

激光与光电子学进展

超声扫查横波成像的波数域快速重建技术

陈沐, 金浩然*, 杨克己, 居冰峰

浙江大学机械工程学院, 浙江 杭州 310027

摘要 超声无损检测为航空航天、石油化工、轨道交通等领域的设备正常运行提供保障, 具有十分重要的意义。横波超声检测因其振动模式衰减小、传播速度低、空间分辨率高等优势成为固体内部缺陷检测的重要手段。然而, 常规的超声换能器因压电晶片的振动特性, 无法直接发射和接收横波, 需要借助斜入射折射出横波。由于斜入射的特殊性, 需要同时考虑折射效应和斜面检测的问题, 这给超声成像重建计算增加了负担。为此, 提出一种超声扫查横波成像的波数域快速重建技术。该方法在传统波数域超声图像重建技术的基础上, 结合波数域坐标变换以及横波波场外推实现斜入射横波成像的快速重建。仿真和实验结果表明, 利用本文方法, 在以 20° ~ 60° 左右的折射角检测横通孔、裂纹和半球面平底孔时, 均能展现优良的检测效果。并且相较于时域合成孔径聚焦技术, 在不损失重建精度的条件下, 该方法的计算效率至少提高 100 倍。

关键词 仪器, 测量与计量; 超声无损检测; 斜入射; 横波; 小型孔; 多角度

中图分类号 O426

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP223109

Wavenumber-Domain Fast Reconstruction Technique Using Ultrasonic Scanning for Transverse Wave Imaging

Chen Mu, Jin Haoran*, Yang Keji, Ju Bingfeng

School of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China

Abstract Ultrasonic nondestructive testing is of great significance to ensure the working of equipment in aerospace, petrochemical, railway, and other fields. Transverse wave ultrasonic testing is an important method for the detection of internal defects in solids due to its advantages of weak attenuation of vibration mode, low sound speed, and high spatial resolution. However, due to the vibration characteristics of piezoelectric wafers, conventional ultrasonic transducers cannot directly transmit and receive transverse waves and need to refract the transverse waves with the help of oblique incidence, and due to the particularity of oblique incidence, it is necessary to consider the refraction effect and slope detection simultaneously, which increases the burden of ultrasonic imaging reconstruction calculation. Therefore, a wavenumber-domain fast reconstruction technique using ultrasonic scanning for transverse waves is proposed. The method is built based on classical synthetic aperture focusing technology (SAFT) by integrating the coordinate transformation in wavenumber domain and transverse wave wavefield extrapolation for the application of oblique incidence transverse wave imaging. The simulation and experimental results show that the proposed method can build excellent detection results when detecting transverse holes, cracks, and hemispherical flat-bottom holes with refraction angles from 20° to 60° . Compared with the time-domain synthetic aperture focusing technique, the computational efficiency of this method is improved by at least 100 times without losing the reconstruction accuracy.

Key words instruments, measurement, and metrology; ultrasonic nondestructive testing; oblique incidence; transverse wave; small hole; multi angle

1 引言

快速超声无损检测在工业领域应用广泛, 包括铁路探伤、汽车制造、航空航天等设备的检修与在线监测。与射线、红外、涡流、磁粉等检测手段相比, 超声以

其无辐射, 且对高温、导电、导磁等材料检测适用性强的特性, 在固体和液体介质等检测领域, 具有难以取代的优势。超声检测设备价格相对较低、灵活便携、操作简单, 可以有效地应用于恶劣环境下现场的实时监测, 便于集成到自动化扫查系统中, 以减少人工长时间观

收稿日期: 2022-11-21; 修回日期: 2022-12-25; 录用日期: 2022-12-27; 网络首发日期: 2023-01-06

通信作者: *Jinhr@zju.edu.cn

测的负担。体波在超声检测中较为常用,基于体波的检测手段适用于介质内部的缺陷无损探伤。常用的体波包括纵波和横波,纵波沿着声波传播方向振动,横波则垂直于传播方向振动。在固体中,横波的声速要低于纵波,因而波长较短,相比于纵波具有更高的空间分辨率。横波通常采用探头斜入射的方式产生,并且对于垂直入射被遮挡的情况,斜入射同样具备重要价值。尽管横波分辨率很高,但受到声波衍射效应的作用,原始数据所直接获得的 B 扫等超声图像的分辨率受到限制^[1-2],不能有效展现内部缺陷的尺寸和形状,所以研究人员采用合成孔径聚焦(SAFT)^[3]的方法对缺陷图像进行重建。

合成孔径聚焦重建^[4-5]可以分为时域和频域方法^[6],时域方法计算原理简单易于实现,是目前较为常用的重建手段。该方法基于射线理论,将超声传播路径简化为直线,利用延时叠加原理(DAS)计算探头到缺陷的往返声波路径,在单一介质下具有不错的计算精度^[7]和效率。但是,当面对的介质具有分层特征^[8]时,声波在分层界面上发生折射,声学路径不再是单一的直线,需要借助费马原理找到声程最短的折射点,从而计算折射的声程,耗费大量计算时间。并且,时域方法在对通孔等类型的缺陷成像时经常会出现变形、拖长等问题,无法正确显示缺陷形状。

频域合成孔径算法在叠层介质中的成像相比于时域方法更为高效,它可以适用于具有复杂声学性质的构件^[9-10],对单叠层都具备速度快、精度高、节省计算资源等优势。1978年Gazdag等^[11]为了解决地层成像的问题,提出了基于相位迁移变换(PSM)的频域合成孔径方法,该方法可以将声场频谱从初始深度外推到任意深度,在应对叠层介质的波场外推时相较于时域方法而言,不需要知道每一层的波场折射点的位置,只需将波场外推至该介质的上表面,而介质内部的每一层波场外推则和单层的外推一致。1978年Stolt等^[12]采用映射的方法对所有深度的波场整体一次性成像,该方法大幅提高速度,但映射不均匀,可能在插值过程中引入伪影和误差。1984年Gazdag等^[13]又提出相移加内插(PSPI)的方法,这与1990年Stoffa等^[14]提出的裂步傅里叶变换(SSF)方法类似,将PSM的傅里叶变换拆分成两步,分别用参考速度计算和误差补偿,可以近似解决曲面或斜入射条件下的频域成像。该方法虽然可以近似斜入射成像,但是对于介质声速差距或者倾斜角度过大时计算误差较大,且大幅牺牲了计算速度。2000年之后,地层成像方法逐渐推广到超声无损检测,由于其成像的精度和效率的优势被广泛应用到实时成像中。2007年Stepinski^[15]对超声频域合成孔径成像进行研究,并分析了探头的远场模型和孔径长度,介绍了孔径长度的计算方法。2008年Schleicher等^[16]对超声检测的频域成像条件进行研究,分析了散射点声

压与成像的关系。相应的水浸条件下的相位迁移频域算法在2010年由Olofsson^[17]提出,对叠层介质具有广泛的适用性。2011年,Skjelvareid等^[18]提出 $\omega-k$ 的方法将Stolt变换与PSM结合起来解决少量层数下的快速成像,该方法可以对叠层构件实时成像,但这些方法并未解决斜入射问题。2007年Huang等^[19]将裂步傅里叶变换应用到对非平面构件的脉冲超声无损检测,而在2013年Li^[20]和2014、2016年Lukomski等^[21-22]将SSF和PSPI的方法应用到斜入射等非规则界面的超声成像检测,但并没有解决大角度倾斜下的成像精度和效率问题,难以适用于横波缺陷检测。2021年Yu等^[23]提出坐标变换的斜入射方法,将PSM扩展到斜入射,该方法有效解决了通孔缺陷成像变形等问题,也避开了费马原理计算折射点的问题,有效缩短了计算复杂度。尽管该方法对比SSF、PSPI等方法,提高了大角度斜入射的计算精度和效率,但是不适用于长距离、大范围的耦合设置和深层缺陷的检测。目前,现有算法大多适用于纵波,对大范围斜入射扫查的高精度、高效率超声横波成像重建仍然缺乏良策。

为了解决上述问题,本文结合频域相位迁移与坐标变换等方法,利用斜入射折射出的横波检测固体试件内的缺陷。该方法使用坐标变换和高频率横波成像提高斜入射成像精度,而频域相位迁移与传统时域相比,大幅提高成像速度并达到快速成像的要求。在成像的过程中,通过坐标变换方法将波场由原始斜入射位置外推至平行介质上表面,在新的平行坐标系下计算叠层的波场外推及相位迁移。在固体试件中,代入横波相应的声速,通过波场的层层外推,对缺陷进行成像。仿真和实验结果表明,本文提出的横波斜入射算法具备效率和空间分辨率上的优势,并且当折射角适中例如 45° 时,兼具抑制伪像和提高横纵向空间分辨率的能力。实验中,在面对 10000×600 个数值的检测数据,并完成一幅 300×600 个像素点的图像时,仅需0.7 s的时间,而传统时域算法需要65 s。

2 基本原理

2.1 频域波场外推

频域的合成孔径方法^[24-25]是基于波场外推技术的,根据均匀介质空间无源声学波动方程,对于空间中某一点,声压随时间的变化关系为

$$\nabla^2 p(x, z, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p(x, z, t)}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

式中: $p(x, z, t)$ 代表声波的压力; x, z, t 分别代表水平方向和深度方向的空间坐标以及声波传播的时间。将上述方程左右两边同时对 x, t 做傅里叶变换,其中声压 $p(x, t)$ 关于波数 k_x 和角频率 ω 的傅里叶变换记为 $p(k_x, z, \omega)$,得出如下关系式:

$$\int_{k_x, \omega} \left[\left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} + k_z^2 \right) p(k_x, z, \omega) \right] \exp(ik_x x - i\omega t) dk_x d\omega = 0. \quad (2)$$

求解式(2),由于积分项 $\exp(ik_x x - i\omega t)$ 不为 0,为了满足对 k_x, ω 的积分恒为 0,其余项必须恒为 0,因此得到下式:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} + k_z^2 \right) p(k_x, z, \omega) = 0, \quad (3)$$

该式又叫亥姆霍兹方程,为声学波动方程的频域形式。求解该方程可得:

$$p(k_x, z, \omega) = A_1(k_x, \omega) \exp(ik_z z) + A_2(k_x, \omega) \cdot \exp(-ik_z z), \quad (4)$$

式中, $A_1(k_x, \omega) \exp(ik_z z)$ 和 $A_2(k_x, \omega) \exp(-ik_z z)$ 分别代表沿 z 轴负向和沿 z 轴正向传播的声场。实际使用中通常将探头扫查平面放置在 $z=0$ 的位置,将扫查的感兴趣区域设置在 $z>0$ 处。只有向探头方向传来的声场也即沿 z 轴负向传播的声场会被超声探头接收到,因此代表 z 轴正向传播的项可以排除,得到下式:

$$p(k_x, z, \omega) = A_1(k_x, \omega) \exp(ik_z z), \quad (5)$$

式中: z 代表正半平面的任意深度位置; k_z 由色散关系求得:

$$k_z = -\text{sign}(\omega) \sqrt{\frac{\omega^2}{c} - k_x^2}, \quad \text{with } \frac{\omega^2}{c} - k_x^2 \geq 0, \quad (6)$$

式中:函数 $-\text{sign}$ 表示波场外推的方向 k_z 与波传播的方向 ω 相反; $\omega^2/c - k_x^2 \geq 0$ 代表成像所使用的传播波分量,此时 k_z 取实数。当式(6)右侧根号下的差小于 0 时,波数 k_z 为复数,代表倏逝波,该类型波对距离以指数形式衰减,不具备远场成像的可能。如果强行在波场外推中加入倏逝波分量,会引入大量噪声,因此在计算中需要排除。

将正半平面的两个位置 z_1, z_2 代入式(5),并将两个等式左右两边各自相除,得到:

$$\frac{p(k_x, z_1, \omega)}{p(k_x, z_2, \omega)} = \exp[ik_z(z_1 - z_2)]. \quad (7)$$

需要说明的是,当 $A_1(k_x, \omega) = 0$ 时,则 $p(k_x, z_1, \omega) = 0$,式(7)即为波场外推。由于超声探头的扫查平面设置在 $z=0$ 处,即接收到的声压信号 $p(x, z=0, t)$ 经傅里叶变换后可得 $p(k_x, 0, \omega)$,任意深度 z 的波场 $p(k_x, z, \omega)$ 可由 $z=0$ 频域外推得到:

$$p(k_x, z, \omega) = p(k_x, 0, \omega) \exp(ik_z z). \quad (8)$$

经外推后的波场 $p(k_x, z, \omega)$ 可以通过对 k_x 和 ω 分别做傅里叶逆变换,得出该深度在任意时刻的声压:

$$p(x, z, t) = \int_{k_x, \omega} p(k_x, 0, \omega) \exp(ik_z z) \cdot \exp(ik_x x - i\omega t) dk_x d\omega. \quad (9)$$

对于多层介质,声速沿深度方向变化,相位因子 $\exp(ik_z z)$ 需要根据实际声速修改。并且当声波穿过

层与层之间的界面时,声波的折射与反射满足复杂的函数关系,需要耗费大量的计算时间。然而在频域外推中,折射的声束角和声波幅值满足一定关系,波场穿过界面可以近似为成正比关系^[17]。

建立典型的多层介质波场外推模型,如图 1 所示,声速在层内保持不变,而在层与层之间发生变化。设定层数为 $l=1, 2, 3, \dots, L$,每层介质的声速和厚度分别为 c_l 和 d_l 。在界面 $z=z_l$ 发生的波场外推满足如下的成正比关系:

$$p(k_x, z_l^+, \omega) \propto p(k_x, z_l^-, \omega), \quad (10)$$

式中, $p(k_x, z_l^+, \omega)$ 和 $p(k_x, z_l^-, \omega)$ 分别表示界面以下和界面以上的边界波场。在同一介质中波场可以由 $p(k_x, z_l^+, \omega)$ 推出:

$$p(k_x, z, \omega) = p(k_x, z_l^+, \omega) \exp[ik_z(z - z_{l-1})]. \quad (11)$$

采用这样的方式处理其他的介质层,在任意层 l 的任意深度 z 的波场可以表示为

$$p(k_x, z, \omega) \propto p(k_x, z=0, \omega) \cdot \exp[ik_z(z - z_{m-1})] \exp\left(\sum_{m=1}^{l-1} ik_{z,m} d_m\right). \quad (12)$$

由于本文只关心相位信息和每一层图像的相对幅值以便确定缺陷位置,所以对于重建过程中穿过界面所带来的成正比系数,通常将其忽略,减少计算负担^[17]。

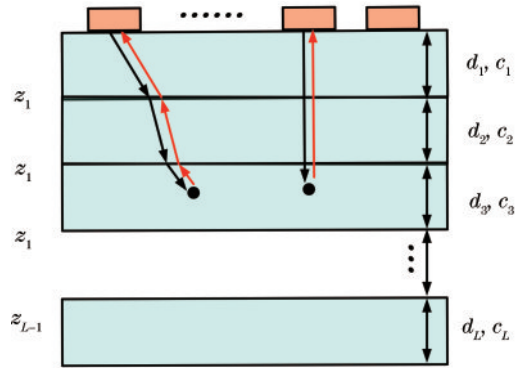


图 1 多层介质结构声速及厚度模型

Fig. 1 Sound speed and thickness model of multilayer dielectric structures

2.2 爆炸反射模型

上述波场外推能够简化分层介质下声波的单向声程传播,然而对于超声无损检测需要考虑收发双程传播,为简化双程的波场推演计算,这里引入爆炸反射模型(ERM)。对于收发双程传播下的任意散射点,声束经过前向和后向两次路径如图 1 所示。如果令传播介质的声速为真实值的一半,那么可以将传播过程等效为像素点自主爆炸发射超声波并被超声换能器所接收^[26]。ERM 下的声波相位信息与自发自收下一致,波形在时间轴上是等效的,如图 2(a)所示。在 ERM 中,设定所有散射点的声波均从 $t=0$ 时刻“爆炸”,它们的强度均正比于点的反射系数,这些点产生的声场同时发射,一起被超声换能器接收,如图 2(b)所示。该模

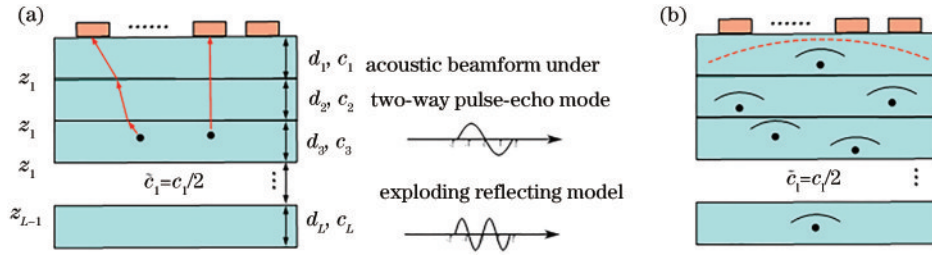


图 2 ERM 的原理。(a) ERM 的等效声束路径图；(b) 多点同时发射、幅值正比反射系数及声场合成所有探头同时接收
Fig. 2 Principle of exploding reflecting model (ERM). (a) Equivalent route path for ERM; (b) scenes of multi-points exciting waves together, amplitude proportional reflection coefficient, and sound field synthesis and all probes receiving simultaneously

型忽略了多层情况下层与层之间的反射,只接收上行返回探头的声场。如果将超声换能器虚拟地放置到某一点的位置,则 $t=0$ 时刻接收到的这一列声波信号即为该位置合成聚焦的、未发生衍射的超声图像,该时刻又被称为成像条件。

2.3 相位迁移推演^[25]

借助于 ERM,双向收发过程可以等效为所有散射点自主同时发射的单向传播过程。将探头平面放置在 $z=0$ 处,探头沿 x 轴排列,任意成像深度散射点的波场均可以从换能器接收平面波场外推得到。将 ERM 下的介质声速记为 $\hat{c}=c/2$,此时的色散关系修改为

$$k_z = -\text{sign}(\omega) \sqrt{\frac{\omega^2}{\hat{c}^2} - k_x^2}, \quad \text{with } \frac{\omega^2}{\hat{c}^2} - k_x^2 \geq 0. \quad (13)$$

根据 ERM 下 $t=0$ 的成像条件,其中 $p(x, z)$ 为散射点初始时刻声压分布,也即对缺陷的成像图。将 $t=0$ 代入式(9),对 ω 的傅里叶逆变换可以简化为积分:

$$p(x, z) = \int_{\omega, k_x} p(k_x, 0, \omega) \exp(ik_z z) \exp(ik_x x) d\omega dk_x. \quad (14)$$

对于矩形感兴趣区域,设定所成图像的深度方向步距为 Δz ,需要外推的深度步进为 z 个点,当前外推到第 N_z 个时,推导的波场外推相位因子记为

$\exp(ik_z N_z \Delta z)$,其中 k_z 满足色散关系式(13)。 $z=0$ 时初始波场由超声换能器扫描信号对 x, t 做离散傅里叶变换得到。所成图像的水平方向间距为 Δx (探头扫描运动的位移的间距),也是离散条件下的 x 轴采样间距。为了避免 x 轴采样的频谱混叠,通常在实际应用中满足关系式 $\Delta x \leq d_{\text{aper}}/4$ ^[27] 即可。

2.4 倾斜横波成像

ERM 下的波场外推与相位迁移成像只适用于平行叠层界面,而横波的激励或声束角度的改变通常采用倾斜入射,因此需要对斜入射进行补偿。考虑第一层倾斜的结构,如图 3 所示,这样的介质可以通过水或者楔块来实现。以原始倾斜换能器建立坐标系 Oxz ,以平行介质的上表面建立坐标系 $O'x'z'$,以新的坐标系完成波场外推。采集的声压借助图 3 中的三角关系,利用坐标变换非线性地外推到新坐标系:

$$\begin{cases} x' = x \\ z' = \frac{1}{2} d_{\text{aper}} x \sin \theta \\ \omega' = \omega \end{cases} \quad (15)$$

式中, d_{aper} 为超声换能器的孔径大小,只有深度方向 z 需要进行非线性变换。将式(15)代入原始坐标下的波场外推式(8),得到:

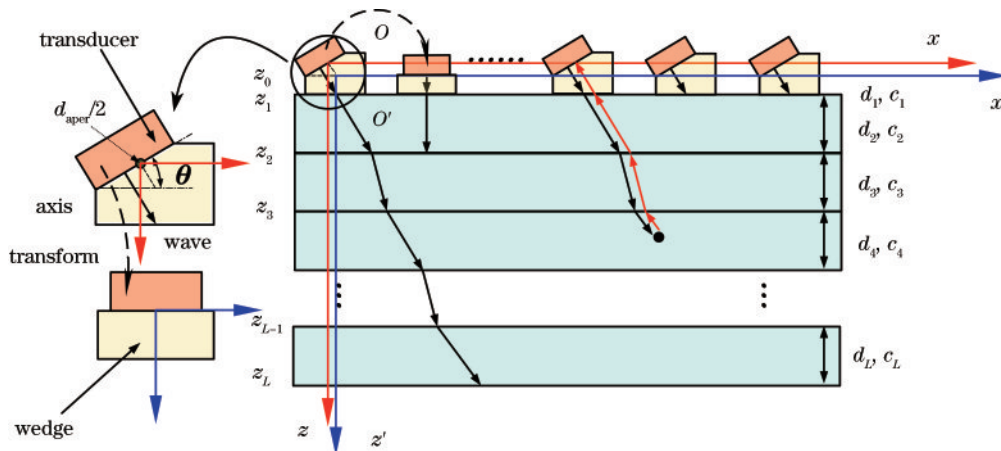


图 3 斜入射算法坐标变换及声束路径图
Fig. 3 Coordinate transformation and wave paths for oblique incidence algorithm

$$p(k'_x, z'=0, \omega') = p(k_x, z=0, \omega) \exp(ik'_x z'), \quad (16)$$

式中, $p(k'_x, z'=0, t)$ 为新坐标系的初始波场。将式(16)代入 $p(k'_x, z'=0, t)$ 的傅里叶逆变换形式, 求得深度 $z'=0$ 处的声压为

$$p(x', z'=0, t) = \int_{k'_x, \omega'} \frac{P(k'_x, z'=0, \omega')}{P(k_x, z=0, \omega) \exp(ik'_x z')} \cdot \exp(-i\omega t + ik'_x x) d\omega dk'_x, \quad (17)$$

该式可以整理为

$$p(x', z'=0, t) = \int_{k'_x, \omega'} [p(k_x, z=0, \omega) \exp(ik_x \cdot \frac{1}{2} d_{\text{aper}} x \sin \theta + ik'_x x) \exp(-i\omega t)] d\omega dk_x. \quad (18)$$

观察式(18), 可以将 $\exp[i(\frac{1}{2} d_{\text{aper}} x \sin \theta + k_x) x]$ 记为整体 $\exp(ik'_x x')$, 其中, k'_x 可以表示为

$$k'_x = k_x + \frac{1}{2} d_{\text{aper}} \sin \theta \cdot k_z = k_x - \frac{1}{2} d_{\text{aper}} \sin \theta \cdot \text{sign}(\omega) \sqrt{\omega^2/c^2 - k_x^2}, \quad (19)$$

将上述关系式改写为 k_x , 用 k'_x, ω, θ 参量表示为

$$k_x(k'_x, \omega, \theta) = \frac{1}{1 + (d_{\text{aper}} k_z \sin \theta/2)^2} \cdot \left\{ k'_x + d_{\text{aper}} k_z \sin \theta/2 \cdot \sqrt{[1 + (d_{\text{aper}} k_z \sin \theta/2)^2] \cdot \omega^2/c^2 - k_x'^2} \right\}. \quad (20)$$

将式(20)代入式(17), 整理可得

$$p(x', z'=0, t) = \int_{k'_x, \omega'} A(k'_x, \omega, \theta) p[k_x(k'_x, \omega, \theta), z=0, \omega] \exp(i\omega t + ik'_x x) d\omega dk'_x, \quad (21)$$

式中, $A(k'_x, \omega, \theta)$ 表示为

$$A(k'_x, \omega, \theta) = \frac{\partial k_x}{\partial k'_x} = \frac{1}{1 + (d_{\text{aper}} \sin \theta/2)^2} \cdot \left\{ 1 - \frac{d_{\text{aper}} \sin \theta/2 \cdot k'}{\sqrt{[1 + (d_{\text{aper}} \sin \theta/2)^2] \cdot \omega^2/c^2 - k_x'^2}} \right\}. \quad (22)$$

观察式(21), 可以将它视为新坐标系 $O'x'z'$ 下的虚拟换能器采集数据。在此基础上, 新坐标系适用传统的单多层成像, 并且坐标变换后原有的叠层结构在最上方增加一层耦合介质, 耦合层记为 z_0 。多层情况下在深度 z' 处的声压可以记为

$$p(x', z', t) = \int_{k'_x, \omega'} A(k'_x, \omega, \theta) p[k_x(k'_x, \omega, \theta), z=0, \omega] \exp(i\omega t + ik'_x x) \exp[ik'_z(z' - z'_{l-1})] \exp\left(\sum_{l=0}^{L-1} ik'_{z,l} d'_l\right) d\omega dk'_x. \quad (23)$$

2.5 实现细节

图 4 绘制了提出算法的流程图。图中包含流程所需要的渐进复杂度, 并用 $O(*)$ 表示。整体算法流程可以被分为 5 步。

1) 对接收的声波信号 $p(k_x, z=0, t)$ 关于 x, t 做傅里叶变换, 得到 $p(k_x, z=0, \omega)$ 。设定采集数据集的大小为 $N \times M$, N 代表超声信号的长度, M 代表信号个数。二维傅里叶变换带来的计算复杂度为 $O[MN \log_2(MN)]$ 。

2) 利用坐标变换将原始坐标系 Oxz 下的波场 $p(k_x, z=0, \omega)$ 迁移到新坐标系 $O'x'z'$ 下的 $p(k'_x, z'=0, \omega)$ 。该过程需要插值, 由式(16)表征, 其计算复杂度为 $O(MN)$ 。

3) 采用相位迁移成像的方法, 在深度方向上循环步进一段距离, 并计算波场 $p(k'_x, z', \omega)$, 该过程由式(8)、式(12)表征, 其计算复杂度为 $O(MN)$ 。对于多层结构, 在不同的深度分别代入不同的介质声速。

4) 每一个深度下的图像 $p(x', z')$ 均由波场 $p(k'_x, z', \omega)$ 对 k'_x 和 ω 分别做傅里叶逆变换和积分得到, 该过程由式(14)表征, 计算复杂度为 $O[MN \log_2(MN)]$ 。判断当前深度是否达到检测的最大深度, 如果没有, 重复第 3) 步, 直到满足要求 $z'=Z$ 。

5) 整合每个深度的图像, 结束计算。

值得注意的是, 在第 3) 步中的波场迁移是非线性的, 需要插值来补偿。因为超声换能器是带限信号, 所以从声压转换到波场之后做角频率截断, 可以滤除高频和低频噪声以提高图像的信噪比。与此同时, 需要处理的频域数据在截断后也得到缩减, 这会提高成像的信噪比。

3 仿真测试

为了验证提出算法的性能, 本文设计了斜入射超声检测仿真。扫查场景为水浸模式下对钢块中预设各种缺陷的检测。仿真基于 CIVA 平台(2020 版, 法国原子能协会)。试件的厚度设为 30 mm, 长宽均为 100 mm。试件的材质是钢, 其纵波声速为 5900 m/s, 横波声速为 3230 m/s。水的纵波声速设为 1483 m/s, 水中不产生横波。缺陷类型包括垂直排列的横通孔和裂纹, 以及半球面平底孔。横通孔有 4 个, 直径均为 2 mm, 纵向间距为 3 mm, 横通孔的中心距离表面深为 10 mm。裂纹同样设置 4 个, 每个裂纹均竖直排列, 其长度均为 2 mm, 相互间距为 3 mm, 最上方的裂纹中心距离表面为 10 mm。半球面平底孔设置为 3 个, 每个直径为 1 mm, 其距离表面的距离分别为 13、16、19 mm, 相互间距为 3 mm。原始扫查坐标系的原点设置在缺陷上方第一个探头位置的中心, x 坐标轴沿扫查方向, z 坐标轴沿深度方向。超声换能器的中心频率设置为 5 MHz, 直径为 6 mm, 探头的中心距离试件

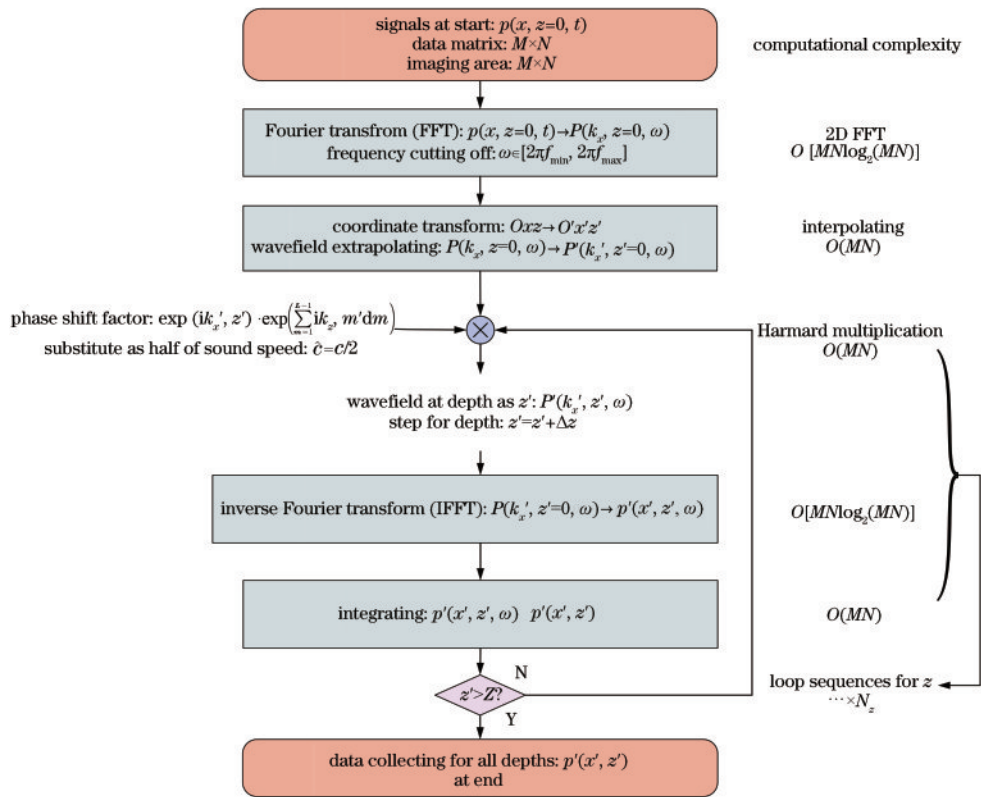


图 4 提出算法流程图及相应的计算复杂度

Fig. 4 Flow chart and relative computational complexity of proposed algorithm

上表面高 5 mm, 探头平面与水平面形成的夹角进行多组参数对照成像。检测范围及缺陷尺寸位置的标识如图 5 所示, 这里的检测范围只代表感兴趣区域的成像

边界, 不包含实际的试件边界。本文所用的水与钢块的纵波入射角及钢块中的纵横波折射角如表 1 所示, 用于满足仿真的各项要求。

表 1 不同角度入射的纵横波折射角

Table 1 Refractive angles of longitudinal and transverse waves at different incidence angles

Incidence angle / (°)	0	10.2	14.5	9	13.3	17.2	18.9	20.6	23.4	27.3
Refractive angle of longitudinal wave / (°)	0	45	First critical angle	0	0	—	—	—	—	—
Refractive angle of transverse wave / (°)	0	—	—	20	30	40	45	50	60	Second critical angle

纵波从水中斜入射, 在固体试件中折射出横波, 经由散射点反射, 沿相同路径返回。发射信号经由汉宁窗调制, 返回时采样频率为 100 MHz, 采样时长为 40.96 μs。扫描间距为 0.1 mm, 共采集 256 个位置, 采集数据导入 Matlab (2020a 版本, Mathworks) 进行合成孔径聚焦成像的后处理操作, 处理用计算机的相关配置包括 CPU 为 i5-10400F, 显卡为 NVIDIA GeForce GTX 1660s。原始数据矩阵的大小为 256 × 4096 个点。感兴趣区域设置在固体试件中, 水仅作为耦合叠层, 不考虑其成像。

设置两组角度对比: 斜入射角度分别为 10.24° 和 18.94°, 它们在钢块试件中分别折射出 45° 的纵波和横波, 分别检测横通孔 (SDH)、纵向裂纹 (crack)、半球面平底孔 (FBH)。CIVA 设置中, 在面对纵波与横波时, 分别设置只计算相应类型的波, 以便排除其他类型的

波的干扰。实验设置如图 5 所示, 图中每一行分别代表 SDH、crack 和 FBH, 每一列分别对应缺陷分布、纵波成像和横波成像。采用斜入射成像, 相同角度下, 横波的成像分辨率高于纵波, 主要体现在沿声束传播的方向。在 crack 成像中, 由于裂纹细小且相互间距离较近, 纵波无法区分多条裂纹之间的端点, 横波却可以通过图像区分端点, 并计算裂纹长度。对于 FBH, 横波检测的分辨率同样高于纵波。

为了探究折射角度对于横波检测的影响, 分别仿真了以 20°、30°、40°、50° 和 60° 折射到金属试件的横波对于垂直排列的 SDH 的检测。CIVA 仿真时如果有纵波斜入射到试件中, 设置自动排除纵波。缺陷设计和成像结果如图 6 所示。

随着角度从 30° 至 60° 逐渐变大, 垂直于入射横波方向分辨率逐渐提高, 但是相应的伪影也逐渐变大,

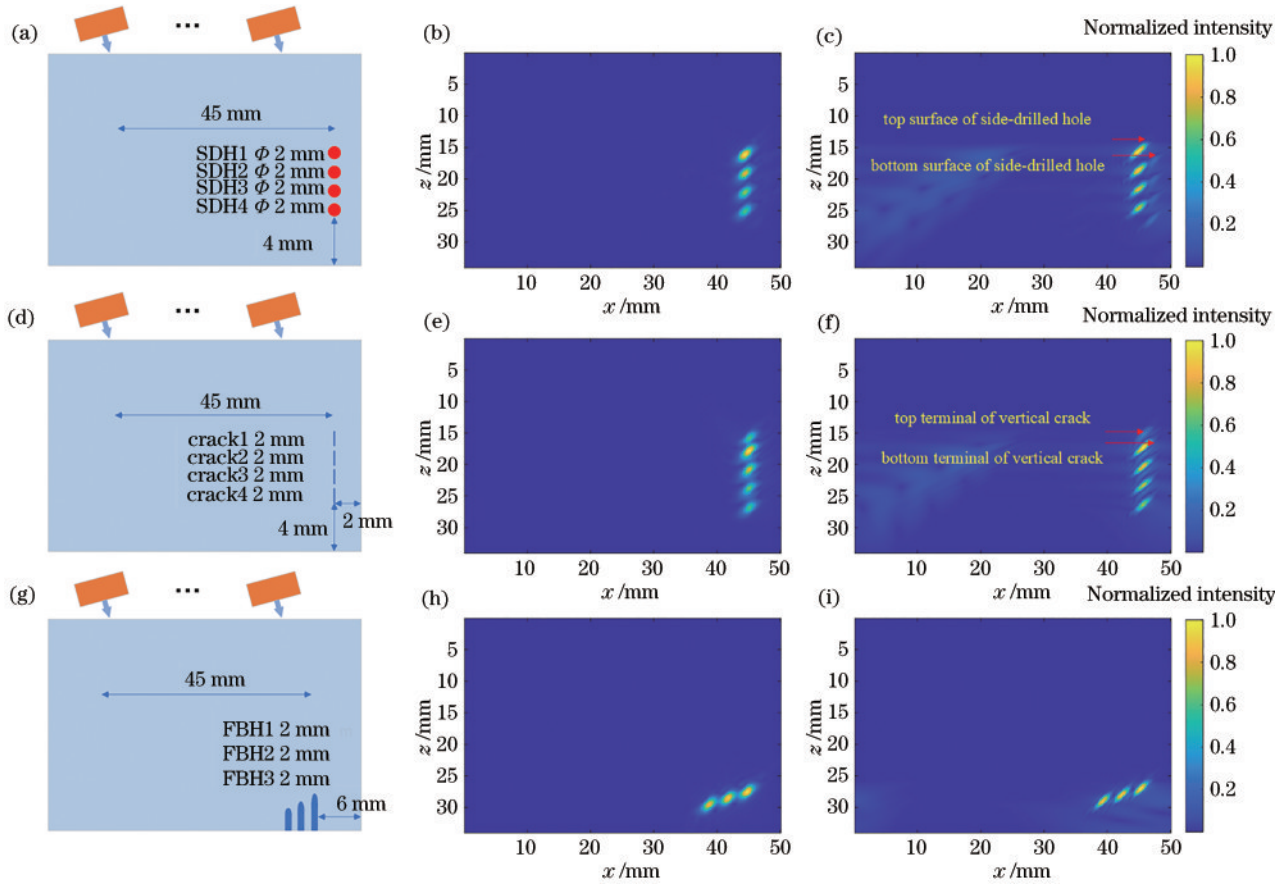


图 5 相同折射角 45° 下的横纵波成像对比。(a)、(d)、(g) 分别代表 SDH、crack、FBH 的试件设置图；(b)、(e)、(h) 分别代表 SDH、crack、FBH 的纵波成像图；(c)、(f)、(i) 分别代表 SDH、crack、FBH 的横波成像图

Fig. 5 Comparison of imaging for longitudinal and transverse waves at same refraction angle of 45° . (a), (d), (g) Respectively represent test specimen setups for side-drilled holes (SDHs), vertical cracks (cracks), and semi-spherical flat-bottomed holes (FBHs); (b), (e), (h) respectively represent images for longitudinal wave upon SDHs, cracks, and FBHs; (c), (f), (i) respectively represent images for transverse wave upon SDHs, cracks, and FBHs

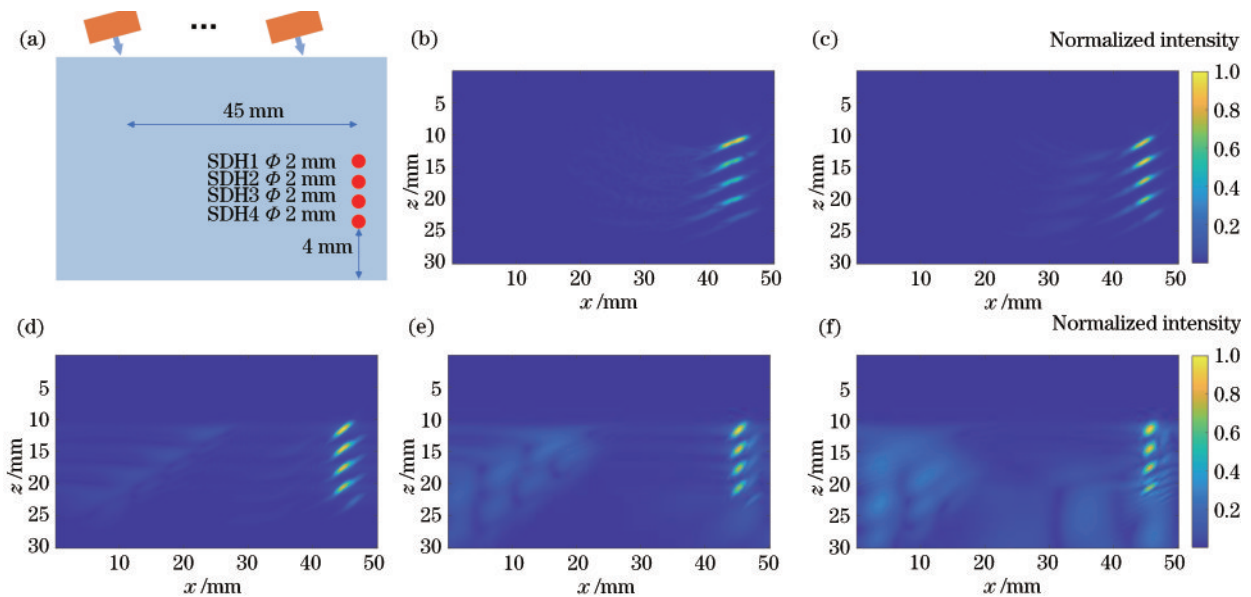


图 6 多角度横波垂直 SDH 成像图。(a) 多角度横波垂直 SDH 试件图；(b) 20° 、(c) 30° 、(d) 40° 、(e) 50° 、(f) 60° 折射下的垂直 SDH 成像图
Fig. 6 Multi-angle transverse wave imaging for vertical SDHs; (a) Test specimen setup for multi-angle transverse wave vertical SDHs; vertical SDHs imaging with refraction angles of (b) 20° , (c) 30° , (d) 40° , (e) 50° , and (f) 60° , respectively

当角度为 20°时,对 SDH 的成像出现了较大的伪影,虽然排除伪影的单个通孔精度较高,却容易对判读造成误解,不能视作有效结果。结合前文的仿真效果,为了量化不同方法的检测性能和成像分辨率,引入无量纲参量阵列性能指示(API) I_{API} :

$$I_{API} = A_{-6dB} / \lambda^2, \quad (24)$$

式中: A_{-6dB} 表示成像区域中高于最大值-6 dB的面积; λ 是相应介质中对应中心频率的波长。取同样大小的缺陷判断范围,表 2 列出了多角度横波检测下的竖直排列 SDH 成像的 API 值。

分别取每个角度的第一和第四个通孔为代表,绘出相应 API 计算的矩形区域,如图 7 所示,分析各个角度的 API 值,角度很小为 20°时,API 值较大,且缺陷严重变形,成像结果不可取。角度从 30°到 60°变化时,API 值整体趋势变大,空间分辨率降低,然而垂直缺陷方向的横向分辨率逐渐变高,60°时第四 SDH 的 API

表 2 竖直排列 SDH 横波超声检测成像的 API 值

Table 2 API values for ultrasonic testing imaging of SDHs using transverse waves

Angle / (°)	API			
	SDH1	SDH2	SDH3	SDH4
20	0.043	0.041	0.037	0.035
30	0.033	0.029	0.027	0.026
40	0.032	0.034	0.033	0.032
50	0.038	0.036	0.034	0.033
60	0.041	0.040	0.036	0.028

值较小,但是伪影的影响较大。其中,角度为 40°时 API 值的波动最小。因此考虑 API 值和横向分辨率,角度在 40°左右的范围时兼具成像分辨率和伪影抑制。事实上仿真研究表明,在钢中折射角度为 30°~50°时都具备良好的成像效果,可以适应角度的变化范围,过

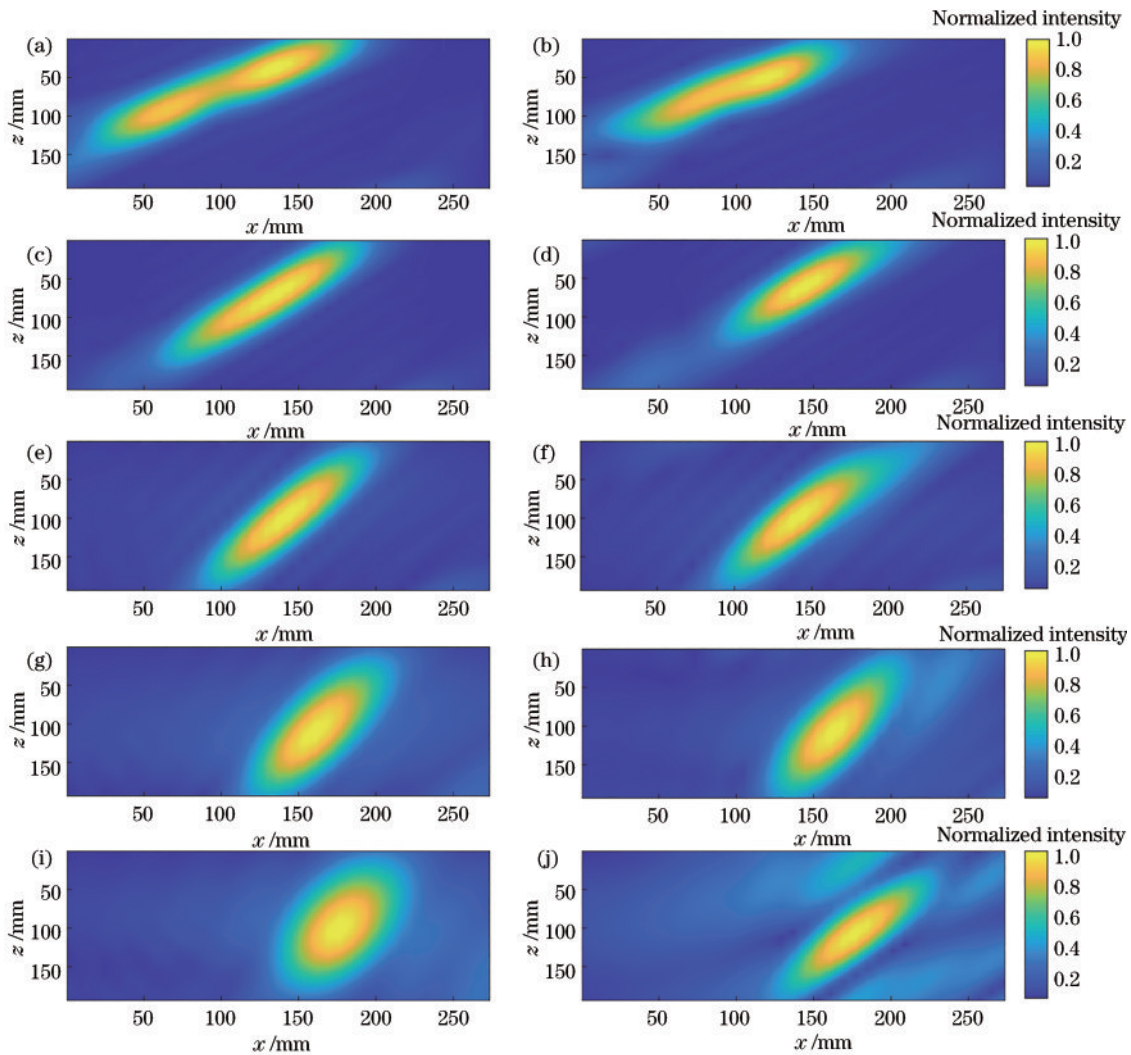


图 7 各个横波折射角度对于最上方和最下方 SDH 的横波 API 矩形成像区域。(a)、(c)、(e)、(g)、(i) 分别代表最上方 SDH 在 20°、30°、40°、50°、60° 折射下的成像结果;(b)、(d)、(f)、(h)、(j) 分别代表最下方 SDH 在 20°、30°、40°、50°、60° 折射下的成像结果
Fig. 7 API rectangle imaging area for top and bottom SDHs with each transverse wave refraction angle. (a), (c), (e), (g), (i) respectively represent imaging for top SDHs at refraction angles of 20°, 30°, 40°, 50°, and 60°; (b), (d), (f), (h), (j) respectively represent imaging for bottom SDHs at refraction angles of 20°, 30°, 40°, 50°, and 60°

小或过大会导致缺陷拖长、重影以及伪影太大,从而影响缺陷的检测。

为了验证提出算法与时域算法的计算精度与效率,本文使用在钢中 40° 折射检测垂直 SDH 的仿真数据,生成 340×250 个像素点的图像,并截取钢中感兴趣

区域 300×250 个像素点。数据导入 Matlab 中计算,并且对于精度与效率,将本文提出的斜入射算法与常规时域算法分别对比第一、第四个通孔的 API 值和整幅图像的计算时间。斜入射成像图与第一、第四 SDH 的 API 图像如图 8 所示。

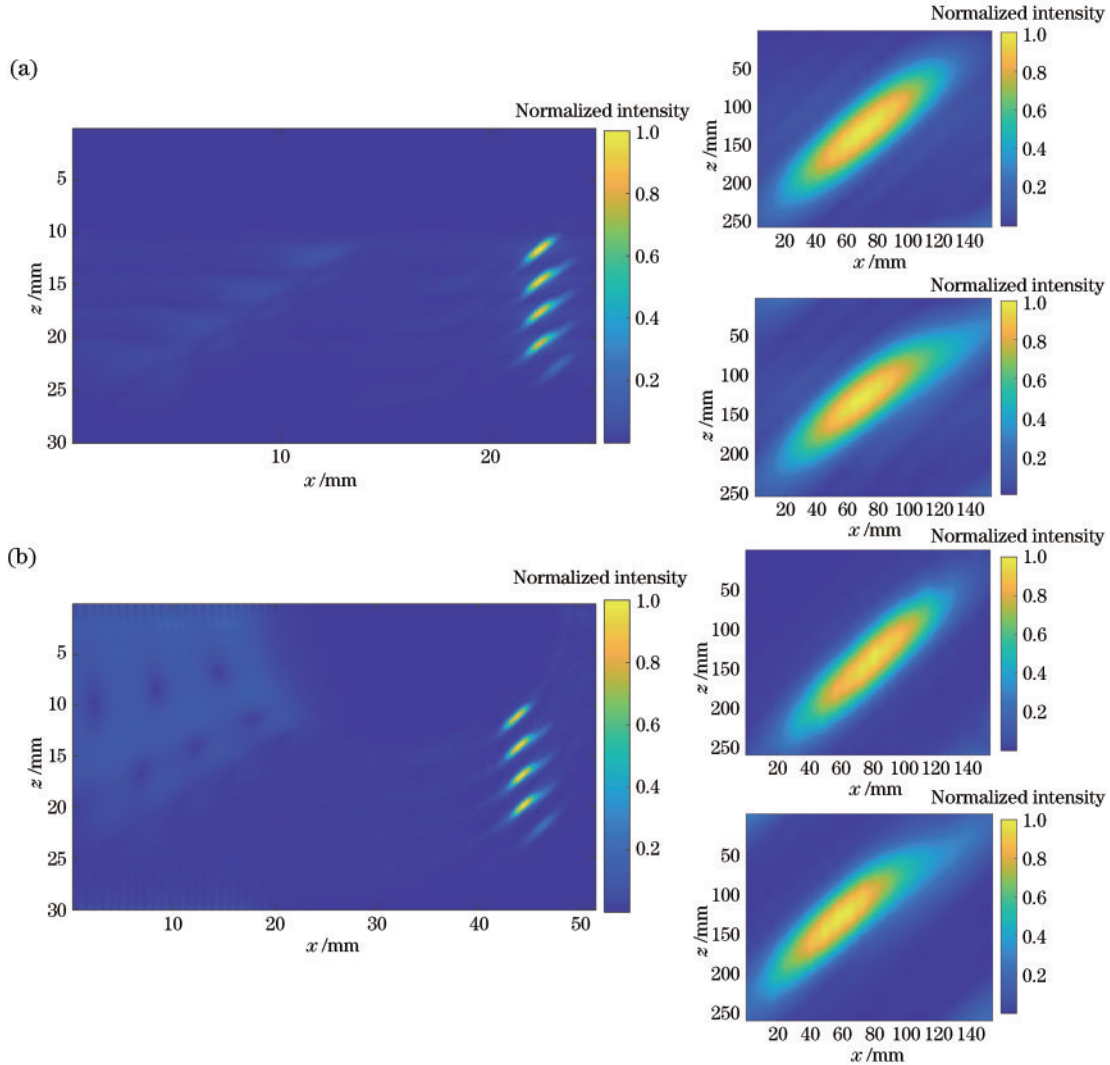


图 8 提出算法与常规时域算法在 40° 横波折射下的效果对比。(a) 提出算法的整体成像图和第一、第四个 SDH 的 API 图; (b) 传统时域算法的整体成像图和第一、第四个 SDH 的 API 图

Fig. 8 Effect comparison of proposed method and conventional time-domain method under 40° transverse wave refraction. (a) Whole image and API images for first and fourth SDHs respectively using proposed method; (b) whole image and API images for first and fourth SDHs respectively using conventional time-domain method

本文提出的算法第一、第四个 SDH 的 API 值分别为 0.0324 和 0.0320,时域算法的第一、第四个 SDH API 值分别为 0.0264 和 0.0265,API 值高于时域约 20%,但是时域算法对竖直通孔位置表征较差,SDH 的图像呈一定角度倾斜,与实际构件不符。因此,本文算法在精度差距不大的情况下,具备更高的定位精度。而在计算效率方面,时域算法耗时 62.3 s,而本文频域算法仅耗时 0.13 s,效率至少提高了 100 倍。所以仿真表明,本文提出的算法具备整体精度与效率的优势,在一定的角度范围内均可以对缺陷有效成像。

4 实验验证

为了验证横波斜入射的算法效果,本文设计了两组实验验证,整体的实验设置如图 9 所示,超声换能器和脉冲发射接收器收发超声信号,ABB 机械臂夹持探头并完成扫查,工控机处理接收的信号。实验的试件为铝块,纵波声速为 6350 m/s,横波声速为 3100 m/s,仿真验证了横波的优越性,所以本文设计实验为横波多角度 SDH 和 FBH 扫查检测。实验过程为了排除纵波在信号中对横波的影响,选择铝中折射角度为 30°~

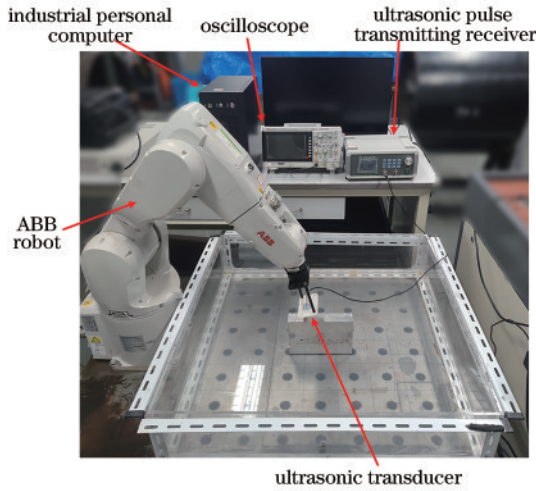


图 9 实验装置图

Fig. 9 Equipment setup for experiment

60°, 大于第一临界角。实验试件包括两块铝材, 其尺寸分别为 150 mm×430 mm×30 mm 和 200 mm×150 mm×40 mm, 第一个铝块全部设置为斜向排列的 1 mm 的 SDH。而第二个在铝块切面, 分别设置直径为 1、2、3、4、6 mm 和深为 5、20、15、25 mm 的 FBH 缺陷, 首个平底孔距离扫查初始位置的距离为 18 mm, 之后每个相邻平底孔之间的间距分别为 12、13、13.5、12、10 mm, 两块试件结构的缺陷尺寸如图 10 所示。实验所使用的人

射角和折射角如表 3 所示。

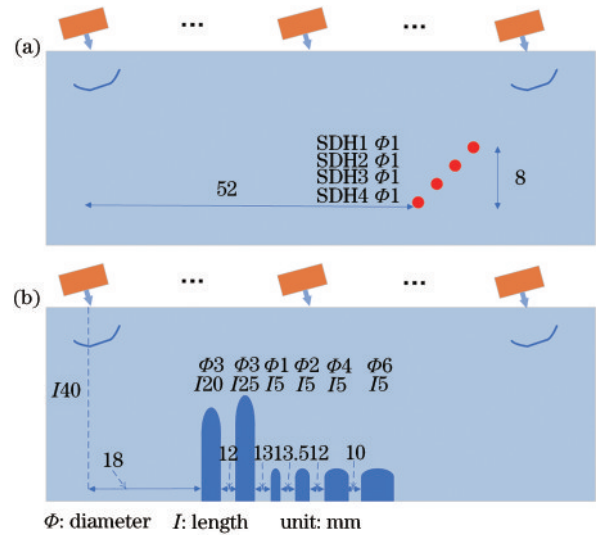


图 10 实验试件缺陷分布图。(a) 试件包含靠右侧斜向排列 1 mm 直径的 SDH; (b) 试件包含多个间距 3 mm 的 FBH, 其孔径分别为 1、2、3、4、6 mm

Fig. 10 Defects distribution for experimental specimens. (a) Test specimens contain right side oblique placed SDHs with diameter of 1 mm; (b) test specimens contain a series of 3-mm spacing FBHs with diameters of 1, 2, 3, 4, and 6 mm respectively

表 3 实验条件下使用的人射角和折射角

Table 3 Incidence and refraction angles used for experiments

Longitudinal wave incidence angle / (°)	9.5	9.5	First critical: 13.6	17.2	19.8	21.5	24.5	Last critical: 28.6
Transverse wave refraction angle / (°)	20.2	20.2	29.4	30	40	45	60	—

探头的电子高带宽为 5 MHz, 直径为 6 mm, 与仿真一致, -6 dB 相对带宽为 100.53%。超声信号的发射和采集使用广东汕头电子 CTS-8077PR 型号的脉冲发射接收仪, 发射电压为 125 V, 增益设置为 31 dB, 脉冲宽度为 100 ns, 每秒发射接收 500 次超声信号。采集的回波信号通过 BNC 接口输入到 Keysight 示波器 EDUX 1002A, 转换为数字信号, 并通过 USB 接口与计算机通信, 传输数据。探头的扫查由 ABB 工业机器人步进控制。扫查的步距为 0.2 mm, 共扫查 500 个位置点, 数据长度为 100 μs, 设置示波器的采样频率为 50 MHz, 每条信号共采集 5000 个点。

对于多个 SDH 的铝块, 仿真研究表明, 竖直 SDH 条件下 40° 左右折射角为满足要求的最佳成像角度。为了验证角度的关系, 设计实验使用本文提出的频域斜入射算法, 分别对 30°、45° 和 60° 折射进入铝块中的横波成像进行对比。由于采用的试件较长, 分别选取感兴趣区域为 30 mm×100 mm 的矩形, 大小为 300 pixel×600 pixel 的图像, 像素点的间隔为横向 0.2 mm、纵向 0.1 mm。成像结果如图 11 所示。

倾斜排列的 SDH1、SDH2、SDH3 和 SDH4 均呈现

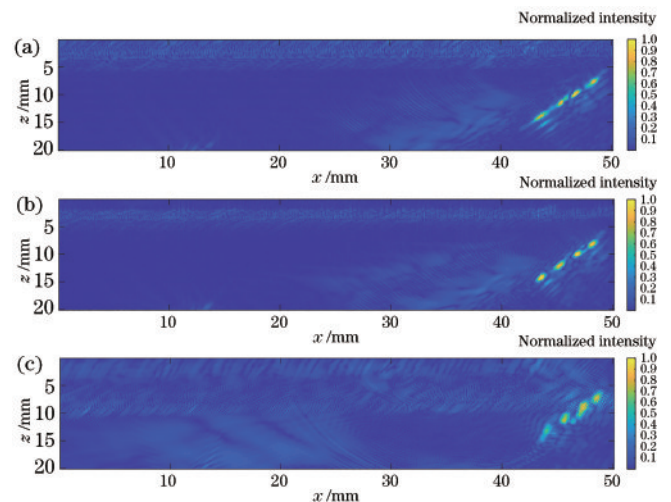


图 11 折射进入铝块的折射角分别为 (a) 30°、(b) 45°、(c) 60° 时的 SDH 实验成像图

Fig. 11 Experimental SDH imaging with refraction angles of (a) 30°, (b) 45°, and (c) 60°, respectively when refracting into aluminum block

在图像中,水层已提前排除。 30° 折射的角度较小,在水和铝的分界面已经接近第一临界角,SDH1 的伪影较大。 60° 折射的角度较大,缺陷通孔垂直声束方向的横向分辨率相对较高,但是同样具有 SDH1 伪影较大的问题, 45° 折射的成像效果在本组实验中最佳,所有孔可以清晰成像。

分别使用常规时域算法和本文提出的频域斜入射算法对上述三个折射角度下的回波进行成像,计算每种方法的平均时间,常规时域法需要 312 s,本文仅需 0.7 s,在计算效率上占据巨大优势。

第二组实验检测图 9(b)中 FBH 试件,使用角度为 30° 折射。如图 12 所示,所有的 FBH 均可以检测出来,第三个 FBH 由于前面的遮挡和自身直径较小,强度最弱。中间的淡色伪影线为水与试件分界面的二次反射,常规时域算法耗费 615 s,而本文提出的算法仅消耗 0.29 s,具有效率的优势。

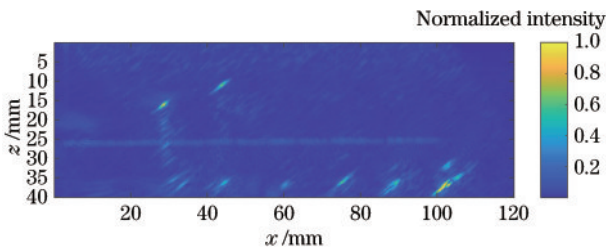


图 12 FBH 横波 30° 角折射成像

Fig. 12 Transverse wave imaging for FBHs with refraction angle of 30°

5 分析讨论

本文对横波折射所成图像的精度和效率进行了仿真研究,发现成像 API 值随角度从 30° 至 60° 变大而变大(20° 处由于两个图像点交叠,其 API 值不能正确表示缺陷孔径),整体空间分辨率略有降低,但是垂直声束方向的横向分辨率变高,并且在 40° 时 API 波动最小。这是由于折射到固体中的角度越大,折射后等效的探头孔径变小,从而提高了横向分辨率,而纵向分辨率相对降低,因此整体 API 值变大。

所述方法可以扩展到斜入射相控阵的二维或三维重建。当相控阵的扫查运动方向需要倾斜以适应不复杂工件表面^[28]或利用横波成像提高精度时,例如管道环焊缝^[29]的检测,亦或者缺陷所在位置需要大角度范围的扫查,常规方法都需要进行改进。为了解决上述问题,结合相控阵成像算法与本文提出的斜入射方法,可以完成机械扫查联合斜面适应大范围三维超声成像。在某些情况下,为了扩大斜入射相控阵扫查的范围,类似于常规超声,需要对多位置的相控阵图像按照空间的摆放顺序综合处理,最后进行二维重建,例如移动机器人携带相控阵探头并扫查长形圆管,并对缺陷的整体进行定征等。结合上述应用,相控阵斜入射可

以应用到多角度焊缝检测、飞机异型构件检测、弯折汽车部件检测和露天自动化扫查等场景,视使用的场景(平面扫查、空间定征),可以完成二维或三维重建。

在面对精度较高且衰减较强的试件时,为了提高传入试件的能量强度,往往采用聚焦探头。聚焦探头的焦点可以作为新的小尺寸的虚拟孔径,它聚焦了整个探头面的声能,和普通小孔径探头相比能量更强,检测深度更大,但相应的声束路径计算更为复杂。由于聚焦探头的焦点处的探头声压及相应参数的计算与常规平探头一致,所以在合成孔径中将新焦点视作平探头,其孔径小,因此精度高。在斜入射频域扫查中,可以先将波场外推至焦点平面,再结合焦点平面与斜入射平面的角度关系等推导新的关系式。外推步骤需要结合聚集探头的声场模型,利用声波在远场聚焦的近似简化复杂的聚焦波场计算。

通过采用 $\omega-k$ 的方法可以进一步提升计算速度,在斜入射转换后垂直入射介质内应用 Stolt 变换,整体计算介质内所有深度的波场。在面对叠层检测的时候,需要将波场分别外推到不同介质的上表面,再在介质内部应用 Stolt 变换。原始的波场以 ω 为自变量,Stolt 变换将 ω 转换为 k_z ,得到的波场关于 k_x, k_z 整体做傅里叶逆变换。这样将大幅缩减计算机处理时间,具备实时成像的能力。

6 结 论

针对超声固体试件斜入射横波扫查,本文提出了一种采用坐标变换进行斜入射成像的方法。该方法将斜入射转换为新坐标系下的垂直入射,从而可以采用相位迁移的方法对缺陷进行成像,并且与时域法相比大幅提高了计算效率。由于斜入射至少需要耦合层和试件两种介质,因此需要叠层迁移步骤。实验和仿真设计为超声纵波从水中斜入射金属块,以探究横波多角度折射对缺陷成像精度的影响。研究表明,当折射角为 40° 时,成像结果兼顾了效率和精度,并且在一定的角度范围($30^\circ \sim 50^\circ$)均有不错的成像效果。在探头扫查受到遮挡或缺陷的检测角度受限时,可以按照实际情况调整折射角度,适应不同试件。在成像精度方面,角度越大分辨率越高,但是在折射角度很小或很大的时候,成像会增加伪影,影响缺陷的判读。本文的斜入射方法对各种缺陷如 SDH、crack 和 FBH 等都具有良好的检测能力。

本文计算的是横波超声成像,与纵波成像相比具有更高的纵向分辨率。对于各种类型缺陷如 SDH、crack、FBH 等,横波更高的纵向分辨率有助于缺陷的区分和定位。

该算法具备广阔的应用前景,可以用于管道、汽车和航天等领域的无损检测,并且具有研究的潜力,可以拓展到相控阵及三维图像重建,并完成实时成像。

参 考 文 献

- [1] Wu H T, Chen J, Wu S W, et al. A model-based regularized inverse method for ultrasonic B-scan image reconstruction[J]. Measurement Science and Technology, 2015, 26(10): 105401.
- [2] Wu H T, Chen J, Yang K J, et al. Ultrasonic array imaging of multilayer structures using full matrix capture and extended phase shift migration[J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27(4): 045401.
- [3] Burch S F. Comparison of SAFT and two-dimensional deconvolution methods for the improvement of resolution in ultrasonic B-scan images[J]. Ultrasonics, 1987, 25(5): 259-266.
- [4] Cai D, Li Z F, Chen S L. Photoacoustic microscopy by scanning mirror-based synthetic aperture focusing technique[J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(10): 101101.
- [5] Lin X W, Feng N Z, Qu Y W, et al. Compressed sensing in synthetic aperture photoacoustic tomography based on a linear-array ultrasound transducer[J]. Chinese Optics Letters, 2017, 15(10): 101102.
- [6] Yu B, Jin H, Mei Y, et al. 3-D ultrasonic image reconstruction in frequency domain using a virtual transducer model[J]. Ultrasonics, 2022, 118: 106573.
- [7] Yang X J, Cai X, Maslov K, et al. High-resolution photoacoustic microscope for rat brain imaging *in vivo*[J]. Chinese Optics Letters, 2010, 8(6): 609-611.
- [8] Lin S B, Shams S, Choi H, et al. Ultrasonic imaging of multi-layer concrete structures[J]. NDT & E International, 2018, 98: 101-109.
- [9] Qin L, Zhang S, Song Y, et al. 3D ultrasonic imaging based on synthetic aperture focusing technique and space-dependent threshold for detecting submillimetre flaws in strongly scattering metallic materials[J]. NDT & E International, 2021, 124: 102523.
- [10] Jin H R, Zheng Z S, Liao X Q, et al. Image reconstruction of immersed ultrasonic testing for strongly attenuative materials[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 168: 108654.
- [11] Gazdag J. Wave equation migration with the phase-shift method[J]. GEOPHYSICS, 1978, 43(7): 1342-1351.
- [12] Stolt R H. Migration by Fourier transform[J]. GEOPHYSICS, 1978, 43(1): 23-48.
- [13] Gazdag J, Sguazzero P. Migration of seismic data by phase shift plus interpolation[J]. GEOPHYSICS, 1984, 49(2): 124-131.
- [14] Stoffa P L, Fokkema J T, de Luna Freire R M, et al. Split-step Fourier migration[J]. GEOPHYSICS, 1990, 55(4): 410-421.
- [15] Stepinski T. An implementation of synthetic aperture focusing technique in frequency domain[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2007, 54(7): 1399-1408.
- [16] Schleicher J, Costa J C, Novais A. A comparison of imaging conditions for wave-equation shot-profile migration[J]. GEOPHYSICS, 2008, 73(6): S219-S227.
- [17] Olofsson T. Phase shift migration for imaging layered objects and objects immersed in water[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2010, 57(11): 2522-2530.
- [18] Skjelvareid M H, Olofsson T, Birkelund Y, et al. Synthetic aperture focusing of ultrasonic data from multilayered media using an omega-K algorithm[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2011, 58(5): 1037-1048.
- [19] Huang L J, Quan Y L. Ultrasound pulse-echo imaging using the split-step Fourier propagator[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6513: 651305.
- [20] Li H J, Le Lawrence H, Sacchi M D, et al. Ultrasound imaging of long bone fractures and healing with the split-step Fourier imaging method[J]. Ultrasound in Medicine & Biology, 2013, 39(8): 1482-1490.
- [21] Lukomski T. Non-stationary phase shift migration for flaw detection in objects with lateral velocity variations [J]. Insight, 2014, 56(9): 477-482.
- [22] Lukomski T. Full-matrix capture with phased shift migration for flaw detection in layered objects with complex geometry[J]. Ultrasonics, 2016, 70: 241-247.
- [23] Yu B, Jin H R, Mei Y J, et al. A modified wavenumber algorithm of multi-layered structures with oblique incidence based on full-matrix capture[J]. Applied Sciences, 2021, 11(22): 10808.
- [24] 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.
- [25] Jin H R, Chen J. An efficient wavenumber algorithm towards real-time ultrasonic full-matrix imaging of multi-layered medium[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 149: 107149.
- [26] Carcione J M, Feliciangeli L P, Zamparo M. The exploding-reflector concept for ground-penetrating-radar modeling[J]. Annals of Geophysics, 2009, 45(3/4): 473-478.
- [27] Soumekh M. Synthetic aperture radar signal processing with MATLAB algorithms[M]. New York: Wiley, 1999.
- [28] Kong Y, Bennett C J, Hyde C J, et al. A review of non-destructive testing techniques for the *in situ* investigation of fretting fatigue cracks[J]. Materials & Design, 2020, 196: 109093.
- [29] Li W T, Zhou Z G, Li Y. Inspection of butt welds for complex surface parts using ultrasonic phased array[J]. Ultrasonics, 2019, 96: 75-82.