

# 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\*

李 洋<sup>1</sup>,周正干<sup>1,2</sup>

(1. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院,北京 100191;  
2. 先进航空发动机协同创新中心,北京 100083)

[摘要] 全矩阵数据是阵列超声换能器以特殊的激发接收模式工作时,从被测试件内部采集到的所有超声 A 型信号构成的集合。基于全矩阵数据的阵列超声无损检测与评价方法采用特定算法对全矩阵数据进行后处理运算,实现被测试件内部缺陷的成像和定量。与基于相位控制的常规阵列超声检测技术相比,基于全矩阵数据的阵列超声检测方法具有更高的缺陷成像及定量精度,可针对具有复杂几何外形或者复杂材料属性的被测试件进行检测与评价算法的定制,是近年来阵列超声检测与评价技术的研究热点和发展方向。对基于全矩阵数据的阵列超声检测与评价技术的基本原理、典型算法、关键技术以及应用案例进行了系统概述,旨在推广该项技术和降低使用门槛,为我国高端制造领域存在的无损检测与评价难题提供新思路和新方法。

关键词: 阵列超声;无损检测与评价;全矩阵数据;全聚焦方法;GPU 加速

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.14.028



李 洋

博士,研究方向为阵列超声检测与评价技术,参与“基于全矩阵数据的相控阵超声检测技术基础研究”(国家自然科学基金资助项目),发表 SCI 检索论文 1 篇、EI 检索论文 2 篇。

\*基金项目:国家自然科学基金资助项目(51775026)。

阵列超声采用由多个压电阵元晶片构成的阵列换能器发射和接收超声波信号,实现工业结构件内部缺陷的无损检测与评价。通过控制各阵元晶片的发射/接收延时(相位)、脉冲宽度以及增益,超声波将根据惠更斯原理在材料中发生干涉叠加,形成具有特定指向性(偏转角度和聚焦深度)的合成声束。与采用单一压电晶片的常规超声技术相比,阵列超声技术无需移动换能器便可实现二维或三维区域的扫描,具有更高的检测效率、检测精度以及更直观的缺陷判别能力。近年来,阵列超声无损检测与评价技术在工业领域的应用越来越广,尤其是航空、航天、船舶及核电等重要领域,被应用于解决先进材料和复杂结构的检测与评价难题<sup>[1-3]</sup>。按缺陷回波信号的获取

方式进行区分,主要有基于相位控制(Phased Array)和基于全矩阵数据(Full Matrix)两大类。

基于相位控制的检测与评价是目前工程化应用最广泛和成熟的阵列超声方法<sup>[4]</sup>,也称为常规阵列超声或者相控阵超声,采用合成声束与试件内部缺陷相互作用,直接利用反射回波 A 型信号检测和评价试件内部的缺陷,相控阵超声的成像方法如图 1 所示,主要包括 B 型、C 型以及 S 型显示。合成声束各自具有不同的发射和接收偏转角度、聚焦深度以及阵列孔径,为提高沿合成声束传播方向的成像分辨率,在接收超声回波信号时一般采用动态深度聚焦技术(Dynamic Depth Focusing-DDF)以增加接收聚焦点数量<sup>[5]</sup>。合成声束的数量、焦点及传播方向由检测需求

和被测试件共同决定。为避免缺陷漏检,合成声束的主瓣能量之和应完全覆盖检测区域。受脉冲重复频率、通道数、采样频率、存储空间等硬件条件的制约,阵列超声控制硬件单元在检测时能驱动换能器发射的合成声束以及接收动态聚焦点的总数均存在上限。以美国 Advanced OEM Solution (AOS) 公司所生产的高端型号控制单元 OEM-PA-128/128 为例,最多支持 4096 条合成声束,每条合成声束的接受动态聚焦点数不可超过 64。当检测具有复杂的材料组织特性(如奥氏体和复合材料)或几何结构(如薄壁或者弯曲型面)时,有限数量的合成声束和聚焦点难以确保探测区域的完全覆盖,大幅提高了缺陷的漏检和误检概率<sup>[6]</sup>。

基于全矩阵数据的检测与评价是近 10 年发展起来的阵列超声检测新技术,以全矩阵数据采集(Full Matrix Capture-FMC)模式工作<sup>[7]</sup>。与基于相位控制的方法不同,全矩阵数据采集时发射的超声波不具有任何声束指向性,不能直接用于成像,需要借助特定全矩阵数据处理算法实现缺陷的检测与评价。起初,受限于硬件性能,全矩阵数据只能采用离线计算的方式进行处理,也被称为阵列超声后处理技术(Post-processing)。近年来,随着并行技术的发展<sup>[8]</sup>,全矩阵数据的处理速度得到了大幅提升,其检测与评价过程的

实时化成为可能<sup>[9]</sup>。

基于全矩阵数据的无损检测与评价技术是目前阵列超声检测技术的主要研究热点,学者们设计了全聚焦等全矩阵数据算法,突破了基于相位控制的阵列超声检测与评价能力极限<sup>[10]</sup>,为高端工业领域复杂结构零部件内部缺陷的高精度、高分辨率阵列超声检测与评价提供了新方法和新思路,具有较高的理论及应用研究价值。

## 基本概念

### 1 全矩阵数据的定义

假设换能器共有  $N$  个阵元晶片,则全矩阵数据采集将包含  $N$  次如图 2 所示的超声波发射,每次产生的反射回波由  $N$  个阵元晶片分别接收,总共产生  $N \times N$  组 A 型信号。全矩阵数据被定义为以上述 A 型信号为元素的  $N \times N$  矩阵  $\{u_{ij}(t)\}$ ,矩阵元素  $u_{ij}(t)$  代表第  $i$  次超声波发射时阵元晶片  $j$  所接收的 A 型信号。

### 2 全矩阵数据的优势

不考虑非线性声学效应,则阵列超声检测过程可采用二阶线性波动方程组描述,根据线性偏微分方程解的叠加性原理,采用相位控制进行阵列超声检测时,合成声束与缺陷作用后产生的反射回波信号  $h(t)$  可以用全矩阵数据表示为:

$$h(t) = \sum_{j \in AP_R} \sum_{i \in AP_T} u_{ij}(t - \Delta t_{T_i} - \Delta t_{R_j}) \quad (1)$$

式中,  $AP_T$  和  $AP_R$  分别为发射和接收孔径集合,  $\Delta t_{T_i}$  和  $\Delta t_{R_j}$  分别为  $AP_T$  和  $AP_R$  中第  $i$  和  $j$  个阵元的发射和接收相位延时。如果将阵列超声回波信号全体看成一个高维矢量空间  $\Psi$ ,则按照线性代数的观点,式(1)表明全矩阵数据恰好构成了  $\Psi$  的一组完备的基底,任意不考虑非线性效应的阵列超声检测与评价结果均可采用全矩阵数据线性表示。依托于全矩阵数据的完备性,与常规阵列超声检测与评价方法相比,基于全矩阵数据的阵列超声检测与评价具有两大优势,主要体现在:

(1) 理论的统一性和优越性。

全矩阵数据为阵列超声检测与评价技术提供了一套统一的理论框架,任何阵列超声方法都可等价于全矩阵数据算法进行研究,变革了阵列超声检测与评价技术的研究方式,具有重要的理论价值。Holmes 等<sup>[11]</sup>给出了电子线性扫描、扇形扫描等经典相位控制检测方法检测结果的全矩阵数据表示形式,系统分析了不同阵列超声检测方法的成像能力。

(2) 突破常规方法的能力极限。

全矩阵数据的采集仅需发射与阵元晶片总数相同数量的非聚焦超声波,远小于硬件的瓶颈上限。理论上,可利用全矩阵数据设计出合成声束及聚焦点数量远远大于基于相位控制方法上限的检测与评价新算法,突破常规方法的检测与评价能力极限。

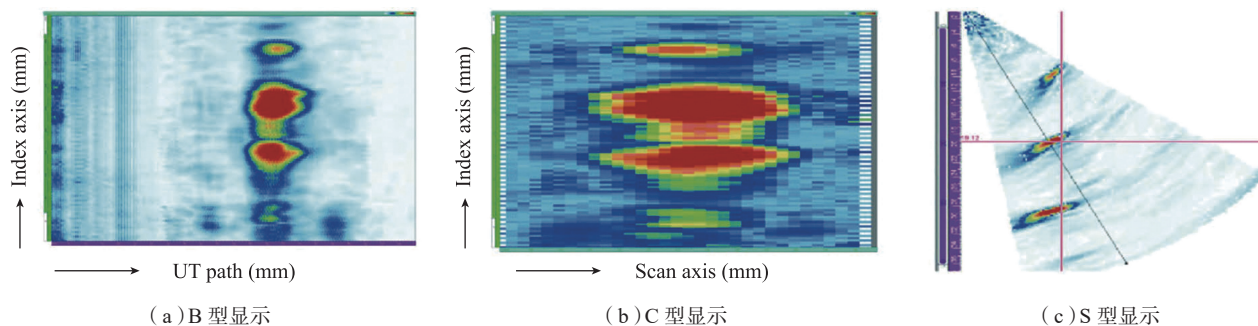


图1 相控阵超声检测技术的典型成像模式

Fig.1 Typical imaging modes of ultrasonic phased array inspection

### 3 研究方向

基于全矩阵数据的阵列超声检测与评价技术研究主要围绕全矩阵数据的理论模型、全矩阵数据新算法的设计及其应用展开。全矩阵数据理论模型的核心研究目标是根据换能器、材料属性、几何结构特征以及缺陷分布,对采集到的全矩阵数据进行正演算预测。全矩阵数据算法的核心研究目标是根据换能器、材料属性、几何结构特征以及采集到的全矩阵数据,对被测试件内部的缺陷分布、缺陷形态进行反演算预测。上述两项研究内容互为逆过程,对于材料属性及几何特征较为复杂的结构件,正确合理的全矩阵数据理论模型是设计及应用高精度、高分辨率检测与评价算法的必要条件。全矩阵数据检测算法主要指内部缺陷的成像算法,检测图像可用于对试件内部缺陷的位置和数量进行初步统计。全矩阵数据评价算法主要指内部缺陷的定量算法,在检测图像的基础上进一步对存在缺陷的类型、尺寸等几何信息进行分析测量。

#### 全矩阵数据的理论模型

不考虑非线性声学效应,全矩阵数据采集的过程可以等价于一个线性控制系统,全矩阵数据采集时施加于阵元晶片上的激励信号是系统的输入,阵元晶片接收到的信号是系统的输出,系统的传递函数是超声波发射、声波与试件作用以及反射信号接收三个环节的乘积<sup>[12]</sup>。假设试件为各向同性材料,其内部存在  $M$  个不同大小和类型的缺陷,缺陷位置坐标所构成的集合为  $\{(x_{Tm}, z_{Tm})^T | m=1, \dots, M\}$ ,当线性阵列换能器直接贴合进行全矩阵数据时,第  $i$  个阵元发射,第  $j$  个阵元接收的过程所对应传递函数  $G_{ij}(\omega)$  的表达式为:

$$G_{ij}(\omega) = G_{ij}^D(\omega) + G_{ij}^B(\omega) \quad (2)$$

式中,  $G_{ij}^D(\omega)$  和  $G_{ij}^B(\omega)$  为声波

与缺陷以及试件边界作用所对应的传递函数分量。 $G_{ij}^D(\omega)$  的表达式为:

$$G_{ij}^D(\omega) = \sum_{m=1}^M \{ \exp(jk(r_{im} + r_{jm})) \left( \frac{2\pi}{kr_{im}r_{jm}} \right)^{0.5} \times D(\theta_{im}, \omega) D(\theta_{jm}, \omega) S_m(\theta_{im}, \theta_{jm}, \omega) \} \quad (3)$$

式中,  $r_{im}$  和  $r_{jm}$  分别为发射和接收阵元与第  $m$  个缺陷的距离,  $\theta_{im}$  和  $\theta_{jm}$  分别为  $r_{im}$  和  $r_{jm}$  阵元晶片表面法线方向的夹角,如图 3 所示。函数  $S_m(\theta_1, \theta_2, \omega)$  为第  $m$  个缺陷的散射系数矩阵(也简称为 S-矩阵),由缺陷的形状、大小决定,反映了缺陷的内禀属性<sup>[13]</sup>,可利用有限元方法进行确定<sup>[14]</sup>,  $k$  为声波在被测试样中的波数,  $D(\theta, \omega)$  为阵元晶片的指向性函数,根据声学的互易性原理,发射和接收为互逆过程,可同时被用于刻画阵元晶片发射及接收过程中声束能量的转化率,其表达式为:

$$D(\theta, \omega) = \left( \frac{\sin(ka \sin \theta/2)}{ka \sin \theta/2} \right)$$

$$\left( \frac{a^2 - 2 \sin^2 \theta}{F_0(\sin \theta)} \right) \cos \theta \quad (4)$$

式中,  $a$  为阵元晶片的尺寸,  $F_0$  是一个以泊松比  $\xi$  为自变量,用于衡量半无穷大(Semi-infinity)各向同性介质中纵波和横波声速比对激励声场指向性影响的因子函数,其表达式为<sup>[15]</sup>:

$$F_0(\xi) = (2\xi^2 - a^2)^2 - 4\xi^2 (\xi^2 - 1)^{0.5} (\xi^2 - a^2)^{0.5} \quad (5)$$

Zhang 等<sup>[16]</sup>进一步考虑了试件具有多层介质的情形,由于声波在介质交界处将发生横纵波之间的波形转换,多层介质中的传递函数为缺陷与不同波型模式声波作用的传递函数叠加。对于特定波型模式,其传递函数的形式与式(3)类似,只不过距离和相位将变为几何声线沿多层介质传播时的总路程和总时间,传递函数的幅值需要额外乘以声波经过各层介质时的透射衰减系数。在实际

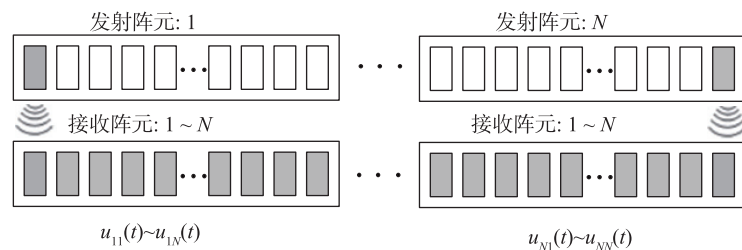


图2 全矩阵数据采集的原理

Fig.2 Illustration of full matrix capture

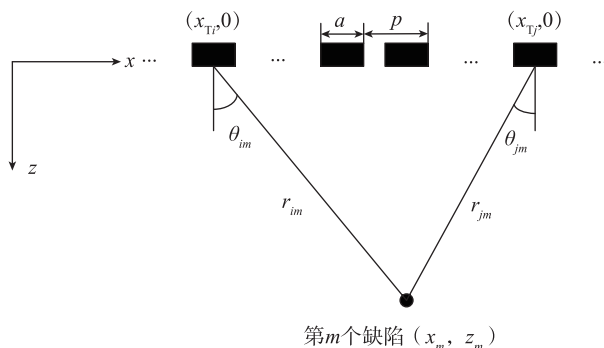


图3 阵元晶片与缺陷之间的几何关系

Fig.3 Geometry relation between transducer element and defect

研究中,一般只对检测时使用到的波形模式进行计算,忽略其他波形模式对传递函数的影响。

$G_{ij}^B(\omega)$  与试件几何外形密切相关, Felice 等<sup>[17]</sup> 建立了适用于矩形试件的传递函数,当只考虑底面纵波一次反射的波形时,  $G_{ij}^B(\omega)$  可表示为:

$$G_{ij}^B(\omega) = \exp(jk2r_{ij}^B) \left(\frac{1}{r_{ij}^B}\right)^{0.5}$$

$$D(\theta_{ij}^B, \omega)^2 R(\theta_{ij}^B) \quad (6)$$

式中,  $r_{ij}^B$  为超声波从第  $i$  个阵元出发经试件底面反射至第  $j$  个阵元时的几何声学路径长度的二分之一,  $\theta_{ij}^B$  为试件厚度与  $r_{ij}^B$  比值的反余弦,  $R$  是以纵波入射角  $\theta_L$  为自变量,用于衡量声波经试件底面镜面反射后的能量损失率,其表达式为:

$$R(\theta_L) = \frac{(c_s/c_L)^2 \sin 2\theta_L \sin 2\theta_s - \cos^2 2\theta_s}{(c_s/c_L)^2 \sin 2\theta_L \sin 2\theta_s + \cos^2 2\theta_s} \quad (7)$$

式中,  $c_L$  和  $c_s$  分别为试件的纵波及横波声速,  $\theta_s$  为等效折射角,满足:

$$\sin \theta_s = (c_s/c_L) \sin \theta_L \quad (8)$$

## 检测成像方法

### 1 时域线性算法

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,其代表算法为全聚焦方法(Total Focusing Method, TFM),是应用最为广泛的全矩阵数据检测成像算法。全聚焦方法采用一定的空间间隔对成像区域进行离散,构造二维矩阵  $I$ , 对每个成像点  $(x, z)$  运用式(1)计算  $I(x, z)$ , 其表达式为<sup>[18]</sup>:

$$I(x, z) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N u_{ij}^H(t_{ij}(x, z)) \quad (9)$$

式中,  $t_{ij}(x, z)$  为声波从第  $i$  个阵元传播至  $(x, z)$  后再传播回第  $j$  个阵元所花费的时间,复解析信号  $u_{ij}^H(t)$  是全矩阵数据  $u_{ij}(t)$  的希尔伯特变换,可消除激励信号振荡对成像结果的影响<sup>[19]</sup>。由于全聚焦方法

的计算结果为复值矩阵,一般采用幅长矩阵  $\text{Abs}(I)$  进行结果显示。假设图像  $I$  的像素点总数为  $N_x \times N_z$ , 全聚焦方法的成像结果与发射了  $N_x \times N_z$  条聚焦声束的相控阵超声检测方案相同。

图4给出了笔者自研的阵列超声检测与评价系统 BUAA\_AUT 分别采用相位控制方法(扇形扫描)以及全矩阵数据算法(全聚焦)对 B 型试块的大圆弧、小圆弧以及竖孔区域进行检测成像的结果,其中,超声控制硬件单元为引言中介绍的 OEM-PA-128/128, 换能器阵元数量为 64, 中心频率为 5MHz, 由广州多浦乐电子科技有限公司制造,成像区域为图4(a)中所示的绿色矩形框,全聚焦方法的成像像素点数量为  $1000 \times 1000$ , 相位控制方法共发射了 4096 条声束,覆盖了极坐标系下区间  $[-90^\circ, 90^\circ]$  的检测范围。对比图4(b)和4(c)可知,全聚焦方法的检测图像探测出了更多的缺陷(例如左下角红色虚线框中的竖排小孔),缺陷图像的圆弧形、对比度、信噪比均远高于扇形扫描的 S 型显示结果图。全聚焦方法的成像结果显著优于基于相位控制方法的原因是其不受超声控制硬件单元限制的庞大数量发射接收声束聚焦点。由全聚焦方法的原理可知,全矩阵数据的计算过程中相当于发射并接收了  $1000 \times 1000$  条聚焦于 B 型试样内部不同位置的“虚拟超声合成声束”,与基于相位控制的方法相比,发射和接收聚焦点分别多了 243 倍和 2.8 倍,远远高于相位控制方法成像能力极限。全聚焦方法因其可采用任意多数量的聚焦点进行成像,也因此被称为阵列超声检测成像的“黄金标准(Gold Standard)”算法。

当换能器直接贴合于试件表面时,若被测试件为各向同性介质,则  $t_{ij}(x, z)$  可表示为:

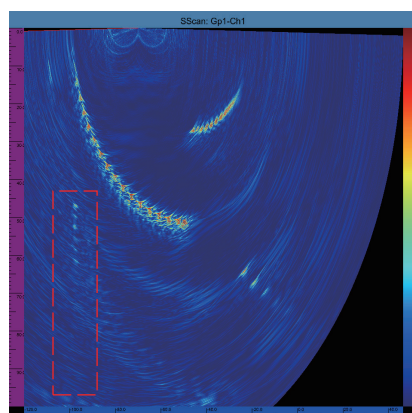
$$t_{ij}(x, z) = \left( \sqrt{(x_{Ti} - x)^2 + z^2} + \sqrt{(x_{Tj} - x)^2 + z^2} \right) / c \quad (10)$$

式中,  $x_i$  和  $x_j$  分别为发射和接收阵元晶片的横坐标,  $c$  为全聚焦方法所采用的试件声速。若被测试件为各向异性介质,则  $t_{ij}(x, z)$  可表示为<sup>[20]</sup>:

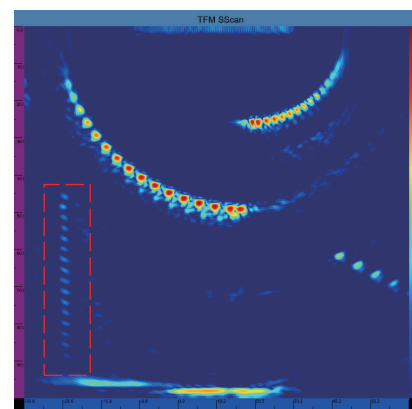
$$t_{ij}(x, z) = \sqrt{(x_{Ti} - x)^2 + z^2} / c_g(\theta_i) + \sqrt{(x_{Tj} - x)^2 + z^2} / c_g(\theta_j) \quad (11)$$



(a) B 型试样



(b) 基于相位控制的成像结果



(c) 基于全矩阵数据的成像结果

图4 B型试样采用不同方法的成像结果  
Fig.4 Imaging result of type-B specimen using different array methods

式中,  $c_g(\theta)$  为各向异性介质中声族群速度随传播方向的变化函数, 可通过弹性力学公式理论计算得到<sup>[21]</sup>, 也可直接利用全矩阵数据试验测量得到<sup>[22]</sup>,  $\theta_i$  和  $\theta_j$  分别为发射和接收阵元晶片与点  $(x, z)^T$  连线相对于晶片表面法线方向的夹角。

当换能器不直接贴合于试件表面, 或者被测试件具有多个介质层时,  $t_{ij}(x, z)$  需采用斯涅耳定律或者费马原理进行计算<sup>[23]</sup>。Zhang 等<sup>[24]</sup>建立了多模式全聚焦方法, 每一种模式对应于一种声波的反射次数和波型转换组合, 其成像结果也称为一种检测视图 (View)<sup>[25]</sup>。图 5 给出了笔者自研的阵列超声检测与评价系统 BUAA\_AUT 分别采用相位控制方法 (扇形扫描) 以及全矩阵数据算法 (全聚焦) 对 6mm 厚铝合金平板焊接区域内部预埋的长度 0.5mm 槽型和直径 0.7mm 孔型缺陷采用多模式全聚焦以及多次反射的扇形扫描的成像结果, 其中, 阵列超声换能器的中心频率及阵元数量分别为 5MHz 和 0.6mm, 贴合于倾斜角为 36° 的斜楔块上表面, 同样由广州多浦乐电子科技有限公司制造。对比图 5 (d) 和 (e)、图 5 (f) 和 (g) 可知, 与前面 B 型试样的检测结果类似, 多模式全聚焦方法测出了更多的缺陷, 缺陷图像的圆形度、对比度、信噪比均远高于扇形扫描的 S 型显示结果图。

## 2 频域线性算法

为了弥补全聚焦方法没有利用频域信息的不足, Hunter 等<sup>[26]</sup>建立了一种称为波数域方法 (Wavenumber Method) 的频域线性成像算法, 该算法利用三维傅里叶变换、外尔恒等式、Stolt 插值等数学工具实现了基于频域信息的试件内部重构。由于傅里叶变换使用了直角坐标系下的正交基函数, 波数域算法仅适用于矩形结构件, 且要求换能器直接贴合于试件表面, 与全聚焦方法相比,

适用范围存在较大限制。从声学理论的角度分析, 可以证明波数域方法与全聚焦方法的成像结果等价。从算法时间复杂度的角度分析, 由于采用了快速傅里叶变换, 其复杂度比全聚焦方法小了至少 1 个数量级。从算法空间复杂度的角度分析, 为了提高 Stolt 插值的精度, 进行傅里叶变换之前需要对全矩阵数据进行加倍补零, 复杂度比全聚焦方法大了至少 1 个数量级。起初, 当全矩阵数据算法只能采用离线后处理的方式执行时, 波数域方法被用于加速检测图像的计算速度。然而,

随着 GPU 并行技术的发展, 全聚焦方法的处理时间大幅度缩减, 以 BUAA\_AUT 为例, 在 GTX1080Ti 显卡下, 1000×1000 个像素点的 64 阵元全聚焦图像只需 70ms 便可完成计算, 基本满足了检测实时性的要求。由于处理速度不再是全矩阵算法实际应用的瓶颈, 波数域方法适用范围窄、实现难度大、内存占用率高、抗高频噪声干扰能力差等缺点使其在实际应用中不再具备任何优势。

在波数域算法的基础上, Velichko<sup>[27]</sup>建立了一种称为反向传

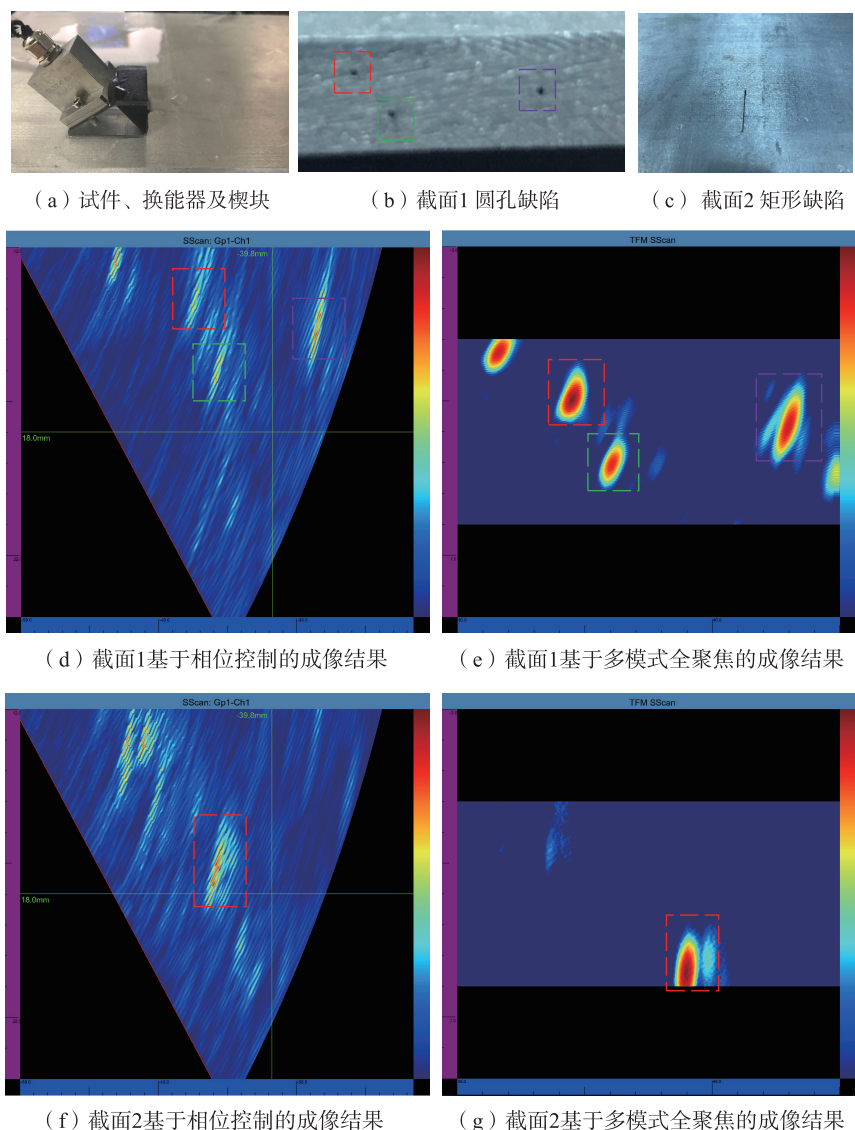


图5 薄壁试样采用不同方法的成像结果

Fig.5 Imaging result of thin-walled plate using different array methods

播方法(Back-propagation Method)的频域线性成像算法。反向传播算法是一种可逆的全矩阵数据算法,这里可逆的定义是能够利用检测图像还原出全矩阵数据,全聚焦方法和波数域算法均不具备可逆的性质。尽管反向传播算法与波数域算法具有完全相同的缺点,但利用其可逆性的性质,算法能够从具有多个缺陷信息的全矩阵数据中还原出只包含特定缺陷信息的全矩阵数据,可实现全聚焦等方法难以完成的缺陷信息提取工作。

### 3 非线性算法

考虑非线性效应时,阵列超声检测过程需采用非线性波动方程组描述,此时偏微分方程的解不满足叠加性原理,式(1)变为:

$$h(t) = \sum_{j \in \text{AP}_R} \sum_{i \in \text{AP}_T} u_{ij}(t - \Delta t_{T_i} - \Delta t_{R_j}) + \text{nl}(t) \quad (12)$$

式中,  $\text{nl}(t)$  为检测过程中的非线性引起的非线性项。基于式(12)的思想, Potter 等<sup>[28]</sup>建立了一种非线性算法,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。由于超声回波信号中的非线性成分十分微弱,且除了材料之外,换能器、激励接收硬件单元、环境温度以及振动均可能引入额外的非线性效应<sup>[29]</sup>。为了提高非线性成像的鲁棒性,非线性成像算法采用声能进行成像,忽略了接收相位延时。假设聚焦点  $(x, z)^T$  处各阵元所采用的发射相位延时集合为  $\{\Delta t_i | i=1, \dots, N\}$ , 则点  $(x, z)^T$  处基于相位控制所得声能  $E_{\text{PA}}$  可表示为:

$$E_{\text{PA}}(x, z) = \sum_{i=1}^N \int_{\frac{2}{3}\omega_0}^{\frac{4}{3}\omega_0} \omega^2 |H_i(x, z, \omega)|^2 d\omega \quad (13)$$

式中,  $H_i(\omega)$  为第  $i$  个阵元接收到的信号  $H_i(t)$  的频谱,  $\omega_0$  为换能器的中心频率。相应的,点  $(x, z)^T$  处基于全矩阵数据所得声能  $E_{\text{FMC}}$  可表示为:

$$E_{\text{FMC}}(x, z) = \sum_{j=1}^N \int_{\frac{2}{3}\omega_0}^{\frac{4}{3}\omega_0} \omega^2 \left| \sum_{i=1}^N U_{ij}(x, z, \omega) e^{i\omega \Delta t_i(x, z)} \right|^2 d\omega \quad (14)$$

式中,  $U_{ij}(\omega)$  为全矩阵数据  $U_{ij}(t)$  的一维傅里叶变换。非线性全矩阵数据算法利用  $E_{\text{PA}}$  和  $E_{\text{FMC}}$  的差异进行成像,对于每个成像点  $(x, z)^T$ , 图像的像素幅值  $I(x, z)$  为:

$$I(x, z) = (E_{\text{FMC}}(x, z) - E_{\text{PA}}(x, z)) / E_{\text{FMC}}(x, z) \quad (15)$$

此时,图像幅值的物理意义是声波由于材料内部的非线性效应而产生的能量损失率。

### 4 不同成像方法的对比

线性全矩阵数据成像算法主要应用于检测裂纹、气孔分层等典型宏观缺陷,非线性全矩阵数据成像算法主要应用于检测微裂纹、早期疲劳等亚宏观微小缺陷,大部分应用中主要采用线性成像算法。当被测试件为各向同性材料、几何外形为矩形时,若忽略外部噪声及采样频率的影响则可证明,全聚焦方法(时域成像算法)与波数域方法及反向传播方法严格等价。波数域算法无法应用于弯曲型面结构件、各向异性结构件及多层分布介质,随着并行计算技术的发展,算法相对于全聚焦方法所具有的时间复杂度优势逐渐消失,使用频率逐渐减少。反向传播算法是波数域算法的推广,与波数域算法不同,具有算子可逆的性质,可以无损地提取只包含单一缺陷信息的散射系数矩阵。由于采用线性时域算法无法无损分离多个缺陷之间的混叠信息,在缺陷的高精度定量表征评价中,反向传播算法具有不可替代的作用。

## 定量评价方法

### 1 基于缺陷图像的算法

缺陷图像与缺陷尺寸、形状以及换能器相对位置密切相关。换能器相

对位置对缺陷图像的影响可通过归一化因子消除,对于特定点  $(x, z)^T$ , 归一化因子的值等于式(3)中扩散衰减项以及指向性衰减项的乘积。周正干等<sup>[30]</sup>分析了楔块耦合时声传播过程中的扩散衰减规律,对多层介质下的扩散衰减归一化因子进行了修正。当缺陷尺寸远大于声波波长时,缺陷形状可直接利用缺陷图像进行表征,缺陷尺寸可通过  $-6\text{dB}$  法测量缺陷图像确定。

为了对接近或者小于波长的缺陷进行定量评价, Wilcox 等<sup>[31]</sup>根据不同类型缺陷与声波作用的规律差异,建立了向量全聚焦方法(Vector Total Focusing Method, VTFM),用于对缺陷尺寸、形状进行定量评价。向量全聚焦方法的成像结果为二维矢量云图,利用不同子阵列孔径下的全聚焦图像加权计算得到,反映了缺陷尺寸和方向,当缺陷形状接近矩形时,缺陷方向表征了镜面反射平面的法向量,当缺陷形状接近圆形时,缺陷不具备任何物理意义。在缺陷峰值的  $-6\text{dB}$  范围内,若矢量方向分布杂乱,无明显规律,则认为缺陷形状接近圆形,若矢量方向分布统一,则认为缺陷形状接近矩形,矩形的朝向可利用矢量方向的平均值进行表征。

### 2 基于散射系数矩阵的算法

基于缺陷图像的算法对幅值和方向等信息进行统计,只能对缺陷的尺寸和形状进行近似估计。Zhang 等<sup>[32]</sup>提出了基于散射系数矩阵的缺陷定量评价算法,利用全矩阵数据对检出缺陷的实际散射系数矩阵进行反演,将实际散射系数矩阵与理论散射系数矩阵数据库进行匹配,根据匹配结果确定缺陷实际尺寸和形状,散射系数矩阵的匹配可采用互相关运算实现。基于散射系数矩阵的评价算法充分利用了全矩阵数据中包含的缺陷信息以及复杂形状缺陷的理论散射规律,能够实现更加精准的缺陷特征评价。实际散射系数矩阵测

量时可利用反向传播方法提取只包含单一缺陷信息的散射系数矩阵,消除边界及其他缺陷反射信号的干扰。基于散射系数矩阵的定量评价精度由理论散射系数数据库规模决定,规模越大,匹配精度越高。

当不具备理论散射系数矩阵数据库时,可以利用实际散射系数矩阵的整体性质对缺陷的特征进行直接估计。当实际散射系数矩阵在区间 $[-90^\circ, 90^\circ] \times [-90^\circ, 90^\circ]$ 无明显主瓣时(图6(a)<sup>[32]</sup>),缺陷的实际形状接近于圆形,此时,可利用实际散射系数矩阵的最大幅值对缺陷的等效直径进行定量。当实际散射系数矩阵在区间 $[-90^\circ, 90^\circ] \times [-90^\circ, 90^\circ]$ 内存在明显的主瓣时(图6(b)<sup>[32]</sup>),缺陷的实际形状接近于矩形,此时,可利用主瓣与水平坐标轴的夹角对等效矩形缺陷的方向进行定量,主瓣中心线上 $-6\text{dB}$ 范围内的宽度(Half Width Half Maximum, HWHM)可用于对缺陷的等效长度进行定量。

### 3 不同定量算法的对比

基于缺陷图像的定量评价算法具有原理简单、实际操作难度小、抗噪声干扰能力强等优点,可有效解决大于声波波长的缺陷的几何类型识别和尺寸定量。基于散射系数矩阵的定量评价算法原理复杂,可实现尺寸小于波长的缺陷的高精度定量评价。为确保定量评价精度,需预先计算存储大量不同尺寸形状仿真缺陷的理论散射系数矩阵,为了不丢失散射系数矩阵中缺陷微结构对反射声场的影响,需采用至少小于36倍声波波长的细小网格进行仿真计算,对计算资源要求较高。此外在测量实际缺陷的散射系数矩阵时还需结合反向传播算法消除固有反射、多缺陷反射产生的混叠干扰信号影响。

## 关键技术

### 1 检测与评价系统设计

进行全矩阵数据采集时,每次脉

冲激励后所接收A型信号的总量比常规基于相位控制的方法大了一个以上的数量级。以采用具有64阵元的换能器进行全矩阵数据采集为例,假设A型信号的长度为 $50\mu\text{s}$ ,脉冲重复频率为 $20\text{kHz}$ ,采样频率为 $100\text{MHz}$ ,数字信号的位数为8,端口为USB3.0,则每次全矩阵数据采集时,声束激励接收所需时长为 $3.2\text{ms}$ ,全矩阵数据所占据约等于 $19.53\text{MB}$ 的内存空间,理论上需要消耗 $51.2\text{ms}$ 的时间完成数据的传输,远远大于 $3.2\text{ms}$ ,为了避免采集数据的丢失,只能采用低于 $25\text{Hz}$ 的频率进行全矩阵数据采集。如果考虑采集单元缓存空间、数字采样处理速度等额外因素,实际采集频率将远低于上述理论值,严重降低检测与评价的效率。为解决上述问题,全矩阵数据检测与评价的硬件系统应采用PCIE接口进行数据传输,以PCIE5.0 $\times 16$ 接口为例,其传输速度峰值为 $49.2\text{GB/s}$ ,理论上只需 $0.38\text{ms}$ 便可完成 $19.53\text{MB}$ 全矩阵数据的传输,确保检测与评价过程中能够采用最大的脉冲重复频率进行全矩阵数据采集。

BUAA\_AUT需消耗 $70\text{ms}$ 完成一次64阵元 $1000 \times 1000$ 像素点的全聚焦图像生成,图像的生成速度慢于全矩阵数据的采集速度峰值。为防止丢失数据,全矩阵数据检测与评价的软件系统应包含全矩阵数据内存池、检测评价结果内存池、全矩阵数据采集线程、全矩阵数据算法处理线程、全矩阵数据同步管理等模块,全矩阵数据同步管理模块维护了一个线程安全的队列,队列中存储了待处理数据对应的内存池偏移地址信息。检测过程中,采集线程根据编码器位置信息计算全矩阵数据以及检测结果内存池中的偏移地址,将新采集到的数据填充至全矩阵数据内存池偏移地址之后的空间,并将偏移地址填充至同步管理队列队尾。算法处理线程从同步管理队列队首获

取偏移地址信息,运用检测评价算法对全矩阵数据内存池偏移地址后的数据进行计算,并将计算结果填充至检测评价结果内存池偏移地址后的空间。为了保证检测系统的实时性,软件系统应采用符合ISO/IEC 14882:2014以上标准的C++编译器进行编写,理论用标准库的`std::async`和`std::future`实现采集和处理线程。假设一次检测存在500个扫描点,则全矩阵数据将总共占据 $9.54\text{GB}$ 的内存空间,为此上位机应安装64位操作系统,并配备足够容量的内存条。

### 2 全矩阵数据的仿真

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,理论仿真方法主要包括:

(1) 基于全矩阵数据理论模型。

该方法利用傅里叶变换将激励信号 $v(t)$ 转化为频谱 $V(\omega)$ ,运用式(2)~(8)给出的全矩阵数据采集传递函数对全矩阵数据 $\{u_{ij}(t)\}$ 进行计算,其表达式为:

$$U_{ij}(t) = \frac{1}{2\pi} \int G_{ij}(\omega) V(\omega) d\omega \quad (16)$$

理论散射系数矩阵 $S_m(\theta_1, \theta_2, \omega)$ 是仿真计算的核心,为确保理论散射系数矩阵的精度,有限元仿真的空间步长应小于声波波长的三分之一,仿真将占据大量的内存空间,为确保仿真计算的稳定进行,计算机应具备至少大于 $8\text{GB}$ 的内存空间。Velichko等<sup>[33]</sup>设计了一种通用的散射系数矩阵有限元计算网格,可实现各向异性介质中二维和三维缺陷散射系数矩阵稳定高效计算。

(2) 基于时域有限差分。

该方法对弹性波动方程的一阶偏微分方程组进行离散,构建以振动速度场和应力场 $v_x, v_z, \sigma_{xx}, \sigma_{zz}$ 以及 $\sigma_{xz}$ 表征介质中传播声波的差分格式,其表达式为<sup>[34]</sup>:

$$\begin{cases}
 v_x|_{i-0.5,k}^{n+0.5} = v_{x1}|_{i-0.5,k}^{n+0.5} + v_{x2}|_{i-0.5,k}^{n+0.5}, v_z|_{i,k-0.5}^{n+0.5} = v_{z1}|_{i,k-0.5}^{n+0.5} + v_{z2}|_{i,k-0.5}^{n+0.5} \\
 \sigma_{xx}|_{i,k}^{n+1} = \sigma_{xx1}|_{i,k}^{n+1} + \sigma_{xx2}|_{i,k}^{n+1}, \sigma_{zz}|_{i,k}^{n+1} = \sigma_{zz1}|_{i,k}^{n+1} + \sigma_{zz2}|_{i,k}^{n+1} \\
 \sigma_{xz}|_{i-0.5,k-0.5}^{n+1} = \sigma_{xz1}|_{i-0.5,k-0.5}^{n+1} + \sigma_{xz2}|_{i-0.5,k-0.5}^{n+1} \\
 v_{x1}|_{i-0.5,k}^{n+0.5} = C_{vxx1}|_{i,k} (\sigma_{xx}|_{i,k}^n - \sigma_{xx}|_{i-1,k}^n) + C_{vxx2}|_{i,k} v_{x1}|_{i-0.5,k}^{n-0.5} \\
 v_{x2}|_{i-0.5,k}^{n+0.5} = C_{vxx2}|_{i,k} (\sigma_{xz}|_{i-0.5,k+0.5}^n - \sigma_{xz}|_{i-0.5,k-0.5}^n) + C_{vxx2}|_{i,k} v_{x2}|_{i-0.5,k}^{n-0.5} \\
 v_{z1}|_{i,k-0.5}^{n+0.5} = C_{vzx1}|_{i,k} (\sigma_{xz}|_{i+0.5,k-0.5}^n - \sigma_{xz}|_{i-0.5,k-0.5}^n) + C_{vzx2}|_{i,k} v_{z1}|_{i,k-0.5}^{n-0.5} \\
 v_{z2}|_{i,k-0.5}^{n+0.5} = C_{vzx2}|_{i,k} (\sigma_{zz}|_{i,k}^n - \sigma_{zz}|_{i-1,k}^n) + C_{vzx2}|_{i,k} v_{z2}|_{i,k-0.5}^{n-0.5} \\
 \sigma_{xx1}|_{i,k}^{n+1} = C_{txx1}|_{i,k} (v_x|_{i+0.5,k}^{n+0.5} - v_x|_{i-0.5,k}^{n+0.5}) + C_{txx2}|_{i,k} \sigma_{xx1}|_{i,k}^n \\
 \sigma_{xx2}|_{i,k}^{n+1} = C_{txx2}|_{i,k} (v_x|_{i,k+0.5}^{n+0.5} - v_x|_{i,k-0.5}^{n+0.5}) + C_{txx2}|_{i,k} \sigma_{xx2}|_{i,k}^n \\
 \sigma_{zz1}|_{i,k}^{n+1} = C_{tzz1}|_{i,k} (v_z|_{i+0.5,k}^{n+0.5} - v_z|_{i-0.5,k}^{n+0.5}) + C_{tzz2}|_{i,k} \sigma_{zz1}|_{i,k}^n \\
 \sigma_{zz2}|_{i,k}^{n+1} = C_{tzz2}|_{i,k} (v_z|_{i,k+0.5}^{n+0.5} - v_z|_{i,k-0.5}^{n+0.5}) + C_{tzz2}|_{i,k} \sigma_{zz2}|_{i,k}^n \\
 \sigma_{xz1}|_{i-0.5,k-0.5}^{n+1} = C_{txz1}|_{i,k} (v_x|_{i,k-0.5}^{n+0.5} - v_x|_{i-1,k-0.5}^{n+0.5}) + C_{txz2}|_{i,k} \sigma_{xz1}|_{i-0.5,k-0.5}^n \\
 \sigma_{xz2}|_{i-0.5,k-0.5}^{n+1} = C_{txz2}|_{i,k} (v_x|_{i-0.5,k}^{n+0.5} - v_x|_{i-0.5,k-1}^{n+0.5}) + C_{txz2}|_{i,k} \sigma_{xz2}|_{i-0.5,k-0.5}^n \\
 C_{vxx1}|_{i,k} = 2(2 + \Delta t \bar{d}x|_{i,k}) / \bar{\rho}_x|_{i,k}, C_{vxx2}|_{i,k} = 2(2 - \Delta t \bar{d}x|_{i,k}) / (2 + \Delta t \bar{d}x|_{i,k}) \\
 C_{vxx2}|_{i,k} = 2(2 + \Delta t \bar{d}z|_{i,k}) / \bar{\rho}_z|_{i,k}, C_{vxx2}|_{i,k} = 2(2 - \Delta t \bar{d}z|_{i,k}) / (2 + \Delta t \bar{d}z|_{i,k}) \\
 C_{vzx1}|_{i,k} = 2(2 + \Delta t \bar{d}x|_{i,k}) / \bar{\rho}_z|_{i,k}, C_{vzx2}|_{i,k} = 2(2 - \Delta t \bar{d}x|_{i,k}) / (2 + \Delta t \bar{d}x|_{i,k}) \\
 C_{vzx2}|_{i,k} = 2(2 + \Delta t \bar{d}z|_{i,k}) / \bar{\rho}_z|_{i,k}, C_{vzx2}|_{i,k} = 2(2 - \Delta t \bar{d}z|_{i,k}) / (2 + \Delta t \bar{d}z|_{i,k}) \\
 C_{txx1}|_{i,k} = 2C_{11}|_{i,k} / (2\Delta h / \Delta t + \bar{d}x|_{i,k}), C_{txx2}|_{i,k} = 2(2 - \Delta t \bar{d}x|_{i,k}) / (2 + \Delta t \bar{d}x|_{i,k}) \\
 C_{txz1}|_{i,k} = 2C_{13}|_{i,k} / (2\Delta h / \Delta t + \bar{d}z|_{i,k}), C_{txz2}|_{i,k} = 2(2 - \Delta t \bar{d}z|_{i,k}) / (2 + \Delta t \bar{d}z|_{i,k}) \\
 C_{tzz1}|_{i,k} = 2C_{33}|_{i,k} / (2\Delta h / \Delta t + \bar{d}x|_{i,k}), C_{tzz2}|_{i,k} = 2(2 - \Delta t \bar{d}x|_{i,k}) / (2 + \Delta t \bar{d}x|_{i,k}) \\
 C_{tzz2}|_{i,k} = 2C_{33}|_{i,k} / (2\Delta h / \Delta t + \bar{d}z|_{i,k}), C_{tzz2}|_{i,k} = 2(2 - \Delta t \bar{d}z|_{i,k}) / (2 + \Delta t \bar{d}z|_{i,k}) \\
 C_{txz1}|_{i,k} = 2(2\Delta h / \Delta t + \bar{d}x|_{i,k}) / \bar{C}_{55}|_{i,k}, C_{txz2}|_{i,k} = 2(2 - \Delta t \bar{d}x|_{i,k}) / (2 + \Delta t \bar{d}x|_{i,k}) \\
 C_{txz2}|_{i,k} = 2(2\Delta h / \Delta t + \bar{d}z|_{i,k}) / \bar{C}_{55}|_{i,k}, C_{txz2}|_{i,k} = 2(2 - \Delta t \bar{d}z|_{i,k}) / (2 + \Delta t \bar{d}z|_{i,k}) \\
 \bar{\rho}_x|_{i,k} = (\rho|_{i-1,k} + \rho|_{i,k})\Delta h / 2\Delta t, \bar{\rho}_z|_{i,k} = (\rho|_{i,k-1} + \rho|_{i,k})\Delta h / 2\Delta t \\
 \bar{C}_{55}|_{i,k} = 4 / (1 / C_{55}|_{i,k} + 1 / C_{55}|_{i-1,k} + 1 / C_{55}|_{i,k-1} + 1 / C_{55}|_{i-1,k-1})
 \end{cases} \quad (17)$$

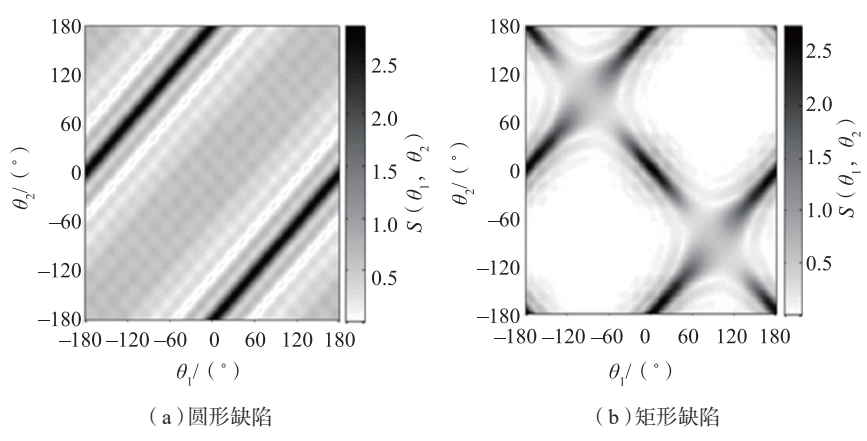


图6 典型缺陷的散射系数矩阵图像  
Fig.6 Scattering matrix of typical defects

式中,  $\Delta t$  和  $\Delta h$  为差分网格的时间和空间步长,  $(i, k)$  为差分网格点的编号,  $n$  为仿真迭代的次数标号,  $C_{11}$ 、 $C_{13}$ 、 $C_{33}$ 、 $C_{55}$  为介质的弹性系数, 由介质的纵波速度、横波速度以及密度  $\rho$  决定,  $\bar{d}x$  和  $\bar{d}z$  为介质的衰减系数, 用于对仿真区域边界处进行声波的吸收。为了确保有限差分计算时不会产生数值发散现象, 时间步长  $\Delta t$ 、空间步长  $\Delta h$  以及介质的纵波声速  $c_L$  应满足二维 Courant 条件<sup>[35]</sup>:

$$c_L \Delta t \leq \Delta h / \sqrt{2} \quad (18)$$

基于时域有限差分的全矩阵数据仿真方法采用矩形网格对仿真区域进行离散, 无需对散射系数矩阵进行预先计算, 也不需要针对不同波型模式的反射和折射进行人工选择, 与基于全矩阵数据理论模型相比, 尽管计算时间较长, 但计算过程简单可靠, 在不具备一定规模的理论散射系数矩阵数据库时, 是最为经济实惠的全矩阵数据仿真方法。

### 3 全矩阵数据算法的并行加速

全矩阵数据算法属于数据密集型算法, 各成像点处采用完全相同的逻辑进行计算, 可以采用 SIMD (Single Instruction Multiple Data) 技术<sup>[36]</sup>进行并行化, 在众多的并行计算架构中, NVIDIA 公司的 CUDA (Compute Unified Device Architecture) 架构<sup>[37]</sup>使用 GPU 进行并行计算, 具有经济实惠、开发便捷、支持个人 PC 等优势, 是全矩阵数据算法并行加速的最佳方案。采用 CUDA 进行并行计算时, 计算任务被划分为大量相互独立的子线程, 所有子线程均执行相同的 CUDA 核函数。子线程采用 6 维坐标进行标识, 坐标的前 3 个分量称为 block 坐标, 后三个分量称为 thread 坐标。前 3 个坐标相同的所有 thread 构成一个 block, 所有 block 构成一个 grid, 每个 block 被分配至一个特定的 GPU 大核, GPU 以线程束为单位驱

动每一个大核中的若干个 thread 坐标连续的子线程进行显存的读写和寄存器的计算,对于采用 Pascal 架构的 GPU, warp 的大小为 32。当线程束中子线程读写的内存恰好连续排布时,内存的读写次数将大幅度削减,因此在核函数设计时,应尽量注意内存的布局形式。

全聚焦方法具有 3 个可以实施并行化的阶段:

(1) 全矩阵数据的希尔伯特变换。

假定数字离散后的信号点数为  $N_t$ , 则希尔伯特变换后复解析全矩阵数据  $u_{ij}^H$  的离散频谱  $U_{ij}^H$  可表示为:

$$U_{ij}^H(n) = \begin{cases} U_{ij}(0) & (n=0) \\ 2U_{ij}(n) & (1 \leq n < N_t/2) \\ U_{ij}(N_t/2) & (n=N_t/2) \\ 0 & (N_t/2 < n < N_t) \end{cases} \quad (19)$$

式中,  $U_{ij}$  为全矩阵数据  $u_{ij}$  的离散傅里叶变换。时域和频域数据之间的转换可直接使用 CUDA 自带的 cufft 函数包求解。采用 CUDA 并行化时, grid 的维数为  $(N \times N, 1, 1)$ , 每个 block 的维数为  $(256, 1, 1)$ 。坐标为  $(i \times N + j, 1, 1, k, 1, 1)$  的子线程利用式 (20) 对  $U_{ij}(k)$ ,  $U_{ij}(k+256)$ ,  $U_{ij}(k+512)$  …… 处的全矩阵数据进行计算。每个子线程所处理的数据以 256 为间隔分布是为了最大程度减小线程束中内存的读写次数。

(2) 传播时间查询表的计算。

计算阵元晶片至成像点的传播时间需沿介质边界进行迭代,耗时较长。为解决上述问题,只对间隔一定距离的成像点计算时间,采用 2DLayered 型纹理内存存储传播时间查询表,利用纹理内存的硬件四点线性插值功能确定间隔之内其他成像点的传播时间。假设时间项计算的间隔为  $N_\Delta$ , 采用 CUDA 并行化时, grid 的维数为  $(N_x / (16 \times N_\Delta), N_y / (16 \times N_\Delta), N/4)$ , block 的维数为  $(16, 4, 4)$ 。坐标为  $(i, j, k, p, q, r)$  的子线程对第  $4 \times k+r$  个阵元晶片至位于  $16 \times N_\Delta \times i+p$  行  $16 \times N_\Delta \times j+q$

列的成像点的传播时间,并存储至第  $4 \times k+r$  层纹理内存中的第  $i$  行  $j$  列节点。

(3) 公式 (9) 的计算。

获得了全矩阵数据的希尔伯特变换以及存储了传播时间的纹理内存后,将 grid 的维数设置为  $(N_x/16, N_y/16, N)$ , block 的维数设置为  $(16, 16, 1)$ 。坐标为  $(i, j, k, p, q, r)$  处的子线程利用求和项:

$$\sum_{j=1}^N u_{ij}^H(t_{ij}(x, z)) \quad (20)$$

计算第  $4 \times k+r$  个阵元晶片发射声波对第  $16 \times j+q$  行  $16 \times i+p$  列的成像点所贡献的成像幅值。由于 c++ 的内存布局遵循行优先的规则,在核函数坐标设计时故意颠倒了  $x$  和  $z$  轴的索引坐标。

CUDA 还可以用于对基于时域有限差分的全矩阵数据仿真进行并行化加速。北航研发的 BUAA\_AUT 软件系统集成了基于式 (17) 和 (18) 的全矩阵数据仿真模块,若换能器阵元晶片数量为 64, 采样时长为 50 $\mu$ s, 仿真区域大小为 40mm $\times$ 40mm, 空间步长为 0.05mm, 时间步长为 5ns, 则进行一次完整的全矩阵数据采集只需 40min。

## 应用案例

### 1 裂纹缺陷的评价

Zhang 等<sup>[25]</sup>对基于缺陷图像和散射系数矩阵的定量评价算法应用于裂纹长度测量极限展开了研究,结果表明,基于缺陷图像的算法最小可实现 0.6 个声波波长裂纹缺陷的测量,基于散射系数矩阵的算法可实现更小长度裂纹的测量,当裂纹反射平面法线恰好被换能器覆盖时,最小可实现 0.2 个声波波长裂纹缺陷的测量。在实际检测时,全矩阵数据中存在的噪声信号将降低上述算法的测量能力。基于缺陷图像的算法抗噪声干扰能力较强,当背景噪声接近缺

陷信号幅值的 10% 时,最小测量长度增大至 1.6 个声波波长,是最小理论测量极限的 2.67 倍。由于反向传播方法的抗噪声干扰能力较差,同样噪声水平下,基于散射系数矩阵的最小测量长度增大至 1.4 个声波波长,是最小理论测量极限的 7 倍。Felice 等<sup>[17]</sup>基于 HSTFM 模式图像对大于 1.5 个波长的底面垂直裂纹长度测量展开了系统研究,结果表明,当裂纹根部与换能器中心连线相对于换能器法平面的夹角位于区间  $[27^\circ, 63^\circ]$  范围内时,采用 -6dB 法测量的垂直裂纹长度与真实值的误差小于 10%。

Peng 等<sup>[38]</sup>利用全矩阵数据理论模型对底面反射信号进行匹配估计,在不借助反向传播方法的前提下构建了一套适用于近表面裂纹缺陷的散射系数矩阵测量算法。在此基础上,对小于 1.5 个纵波波长的底面裂纹测量展开了研究,结果表明,由于采用时域信号测量的散射系数矩阵抗噪声干扰能力较强,利用散射系数矩阵可实现最小 0.78 个波长的实际近表面裂纹缺陷测量,测量结果与理论值的误差小于 19%。Li 等<sup>[39]</sup>利用斜楔块对阵列换能器进行耦合,对厚度小于 5 个纵波波长的壁厚试件内部裂纹和气孔缺陷的检测与评价展开了研究,结果表明,SS-S、SSS-SS 以及 SSS-SSS 视图可用于分辨试件内部的气孔和裂纹,气孔缺陷的直径可利用 SSS-SSS 视图下缺陷图像的峰值进行定量,紧贴下表面的裂纹缺陷可利用 -6dB 法对 SS-S 视图中的缺陷图像测量实现,与 Felice 等<sup>[17]</sup>的研究前提条件不同,试件的相对厚度更小,缺陷与换能器中心连线的倾斜角更大。

### 2 弯曲型面结构件的自适应成像

弯曲型面结构件的自适应成像是全矩阵数据算法的研究热点。按照自适应形式的差异,主要包括:

(1) 换能器自适应。

采用柔性阵列超声换能器直接

贴合于试件表面,为了确定柔性阵元在弯曲型面结构件表面上的位置坐标, Hunter 等<sup>[40-41]</sup>提出了两种不同的阵元位置估计方法。第一种方法认为采用正确的阵元位置坐标计算出的全聚焦图像的缺陷对比度最高,为了加速全局最优对比度图像的搜索,采用模拟退火等优化算法进行迭代。第二种方法将一般弯曲型面分解为一系列基本曲面构型的加权组合,当采用正确的加权系数时,声波由阵元晶片传播至缺陷的时间与柔性换能器位于各基本曲面构型时传播时间加权的方差最小,因此可利用多元最小二乘法进行求解。

#### (2) 耦合介质自适应。

此方法采用柔性楔块或者液体耦合介质实现刚性阵列超声换能器与弯曲型面试件之间的耦合。检测过程中需要进行两次全聚焦成像,第一次成像采用耦合介质的声速进行计算,获得试件型面轮廓的图像,第二次成像基于轮廓信息采用费马最短时间原理计算式(9)中的时间项 $t_{ij}$ ,最终实现曲面结构件内部缺陷的成像。Malkin 等<sup>[42]</sup>系统分析了型面弯曲程度对全聚焦成像准确度的影响。时间项 $t_{ij}$ 的计算速度影响了自适应成像算法的实时性,根据前文全矩阵数据算法介绍可知,可利用纹理内存降低时间项 $t_{ij}$ 的实际计算数量,Zhang 等<sup>[43]</sup>系统分析了时间项网格尺寸对弯曲型面结构件全聚焦成像结果精度的影响,对纹理内存尺寸的设计提供了理论指导。

### 3 复杂组织材料的成像

Bai 等<sup>[21]</sup>利用全矩阵数据测量了声波群速度随传播方向的变化规律,利用式(11)给出的时间项对碳纤维层压板内部预埋的侧孔缺陷进行了全聚焦成像,分析了阵列孔径、滤波方式对缺陷成像信噪比的影响。Pain 等<sup>[44]</sup>在上述研究的基础上研究了纤维层压板内部纤维波纹度的评价方法。首先,综合全聚焦方法所得

幅值矩阵  $Abs(I)$  和相位矩阵  $Arg(I)$  图像,对试件内部可能存在的纤维波动进行识别;然后,对可能存在纤维波动的区域进行散射系数矩阵的测量,通过对比纤维完好区域散射系数矩阵的区别,实现纤维波纹度的评价。该方法最小可识别单层纤维的翘曲。Zhang 等<sup>[45]</sup>将全矩阵数据和贝叶斯蒙特卡洛优化方法相结合,实现了对各向异性焊缝区域内部各点处速度场的反演,校正了缺陷成像的定位误差。Fan 等<sup>[46]</sup>利用一种称为 MINA 的模型对层状各向异性焊缝区域进行理论建模,以全矩阵数据为原始资料,通过模拟退火算法进行全局优化,实现了焊缝内部晶粒大小、旋向等材料特征的反演成像,同样实现了缺陷定位误差的校正。

### 4 特殊结构换能器的应用

除了线性阵列换能器,全矩阵数据算法还可以应用于矩阵、环阵等特殊结构的阵列超声换能器。Lane 等<sup>[47]</sup>利用矩阵换能器对航空各向异性结构件内部缺陷进行全聚焦成像,在不移动换能器的前提下便可实现对内部缺陷的三维立体成像。周正干等<sup>[48]</sup>利用环形阵列超声换能器对钛合金增材制造试件内部缺陷进行全聚焦成像。与采用线阵和矩阵换能器不同,环阵换能器只能实现沿深度轴( $z$ )方向的一维全聚焦成像,相当于采用具有无穷多个聚焦点的常规单通道超声换能器,需要借助

机械扫查装置实现被测试件的完全检测。图7环阵换能器全聚焦检测结果的二维平面和三维立体图像,从三维立体图像中可同时观测到缺陷的深度和形状信息,无需借助任何C扫描电子闸门,提升了阵列超声检测结果的直观性。

## 结论

全矩阵数据包含了丰富完整的阵列超声回波信息,可用于实现试件内部缺陷的高精度成像和定量表征,解决常规阵列超声检测技术难以解决的难题,特别是在小于0.5个波长的裂纹定量表征、各向异性材料检测、复杂曲面结构件自适应检测等方面。为了充分发挥全矩阵数据算法的优势,需构建具有快速高效的仿真工具,高IO吞吐量的采集单元以及庞大规模的理论散射系数矩阵数据库的检测与评价系统。与常规相控阵超声检测系统相比,由于高IO吞吐阵列超声控制硬件单元以及用于全矩阵数据并行加速的高性能GPU价格较为昂贵,全矩阵数据阵列超声检测系统成本较高,目前仍主要处于实验室研究阶段,缺乏符合工业要求的检测与评价工艺规范。

为了促进该技术的实际应用,后续的研究工作应重点针对航空航天等高端制造领域的难检测结构件展开,解决现有无损检测与评价方法无法克服的检测难题。除此之外,还应

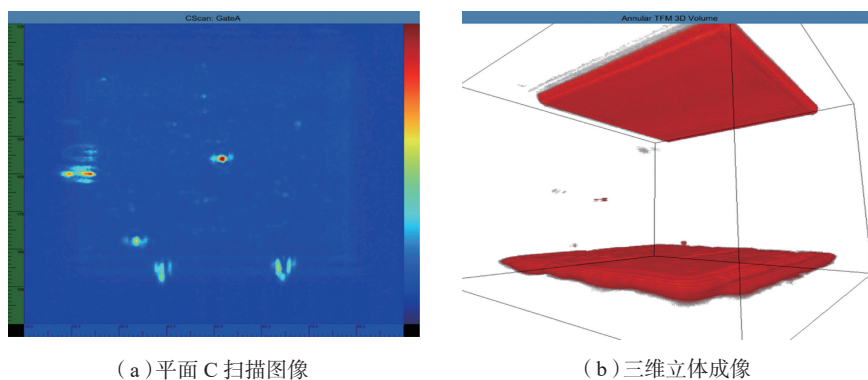


图7 增材制造钛合金环阵全聚焦检测结果

Fig.7 Testing results of additive manufacturing titanium alloy specimen with TFM of annular array

进一步降低高 IO 吞吐量采集单元的设计制造成本,结合云计算等途径构建理论散射系数矩阵的共享数据库,降低基于全矩阵数据的阵列超声无损检测与评价技术的使用门槛。

### 参考文献

- [1] YANG P, CHEN B, SHI K R. A novel method to design sparse linear arrays for ultrasonic phased array[J]. *Ultrasonics*, 2006, 44: 717–721.
- [2] CHATILLON S, CATTIAUX G, SERRE M, et al. Ultrasonic non-destructive testing of pieces of complex geometry with a flexible array transducer[J]. *Ultrasonics*, 2000, 38: 131–134.
- [3] PUEL B, LESSELIER D, CHATILLON S, et al. Optimization of ultrasonic arrays design and setting using a differential evolution[J]. *NDT&E International*, 2011, 44: 797–803.
- [4] 杨平华, 林莉, 刘春伟, 等. 相控阵声束焦距及换能器孔径综合优化的实验研究[J]. *无损探伤*, 2011, 35(3): 9–13.
- YANG Pinghua, LIN Li, LIU Chunwei, et al. Experimental study on the integrated optimization of focus length and transducer aperture for phased array beam[J]. *Nondestructive Inspection*, 2011, 35(3): 9–13.
- [5] 陈彦宏. 超声相控阵动态聚焦技术[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- CHEN Yanhong. The research on ultrasonic phased array dynamic focusing technology[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [6] 徐娜, 周正干, 刘卫平, 等. L型构件R区的超声相控阵检测方法[J]. *航空学报*, 2013, 34(2): 419–425.
- XU Na, ZHOU Zhenggan, LIU Weiping, et al. Ultrasonic phased array inspection method for the corner of L-shaped components[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(2): 419–425.
- [7] HOLMES C, DRINKWATER B W, WILCOX P D. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for nondestructive evaluation[J]. *NDT & E International*, 2005, 38(8): 701–711.
- [8] FAN Z, MARK A F, LOWE M J S, et al. Noninvasive estimation of anisotropic stiffness maps of heterogeneous steel welds for the improvement of ultrasonic array inspection[J]. *IEEE Transaction on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 2015, 62(8): 1530–1543.
- [9] NJIKI M, ELOUARDI A, BOUAZIZ S, ET AL. A real-time implementation of the total focusing method for rapid and precise diagnostic in non destructive evaluation[C]// *Proceedings of IEEE 24th International Conference on Application-Specific Systems, Architectures and Processors (ASAP)*. Washington DC: 2013.
- [10] CHAHBAZ A, SICARD R. Comparative evaluation between ultrasonic phased array and synthetic aperture focusing techniques[C]// *AIP Conference Proceedings*. Konigstein: AIP Publishing, 2003.
- [11] HOLMES C, DRINKWATER B W, WILCOX P D. The post-processing of ultrasonic array data using the total focusing method[J]. *Ultrasonics*, 2004, 46(11): 677–680.
- [12] SCHMERR Jr L W. Fundamentals of ultrasonic phased arrays[M]. New York: Springer, 2015.
- [13] ZHANG J, DRINKWATER B W, WILCOX P D. Comparison of ultrasonic array imaging algorithms for non-destructive evaluation[J]. *IEEE Transaction on Ultrasonics and Frequency Control*, 2013, 60(8): 1732–1745.
- [14] ZHANG J, NIXON A, BARBER T, et al. Methodologies for validating ray-based forward model using finite element method in ultrasonic array data simulation[C]// *AIP Conference Proceedings*. Provo: AIP Publishing, 2018.
- [15] CLAY A C, WOOH S C, AZAR L, et al. Experimental study of phased array beam steering characteristics[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 1999, 18(2): 59–71.
- [16] ZHANG J, DRINKWATER B W, WILCOX P D. Efficient computation of delay law for imaging structure with a complex surface[C]// *Proceedings of IEEE International Ultrasonics Symposium*. Prague: IEEE, 2014.
- [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.
- [18] WILCOX P D, HOLMES C, DRINKWATER B W. Advanced reflector characterization with ultrasonic phased arrays in NDE applications[J]. *IEEE Transaction on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 2007, 54(8): 1541–1550.
- [19] WILCOX P D, HOLMES C, DRINKWATER B W, et al. Enhanced defect detection and characterisation by signal processing of ultrasonic array data[C]// *ECNDT Proceedings*. Berlin, 2006.
- [20] LI C, PAIN D, WILCOX P D, et al. Imaging composite material using ultrasonic arrays[J]. *NDT & E International*, 2013, 53: 8–17.
- [21] YAN D, SUTCLIFFE M, WRIGHT B, et al. Ultrasonic imaging of full matrix capture acquired data for carbon fiber-reinforced polymer[J]. *Insight*, 2013, 55(9): 477–481.
- [22] BAI L, VELICHKO A, DRINKWATER B W. Ultrasonic characterization of crack-like defects using scattering matrix similarity metrics[J]. *IEEE Transaction on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 2015, 62(3): 545–559.
- [23] ZHANG J, DRINKWATER B W, WILCOX P D. Efficient immersion imaging of components with nonplanar surfaces[J]. *IEEE Transaction on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 2014, 61(8): 1284–1295.
- [24] ZHANG J, DRINKWATER B W, WILCOX P D, et al. Defect detection using ultrasonic arrays: the multi-mode total focusing method[J]. *NDT & E International*, 2010, 43(2): 123–133.
- [25] 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]// *AIP Conference Proceedings*. Atlanta: AIP Publishing, 2017.
- [26] 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 Ferroelectrics and Frequency Control*, 2008, 55(11): 2450–2462.
- [27] VELICHKO A, WILCOX P D. Reversible back-propagation imaging algorithm for post processing of ultrasonic array data[J]. *IEEE Transaction on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 2009, 56(11): 2492–2503.
- [28] POTTER J N, CROXFORD A J, WILCOX P D. Nonlinear ultrasonic phased array imaging[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(14): 144301–1–144301–5.
- [29] GRACE O D, PITI S P. Quadrature sampling of high-frequency waveforms[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1968, 44(5): 1453–1454.
- [30] 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, 54(10): 1–6.
- 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, 54(10): 1–6.
- [31] 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.
- [32] ZHANG J, DRINKWATER B W, WILCOX P D. Defect characterization using an ultrasonic array to measure the scattering coefficient matrix[J]. *IEEE Transaction on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 2008, 55(10): 2254-2265.
- [33] ZHANG J, FELICE M, VELICHKO A, et al. Investigation into angular and frequency dependence of scattering matrices of elastodynamic scatterers[C]//AIP Conference Proceedings. Minneapolis: AIP Publishing, 2016.
- [34] 徐娜, 李洋, 周正干, 等. FDTD方法的改进及在超声波声场计算中的应用[J]. *北京航空航天大学学报*, 2013, 39(1): 78-82.
- XU Na, LI Yang, ZHOU Zhenggan, et al. Improvement of finite difference time domain method and its application to calculation of ultrasonic sound fields[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2013, 39(1): 78-82.
- [35] MORTON K W, MAYERS D F. 偏微分方程数值解[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006.
- MORTON K W, MAYERS D F. Numerical solutions of partial differential equations[M]. Beijing: Post & Telecom Press, 2006.
- [36] LAMBERT J, PEDRON A, GENS G, et al. Performance evaluation of total focusing method on GPP and GPU[C]//Proceedings of the 2012 Conference on Design and Architectures for Signal and Image Processing. Karlsruhe: IEEE, 2012.
- [37] SUTCLIFFE M, WESTON M, DUTTON B, et al. Real-time full matrix capture for ultrasonic non-destructive testing with acceleration of post-processing through graphic hardware[J]. *NDT & E International*, 2012, 51: 16-23.
- [38] PENG C, BAI L, ZHANG J, et al. The sizing of small surface-breaking fatigue cracks using ultrasonic arrays[J]. *NDT & E International*, 2018, 99: 64-71.
- [39] LI Y, ZHOU Z G, WANG J. Analysis of linear non-destructive testing and evaluation methods for thin-walled structure inspection using ultrasonic array[J]. *Coatings*, 2019, 9(2): 146.
- [40] HUNTER A J, DRINKWATER B W, WILCOX P D. A model-based autofocus algorithm for ultrasonic imaging using a flexible array[J]. *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2010, 29: 863-870.
- [41] HUNTER A J, DRINKWATER B W, WILCOX P D. Least-squares estimation of imaging parameters for an ultrasonic array using known geometric image features[J]. *IEEE Transaction on Ultrasonics, and Frequency Control, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2011, 58(2): 414-426.
- [42] MALKIN R E, FRANKLIN A C, Bevan R L T, et al. Surface reconstruction accuracy using ultrasonic arrays: application to non-destructive testing[J]. *NDT & E International*, 2018, 96: 26-34.
- [43] DRINKWATER B W, BOWLER A I. Ultrasonic array inspection of the Clifton suspension bridge chain-links[J]. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2009, 51(9): 491-498.
- [44] PAIN D, DRINKWATER B W. Detection of fiberwaviness using ultrasonic array scattering data[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2013, 32(3): 215-227.
- [45] ZHANG J, HUNTER A, DRINKWATER B W, et al. Monte Carlo inversion of ultrasonic array data to map anisotropic weld properties[J]. *IEEE Transaction on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 2012, 59(11): 2487-2497.
- [46] PAMEL VAN A, HUTHWAITE P, BRETT C R, et al. Numerical simulations of ultrasonic array imaging of highly scattering materials[J]. *NDT & E International*, 2016, 81: 9-19.
- [47] LANE C J L, DUNHILL A K, DRINKWATER B W, et al. The development of a 2d ultrasonic array system for the in situ inspection of single crystal turbine blades[C]//AIP Conference Proceedings. Burlington: AIP Publishing, 2012.
- [48] ZHOU Z, LI W, LI Y, et al. Research on ultrasonic array testing method for additive-manufactured titanium alloy[C]//Proceedings of SHM-NDT. Saarbrücken: 2018.

通讯作者: 周正干, 教授、博士生导师, 研究方向为超声检测技术, E-mail: zzhenggan@buaa.edu.cn。

## Array Ultrasound Nondestructive Testing and Evaluation Using Full Matrix: A Review

LI Yang<sup>1</sup>, ZHOU Zhenggan<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. The Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-Engine, Beijing 100083, China)

**[ABSTRACT]** Full matrix is an A-Scan data set of all transmit and receive elements' combinations. Array ultrasound nondestructive testing and evaluation technology based on full matrix uses specific post-processing algorithm to image and quantify defects inside the test pieces. Compared with traditional phased array methods, algorithms based on full matrix have much higher imaging resolution and quantitative accuracy. On the other hands, full matrix algorithms can be customized according to geometrical or material properties of testing pieces. It's the next generation ultrasonic array testing and evaluation method. This paper systematically summarizes the fundamental, typical algorithms, key technologies, and applications of ultrasonic array technology based on the FMC, aiming to promote the technology and lower the application threshold, and to provide new ideas and new methods for the challenge of non-destructive testing and evaluation in high-end manufacturing industry.

**Keywords:** Ultrasonic array; Nondestructive testing and evaluation; Full matrix; Total focusing method; GPU acceleration

(责编 海山)