

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413550

一种基于缺陷响应空间补偿的多模式超声全聚焦复合成像及应用*

焦敬品^{1,2}, 梁士通², 李晨旭², 齐高君³, 岳大庆³

(1. 北京工业大学信息科学技术学院 北京 100124; 2. 北京工业大学机械与能源工程学院 北京 100124;
3. 中国电建集团山东电力建设第一工程有限公司 济南 250102)

摘要: 因奥氏体不锈钢小径管壁厚较小, 超声波在其界面多次反射和模式转换产生的多次回波导致相控阵成像中产生大量伪像, 严重影响缺陷的识别。为解决所选超声波模式类型、数量及其幅值空间差异性对成像效果的影响, 提出了一种基于缺陷响应空间补偿的多模式超声全聚焦复合成像方法。建立了缺陷空间响应模型, 对模型获取的全矩阵数据进行多模式成像, 与CIVA仿真软件的成像结果具有较好的一致性。将各模式成像结果中缺陷位置附近的最大强度值作为缺陷响应值进行对比, 缺陷响应模型与仿真的计算结果误差仅在 ± 3 dB以内。并研究了不同模式成像敏感度的空间分布规律, 确定了适合不同模式的空间补偿参数。利用校准后的所有直接模式和半跨模式对仿真数据进行复合成像, 相较于单模式成像以及直接相加复合成像, 基于缺陷响应空间补偿的复合成像方法在缺陷处具有更高缺陷幅值以及更低的伪像幅值, 且在不同位置的圆孔缺陷成像结果中均未出现伪像。在此基础上, 将所提方法应用于裂纹与气孔缺陷的检测实验。结果表明, 相较于单模式成像, 基于缺陷响应空间补偿的复合成像方法可以很好地抑制伪像并提高信噪比。

关键词: 奥氏体; 小径管; 缺陷响应; 多模式; 全聚焦成像; 复合成像

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

A multimodal ultrasonic total focus compound imaging method based on spatial compensation of defect response and its application

Jiao Jingpin^{1,2}, Liang Shitong², Li Chenxu², Qi Gaojun³, Yue Daqing³

(1. School of Information Science and Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
2. College of Mechanical & Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
3. PowerChina SEPCO1 Electric Power Construction Co., Ltd., Jinan 250102, China)

Abstract: Austenitic stainless steel small-diameter tubes, with their thin walls, generate multiple echoes due to ultrasonic wave reflections and mode transitions at the interfaces, leading to significant artifacts in phased array imaging that hinder defect detection. To address the impact of ultrasonic mode type, number, and their amplitude spatial variability on multimodal compound imaging performance, this paper proposes a multimodal ultrasonic total focus compound imaging method with spatial compensation for defect response. A defect spatial response model is developed, and compound imaging is performed on the full matrix data acquired using this model, which shows good agreement with results from CIVA simulation software. The defect response values, determined by maximum intensity near the defect in each imaging mode, are compared, with deviations within ± 3 dB relative to the simulation. Additionally, the spatial distribution of imaging sensitivity in different modes is analyzed, and spatial compensation parameters suitable for each mode are identified. Compound imaging is carried out using both calibrated direct modes and half-skip modes. Compared to single-mode imaging and direct-sum composite imaging, the proposed method, based on defect spatial response compensation, achieves higher defect

收稿日期: 2024-11-29 Received Date: 2024-11-29

* 基金项目: 国家重点研发计划(2023YFF0614902)项目资助

amplitude and reduced artifact amplitude, with no artifacts in imaging results of circular-hole defects at various positions. The method is further applied to crack and porosity defect experiments, where it effectively suppresses artifacts and enhances the signal-to-noise ratio compared to single-mode imaging.

Keywords: austenite; small-diameter tube; defect response; multimode; total focusing method; compound imaging

0 引言

奥氏体不锈钢小径管因其具有良好的耐腐蚀性和抗氧化性等特点,在核电、锅炉、油气领域应用广泛。奥氏体不锈钢小径管在制造及服役过程中,受压力、温度腐蚀等复杂因素的综合作用下,在其焊缝部位容易产生气孔和裂纹等各类缺陷^[1],导致焊缝部位存在极大的安全隐患。因此,对奥氏体不锈钢焊缝中损伤检测就显得极为重要。

相控阵技术是一种公认的、有效的焊缝无损检测技术,有利于复杂结构件(如焊缝)中损伤的检测^[2-5]。常规相控阵成像通常利用超声的直达波信息^[6],但是在有限尺寸的试件结构,如奥氏体不锈钢小径管(壁厚为4~8 mm),超声波会在其结构界面处发生多次反射和波型转换,使得检测波形复杂,导致相控阵成像中出现大量的伪像,难以实现损伤信息的有效辨别。国内外一些学者在研究中考虑了超声波的多路径传播及模式转换^[7-8],并将由此产生的多模式超声考虑到超声成像中^[9-10]。多模式成像中包含了更丰富的超声缺陷信息,其缺陷检测能力更强^[11-12]。Wu等^[13]将T-T和TT-T两种最优成像视图进行加权融合,实现了对小径管焊缝中多类缺陷的高精度成像。Jin等^[14]提出了镜像复合模式全聚焦方法,通过获取不规则缺陷两侧的全矩阵捕获数据集来获取缺陷特性,并选取6个有效视图进行成像。但针对不同试件,上述方法仍需要人为筛选成像模式。Nicolson等^[15-16]搭建双串联相控阵成像系统对窄坡口焊缝进行检测,有效提高了成像信噪比,但检测方式较为复杂。Jin等^[17]将不同模式成像结果进行了加和融合处理,实现了不规则平面下缺陷的定量。但该方法未考虑不同模式超声波的扩散衰减及指向性等因素造成的不同模式成像之间的幅值水平,成像结果受伪像的影响大。Bevan等^[18-19]考虑了声束指向性、反射系数、介质散射和扩散衰减等因素对不同模式超声成像的影响,对21种模式超声波图像进行融合,提高了缺陷图像重建质量与定量精度。但该方法需要预先采集无损伤试件的数据,对被检测位置与预先采集数据与检测数据的一致性要求较高。目前奥氏体不锈钢小径管焊缝的多模式全聚焦复合成像主要存在两个问题:1)在小径管焊缝中超声传播行为复杂,产生的伪像对缺陷的识别造成很大影响;2)不同超声波模式对缺陷的敏感度存在显著的空间差异,且其幅值受声束扩散

衰减、指向性等因素影响,导致多模式成像结果的不一致性。

针对上述问题,提出一种基于缺陷响应空间补偿的超声多模式全聚焦复合成像方法。将缺陷响应空间分布向质心求偏导进行空间补偿,使用补偿后的缺陷响应空间分布对各模式成像加权。通过对小径管焊缝试件进行仿真与实验,结果表明所提方法可实现对伪像的抑制。

1 算法原理

1.1 全聚焦算法

全聚焦算法是基于全矩阵采集的一种通过延迟求和进行波束形成的后处理成像算法^[20-21]。

$$I(\mathbf{r}) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N g_{ij}(t, \mathbf{r}) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{r}$ 为成像区域内每个成像点的位置向量; $g_{ij}(t, \mathbf{r})$ 对应*i*阵元激励、*j*阵元接收的超声信号在成像点 $\mathbf{r}$ 、时间*t*处的幅值;*N*表示阵元个数。

图1给出了小径管超声相控阵检测示意图。图中给出了超声波由激励阵元向管道内传播、被管内表面反射、在缺陷处反射及缺陷波传播回接收阵元的声线传播过程^[22]。

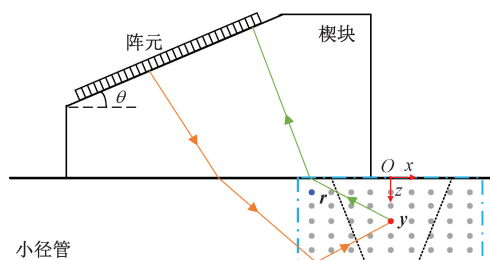


图1 小径管焊缝超声阵列检测示意图

Fig.1 Schematic diagram of ultrasonic array detection of small-diameter tubes

考虑超声波传播模式中的直接模式和半跨模式,如图2所示。若只考虑阵列在楔块内激励与接收的纵波信号,并考虑声束路径的互易性原理,则超声波在小径管中存在3种直接模式:L-L、L-T和T-T,如图2(a)所示;存在8种半跨模式:LL-L、LL-T、TT-L、TT-T、LT-L、LT-T、TL-L和TL-T,如图2(b)所示。其中,L表示纵波,T表示横波。在各成像点计算不同声束路径对应的时间*t*,代入式(1)中以获得不同模式对应的全聚焦成像。

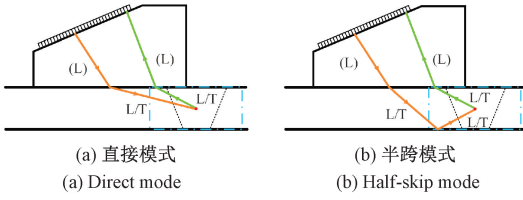


图2 不同模式超声波在小径管中传播示意图

Fig. 2 Schematic diagram of different modes of ultrasonic wave propagation in a small-diameter tube

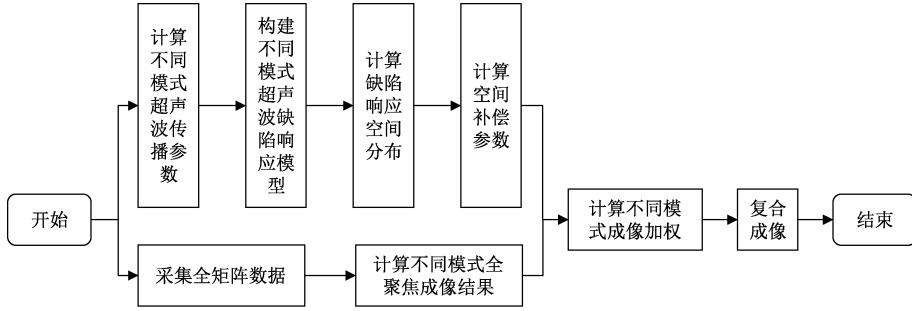


图3 复合成像流程

Fig. 3 Flow chart of compound imaging

式中: ω 是探头的中心频率; $Y(y)$ 为检测路径上的传播时间; $U(\omega)$ 为激励信号。 $P_{ij}(\omega, y)$ 表示第 i 阵元激励和第 j 阵元接收的传播过程, 其中 $H_i(y)$ 和 $H'_j(y)$ 分别为激励和接收过程中声波经过不同介质界面处的透射/反射系数; $B_i(y)$ 和 $B'_j(y)$ 分别为激励和接收过程中因扩散引起的声信号衰减; $D_i(\omega, y)$ 和 $D'_j(\omega, y)$ 是探头阵元在耦合剂中相对于探头的激励和接收路径方向上的指向性函数; $S_{ij}(\omega, y)$ 表示缺陷处的散射系数(远场平面波入射下, 近似计算出的圆形气孔缺陷^[23]和直裂纹^[24]的散射系数矩阵)。

根据式(2)可以依次计算出上述不同模式超声波在频域的缺陷响应 $G_{ij}^e(\omega, y)$, 并使用逆傅里叶变换转换为时域 $g_{ij}^e(t, y)$ 再进行全聚焦成像, 得到不同模式超声波在每个成像点 r 处的强度。

$$I_l^e(r, y) = \left| \sum_{i,j} g_{ij}^e(Y_{ij}^e(r), y) \right| \quad (3)$$

式中: ε 为超声波的传播模式, 包括3种直接模式和8种半跨模式。

假设较大缺陷的响应可视为众多微小圆孔缺陷响应的叠加, 由此可以计算微小圆孔形缺陷位于每个成像点位置时对应的全聚焦成像, 进而得到该模式超声波的缺陷响应的空间分布 $E^e(r)$:

$$E^e(r) = I_l^e(r, r) = \frac{1}{2\pi} \left| \sum_{i,j} \int_{-\infty}^{+\infty} G_{ij}^e(\omega, r) e^{-j\omega Y_{ij}^e(r)} d\omega \right| =$$

1.2 基于空间补偿的复合成像方法

图3给出了缺陷响应空间补偿的复合成像方法的流程, 其中主要包括多模式全聚焦计算、补偿参数计算和复合成像3部分。

若试件内缺陷位于 y 处, 则由第 i 阵元激励、第 j 阵元接收的缺陷响应 $G_{ij}(\omega, y)$ 可表示为:

$$\begin{cases} G_{ij}(\omega, y) = P_{ij}(\omega, y) e^{-j\omega Y_{ij}^e(y)} U(\omega) \\ P_{ij}(\omega, y) = H_i(y) H'_j(y) B_i(y) B'_j(y) \\ D_i(\omega, y) D'_j(\omega, y) S_{ij}(\omega, y) \end{cases} \quad (2)$$

$$\frac{1}{\pi} \left| \sum_{i,j} \int_0^{+\infty} P_{ij}^e(\omega, r) U(\omega) d\omega \right| = \left| \tilde{u}(0) \sum_{i,j} P_{ij}^e(\omega, r) \right| \quad (4)$$

式中: $\tilde{u}(0) = \frac{1}{\pi} \int_0^{+\infty} U(\omega) d\omega$, $\tilde{u}(0)$ 为模型参考信号与实验激励信号的幅值比例系数。

缺陷响应空间分布反映了该模式超声对缺陷检测的敏感性, 能反映因波束扩展及衰减而导致的不同模式超声波成像幅值在空间上的不均匀性。对不同模式超声波的缺陷响应空间分布中每个成像点, 计算其关于成像质心 r_0 的方向导数, 得到该点的空间补偿系数 $c^e(r)$, 即:

$$c^e(r) = m(r - r_0) + E^e(r_0) \quad (5)$$

式中: m 表示在 $E^e(r)$ 平面上每个成像点相对于质心的方向导数。

考虑到超声波的多路径和多模态传播特性, 可以利用空间补偿系数 $c^e(r)$ 对不同模式超声波全聚焦成像进行加权处理, 以实现不同模式超声波成像不均匀的补偿。由于该空间补偿利用的是每个成像点幅值相对于质心幅值 r_0 的变化实现, 因此, 还需要利用质心点处的缺陷响应幅值 $E^e(r_0)$ 对成像结果进行重新缩放, 以使所有模式成像结果保持在原始的幅值基准水平, 由此, 得到基于缺陷响应空间分布的多模式全聚焦复合成像表达式为:

$$I(r) = \sum_{\varepsilon} |I^e(r)| c^e(r) / E^e(r_0) \quad (6)$$

可见所提成像方法与传统全聚焦方法的本质区别在于,利用理论分析得到的不同模式超声波的缺陷响应的空间分布,计算出反映不同模式超声波对不同空间位置缺陷敏感性差异的空间补偿系数,并利用其对该模式超声波成像进行加权处理,从而达到抑制伪像,提高了缺陷成像的信噪比的目的。

2 仿真实验

本章开展了超声相控阵检测数值仿真,将多模式全聚焦成像方法与复合成像方法应用于仿真数据处理,以验证其对缺陷检测的有效性。

2.1 CIVA 仿真

CIVA 是由法国原子能委员会研发的一款专业无损检测仿真软件,包括超声、射线和涡流等模块,可用于无损检测中多种检测方法的仿真分析^[25]。其中超声模块可以实现相控阵超声检测的声场仿真和缺陷响应计算。声场仿真可以计算工件中的超声波束并显示声场,缺陷响应可以模拟声束与缺陷的相互作用以预测缺陷回波,也可计算表面回波和波形转换。此处使用超声模块中的缺陷响应功能获取各类缺陷下的回波信号进行后续分析。

在 CIVA 中构建奥氏体不锈钢小径管焊缝超声相控阵检测模型,如图 4 所示。小径管的尺寸为 $\phi 51\text{ mm}\times 6\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ 。采用中心频率为 5 MHz 的 32 线阵探头进行超声波的激励与接收,并使用 20° 楔块与小径管耦合。在仿真模型的焊缝中设置了圆孔与裂纹两种类型的缺陷,缺陷的位置如表 1 所示。当圆孔缺陷位于 5 个不同位置时,进行了数值仿真。同时,保持裂纹缺陷位置不变,改变裂纹角度,进行了多次数值仿真。其中,裂纹角度变化范围在 0°~165°,变化步长为 15°。对数值仿真获得的全局阵数据进行多模式全聚焦成像分析,典型结果如图 5 所示。图 5 给出了位于 A5 处、直径 1 mm 圆孔缺陷的多模式成像结果,白色“+”表示实际缺陷中心位置。由图 5 可见不同模式对应的成像结果有很大的差异。

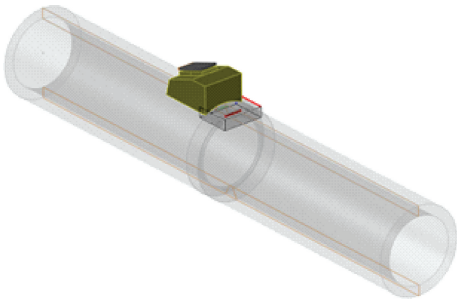


图 4 小径管焊缝 CIVA 仿真模型

Fig. 4 CIVA simulation model of small-diameter tube weld

表 1 缺陷参数信息

Table 1 Defect parameter information

缺陷类型	尺寸	位置编号/坐标
圆孔	$\phi 1\text{ mm}\times 3\text{ mm}$	A1(-2,3)
	$\phi 1\text{ mm}\times 3\text{ mm}$	A2(2,3)
	$\phi 1\text{ mm}\times 3\text{ mm}$	A3(0,1)
	$\phi 1\text{ mm}\times 3\text{ mm}$	A4(0,5)
	$\phi 1\text{ mm}\times 3\text{ mm}$	A5(0,3)
裂纹	1 mm×3 mm	A5(0,3)

对于直接模式,T-T 模式可以很好实现缺陷成像,而 L-L 和 L-T 模式成像结果中却出现了严重的伪像。对于半跨模式,LL-L、LL-T、LT-L 和 TL-T 模式在缺陷附近的成像幅值很小,而伪像幅值较大,成像结果较差;TT-L、TT-T、TL-L 和 LT-T 模式能较好实现缺陷成像,但缺陷定位的准确性有较大差异,其主要原因是不同模式超声波缺陷响应的空间差异性。因此,多模式全聚焦结果的差异给超声相控阵缺陷检测判识带来巨大挑战。

2.2 复合参数计算

将仿真模型中不同模式超声波传播参数代入式(2),可以计算出不同模式超声波的缺陷响应 $G_y(\omega,y)$,将得到的频域全矩阵数据转换到时域并成像,典型结果如图 6 所示。

将图 6 成像结果与图 5 中对应模式的 CIVA 仿真成像结果进行对比发现,两种成像结果中显示的缺陷位置与形状极为相似。进一步,将基于 CIVA 数据与基于缺陷响应模型数据的成像结果按照各自 T-T 模式成像最大值进行归一化处理,并将各模式成像结果中缺陷位置附近的最大强度值作为缺陷响应值进行对比,结果如图 7 所示。可见缺陷响应模型与仿真的计算结果误差仅在±3 dB 以内。此外,不同模式超声波对同一位置处的缺陷响应有很大差异,最高和最低缺陷响应相差达 36 dB。

在上述数值计算基础上,按照式(4)计算各个超声模式在每个成像位置的缺陷响应(微缺陷为半径 0.001 mm 的圆孔缺陷),得到每种模式的缺陷响应空间分布,结果如图 8 所示。可见每种模式超声波的缺陷响应均具有空间分布不均匀性,不同模式的缺陷响应的空间分布有很大的差异,这种差异反映出不同模式超声波对空间不同位置缺陷检测的敏感区和盲区。显然,缺陷响应空间分布图可用于评估该模式超声波对给定试件中不同位置缺陷检测的适用性。例如,从图 8 中可见 T-T、TT-L 和 TT-T 模式在焊缝区具有较强的预期信号强度,且在该区域没有显示出明显的盲区,适合焊缝中心及根部的垂直或小倾角缺陷的检测。

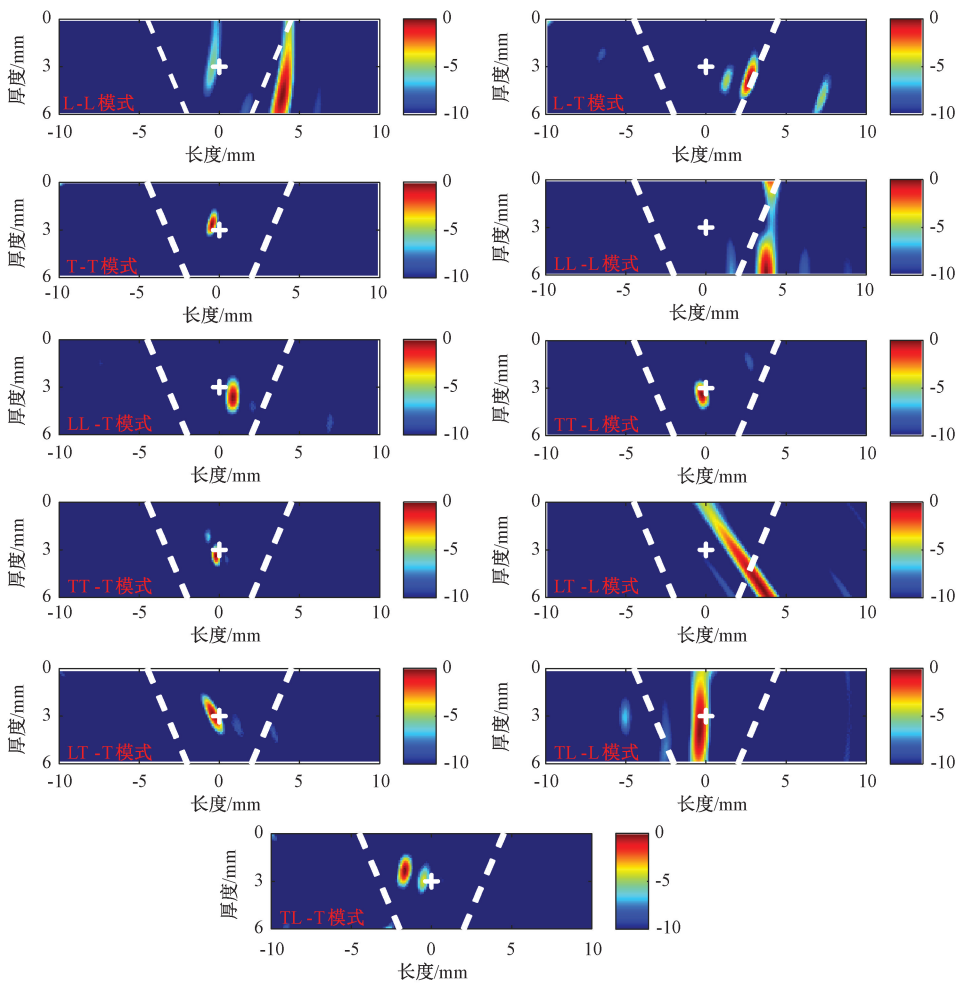


图 5 直径 1 mm 圆孔缺陷(A5)多模式全聚焦成像

Fig. 5 Multimodal total focus imaging of 1 mm diameter circular hole defect (A5)

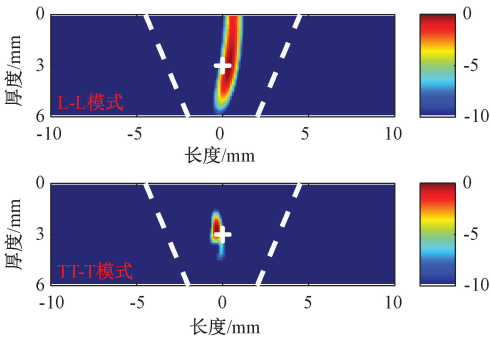


图 6 基于缺陷响应模型的典型成像

Fig. 6 Typical imaging based on defect response model

按照式(5)对缺陷响应空间分布进行方向导数求解,并利用三维平滑处理消除参数离散带来的误差,图 9 给出了平滑处理后 L-L 模式的方向导数空间分布。在此基础上,进一步计算各模式的空间补偿系数,并通过加权处理为多模式复合成像提供具有空间均匀性的单模式超声波图像。

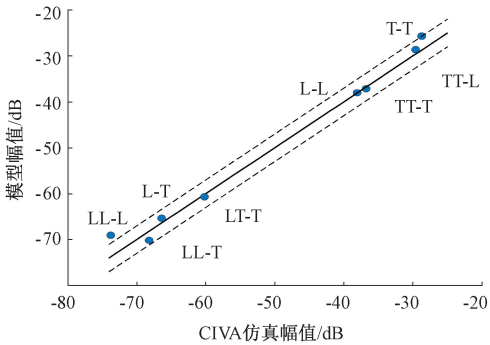


图 7 相同缺陷成像强度对比

Fig. 7 Comparison of imaging intensity of the same defect

2.3 复合成像及检测性能对比

按照式(6),对 11 种多模式全聚焦成像结果进行加权补偿与复合成像,结果如图 10(a)所示,作为对比图 10(b)给出了 11 种模式全聚焦成像的直接相加融合成像结果。可见两种复合成像方法均能实现缺陷检测,

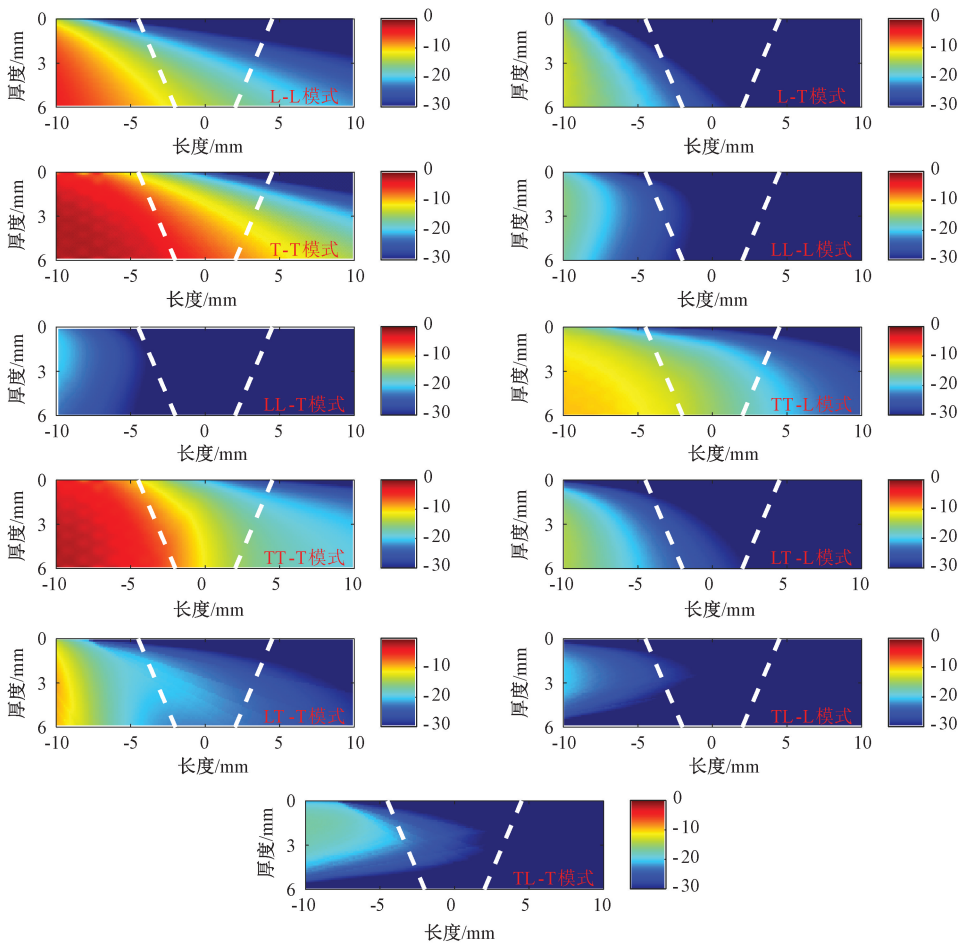


图 8 不同模式超声波缺陷响应空间分布图

Fig. 8 Spatial distribution of defect response in different ultrasonic modes

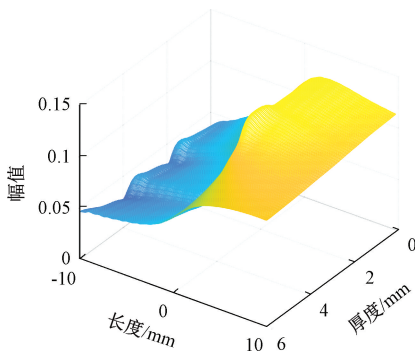


图 9 L-L 模式方向导数图

Fig. 9 Directional derivative diagram of L-L mode

但与直接相加融合成像相比,基于缺陷响应空间补偿的多模式全聚焦复合成像的信噪比更高,且可以有效剔除多次反射产生的伪像。

为量化不同成像方法的成像效果,对不同方法成像结果进行各自归一化,并在成像最大值处取截面,观察该截面上成像幅值的分布,如图 11 所示。可见 3 种成像方

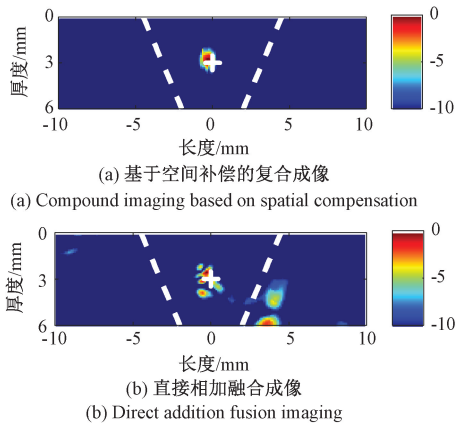


图 10 两种复合成像结果

Fig. 10 Two compound imaging results

法在长度为 0、4 和 8.45 mm 处均出现局部峰值。其中,第 1 处峰值为实际缺陷所在的位置;第 2 处峰值在 L-L 与直接相加复合成像结果中均为伪像,而基于空间补偿的复合成像方法能够较好地抑制伪像的幅值,其幅值相

较 L-L 模式降低了 14.6 dB;第 3 处峰值由于幅值较小,当成像水平保持在-6 dB 以下时,该位置的伪像未显示出。

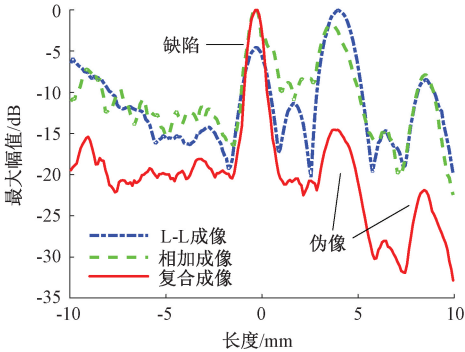


图 11 3 种成像方法幅值对比结果
Fig. 11 Comparison of amplitude results from three imaging methods

从图 11 还可见基于空间补偿的复合成像方法具有更好的信噪比,并提高了缺陷的空间分辨能力。为量化复合成像方法对不同缺陷的检测能力,定义了复合图像的信噪比,其定义为成像结果中-6 dB 内幅值平均值与-6 dB 外幅值平均值的比值:

$$SNR = 20 \times \lg \left(\frac{\text{mean}(I^*(x,y) \geq 0.5)}{\text{mean}(I^*(x,y) < 0.5)} \right) \tag{7}$$

式中:mean 为取平均值; $I^*(x,y)$ 为归一化后的成像幅值。

利用基于空间补偿的复合成像方法对不同数值模型获得的仿真数据进行了成像处理,图 12 和表 2 分别给出复合成像结果的伪像数量及信噪比。其中,焊缝区域不同位置的圆孔缺陷成像结果中均未出现伪像,且信噪比较高。但裂纹缺陷的成像结果有出现伪像,且信噪比波动较大。

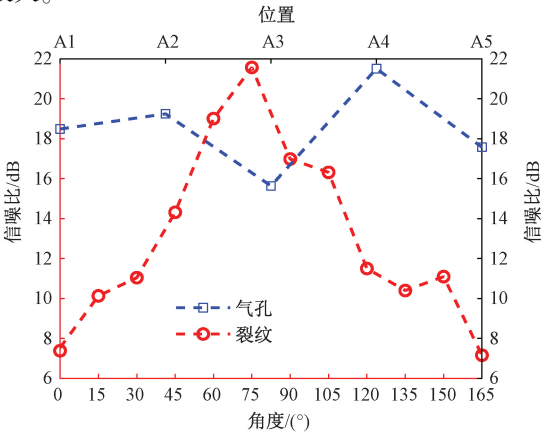


图 12 基于空间补偿的复合成像信噪比
Fig. 12 Signal-to-noise ratio of compound imaging based on spatial compensation

表 2 裂纹伪像数量
Table 2 Number of crack artifacts

角度/(°)	伪像数量	角度/(°)	伪像数量
0	1	90	0
15	0	105	0
30	0	120	0
45	0	135	2
60	0	150	0
75	0	165	1

可见当裂纹方向达到 75°时,成像结果无伪像,且信噪比最高。分析认为,在由阵列激发的声波经斜楔后,其声束方向与 75°裂纹面近似垂直,因此,反射波幅值较强,使得成像效果最佳。随着裂纹方向向小或者向大变化,入射声波与裂纹面的夹角逐渐偏离 90°,使得反射声波变弱,导致成像信噪比降低,出现较多伪像。因此,对于裂纹缺陷检测,其检测结果受超声波入射方向影响较大。

3 实验验证

本章对小径管的焊缝进行相控阵检测,并利用上述成像方法对检测数据进行了处理。

3.1 实验设备

图 13 (a) 给出了待检测小径管的实物照片,图 13(b)给出了 Multi2000 超声相控阵检测系统。表 3 给出了对应检测试件的编号和尺寸以及存在的缺陷类型和位置。检测参数设置与仿真一致。

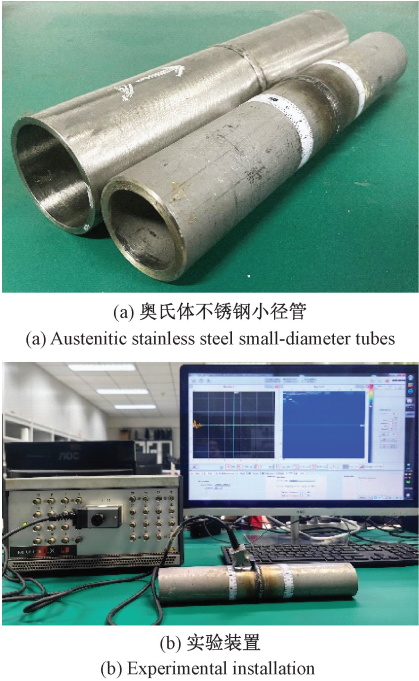


图 13 超声相控阵检测实验
Fig. 13 Ultrasonic phased array test

表 3 小径管试件参数
Table 3 Specimen parameter (mm)

试件	缺陷 编号	缺陷 类型	位置	外径	壁厚
管 1	S1	裂纹	(0, 3)	51	6
	S2	气孔	(0, 3)		
管 2	S3	根部裂纹	(0, 3.2)	63.5	4
	S4	近表面裂纹	(0, 1)		

3.2 实验结果

缺陷 S1 对应的不同模式成像结果如图 14 所示。可见不同模式成像结果间存在很大差异,且信噪比普遍较低,各模式成像结果均不同程度受到伪像影响。在显示的阈值范围内,虽然存在伪像,但 L-L 和 TL-L 两种模式可以准确、清楚的反映出缺陷位置,而其他模式成像对缺陷的表征能力则较弱,或信噪比差或位置偏差较大。

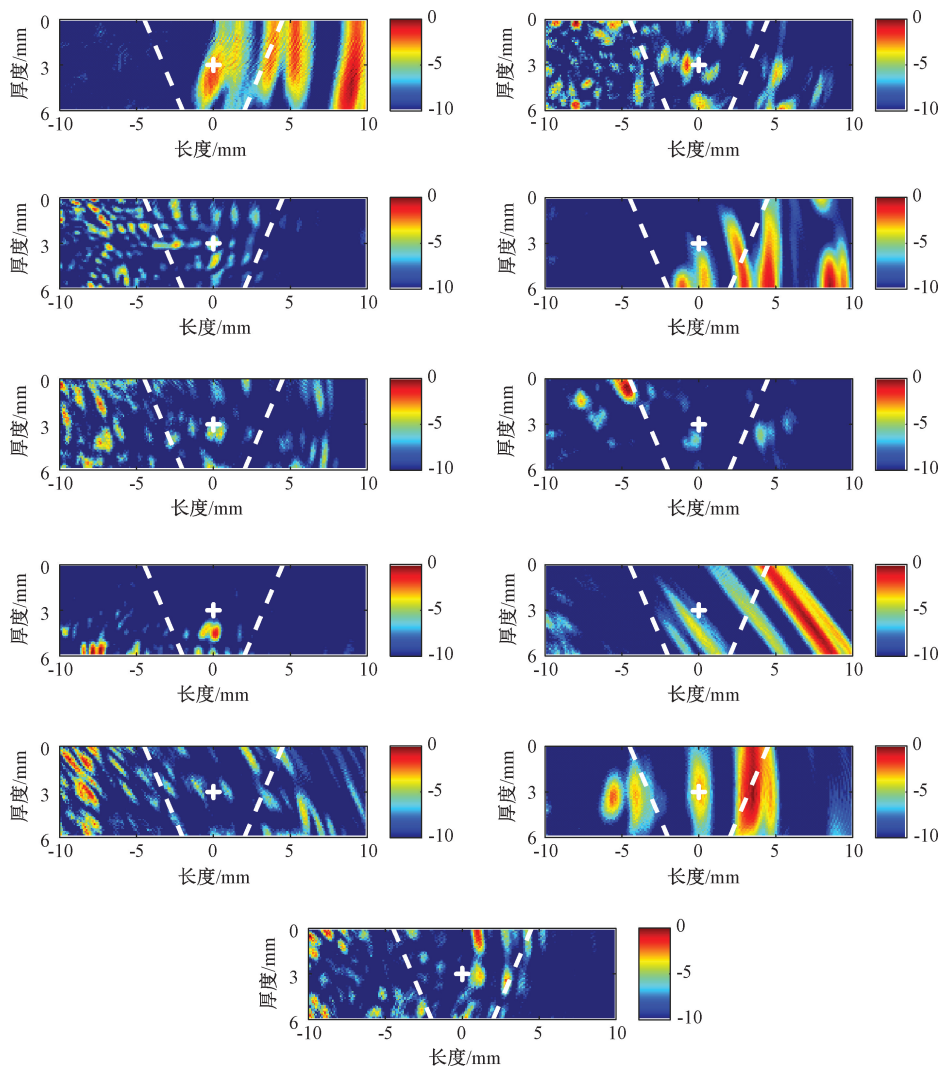


图 14 不同模式超声波对缺陷 S1 的全聚焦成像结果
Fig. 14 Total focus imaging results of defect S1 by different ultrasonic modes

按照式(6),对多模式全聚焦成像进行加权补偿,图 15 给出了 L-L 模式在补偿前后的成像幅值图。可见靠近探头一侧较高的噪声幅值在加权后得到了减弱。

图 16~19 给出了利用提出的多模式全聚焦复合成

像方法对 4 个缺陷的检测结果。作为对比,给出了对应缺陷的单一 T-T 模式的成像结果。可见单一模式难以实现缺陷检测,而利用提出的复合成像方法可以实现 4 个缺陷的检测,但对不同缺陷成像的信噪比和定位精度不同。

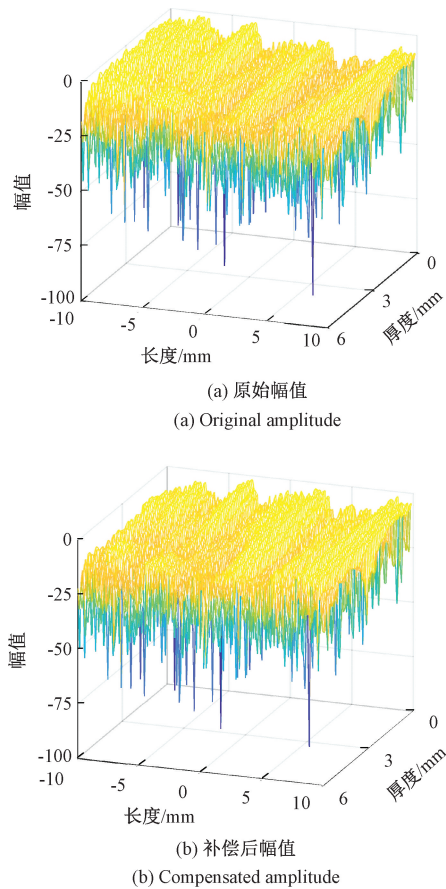


图 15 L-L 模式成像幅值
Fig. 15 Imaging amplitude of L-L mode

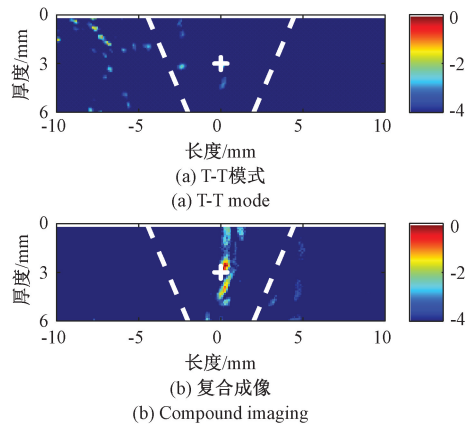


图 16 缺陷 S1 的成像结果
Fig. 16 Imaging results of defect S1

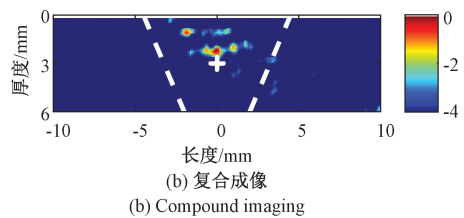
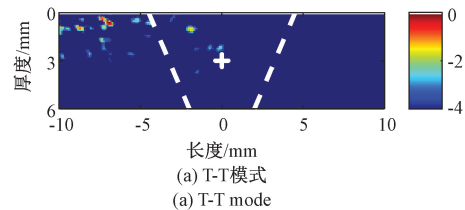


图 17 缺陷 S2 的成像结果
Fig. 17 Imaging results of defect S2

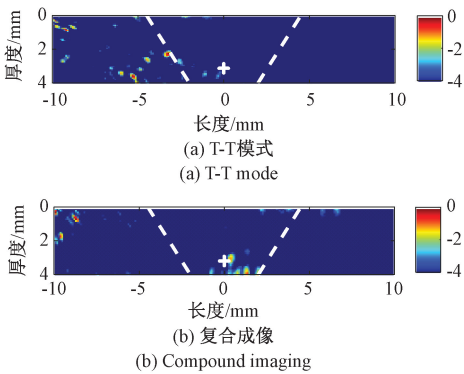


图 18 缺陷 S3 的成像结果
Fig. 18 Imaging results of defect S3

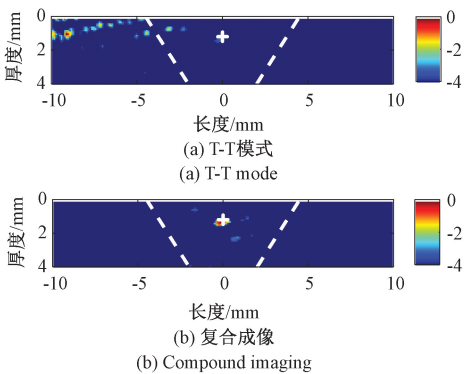


图 19 缺陷 S4 的成像结果
Fig. 19 Imaging results of defect S4

4 结 论

基于超声阵列检测技术,开展了薄壁小径管多模式复合成像方法研究,得到的结论为:

1) 建立了缺陷空间响应模型,利用该模型可以计算出不同模式超声波的缺陷响应空间分布,反映了不同模式超声波对空间不同位置缺陷的敏感性。

2) 基于缺陷响应的空间分布提出了一种改进的多模式复合成像方法。通过数值仿真和实验的对比分析证明了提出的成像方法可以很好的抑制伪像,提高缺陷成像的信噪比。

参考文献

- [1] 刘桂刚. 奥氏体不锈钢小径管焊缝超声波相控阵检测技术应用及分析[J]. 金属加工(热加工), 2024(6): 130-136.
LIU G G. Application and analysis of ultrasonic phased array detection technology for austenitic stainless steel small diameter tube weld[J]. MW Metal Forming, 2024(6): 130-136.
- [2] 杨敬, 吴斌, 焦敬品, 等. 各向异性焊缝缺陷超声阵列全聚焦成像方法[J]. 声学学报, 2019, 44(1): 125-135.
YANG J, WU B, JIAO J P, et al. Total focus imaging of defects in anisotropic welds using ultrasonic array[J]. Acta Acustica, 2019, 44(1): 125-135.
- [3] 胡海涛, 熊贵敏, 薛敏. CRDM 密封壳组件异种金属焊缝相控阵超声检测技术研究[J]. 无损探伤, 2025, 49(1): 21-26, 43.
HU H T, XIONG G M, XUE M. PAUT technique of heterogeneous metal welds of CRDM sealed shell assembly[J]. Nondestructive Testing Technology, 2025, 49(1): 21-26, 43.
- [4] 龙盛蓉, 陈尧, 孔庆茹, 等. 基于符号相干因子加权的双层介质频域相干复合平面波成像[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(3): 32-39.
LONG SH R, CHEN Y, KONG Q R, et al. Fourier-domain coherent plane wave compounding imaging for two-layered medium based on sign coherence factor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(3): 32-39.
- [5] 赵宁, 孙铭聪, 刘苗苗, 等. 一种测量液膜厚度的超声相控阵实验装置[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(3): 170-178.
ZHAO N, SUN M C, LIU M M, et al. Ultrasonic phased array experimental device for liquid film thickness measurement[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(3): 170-178.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] LI L J, FROMME P. Mode conversion of fundamental guided ultrasonic wave modes at part-thickness crack-like defects[J]. Ultrasonics, 2024, 142: 107399.
- [9] LE JEUNE L, ROBERT S, VILLAYERDE E L, et al. Plane wave imaging for ultrasonic non-destructive testing: Generalization to multimodal imaging[J]. Ultrasonics, 2016, 64: 128-138.
- [10] MERABET L, ROBERT S, PRADA C. The multi-mode plane wave imaging in the fourier domain: Theory and applications to fast ultrasound imaging of cracks[J]. NDT & E International, 2020, 110: 102171.
- [11] OHARA Y, ULRICH T J, REMILLIEUX M C, et al. Multi-mode 3D ultrasonic phased array imaging method using piezoelectric and laser ultrasonic system (PLUS)[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2023, 62(SJ): SJ1019.
- [12] YING K N, NI CH Y, DAI L N, et al. Multi-iteration frequency-domain synthetic aperture focusing technique (MIF-SAFT) in multi-mode laser ultrasound for image quality improvement[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2024, 216: 111478.
- [13] WU B, YANG J, JIAO J P, et al. Ultrasonic multi-view total focusing method for weld defect detection on small-diameter austenitic stainless steel tubes[J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2019, 61(11): 649.
- [14] JIN SH J, DI CH J, SU J K, et al. Profile reconstruction of irregular planar defects by mirrored composite-mode total focusing method[J]. NDT & E International, 2024, 141: 102979.
- [15] NICOLSON E, MOHSENI E, LINES D, et al. Towards an in-process ultrasonic phased array inspection method for narrow-gap welds[J]. NDT & E International, 2024, 144: 103074.
- [16] NICOLSON E, MOHSENI E, SUMANA, et al. Dual-tandem phased array method for imaging of near-vertical defects in narrow-gap welds[J]. NDT & E International, 2023, 135: 102808.
- [17] JIN SH J, DI CH J, SUN J K, et al. Profile reconstruction of irregular planar defects by mirrored composite-mode total focusing method[J]. NDT & E International, 2024, 141: 102979.
- [18] BUDYN N, BEVAN R L T, ZHANG J, et al. A model for multiview ultrasonic array inspection of small two-dimensional defects[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2019, 66(6): 1129-1139.
- [19] BEVAN R L T, BUDYN N, ZHANG J, et al. Data fusion of multiview ultrasonic imaging for characterization

of large defects[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2020, 67(11): 2387-2401.

[20] 周至伟,饶静,牛伟. 基于改进稀疏表示的高衰减厚壁结构超声相控阵全聚焦成像[J]. 仪器仪表学报, 2024,45(12):246-255.
ZHOU ZH W, RAO J, NIU W, et al. Total focusing method for highly attenuated thick-walled structures based on improved sparse representation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024,45(12):246-255.

[21] 张浩文,王强,肖权旌,等. 9% Ni 钢 T 角焊缝相位相干全聚焦成像[J/OL]. 声学技术,1-6[2024-11-29].
ZHANG H W, WANG Q, XIAO Q SH, et al. Phase coherent total focusing imaging for 9% Ni steel T-fillet weld[J/OL]. Technical Acoustics, 1-6[2024-11-29].

[22] 董明,于祥军,马宏伟,等. 空间脉冲响应和有限元混合的超声回波建模方法[J]. 声学学报,2023,48(5): 996-1003.
DONG M, YU X J, MA H W, et al. A hybrid method for ultrasonic echo of defects using spatial impulse response and finite element method[J]. Acta Acustica, 2023,48(5):996-1003.

[23] LOPEZ-SANCHEZ A L, KIM H J, SCHMERR L W, et al. Measurement models and scattering models for predicting the ultrasonic pulse-echo response from side-drilled holes[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2005, 24(3):83-96.

[24] ZHANG J, NIXON A, BARBER T, et al. Methodologies for validating ray-based forward model using finite element method in ultrasonic array data simulation[J]. AIP Conference Proceedings, 2018, 1949(1):080002.

[25] 张子健,吕钟杰,沈正祥,等. 承压设备对接焊缝特殊结构相控阵超声 CIVA 模拟与检测应用[J]. 电焊机, 2022,52(12):43-50.
ZHANG Z J, LYU ZH J, SHEN ZH X, et al. Ultrasonic phased array CIVA simulation and detection of special structure of butt weld of pressure equipment[J]. Electric Welding Machine, 2022,52(12):43-50.

作者简介



E-mail:jiaojp@bjut.edu.cn

Jiao Jingpin (Corresponding author) received her B.Sc. and M.Sc. degrees both from Yanshan University in 1995 and 1998, received her Ph.D. degree from Beijing University of Technology in 2005. Now she is a professor and Ph.D. supervisor at Beijing University of Technology. Her main research interests include modern control & measurement technology and methods, new nondestructive testing technology, modern signal analysis and processing technology, and advanced sensor technology.



E-mail:liangshitong@emails.bjut.edu.cn

Liang Shitong received his B.Sc. and M.Sc. degrees both from Beijing Information Science and Technology University in 2019 and 2022. Now he is a Ph.D. candidate at Beijing University of Technology. His main research interest includes modern control & measurement technology and methods.



E-mail:qigj@sepcol.com

Qi Gaojun received his B.Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 2017. Now he is the chief engineer, deputy general manager and senior engineer of Shandong Fenghui Engineering Inspection Co., Ltd. His main research interest includes non-destructive testing technology in power industry.

焦敬品 (通信作者),1995 年和 1998 年于燕山大学获得学士学位和硕士学位,2005 年于北京工业大学获得博士学位,现为北京工业大学教授、博士生导师,主要研究方向为现代测控技术与方法、无损检测新技术、现代信号分析与处理技术、新型传感器技术。

梁士通,2019 年和 2022 年于北京信息科技大学获得学士学位和硕士学位,现为北京工业大学博士研究生,主要研究方向为现代测控技术与方法。

齐高君,2017 年于哈尔滨工业大学获得学士学位,现为山东丰汇工程检测有限公司总工兼副总经理、高级工程师,主要研究方向为电力行业无损检测技术。