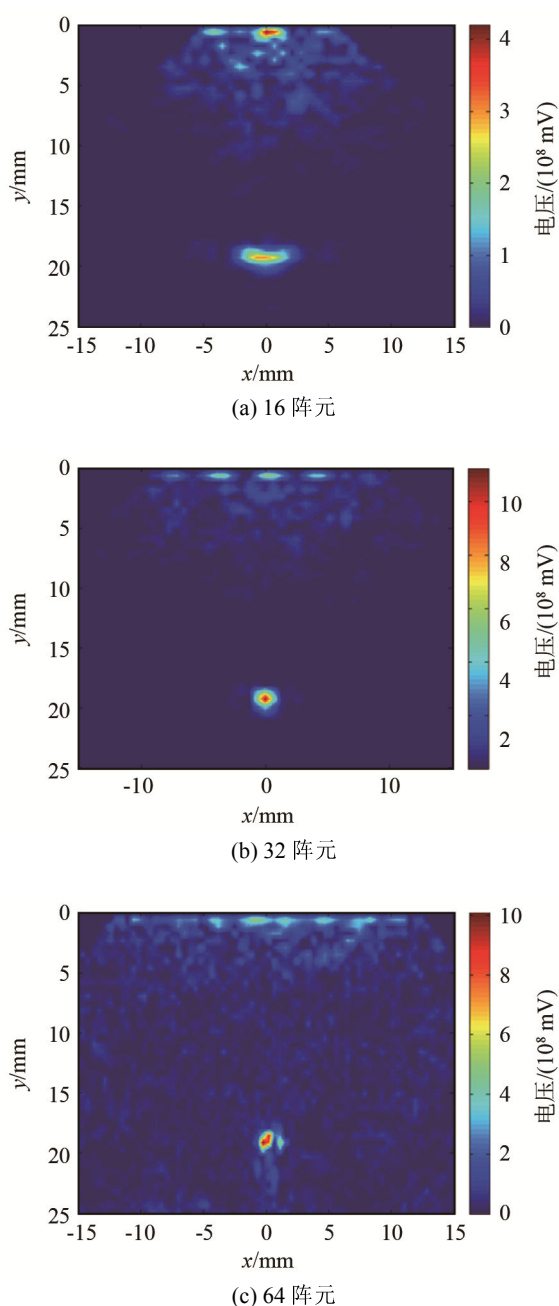


图 13 Verasonics 公司的实验仪器得出的不同阵元成像
Fig.13 Imaging of different array elements obtained by Verasonics experimental instruments

对应的缺陷周围散射能量最强；这与图 11 的模拟成像结果一致。

图 13 中的不同阵元全聚焦成像结果表明，成像区域中的干扰信号强度随着阵元数量的增加而加强；与图 12(a)~12(c)相比，图 13 中近场区的信号强度较低，图 12(c)的缺陷面积接近实际缺陷，图 13(c)的缺陷成像面积比图 12(c)小。由于近场区的干扰信号无法避免而且能量集中，图 12 的上半部图像区域有着明显的能量集中，对待测物进行双面检测，可避免近场区缺陷漏检。

对比模拟结果与实验结果，如图 11 与图

12(d)~12(f)所示，图 11 中无明显的近场区信号，这是由于在模拟过程中，信号激励的整个过程消耗的时间为 $\Delta t = 8 \times 10^{-7}$ s。因此，在成像区域的离散点计算时间过程中，都会对其进行时间修正，减去一个 Δt ，使得近场区在纵坐标的负值区域，并没有在成像区域中显现出来；而实验过程中，可添加一定厚度的楔块进行检测，这样可以避免近场区的信号干扰。另外，如图 10(b)所示，由于模拟中忽略干扰，对比图 12、图 13，模拟的全聚焦成像区域中无明显的干扰信号，对缺陷的检测效果更好。

5 结 论

本文采用 ABAQUS 有限元软件模拟了全聚焦成像的超声相控阵检测方法，将实验结果与模拟结果进行了对比分析，验证了模型的正确性。主要结论如下：

(1) 由于模拟中忽略了杂波信号的干扰，相控阵全聚焦成像缺陷检测的模拟效果好于实验结果。

(2) 三组 16、32、64 探头阵元成像的模拟结果和实验结果都表明，并非探头阵元数越多全聚焦成像效果越好，因此在实际装备缺陷检测时，需要通过模拟结果来选择最优的探头阵元数。

(3) 采用 MATLAB 软件对全聚焦成像算法进行了优化，缺陷成像的模拟结果与国外 Verasonics 公司的设备检测效果相近，但近场区信号的处理与实验仪器的检测结果还有一定差距，需要进一步优化全聚焦成像算法。

参 考 文 献

- [1] 李衍. 相控阵超声检测国际动态[J]. 无损检测, 2009, 31(1): 56-60.
LI Yan. Worldwide trend of phased array ultrasonic testing[J]. Nondestructive Inspection, 2009, 31(1): 56-60.
- [2] 李京安. 超声相控阵扇形扫描检测成像技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
LI Jing'an. Research on phased array ultrasonic sector-scan inspection imaging technology[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [3] HU H J, ZHU X, WANG C H, et al. Stretchable ultrasonic transducer arrays for three-dimensional imaging on complex surfaces[J]. Sci. Adv. 2018, 4: 1-11.
- [4] HOLMES C, DRINKWATER B W, WILCOX P D. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation. NDT E Int. 2005, 38: 701-711.
- [5] HUNTER A J, DRINKWATER B W, WILCOX P D. The wave number algorithm for full matrix imaging using an ultrasonic array[J]. IEEE Transaction on Ultrasonics, and Frequency Control, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2008, 55(11): 2450-2462.
- [6] VELICHKO A, WILCOX P D. Reversible back-propagation imaging algorithm for post processing of ultrasonic array data[J]. IEEE Transaction on Ultrasonics, and Frequency Control, Ferro-

- lectrics, and Frequency Control, 2009, **56**(11): 2492-2503.
- [7] HUNTER A J, DRINKWATER B W, WILCOX P D. Autofocusing ultrasonic imagery or non-destructive testing and evaluation of specimens with complicated geometries[J]. NDT E Int, 2010, **43**(2): 78-85.
- [8] ZHANG J, DRINKWATER B W, WILCOX P D. Effects of array transducer inconsistencies on total focusing method imaging performance. NDT E Int. 2011, **44**(4): 361-368.
- [9] 童今鸣, 胡明慧. 基于纵向超声导波管道非通透缺陷检测研究[J]. 声学技术, 2017, **36**(3): 238-246.
- TONG Jinming, HU Minghui. Detection of non-penetrating defect in pipeline based on the longitudinal ultrasonic guided wave[J]. Technical Acoustics. 2017, **36**(3): 238-246.
- [10] 陈汉新, 向波, 周庆, 等. 超声相控阵有限元建模分析[J]. 焊接技术, 2018, **47**(1): 15-17.
- CHEN Hanxin, XIANG Bo, ZHOU Qing, et al. Ultrasonic phased array finite element modeling analysis[J]. Welding Technology, 2018, **47**(1): 15-17.
- [11] 陈振华, 黄智刚, 王婵, 等. 超声相控阵检测声场的有限元仿真建模及其试验验证[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, **32**(2): 48-55.
- CHEN Zhenhua, HUANG Zhigang, WANG Chan, et al. Finite element modulation and its experimental verification on sound field of ultrasonic phased array testing[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, **32**(2): 48-55.
- [12] 马立印, 李洋, 周正干. 检测发动机叶片的相控阵超声换能器设计[J]. 压电与声光, 2017, **39**(5): 669-672.
- MA Liyin, LI Yang, ZHOU Zhenggan. Design of phased array ultrasonic transducer for detection of aero engine turbine blade[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2017, **39**(5): 669-672.
- [13] 马立印, 李洋, 周正干. 整体叶盘叶片焊缝裂纹相控阵超声检测[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, **43**(9): 1900-1908.
- MA Liyin, LI Yang, ZHOU Zhenggan. Detection of welding crack in blisk blade based on ultrasonic phased array[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, **43**(9): 1900-1908.
- [14] 池强强. 超声相控阵检测的数值模拟及全聚焦成像研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2019.
- CHI Qiangqiang. Research on ultrasonic phased array detection and TFM imaging based on finite element method[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2019.
- [15] ZHOU Zhenggan. Research on phased array ultrasonic total focusing method and its calibration[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, **51**(10): 1-7.
- [16] 丁辉. 计算超声学: 声场分析及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 41-43.
- DING Hui. Computational ultrasound: analysis and application of ultrasonic field[M]. Beijing: Science Press, 2010: 41-43.
- [17] SAEED Moaveni. Finite element analysis: theory and application with ANSYS second edition[M]. New York: Pearson Education, INC. 2008.
- [18] 中华人民共和国机械工业部. JB/T 4009—1999 接触式超声纵波直射探伤方法[S]. 上海: 全国无损检测标准化技术委员会, 1999.
- Ministry of Machine Building and Electronics Industry. JB/T 4009-1999 Recommended practice for ultrasonic pulse-echo straight-beam testing by the contact method[S]. Shanghai: National Technical Committee 56 on Non-destructive testing of Standardization Administration of China, 1999.