

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2412578

曲面构件阵列超声频域逆时偏移成像方法研究*

朱甜甜¹, 周正干¹, 周文彬¹, 赵永峰², 李超²

(1. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院 北京 100191; 2. 国网河南省电力公司电力科学研究院 郑州 450052)

摘要: 曲面构件因其独特的结构和力学特性, 广泛应用于航空航天领域。然而, 未知的曲面形状导致阵列超声检测时, 声传播延时计算不准确, 影响缺陷检测的精度。为解决这一问题, 提出了一种不依赖声传播延时的适用于曲面构件的阵列超声频域逆时偏移成像方法。首先, 利用阵列超声全聚焦方法对曲面构件表面进行成像; 然后, 对成像结果进行阈值分割和曲线拟合, 重构构件表面形状并建立二维声学特性分布模型; 最后, 通过频域逆时偏移将来自超声波源的正向传播波场与缺陷反射体的反向传播波场进行互相关成像。实验结果表明, 所提出的方法可以有效实现曲面构件内部缺陷成像, 与传统的阵列超声全聚焦方法相比, 缺陷的成像质量提升66%以上, 缺陷定量平均误差降低37.04%以上。

关键词: 曲面构件; 阵列超声检测; 频域逆时偏移成像

中图分类号: TB553 TH878 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Research on the curved-surface components array ultrasonic frequency-domain reverse time migration imaging method

Zhu Tiantian¹, Zhou Zhenggan¹, Zhou Wenbin¹, Zhao Yongfeng², Li Chao²

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

2. State Grid Henan Electric Power Company Electric Power Science Research Institute, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Curved-surface components are commonly utilized in the aerospace industry due to their unique structural and mechanical properties. However, the irregular shapes of these components pose challenges in accurately calculating ultrasonic propagation delays during array ultrasonic testing, which can impact defect detection precision. This article proposes a novel frequency-domain reverse time migration imaging technique for array ultrasonic testing of curved surface components that eliminates the need for relying on ultrasonic propagation delays. The method involves utilizing the total focusing method to create an image of the curved surface component, followed by threshold segmentation and curve fitting to reconstruct the surface shape and create a two-dimensional acoustic property distribution model. Subsequently, frequency-domain reverse time migration is used to correlate the forward and backward propagation wavefields, resulting in an internal image of the curved surface component. Experimental results on curved samples show that this method successfully enables internal defect imaging of curved-surface components. Compared with the traditional ultrasonic full-focus method, the imaging quality is improved by more than 66%, and the average quantitative error of defects are reduced by more than 37.04%.

Keywords: curved-surface component; phase array ultrasonic testing; frequency-domain reverse time migration

0 引言

曲面构件由于其独特的结构和力学特性, 作为关键部件被广泛应用于航空航天、能源、电力装备等重点领

域^[1]。曲面构件受加工工艺与复杂机械载荷或极端工作环境的影响, 容易产生微裂纹、气孔、夹杂等缺陷, 降低其服役寿命和安全性^[2]。为了确保关键曲面构件的安全和性能, 对构件内部缺陷进行有效检测具有重要研究意义^[3-4]。

阵列超声检测技术因其高灵敏度和对各种缺陷的直观检测,逐渐成为关键曲面构件的主要检测方法。目前,针对曲面构件阵列超声检测方法主要分为3类,分别是基于多轴机器人辅助超声检测^[5-6];基于柔性探头^[7]、轮式探头^[8]的阵列超声检测;水浸和异形楔块^[9-10]的阵列超声检测。其中,基于虚拟源技术的水浸阵列超声全聚焦(total focusing method, TFM)方法在曲面构件检测中取得了显著效果^[11-12]。然而,这些方法的检测结果均依赖于曲面构件中声传播延时的计算^[13]。

逆时偏移(reverse time migration, RTM)算法是基于波动方程的成像算法,最早起源于地震波成像,因其成像精度高且不受声波倾角限制,近年来逐渐应用于超声检测领域。Rao等^[14]采用弹性波RTM对金属块中不规则形状的缺陷进行成像,将基于点云数据的表面重建技术与弹性波RTM结合,实现对垂直表面结构的超声成像^[15]。然而,该类应用均在单介质中成像,且声波入射面均为平面构件。Liu等^[16]将逆时偏移技术应用于混凝土结构超声成像,实现内部缺陷检测,然而,该方法是在时域中进行的,成像过程需要对每个时间节点进行迭代计算,需要大量的计算时间。相比时域逆时偏移,频域逆时偏移(frequency-domain reverse time migration, FRTM)包含全频段数据,可以有效避免低频缺失问题,且每个频段可以实现并行运算,使得该方法可以有效提高检测效率。Wang等^[17]利用FRTM实现对铝块底部开口裂纹的成像检测;Ji等^[18]首次将FRTM方法运用在多介质曲面构件中,实现对曲面构件的缺陷检测。但是,由于FRTM依赖介质的声学特性(声速、密度等)分布模型,当曲面复杂或未知的情况下难以直接运用FRTM进行曲面构件成像。

因此,本文基于FRTM提出一种曲面构件自适应检测成像方法。采用阵列超声水浸全聚焦检测对耦合曲面进行成像,利用数据拟合算法实现耦合曲面重建并建立声学特性模型,使用FRTM实现曲面构件内部缺陷检测。对曲面试样进行阵列超声检测,试验验证了上述方法的准确性。

1 FRTM 理论分析

FRTM通过将来自超声波源的正向传播波场与缺陷反射体的反向传播波场进行互相关来生成图像,主要有3个步骤:1)源波场的频域正向外推,2)在接收器位置接收信号的频域反向外推,3)利用互相关成像条件进行成像。

1.1 频域正向外推

在线性弹性理论框架下,频域二维各向同性介质中

声波方程可以表示为:

$$-i\omega P(x, z, \omega) = K(x, z) \times \frac{\partial Q(x, z, \omega)}{\partial x} + K(x, z) \times \frac{\partial R(x, z, \omega)}{\partial z} + S(x, z, \omega) \quad (1)$$

$$-i\omega Q(x, z, \omega) = b(x, z) \frac{\partial P(x, z, \omega)}{\partial x} \quad (2)$$

$$-i\omega R(x, z, \omega) = b(x, z) \frac{\partial P(x, z, \omega)}{\partial z} \quad (3)$$

其中, x 和 z 表示笛卡尔坐标系下介质二维空间位置, ω 表示角频率, $P(x, z, \omega)$ 表示二维声压波场, $Q(x, z, \omega)$ 和 $R(x, z, \omega)$ 分别表示横向和纵向质点速度, $b(x, z)$ 表示密度的倒数, $K(x, z)$ 为体积模量, $S(x, z, \omega)$ 为震源项。

由于在实际声传播过程中,计算的区域是有限的,容易在计算区域边界位置出现反射回波,为了模拟声波在半无限介质中的传播,需要在计算区域四周添加完美匹配层(perfect matching layers, PML),在PML层内的声波衰减表达式为:

$$\gamma(\tilde{\chi}) = c_{\text{PML}} \left[1 - \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{\tilde{\chi}}{d}\right) \right] \quad (4)$$

其中, d 为PML区域的网格宽度, $\tilde{\chi}$ 为PML内部位置的局部坐标,表示距离PML边界的长度,系数 c_{PML} 表示阻尼系数,通常通过实验选择经验值。

在频域中,可将二维声波方程写作阻抗矩阵表达式:

$$A(\omega)P(\omega) = S(\omega) \quad (5)$$

其中, $A(\omega)$ 表示 $L \times L$ 的复数类型的声阻抗稀疏矩阵,可通过引入有限差分方法进行求解,其中 L 为二维空间离散点总数; $P(\omega)$ 和 $S(\omega)$ 可用 $L \times 1$ 维的列向量表示。

式(4)中震源项 $S(\omega)$ 已知,由激励声波决定,声阻抗系数矩阵 $A(\omega)$ 由介质声学特性决定,因此,二维频域声波正向传播过程即为求解二维声压波场 $P(\omega)$ 的过程。对于该方程求解,目前主要采用两种方法,分别为直接法和共轭梯度法。其中共轭梯度法计算效率低下,难以求解;直接法以LU分解为理论基础,对声阻抗系数矩阵进行分解,消除矩阵中大量零元素,提高了计算效率。因此,频域二维声波方程可以表示为:

$$L(\omega)U(\omega)[P_1(\omega), P_2(\omega), \dots, P_N(\omega)] = [S_1(\omega), S_2(\omega), \dots, S_N(\omega)] \quad (6)$$

其中, N 是震源数量, $L(\omega)$ 和 $U(\omega)$ 为 $A(\omega)$ 经过LU分解后的下三角矩阵和上三角矩阵, $S_i(\omega)$ 和 $P_i(\omega)$ 分别表示第 i 次激励的震源项和二维声压波场。

1.2 频域反向外推

RTM反向外推通过将接收信号沿时间反向进行的

正演模拟,在频域中,对应频域接收信号的复共轭波场正向外推。阵列超声全矩阵(full matrix capture, FMC)数据通过换能器中单阵元依次激发,全部阵元作为接收器同时接收声波时域信号。将阵列超声 FMC 数据在时间维度上进行傅里叶变换获得频域 FMC 数据,表达式为:

$$D(\omega, x_r, x_s) = \text{fft}(D(t, x_r, x_s)) \quad (7)$$

$$\tilde{D}(\omega, x_r, x_s) = D(\omega, x_r, x_s)^* \quad (8)$$

其中, D 表示阵列超声 FMC 数据, fft 表示傅里叶变换, x_r 和 x_s 分别表示接收阵元和发射阵元, $*$ 表示复共轭操作。

将式(7)和(8)代入式(6)中,其中 $\tilde{D}(\omega, x_r, x_s)$ 作为震源项即可求解不同频率下反向外推波场 $B(\omega)$:

$$B(\omega) = [L(\omega)U(\omega)]^{-1}S(\omega) \quad (9)$$

1.3 FRTM 成像条件

在二维介质中, FRTM 互相关成像条件可以表示为^[19]:

$$I = \sum_{i=1}^{N_w} \sum_{j=1}^N \text{Re} \left\{ \left[\frac{\partial P_j(\omega_i)}{\partial m} \right]^T \tilde{D}_j(\omega_i) \right\} \quad (10)$$

式中: N_w 为离散角频率的数量; N 为震源数量; m 为模型参数; Re 表示实部算子; $P_j(\omega_i)$ 和 $\tilde{D}_j(\omega_i)$ 分别是在频率 ω_i 下第 j 个震源发射声波的正向波场和频域接收数据。

由于式(10)中偏导数的计算较复杂,难以直接应用互相关成像条件,为了避免复杂的数值偏导计算, Gao 等^[20]将互相关成像条件进行简化如下:

$$I(x, z) = \text{Re} \left\{ -\omega^2 P_j(\omega_i, x, z) B_j(\omega_i, x, z) \right\} \quad (11)$$

经过归一化(照明步长)处理, FRTM 互相关成像条件可以表示为:

$$I(x, z) = \sum_{i=1}^{N_w} \sum_{j=1}^N \text{Re} \left\{ \frac{-\omega^2 P_j(\omega_i, x, z) B_j(\omega_i, x, z)}{P_j(\omega_i, x, z) P_j(\omega_i, x, z)^*} \right\} \quad (12)$$

2 曲面重构方法

由于 FRTM 成像依赖于二维介质的声学特性(速度、密度等)分布模型,因此对于成像区域中不同介质间的耦合界面形状重构是必要的。TFM 方法通过对全矩阵捕获(full matrix capture, FMC)数据进行后处理成像,具有比常规相控阵超声检测技术更高的缺陷成像能力^[21]。为了获得连续的耦合曲面,本文从曲面构件水浸 TFM 图像中对构件表面进行曲线拟合,并建立二维介质声速、密度模型。首先通过水浸 TFM 检测对曲面形状进行检测,为了避免伪像和相干噪声干扰,引入相位相干因子(phase coherence imaging, PCI)^[22]提高 TFM 成像质量;然后通过阈值分割和曲线拟合算法(傅里叶拟合、多项式拟合、随机采样一致拟合等)对耦合界面进行拟合;最后根据拟合函数建立二维介质中声速、密度模型。

3 实验结果与分析

3.1 实验方法与参数设置

为了验证 FRTM 在不同曲面构件中的成像,实验采用两个不同的曲面试样,如图 1 所示,其中红色方框部分为检测区域,尺寸为 40 mm×30 mm。试样 1 和试样 2 材料均为铝合金,纵波声速为 6 300 m/s,横波声速为 3 080 m/s,密度为 2 700 kg/m³,其中试样 1 中的曲面由两段半径分别为 19 mm 和 15 mm 的圆柱形表面相切形成,预制平底孔尺寸为 $\Phi 1.0$ mm;试样 2 的曲面为半径 35 mm 的 R 角结构,预制平底孔尺寸为 $\Phi 1.5$ mm。其中,试样 1 的曲面结构及平底孔位置是完全对称的,因此,本文只对试样 1 中右测平底孔进行检测验证方法的准确性。

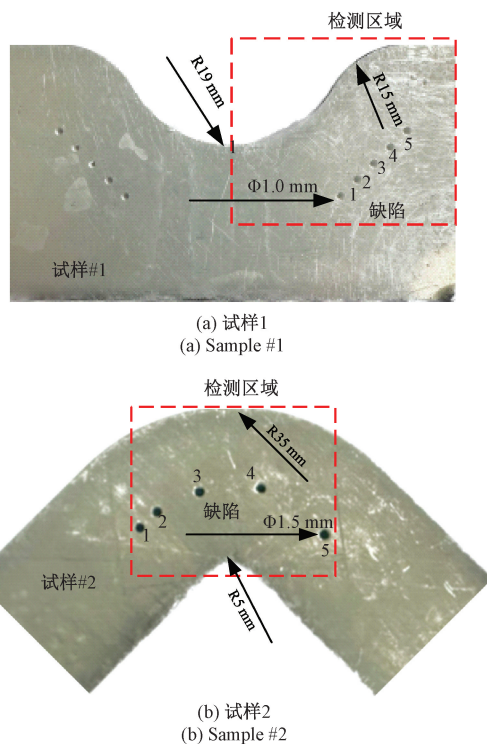


图 1 铝合金曲面试样示意图

Fig. 1 Diagram of aluminum alloy curved surface sample

本实验使用 OEMPA64-128 阵列超声探伤仪作为脉冲发生器和数据采集单元;实验采用线性阵列换能器参数如表 1 所示。

3.2 TFM 成像及曲面拟合结果

对两个曲面试样检测区域采集 FMC 数据,并导入 Matlab 软件进行后处理成像,为了方便比较成像结果,对同一 FMC 数据生成的 TFM 图像幅值归一化并转化为 dB 值。TFM 成像结果如图 2 所示,图像中存在严重噪声和伪像干扰,这些干扰导致耦合界面的形状拟合不准确。

表 1 线性阵列换能器参数表

Table 1 Parameters of ultrasonic array transducers

阵元数	64
中心频率/MHz	5
阵元间距/mm	0.6
阵元宽度/mm	0.5
-6 dB 带宽/MHz	2.4~7.6

PCI 方法可以有效降低 TFM 图像中的伪像和噪声干扰,提高成像质量,成像结果如图 3 所示。

根据 PCI-TFM 成像结果,先对检测图像进行阈值分割,寻找高幅值像素点,然后分别使用平滑拟合、随机采样一致性拟合、多项式拟合和傅里叶拟合方法对阈值分割后的像素点进行曲线拟合,并与真实曲面形状进行对比,结果如图 4 所示,图中黑色圆圈为阈值分割后保留的像素点位置。

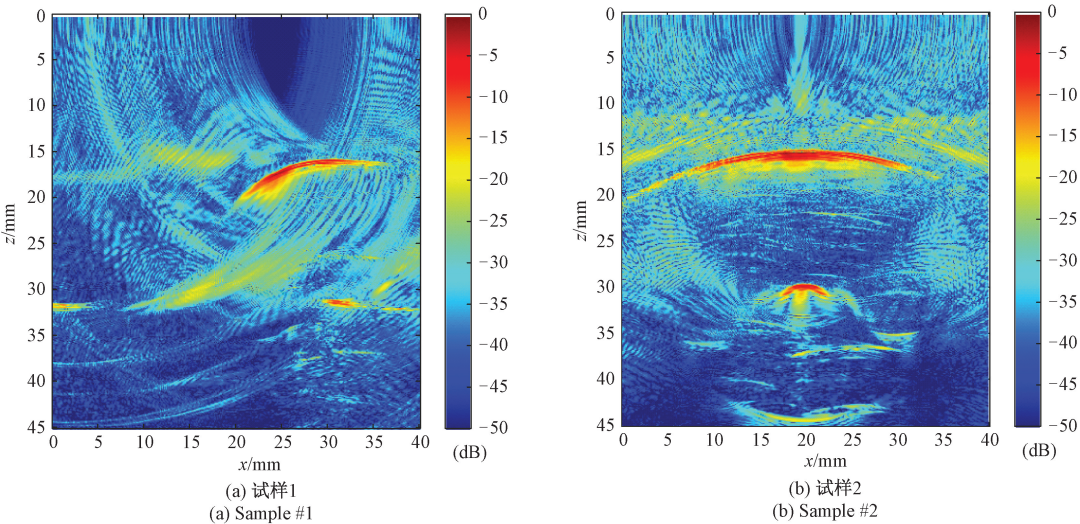


图 2 TFM 成像结果

Fig. 2 The imaging results based on TFM

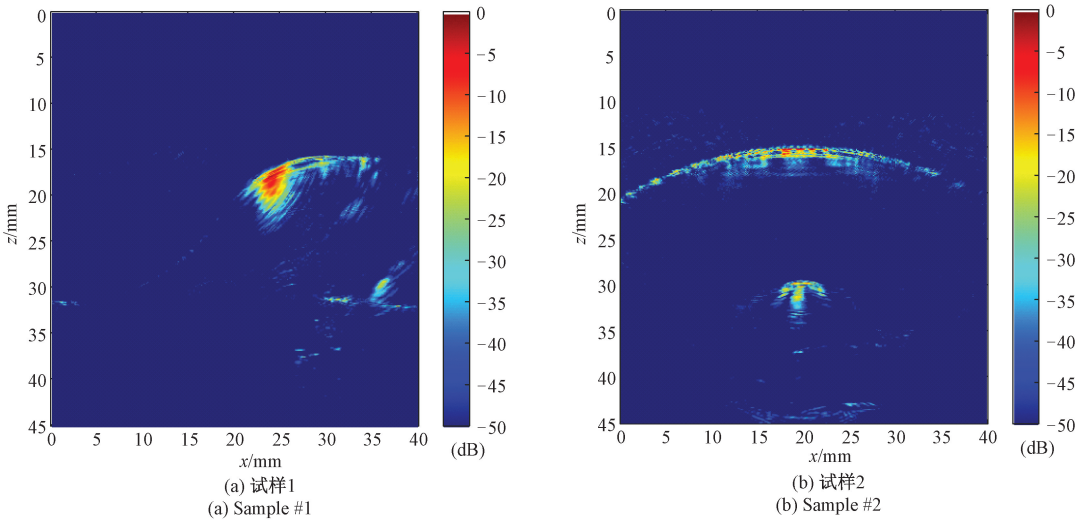


图 3 PCI-TFM 成像结果

Fig. 3 The imaging results based on PCI-TFM

从图 4 中可以看出,当在试样 2 中进行曲线拟合时,由于试样曲面只有一段圆弧,且曲率较小,实验所用的拟合方法均可以较好拟合曲线形状;而在试样 1 中进行曲线拟合时,由于曲面结构复杂,由两段不同半径的圆弧相

切形成,且曲率较大,只有傅里叶拟合方法可以较好拟合出曲线形状。因此,使用傅里叶拟合方法对试样耦合界面形状进行拟合,结果如图 5 所示。

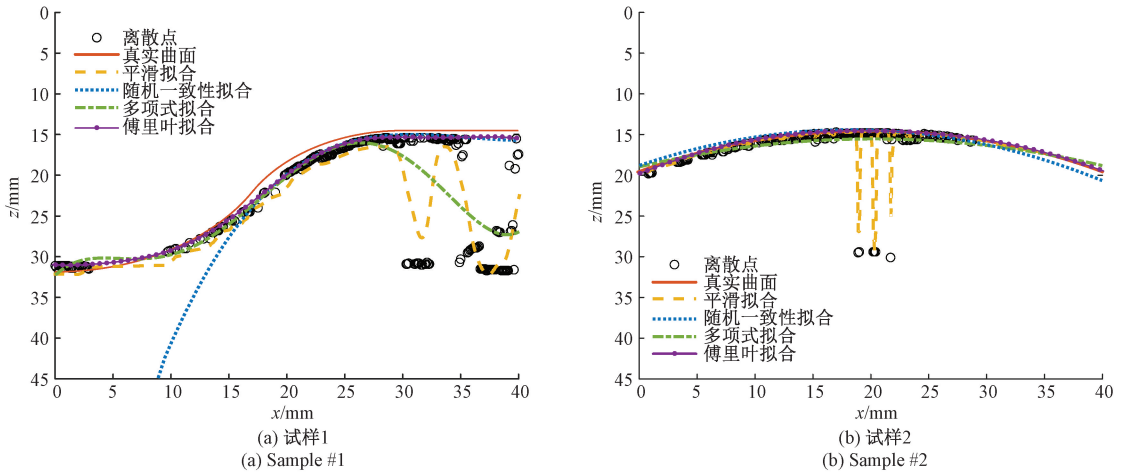


图4 不同方法的界面拟合结果对比

Fig. 4 Comparison of surfaces fitting results in different methods

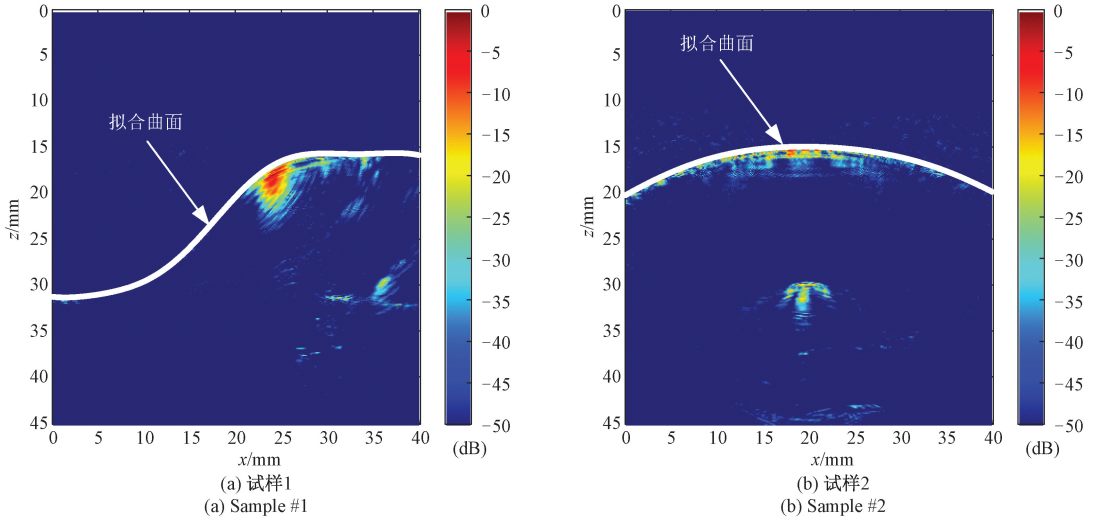


图5 曲面拟合结果

Fig. 5 Fitting results of curved surface

3.3 FRTM 成像结果

FRTM 成像通过阵元发射超声波的正向传播波场与缺陷反射体的反向传播波场进行互相关来进行成像,然而,直达波(由发射阵元直接传播至接收阵元的声波)的存在严重干扰这种互相关成像,影响最终的成像质量。因此,在进行 FRTM 成像前需要去除直达波。

去除直达波的传统方法是通过闸门设置,即在固定的时间节点之前将接收到的超声信号设置为零,这在时域 RTM 成像中得到广泛应用。但是频域中,这种方法会造成原始信号的频谱泄露, Ji^[18] 等通过实验验证了窗函数可以有效去除 FRTM 中的直达波。本文使用汉宁窗函数对原始信号进行处理,实现直达波的去除。具体过程

如下:首先计算每个阵元发射其他所有阵元接收到直达波的时间,确定回波信号中直达波信号,然后使用直达波信号长度两倍的汉宁窗信号,取其前 1/2 信号与直达波信号部分相乘,其余信号保持不变。处理过程可用如下公式表示:

$$\begin{cases} S(t) \cdot W_{half}(t - t_1), & t_1 < t < t_2 \\ S(t), & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

其中, $S(t)$ 表示原始信号, W_{half} 表示前半一半长度的汉宁窗函数, t_1 和 t_2 分别表示直达波信号的起始时间和终止时间。以第 32 阵元发射声波为例子,图 6 为第 32 阵元激发第 1 阵元接收的原始信号和汉宁窗处理后的信号。图 7 为第 32 阵元激发所有阵元接收的原始信号和去除直达波后的信号。

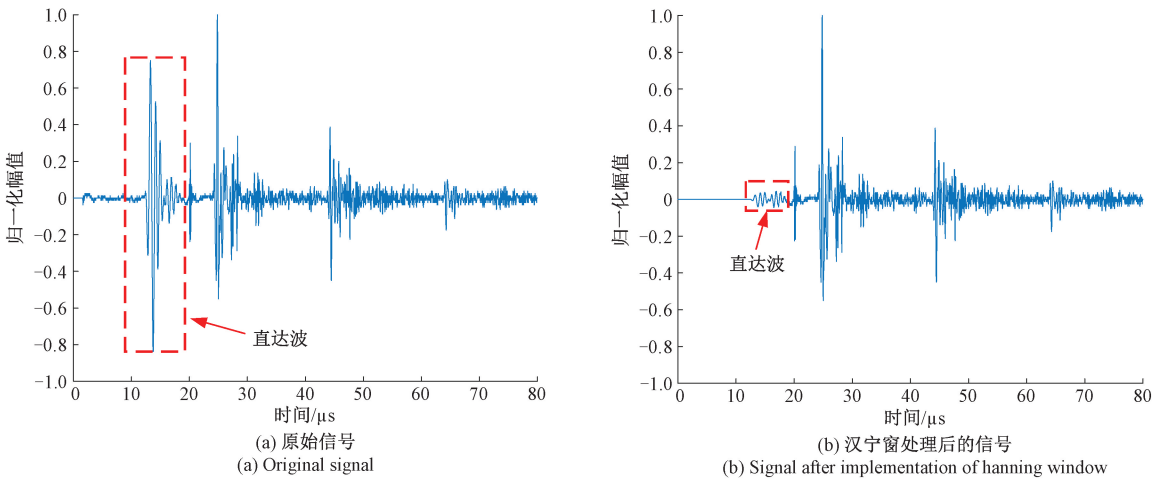


图6 第32阵元激发第1阵元接收信号

Fig. 6 The received signals of the 1-th elements at the 32-th excitation, window

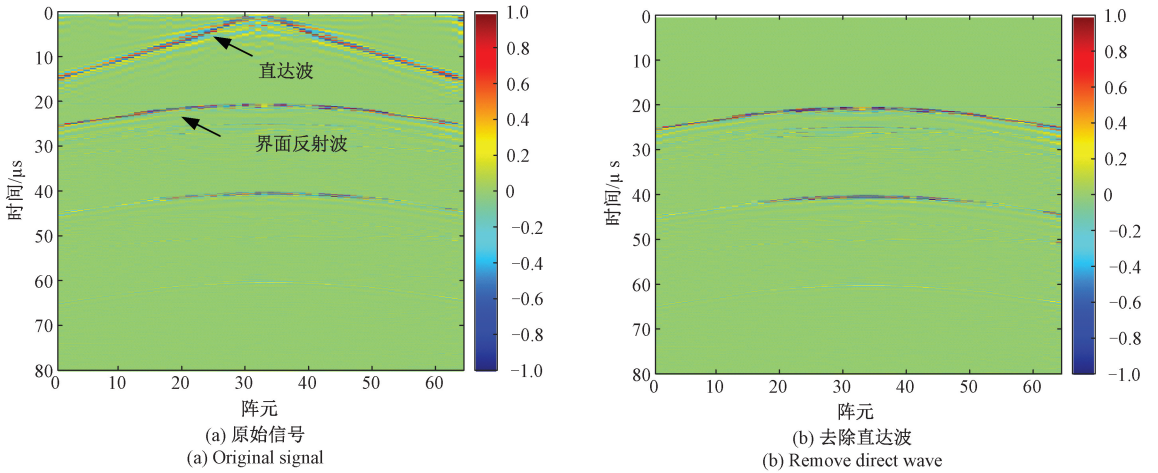


图7 第32阵元激发所有阵元接收信号

Fig. 7 The received signals of all elements at the 32-th excitation

在3.2中已经通过傅里叶拟合方法成功拟合出曲面构件的耦合界面函数,因此可以重构出背景模型中的声速、密度等声学特性分布模型。由于拟合曲线与实际曲线仍存在误差,为了尽可能减少对成像的影响,在耦合界面处进行高斯平滑,如图8所示。

根据重建后的声速、密度模型,使用1~8 MHz的频带范围,通过FRTM方法对试样1和试样2中的检测区域进行成像,并与传统TFM成像进行对比,如图9所示。图9(a)和(b)显示,在曲面形状较为简单的试样2中,TFM方法可以对缺陷准确成像,在曲面形状较为复杂的试样1中,TFM方法可以对缺陷进行成像,但是缺陷位置与真实位置出现偏差,这是因为拟合的曲线与真实曲面形状存在误差,计算延时法则不准确。图9(c)和(d)显示,由于声学特性分布模型中使用高斯平滑过渡带对耦合面进行修正,FRTM方法可以对试样1和试样2中的

缺陷进行准确成像。比较图9(a)和(c),图9(b)和(d),相比于TFM方法,FRTM方法对缺陷形状的重建更为准确。

为了进一步量化TFM方法和FRTM方法对孔型缺陷的成像质量,采用一种无量纲的阵列性能参数指标(array performance indicator, API)对图像进行评价。API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。表达式如下:

$$API = A_{-6\text{ dB}} / \lambda^2 \quad (14)$$

其中, $A_{-6\text{ dB}}$ 表示缺陷图像中dB值大于-6 dB的区域面积, λ 表示声波波长。当API指数越小,表示成像质量越好,分辨率越高,对缺陷的识别能力越强。表2列出了试样1和试样2中侧钻孔缺陷的API。

同时,使用-6 dB法对试样中的每个缺陷尺寸进行

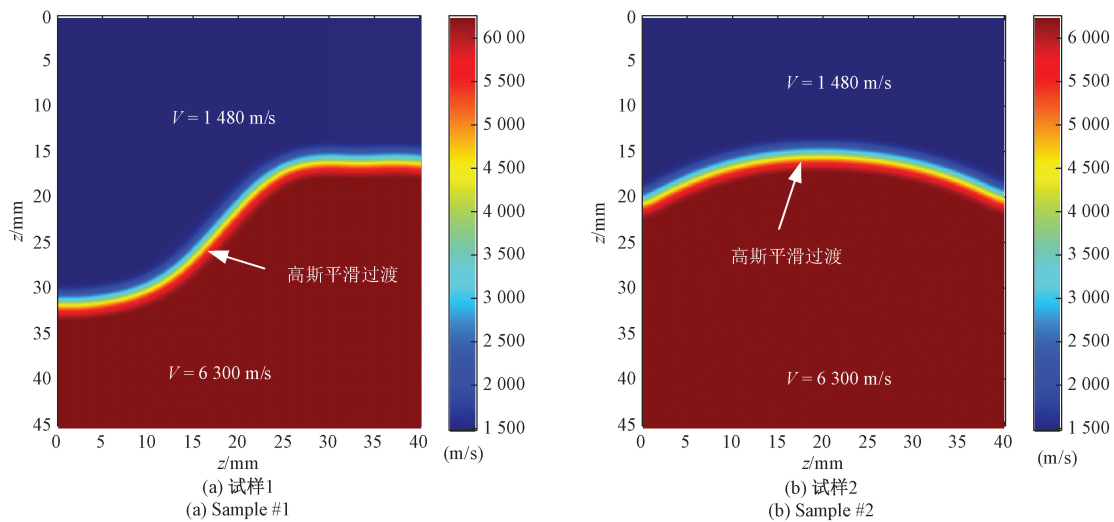


图 8 背景声速分布模型
Fig. 8 The migration velocity model

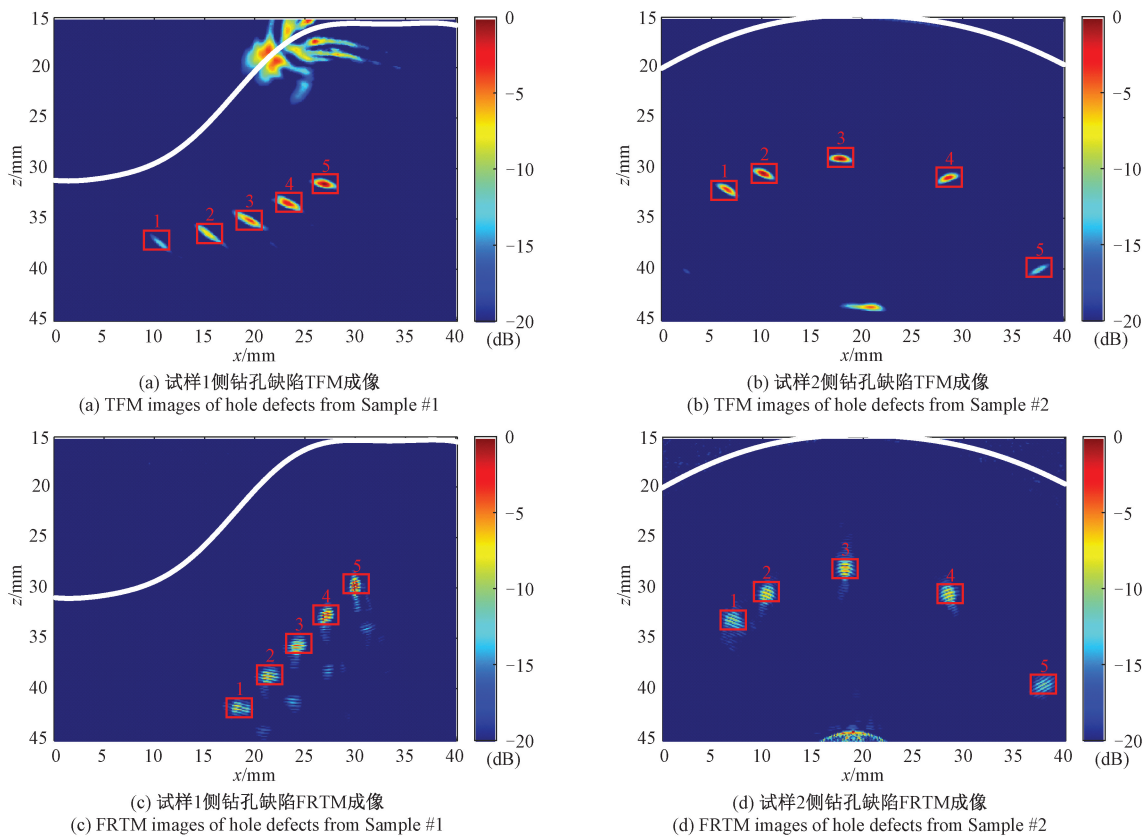


图 9 TFM 和 FRTM 成像对比
Fig. 9 Comparison of TFM and FRTM imaging

定量分析,结果如表 3 所示。从表 2 和表 3 中可以看出,在两个试样中 FRTM 方法的 API 均小于 TFM,显然针对曲面试样中孔型缺陷,FRTM 成像质量优于 TFM,提高了 66% 以上;FRTM 成像方法定量的缺陷尺寸也更准确,对

于简单曲面形状,FRTM 成像方法的缺陷定量尺寸平均误差降低 37.04%,对于复杂曲面形状,FRTM 成像方法的缺陷定量尺寸平均误差降低 85.58%。进一步验证了本文方法的有效性。

表 2 不同试样中采用 TFM 和 FRTM 方法成像的 *API*

Table 2 The *API* of the imaging results of TFM and FRTM in different samples

试样	TFM	FRTM	图像质量提升/%
试样 1	0.825 1	0.151 2	81.67
试样 2	0.944 8	0.321 2	66.00

表 3 不同试样中不同位置缺陷尺寸定量

Table 3 The quantification of defect sizes at different locations in different samples

试样	缺陷 编号	真实 尺寸 /mm	TFM /mm	FRTM /mm	TFM 平均误 差/mm	FRTM 平均误 差/mm	误差 降低 /%
试样 1	1	1.0	3.8	1.8			
	2	1.0	3.6	1.4			
	3	1.0	3.4	1.1	2.08	0.30	85.58
	4	1.0	2.5	0.9			
	5	1.0	2.1	1.1			
试样 2	1	1.5	2.1	2.0			
	2	1.5	1.9	1.7			
	3	1.5	1.9	1.7	0.54	0.34	37.04
	4	1.5	1.8	1.7			
	5	1.5	2.5	2.1			

4 结 论

本文将频域逆时偏移成像(FRTM)引入到曲面部件的阵列超声检测成像中,首先通过 PCI-TFM 方法对耦合界面进行高分辨成像,然后通过阈值分割和傅里叶拟合方法拟合曲面形状并重建声学特性模型,最后使用 FRTM 方法对检测区域进行高分辨成像。通过对两块不同曲面形状的铝合金试块进行阵列超声 FRTM 检测实验,并与 TFM 成像进行对比,得到如下结论:

1)PCI-TFM 方法可以有效降低曲面部件阵列超声成像的伪像和噪声干扰,提高成像质量。对于曲面结构简单的试样,各种拟合方法对曲面的拟合均较为准确,而对于曲面结构较为复杂的情况,拟合方法的差异对拟合结果影响较大。本文使用的傅里叶拟合方法相比于高阶多项式拟合和随机采样一致性拟合对曲面形状拟合更准确,适用于不同曲面结构试样。

2)曲面试样中缺陷的 TFM 成像效果对耦合界面形状较为敏感,对于曲面形状较为复杂的试样,拟合误差仍会引起缺陷定位不准确的问题;而 FRTM 通过声学特性

模型中高斯平滑带的过渡,降低了对曲面形状的敏感度,在相同拟合误差下,FRTM 对缺陷的定位准确度优于 TFM。

3)以 *API* 指数作为评价指标,实验中 FRTM 对不同的曲面试样中孔型缺陷的成像的 *API* 系数均小于 TFM,表明 FRTM 对曲面构件中孔型缺陷的成像质量优于 TFM,提升了 66% 以上;以-6 dB 法定量缺陷尺寸,FRTM 成像方法定量的缺陷尺寸更准确,平均误差降低 37.04% 以上,进一步验证了本文方法对曲面构件阵列超声检测的有效性。

参考文献

[1] 郑艳芳,张建海,孙书博. 复杂曲面构件的超声柔性相控阵检测方案研究[C]. 2018 远东无损检测新技术论坛论文集, 2018;309-313.

ZHENG Y F, ZHANG J H, SUN SH B. Research on ultrasonic flexible phased array detection scheme for complex curved surface components[J]. 2018 Far East NDT New Technologies Conference Proceedings, 2018; 309-313.

[2] 郑艳芳. 复杂曲面构件缺陷的柔性超声相控阵检测关键技术研究[D]. 长春:吉林大学, 2020.

ZHENG Y F. Research on the key technology of flexible ultrasonic phased array detection for complex curved surface components [D]. Changchun: Jinlin University, 2020.

[3] MARCANTONIO V, MONARCA D, COLANTONI A, et al. Ultrasonic waves for materials evaluation in fatigue, thermal and corrosion damage: A review[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 120: 32-42.

[4] BRATH A J, SIMONETTI F. Phased array imaging of complex-geometry composite components [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2017, 64(10): 1573-1582.

[5] 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. Trajectory planning for automatic ultrasonic inspection of curved workpieces using flexible phased array [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(24): 41-48.

[6] PAN Q X, SHAO CH, XIAO D G, et al. Robotic ultrasonic measurement of residual stress in complex curved surface components [J]. Applied Bionics and Biomechanics, 2019, 2019(1): 2797896.

[7] HU H J, ZHU X, WANG CH H, et al. Stretchable ultrasonic transducer arrays for three-dimensional imaging

- on complex surfaces [J]. Science advances, 2018, 4 (3): eaar3979.
- [8] 赵志鹏, 戴宁, 周鑫, 等. 复合材料曲面构件缺陷超声三维成像方法 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43 (7): 257-266.
- ZHAO ZH P, DAI N, ZHOU X, et al. A 3D ultrasonic imaging method for defects of composite curved components [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43 (7): 257-266.
- [9] 陈海燕, 李亮, 夏正武, 等. 复合绝缘子内部缺陷超声相控阵柔性耦合检测 [J]. 高电压技术, 2019, 45 (4): 1274-1280.
- CHEN H Y, LI L, XIA ZH W, et al. Flexible coupling detection of internal defects in composite insulators using ultrasonic phased array [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45 (4): 1274-1280.
- [10] 周正干, 李尚凝, 李洋. 相控阵超声检测方案设计关键技术及其在航空航天领域的应用 [J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49 (4): 461-467.
- ZHOU ZH G, LI SH N, LI Y. Technologies in the design of phased array ultrasonic testing schemes and their application in the aerospace field [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 49 (4): 461-467.
- [11] 康亚轩, 陈俊超, 龚真珍, 等. 面向非规则界面双层介质超声全聚焦成像 [J]. 仪器仪表学报, 2023, 44 (12): 307-315.
- KANG Y X, CHEN J CH, GONG ZH ZH, et al. Ultrasonic total focusing method for double-layer media with irregular interface [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44 (12): 307-315.
- [12] 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 virtual source [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40 (6): 48-55.
- [13] MCKEE J G, BEVAN R L T, WILCOX P D, et al. Volumetric imaging through a doubly-curved surface using a 2D phased array [J]. NDT & E International, 2020, 113: 102260.
- [14] RAO J, SAINI A, YANG J ZH, et al. Ultrasonic imaging of irregularly shaped notches based on elastic reverse time migration [J]. NDT & E International, 2019, 107: 102135.
- [15] RAO J, WANG J L, KOLLMANNBERGER S, et al. Point cloud-based elastic reverse time migration for ultrasonic imaging of components with vertical surfaces [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 163: 108144.
- [16] LIU H, XIA H Y, ZHUANG M W, et al. Reverse time migration of acoustic waves for imaging based defects detection for concrete and CFST structures [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 117: 210-220.
- [17] WANG C C, WANG K, ZHU J, et al. Ultrasound imaging of bottom opening crack based on frequency-domain reverse time migration [J]. IEEE Access, 2022, 10: 68202-68212.
- [18] JI K P, ZHAO P, ZHUO CH J, et al. Ultrasonic full-matrix imaging of curved-surface components [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 181: 109522.
- [19] KIM Y, MIN D J, SHIN C. Frequency-domain reverse-time migration with source estimation [J]. Geophysics, 2011, 76 (2): 41-49.
- [20] GAO B, LI G F. Frequency-space domain viscoacoustic RTM using stable compensation operator [M]. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 2019.
- [21] 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.
- [22] CRUZA J F, CAMACHO J, FRITSCH C. Plane-wave phase-coherence imaging for NDE [J]. NDT & E International, 2017, 87: 31-37.

作者简介



朱甜甜, 2018 年于南昌航空大学获得学士学位, 2021 年于中国科学院大学获得硕士学位, 现为北京航空航天大学博士研究生, 主要研究方向为超声检测。

E-mail: zhutiantian@buaa.edu.cn

Zhu Tiantian received his B.Sc. degree from Nanchang Hangkong University in 2018, and received his M.Sc. degree from University of Chinese Academy of Sciences in 2021. He is currently a Ph.D. candidate at Beihang University. His main research interests include ultrasonic detection and signal processing.



周正干, 分别在 1987 年、1990 年和 1992 年于哈尔滨工业大学获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为北京航空航天大学教授、博士生导师, 主要研究方向为超声无损检测及评价技术。

E-mail: zzhenggan@buaa.edu.cn

Zhou Zhenggan received his B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Harbin Institute of Technology in 1987, 1990, and 1992, respectively. He is currently a professor and a Ph. D. advisor at Beihang University. His main research interest includes modern ultrasonic NDT & E technologies.



周文彬 (通信作者), 2016 年于北京航空航天大学获得学士学位, 2017 年和 2022 年于英国帝国理工大学获得硕士学位和博士学位, 现为北京航空航天大学副教授、博士生导师, 主要研究方向为无损检测与轻量化制造。

E-mail: zhouwb@buaa.edu.cn

Zhou Wenbin (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Beihang university in 2016, and received his M. Sc. degree and Ph. D. degree both from Imperial College London in 2017 and 2022. He is currently an associate professor and a Ph. D. advisor at Beihang University. His main research interests include Non-destructive and lightweight manufacturing.



赵永峰, 2007 年于华中科技大学获得硕士学位, 现为国网河南省电力科学研究院材料专业高级工程师, 主要研究方向为电工材料和无损检测。

E-mail: yongbubian109@163.com

Zhao Yongfeng received his M. Sc. degree from Huazhong University of Science and Technology in 2007. He is currently a senior engineer of materials specialty at Henan Electric Power Research Institute of State Grid. His main research interests include electrical materials and Non-destructive testing.



李超, 2014 年于哈尔滨工业大学获得学士学位, 2020 年于吉林大学获得博士学位, 现为国网河南省电力公司电力科学研究院专责, 主要研究方向为先进电工材料研发、无损检测技术。

E-mail: chaoli0714@163.com

Li Chao received her B. Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 2014, and received her Ph. D. degree from Jilin University in 2020. She currently serves as the specialist at the Electric Power Research Institute of State Grid Henan Electric Power Company. Her main research interests include the development of advanced electrical materials and Non-destructive testing technology.