DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1904813

基于虚拟源的非规则双层介质频域合成孔径聚焦超声成像*

陈 尧[1,2],冒秋琴[1],石文泽[1],龙盛蓉[1],卢 超[1,3]

(1. 南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室 南昌 330063;
2. 中国科学院声学研究所 声场声信息国家重点实验室 北京 100190; 3. 上饶师范学院 上饶 334000)

摘 要:为实现非规则双层介质的快速超声成像,提出一种基于虚拟源(VS)的频域合成孔径聚焦技术(SAFT)。首先,借助 VS 技术在未知界面几何形状的不规则双层介质的表面建立一系列虚拟源点。其次,对所建不均匀分布的虚拟源点进行插值处理,得到近似表征分层界面形状的数学表达式。然后,根据界面表达式,建立表征网格成像区域内速度分布的速度模型。最后,在非稳态相位迁移成像实施过程中,利用声速模型适应每个迁移步进位置上声速的水平变化。通过凸面和正弦曲面工件成像实验验证频域 VS-SAFT 的有效性,同时对比时、频域 VS-SAFT 的成像结果和运算效率。结果表明,2 种 VS-SAFT 图像基本还原了缺陷位置和工件表面形状。单核测试条件下,频域 VS-SAFT 的计算时间仅为 0.47~0.53 s,而时域 VS-SAFT 需要 91.21~93.54 s。

关键词: 虚拟源;非规则双层介质;频域;合成孔径聚焦技术;速度模型

中图分类号: TG115.28 TH878.2 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 460.40

Frequency domain synthetic aperture focusing technique for irregular two-layered medium based on visual source

Chen Yao[1,2], Mao Qiuqin[1], Shi Wenze[1], Long Shengrong[1], Lu Chao[1,3]

(*1.Key Laboratory of Non-destructive Testing Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;*
2.State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
3.Shangrao Normal University, Shangrao 334001, China)

Abstract: To achieve high-speed ultrasonic imaging for irregular two-layered medium, one kind of frequency domain synthetic aperture focusing technique (SAFT) based on visual source (VS) technique is proposed. Firstly, VS technique is adopted to construct a series of VS points at the interface of an unknown testing object with irregular two-layered structure. Secondly, the expression of irregular interface is obtained by the interpolation processing with the coordination of VS points. Thirdly, the velocity model is formulated, which represents the velocity distribution in the mesh imaging region according to the expression. Finally, the velocity model is used to accommodate lateral velocity variation for each migration interval during the implementation process of the non-stationary phase shift migration imaging. The performance of the method is evaluated using the convex surface and the sinusoidal curve surface, respectively. Meanwhile, the imaging results and the operation efficiency of the frequency domain VS-SAFT are compared with the time domain VS-SAFT. Experimental results show that the defect location and the surface shape are displayed accurately in two kinds of VS-SAFT images. In the single CPU core condition, the calculation time is only 0.47~0.53 s for the frequency domain VS-SAFT. However, the time domain VS-SAFT need consume 91.21~93.54 s.

Keywords: virtual source; irregular two-layered medium; frequency domain; synthetic aperture focusing technique; velocity model

收稿日期:2019-03-07 Received Date:2019-03-07

*基金项目:国家自然科学基金项目(51705232, 11764030)、声场声信息国家重点实验室开放课题研究基金(SKLA201806)、江西省自然科学基金(20171BCB24008, 20171BAB206039)、江西省科技厅项目(GJJ170621, GJJ170577, GJJ180525)资助

0 引　　言

合成孔径聚焦成像技术(synthetic aperture focusing technique, SAFT)具有直观显示缺陷的优点,已被广泛应用于无损检测领域[1-3]。然而,现有 SAFT 成像算法大多只适用于被检构件表面为平面,且平行于阵列探头的检测工况。遗憾的是,在实际检测过程中诸如弯管和曲面复合材料等构件的表面为非规则形状。在检测复杂曲面构件时,为保证耦合质量,通常采用水浸或楔块等耦合方式进行检测。这样,声速之间的差异使得声束在耦合介质和被测构件组成的双层介质中传播。因此,SAFT 成像时必需要考虑非规则界面对声束的折射效应[4]。如果成像算法未能处理因折射引起的延时时间变化,会导致重建图像中缺陷和界面位置的严重失真。

为克服上述困难,相关研究者相继提出很多成像算法。例如,将 Snell 定理、费马原理、射线示踪算法与时域 SAFT 相结合,可实现非规则界面分层介质的超声成像[5-8]。然而,上述复合方法在延时时间计算过程中需要繁重的迭代运算,因而其运算效率较低,在实际检测时受到一定的限制。相比于时域 SAFT,以相位迁移技术(phase shift migration,PSM)为基础的频域 SAFT 是一种用于分层介质成像的高效算法,目前该方法已在超声 SAFT 成像领域得到初步应用。但由于波场外推过程中假设水平方向上声速恒定,因而传统 PSM 仅能适用于规则界面的分层介质成像。为使 PSM 适用于非规则分层介质成像,相移加插值(phase shift plus interpolation, PSPI)[9],变波速相位迁移(generalized phase shift migration, GPSM)[10]和非稳态相位迁移(non-stationary phase shift migration,NSPSM)[11]等 PSM 的衍生方法相继被提出。由于改进后的迁移因子同时考虑了水平和垂直 2 个方向上的声速变化,上述衍生算法均能够用于非规则分层介质的成像。

尽管改进后的 PSM 能够适用于非规则分层介质成像,但上述方法都存在合理的参考声速选择问题。若要获得准确的成像结果,相位迁移过程中必须考虑每个波场外推深度上的正确速度分布。因此,如何正确解释非规则介质的声速值,进而根据工件表面特点建立正确的声速模型是精确 PSM 成像过程中的关键所在[12]。然而,在实际的超声无损检测过程中,工件的表面形状及其与探头的相对位置往往是未知的,导致声速模型难以有效建立,限制了非规则工件频域 SAFT 成像的实际应用。不过,随着虚拟源(virtual source,VS)表面映射技术的出现,上述问题有望迎刃而解。

VS 技术可利用一次界面回波在双层介质界面处建立了一系列虚拟源点,通过虚拟源点所在坐标量化描述工件表面形状及位置[13-15]。该技术的最大优点是利用成像检测自身快速完成工件表面信息的测量。目前,VS 技术已与时域 SAFT 相结合形成了 VS-SAFT 成像,并在非规则介质的成像中得到了初步应用[15]。在上述工作基础上,本文提出一种适用于非规则表面工件超声成像的频域 VS-SAFT 方法。通过 VS 技术快速获取非规则工件的表面信息。在此基础上建立适用于波场外推的声速模型,实现非规则表面工件内部缺陷的成像。

1 原　　理

1.1 非稳态相位迁移

PSM 成像的一般原理是利用矢量波动方程将爆炸波场外推至目标中的某一深度。如图 1 所示,PSM 的实施过程是将被检目标假设为一系列间隔为 Δz 的切片,每个切片可视为一条成像线,然后通过逐层递推每条成像线实现整个被检目标的聚焦。假设每个外推深度上声速恒定时,波场 $p(x, z, t)$ 的矢量波动方程表达式为[16]:

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial z^2}-\frac{1}{c_z^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\right]p(x,z,t)=0 \tag{1}$$

式中:x 为水平方向的坐标;z 为深度方向的坐标;t 为超声波场的传播时间;c_z 为深度 z 处的介质声速。由深度 z 外推至 $z=z+\Delta z$ 的外推波场表达式为:

$$p(k_x,z+\Delta z,\omega)=p(k_x,z,\omega)\alpha(k_x,\Delta z,\omega) \tag{2}$$

式中:$p(k_x, z, w)$ 为 $p(x, z, t)$ 的傅里叶变换式;$\alpha(k_x, \Delta z, w)$ 为用于波场外推的相位迁移因子,由爆炸物反射模型和波动方程色散关系推导所得[17]。根据爆炸物反射模型,由于声波发射和接收处于同一位置,因此假设声波传播路径为实际传播路径的一半。若将传播路径差异体现在声速上,即假设声速为实际介质声速的一半[16]。因而迁移因子中的声速为介质声速除以 2,此时相位迁移因子的表达式为:

$$\alpha(k_x,\Delta z,\omega)=\exp\left[-i\Delta z\sqrt{\frac{4\omega^2}{c_z^2}-k_x^2}\right] \tag{3}$$

式中:i 为单位复数;k_x 为波数矢量在水平方向上的分量;ω 为角频率;c_z 为实际介质的半声速值。

上述情况中,利用二维反傅里叶变换对深度 z 上的成像点 $p(x, z, t=0)$ 进行重建,表达式写作 :

$$p(x,z,t=0)=\iint p(k_x,z,\omega)e^{ik_x x}\mathrm{d}k_x\mathrm{d}_\omega \tag{4}$$

若检测对象为均匀单一介质,式(3)中的声速 c_z 是一个常数,其值为实际介质的半声速值。不过,实际检测中往往会通过水浸或楔块等介质进行耦合,导致被检对象成为双层介质,使得声波在耦合介质-工件中传播。这样,式(3)中所示的声速 c_z 就需要被表达为深度 z 方向上的函数,即耦合介质中一个速度,被检工件一个速度。对

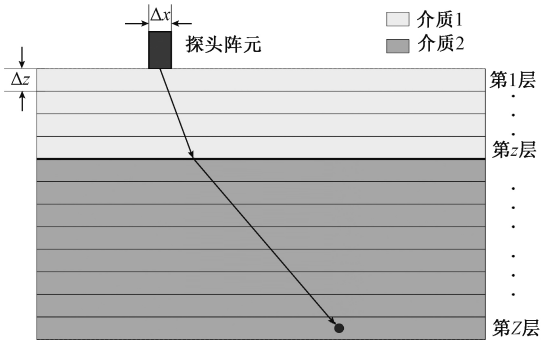


图 1 规则界面双层介质的相位迁移成像原理

Fig.1 Principle of PSM for two-layered medium with regular interface

于图 1 所示的声阻抗界面为规则平面(方向平行于水平面)的分层介质,声速 c_z 在每个外推深度上总是恒定的。然而,对于具有非规则界面的分层介质,某些外推深度上的声速沿水平和深度 2 个方向均发生变化。例如,图 2 所示为中介质 1 和介质 2 界面之间黑色虚线围成的成像切片中出现了 2 个声速值(一个是介质声速,另一个是工件声速),即声速 c_z 为水平 x 方向上和深度 z 方向上的函数。针对上述状况,可将式(3)修正为:

$$\alpha_{c_z(x)}(k_x,\Delta z,\omega)=\begin{cases}\exp\left[-i(\Delta z)\sqrt{\dfrac{4\omega^2}{c_z^2(x)}-k_x^2}\right], & \omega<0 \text{ and } \dfrac{4\omega^2}{c_z^2(x)}-k_x^2\geqslant 0\\ 0, & \text{其他}\end{cases} \tag{5}$$

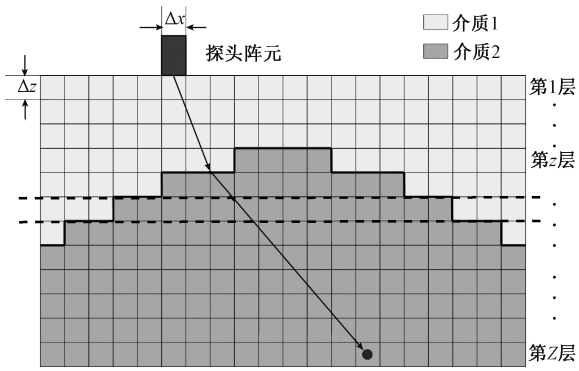


图 2 非规则界面双层介质的相位迁移成像原理

Fig.2 Principle of PSM for two-layered medium with irregular interface

为适应声速水平变化,需要预先掌握各外推深度上不同水平位置的声速值[12],进而通过式(6)实现非规则分层介质的波场外推。

$$\hat{p}(x,\Delta z,\omega)=\underset{kx\Rightarrow x}{IFT}\left[\sum_j \alpha_{cj}(k_x,\Delta z,\omega)\ \underset{x\Rightarrow kx}{FT}(\Omega_j(x)\hat{p}(x,0,\omega))\right] \tag{6}$$

式中:FT 和 IFT 分别代表傅里叶变换和反傅里叶变换;$\hat{p}$ 表示沿深度进行一维傅里叶变换后的波场 p;c_j 为位置 (x,z) 对应的声速,其中 $j=1,2$ 分别代表介质 1 和介质 2 对应的声速;Ω 为区分某一深度上不同水平位置声速值的窗函数,其表达式写作:

$$\Omega_j(x)=\begin{cases}1, & c_z(x)=c_j\\ 0, & \text{其他}\end{cases} \tag{7}$$

由式(5)和(6)可知,PSM 成像时需要明确波场外推过程中每个深度的速度。因此,为实现水平变波速 PSM,需要预先得知被检工件的表面形状及其与探头的相对位置,进而得到如图 2 所示的声速模型。由于缺少探头—工件结构,因而实际检测过程中很难获得有效的声速模型。不过,上述问题有望被 VS 表面映射技术解决。

1.2 VS 表面映射技术

图 3 所示为 VS 映射技术获取探头—工件结构的原理,该技术利用相邻阵元之间的一次界面回波飞行时间在工件界面建立 VS 阵元。如图 3 所示,u_i 和 u_{i+1} 分别为相控阵探头中相邻阵元的中心坐标。q_i 和 q_{i+1} 分别代表由 u_i 和 u_{i+1} 所发声波在双层介质界面上的入射点,则 u_iq_i 和 $u_{i+1}q_{i+1}$ 为声波由阵元中心至界面入射点的传播路径,c_k 为相邻阵元 u_i 和 u_{i+1} 中心,v_k 为根据相邻阵元 u_i 和 u_{i+1} 所发信号 1 次回波建立的虚拟阵元。假设点 q_i、v_k 和 q_{i+1} 在同一直线上,则虚拟阵元 v_k 到 c_k 的偏转角为:

$$\alpha_i=\arcsin\left(\frac{u_iq_i-u_{i+1}q_{i+1}}{d}\right)=\arcsin\left(\frac{c_1}{2d}(T_i-T_{i+1})\right) \tag{8}$$

式中:T_i 和 T_{i+1} 为阵元 U_i 和 U_{i+1} 的界面回波信号的对应时间。由于阵元坐标已知,虚拟阵元 v_k 的坐标可以表示为:

$$\begin{aligned}x_{v_k}&=x_{c_k}+\left(\frac{u_iq_i+u_{i+1}q_{i+1}}{2}\right)\cdot\sin\alpha_i\\ z_{v_k}&=z_{c_k}-\left(\frac{u_iq_i+u_{i+1}q_{i+1}}{2}\right)\cdot\cos\alpha_i\end{aligned} \tag{9}$$

这样,通过连续激发相控阵探头的各路阵元,可在双层介质界面上建立一系列虚拟阵元。若激励的阵元数为 N,则构建虚拟阵元的数量为 $N-1$。对于以延时叠加算法的时域 SAFT 而言,确定虚拟阵元坐标后,可以将虚拟阵元作为折射点求得声波在耦合介质中的传播时间 t_1 和被检工件中的传播时间 t_2,其表达式如下:

$$\begin{aligned}t_1&=\sqrt{(x_{u_i}-x_{v_i})^2+(z_{u_i}-z_{v_i})^2}/c_1\\ t_2&=\sqrt{(x_{v_i}-x)^2+(z_{v_i}-z)^2}/c_2\end{aligned} \tag{10}$$

式中:x、z 分别为聚焦点的横、纵坐标;c_1、c_2 分别为耦合介质和被检工件的纵波声速。将 $N-1$ 个信号进行延时

叠加,则聚焦点 $p(x, z)$ 处的幅值表达式写作:

$$I_{\text{VS-SAFT}}(x,z) = \sum_{i=1}^{N-1} h(S_i(t_1 + t_2)) \tag{11}$$

式中:$h(\,)$ 为信号 $S_i(\,)$ 的希尔伯特变换,对信号进行包络处理。

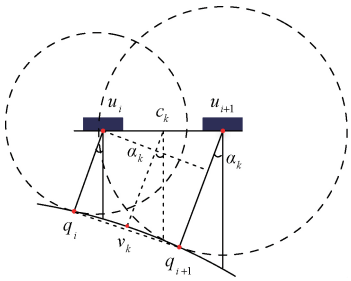


图 3　非规则界面构建 VS 点

Fig.3　Schematic of creating VS point at the irregularly interface

1.3　基于虚拟源的非稳态相位迁移

由式(10)~(11)可知,时域 SAFT 过程中,只要将虚拟阵元作为折射点算得式(10)中的传播时间 t_1 和 t_2,就能通过式(11)实现延时叠加图像重建。然而,由式(7)可知,非规则双层介质频域 SAFT 成像时,需要预先知晓成像区域内耦合介质-被检工件之间的界面形状和位置,以便预先掌握各外推深度上不同水平位置的声速值。因此,若要利用 VS 技术实现频域 SAFT 图像重建,需要利用式(8)~(9)所建 VS 阵元坐标量化表示非规则界面的形状和位置,为可靠声速模型的建立提供了一个可行性环境。以 VS 理论为基础,建立适用于非规则分层介质 PSM 成像的声速模型,具体如下。

利用阵元数为 N 的相控阵系统采集用于成像的 A 扫描信号。通过测量信号一次界面回波的最大幅值,得到由阵元到非规则界面的飞行时间。基于式(8)和(9),利用所测飞行时间在双层介质界面上建立 $N-1$ 个 VS 点。对 VS 点进行插值或拟合处理,得到用于区分耦合介质和被检工件之间材料边界的曲线表达式。

根据非稳态相位迁移原理[18],整个波场的外推是通过计算一系列间隔为 Δz 成像线实现的。此外,成像线的方向为水平且平行于线性相控阵探头。为适应 PSM 成像,假设成像目标是由一系列厚度为 Δz 的水平切片组成的物体。此时,成像目标可视为由若干像素点组成的网格区域,进而将其抽象为由 $X\times Z$ 个阵元组成的矩阵。表示成像目标的矩阵中,Z 为厚度为 Δz 的切片数量,X 为中心距为 Δx 的阵元数量。相应地,z $(1\leqslant z\leqslant Z)$ 和 $n(1\leqslant x\leqslant X)$ 分别代表成像线的第 z 层和阵列探头的第 x 号阵元。

假设 $c(x, z)$ 是图 2 中加粗拟合线对应的函数,用于确定 $X\times Z$ 区域中某网格点对应阵元的声速值,其表达式写作:

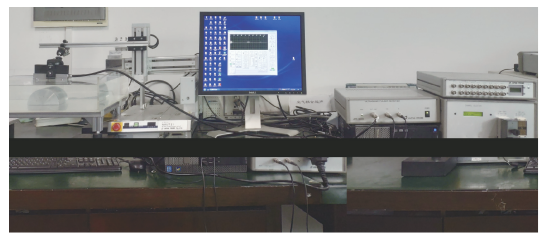
$$c_z(x) = \begin{cases} c_1, & c(x,z) > 0 \\ c_2, & c(x,z) \leqslant 0 \end{cases} \tag{12}$$

式中:$c_z(x)$ 为位置为 (x, z) 的网格点纵波声速值。假若 $c(x, z)>0$,则网格点位于拟合线上方,此时声速值 $c_z(x)$ 为耦合介质纵波声速 c_1。假若 $c(x, z)\leqslant 0$,则网格点位于拟合线下方或与拟合线重合,此时声速值 $c_z(x)$ 为被检工件纵波声速 c_2. 基于式(12),将声速值 c_1 和 c_2 分配给代表网格区域的 $X\times Z$ 矩阵。该矩阵即用于横向声速变化波场外推的声速模型,其对应的声速值 c_1 和 c_2 分别由图 2 中的浅灰色和深灰色表示。波场外推至第 z 层时,利用式(7)区分不同水平位置对应的声速值,进而将声速值代入式(6)计算第 z 层波场,最后基于公式(4)对第 z 层成像线进行重建。

2　实　　验

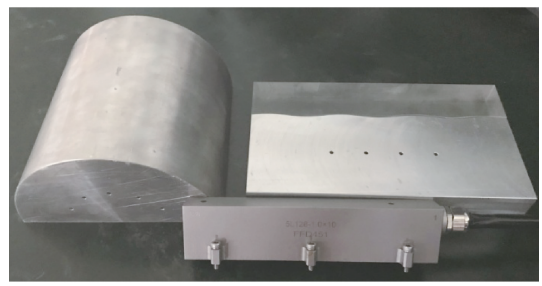
分别利用凸面和正弦曲面工件的相控阵成像实验验证频域 VS-SAFT 方法的有效性。图 4 为用于曲面构件成像的超声成像系统、相控阵探头和曲面被检试样。如图 4(a)所示,超声相控阵成像检测系统,由独立 128 通道超声信号采集系统、计算主机、阵列信号采集软件和 128 阵元信号采集传感器组成。

如图 4(b)所示,传感器为广州多浦乐电子科技有限公司生产的线性 128 阵元的线性阵列探头,中心频率为 5 MHz,阵元宽度为 0.9 mm,阵中心间距为 1 mm,阵元长度为 10 mm。



(a) 超声相控阵成像检测系统

(a) The detection system of phased array imaging



(b) 相控阵探头和被检试块

(b) Phased array probe and the testing samples

图 4　超声成像系统、探头和试样

Fig.4　Ultrasonic imaging system, probe and samples

图 4(b)中被检试样 I 和被检试样 II 的表面形状分别为波浪形和半圆形。如图 5 所示,被检试样 I 为表面为波浪形的铝制试块,其形状表达式为振幅为 2 mm,波长为 45 mm 的正弦函数,即 $z=2\sin(2\pi x/45)$。试样 I 和探头之间通过楔块进行耦合。

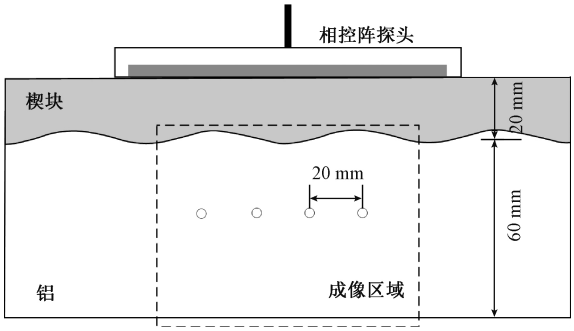


图 5 表面为正弦曲面的被检试样 I

Fig.5 The testing sample I with the sinusoidal shape surface

如图 6 所示,被检试样 II 为半径 60 mm 的半圆形铝制试块,该试样中加工 5 个 F2 边钻孔。边钻孔至试样圆心的距离均为 30 mm,边钻孔中心之间的圆周角为 30°。试样 II 和探头之间通过水进行耦合。经测量,耦合楔块的声速为 2 690 m/s,耦合介质水的声速为 1 480 m/s,铝制试块的声速为 6 190 m/s。以 100 MHz 采样频率,使系统从 1 号阵元开始,按照 1~128 号的顺序使单个阵元进行自发自收,形成 128 个采样点数为 3 999 的 A 型扫描信号,以 3 999×128 矩阵形式存储于电脑主机内。获得矩阵数据后,基于式(8)、(9)及 1.3 节中建立不同工件的声速模型,据此利用式(1)~(7)实现频域 VS-SAFT 成像。

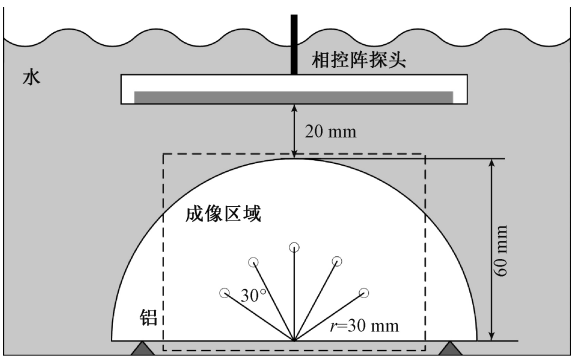


图 6 表面为半圆曲面的被检试样 II

Fig.6 The testing sample II with the semicircle shape surface

为进行对比,根据 1.2 节中的理论实现时域 VS-SAFT 成像。最后,从成像质量和效率 2 方面对比频域 VS-SAFT 和时域 VS-SAFT 的成像效果。上述成像的数值计算平台为 MATLAB 2015a,测试所用计算机 CPU 为 Intel core i7 4700,主频 3.6 GHz,4 核心。

3 结果及讨论

3.1 速度模型

以试样 I 为例,进一步研究和分析基于 VS 技术所建声速模型的有效性性。图 7(a)所示为利用 89 个信号一次界面回波测量结果所建立的虚拟阵元坐标点。对比图 7(a)中代表实际界面形状的曲线可知,VS 点与实际界面形状和位置基本吻合。根据文献记载[15],由于空间中的声波波前为球面波,因而图 7(a)中所示 VS 点在水平方向上呈非线性排列,即相邻 VS 点之间的水平距离是不相等的。但是,若实现式(4)~(6)中的非稳态 PSM 成像,要求相邻 VS 点之间在水平方向上是等间距的。利用插值对所建 VS 点进行处理,得到每个步进长度下对应的深度坐标值,结果如图 7(b)所示。由图 7(b)可知,插值处理后所建的 VS 点基本位于实际双层介质界面。

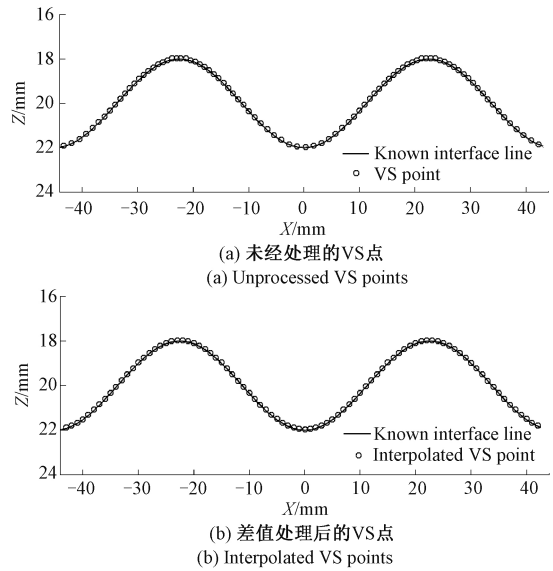


图 7 正弦曲面的 VS 点

Fig.7 The VS points of the surface with sinusoidal curve

经测量,处理后的 VS 点与实际坐标点之间的误差绝对值在 0.01~0.06 mm。由波长公式 $l=c/f$ 可知,5 MHz 中心频率下,声波在树脂中的纵波波长约为 0.54 mm,声波在铝中的纵波波长约为 1.2 mm。对比 VS 点测量误差和介质波长可知,所测 VS 点的误差小于树脂和铝波长的 1/4。从成像的角度上看,小于 1/4 介质波长误差引起的相位偏差不超过 p/2,成像时不会造成因信号之间的反相位叠加和幅值相互抵消而引起的图像缺陷质量失真和图像下降问题。上述结果表明,VS 技术能够满足非规则介质超声成像精度的要求。

获得插值处理后的 VS 点后,需要选择合理的深度步

进距离 Δz 进行波场外推。由 1.3 节可知,模型的精度由 Δz 决定。根据上文,*VS* 点与实际坐标点之间的最大误差绝对值为 0.06 mm。考虑到若采用较大的 Δz 可能会引起额外的计算误差,基于精度和效率的考虑,本文选择 Δz=0.05 mm 步进距离进行建模,所建模型如图 8 所示。由图 8 可知,0.05 mm 深度步进距离下所建立的声速模型与实际界面形状和位置基本一致。上述结果表明,基于 VS 测量结果所建立的声速模型,能够准确描述非规则工件的表面形状及其与相控阵探头之间的相对位置,可为解决非规则工件的频域非稳态 PSM 成像提供可靠数据。

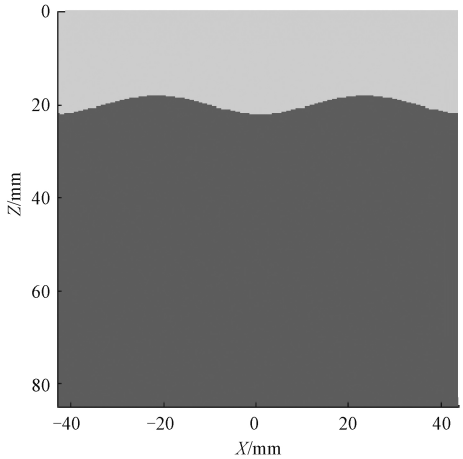
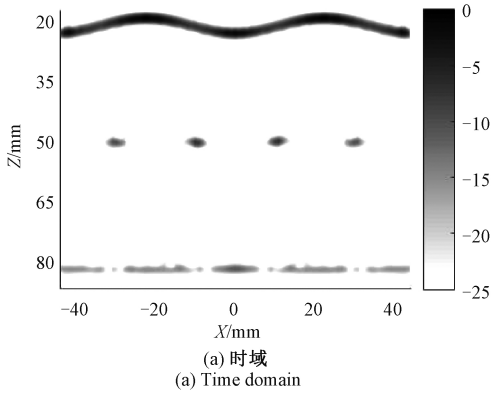


图 8　正弦曲面的速度模型

Fig.8　The velocity model of the surface with convex curve

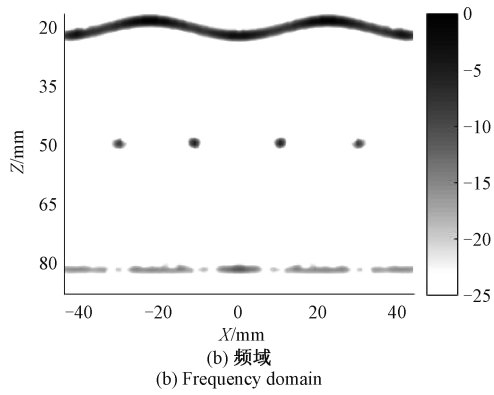
3.2　成像结果

图 9 和 10 分别为正弦曲面和半圆的超声成像结果。根据文献[19],图像以分贝作为单位,用以考察缺陷及界面回波强度。利用 Holmes 等的定义相控阵性能指标(array performance indicator,API),对超声图像的缺陷分辨率进行评价[20]。



(a) 时域

(a) Time domain

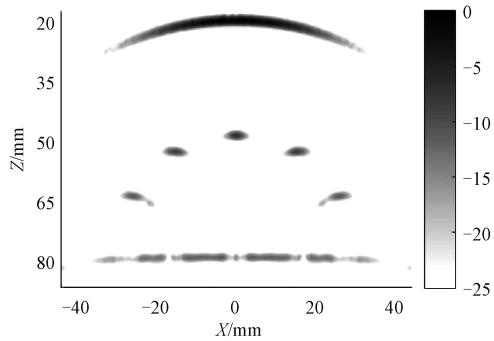


(b) 频域

(b) Frequency domain

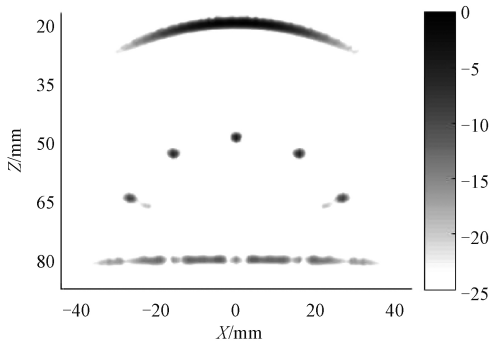
图 9　正弦曲面的 VS-SAFT 图像

Fig.9　VS-SAFT image of the surface with sinusoidal curve



(a) 时域

(a) Time domain



(b) 频域

(b) Frequency domain

图 10　半圆曲面的 VS-SAFT 图像

Fig.10　VS-SAFT image of the surface with semicircle curve

图 9 所示的 VS-SAFT 图像中树脂-铝界面的回波形状基本与试样 I 表面相吻合,能够直观通过超声图像观察到被检工件的表面形状及所处位置。同时,试样 I 中的 4 个边钻孔的深度均为 50 mm,在超声图像中呈直线排列。经测量,相邻缺陷回波最大幅值之间的间距大致为 20 mm,与实际情况一致。如图 10 所示,试样 II 的 VS-SAFT 图像中,声阻抗界面的回波形状呈半圆形。但是,由于试样两端曲面与声束传播方向之间的夹角较大,因

此图像中仅能在-30~30 mm 显示界面的形状。基于同样的原因,图像中位于两端的缺陷聚焦效果略有下降,导致其幅值和分辨率低于其余缺陷。不过,尽管端部缺陷质量略有下降,但图像中 5 个缺陷的位置均与实际情况符合良好。综上,无论是时域 VS-SAFT 还是频域 VS-SAFT,均能够准确的还原被检工件表面形状和缺陷位置,直观地显示非规则界面的实际形状及内部缺陷所在位置。

表 1 和 2 分别为 2 试样的时、频域 VS-SAFT 成像指标对比。结合图 9 和 10 可知,频域 VS-SAFT 图像中缺陷回波幅值较时域 VS-SAFT 图像中对应的缺陷回波幅值高 2.19~5.31 dB,表明频域 VS-SAFT 算法具有更优的聚焦效果。同时,对比相控阵绩效指数 API 可知,-25 dB 闸门内频域 VS-SAFT 图像中各缺陷回波的 API 值是时域 VS-SAFT 图像中对应缺陷的 49%~73%,表明频域 VS-SAFT 所得缺陷回波图像具有更高的分辨率。综上,频域 VS-SAFT 算法所得非规则工件的超声图像质量略优于时域 VS-SAFT 图像。根据文献[17],频域相位迁移成像实施过程中,波场被外推至某一深度时信号相位不会发生变化。相比之下,由于离散网格是非连续的,因而时域成像时信号的相位会随深度发生微小变化。因此,频域 VS-SAFT 成像能够达到更好的聚焦效果,使回波强度和分辨率进一步提高,更有利于缺陷的检测与判定。

表 1 正弦曲面的 VS-SAFT 成像质量对比

Table 1 Comparison of VS-SAFT image quality using time and frequency domain for the surface with sinusoidal curve

缺陷编号	最大幅值/dB		API	
	时域	频域	时域	频域
1	-9.67	-7.48	10.23	7.48
2	-7.87	-4.98	12.03	8.35
3	-7.76	-4.77	12.34	8.63
4	-9.49	-7.25	10.07	7.31

表 2 半圆曲面的 VS-SAFT 成像质量对比

Table 2 Comparison of VS-SAFT image quality using time and frequency domain for the surface with semicircle curve

缺陷编号	最大幅值/dB		API	
	时域	频域	时域	频域
1	-10.76	-7.06	13.23	7.88
2	-8.57	-4.68	14.63	7.33
3	-6.83	-3.86	13.55	6.64
4	-9.32	-4.01	14.58	7.54
5	-10.59	-6.92	13.09	7.67

为对比成像效率,本文在非并行运算条件下对时、频域的 VS-SAFT 成像速度进行了测试。结果表明,对于图 9 和 10 规模下的成像,主频 3.6 GHz 的单核心计算条件下,时域 VS-SAFT 成像所需时间在 91.21 s~93.54 s 之间。相比之下,频域 VS-SAFT 成像所需时间在 0.47 s~0.53 s 之间。上述结果表明,相比于时域 VS-SAFT,频域 VS-SAFT 能够通过高效相位迁移算法显著提高成像效率,并且能够在非并行硬件环境下达到了准实时成像的要求,若今后通过软件运算效率优化和硬件并行加速,频域 VS-SAFT 有望实现非规则表面工件的实时在线无损检测方法。

由对比测试结果可知,频域 VS-SAFT 显著提高成像效率,若采用并行运算,有望实现非规则表面工件的实时成像。根据相关文献,以 PSM 为基础的频域成像技术能够有效降低算法的复杂度,使成像效率显著提升。综上,与时域 VS-SAFT 相比较,频域 VS-SAFT 显著提高成像效率的同时使成像质量略有提高。

4 结 论

本文通过 VS 技术所测的虚拟阵元坐标点,建立了用于描述表面形状和位置的声速模型,进而实现了非规则工件的频域 VS-SAFT 成像。通过分析和研究得到如下结论。

1) 基于 VS 测量结果所建立的声速模型,能够准确描述非规则工件的表面形状及其与相控阵探头之间的相对位置,为解决非规则工件的频域 PSM 成像提供可靠数据。

2) 成像结果表明,频域 VS-SAFT 算法所得超

声图像能够直观显示非规则界面的实际形状及内部缺陷所在位置。

3) 相比于时域 VS-SAFT,频域 VS-SAFT 显著提高成像效率的同时使成像质量略有提高,有望为具有非规则表面工件的实时在线无损检测提供了一种新的思路和方法。

参考文献

[1] JENSEN J A, NIKOLOV S I, GAMMELMARK K L, et al. Synthetic aperture ultrasound imaging [J]. Ultrasonics, 2006, 44(8): e5-e15.

[2] 胡宏伟, 王泽湘, 彭凌兴, 等. 基于均方根速度的水浸超声合成孔径聚焦成像[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(2): 365-370.
HU H W, WANG Z X, PENG L X, et al. Immersion ultrasonic imaging using the synthetic aperture focusing technique based on the root mean square velocity[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(2): 365-370.

[3] 王平, 邹强鑫, 王林泓, 等. 一种融合动态孔径的聚焦延迟参数压缩方法 [J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(9): 2080-2086.
WANG P, ZOU Q X, WANG L H, et al. Focus delay

parameter compression method combined with dynamic aperture control [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(9): 2080-2086.

[4] WU S W, YANG K J. Non-recursive synthetic aperture imaging for multilayered media with irregular boundary [C]. IEEE International Ultrasonics Symposium, 2014 (IUS):1380-1383.

[5] HOYLE E, SUTCLIFFE M, CHARLTON P, et al. Virtual source aperture with real-time focussing of known geometry through dual-layered media [C]. The 56th Annual Conference of the Brittish Institue of Non-Destructive Testing, 2017: 164-168.

[6] JOHNSON J A, BARNA B A. Effects of surface-mapping corrections and synthetic-aperture focusing techniques on ultrasonic imaging [J]. IEEE Transactions on Sonics & Ultrasonics, 1983, 30(5): 283-294.

[7] JEUNE L L, ROBERT S, VILLAVERDE E L, et al. Multimodal plane wave imaging for non-destructive testing[C]. 2015 ICU International Congress on Ultrasonics, 2015, 70:570-573.

[8] 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.

[9] GAZDAG J, SGUAZZERO P. Migration of seismic data by phase shift plus interpolation [J]. Geophysics, 1984, 49(2): 124-131.

[10] 杨春.分层物体的合成孔径聚焦超声成像技术研究[D].北京:清华大学, 2014.
YANG CH. Study on synthetic aperture focused ultrasound imaging of layered objects [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014.

[11] MARGRAVE G F, FERGUSON R J. Wavefield extrapolation by nonstationary phase shift [J]. Geophysics, 1999, 64(4): 1067-1078.

[12] LUKOMSKI T. Non-stationary phase shift migration for flaw detection in objects with lateral velocity variations [J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2014, 56(9): 477-482.

[13] HOYLE E, SUTCLIFFE M, CHARLTON P, et al. Virtual source aperture imaging with auto-focusing of unknown complex geometry through dual layered media [J]. Ndt & E International, 2018(98):55-62.

[14] CAMACHO J, CRUZA J F, BRIZUELA J, et al. Automatic dynamic depth focusing for NDT [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2014, 61(4): 673-684.

[15] CAMACHO J, CRUZA J F. Auto-focused virtual source imaging with arbitrarily shaped interfaces [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2015, 62(11): 1944-1956.

[16] QIN K H, YANG CH, SUN F. Generalized frequency-domain synthetic aperture focusing technique for ultrasonic imaging of irregularly layered objects [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 2014, 61(1): 133-146.

[17] SKJELVAREID M H. Synthetic aperture ultrasound imaging with application to interior pipe inspection [D]. Tromso: University of Tromso, 2012.

[18] LUKOMSKI T. Full-matrix capture with phased shift migration for flaw detection in layered objects with complex geometry [J]. Ultrasonics, 2016,70: 241-247.

[19] 陈尧, 冒秋琴, 陈果, 等. 基于 Omega-K 算法的快速全聚焦超声成像研究 [J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(9): 128-134.
CHEN Y, MAO Q Q, CHEN G, et al. Research on high-speed total focusing ultrasonic imaging method based on Omega-K algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(9): 128-134.

[20] 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.

作者简介

陈尧,分别于 2008 年和 2011 年于辽宁工业大学获得学士学位和硕士学位,2016 年于大连理工大学获博士学位,现为南昌航空大学讲师,主要研究方向为弹性各向异性及非均质材料的超声成像检测及信号处理。
E-mail: chenyao1984@foxmail.com

Chen Yao received his B. Sc. degree and M. Sc. degree from Liaoning University of Technology in 2008 and 2011 respectively. He received his Ph. D. degree from Dalian University of Technology in 2016. He is a lecturer at Nanchang Hangkong University. His main research interests include ultrasonic imaging test and signal processing for the anisotropic and heterogeneous materials.

卢超(通信作者),1995 年于江西师大获学士学位,1998 年于中国科技大学获硕士学位,2009 年于中国铁道科学研究院获博士学位,现为南昌航空大学教授,主要研究方向为超声检测及仪器。
E-mail: luchaoniat@163.com

Lu Chao (Corresponding author) received his B. Sc. degree in physics from Jiangxi Normal University in 1995, M. Sc. degree in physics from University of Science and Technology of China in 1998, and Ph. D. degree from China Academy of Railway Sciences in 2009. He is a professor at Nanchang Hangkong University. His main research interests include ultrasonic non-destructive testing and instrument design.