DOI: 10. 19650/j. cnki. cjsi. J2311772

面向非规则界面双层介质超声全聚焦成像*

康亚轩,陈俊超,龚真珍,陈 尧

(南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室 南昌 330063)

摘 要:为解决盲测工况下双层介质全聚焦成像困难的问题,提出了一种基于虚拟源(VS)的全聚焦(TFM)成像技术。首先,利 用全矩阵数据集中的对角线信号一次界面回波飞行时间,在非规则双层介质界面建立一系列虚拟源点。通过对虚拟源点插值 或拟合处理得到实现非规则介质界面的重建。最后,通过重构的界面寻找可能的折射点,以满足盲测条件下非规则界面双层介 质 TFM 的成像条件。盲测条件下的结果表明,VS-TFM 图像中的非规则界面和缺陷位置与实际吻合。与基于虚拟源的合成孔 径聚焦技术(SAFT)相比,对于凸面试块,VS-TFM 图像的信噪比提升了 4.66~13.31 dB;对于凹面试块,VS-TFM 图像的信噪比 提升了 4.74~12.8 dB,且 API 值基本相同,成像时间几乎不增加。因此,本文所提方法将全聚焦成像的应用对象拓展至盲测工 况下非规则双层介质。

Ultrasonic total focusing method for double-layer media with irregular interface

Kang Yaxuan, Chen Junchao, Gong Zhenzhen, Chen Yao

(Key Laboratory of Non-Destructive Testing Technology, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: To solve the problem of total focusing imaging of double-layer media under blind measurement conditions, this article proposes a total focusing method (TFM) based on virtual source (VS). Firstly, a series of virtual sources are established on the irregular interface of the double-layer media by using the first echo time-of-flight of the diagonal signals of full matrix capture data. Then, the irregular interface of the double-layer media is reconstructed by interpolating or fitting the virtual sources on the interface. Finally, the reconstructed interface is used for possible refraction points to achieve the TFM imaging condition for the irregular interface of double-layer media. The results show that the position of the surface and flaws are both located correctly in TFM images under blind measurement conditions. Compared with the synthetic aperture focusing technique (SAFT) imaging technology based on virtual source (VS), the signal-to-noise ratio of the VS-TFM images is improved by 4. $66 \sim 13. 31$ dB in the convex specimen, and by 4. $74 \sim 12.8$ dB in the concave specimen, with nearly the same API values and minimal increase in imaging time. Therefore, the proposed method extends TFM imaging to double-layer media with irregular surfaces in blind measurement conditions.

Keywords: total focusing method; virtual source; blind measurement conditions; irregular interface; double-layer media

0 引 言

作为一种先进的超声成像检测方法,全聚焦(total focusing method, TFM)技术可通过全孔径后处理图像重 建实现整个检测区域的逐点聚焦^[1-5],其成像质量显著优

于传统超声成像检测技术,已被广泛应用于航空^[6]、船 舶^[7]、管道^[8]等工业领域。

尽管具有传统相控阵成像技术无法比拟的优势,但 现有图像重建算法限制了 TFM 成像技术的进一步发展 和应用。TFM 是一种基于延时叠加(delay and sum, DAS)算法的超声图像重建技术,仅能对声速固定的单一

*基金项目:国家自然科学基金(62161028,12064001)、江西省省自然科学基金杰出青年基金(20232ACB214012)项目资助

收稿日期:2022-08-08 Received Date: 2022-08-08

介质进行聚焦处理。在实际检测中,大部分构件具有复杂曲面结构,传统刚性超声探头不能与构件表面完全贴合,无法形成有效检测。为保证超声波进入工件,通常采用水浸^[9]或楔块^[10]等方式进行耦合,但同时形成了双层介质。

从物理属性上看,分层介质由不同声速和弹性特性的物质构成,所形成的介质界面会造成声波传播特性的改变。当分层介质为被检对象时,声束在相邻介质之间形成的声阻抗界面传播时会发生折射,声束传播路径、介质声速、甚至是声传播类型均可能发生改变,导致常规延时叠加算法难以准确地计算出声传播时间^[11-12],进而引起 TFM 图像中缺陷的失真和错位,导致成像检测的失效。

为解决上述问题,研究者们围绕双层介质全聚焦成 像检测问题,从声阻抗界面上的超声波传播特性出发,分 析了双层介质界面处声波入射点难以确定的原因^[13-14]。 基于费马原理,掌握了非规则双层介质上超声波的声传 播规律,并根据费马原理得到了求解双层介质声束入射 点的一般表达式,逐步建立了面向非规则双层介质全聚 焦成像的 DAS 算法,并实现了界面几何轮廓和探头位置 信息已知工况下的全聚焦成像。

然而,实际无损检测中,经常出现被检构件的几何轮 廓和探头位置未知的检测工况,即非规则双层介质的盲 测工况。例如,工件坯料的轮廓和图纸不完全匹配,或工 件夹持偏差,均会导致图纸提供的信息与实际不符,导致 全聚焦图像中出现缺陷错位和幅值严重下降^[15]。因此, 非规则分层介质全聚焦成像的实现,还需要在实施 TFM 成像前知晓界面的几何信息和探头位置^[16-18]。

如上所述,如何快速测量分层介质的界面,是非规则 双层介质全聚焦成像的关键所在,为盲测环境下的快速 TFM 成像提供准确的界面信息条件。

Zimermann 等^[19]提出的界面重建提取方法在成像中 仅考虑耦合剂声速将图进行二值化提取界面,该种方法 成像速度慢,扫查效率低。Hopkins 等^[20]提出的表面自 适应技术通过反复发射,发射波前与所对轮廓一致,从发 射延时中提取界面,该方法探头需要在扫查点处停止,扫 查效率低,稳定性差。作为一种快速测量界面的超声方 法,虚拟源(virtual source, VS)技术可利用相控阵探头接 收信号的一次界面回波飞行时间,在非规则双层介质界 面建立一系列虚拟源点,能快速进行界面轮廓信息的测 量且该方法探头不需要在扫查点处停止,扫查效率高,获 取界面速度快。近年来, VS 技术已与合成孔径聚焦 (synthetic aperture focusing technique, SAFT)技术相结 合,实现了盲测工况下的非规则双层介质超声成像^[18,21]。

为将 TFM 成像的适用范围拓展至非规则双层介质, 本文提出了一种基于虚拟源的全聚焦成像技术。利用凹 面和凸面铝合金试块验证 VS 所测界面轮廓的有效性,通 过对虚拟源拟合的界面与真实界面的差异、成像图像中 界面和缺陷的位置进行分析,并对比 VS-SAFT 和 VS-TFM 成像质量,讨论所提算法能否满足盲测工况下的非 规则双层介质全聚焦成像要求。

1 原 理

1.1 双层介质全聚焦成像技术

全聚焦成像技术的流程可分为信号采集、声束路径 计算以及后处理成像 3 部分。首先在信号采集中,TFM 所基于的数据集是全矩阵数据 (full matrix capture, FMC)。FMC 的采集过程为 N 个阵元相控阵探头通过一 发多收模式可得到 N×N 条 A 扫信号,组成 FMC 矩阵数 据。例如, A_{nN} 表示阵元 n 发射超声波,阵元 N 接收缺陷 回波得到的 A 扫信号。

其次在声束路径计算时,当被检构件的界面为规则界面时,构件能够直接与探头耦合,此时声束路径的 计算可通过发射阵元、像素点、接收阵元坐标以及勾股 定理进行求解。当被检构件的界面为非规则界面时, 为保证良好的耦合效果需要在探头与界面中间加入定 制楔块或者水。而在使用水浸检测或楔块检测后,虽 然水或楔块能够与表面完全耦合,但由于水或楔块和 被检构件的声阻抗有一定差异,超声波会在界面处发 生折射和反射,声束传播路径将发生改变。此时,仅靠 发射阵元、像素点、接收阵元坐标以及勾股定理不能解 决双层介质中声束路径的计算。如果已知界面与阵元 间的位置关系,在声束路径计算中加入费马原理,找到 真实声束路径,如图1所示,则能实现双层介质下的全 聚焦成像。



图 1 双层介质声束路径计算 Fig. 1 Acoustic beam path calculation of double-layer media

当界面位置已知时,双层介质 TFM 的声束路径具体 计算过程为:在图 1 中,建立平面直角坐标系,则阵元 R_n 、 R_m 和界面点的位置坐标已知。取成像区域某一像素 点坐标为(x, z),则该声束路径对应的路程 d_{nm} 可用勾股 定理进行计算:

$$\begin{cases} d_{1n} = \sqrt{(x_n - x_{Rn})^2 + (z_n)^2} \\ d_{2n} = \sqrt{(x - x_n)^2 + (z - z_n)^2} \\ d_{1m} = \sqrt{(x_m - x_{Rm})^2 + (z_m)^2} \\ d_{2m} = \sqrt{(x - x_m)^2 + (z - z_m)^2} \\ d_{mn} = d_{1n} + d_{2n} + d_{1m} + d_{2m} \end{cases}$$
(1)

设第一、二介质声速分别为 c_1 、 c_2 ,计算出发射阵元 R_n -可能折射点-像素点-可能折射点-接收阵元 R_m 路径 对应的传播时间 t_m 为:

$$t_{nm} = t_1 + t_2 = \frac{d_{1n} + d_{1m}}{c_1} + \frac{d_{2n} + d_{2m}}{c_2}$$
(2)

通过循环以上计算,得到若干条经过发射阵元 R_n -像素点-接收阵元 R_m 的可能声束传播路径对应的传播时间。根据费马原理,在所有可能的路径中,声波会沿用时最短的路径传播。取其中的最小值,得到真实声束传播路径对应的时间 t_{nm} ,即在双层介质中,超声波经阵元 R_n 发射,在工件假设缺陷处产生回波,由阵元 R_m 接收回波所需的时间。

在 FMC 矩阵数据中找到对应发射-接收对的 A 扫信号,通过延时叠加算法,叠加 N×N 条 A 扫信号后,可得到 该像素点(x, z)的总信号幅值:

$$I_{TFM}(x,z) = \sum_{n=1}^{N} \sum_{m=1}^{N} S_{nm}(t_{nm})$$
(3)

式中: $I_{TFM}(x, z)$ 表示像素点(x, z)处的幅值,对成像区域的每一个像素点重复以上计算,最终得到双层介质的全聚焦成像图像。

1.2 基于虚拟源的全聚焦成像技术

双层介质的全聚焦技术基于界面与阵元间的位置关系已知的条件,当关系未知时,双层介质的全聚焦技术无 法实现声束路径的计算,不能进行后处理成像。通过引入 虚拟源算法,就能重构界面,实现盲测工况下全聚焦成像。

基于虚拟源的全聚焦成像技术流程上分为界面重构、双层介质全聚焦成像两部分。其中界面重构的原理为:当两阵元之间的距离很近且被检构件表面曲率半径很大时,取相邻阵元一次最大回波位置处球面波前的公切线,即可得到界面信息。虚拟源全聚焦成像技术(VS-TFM)具体步骤如下:

 (界面重构):依次激发 N 个阵元,所有阵元接收 采集 N×N 组 A 扫信号,得到 FMC 矩阵数据如图 2 步骤 1)所示。取 FMC 矩阵对角线数据,即各阵元自发 自收采集得到的 N 条 A 扫信号,用于重构界面的计算。



图 2 VS-TFM 流程 Fig. 2 VS-TFM process

取相邻阵元界面回波信号, R_n 、 R_{n+1} 分别表示阵元 R_n 及其相邻阵元 R_{n+1} ,P、Q分别表示声波从两阵元到界 面的垂直入射点。 R_n 、 R_{n+1} 的球面波前与界面相切于P、 Q。当相邻两阵元的间隔很小且界面曲率半径很大时, $R_n P 与 R_{n+1} Q$ 近似平行,可将 PQ 近似看作界面的局部 轮廓。

作 $R_n I$ 垂直于 $R_{n+1}Q$ 交于点 I,已知相邻阵元间距 p, $R_{n+1}I$ 可用第一介质声速 c_1 以及阵元 R_n 、 R_{n+1} 界面回波时 间差计算,则角α。可表示为:

$$\alpha_n = \arcsin\left(\frac{R_{n+1}Q - R_nP}{p}\right) = \arcsin\left(\frac{c_1}{2p}(T_{n+1} - T_n)\right)$$
(4)

式中: c_1 为第一介质声速, T_{n+1} 和 T_n 分别为阵元 R_{n+1} 和 R_n 接收一次界面回波对应的时间。已知阵元 R_{n+1} 的坐标,则可通过对应的三角函数关系表示虚拟源点Q的坐标:

$$\begin{cases} x_Q = x_{R_{n+1}} - R_{n+1}Q \cdot \sin\alpha_n \\ z_Q = z_{R_{n+1}} - R_{n+1}Q \cdot \cos\alpha_n \end{cases}$$
(5)

依次激励 N 个阵元,可得到 N-1 个虚拟源点,进行 拟合处理后则获得界面信息。

2)(双层介质全聚焦成像):重构出界面后,将 式(1)中的界面点坐标替换为虚拟源点坐标,计算出真 实声束路径对应的时间,真实路径如图2步骤2)中的 实线箭头所示。根据1.1节双层介质全聚焦成像原 理,已知界面信息,则可实现全聚焦成像。基于虚拟源 的全聚焦成像技术通过虚拟源算法重构未知界面,使 双层介质全聚焦成像技术在盲测工况下也能适用,实 现"边测、边成像"功能。

2 实 验

2.1 实验数据采集平台搭建

图 3(a)为数据采集平台,其中超声采集系统为美国 Verasonics 公司的 Vantage32LE 采集系统,通过驱动相控 阵探头收发采集。实验采用水浸检测,实验使用的探头 型号为 5L64-0.6×10,如图 3(b)所示,具体参数如表 1 所示。实验平台由机械臂、水槽以及实验试样组成,如 图 3(c)所示。



(a) 信号采集平台 (a) Signal acquisition platform



(b) 超声相控阵探头 (b) Ultrasonic array probe



(c) 实验平台 (c) Experiment platform

图 3 实验及数据采集平台

Fig. 3 Experiment and data acquisition platform

表1 探头的主要参数

Table 1 The main parameters of probe

参数	阵元宽度 /mm	阵元长度 /mm	阵元间距 /mm	中心频率 /MHz	阵元数
值	0. 55	10	0.05	5	64

2.2 实验过程

实验中使用凸面三孔试样和凹面三孔试样,如 图 4(a)和(b)所示,探头与工件曲面保持 15 mm 水层。 凸面试样截面为半径 60 mm 的半圆,凹面试样截面为矩 形加工一个凹面所得,该凹面的曲率半径为 200 mm。两 试块均加工 3 个 Φ2 大小的边钻孔,与凸面最高点或凹 面最低点保持 30 mm 纵向距离,相邻两孔之间的距离为 20 mm,从左到右依次命名为 1~3 号缺陷。



Fig. 4 Diagrams of experimental specimens

mm

将被检试样浸入水中,操控机械臂夹持超声探头对 被检构件进行全矩阵数据采集,利用图 2 所示的成像流 程实现面向非规则分层介质的全聚焦成像。为避免实验 偶然性,验证盲测条件下虚拟源全聚焦成像技术的适用 性,本实验通过改变耦合水层的深度,即设置 10、15、20、 25 mm 的水层深度,对凸面试样和凹面试样进行界面重 构和缺陷成像。对重构界面与真实界面的误差以及后处 理成像效果进行分析,判断图像中的非规则界面和缺陷 位置与实际是否吻合,并对 VS-SAFT、VS-TFM 成像效果 进行比较。

3 结果分析

3.1 误差分析

在图 5 中,线条为真实界面,圆圈为通过虚拟源算法得到的虚拟源点,由圆圈组成的界面为对虚拟源点进行插值或拟合处理重建的非规则介质界面,其中图 5(a)~(d)和(e)~(h)分别为凸面试样和凹面试样在不同耦合水层下的重构界面与真实界面误差图。通过观察易知,在不同耦合水层下,无论是凸面试样还是凹面试样,重构界面和真实界面基本吻合。可知,通过虚拟源算法重构的界面较准确,与真实界面的误差很小。为更精准地分析两者之间的误差,可参考误差数据如表 2 所示。





图 5 重构界面与真实界面误差图

Fig. 5 Errors diagrams of reconstruction and real interface

表 2 重构界面与真实界面误差

Table 2 Errors between reconstruction and real interface

试样类型	水层深度	最小误差	最大误差	平均误差
	10	0.004	0. 109	0.026
.П. उस	15	0.004	0. 137	0.080
口囲	20	0.004	0.106	0.060
	25	0.040	0. 148	0.077
	10	0.076	0. 159	0. 119
	15	0.031	0. 205	0. 148
凹围	20	0.028	0.073	0.040
	25	0.051	0.094	0.082

通过观察表2可知,在水层深度10~25 mm范围内, 通过虚拟源算法重建的界面,其最小误差可达到 0.004 mm,最大误差不超过0.205 mm,平均误差在 0.026~0.148 mm范围内,界面误差均不超过5 MHz 探 头在铝中的1/4 波长0.3 mm,能够在TFM 重建过程中不 会引起信号相位的畸变,充分满足成像的要求。因此,对 测量的虚拟源点进行拟合后,重建界面的精度能够满足 后期全聚焦成像的要求。

3.2 试样缺陷成像结果

基于虚拟源的合成孔径聚焦技术和全聚焦成像技术,对凸面试样与凹面试样的超声后处理成像结果如图6所示,其中图6(a)~(h)为VS-SAFT实验成像图,图6(i)~(p)为VS-TFM实验成像图。观察可知,无论是凸面试样还是凹面试样,在水层深度10、15、20、25 mm 左右,即被检构件表面在距离探头10、15、20、25 mm 左右,即被检构件表面在距离探头10、15、20、25 mm 处。3个边钻孔分布在z轴40、45、50、55 mm 处,即缺陷分布在距离探头40、45、50、55 mm 处,说明基于虚拟源算法重构的界面与真实界面较为吻合,所重建的全聚焦图像中缺陷和界面的位置得到了较好的还原。通过对比VS-TFM和VS-SAFT的缺陷成像效果可知,VS-TFM





成像图杂波少,缺陷成像效果清晰,VS-SAFT 成像图杂 波多,对缺陷判断干扰较大,说明 VS-TFM 成像质量高 于 VS-SAFT。当水层变化时,VS-TFM 成像效果无明显 变化,VS-SAFT 成像效果随水层变化而变化,在凹面试 件、水层 10 mm 条件下,缺陷几乎难以发现,说明 VS-TFM 抗干扰能力强于 VS-SAFT。综上,VS-TFM 图像中 的非规则界面和缺陷位置与实际吻合且成像质量高于 VS-SAFT。

3.3 评价指标

为了更加直观地衡量成像质量,引入阵列性能参数 指标(array performance indicator, API)和信噪比(signal to noise rate, SNR)对图像进行评价。API指标是指所选 成像区域中缺陷的最大幅值降低 50% 时,缺陷覆盖的面积与检测声波波长的平方之比,反映图像分辨率。其表达式为:

$$API = \frac{A_{-50\%}}{\lambda^2} \tag{6}$$

API 值越小,成像分辨率越高,对缺陷的识别能力 越强。

SNR 指标用来评价图像中缺陷信号与其周围非缺陷 信号之间的幅值差异等级。其表达式为:

$$SNR = 20 \lg \frac{I_{mean(signal)}}{I_{mean(noise)}}$$
(7)

SNR 值越大,缺陷信号和噪声信号之间的差值就越大,在较小动态显示范围内图像越清晰。

通过分析 API 指标和 SNR 指标,可对图像成像质量 进行客观评估,表 3、4 分别为凸面试样和凹面试样缺陷 实验成像图的 API 和 SNR。

表 3 凸面试样缺陷成像图的 API 和 SNR 计算结果

 Table 3
 The API and SNR calculation results of the defect imaging diagrams of the convex specimen

成像 方法	缺陷 深度 /mm	API			SNR		
		1号 缺陷	2 号 缺陷	3号 缺陷	1号 缺陷	2 号 缺陷	3 号 缺陷
	10	1.19	1.08	1.23	12.70	16.60	17.85
NG CAPE	15	1.23	1.20	1.15	17.80	19.30	18.90
VS-SAFT	20	1.36	1.10	1.18	18.30	20.60	19.37
	25	1.43	1.08	1.23	18.31	20.68	19. 47
	10	1.17	1.04	1.23	19. 50	29.91	22. 51
VS TEM	15	1.20	1.20	1.13	27.94	29.68	29.30
VS-1FM	20	1.35	1.01	1.17	29.66	31.90	30.76
	25	1.45	1.04	1.23	28.76	30.86	30. 16

根据表 3 和 4 数据可知,水层深度 10~25 mm 范围 内,试样缺陷的 VS-SAFT 与 VS-TFM 成像图 API 值基本 相同,差值在 0.02~0.11 范围内, SNR 值具有明显差异, VS-TFM 成像图相较 VS-SAFT 成像图提高了 4.66~ 13.31 dB。其中,10 mm 水层处由于二次界面波影响导 致凹面试样缺陷被覆盖,统计无意义。综上,与 VS-SAFT 相比, VS-TFM 能够保持成像图的 API 值并提高 SNR 值, 从而提高缺陷成像质量。

除了对比 VS-SAFT 和 VS-TFM 缺陷成像质量,本文 还对两种方式的成像所需时间 t 进行比较。将 t 划分为 3 部分,即 VS 计算时间 t_1 、最短路径 d 计算时间 t_2 以及 成像时间 t_3 ,实验设备电脑配置的 CPU 为 AMD, Ryzen 9 7950X 16 核心。成像总时间如表 5 所示。

表 4 凹面试样缺陷成像图的 API 和 SNR 计算结果 Table 4 The API and SNR calculation results of the defect

imaging diagrams of the concave specimen

成像 方法	缺陷 深度 /mm	API			SNR		
		1号 缺陷	2 号 缺陷	3 号 缺陷	1号 缺陷	2 号 缺陷	3 号 缺陷
	10	-	-	-	-	-	-
NO CADE	15	1.08	0.96	1.04	25.60	19.40	18. 94
VS-SAFT	20	1.15	0.76	0.88	18.68	23.58	23.56
	25	1.18	0.80	0.92	18.70	23.95	24.07
VS-TFM	10	0. 98	0.66	0. 91	14.07	29.84	21.85
	15	1.04	0.94	1.04	30. 34	32.20	28.65
	20	1.10	0.76	0.88	26.85	32.73	31. 83
	25	1.07	0. 79	0.91	26.93	32.57	31.17

表 5 成像总时间

	Table 5 Total	imaging time	s
成像方法	t_1	t_2	t_3
VS-SAFT	0.011	0. 203	0.000 5
VS-TFM	0.012	0. 201	0.033 0

通过观察表 5 可知, VS-TFM 与 VS-SAFT 计算虚拟 源、最短路径所需时间相等,由于 VS-TFM 成像时所需 处理信号多于 VS-SAFT,计算量的增加导致对应的成像 时间 t_3 也会增加。而由于 t_2 为主要时间,即使 VS-TFM 对应的 t_3 为 VS-SAFT 的 64 倍,但在整体时间上二者差 别较小。 VS-TFM、VS-SAFT 缺陷成像总时间分别为 0.246、0.214 5 s,二者时间相差仅为 0.031 5 s。而通 过对比二者的成像质量分析易知, VS-TFM 的成像质量 要明显优于 VS-SAFT。所以 VS-TFM 的成像质量 要明显优于 VS-SAFT。所以 VS-TFM 相对于 VS-SAFT 而言,在保证成像质量的同时并不会大量的增加算法 计算时间。随着计算机设备的发展, VS-TFM 的计算时 间会进一步缩减。

4 结 论

本文提出了一种基于虚拟源的全聚焦成像技术,解决了盲测工况下双层介质全聚焦成像困难的问题。在水 浸检测下,通过对虚拟源点插值或拟合处理重建的界面 误差均不超过 0.205 mm,平均误差在 0.026~0.148 mm 范围内。根据重构的界面进行双层介质全聚焦成像,获 得的成像图中的非规则界面和缺陷位置较准确。通过对 比 VS-TFM 与 VS-SAFT 的成像质量与成像总时间可知, VS-TFM 提高了 SNR 值, API 值基本相同,成像时间几乎 不增加。综上,该技术通过探头信息和回波信号进行界 面重构,能够实现自适应检测,有望在将来与自动化设备 结合进行智能化超声检测。

参考文献

- JENSEN J A, NIKOLOV S I, GAMMELMARK K L, et al. Synthetic aperture ultrasound imaging [J]. Ultrasonics, 2006, 44: e5-e15.
- [2] BULAVINOV A, JONEIT D, KRÖNING M, et al. Sampling phased array a new technique for signal processing and ultrasonic imaging [J]. Berlin, ECNDT, 2006, DOI:10.1023/A:1006231805030.
- [3] HOLMES C, DRINKWATER B W, WILCOX P D. Postprocessing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation [J]. Ndt & E International, 2005, 38(8): 701-711.
- [4] 陈明,陈尧,肖树坤,等.基于环形统计矢量阈值加 权的上表面开口裂纹横波全跨全聚焦成像[J].仪器 仪表学报,2023,44(4):52-60.

CHEN M, CHEN Y, XIAO SH K, et al. Shear wave full-skip total focusing method of upper surface-breaking cracks based on circular statistic vector threshold weighting[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(4): 52-60.

 [5] 黄文大, 汪同和, 孙岳. 大口径厚壁奥氏体不锈钢管 道焊接接头的 3D 全聚焦相控阵超声检测[J]. 无损 检测, 2022, 44(1): 38-41.

HUANG W D, WANG T H, SUN Y. 3D total focusing phased array ultrasonic testing of welded joints of large diameter thick-walled austenitic stainless steel pipes[J]. Nondestructive Testing, 2022, 44(1): 38-41.

 [6] 关山月, 汪小凯, 华林, 等. 航空机匣环件曲面结构 超声全聚焦检测与缺陷定量方法[J]. 中国机械工 程, 2023, 34(8): 892-898.

GUAN SH Y, WANG X K, HUA L, et al. Ultrasonic TFM inspection and quantitative method of defects for curved surface structures of aeroengine casing rings[J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(8): 892-898.

[7] 佟世琪,赵鹏,王月兵,等. 基于超声相控技术的船 舶吃水测量方法[J]. 声学技术,2023,42(2): 192-198.

> TONG SH Q, ZHAO P, WANG Y B, et al. Measurement method of ship draft based on ultrasonic phase control technology [J]. Technical Acoustics,

2023, 42(2): 192-198.

[8] 肖权旌,王强,许卫荣,等.高密度聚乙烯管道热熔接头 3D 全聚焦成像试验分析[J].压力容器,2022,39(12):62-70.
 XIAO Q J, WANG Q, XU W R, et al. Experimental

analysis of 3D total focusing method imaging of hot melt joint of hight-density polyethylene pipe [J]. Pressure Vessel Technology, 2022, 39(12): 62-70.

- [9] LI Y, WANG Z, PENG C, et al. Research on forward compensation algorithm of water-immersed total focusing ultrasound imaging[C]. 2018 IEEE Far East NDT New Technology & Application Forum (FENDT), IEEE, 2018: 190-194.
- [10] BALVANTÍN A J, ROJAS-MANCERA E, RAMIREZ V A, et al. The suitability of using 3D PLA printed wedges for ultrasonic wave propagation[J]. IEEE Access, 2020, 8: 15205-15209.
- [11] 罗斯. 固体中的超声波[M]. 科学出版社, 2004. LUO S. Ultrasound in solids[M]. Science Press, 2004.
- [12] 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.
- [13] WESTON M, MUDGE P, DAVIS C, et al. Time efficient auto-focussing algorithms for ultrasonic inspection of dual-layered media using full matrix capture [J]. Ndt & E International, 2012, 47: 43-50.
- [14] 胡宏伟, 杜剑, 李洋, 等. 基于稀疏矩阵的两层介质 超声相控阵全聚焦成像[J]. 机械工程学报, 2017, 53(14): 128-135.
 HUHW, DUJ, LIY, et al. Two-layer medium ultrasonic phased array total focusing method imaging based on sparse matrix[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(14): 128-135.
- [15] 赵新玉,李鹏飞,段晓敏,等.曲面工件自动超声检测轨迹规划[J].机械工程学报,2022,58(24):
 41-48.

ZHAO X Y, LI P F, DUAN X M, et al. Motion planning of curved surface for automatic ultrasonic testing [J].Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58 (24): 41-48.

[16] 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.

- [17] LUKOMSKI T. Full-matrix capture with phased shift migration for flaw detection in layered objects with complex geometry[J]. Ultrasonics, 2016, 70: 241-247.
- [18] MAO Q, CHEN Y, CHEN M, et al. A fast interface reconstruction method for frequency-domain synthetic aperture focusing technique imaging of two-layered systems with non-planar interface based on virtual points measuring [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2020, 39: 1-10.
- [19] ZIMERMANN R, MOHSENI E, VITHANAGE R K W, et al. Increasing the speed of automated ultrasonic inspection of as-built additive manufacturing components by the adoption of virtual source aperture[J]. Materials & Design, 2022, 220: 110822.
- [20] HOPKINS D L, BRASSARD M, NEAU G A, et al. Surface-adaptive ultrasound (SAUL) for phased-array inspection of composite specimens with curved edges and complex geometry [C]. AIP Conference Proceedings, American Institute of Physics, 2013, 1511 (1): 809-816.
- [21] 陈尧, 冒秋琴, 石文泽, 等. 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[J]. 仪器仪表学 报, 2019, 40(6): 48-55.

CHEN Y, MAO Q Q, SHI W Z, et al. Frequency domain synthetic aperture focusing technique for irregular two-layered medium based on visual source[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(6):48-55.

作者简介



康亚轩,现为南昌航空大学本科生,专 业为测控技术与仪器,主要研究方向为超声 后处理成像。

E-mail: 2963712700@ qq. com

Kang Yaxuan is an undergraduate at Nanchang Hangkong University. Her major is

Measurement and Control Technology and Instruments. Her main research interest is ultrasound post-processing imaging.



陈尧(通信作者),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得博士学 位,现为南昌航空大学副教授,主要研究方 向为超声成像检测及超声信号处理。

E-mail: chenyao1984@ foxmail. com

Chen Yao (Corresponding author) received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Liaoning University of Technology in 2008 and 2011, and received his Ph. D. degree from Dalian University of Technology in 2016. He is currently an associate professor at Nanchang Hangkong University. His main research interests include ultrasonic imaging detection and ultrasonic signal processing.