**引用格式：**张杰，莫润阳. 超声相控阵全聚焦成像算法比较分析[J]. 声学技术, 2021, **40**(1): 71-76. [ZHANG Jie, MO Runyang. Comparative analysis of total focusing method in ultrasonic array imaging algorithms[J]. Technical Acoustics, 2021, **40**(1): 71-76.] **DOI**: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2021.01.011

# 超声相控阵全聚焦成像算法比较分析

张 杰，莫润阳
(陕西师范大学超声学重点实验室，陕西西安 710062)

**摘要：**先进的成像算法推动了超声相控阵技术的发展，全聚焦方法(Total Focusing Method, TFM)是一种基于全矩阵捕获的虚拟聚焦后处理及缺陷图像重构算法。文章基于一维线阵相控阵纵波探头全矩阵数据模式，利用 Matlab 软件结合 Field II 自带开源函数包编写了算法程序，比较了 TFM 和 1/2 矩阵方法成像效果并对缺陷分辨率影响因素进行分析，最后用标准试块对算法进行实验验证。仿真结果表明，TFM 和 1/2 矩阵方法都能用于缺陷重构且效果无明显差异，激励脉冲的宽度和频率对图像分辨率影响较大；实验表明，1/2 矩阵的成像方法虽可有效降低计算数据量，但同时也丢失了检测区边缘处缺陷的部分信息，因而成像效果较 TFM 稍差。

**关键词：**超声相控阵；全矩阵捕获；全聚焦算法；1/2 矩阵方法
**中图分类号：**O426 **文献标志码：**A **文章编号：**1000-3630(2021)-01-0071-06

# Comparative analysis of total focusing method in ultrasonic array imaging algorithms

ZHANG Jie, MO Runyang
(*Shaanxi Key Laboratory of Ultrasonics*, *Shaanxi Normal University*, *Xi'an* 710062, *Shaanxi*, *China*)

**Abstract:** Advanced imaging algorithms promote the development of ultrasonic phased array technology. Total focusing method (TFM) is a virtual focusing post processing and defect image reconstruction algorithm based on full matrix capture. In this paper, based on the full matrix data mode of one-dimensional linear phased array longitudinal wave probe, the algorithm is programmed by using Matlab software combined with the open source function package of Field II. The imaging effects of TFM and 1/2 matrix method are compared, and the influencing factors of defect resolution are analyzed. Finally, the algorithm is verified experimentally with the standard test block. The simulation results show that both TFM and 1/2 matrix method can be used for defect reconstruction without significant difference in effect, and the width and frequency of the excitation pulse have great influence on the image resolution. Experimental results show that the imaging method of 1/2 matrix can effectively reduce the amount of calculated data, but it also loses part of the defect information at the edge of the detection area, and its imaging effect is slightly worse than that of TFM.

**Key words:** ultrasonic phased array; full matrix capture (FMC); total focusing method (TFM); 1/2 matrix technique

## 0 引 言

全聚焦方法(Total Focusing Method, TFM)是一种基于全矩阵捕获(Full Matrix Capture, FMC)数据进行图像重建的超声阵列后处理技术，由英国 Bristol 大学 Holmes 等[1-2]于 2005 年首次提出。相比于传统相控阵线扫及扇扫成像方法，TFM 有更高的缺陷分辨率和更大的扫查面积，有“黄金算法”之称。但 FMC 数据量庞大、数据处理时间长，难以满足工业实时检测的需求，也限制了其在工业应用领域推广的脚步，如何提高全聚焦算法的计算效率成为全聚焦实时检测中的关键技术。全矩阵数据后处理技术及以提高运算速度为目的全聚焦成像算法改进的研究从未停止过。全聚焦检测成像方法主要包括时域线性成像、频域线性成像及非线性成像[3]。时域线性成像利用全矩阵数据的时域信息对试件内部进行重构，最具代表的算法即为全聚焦算法，应用最为广泛。但全聚焦方法没有利用信号的频域信息，Hunter 等[4]用频域线性成像算法中的波数域方法、Velichko 等[5]用反向传播方法弥补其不足，Potter 等[6]考虑非线性效应，利用相同相位延时下相位控制和全矩阵数据所得到的幅值差异对材料内部的非线性进行成像，Zhang 等[7]用迁移法提高运算速度。周正干等[8]通过对有楔块时声衰减进行校准、提出了使成像更加均匀的算法，张昊等[9]

**收稿日期：**2020-01-13; **修回日期：**2020-02-20
**基金项目：**基金项目(12074238、11474192)
**作者简介：**张杰(1999－)，男，陕西延安人，研究方向为超声成像算法。
**通信作者：**莫润阳，E-mail: mmrryycn@snnu.edu.cn

提出了三维成像方法。从本质上说，任何相控阵超声成像算法的研究可等价为对全矩阵数据的某种后处理算法的研究。

本文针对全矩阵数据两种后处理算法，即 TFM 和 1/2 矩阵方法的图像重建质量和计算量，在保证真实还原缺陷的前提下提高全聚焦成像的运算速度。利用 Matlab 软件结合 Field Ⅱ开源函数包编写算法程序，对这两种方法的成像能力进行了理论仿真和实验验证。结果表明，1/2 矩阵方法从理论上与全聚焦方法完全相同。但实际检测应用中，1/2 矩阵方法会丢失检测区域边缘部分信息，但若探头参数选择合适时，1/2 矩阵方法仍能真实还原缺陷的物理特性，说明该法具备替代 TFM 方法、实现实时检测的潜力。

## 1 全聚焦算法理论模型

全矩阵数据捕获(FMC)是收集相控阵数据的一种方法，而基于超声波相干叠加的全聚焦方法(TFM)则是一种超声阵列后处理技术。TFM 处理的第一步就是采集 FMC 数据，使用超声阵列探头的 FMC 特定数据采集过程，其中阵列中的每个阵元依次作为发射器，而所有阵元作为每个发射脉冲的接收器。相控阵换能器的 $N$ 个阵元依次激发，当其中一个阵元被激发时，所有阵元都接收超声回波信号并储存。将发射阵元的序号记为 $i$，接收阵元的信序号为 $j$，接收的超声回波时域信号记为 $S_{ij}$，每个具体的 $S_{ij}$ 其实就是一个 A 扫信号。待 $N$ 个阵元都激发完成后，便可得到一个包含了检测物体全部信息的 $N\times N$ 矩阵集，如表 1 所示。根据波的迭加原理，几列波在均匀介质中传播相遇时的振动是各列波的线性叠加，其幅值也是各列波在此点的矢量和，且几列波相遇后仍保持着各自的特性按照原来传播方向继续传播。因此，在全聚焦算法的扫描区域内，任何一点的振动可以认为是所有阵元发射声波的共同作用，那么待测区域内任意一点的声压幅值即为每一个声波在此点的声压幅值之和。

表 1 全矩阵捕获的数据表
Table 1 FMC data list

| 发射阵元编号 | 接收阵元接收回波信号 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | … | $j$ | … | $N$ |
| 1 | $S_{11}$ | $S_{12}$ | … | $S_{1j}$ | … | $S_{1N}$ |
| 2 | | $S_{22}$ | … | $S_{2j}$ | … | $S_{2N}$ |
| … | … | … | … | … | … | … |
| $i$ | $S_{i1}$ | $S_{i2}$ | … | $S_{ij}$ | … | $S_{iN}$ |
| … | … | … | … | … | … | …… |
| $N$ | $S_{N1}$ | $S_{N2}$ | … | $S_{Nj}$ | … | $S_{NN}$ |

TFM 处理的第二步即基于 FMC 数据进行图像重建，此即全聚焦成像，基本原理如图 1 所示。在待检样品中选择一个虚拟聚焦点 $p$，对于一维相控阵，以阵列换能器几何中心为原点建立坐标系，其中 $x$ 轴为沿试块长度方向，$z$ 轴为沿试块高度方向。将成像区域划分为若干个像素点，根据采集数据计算每个像素点的声压幅值，然后进行归一化处理并成像显示。以图 1 中的点 $(x,z)$ 为例，该点的声压幅值 $P(x,z)$ 的计算公式为[8]

$$P(x,z)=\left|\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\left[S_{ij}\otimes\left(\frac{T_{ip}+T_{pj}}{\Delta t}\right)\right]\right| \tag{1}$$

式中：$T_{ip}$ 为声波从阵元 $i$ 传播至点 $p$ 所用的时间，$T_{pj}$ 为声波从 $p$ 点返回到阵元 $j$ 所用的时间，$S_{ij}$ 为第 $i$ 个阵元发射，第 $j$ 个阵元接收的时域信号，$\Delta t$ 为采样间隔，“$\otimes$”定义为设右元素取整结果为 $x$，则结果为左边行向量的第 $x$ 个分量的值。因此式(1)实际上就是比较 $p$ 点在 $i$ 阵元发射、$j$ 阵元接收时，采集的离散信号时间和该点计算的声波传播时间是否相等。若两者相等，就认为这个采集数据对应的声压幅值是由该点处的缺陷所产生。最后对所有 $S_{ij}$ 中提取的声压信号求和，此即该点对应的声压幅值。式(1)中 $T_{ip}+T_{pj}$ 的计算公式为

$$T_{ip}+T_{pj}=\frac{\sqrt{(x_i-x)^2+z^2}+\sqrt{(x_j-x)^2+z^2}}{c} \tag{2}$$

其中，$x_i$ 为发射阵元中心的横坐标，$x_j$ 为接收阵元中心的横坐标，$c$ 为超声波在待测物体中传播的纵波速度。

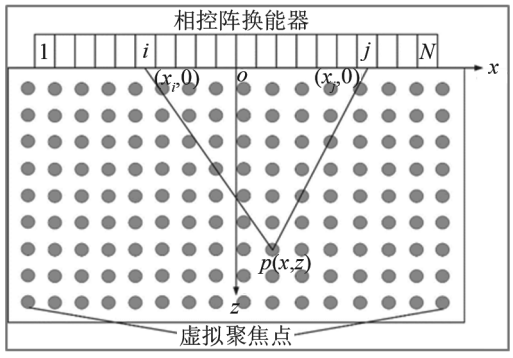



图 1 全聚焦方法成像处理的原理图
Fig.1 Schematic diagram of TFM imaging process

考虑到全矩阵数据为对称矩阵，对图 1 中的点 $p$ 来说，由阵元 $i$ 发射、阵元 $j$ 接收的超声回波信号 $S_{ij}$ 和由阵元 $j$ 发射、阵元 $i$ 接收的超声回波信号 $S_{ji}$ 的传播路径一致，所需要传播时间相同，即 $T_{ip}+T_{pj}=T_{jp}+T_{pi}$，且如果不考虑不同阵元发射信号的微小差异，回波信号 $S_{ij}$ 和 $S_{ji}$ 也相同。于是，可对式(1)进行化简，在成像时只需将全矩阵的上三角

或下三角的声波信号进行计算，化简后 $p$ 点的声压幅值 $P(x,z)$ 的计算式为

$$P(x,z)=\left|\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{i}\left[S_{ij}\otimes\left(\frac{T_{ip}+T_{pj}}{\Delta t}\right)\right]\right| \tag{3}$$

式中，$j$ 的取值范围从(1)式中的 1～$n$ 变为 1～$i$。式(3)相比式(1)，参与运算的全矩阵的非对角线超声回波信号减少了一半，参与叠加的声波幅值也降低一半，但是对角线上的声波幅值却没有改变，所以应将对角线的声波幅值也减小 1/2 以保持相同的对比度，于是式(3)变为

$$P(x,z)=\left|\sum_{i=1}^{n}\left[\sum_{j=1}^{i-1}S_{ij}\otimes\left(\frac{T_{ip}+T_{pj}}{\Delta t}\right)+\frac{1}{2}S_{ii}\otimes\left(\frac{2T_{ip}}{\Delta t}\right)\right]\right| \tag{4}$$

对于全矩阵捕获得到的 $N\times N$ 矩阵来说，若采用传统全聚焦算法，在每一个像素点都需要计算 $N^2$ 次，而采用 1/2 矩阵方法只需要叠加 $n(n+1)/2$ 次。例如对于 32 阵元相控阵换能器，传统全聚焦算法需要叠加 1 024 次，而简化算法需要叠加 496 次，理论计算效率能提高 50%左右。

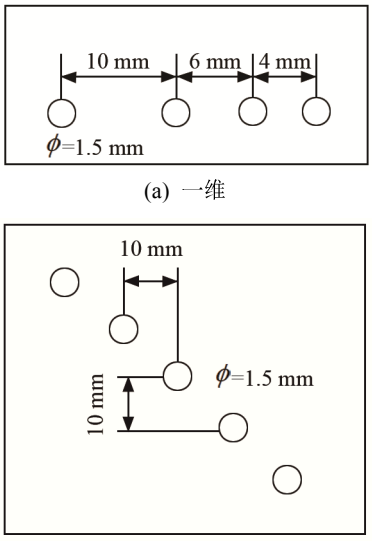
## 2　缺陷模型全矩阵数据仿真

全聚焦成像算法采用延时叠加的方法，能使换能器不同发射-接收阵元组合的回波数据聚焦到被测区域内的每一个虚拟聚焦点。全矩阵数据的仿真能够为检测与评价算法的设计、分析及优化提供数据支撑。

### 2.1　一维/二维分布的缺陷模型设计及仿真成像

本研究设计了两种缺陷模型用于理论仿真，包括一维横向缺陷和二维缺陷模型。考虑实验用试块上相邻两缺陷中心间距为 5 mm，为对成像算法缺陷分辨能力进行评估，所设计横向分布的缺陷模型如图 2(a)所示，从左到右相邻两缺陷中心间距离分别为 10、6 及 4 mm。二维缺陷模型如图 2(b)所示，每个缺陷间的横向间隔与纵向间隔皆为 10 mm。仿真所用相控阵探头阵元数为 32，阵元宽度为 0.5 mm，阵元间隔为 0.1 mm，采样频率为 100 MHz，试块中超声波声速为 5 800 m·s$^{-1}$。

利用 Field Ⅱ 软件进行缺陷仿真。Field Ⅱ 是基于 Matlab 软件平台，使用其自带开源函数包、通过调用函数进行仿真。首先，利用内置函数、初始化探头基本参数：阵元个数 32、单个阵元宽度为 0.5 mm，阵元间隔为 0.1 mm，阵元高度为 10 mm。然后，以矩阵的形式创建缺陷散射体的位置和对应的散射强度矩阵，初始化阵元的脉冲激励，最后利用全聚焦成像的激励模式，调用内部函数计算出回波数据，使用全聚焦成像的后处理算法对得到的回波数据进行处理，并将计算结果进行成像。本算法处理中将单个阵元等效成活塞换能器[9-11]，对其发

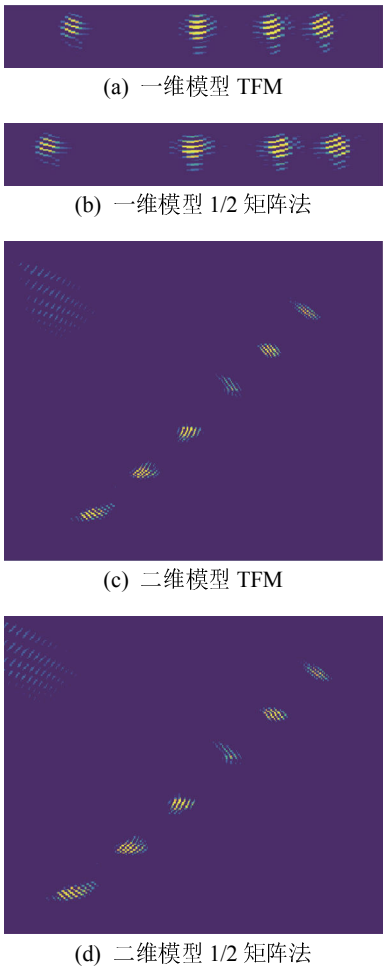



(a) 一维

(b) 二维

图 2　缺陷模型示意图

Fig.2　Schematic diagrams of defect distribution model



(a) 一维模型 TFM

(b) 一维模型 1/2 矩阵法

(c) 二维模型 TFM

(d) 二维模型 1/2 矩阵法

图 3　TFM 和 1/2 矩阵法对缺陷模型的仿真效果图

Fig.3　Simulation images of the defect models by TFM technique and 1/2 matrix approach

射和接受的声波利用指向性函数进行了修正。采用 TFM 和 1/2 矩阵方法分别对一维、二维分布的缺陷模型进行仿真，结果如图 3(a)～3(d)所示。

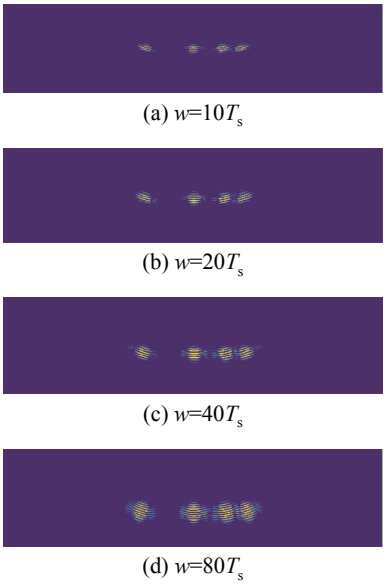
由图 3 可见，TFM 和 1/2 矩阵方法对一维、二维分布的缺陷都有较好的检出效果，且所有缺陷都能从图像上清晰分辨。尤其对呈一维分布的缺陷模型，当两相邻缺陷的横向间距等于 4 mm 时，每个缺陷图像之间无粘连，仍可清晰独立分辨，说明基于全矩阵数据的缺陷检测能力很强。两种方法理论仿真效果无差异这一点，从理论上非常容易理解，基于声学互易原理，阵元 $j$ 发射、阵元 $i$ 接收的超声回波信号与阵元 $i$ 发射、阵元 $j$ 接收的超声回波信号理论上完全相同(当且仅当这两个阵元的激励信号、接收信号的指向性相同时)，理论上采用 1/2 矩阵方法并未丢失任何回波数据，但 1/2 矩阵方法成像计算量比全矩阵方法少了 50%。当检测探头各个阵元性能相近时，可以使用 1/2 矩阵法，但是如果有某些阵元的性能异常时，需要剔除和这个阵元相关的回波数据后再进行成像。

## 2.2 影响缺陷分辨力的主要因素

经以上对缺陷模型仿真发现，某些参数的变化对成像的质量影响很大，下面利用一维缺陷模型分别对这些因素的影响进一步分析。

### 2.2.1 激励脉冲宽度 $w$ 的影响

首先研究产生超声波激励的脉冲宽度对成像结果的影响。对全聚焦成像过程来说，每个阵元激励的脉冲是有一定宽度的，在本次仿真过程中，将脉冲宽度 $w$ 和采样周期($T_s$)联系起来，图 4(a)～4(d)分别为 $w$=10$T_s$、20$T_s$、40$T_s$、80$T_s$ 时一维模型的成像效果。从仿真实验的角度来看，当脉冲宽度 $w$=20$T_s$，成像分辨率是相对较高，可以分辨 4 mm 之内的散射斑点，而且当脉冲宽度越大时，缺陷散射斑点越大。



(a) $w$=10$T_s$

(b) $w$=20$T_s$

(c) $w$=40$T_s$

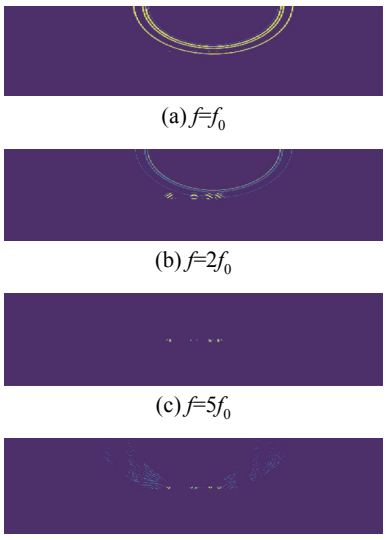
(d) $w$=80$T_s$

图 4 超声波脉冲宽度 $w$ 对仿真成像结果的影响

Fig.4 Effects of ultrasonic pulse width on simulated imaging results

### 2.2.2 激励信号频率 $f$ 的影响

激励信号是指数衰减包络调制下的正弦信号，若探头中心频率用 $f_0$ 表示，当激励探头的声波频率 $f$ 分别为其中心频率的 1、2、5 及 10 倍时，即 $f=f_0$、$2f_0$、$5f_0$、$10f_0$ 时，一维分布缺陷模型的成像效果如图 5(a)～5(d)所示。当 $f=f_0$ 时无法成像，干涉条纹形成光圈，无法分辨缺陷在何处；当 $f=2f_0$ 和 $f=5f_0$ 时缺陷像点边缘较清晰；当激励频率较大，如 $f=10f_0$ 的时候，除了缺陷影像之外还会出现比较多的伪像，影响判断。



(a) $f$=$f_0$

(b) $f$=2$f_0$

(c) $f$=5$f_0$

(d) $f$=10$f_0$

图 5 超声波激励频率对仿真成像结果的影响

Fig.5 Effects of ultrasonic excitation frequency on simulated imaging results

# 3 算法验证

实验采用中国科学院声学研究所的超声相控阵数据采集平台 UT-Stadio 对济宁高新东方模具制造有限公司的试块进行全矩阵数据采集，线阵探头型号为 5L32-A30(上海新阵元电子科技有限公司生产)，阵元个数为 32，阵元长度为 10 mm，阵元宽度为 0.5 mm，阵元间隔为 0.1 mm。检测区域为试块右上方红色方框区域内的 12 个 $\phi$1.5 mm 横孔缺陷(从下至上依次编号为 1～12 号)，相邻两孔中心间距为 5 mm。数据采集时将相控阵探头耦合于试件的上表面，如图 6 所示。对采集到的全矩阵数据首先进行滤波处理，然后分别采用全聚焦算法和 1/2

矩阵方法进行缺陷成像，结果见图 7(a)～7(d)。

两种算法得到的检测图像中，1～11 号缺陷均能独立、清晰显现，且位于相控阵探头正下方区域的缺陷反射信号最强，两侧边缘区域信号弱，尤其是距离上表面最近的 12 号孔(表面下 13 mm)，未经滤波处理(图 7(a)、7(b))时像斑依稀可见，但经滤波处理后，(如图 7(c)、7(d))，信号几乎消失，可见，滤波虽可提高信噪比，但同时也造成较弱信号的缺失。另外，对比图 7(a)、7(b)，全聚焦(图 7(a))与 1/2 矩阵法(图 7(b))成像效果并不完全相同，尤其是位于检测区域两侧边缘的缺陷，前者细节显示较后者更清晰。其主要原因为实际所用相控阵探头的各阵元的参数不可能完全一致，同样激励条件下所激发的超声波存在差异，接收阵元的指向性也不完全一样。因此在实验中，回波的全矩阵数据不可能是完全对称的矩阵，全矩阵的 1/2 数据并无法代表所有的回波信息。虽然 1/2 矩阵法在计算量和信噪比方面优于全矩阵算法，但是 1/2 矩阵丢失了部分边缘缺陷的信息。该结果也同时提示我们，可以利用实验上所得不完全对称矩阵来判断各个阵元的一致性的差异是否在实验测量误差的允许范围之内，为探头的质量检测提供一种有效的分析方法。

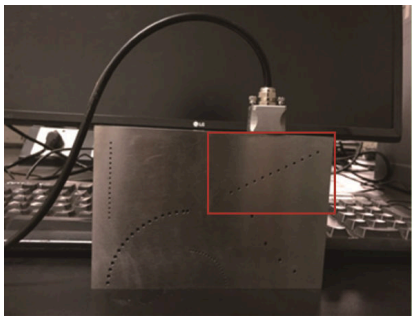
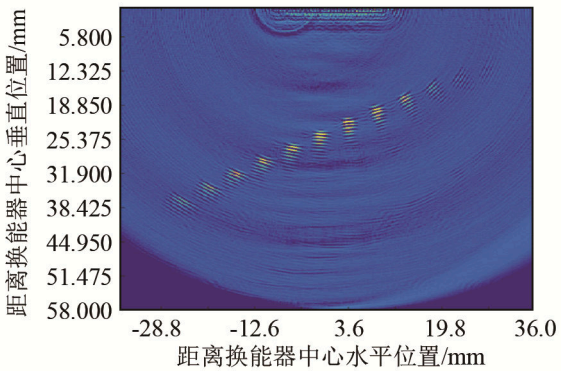
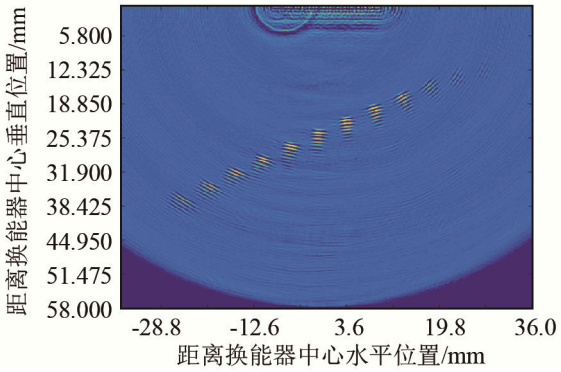


Fig.6　含测孔试块的探测演示

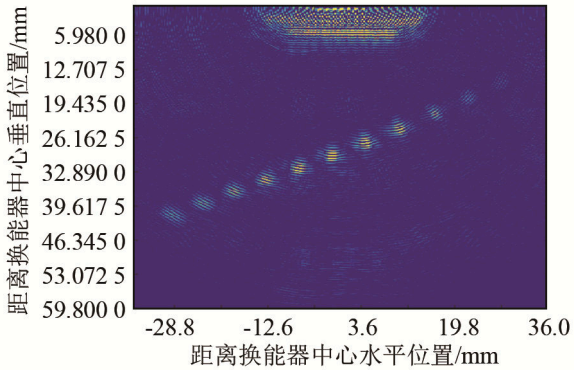
Fig.6　Demonstration photo of inspecting a steel piece containing side drilled holes



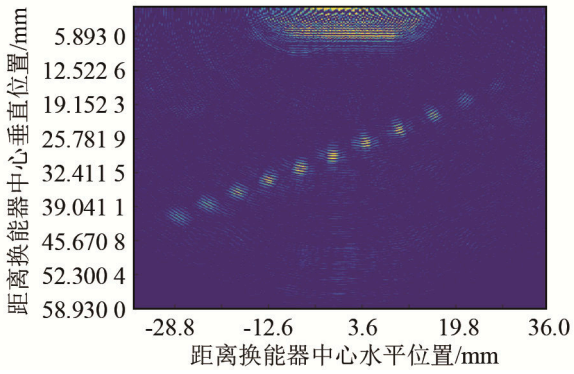

(a) 采集数据滤波前 TFM 成像结果




(b) 采集数据滤波前 1/2 矩阵法成像结果




(c) 采集数据滤波后 TFM 成像结果




(d) 采集数据滤波后 1/2 矩阵法成像结果

图 7　TFM 和 1/2 矩阵法的成像结果比较

Fig.7　Comparison of imaging results between TFM and 1/2 matrix approach

## 4　结 论

全聚焦成像算法开创了基于全矩阵数据的虚拟聚焦后处理算法的先河，成为近几年来相控阵超声检测领域的研究热点。本文研究表明，基于 TFM 和 1/2 矩阵算法原理，考虑一维线阵纵波相控阵探头的指向性、缺陷边缘的轮廓成像模糊等问题，采用指向性补偿、滤波等处理，均可实现缺陷高分辨的图像重构，真实还原缺陷的特征；探头激励脉冲宽度和频率均会对成像分辨率产生影响；从理论上看 1/2 矩阵方法的计算量减半且不会对成像质量产生影响，但实验结果却发现，1/2 矩阵法会造成边缘缺陷信息丢失。

## 参 考 文 献


[1] 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.

[2] HOLMES C, DRINKWATER B W, WILCOX P D. Advanced post-processing for scanned ultrasonic arrays: Application to defect detection and classification in non-destructive evaluation[J]. Ultrasonics, 2008, **48**(6-7): 636-642.

[3] 李洋, 周正干. 基于全矩阵数据的阵列超声检测与评价技术研究和应用概述[J]. 航空制造技术, 2019, **62**(14): 28-39.
LI Yang, ZHOU Zhenggan. Array ultrasound nondestructive testing and evaluation using full matrix: a review[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, **62**(14): 28-39.

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

[5] VELICHKO A, WILCOX P D. Reversible back-propagation imaging algorithm for postprocessing of ultrasonic array data[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2009, **56**(11): 2492-2503.

[6] POTTER J N, CROXFORD A J, WILCOX P D. Nonlinear ultrasonic phased array imaging[J]. Physical Review Letters, 2014, **113**(14): 144301.

[7] ZHANG J, BARBER T, NIXON A, et al. Investigation into distinguishing between small volumetric and crack-like defects using multi-view total focusing method images[C]//Atlanta, Georgia, USA. Author(s), 2017.

[8] 周正干, 彭地, 李洋, 等. 相控阵超声检测技术中的全聚焦成像算法及其校准研究[J]. 机械工程学报, 2015, **51**(10): 1-7.
ZHOU Zhenggan, PENG Di, LI Yang, et al. Research on phased array ultrasonic total focusing method and its calibration[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, **51**(10): 1-7.

[9] 张昊, 陈世利, 贾乐成. 基于超声相控线阵的缺陷全聚焦三维成像[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, **30**(7): 992-999.

[10] 赵大丹. 超声相控阵成像关键算法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
ZHAO Dadan. Study on key algorithms of ultrasonic phased array imaging[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.

[11] 刘冬雪. 基于 FieldⅡ的非衍射超声声场的仿真研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
LIU Dongxue. Simulation of non-diffraction ultrasonic field based on field Ⅱ[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.