

# 超声全聚焦成像校正模型及加速算法\*

贾乐成<sup>1</sup>, 陈世利<sup>1</sup>, 白志亮<sup>1</sup>, 曾周末<sup>1</sup>, 杨晓霞<sup>2</sup>

(1. 天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室 天津 300072;

2. 天津职业技术师范大学 天津市信息传感与智能控制重点实验室 天津 300222)

**摘要:** 超声全聚焦成像算法是一种基于全矩阵数据的成像技术, 具有成像精度高、缺陷表征能力强的优点, 但也存在数据量大、计算时间长、近表面区域噪声较大的缺点, 目前主要应用于后处理成像。针对以上问题, 建立了基于阵元指向性函数的成像校正模型; 结合并行计算设备, 提出了基于三角矩阵数据采集和索引技术的成像加速算法。使用 16 阵元相控阵探头对带有人工通孔的铝制试块进行检测试验, 结果表明, 使用加速算法可以将每帧图像成像时间缩短至 135 ms 以内, 满足实时成像的要求; 添加校正模型后, 对于图像近表面区域噪声抑制效果明显, 降低了伪缺陷出现的可能性, 提高了图像信噪比。

**关键词:** 超声相控阵; 全聚焦成像; 校正模型; 加速算法

**中图分类号:** TH878 TB553 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.20

## Correction model and accelerating algorithm for ultrasonic total focusing method

Jia Lecheng<sup>1</sup>, Chen Shili<sup>1</sup>, Bai Zhiliang<sup>1</sup>, Zeng Zhoumo<sup>1</sup>, Yang Xiaoxia<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instrument, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Information Sensing & Intelligent Control, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China)

**Abstract:** Ultrasonic phased array full focusing method is an imaging algorithm based on full matrix data. It exhibits advantages of high imaging accuracy and great defect characterization ability, while there are some disadvantages, such as large amount of data, long computation time and large near-surface noise. At present it is mainly used in post-processing imaging. A correction model based on the angular directivity function is established, and an accelerating algorithm based on triangular matrix data capture and data index technology is designed, combining with parallel computing device. It is tested on an aluminum block with artificial holes with a 16-element phased array probe. The result shows that time consumption of each image is decreased to less than 135 ms with the accelerating algorithm, which can be deemed real-time. The correction model is helpful to decrease near-surface noise, reduce false defects, and improve signal to noise ratio of the image.

**Keywords:** ultrasonic phased array; total focusing method; correction model; accelerating algorithm

## 1 引言

超声相控阵检测技术<sup>[1]</sup>是一项成熟的声学无损检测技术, 广泛应用于管道<sup>[2]</sup>、铁路<sup>[3]</sup>、航空航天<sup>[4]</sup>等领域。传统超声相控阵检测技术通过控制各个阵元的激发时间, 来实现声束聚焦、偏转, 从而调整焦点位置及声束偏

转方向, 以获得更好的成像效果<sup>[5]</sup>。由于在一次发射接收过程中只能在一个点聚焦, 传统超声相控阵检测技术存在检测效率低、精度差的缺点。

全聚焦成像算法<sup>[6]</sup>是近年来兴起的一种超声后处理成像技术, 与传统相控阵成像不同的是, 该算法使用全矩阵数据<sup>[7]</sup>这一特殊格式的超声回波信号进行成像。全聚焦成像算法无需复杂的延时控制电路, 成像精度更高、缺

陷表征能力更强<sup>[8]</sup>。但是,该算法也具有以下缺点:1)计算过程复杂,数据量大,通常用作后处理算法,无法实时成像<sup>[9]</sup>;2)在探头近表面区域噪声较大,产生图像失真<sup>[10]</sup>。在全聚焦成像加速算法领域,Lambert J等人<sup>[11]</sup>使用图形处理器(graphics processing unit, GPU)和通用处理器(general purpose processors, GPP)来对全聚焦成像进行加速计算,并比较了两者的加速效果;Carcreff E等人<sup>[12]</sup>提出了全聚焦成像的频域迁移成像算法,在带有入工通孔缺陷的均质试件上进行对比实验,结果表明该算法可以有效提高成像信噪比,加快成像速度;在全聚焦成像校正模型领域,Tasinkevych Y等人<sup>[13]</sup>比较了不同变迹函数模型的校正效果,提出了适用于合成孔径聚焦算法(synthetic aperture focusing technique, SAFT)的校正模型,提高了近场区域的成像质量;周正干等人<sup>[14]</sup>分析了声束传播路径上的能量衰减,计算了衰减校正系数,扩大了角度检测范围,提高图像能量均匀性。本文在现有的全聚焦成像算法的基础上,通过三角矩阵数据采集来减小数据量,利用GPU并行计算架构和索引技术来加快成像速度,并根据声波在待测区域内的传播特性建立校正模型,实现低成本高精度实时全聚焦成像。

## 2 全矩阵数据和全聚焦成像算法

### 2.1 全矩阵数据

与传统超声相控阵成像方式不同,全聚焦成像依赖于全矩阵数据。全矩阵数据包含待测区域内所有的声学信息,可以实现常见的电子扫描,声束虚拟偏转、聚焦以及全聚焦成像等多种成像算法<sup>[15]</sup>。对于 $N$ 个阵元的超声相控阵,全矩阵数据采集的过程如图1所示。

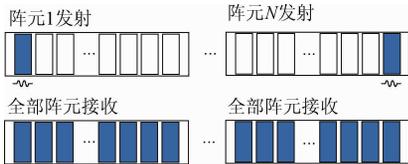


图1 全矩阵数据采集过程

Fig. 1 Process of full matrix capture

第1个阵元激发超声信号后,由所有阵元接收回波信号,接收的信号记为 $S_{1n}$ ;之后第2个阵元激发超声信号,由所有阵元接收超声信号,接收的信号记为 $S_{2n}$ ;以此类推,直到第 $N$ 个阵元激发超声信号,并由所有阵元接收超声信号。通过以上步骤,可以得到一组完整的超声全矩阵数据,记为 $S$ 。 $S_{ij}(t_0)$ 即代表第 $i$ 个阵元激发,第 $j$ 个阵元接收,在 $t_0$ 时刻接收到的超声信号幅值。对于16阵元相控阵探头,采样深度为3 000个点的全矩阵数据采集过程来说,一次采集得到的数据大约为3 000 KB<sup>[16]</sup>。

### 2.2 全聚焦成像算法

全聚焦成像算法可以利用全矩阵数据实现待测区域内所有离散点的聚焦成像。其原理如图2所示,以相控阵阵元方向为 $x$ 轴,超声信号传播方向为 $z$ 轴,在待测区域范围建立平面直角坐标系,并将待测区域离散成网格。对于该区域内任意一个离散点 $P(x_p, y_p)$ ,利用式(1)计算超声信号从TX( $x_{tx}, z_{tx}$ )发出,到达 $P(x_p, z_p)$ 点反射,再回到RX( $x_{rx}, z_{rx}$ )的时间 $t_0$ ,进而得到该点的超声信号幅值。

$$t_0 = \frac{\sqrt{(x_{tx} - x_p)^2 + (z_{tx} - z_p)^2}}{c} + \frac{\sqrt{(x_{rx} - x_p)^2 + (z_{rx} - z_p)^2}}{c} \quad (1)$$

式中: $c$ 为待测区域内声速,假设待测区域为各向同性介质。

利用式(2),遍历所有的发射和接收阵元后,即可得到该点的超声信号叠加幅值,遍历网格内所有离散点,即可得到待测区域的成像结果。

$$I(x, z) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N m(t_i, t_j) \quad (2)$$

式中: $m$ 为超声信号幅值。

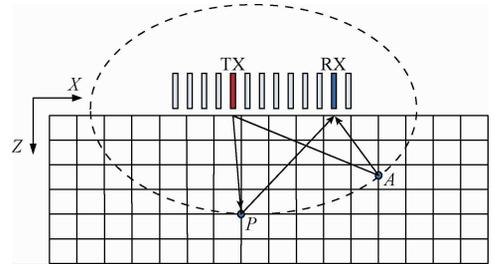


图2 全聚焦成像实现原理

Fig. 2 Theory of the total focusing method

## 3 全聚焦成像校正模型

### 3.1 全聚焦成像算法的不足

图2中 $A$ 点和 $P$ 点是以TX和RX为焦点的椭圆上的两点,发射阵元TX、接收阵元RX到 $A$ 点和 $P$ 点的声程和是相等的,根据全聚焦成像原理,在 $A$ 点和 $P$ 点的超声信号幅值是相同的,而实际情况则是 $P$ 点与阵元TX的夹角更小,超声信号振幅应更大。如不进行校正的话,会导致 $A$ 点超声信号振幅大于实际信号振幅,进而导致图像失真,甚至造成伪缺陷。

目前超声成像校正模型包括:声束扩散模型(不同角度的声能量差异)、声束衰减模型(不同声程的声能量差异)、声束透射模型(不同介质间声能量的损失)等,在使

用超声探头直接耦合在金属试件进行检测时,如前文所述,成像失真的主要原因是不同角度的声能量差异,因此,本文提出了基于指向性函数的校正模型。

### 3.2 阵元指向性函数

阵元指向性函数<sup>[17]</sup>定义为远场中任意方向的声压与主声束偏转方向上声压之比,由式(3)计算:

$$H(\theta) = \text{sinc}(\pi d \sin\theta/\lambda) \cos\theta \quad (3)$$

式中: $d$ 为阵元宽度, $\lambda$ 为超声波长, $\theta$ 为界面法线方向与声束传播方向的夹角。

指向性函数表征了单个阵元所激发声场能量与声束传播方向的关系,该函数与阵元宽度和阵元中心频率有关。图3所示为阵元宽度为0.59 mm,中心频率分别为1.5、3、6、12 MHz的单阵元指向性函数, $d/\lambda$ 分别为0.14、0.28、0.56和1.12。

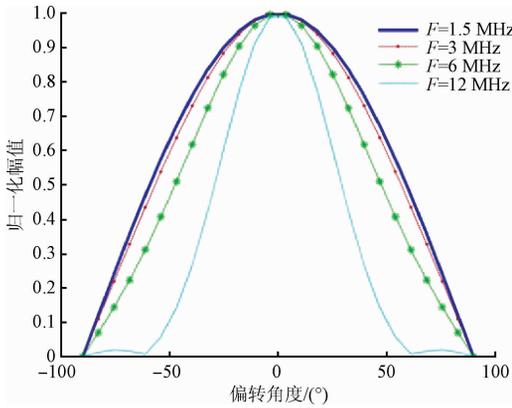


图3 中心频率分别为1.5、3、6、12 MHz的指向性函数  
Fig.3 Directivity functions for different central frequencies 1.5, 3, 6, 12 MHz

### 3.3 指向性函数校正模型的改进

指向性函数对单阵元的声束扩散具有很好的校正效果,但全聚焦成像是深度叠加成像,在多次叠加后,基于指向性函数的校正模型会出现失真。图4所示为在超声数据均为1时,对48 mm × 45 mm区域使用指向性函数进行校正的全聚焦成像结果。从图4中可知,该校正模型对近表面及两侧区域的噪声有抑制作用,但探头正下方区域 $x$ 轴与 $z$ 轴方向校正模型过渡较慢,导致探头下方10~15 mm处幅值偏低,35~45 mm处幅值偏高,与实际不符,可能会出现伪缺陷。

因此,对阵元指向性函数做如下改进:

$$H'(\theta) = \begin{cases} \text{sinc}(\pi d \sin\theta/\lambda) \cos\theta, & \pm 90 < \theta < \pm \theta_0 \\ \alpha, & -\theta_0 < \theta < \theta_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\theta_0$ 为 $H(\theta) = a$ 时 $\theta$ 的取值, $0 < a < 1$ 。

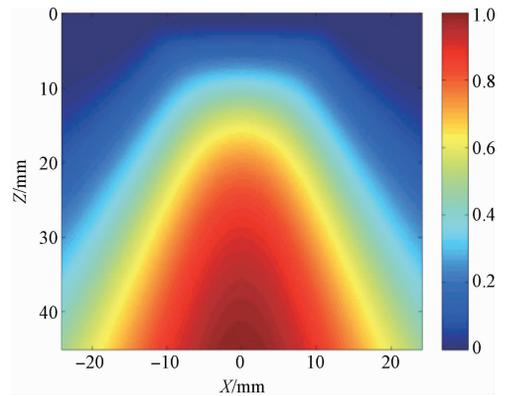


图4 基于指向性函数的校正模型  
Fig.4 Correction model based on angular directivity function

$a = 0.4$ 时,改进后的校正模型如图5所示,探头近表面和两侧噪声抑制效果与改进前类似,校正模型的过渡带明显变窄,降低探头正下方区域出现伪缺陷的可能。通过调整 $a$ 的取值,可以调整校正模型,以适应不同的检测对象。

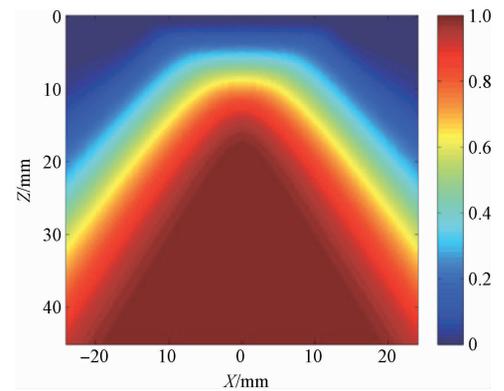


图5 基于改进指向性函数的校正模型  
Fig.5 Correction model based on the improved angular directivity function

加入指向性校正后的全聚焦成像模型如式(5)所示。

$$I(x, z) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N H'(\theta_i, \theta_j) m(t_i, t_j) \quad (5)$$

式中: $\theta_i, \theta_j$ 分别为离散点与发射阵元和接收阵元夹角, $I(x, z)$ 为图上某点幅值。

指向性校正需要计算辛格函数,添加校正模型后,会计算时间成倍增加,因此,需要通过加速算法加快计算速度,以满足实时成像的需要。

## 4 全聚焦成像加速算法

### 4.1 三角矩阵的数据采集

前文中提到, $N$ 个阵元可以得到全矩阵数据 $S$ ,但是

在进行全聚焦成像时,根据声场互易定理,当阵元  $m$  与阵元  $n$  收发互易时,待测区域内某点  $P$  处的超声幅值相等,如式(6)所示。

$$m_p(t_m, t_n) = m_p(t_n, t_m) \quad (6)$$

对于收发一体式超声换能器,它的辐射指向性函数与接收指向性函数是相同的,根据式(5),使用指向性函数校正后的该点处超声幅值也相等。

$$H'(\theta_m, \theta_n) m_p(t_m, t_n) = H'(\theta_n, \theta_m) m_p(t_n, t_m) \quad (7)$$

根据式(7),在发射-接收阵元互易时成像结果是相同的。因此,在全聚焦成像计算时,对于阵元  $m$  发出的声波,只需要遍历阵元  $m$  到阵元  $N$  接收的声波,即可完成全聚焦成像。参与成像计算的超声数据排列在矩阵中可形成一个下三角矩阵,记为  $S_{iri}$ ,如表1所示,这种数据采集方式可以称为三角矩阵数据采集。与全矩阵数据相比,使用三角数据可以将数据量减少近一半。

表1 三角矩阵数据  
Table 1 Triangular matrix data

$T \setminus R$	1	2	...	$j$	...	$N$
1	$S_{11}$	$S_{12}$	...	$S_{1j}$	...	$S_{1N}$
2	0	$S_{22}$	...	$S_{2j}$	...	$S_{2N}$
$\vdots$	0	0	$\ddots$	...	...	...
$i$	0	0	0	$S_{ij}$	...	$S_{iN}$
$\vdots$	0	0	0	0	$\ddots$	...
$N$	0	0	0	0	0	$S_{NN}$

一个算法中语句执行的次数称为时间频度,记为  $T(n)$ 。使用阵元数为  $N$  的相控阵探头对  $M \times M$  的待测区域使用全矩阵数据和本文校正模型进行全聚焦成像时,算法的时间频度记为:

$$T(M, N) = M^2 \cdot N^2 \quad (8)$$

在使用三角矩阵数据时,算法的时间频度记为:

$$T(M, N) = M^2 \cdot N(N-1)/2 \quad (9)$$

与全矩阵数据相比,使用三角矩阵数据时,算法时间频度减小了近一半。因此,可以使用三角矩阵数据采集代替全矩阵数据采集,减小数据量,提高运算速度。

#### 4.2 GPU 并行计算架构

统一计算设备架构(compute unified device architecture, CUDA)是由英伟达公司在2007年推出的通用并行计算架构<sup>[18]</sup>。在并行计算中,线程是最基本的程序单位,一个线程可以完整而独立在GPU的一个内核中执行一段程序。CUDA的编程模型将线程组合在一起形成了线程块,每个线程均可通过其ID进行访问。在全聚焦成像中,每个网格点均可以根据其坐标进行定位,因此非常适合使用并行计算架构来进行加速计算。

#### 4.3 索引数据加速技术

由全聚焦成像算法计算过程可知,在相控阵探头、待测介质、采样率以及离散网格不变的情况下,网格内每个点到发射和接收阵元的声程是固定的,该点超声信号幅值在超声回波数据中的位置也是固定的。因此,可以构建每个网格点关于超声信号存储位置的索引,在成像计算时利用索引来减小计算量。

将指向性校正模型加入传统全聚焦成像算法中时,引入了乘方、开方以及求解三角函数、辛格函数等运算,计算量较大;而指向性信息只与网格点的位置有关,同样可以通过索引技术来减小计算量。使用索引后,该算法的基本运算仅仅包含索引数组的寻址计算,可以明显减小计算量,加速计算过程。

基于本文校正模型和加速算法的全聚焦成像流程:首先根据待测区域特性对索引数据进行预处理,并将索引数据存入GPU显存中,再使用三角矩阵数据采集方式获取超声数据并传入显存中,在GPU的CUDA核中运行核函数副本,进行全聚焦成像计算。在所用超声相控阵探头与待测区域材质不变的情况下,索引数据只需计算一次即可。

### 5 实验及讨论

#### 5.1 实验条件

待测试件示意图如图6所示,试件材料为铝,铝内理论声速为6300 m/s,经实测,整个试件长度为10 mm,换能器接收到超声底波的时间为3.28  $\mu$ s,将试件内声速校正为6100 m/s。待测区域范围为宽48 mm深45 mm的矩形区域,将待测区域离散为200  $\times$  200的网格,待测区域内有3个直径为1 mm的通孔。

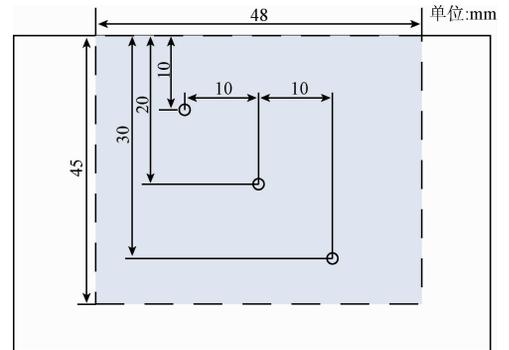


图6 待测试块示意图

Fig. 6 Schematic of the test block

相控阵探头中心频率为3.5 MHz,共有16个阵元,阵元中心距为1.6 mm,阵元间距为0.1 mm。

上位机GPU为NVIDIA GT540M,具有96个CUDA核心,软件版本为Visual Studio 2013, CUDA 7.5。

### 5.2 实验结果及讨论

阵列性能指标 (array performance indicator, API), 主要评估缺陷检测能力及成像清晰度, 定义如下:

$$API = \frac{A_{-6dB}}{\lambda^2} \quad (10)$$

式中:  $A_{-6dB}$  为图像中幅值由最大值下降 6 dB 所对于区域面积;  $\lambda$  为超声波长。对于同一缺陷, API 越小, 成像效果越好。

图 7 所示为使用传统超声相控阵 B 扫成像的结果, 每次激发 3 个阵元, 步进为一个阵元, 偏转角度为  $0^\circ$ 。3 个通孔的位置分布范围基本准确, 但通孔尺寸误差较大, 图像分辨率及成像效果较差, 成像范围较小, 仅为  $50 \text{ mm} \times 24 \text{ mm}$ , 横向成像范围与相控阵探头长度相同, 扩大成像范围需采用不同的延时法则。图 8 所示为未校正的全聚焦成像结果, 和传统超声相控阵 B 扫成像结果相比, 图像分辨率有明显提高, 横向成像范围可达  $48 \text{ mm}$ , 3 个通孔的位置定位准确, 对通孔大小的定量判断也较为准确, 但是在靠近探头位置处噪声较大, 图像信噪比较差。图 9 所示为使用指向性校正模型的全聚焦成像结果, 和图 8 相比, 近表面噪声明显减小, 图像信噪比有所提高。但  $10 \text{ mm}$  深处通孔的幅值偏低, 探头正下方  $30 \text{ mm}$  左右位置幅值偏高, 与图 4 的结论相符。图 10 所示为使用改进指向性校正模型的全聚焦成像结果, 近表面噪声抑制效果明显,  $10 \text{ mm}$  深处通孔的幅值正常, 探头正下方成像结果与实际情况相符。表 2 所示为几种不同成像算法的 API 对比。30 mm 处使用指向性校正后 API 异常升高的原因是 30 mm 深处通孔位于探头右下方, 而探头正下方 30 mm 处成像幅值偏大, 导致 -6 dB 面积计算值偏大, 改进指向性校正模型则没有类似问题。对比可知, 改进指向性校正模型成像效果最好; 在使用三角矩阵数据时, 不会导致成像质量下降。

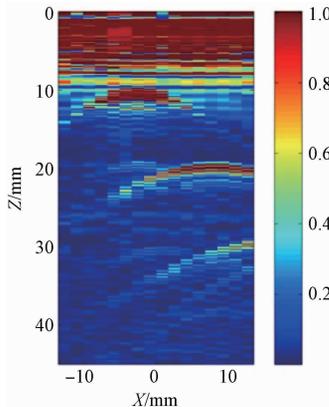


图 7 传统超声相控阵 B 扫成像结果

Fig. 7 Result of B scan with the traditional ultrasonic phased array

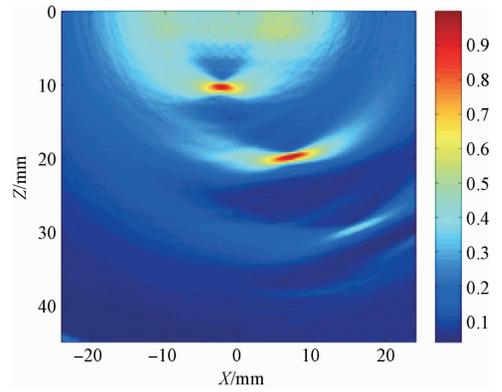


图 8 未使用校正模型的全聚焦成像结果

Fig. 8 Result of the total focusing method without correct model

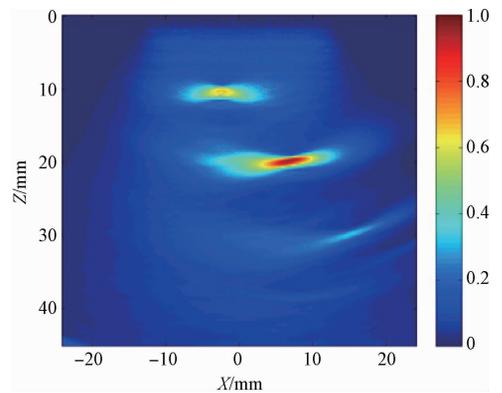


图 9 指向性校正模型的全聚焦成像结果

Fig. 9 Result of the total focusing method with the directivity correction model

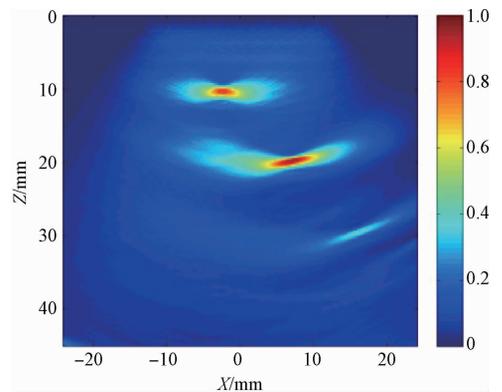


图 10 改进指向性校正模型的全聚焦成像结果 ( $a = 0.4$ )

Fig. 10 Result of the total focusing method with the improved directivity correction model ( $a = 0.4$ )

表2 不同成像算法 API 对比

Table 2 API of different imaging algorithms

成像算法	10 mm	20 mm	30 mm
三角矩阵数据 + 未校正	4.799 9	3.733 3	6.275 5
全矩阵数据 + 未校正	4.071 0	3.697 7	6.257 7
三角矩阵数据 + 指向性校正	4.462 1	3.822 2	18.595 2
全矩阵数据 + 指向性校正	3.875 5	3.822 2	18.630 8
三角矩阵数据 + 改进指向性校正	3.875 5	3.697 7	6.311 0
全矩阵数据 + 改进指向性校正	3.662 2	3.626 6	6.222 1

表3所示为不同成像方法的成像速度对比。传统超声相控阵B扫成像速度非常快,可以做到实时成像;通过使用三角矩阵数据来代替全矩阵数据进行计算,可以将算法时间频度降低约1/2,计算时间缩短一半;使用GPU后,可将每帧图像的成像时间缩短至1s以内;在指向性函数计算中涉及多个三角函数计算及辛格函数计算,计算开销较大,使用索引对于添加指向性校正模型的全聚焦成像算法提速最为明显。综上所述,在使用本文加速算法时,可以将未校正的全聚焦成像算法计算速度提升至每帧0.056s,将添加改进指向性校正的全聚焦成像算法计算速度提升至每帧0.131s,满足实时成像的需要。

表3 不同算法成像时间对比

Table 3 Time consumption of different imaging algorithms (s)

成像算法	成像时间
全矩阵数据 + 改进指向性校正 + CPU	626.442
三角矩阵数据 + 改进指向性校正 + CPU	323.942
全矩阵数据 + 未校正 + CPU	203.534
三角矩阵数据 + 未校正 + CPU	113.312
三角矩阵数据 + 改进指向性校正 + CPU + 索引	6.213
全矩阵数据 + 未校正 + GPU	0.197
三角矩阵数据 + 改进指向性校正 + GPU + 索引	0.131
全矩阵数据 + 未校正 + GPU + 索引	0.086
三角矩阵数据 + 未校正 + GPU + 索引	0.056
传统超声相控阵B扫成像	0.042

表4对比了深度方向上3种全聚焦成像结果中缺陷位置与试件上缺陷实际位置的对比情况。对于10mm与20mm深度通孔缺陷,3种方法的结果相同,对于30mm深度处通孔缺陷,3种方法的结果有微小差别,深度方向上缺陷定位相对误差均在3.5%以内。

表4 缺陷深度比较

Table 4 Comparison of defect depths (mm)

编号	未校正	指向性校正	改进指向性校正	实际深度
1	10.35	10.35	10.35	10
2	19.80	19.80	19.80	20
3	29.48	29.93	29.70	30

图11所示为10mm深通孔的x轴方向截面,添加校正模型后,通孔周围噪声幅值明显下降,在宽度20mm处

的幅值异常升高点也消除了。图12所示为图像在x轴与z轴方向投影的最大值,从图中可知,3个孔缺陷的位置基本一致,校正后,图像噪声有明显下降,尤其是0~10mm深度的近表面区域;而使用改进指向性校正模型后,没有出现孔缺陷的归一化幅值大幅下降的现象,成像结果更符合实际情况。

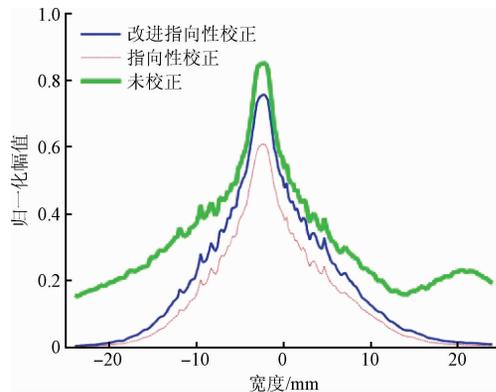


图11 10 mm 深通孔的轴向截面

Fig. 11 Axial section of the image of drills at the depth of 10 mm

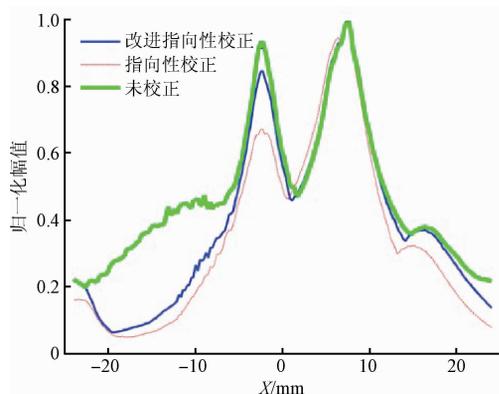
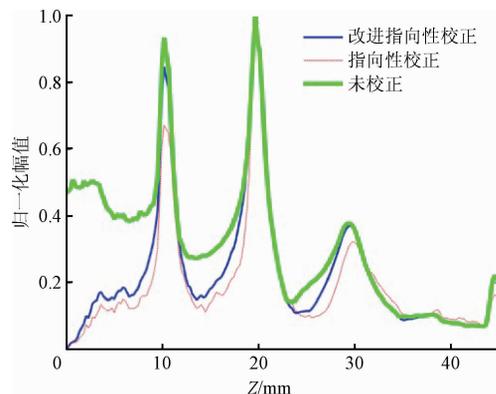
(a) X轴方向投影  
(a) Projection along X axis(b) Z轴方向投影  
(b) Projection along Z axis

图12 坐标轴方向上投影的最大值

Fig. 12 The maximum of the projection along axis

## 6 结 论

本文引入指向性校正模型,针对全聚焦成像这一深度叠加成像方法对指向性函数进行改进。实验结果表明该校正模型对近表面区域噪声有明显的抑制效果,可提高图像信噪比,降低伪缺陷出现的可能性。

本文使用三角矩阵数据采集代替全矩阵数据采集,引入 GPU 并行计算架构提高计算速度,以及使用索引技术来减小计算量。结合以上加速算法,在本文实验条件下,未添加校正模型的全聚焦成像算法一帧的计算时间为 0.056 s,添加指向性校正模型后的全聚焦成像算法一帧图像的计算时间为 0.131 s,可以满足实时成像的需要。

在待测试件材质,待测区域范围以及探头不变的情况下,利用本文校正模型与加速算法可实现实时全聚焦成像。针对不同的待测试件,只需对索引矩阵进行计算即可。

## 参考文献

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

[2] 詹湘琳, 李健, 张宇, 等. 用于管道环焊缝缺陷检测的超声相控阵系统[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(增刊2):1427-1428.  
ZHAN X L, LI J, ZHANG Y, et al. Ultrasonic phased array system applied in flaw detection of pipe girth welds[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(Suppl. 2):1427-1428.

[3] 田贵云, 高斌, 高运来, 等. 铁路钢轨缺陷伤损巡检与监测技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8):1763-1780.  
TIAN G Y, GAO B, GAO Y L, et al. Review of railway rail defect non-destructive testing and monitoring [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 37(8):1763-1780.

[4] 孙亚杰, 张永宏, 刘青山, 等. 基于相控阵的结构损伤范围监测与图像表征[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(11):2582-2588.  
SUN Y J, ZHANG Y H, LIU Q SH, et al. Phased array based structural damage range monitoring and imaging analysis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(11):2582-2588.

[5] 杨晓霞, 薛彬, 靳世久, 等. 压缩传感在超声相控阵检测系统中的应用研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(9):1286-1294.  
YANG X X, XUE B, JIN SH J, et al. Application study on compressed sensing in ultrasonic phased array detection system[J]. Journal of Electronic Measurement & Instrumentation, 2015, 29(9):1286-1294.

[6] HOLMES C, DRINKWATER B, WILCOX P. The post-processing of ultrasonic array data using the total focusing method [J]. Insight: Non-Destructive Testing & Condition Monitoring, 2004, 46(11):677-680.

[7] HOLMES C, DRINKWATER B W, WILCOX P. 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.

[8] 张昊, 陈世利, 贾乐成. 基于超声相控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.  
ZHANG H, CHEN SH L, JIA L CH. Three-dimensional total-focus imaging based on ultrasonic linear phased array [J]. Journal of Electronic Measurement & Instrumentation, 2016, 30(7):992-999.

[9] 周正干, 李洋, 周文彬, 等. 相控阵超声后处理成像技术研究、应用和发展[J]. 机械工程学报, 2016, 52(6):1-11.  
ZHOU ZH G, LI Y, ZHOU W B. Ultrasonic phased array post-processing imaging techniques; A review [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(6):1-11.

[10] 周祥. 车轮缺陷相控阵超声全聚焦成像技术研究[D]. 重庆:西南交通大学, 2015.  
ZHOU X. Research on phased array ultrasonic total focusing method imaging technique for wheel defects [D]. Chongqing: Southwest Jiaotong University, 2015.

[11] LAMBERT J, PEDRON A, GENS G, et al. Performance evaluation of total focusing method on GPP and GPU [C]. Design and Architectures for Signal and Image Processing, 2012:1-8.

[12] CARCREFF E, BRACONNIER D, DAO G. Fast total focusing method for ultrasonic imaging [C]. Ultrasonics Symposium, IEEE, 2015:1-2.

[13] TASINKEVYCH Y, TROTS I, NOWICKI A, et al. Modified synthetic transmit aperture algorithm for ultrasound imaging [J]. Ultrasonics, 2012, 52(2):333-342.

[14] 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 ZH G, PENG D, LI Y, et al. Research on phased array ultrasonic total focusing method and its calibration [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(10):1-7.

- [15] 黄玉秋. 相控阵超声缺陷检测信号处理研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.

HUANG Y Q. Study on signal processing of defects detection using ultrasonic phased array [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.

- [16] LONG R, RUSSELL J, CAWLEY P. Ultrasonic phased array inspection using full matrix capture [J]. Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2010, 1211(1):918-925.

- [17] SELFRIDGE A R. A theory for the radiation pattern of a narrow-strip acoustic transducer [J]. Applied Physics Letters, 1980, 37(1):35-36.

- [18] 陈云善, 盛磊, 李一芒, 等. Retinex 图像增强算法的 GPU 实现 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(增刊1): 189-193.

CHEN Y SH, SHENG L, LI Y M, et al. GPU implementation of retinex image enhancement algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(Suppl. 1):189-193.

## 作者简介



贾乐成, 2014 年于天津大学获得学士学位, 现为天津大学博士研究生, 主要研究方向为超声相控阵无损检测技术。

E-mail: jialecheng@tju.edu.cn

**Jia Lecheng** received his B. Sc. degree in 2014 from Tianjin University. Now he is a

doctoral candidate in Tianjin University. His main research interests include ultrasonic phased array detection technology.



陈世利(通讯作者), 分别在 1997 年和 2003 年于天津大学获得学士和博士学位, 现为天津大学精密仪器与光电子工程学院副教授, 主要研究方向为无损检测技术、管道泄露检测。

E-mail: slchen@tju.edu.cn

**Chen Shili** (Corresponding author) received his B. Sc. and Ph. D. degrees both from Tianjin University in 1997 and 2003, respectively. Now he is an associate professor in Tianjin University. His main research interests include Non Destructive Testing and pipeline leak detection.



白志亮, 2015 年于天津大学获得学士学位, 现为天津大学博士研究生, 主要研究方向为超声相控阵无损检测、压缩感知算法。

E-mail: zhl\_bai@tju.edu.cn

**Bai Zhiliang** received his B. Sc. degree in 2015 from Tianjin University. Now he is a doctoral candidate in Tianjin University. His main research interests include ultrasonic phased array detection technology and compress sensing algorithm.