DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2513680

稀疏阵元管道缺陷全聚焦相位相干成像研究

王 错,李兴昊,王鹏飞,王晓娟,高鹤明
(西安理工大学机械与精密仪器工程学院 西安 710048)

摘 要:基于稀疏阵元全聚焦成像并融合相位相干加权因子,利用超声导波对管道缺陷进行成像研究。传统的全聚焦成像算法存在一些显著问题,例如全矩阵数据量庞大、处理成像所需时间过长以及信噪比相对较低,这些问题影响了超声导波在管道无损检测中的应用效果。因此,在传统全聚焦算法的基础上进行了针对性的优化,采用了稀疏阵元技术,将传统全矩阵的 32 阵元精简至 8 阵元,在保证声场覆盖的前提下使数据量减少 16 倍;其次为了保证减少阵元后的成像质量,同时引入相位相干加权因子(PCF),利用回波信号的相位一致性信息抑制噪声干扰,在保证成像质量的前提下显著提升计算效率。实验结果表明,相比传统 32 阵元全聚焦成像算法信噪比提升约 120%,成像效率提升约 38%;这不仅有效减少了成像时间,提高了成像效率,同时也提高了信噪比。针对管道中常见的多缺陷共存工况,利用全聚焦相位相干数据矩阵进行管道多缺陷叠加成像,通过利用管道中缺陷的相位信息,实现多缺陷信号的相位同步增强,提高了多缺陷的成像信噪比以及管道中多缺陷的检出率,该方法对双穿孔缺陷的成像信噪比从传统全聚焦相位相干成像的 32.97 dB 提升至 42.69 dB,提升约 30%。基于该方法的可靠性与有效性在管道缺陷中得到了验证。

关键词: 管道缺陷;多缺陷;超声导波;全聚焦方法;相位相干因子
中图分类号: TH70 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 460.99

Research on total focusing phase-coherent imaging of pipeline defect with sparse array elements

Wang Cuo, Li Xinghao, Wang Pengfei, Wang Xiaojuan, Gao Heming
(*School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China*)

Abstract: This study investigates pipeline defect imaging using ultrasonic guided waves based on a sparse-array total focusing method (TFM) integrated with a phase coherence factor (PCF). Conventional TFM suffers from significant limitations, including excessive full-matrix data volume, prolonged imaging processing time, and relatively low signal-to-noise ratio (SNR), which hinder the effectiveness of pipeline nondestructive testing. To address these issues, this research proposes an optimized TFM method by employing a sparse-array configuration, reducing the number of transducer elements from 32 to 8 while maintaining sufficient acoustic coverage, thereby decreasing the data volume by a factor of 16. Furthermore, to ensure imaging quality with the reduced array, a phase coherence factor (PCF) is introduced to suppress noise interference by leveraging the phase consistency of echo signals, significantly improving computational efficiency without compromising imaging resolution. Compared with conventional 32-element TFM, experimental results show that the proposed method achieves an approximately 120% improvement in SNR and a 38% enhancement in imaging efficiency, effectively reducing processing time while improving detection performance. For scenarios involving multiple coexisting defects, this study develops a multi-defect superposition imaging technique based on the TFM-PCF data matrix. By utilizing the phase coherence characteristics of defect signals, this method enables phase-synchronized enhancement of multiple defects, improving both SNR and detection rates. Specifically, the proposed method increases the SNR for double-hole defects from 32.97 dB (conventional TFM-PCF) to 42.69 dB, representing a 30% improvement. The reliability and effectiveness of this method are experimentally validated for various pipeline defect conditions, demonstrating its potential for practical industrial applications in high-precision pipeline inspection.

Keywords: pipeline defects; multiple defects; ultrasonic guided waves; total focusing method; phase coherence factor

收稿日期:2025-01-13 Received Date: 2025-01-13

0 引　　言

管道运输作为五大运输方式之一,在我国运输行业发挥着重要的作用,对我国的国民经济也具有举足轻重的推动作用。随着我国管道产业的快速发展,截至2022 年,中国建成油气管道里程已达 4 668 km,管道总里程更是突破 1.55×10^5 km[1]。然而,随着管道数量的增加,老化、腐蚀、裂纹和磨损等问题也日益突出。如果这些问题未能及时监测,可能引发原材料泄漏等严重事故,甚至威胁人员安全,造成重大损失。传统的无损检测方法在管道缺陷的详细信息获取方面存在一定局限性。随着技术的进步和成熟,研究重点逐渐从传统的无损检测方法转向更为直观和精确的管道缺陷可视化技术,这一转变为提升管道检测能力提供了新的方向和机遇。

全聚焦成像算法(total focusing method, TFM)[2]是一种以全矩阵数据捕获(full matrix data acquisition, FMC)为基础的典型离线后处理成像技术,同时也是超声相控阵检测中常用的一种方法。与其他超声相控阵检测技术[3](合成孔径成像,超声计算机断层成像(ultrasound computed tomography, USCT),衍射时差法(time of flight diffraction, TOFD)成像[4])相比,TFM 成像可以实现在成像区域内的任意一点聚焦,具有更高的精度和更好的成像效果,因此 TFM 算法也被认为是提供最佳分辨率和更大动态范围的“黄金标准”[5-6]。但全聚焦成像算法基于全矩阵数据实现,故成像时间因数据量过大而大大增加,使其在实际应用中的价值被大幅降低。而且由于等声路径线扩散和超声旁瓣能量泄漏,全聚焦成像技术不可避免地会产生伪影从而降低信噪比。此类伪影与全聚焦超声检测原理有关,不便于直接消除,影响后续缺陷的定性和定量分析[7]。为解决成像速度过慢的问题,冉超[8]通过 FPGA(field programmable gate array)设计实现 32 阵元实时全聚焦合成孔径成像,缩减了成像时间,但仍存在横向分辨率较低的问题。张鑫宇等[9]采用稀疏阵元对超声导波系数矩阵进行全聚焦成像,显著提升了成像效率,但未对稀疏阵元引入的精度损失进行补偿,因而难以实现高精度成像。Chen 等[10]为了解决全聚焦成像中全矩阵数据采集时间过长的问题,采用选择一种多参数遗传算法来优化稀疏阵列布局,从而减少了数据收集并提高检测速度,但优化结构复杂,并且不能很好地解决阵元数量减少所带来的成像信噪比下降的问题。为解决伪影旁瓣造成的信噪比较低的问题,Yu 等[11]提出了一种频率稀疏表示方法,通过构建声学传播模型,将缺陷反射信号建模为稀疏向量,利用 L1 范数正则化优化求解,有效分离重叠回声并抑制噪声,但由于正则化参数对管道敏感性较高,缺乏普适性。Sun 等[12]提出了一种基于白鲨算法(white shark optimization, WSO)的稀疏阵列设计,用少数阵元保留等效孔径,通过优化旁瓣与主瓣宽度实现成像时间减半且保持精度,但其算法复杂度较大,导致该算法在兼顾成像效率和精度的稀疏程度较难把控。Cruza 等[13]提出了一种基于平面波的相位相干因子加权全聚焦成像方法,利用相位相干抑制杂散信号,从而提高成像质量。但上述两种方法均基于传统相控阵或全聚焦成像算法进行优化,未考虑成像时间;Zhao 等[14]通过离散张量建模和稀疏正则化策略,结合快速迭代收缩阈值算法并嵌入修正线性单元(rectified linear unit, ReLu),显著提升了超声波相控阵成像的分辨率、对比度及噪声抑制能力,但是成像时间较长,约为传统全聚焦的 5 倍。在以上研究中均未兼顾成像质量和成像效率。Zhang 等[15]利用符号相干因子(sign coherence factor, SCF)成像算法对铝板中多个穿孔缺陷进行成像验证,得到 SCF 成像可以削弱多个孔状缺陷间频散信号的干扰的结论,但该文献只是针对铝板中多缺陷进行 SCF 算法与其他传统算法对比成像并未对 SCF 成像算法进行特定的多缺陷成像优化且未在管道中进行验证。Senyurek 等[16]提出一种利用 3 个以 7.5 mm(半波长)间距布置的压电传感器构成的紧凑相控阵列,结合改进全聚焦算法,通过同时激发两个传感器的波干涉修正及多缺陷的匹配技术,在铝板上实现了多缺陷高精度定位,但未充分考虑激励对称性从而对成像造成一定影响。

在以上研究背景下,针对管道缺陷的导波成像问题,选择采用相对简单直接的阵元优化策略,对相位相干因子加权全聚焦成像方法进行优化。由于管道中超声导波的复杂性,相位相干因子加权全聚焦成像方法的可靠性与有效性需进行验证及优化。采用稀疏超声导波激励阵元和全聚焦成像算法,在此基础上引入相位相干加权因子(phase coherent factor, PCF),用于管道缺陷的成像,兼顾了成像效率以及成像质量,有效缩短成像时间和提高缺陷成像的信噪比。

针对管道中的多缺陷成像,对 SCF 算法成像进行优化并结合形态学操作进行多缺陷筛选叠加成像,有效提高了多缺陷的成像信噪比。为验证该方法在管道缺陷检测中的可靠性与有效性,采用 ANSYS 有限元仿真软件进行数值仿真,搭建了管道缺陷检测实验平台,并采用本研究的方法对仿真数据和实验数据开展管道缺陷成像,结果表明,优化的成像结果可有效提升管道缺陷的检测性能。

1 稀疏全聚焦相位相干成像

1.1 全矩阵数据采集原理

全矩阵数据捕获为全聚焦成像技术的核心步骤,全矩阵数据的采集过程如图 1 所示。

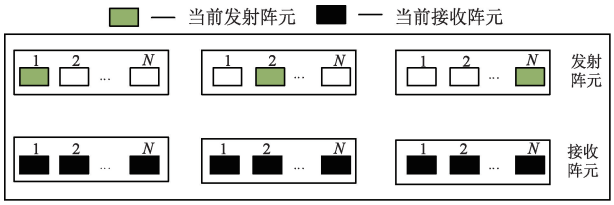


图 1 全矩阵数据捕获示意图

Fig. 1 Diagram of full matrix data capture

假设将相控阵阵元设置为 N 个,首先由第 1 个发射阵元激励超声导波信号,第 1 个到第 N 个阵元作为接收阵元接收回波信号,发射阵元依次激励 N 个信号,这样便得到一组 $N \times N$ 的矩阵数据,如表 1 所示。

表 1 全矩阵数据

Table 1 Full matrix data

发射阵元 i	接收阵元 j				
	1	2	3	…	N
1	S_{11}	S_{12}	S_{13}	…	S_{1N}
2	S_{21}	S_{22}	S_{23}	…	S_{2N}
3	S_{31}	S_{32}	S_{33}	…	S_{3N}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋱	⋮
N	S_{N1}	S_{N2}	S_{N3}	…	S_{NN}

其中,S_{ij} 表示接收阵元接收到的回波数据,i 为发射阵元,j 为接收阵元。

1.2 管道缺陷稀疏全聚焦相位相干成像算法研究

为研究管道缺陷的全聚焦成像,需要将管道沿周向方向展开为长方形,将管道等效为板进行算法研究,则管道全聚焦成像算法的原理如图 2 所示。

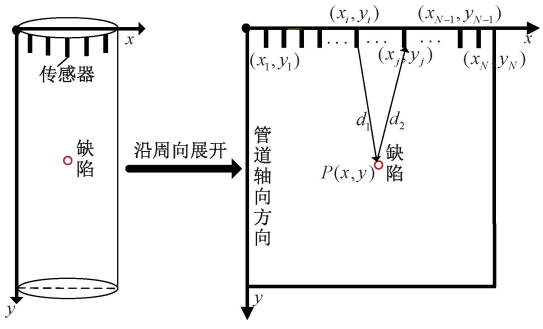


图 2 全聚焦成像算法原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the full-focus imaging algorithm

以管道周向方向为 x 轴,轴向方向为 y 轴建立直角坐标系。其中 P 为管道中任意一点缺陷,坐标为 (x,y),x_i 为发射阵元横坐标,x_j 为接收阵元横坐标。$t_{ij}(x,y)$ 为激励阵元发射的超声导波经过 P 点之后产生的回波信号被阵元接收的整个时间,定义为:

$$t_{ij}(x,y) = \frac{d}{c} \tag{1}$$

$$d = d_1 + d_2 = \sqrt{(x - x_i)^2 + y^2} + \sqrt{(x - x_j)^2 + y^2} \tag{2}$$

其中,c 为超声导波在管道中的传播速度,d 为超声导波在管道中经过 P 点传播的距离之和。如此便得到该缺陷处在全矩阵数据中对应的幅值 S_{ij},将该点处所有对应的幅值 S_{ij} 相加便得到该点对应的总幅值 $I(x,y)$,如式(3)所示。

$$I(x,y) = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} S_{ij}\left[\frac{t_{ij}(x,y)}{t_0}\right] \tag{3}$$

$$t_0 = \frac{1}{f_s} \tag{4}$$

其中,t_0 为采样点的采样间隔,f_s 为中心频率。

随后在稀疏阵元全聚焦算法的基础上融合相位相干加权因子来提高成像信噪比。首先,将全矩阵数据 S_{ij} 进行 Hilbert 变换为:

$$\tilde{S}(t) = S(t) * \frac{1}{\pi t} \tag{5}$$

其中,$*$ 为卷积运算。

得到的频域特性为:

$$\hat{S}(\omega) = S(\omega)H(\omega) \tag{6}$$

$$H(\omega) = \begin{cases} -j, & \omega \geqslant 0 \\ +j, & \omega < 0 \end{cases} \tag{7}$$

然后构造出解析信号,即:

$$\tilde{S}(t) = S(t) + j\hat{S} \tag{8}$$

其中,$S(t)$、$\hat{S}$ 分别为原始信号与希尔伯特变换后的信号,因此可以将式(8)写为:

$$\tilde{S} = |S|(\cos\varphi + j\sin\varphi) \tag{9}$$

其中,$|S|$为数据 $S(t)$ 的模,φ 为相位角,$\cos\varphi$ 为实部信息,$\sin\varphi$ 为虚部信息。然后再利用聚焦点对应的全矩阵数据中的虚部和实部的相位信息构建循环相位相干因子(circular coherence factor, CCF),其表达式为:

$$CCF = (1 - \sqrt{\mathrm{var}(\cos\varphi) + \mathrm{var}(\sin\varphi)})^{\varepsilon} \tag{10}$$

其中,$\mathrm{var}(\cos\varphi) + \mathrm{var}(\sin\varphi)$ 为全聚焦图像中聚焦点的信号相位标准差,$\varepsilon \in [0,1]$ 为强度因子,可调整相干性的强度,其表达式为:

$$\mathrm{var}(\cos\varphi) = \left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(\cos\varphi)^2 - \left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\cos\varphi\right)^2\right) \tag{11}$$

$$\mathrm{var}(\sin\varphi) = \left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(\sin\varphi)^2 - \left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\sin\varphi\right)^2\right) \tag{12}$$

CCF 提供了[0,1]范围内的相位相干因子,该因子的

大小取决于聚焦点接收回波信号的来源,若该聚焦点位于缺陷区域时,信号的相位分布较为一致,CCF 因子更接近于 1,反之接近于 0。同时强度因子 ε 取值越接近于 1,对相位标准差的放大作用越强。理论上强度因子 ε 越大,去噪效果越好,但同时也会损失部分图像信息。

最后,在全聚焦成像的基础上融合 CCF 因子进行加权,加权后得到新的幅值 I_{CCF} 为:

$$I_{CCF} = |I(x,y) \times CCF| \tag{13}$$

通过图 3 可以看出在缺陷区域以及信号发射和端面回波区域,信号波包较大,能量较为集中;噪声区域信号杂乱无序,变化无规律。

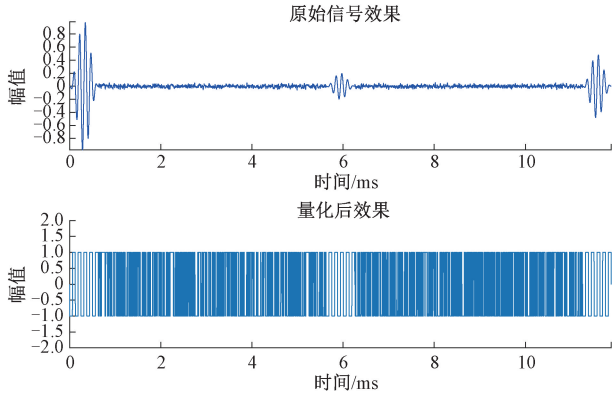


图 3　管道超声导波信号示例

Fig. 3　Example of pipeline ultrasonic guided wave signal

因此运用式(15)对反射波信号进行量化后 >0 或<0 的信号点更集中连续分布,+1 或-1 信号会被延长,最终利用 FMC 中的数据对相位进行离散化得到符号相干因子(SCF)。

$$SCF = \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\mathrm{sign}[I(i,j)]\right)^2}\right)^{\varepsilon} \tag{14}$$

其中,$\mathrm{sign}[I(i,j)]$ 为对 FMC 中数据相位进行离散化的值,$\varepsilon \in [0,1]$ 为强度因子。

$$\mathrm{sign}[x(t)] = \begin{cases} 1, & x(t) < 0 \\ 0, & x(t) = 0 \\ -1, & x(t) > 0 \end{cases} \tag{15}$$

1.3　基于 I_{SCF} 的多缺陷筛选叠加成像方法

在全聚焦成像中,当两个或多个相同大小的圆形缺陷轴向位置相同而周向位置不同时,可能会导致一个缺陷的能量分布较强,而另一个较弱。这种现象通常与成像算法、声束的衍射特性以及图像的分辨率有关[17-19];对于轴向位置不同而大小相同的圆形缺陷,由于导波特性以及导波遇到第 1 个缺陷后发生模态转换等原因,也会导致轴向位置较远的缺陷区域能量聚焦效果较差,甚至无法有效聚焦检测。

通过本研究的第 3、4 章可验证,与传统 TFM 算法相比,TFM-SCF 算法能够更有效地滤除或削减图像中的噪声和伪像,显著提高成像质量。因此,为避免多缺陷成像过程中出现缺陷漏检的情况,本研究基于 TFM-SCF 成像结合形态学操作,识别独立的缺陷区域,并对当前已检测到的缺陷区域进行总能量(缺陷的面积以及幅值)的量化和比较。通过找出最大缺陷区域并将其有效剔除后,再次进行二次成像检测能量较小的缺陷区域,最终叠加所有成像结果,具体实现流程如图 4 所示。

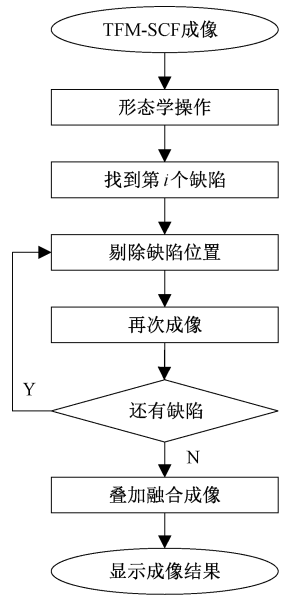


图 4　多缺陷成像流程

Fig. 4　Multi-defect imaging flow

首先对 I_{SCF} 数据矩阵如式(16)所示进行归一化并确定合适阈值 k 以便区分缺陷区域,然后利用形态学操作开运算去除孤立较小噪声点,闭运算填补缺陷区域,并计算每个区域总能量找出最大缺陷区域位置剔除并进行叠加成像。开、闭运算公式如式(17)和(18)所示。

$$I_{SCF}(x,y) = \frac{I_{SCF}(x,y) - \min(I_{SCF})}{\max(I_{SCF}) - \min(I_{SCF})} \tag{16}$$

$$I_{SCF} \circ B = (I_{SCF} \ominus B) \oplus B \tag{17}$$

$$I_{SCF} \cdot B = (I_{SCF} \oplus B) \ominus B \tag{18}$$

其中,$(I_{SCF} \ominus B)$ 为腐蚀操作,$(I_{SCF} \oplus B)$ 为膨胀操作,开运算为先腐蚀再膨胀,闭运算为先膨胀再腐蚀。

腐蚀操作如式(19)所示,膨胀操作如式(20)所示。

$$(I_{SCF} \ominus B)(x) = \min\{I_{SCF}(x+b) - B(b)/b \in B\} \tag{19}$$

$$(I_{SCF} \oplus B)(x) = \max\{I_{SCF}(x-b) + B(b)/b \in B\} \tag{20}$$

式中:b 是结构元素 B 中的一个相对位置;x 是在图像中的一个像素位置。

2 仿真实验

2.1 单缺陷仿真模型

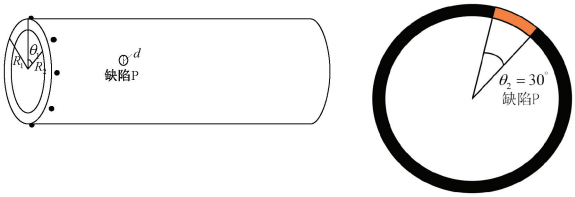
ANSYS Mechanical 是一款功能强大的有限元分析软件,其优点是能够使用有限元方法来进行结构和材料的分析,可以针对复杂的几何形状进行建模。并进行精确的力学分析;同时支持自定义脚本,提高了工作效率。在 ANSYS 中建立如表 2 数据的管道模型,单元类型采用节点数为 8,自由度为 3 的空间实体单元 SOLID185,其优点为最接近实际,可以实现各种复杂管道模型的建立[20]。

表 2 管道模型相关数据

Table 2 Pipeline modelling data

密度 /(kg·m^{-3})	弹性模量 /GPa	泊松比	管道外径 R_1/m	管道内径 R_2/m
7 850	2×10^{11}	0.28	0.017	0.013

同时在管道 1 m 处设置一个直径(d)10 mm,深度 4 mm,周向大小为 30°的孔状缺陷;在距离管道顶部一个单元格长度的位置均匀布置 8 个传感器,每个传感器的间隔夹角(θ_1)为 45°。管道缺陷设置如图 5 所示。



(a) 单缺陷管道模型
(a) Single-defect pipeline model

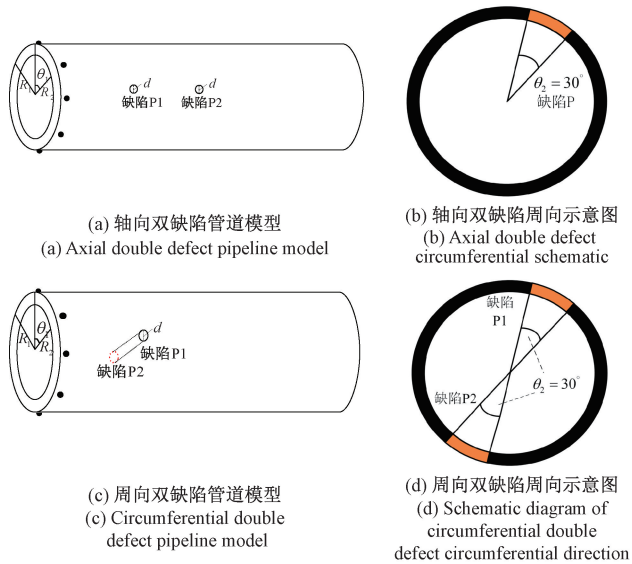
(b) 单缺陷周向示意图
(b) Single defect circumferential schematic

图 5 单缺陷管道模型示意

Fig. 5 Diagram of single defect pipeline model

2.2 多缺陷仿真模型

在多缺陷模型建立中,以双缺陷管道模型为例,进行后续的仿真及实验验证。仿真模型的建立依旧使用 ANSYS Mechanical 有限元分析软件。双缺陷管道模型的基本参数与单缺陷管道模型一致,在建立轴向双缺陷模型时选择在管道 1 和 1.5 m 处分别设置一个直径(d)10 mm,深度 4 mm,周向大小(θ_2)为 30°的圆形孔状缺陷;在建立周向双缺陷模型时选择在管道 1 m 处设置 2 个直径(d)10 mm,深度 4 mm,周向大小(θ_2)为 30°的圆形孔状缺陷,2 个缺陷周向相差为 180°。两种管道缺陷均选择在距离管道顶部一个单元格长度的位置均匀布置 8 个传感器,每个传感器的间隔夹角(θ_1)为 45°,管道缺陷设置如图 6 所示。



(a) 轴向双缺陷管道模型
(a) Axial double defect pipeline model

(b) 轴向双缺陷周向示意图
(b) Axial double defect circumferential schematic

(c) 周向双缺陷管道模型
(c) Circumferential double defect pipeline model

(d) 周向双缺陷周向示意图
(d) Schematic diagram of circumferential double defect circumferential direction

图 6 多缺陷管道模型示意图

Fig. 6 Diagram of multi-defect pipeline model

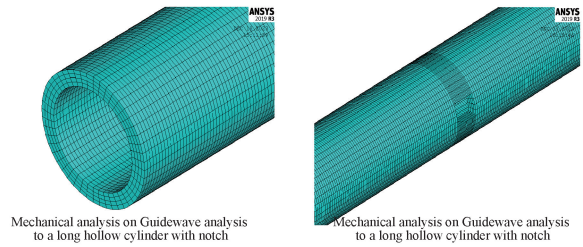
2.3 仿真模型的网格划分与边界条件设置

在 ANSYS 中进行网格划分可以提高计算的精度和效率,同时也可以更好的控制模型以及缺陷的形状和特征。本研究采用中心频率 175 kHz 的 L(0,2)模态超声导波来进行管道缺陷检测,根据式(21)计算得到需要将单元网格长度控制在 3 mm 以内。

$$l=\frac{c}{10f_s} \tag{21}$$

其中,c 为超声导波在管道中的传播速度,c 值为 5 351 m/s;f_s 为中心频率,取值为 175 kHz;l 为单元格长度。

在满足单元格长度的限制下,将管道周向划分为 96 个单元格,无缺陷处选择正六面体单元,在缺陷处,选择正四面体单元,这样可以更好地模拟均匀介质的管道。管道网格划分如图 7 所示。



(a) 非缺陷处网格划分
(a) Meshing of non-defect areas

(b) 缺陷处网格划分
(b) Meshing of defects

图 7 管道网格划分

Fig. 7 Pipeline mesh division

管道中瞬时变化的导波信号,本研究选用 ANSYS 软件中瞬态分析的完全解析法,该方法可以对管道中的导

波传播状态进行完全模拟。其次,因在实际中管道所处的复杂环境,为了尽可能控制其他干扰因素对实验数据的影响,选择对管道两端加载约束以及选择距离端面一个单元格长度的位置加载激励载荷。管道端面约束如图 8 所示。

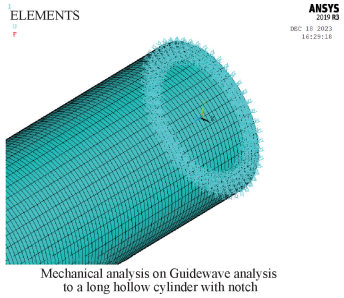


图 8　端面约束加载图

Fig. 8　Diagram of end surface constraint loading

研究所考虑的管道模型为实际应用中常见的钢管类型,缺陷位于距管道端面 1 m 位置处,换能器布置在管道一端,三者的相对关系如图 9 所示。

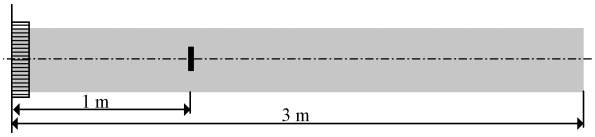


图 9　管道及缺陷模型

Fig. 9　Pipeline and defect model studied in this article

2.4　仿真数据获取及处理

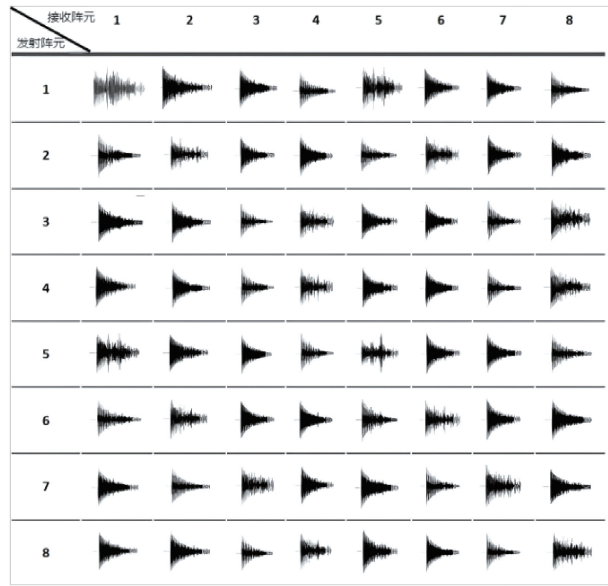
在完成上述工作后,将对建立完成的管道模型进行仿真实验,每次实验由其中一个传感器激励信号,所有的 8 个传感器全部接收回波信号。共进行 8 次实验,完成全矩阵数据的采集工作。将采集到的表 1 中的全矩阵数据转换为信号形式,如图 10(a)所示,64 组信号进行叠加将得到图 10(b)中的叠加信号,通过观察该叠加信号可以直观的观测到缺陷回波信号以及模态转换信号。最终使用获得的全矩阵数据完成全聚焦算法的成像工作。

3　数值仿真结果分析

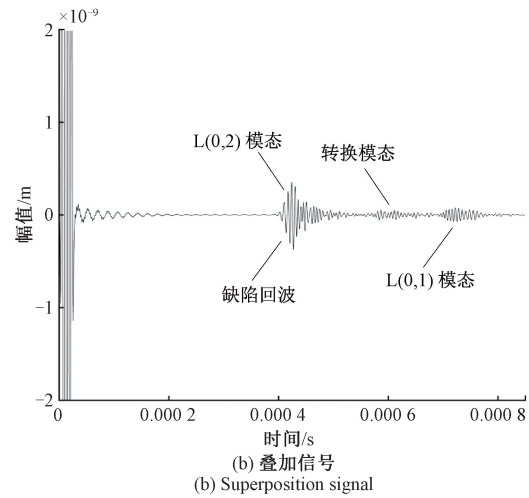
3.1　成像质量

传统 32 阵元 TFM、稀疏 8 阵元 TFM、稀疏 8 阵元 TFM-PCF-0.4 成像对比,如图 11 所示。其中 TFM-PCF-0.4 中 0.4 为强度因子 ε 的取值,强度因子 ε 的取值选择在 3.2 节中会详细介绍。

图 11(a)为传统 32 阵元全聚焦算法成像效果图,图 11(b)为稀疏 8 阵元全聚焦算法成像效果图,其中白色椭圆框内为实际缺陷位置。图 11(c)和(d)为稀疏 8 阵元全聚焦分别融合相位相干加权因子 CCF 以及 SCF 后的成像。通过直接观察图像便可得出,随着阵元数量的减少成像质量明显下降,噪声部分增多,但稀疏阵元全聚焦融合相位相干加权因子后可以很好地弥补阵元减少所带来的问题,实现高分辨率成像。缺陷的深度位置约为 1 000 mm,周向位于 150°~200°,周向大小约为 50°。可以很好的确定管道缺陷的位置。



(a) 各数据分量信号
(a) Data component signals



(b) 叠加信号
(b) Superposition signal

图 10　全矩阵数据信号形式

Fig. 10　Full matrix data signal format

利用式(22)计算不同全聚焦成像算法的信噪比(signal-to-noise ratio, SNR),其中, *signal* 表示信号的平均幅值,*noise* 表示噪声的平均幅值。通过公式不难看出,信噪比越高,噪声对于有用信号越不明显,成像质量越好;反之,成像质量越差。

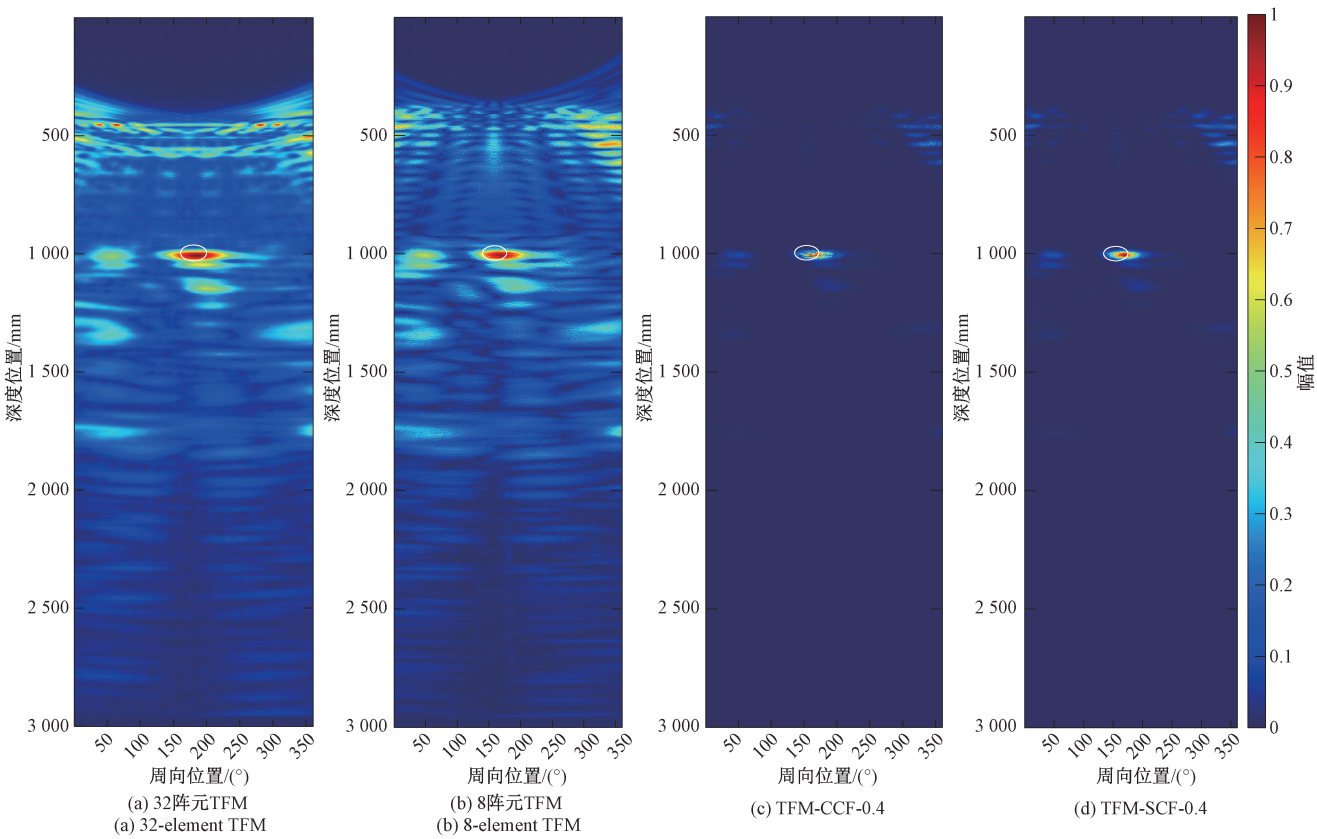


图 11 单缺陷成像效果对比

Fig. 11 Comparison of single-defect imaging effect

$$SNR = 20 \times \log10\left(\frac{signal}{noise}\right) \tag{22}$$

计算得到的信噪比如表 3 所示,通过对比表 3 中的数据,可以很直观地看出,稀疏 8 阵元全聚焦算法成像的信噪比最低,成像质量最差。稀疏 8 阵元全聚焦融合相位相干加权因子 SCF 后的成像信噪比最高,质量最好,因此在后续图像质量对比中只选择 8 阵元 TFM-SCF-0.4 图像与传统全聚焦 TFM 图像进行对比说明。

表 3 单缺陷不同全聚焦算法信噪比

Table 3 Signal-to-noise ratio of different all-focus algorithms for single defects

全聚焦成像类型	8 阵元 TFM	32 阵元 TFM	8 阵元 TFM-CCF-0.4	8 阵元 TFM-SCF-0.4
信噪比/dB	14.60	20.03	44.72	50.63

3.2 强度因子的对比选择

依次将强度因子设置为 1.0、0.7、0.4 和 0.1,图 12 为不同强度因子 ε 下的全聚焦相位相干成像效果。通过观察对比图 12 发现:当强度因子 ε 取值为 1 时,图 12(a)除缺陷区域几乎无噪声,整个成像区域光滑平整,但由于去噪强度较高,算法将缺陷区域较低的幅值信息当作噪声进行了消除,因此圆形缺陷区域中只有幅值较高的区域在图像中显现;当强度因子 ε 取值为 0.7 时,图 12(b)缺陷区域的成像不够光滑,但缺陷形状大致显现以及噪声增加并不明显;当强度因子 ε 取值为 0.4 时,图 12(c)中缺陷区域成像光滑完整,圆形缺陷完全显现;当强度因子 ε 取值为 0.1 时,图 12(d)中图像信息最为完整,同时也出现更多的噪声,因此验证了 1.2 节末对强度因子 ε 在理论上的分析,同时也通过综合对比选择将强度因子 ε 数值设置为 0.4 作为标准值。

3.3 成像效率

32 阵元全聚焦算法、稀疏 8 阵元全聚焦算法以及稀疏 8 阵元全聚焦融合相位相干加权因子成像算法在 MATLAB 中各自的成像时间和仿真数据采集时间如表 4 所示。

表 4 成像效率对比

Table 4 Comparison of imaging efficiency

全聚焦成像类型	矩阵数据量	成像时间/s
32 阵元 TFM	32×32	34
8 阵元 TFM	8×8	16
8 阵元 TFM-SCF	8×8	21

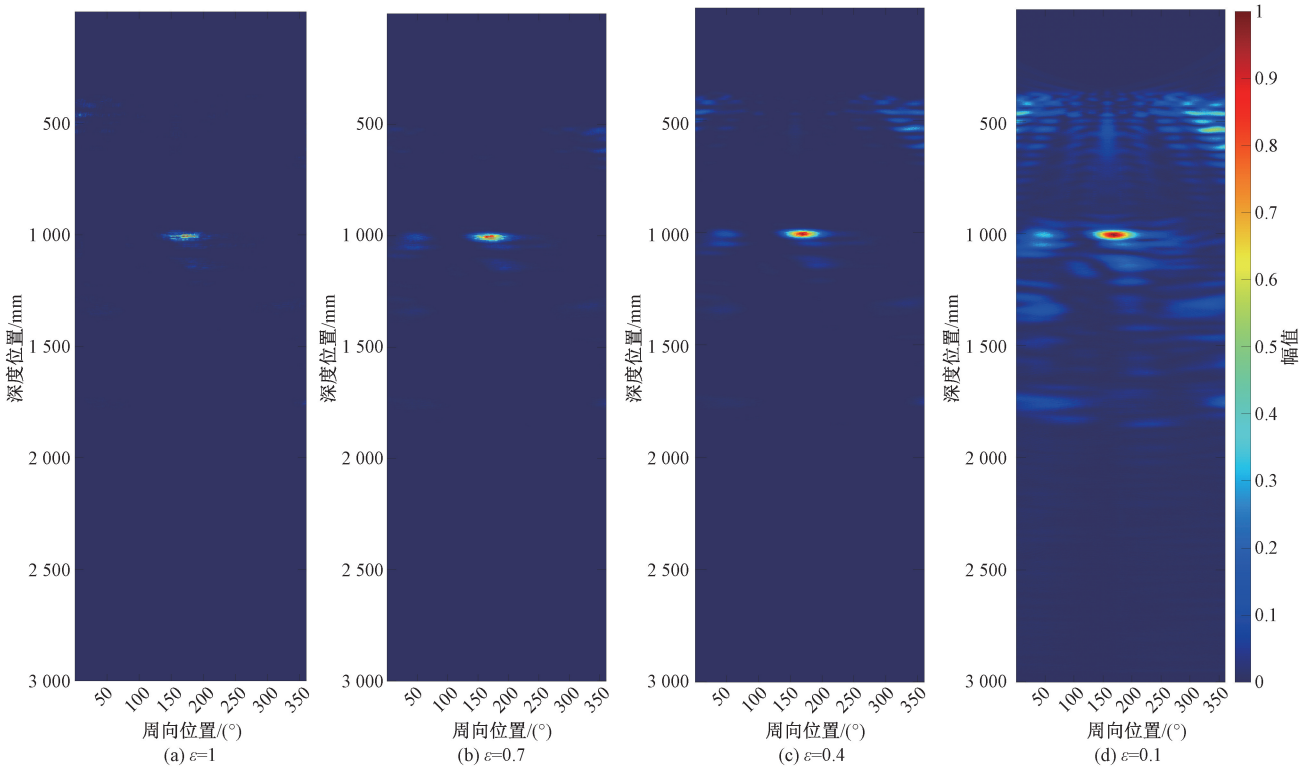


图 12　TFM-SCF 成像对比

Fig. 12　Comparison of TFM-SCF imaging

由表 4 可知,无论 8 阵元 TFM 还是 8 阵元 TFM-SCF 相比于 32 阵元 TFM 矩阵数据量都大大减少,所以成像时间也会相应缩减。通过对比计算发现,8 阵元 TFM 以及 8 阵元 TFM-SCF 相比于 32 阵元 TFM 成像效率分别提高了 53% 以及 38%。同时也可以大大减少数据的采集时间,使稀疏阵元全聚焦成像的综合效率明显提高。

3.4　多缺陷成像

针对在 2.2 节中建立的双缺陷模型分别使用稀疏 8 阵元 TFM、8 阵元 TFM-SCF, I_{SCF} 叠加成像算法进行成像对比。

周向双缺陷成像效果如图 13 所示,对应算法的信噪比如表 5 所示。

表 5　周向多缺陷不同全聚焦算法信噪比

Table 5　Signal-to-noise ratio of different total focusing algorithms for circumferential multiple defects

全聚焦成像类型	8 阵元 TFM	8 阵元 TFM-SCF	I_{SCF} 叠加成像
信噪比/dB	19.02	43.85	58.89

通过观察图 13 以及表 5 数据可得:在传统 TFM 成像图中可以观察到管道 1 m 处设置的两个圆形穿孔缺陷(虚线椭圆标记处),周向缺陷中心间隔约为 150°,且 2 号缺陷区域能量相较于 1 号缺陷区域能量较小,与激励信号产生的噪声能量近似;TFM-SCF 成像图中整体成像分辨率提高,相较于 TFM 成像提高约 130%,激励信号噪声被消除,但 2 号缺陷区域几乎被算法消除在实际应用中很难被观察; I_{SCF} 叠加成像图中,图像整体分辨率比 TFM 成像提高了约 209%,比 TFM-SCF 成像提高了约 34%,且 1、2 号缺陷区域能量相似且较为明显,在实际应用中也很难出现漏检的情况。

轴向双缺陷成像效果如图 14 所示,对应算法的信噪比如表 6 所示。通过观察图 14 以及表 6 数据可得:在传统 TFM 成像图中只有 1 号缺陷可以被观察到,2 号缺陷已完全淹没在噪声与伪像中,其中 3 号能量区域是由于全聚焦算法本身特性叠加出的伪像,而 4 号能量区域是由于 L(0,2)模态导波的特性,即在遇到缺陷后发生模态转换叠加出的伪像[21];TFM-SCF 成像图中整体成像分辨率提高,相较于 TFM 成像提高约 82%,同时 3、4 号伪像区域能量已被大幅度削减,激励信号噪声也基本被消除,但 2 号缺陷区域能量依旧不明显,在实际应用中很难被观察; I_{SCF} 叠加成像图中,图像整体分辨率比 TFM 成像提高了约 136%,比 TFM-SCF 成像提高了约 29%,且 1、2 号缺陷区域能量相似且较为明显,在实际应用中容易检出。

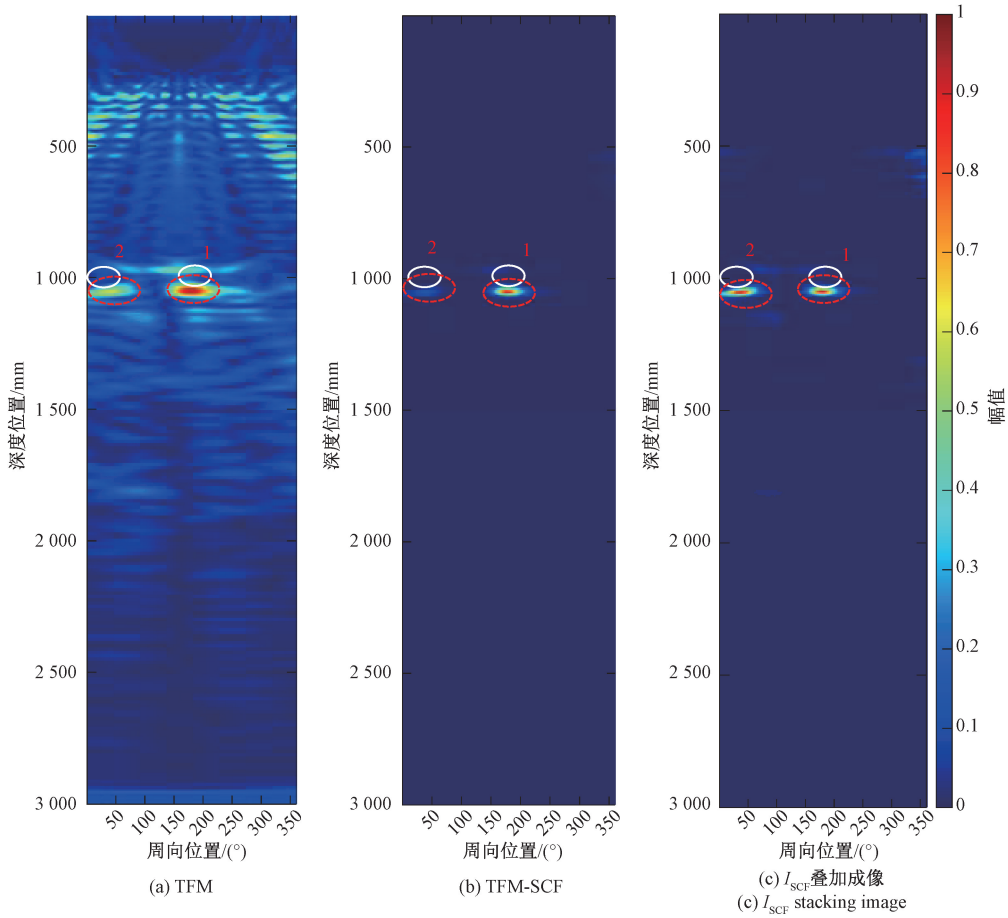


图 13 周向多缺陷成像对比

Fig. 13 Comparison of circumferential multi-defect imaging

表 6 轴向多缺陷不同全聚焦算法信噪比

Table 6 Signal-to-noise ratio of different total focusing algorithms for axial multi-defects

全聚焦成像类型	8 阵元 TFM	8 阵元 TFM-SCF	I_{SCF} 叠加成像
信噪比/dB	18.06	32.97	42.69

4 实验验证

4.1 实验系统

图 15 为实验装置，由信号发生器（Tektronix-AFG3021C）、功率放大器（ATA-2021B）、前置放大器（RITEC-BR-640A）、示波器（Tektronix-MDO3012）、8 个压电换能器组成。其中：激励信号为 175 kHz 的 L(0,2)模态脉冲五峰波经功率放大器放大后由传感器在管道顶端激励发射，再由换能器依次接收回波信号，经前置放大器放大后在示波器中输出。

细长碳钢管道外直径为 34 mm，壁厚为 4 mm，长度为 2 m。在单缺陷实验中缺陷设置于管道轴向位置 1.1 m 处，缺陷直径为 10 mm 的穿孔圆形缺陷；在周向双缺陷实验中缺陷设置于管道轴向位置 0.8 m 处，周向位置间隔 180°的两个缺陷直径为 10 mm 的穿孔圆形缺陷；在轴向双缺陷实验中 2 个 10 mm 圆形穿孔缺陷分别设置于管道轴向位置 0.8 和 1.2 m 处。缺陷设置如图 16 所示。

4.2 实验结果分析

单缺陷实验成像如图 17 所示。缺陷在成像图中的轴向位置为 1 200 mm 左右与实际缺陷在管道中的 1 100 mm 存在一定的偏移，偏移误差为 9%；图 17(a)的缺陷周向大小约为 70°，图 17(b)的缺陷周向大小约为 40°，因此可以验证 TFM-SCF 算法对缺陷的周向大小，成像精度更高。

与图 11 对比发现，虽然通过实验信号进行成像的整体图像质量比仿真的图像质量较低，但同样可以验证稀疏阵元全聚焦成像与全聚焦融合相位相干加权因子成像在实际成像应用中的可行性。

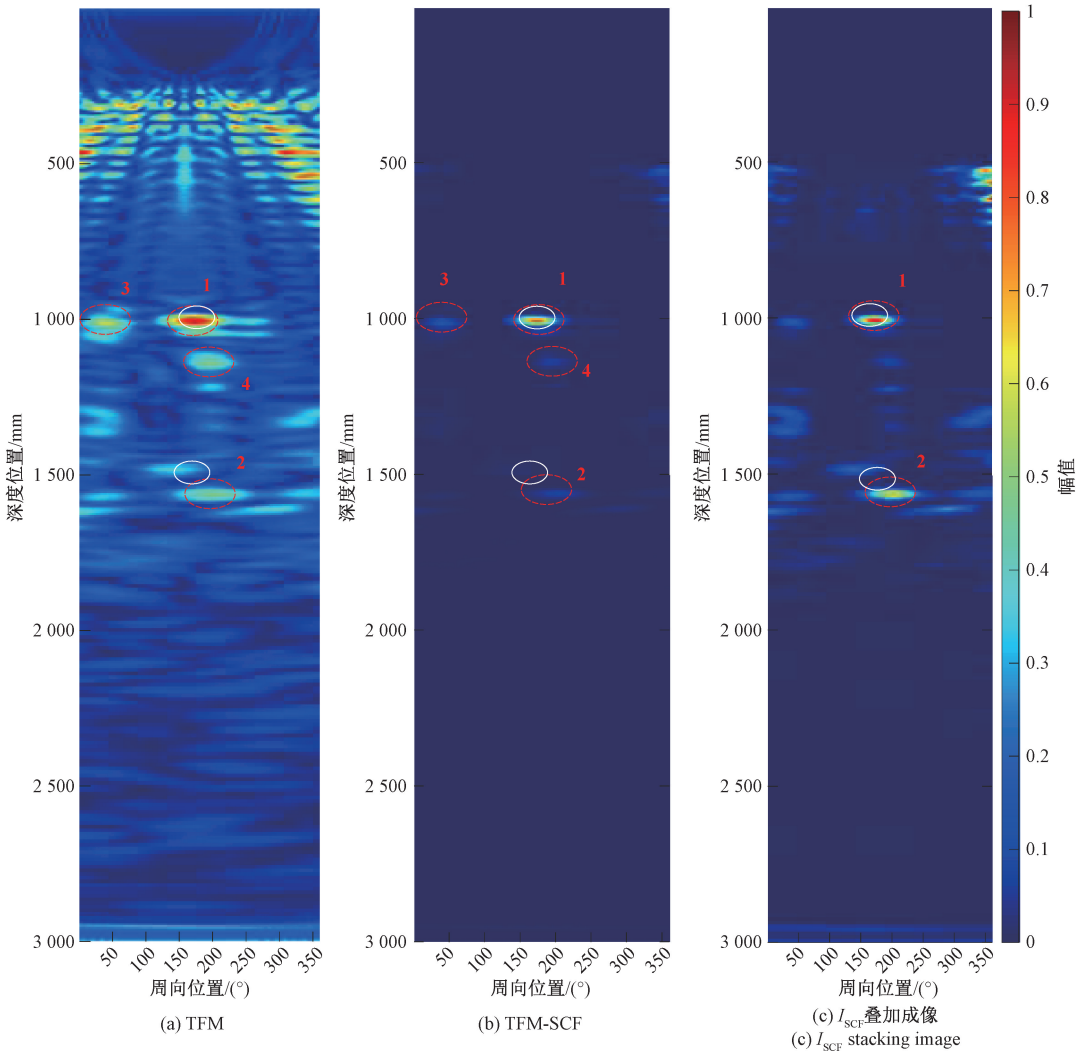


图 14　轴向多缺陷成像对比

Fig. 14　Comparison of axial multi-defect imaging

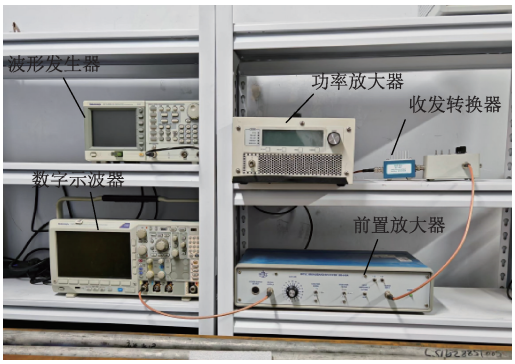


图 15　实验装置示意图

Fig. 15　Diagram of the experimental setup

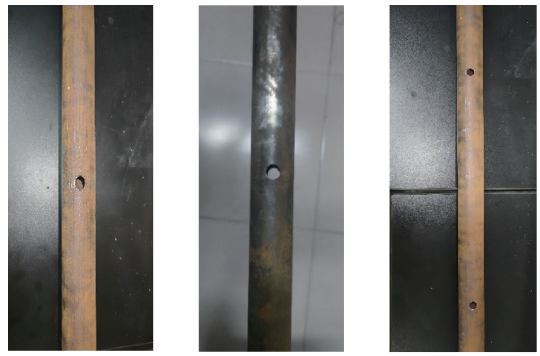


图 16　管道缺陷示意图

Fig. 16　Diagram of pipeline defects

多缺陷实验成像如图 18 所示,其中图 18(a)为周向双缺陷成像图,图 18(b)为轴向双缺陷成像图。

无论周向双缺陷还是轴向双缺陷的稀疏 8 阵元 TFM 全聚焦成像效果皆不理想,甚至无法判定缺陷位置及缺

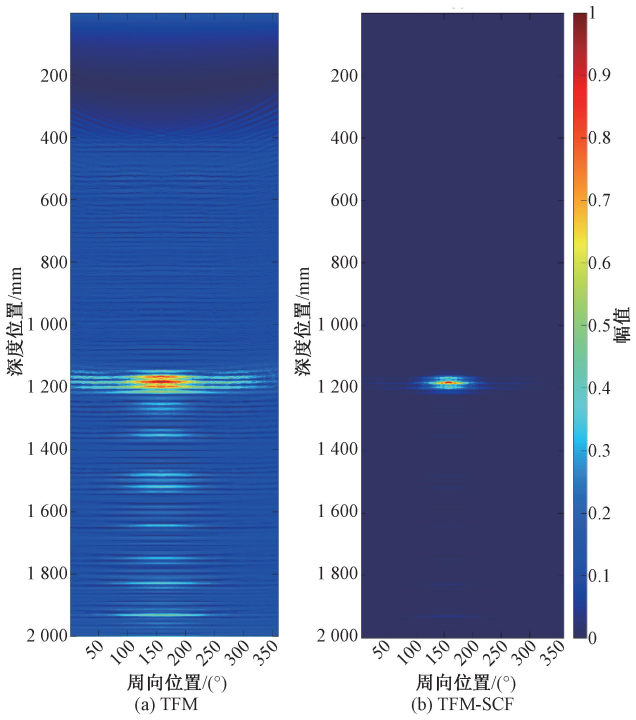


图 17 单缺陷成像图

Fig. 17 Imaging of single defects

陷个数;但在 I_{SCF} 叠加成像图中可以清晰地观察到缺陷的数量及位置(图中 1、2 标识处),图 18(a)中 1、2 缺陷周向位置间隔约为 110°,与实际周向 180°间隔误差约为 38%;图 18(b)中 1、2 缺陷轴向位置间隔约为 0.3 m,与实际 0.4 m 间隔误差约为 25%,二者虽然都有一定误差,但与传统 TFM 成像都有较大的提升。同时 3 号标识区域为超声导波在经过缺陷区域后发生模态转换堆叠后噪声的伪影区域,在实际检测应用中也可经过判断进行剔除。通过与图 13、14 对比可知,实验过程中超声导波的模态转换及噪声信号更为严重,对缺陷成像有更大的影响;但通过基于 I_{SCF} 的多缺陷筛选叠加成像方法进行改进成像之后,图像整体质量得到大幅度提高,同时缺陷位置及个数也可以精确判定。因此基于 I_{SCF} 的多缺陷筛选叠加成像方法在实际应用中的可行性及有效性得到了验证。

将实验中的单缺陷、多缺陷的成像图与数值仿真的单缺陷、多缺陷的成像图进行对比发现:实验中成像图的缺陷误差要大于仿真模拟的成像图,尤其是轴向位置的误差。分析实验中可能造成较大误差的原因为:首先,实验中传感器的安装位置、角度和耦合剂的使用可能不够精确,导致导波激励和接收信号的偏差以及实验环境中

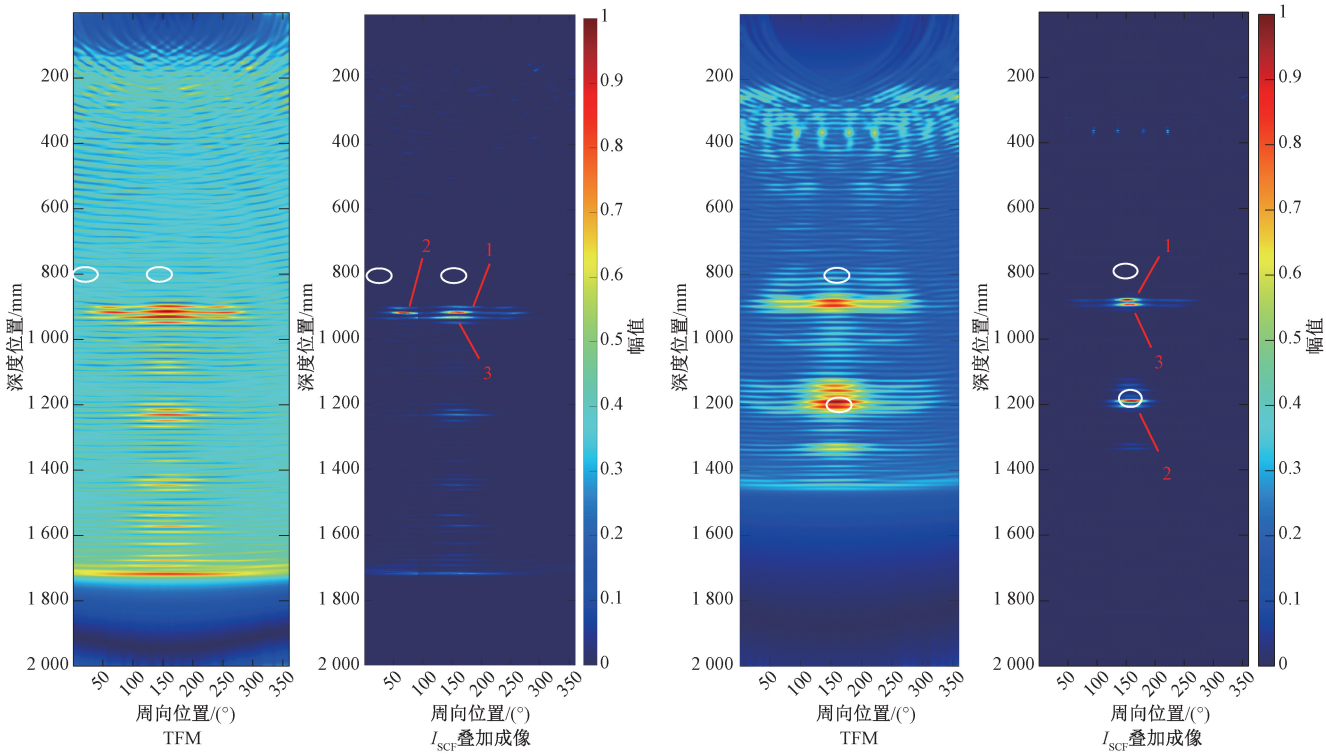


图 18 多缺陷成像图

Fig. 18 Multi-defect imaging diagram

不可避免的存在电磁干扰、机械振动等噪声源,可能降低信号质量。其次,在实际管道中,由于材料不均匀性、边界条件复杂或缺陷加工误差的存在,L(0,2)模态导波可能更多地转换为其他模态(如 F(1,2)模态)。这些模态的传播特性和反射行为与 L(0,2)模态不同,可能导致信号叠加或干扰,增加成像误差;而在数值仿真中通常假设单一模态传播,未考虑模态转换效应。并且在轴向位置导波传播路径较长,模态转换效应更加显著,可能导致信号能量分散或叠加,增加定位误差。并且,在数值仿真中使用的为理论波速来通过全聚焦算法对缺陷进行定位,而在实际实验中由于频散效应 L(0,2)模态导波的波速可能随频率发生变化,在实验数据处理中未考虑频散效应导致波速误差被放大,从而影响实验缺陷定位误差。

5　结　　论

在传统多阵元全聚焦成像算法的基础上,引入稀疏导波换能阵元相位相干加权实现管道缺陷的成像,并通过数值仿真以及实验验证对该算法的可靠性及有效性进行了验证。进一步提出基于 I_{SCF} 数据矩阵的多缺陷叠加成像方法,提高了多缺陷的成像质量,实现了对传统全聚焦技术的改进。这些方法可有效改善管道缺陷的成像质量并提高成像速度,从而提高缺陷检测效率。

1)通过数值仿真及实验得到的缺陷回波信号,利用稀疏 8 阵元全聚焦融合相位相干加权因子成像算法对管道中的单缺陷以及多缺陷进行成像。成像结果显示该算法在管道导波检测具有很好的有效性和可靠性。

2)以信噪比及成像效率作为评估指标,对 32 阵元 TFM、8 阵元 TFM 以及 8 阵元 TFM-PCF 的成像结果进行了对比分析。结果表明:稀疏 8 阵元全聚焦融合相位相干加权因子成像算法在具有高信噪比的同时,成像效率比 32 阵元全聚焦成像算法提高了近 38%。

3)本研究提出的基于 I_{SCF} 数据矩阵的多缺陷叠加成像算法可有效提高多缺陷的成像质量,非缺陷区域的噪声及伪像也得到控制,从而可提高多缺陷在实际应用中的检出率。

参考文献

[1] 高振宇,张慧宇,高鹏. 2022 年中国油气管道建设新进展[J]. 国际石油经济, 2023, 31(3): 16-23.
GAO ZH Y, ZHANG H Y, GAO P. New developments in China's oil and gas pipeline construction in 2022[J]. International Petroleum Economics, 2023, 31(3): 16-23.

[2] HOLMES C, DRINKWATER B, WILCOX P. The post-processing of ultrasonic array data using the total focusing method[J]. Insight: Non-Destructive Testing & Condition Monitoring, 2004, 46(11): 677-680.

[3] 靳世久,杨晓霞,陈世利, 等. 超声相控阵检测技术的发展及应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2014,28(9): 925-934.
JIN SH J, YANG X X, CHEN SH L, et al. Development and application of ultrasonic phased array detection technology[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(9): 925-934.

[4] WU ER Y, HAN Y, YU B, et al. Ultrasonic time-of-flight diffraction imaging enhancement for pipeline girth weld testing via time-domain sparse deconvolution and frequency-domain synthetic aperture focusing[J]. Sensors, 2025, 25(6):1932.

[5] HOLMES C, BRINKWATER 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.

[6] HOLMES C, DRINKERWATER B W, WILCOX P D. Advanced post-processing for scanned ultrasonic arrays: Application to defect detection and classification in non-destructive evaluation[J]. Ultrasonics, 2008, 48(6/7): 636-642.

[7] XIE Y, ZHOU L J, ZHANG X B, et al. Weighted full-focus defect detection and imaging method based on threshold fusion for phase coherence factor[J]. Journal of Sensors, 2022, 2022(13):6886025.

[8] 冉超. 基于 FPGA 的快速超声全聚焦成像研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
RAN CH. Research on fast ultrasonic full-focus imaging based on FPGA [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.

[9] 张鑫宇,范惜梅,李忠虎, 等. 管道超声相控阵全聚焦成像仿真及算法优化[J]. 电子测量技术, 2024, 47(6):151-156.
ZHANG X Y, FAN X M, LI ZH H, et al. Simulation and algorithm optimization of pipeline ultrasonic phased-array total focusing imaging[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(6):151-156.

[10] CHEN L, LIU Z H, TANG ZH H, et al. Optimization of selection matrix capture for micro defects laser ultrasound imaging using multi-parameter genetic algorithm [J]. NDT & E International, 2025:103325.

[11] YU Y CH, HOROSHENKOV K V, SAILOR G, et al. Sparse representation for artefact/defect localization with an acoustic array on a mobile pipe inspection robot[J]. Applied Acoustics, 2025, 231:110545.

[12] SUN L J, HAN Q B, YIN C, et al. Research on the fusion imaging method of sign coherence and time reversal

for Lamb wave sparse array[J]. Ultrasonics, 2025, 145: 107489.

[13] CRUZA J F, CAMACHO J, FRITSCH C. Corrigendum to "Plane-wave phase-coherence imaging for NDE"[J]. NDT & E International, 2020, 116:102363.

[14] ZHAO ZH Y, LIU L SH, LIU W, et al. Discretized tensor-based model of total focusing method: A sparse regularization approach for enhanced ultrasonic phased array imaging[J]. NDT & E International, 2024, 141: 102987.

[15] ZHANG M K, FAN G P, ZHU W F, et al. Multi-defect detection based on ultrasonic Lamb wave sign phase coherence factor imaging method [J]. Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2021, 63(11):659-666.

[16] SENYUREK V Y, BAGHALIAN A, TASHAKORI S, et al. Localization of multiple defects using the compact phased array (CPA) method[J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 413:383-394.

[17] CHEN Y, CAO H Q, GUO Y H, et al. Research of SNR enhancement for coarse-grained CASS based on phase coherence imaging[C]. 2016 IEEE Far East NDT New Technology & Application Forum, 2016:44-48.

[18] 赵新玉,唱晓宇,张佳莹. 双探头梯形矩阵聚焦成像方法[J]. 振动.测试与诊断,2024,44(2):280-283,408-409.
ZHAO X Y, CHANG X Y, ZHANG J Y. Dual-probe trapezoidal matrix focusing imaging method[J]. Vibration, Testing and Diagnosis, 2024, 44(2): 280-283,408-409.

[19] 张杰,莫润阳. 超声相控阵全聚焦成像算法比较分析[J]. 声学技术, 2021,40(1):71-76.
ZHANG J, MO R Y. Comparative analysis of ultrasonic phased array full-focus imaging algorithms[J]. Acoustical Technology, 2021,40(1):71-76.

[20] 王晓娟,秦晨,刘君. 管道点蚀检测的导波仿真优化研究[J]. 仪器仪表学报,2019,40(1):166-174.
WANG X J, QIN CH, LIU J. Waveguide simulation optimization for pipeline pitting detection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(1):166-174.

[21] 宋寿鹏,陈仪倩. 超声全聚焦成像中等声程线伪影剔除方法[J]. 应用声学, 2022,41(4):527-534.
SONG SH P, CHEN Y Q. Method for eliminating intermediate path-line artifacts in ultrasonic full-focus imaging[J]. Applied Acoustics, 2022, 41(4): 527-534.

作者简介

王错,2010 年武汉理工大学获学士学位,2016 年天津大学获硕士学位和博士学位(硕博连读),现为西安理工大学讲师,主要研究方向为无损检测技术与装置、传感器设计及应用等。
E-mail:wangcuo@xaut.edu.cn

Wang Cuo received her B. Sc. degree from Wuhan University of Technology in 2010 and received her M. Sc. and Ph. D. degrees (in an integrated M. Sc. -Ph. D. program) from Tianjin University in 2016. She is currently a lecturer at Xi'an University of Technology. Her main research interests include nondestructive testing technology and devices, sensor design and applications, etc.

王晓娟(通信作者),2011 年于香港城市大学获得博士学位,现为西安理工大学讲师,主要研究方向为结构无损检测等。
E-mail:xjwang@xaut.edu.cn

Wang Xiaojuan (Corresponding author) received her Ph. D. degree from City University of Hong Kong in 2011. She is currently a lecturer at Xi' an University of Technology. Her main research interests include NDT, etc.