

管道超声相控阵全聚焦成像仿真及算法优化^{*}张鑫宇¹ 范惜梅^{2,3} 李忠虎^{2,3} 李 靖^{2,3} 王金明^{2,3}(1. 内蒙古科技大学机械工程学院 包头 014010; 2. 内蒙古科技大学信息工程学院 包头 014010;
3. 内蒙古自治区光热与风能发电重点实验室 包头 014010)

摘 要: 针对厚壁管道内部缺陷识别困难、可视化差等问题,提出基于超声相控阵理论和全聚焦算法对厚壁管道内部缺陷进行图像重构。并针对全聚焦成像效率低的缺点,采用有限元法对外径为 550 mm,壁厚为 65 mm 的厚壁管道超声相控阵全聚焦成像进行仿真,模拟缺陷检测过程和成像结果,并使用稀疏矩阵对算法进行优化。结果表明:在基本满足成像质量要求的情况下,采用激发中心频率为 5 MHz,阵元宽度为 0.5 mm,阵元间距为 1 mm,阵元数量为 32 时,稀疏激发矩阵比全矩阵全聚焦成像效率提高了 74.81%,有效提高了成像速度,满足全聚焦快速成像的需求。

关键词: 厚壁管道;超声相控阵;全聚焦方法;全矩阵;稀疏矩阵

中图分类号: TH878 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1040

Simulation and optimization of ultrasonic phased array full-focus
imaging for pipesZhang Xinyu¹ Fan Ximei^{2,3} Li Zhonghu^{2,3} Li Jing^{2,3} Wang Jinming^{2,3}

(1. School of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;

2. School of Information Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;

3. Key Laboratory of Solar Thermal and Wind Power Generation of Inner Mongolia Autonomous Region, Baotou 014010, China)

Abstract: Ultrasonic phased array theory and Total Focusing Method are introduced to identify internal defects of thick-walled pipelines, the image is reconstructed. Sparse Matrix Capture technology is used to reduce data volume and improve imaging efficiency, it simulated the ultrasonic phased array total focus imaging of thick-walled pipelines with the outer diameter of 550mm and the wall thickness of 65 mm by the finite element method. The results show that when the excitation center frequency is 5 MHz, the element width is 0.5 mm, the element spacing is 1 mm, the number of array elements is 32. the effectively of the image of Sparse Matrix Capture-Total Focusing Method is 74.81% higher than that of Full Matrix Capture-Total Focusing Method, which is improves the imaging speed and meets the requirements of rapid imaging.

Keywords: thick-wall pipes; ultrasonic phased array; TFM; full matrix; sparse matrix

0 引 言

超声相控阵检测技术因灵活的声束可控性、较强的检测适应性、良好的缺陷检出率等特点在工业无损检测领域得到了成功应用^[1-4]。但其扫描声束范围有限,导致聚焦效果受到影响。全聚焦成像算法(total focusing method, TFM)是在传统的超声相控阵成像技术的基础上发展起来的一种超声后处理算法^[5-7],可以对被测区域的任意点聚焦,具有极佳的缺陷检测能力,但受到全矩阵采集数据量

大、时间长等因素的限制,全聚焦成像的速度较慢,难以满足工业检测实时成像的需求。

近年来,国内外众多学者针对全聚焦成像的局限性开展了多项研究,提高了全聚焦成像的实用性。在硬件方面,一些学者通过硬件来提高全聚焦成像的速度,如通过 FPGA 元器件设计硬件电路进一步实现了实时的相控阵全聚焦成像^[8-9]。在成像算法方面,陈尧等^[10]提出基于 $\omega-k$ 算法的快速 TFM,虽然成像速度快、对硬件要求低,但需要计算全矩阵回波数据,占用内存过大,不适用于工业快速检

收稿日期:2023-09-26

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(62161042)、内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZY23074)、内蒙古自然科学基金(2023MS06006)项目资助

测。赵大丹^[11]引入静态 1/2 矩阵和动态矩阵的方法减少 50% 数据量,赵新玉^[12]、贾乐成等^[13]基于检测系统收发通道的互易性提出三角矩阵聚焦成像算法,通过简化数据采集过程减少数据量,范学腾等^[14]提出了一种分序列局部全聚焦加速算法,计算量降低了 34.7%。上述方法的成像效率提高效果都不是十分明显。

本文采用有限元法对厚壁管道内部缺陷进行超声相控阵全聚焦成像仿真,分析了阵元数量和各阵元间距对成像质量的影响以及成像时间的决定因素,提出稀疏激发,全矩阵接收的方式进行算法优化,并定量分析稀疏矩阵全聚焦成像与全矩阵全聚焦成像的精度及算法计算效率。稀疏矩阵全聚焦成像在不影响其成像质量的情况下,通过减少索引数据计算量,提高成像效率。

1 相控阵 TFM

1.1 全矩阵数据采集

全矩阵数据采集(full matrix capture, FMC)的概念由 Hunter 提出,其原理如图 1 所示。 n 个阵元逐一激发且同时均作为接收阵元,采用一发多收模式,采集并储存全部阵元激发-接收对的超声回波时域信号,即 $n \times n$ 个回波信号 s_{ij} , 其中, $i = 1, 2, 3, \dots, n, j = 1, 2, 3, \dots, n$, 此为全矩阵数据^[15]。

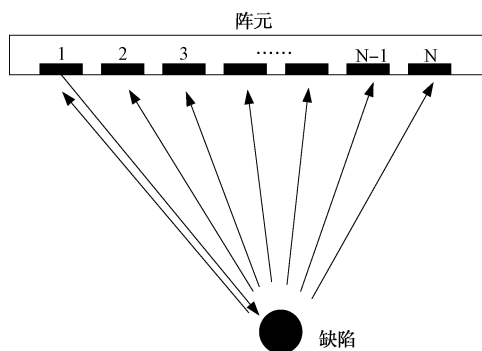


图 1 TFM 原理示意图

1.2 相控阵 TFM 原理

TFM 由 Holmes 在 2005 年提出,并引入了超声相控阵全矩阵采集概念。相比传统的超声相控阵成像技术,相控阵 TFM 不需要考虑波束的延时与偏转。将采集到的全矩阵数据聚焦到被测区域内的任意点,检测被测物中的缺陷,实现缺陷成像及可视化。

相控阵 TFM 原理如图 2 所示,首先建立虚拟聚焦扫描区域,以相控阵阵列的中心为坐标原点建立坐标系, P 点为待测区域的任意一点, x 轴为相控阵阵元排列方向, z 轴为声束的发射方向。然后,规划出对应的网格,其宽度为 d_x , 高度为 d_z 。计算 P 点到各个阵元的距离,将所有阵元激发-接收的回波信号叠加,获得 P 点的信号幅值 $I(x, z)$ 。最后,计算待测区域所有像素点的回波信号幅值,得到待测区域的图像。

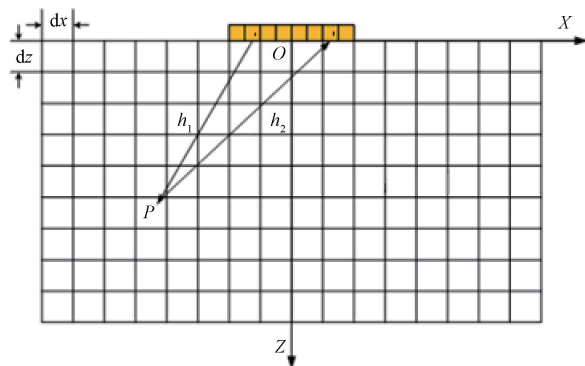


图 2 相控阵 TFM 原理示意图

$P(x, z)$ 点的回波信号幅值 $I(x, z)$ 的计算公式为:

$$I(x, z) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n S_{ij} \left[\frac{t_{ijx,z}}{\Delta t} \right] \quad (1)$$

$$t_{ijx,z} = \frac{h_1 + h_2}{c} \quad (2)$$

$$\Delta t = \frac{1}{f_s} \quad (3)$$

式中: S_{ij} 是 i 阵元激发, j 阵元接收的回波信号; $t_{ij}(x, z)$ 是声波从 i 阵元经过点 (x, z) 至 j 阵元的传播时间; Δt 是回波离散相邻数据的时间间隔; h_1 是从 i 阵元到 P 点的距离; h_2 是从 P 点到 j 阵元的距离; c 是声波速度; f_s 是系统的采样频率, 本文采样频率取 50 MHz。

1.3 基于稀疏矩阵的快速成像算法

随着阵元数量的增多,全矩阵采集到的数据量增加,使全聚焦成像的实时成像效率降低。针对此问题,可采用稀疏激发、稀疏接收和稀疏激发-接收等方法进行优化。本文采用稀疏激发的方法进行优化。以 32 阵元的一维线性阵列为例,当对偶数级阵元进行稀疏时,将其作为无效阵元,仅激发奇数级阵元,所有阵元接收采集得到全矩阵数据。稀疏激发阵元的方法并没有直接减少接收数据量,但使 TFM 中声程索引计算数据量减少了一半,进而提高成像效率。

全矩阵全聚焦成像的时间包括全矩阵采集时间和全聚焦成像时间。稀疏矩阵全聚焦成像的时间中因接收阵元数量不变,数据采集时间不变。全聚焦成像时间中每一个像素点的声程索引以及像素点振动幅值的叠加可以作为算法的一个基本操作,其耗时记作 Δt , 像素点的数量为 $M \times M$, 共耗时为 $N \times (N/2) \times M \times M \times \Delta t$ 。稀疏矩阵全聚焦成像中,因声程索引数量的减少使 Δt 减小,进而减少总耗时。

2 管道缺陷超声相控阵检测有限元数值模拟

2.1 建立仿真模型

本文利用 COMSOL 软件对厚壁管道进行超声相控阵全聚焦成像有限元模拟。建立管道仿真模型如图 3(a) 所示,长度为 2 m、壁厚为 65 mm、直径为 550 mm,材料如表 1 所示。全聚焦成像处理数据量很大,因此降低求解维

数创建厚壁管道的二维有限元模型,进而提高处理速度。如图3(b)所示,选取轴面为工作平面,创建管道截面,轴向长度为100 mm、壁厚为65 mm。在管道内壁设置深度为5 mm、宽度为1 mm的凹槽缺陷。沿管道外壁轴向布置激发阵元32个,每个阵元宽度为0.5 mm,间距为1 mm。

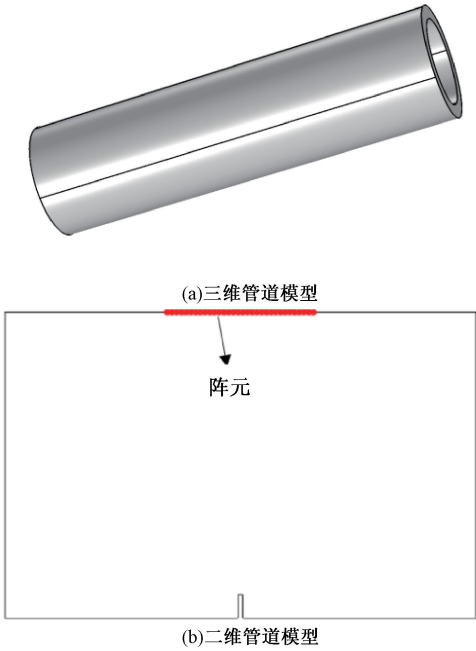


图3 仿真模型

表1 材料参数

材料	密度	泊松比	杨氏模量
20# 钢	7 800 kg/m ³	0.286	211 GPa

20# 钢中的超声波的声速为5 900 m/s,设置阵元的激发中心频率为5 MHz,则超声波波长为1.18 mm。模型网格划分单元尺寸需低于模型中传播的波长的1/10,因此单元最大尺寸取为0.118 mm。

超声波检测仿真选用瞬态动力学分析。采用广义 α 的时间步长计算方法,使用最多五个时间步长的解用来估算物理场的时间导数,同时可以预测下一个时间步长的解。一般保证波长在一个时间步长内传播的距离不超过一个网格单元的长度,因此时间步长取0.02 μ s。

2.2 施加载荷及约束

本文将管道设置在冷态情况下,为了避免内壁反射波的影响,在内壁处设置硬声场边界条件,其具有全反射特点,使各个阵元之间的干扰很小,以便观察。其余各边边界条件均设置为平面波辐射,在理想介质中传播声压幅值不会随传播距离而改变。

为了使采集到的信号具有较高的辨识度,选择汉宁窗调制的正弦波为激励信号,公式如下:

$$A t = 0.5 \times \sin(2\pi f_c t) \left[1 - \cos \frac{2\pi f_c t}{n} \right] \tag{4}$$

式中: $A(t)$ 是施加的位移载荷; f_c 是激发超声波的中心频率; n 是周期数,取2。

2.3 检测仿真结果分析

以2号阵元激发,32个阵元接收的时域回波信号为例进行分析。如图4(a)所示,从下到上依次为1~32号阵元采集的信号。在激励信号附近首先出现第一组波包,因与激发阵元距离不同,各阵元依次接收到激励信号波包,因传播距离较短,波形基本不变,但能量明显逐渐降低。在23 μ s附近出现第二组波包,各阵元接收到的回波信号时间略有不同,位于缺陷正上方的16和17号阵元首先接收到波包,从中间向两侧各阵元接收到波包的时间逐渐延长,由此判断此为内壁缺陷反射回波包。在26 μ s附近接收到第三组波包。为确定此波包收否为内壁反射波包,同上述方法采集无缺陷检测信号如图4(b)所示,发现二者基本相同。据此推断第三组波包为内壁反射回波。

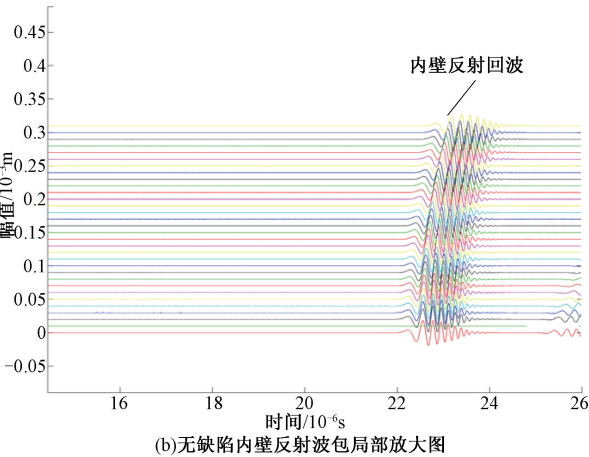
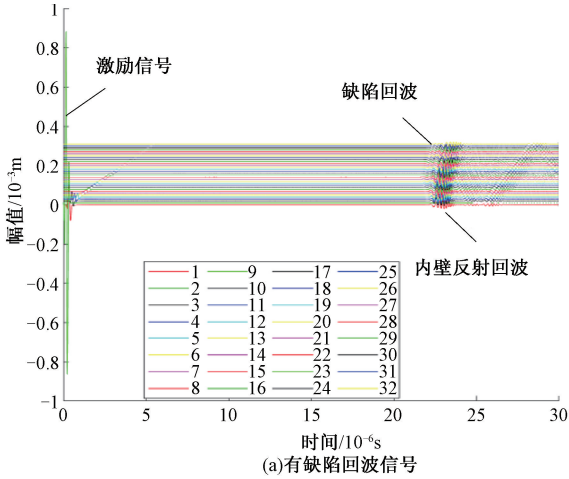


图4 2号阵元激发回波信号

将每个阵元激发,32个阵元采集的回波信号设为一组,每组波形主要包含3种波包,分别为激励信号波包、缺陷回波波包和内壁反射回波波包。因缺陷位于管道内壁,缺陷回波信号与内壁反射回波信号糅合在一起,导致两种波包区分困难。

3 全聚焦成像仿真分析及算法优化

3.1 全聚焦成像仿真分析

利用有限元模拟仿真数据,结合 TFM 进行缺陷成像,得到的全矩阵全聚焦成像。如图 5 所示,在阵元阵列中心的正下方存在聚焦能量,且深度在 60~65 mm 之间,与实际缺陷位置基本相符。全矩阵全聚焦成像与时域信号图相比,可以更加直观清晰地获得缺陷位置,并且可以大致判断出缺陷的大小。当阵元宽度为 0.5 mm,阵元间距为 1 mm,阵元数量取 8、16、32 时进行超声相控全聚焦成像对

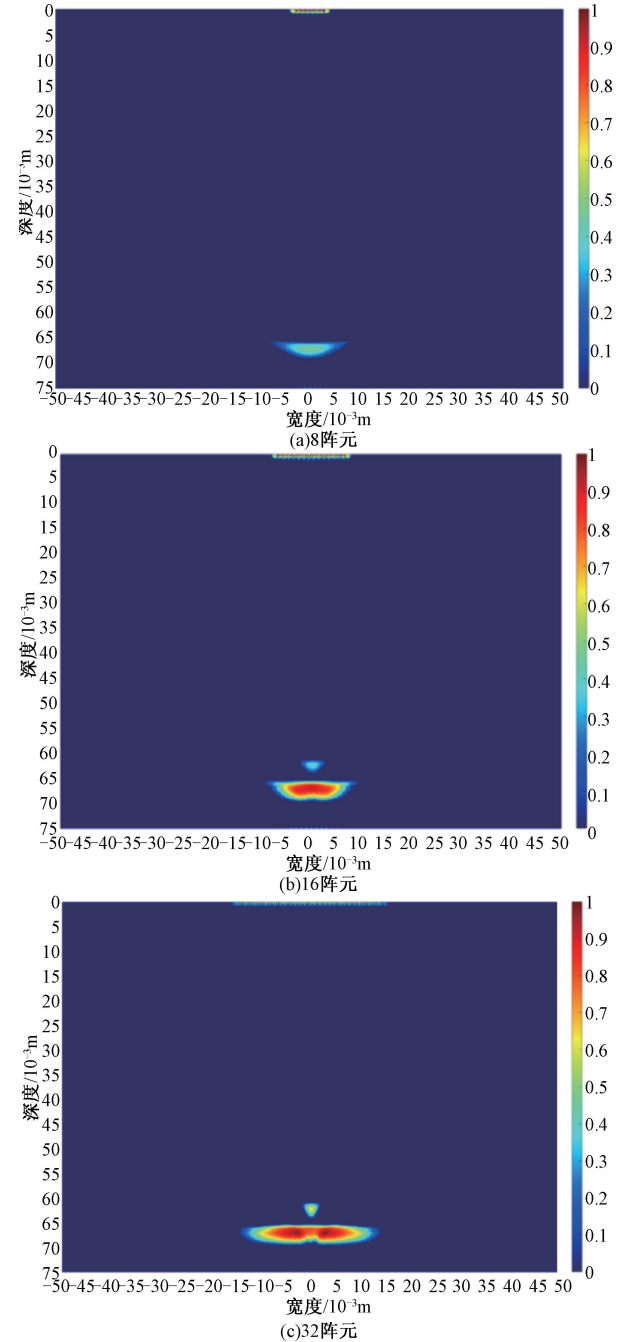


图 5 不同阵元数量的全聚焦成像

比分析。当阵元数量为 8 时,聚焦能力受到影响,只出现了微弱的能量,无法实现缺陷表征的目的;当阵元数量为 16 时,只能看出缺陷的位置,不能直观地看到缺陷的大小及形状,无法对缺陷进行定量分析;当阵元数量为 32 时,可以明显看出缺陷的位置及大小,实现了精准聚焦以及对缺陷的图像表征。

当阵元宽度为 0.5 mm,阵元数量为 32 时,分别使用 1、2、3 mm 的阵元间距来进行超声相控阵全聚焦成像对比分析。如图 6 所示,当阵元间距为 1 mm 时,超声相控阵阵列正下方的能量最强,且集中在缺陷附近,可以清楚的观察

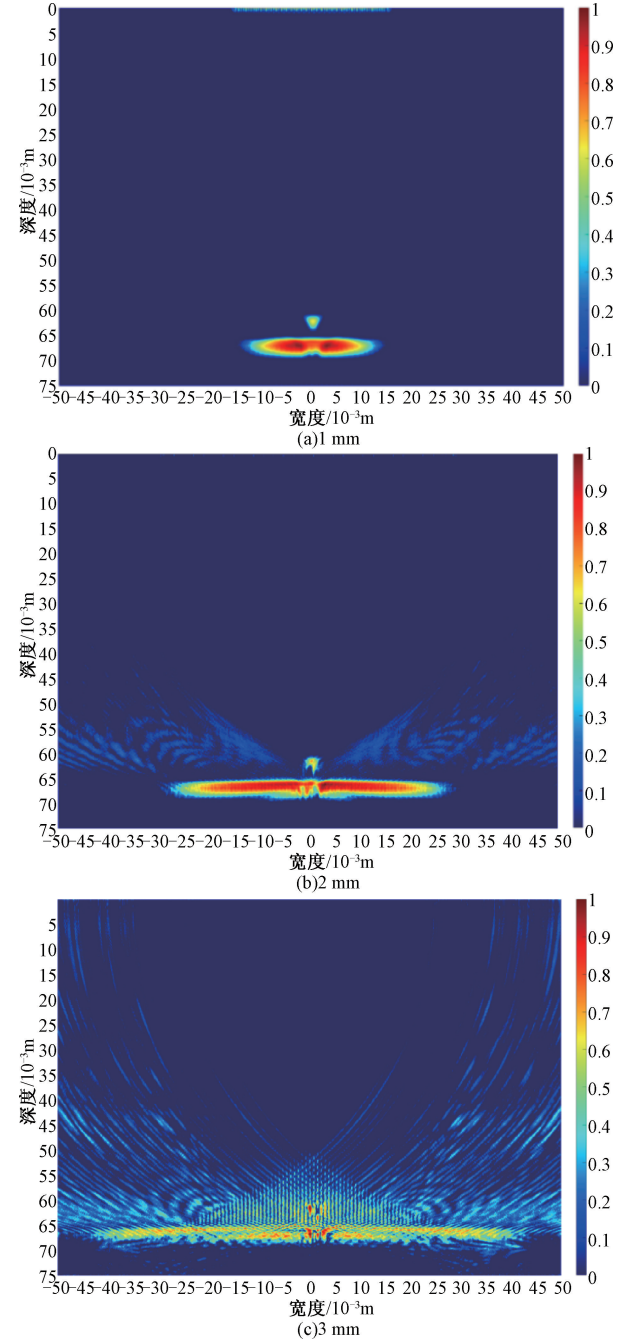


图 6 不同阵元间距的全聚焦成像

到缺陷的形状、大小与位置,与实际缺陷基本相符合,实现了缺陷可视化;当阵元间距为 2 mm 时,同样在超声相控阵阵列的正下方产生了强烈能量,但伪像增多,且缺陷的成像形状同时也发生了变化,导致全聚焦成像质量明显下降;当阵元间距为 3 mm 时,成像质量明显下降,伪像能量过强,干扰比较大,无法识别出缺陷的形状和大小。

综上所述,当阵元宽度一定时,随着阵元数量的增加和间距的减小,缺陷的轮廓形状越来越清晰,从而实现对缺陷的图像表征。当阵元数量不断增加时,全聚焦成像的分辨率会越来越高,但运行时间也随之增加,数据处理过程变得更加复杂。因此,在阵元布置时,阵元宽度为 0.5 mm,间距为 1 mm,数量为 32 较为合适,用于全聚焦成像效果最佳。

3.2 多缺陷管道内壁全矩阵全聚焦成像仿真分析

针对管道内壁存在多个缺陷的情况,进行全矩阵全聚焦成像仿真分析。在管道内壁设置半径为 1、2、3 mm 的孔蚀缺陷,二维截面如图 7 所示,其余参数同上。

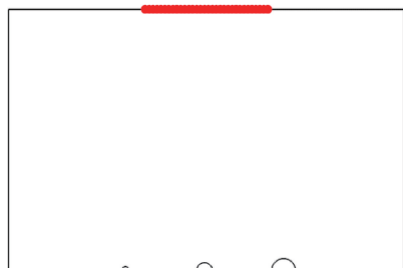


图 7 内壁多缺陷管道轴向二维截面

全矩阵全聚焦成像如图 8 所示,可以看出存在 3 个缺陷,定位较为准确,且阵元的正下方存在着强烈的能量。图中仅显示出缺陷 1 的位置,无法判别其形状;处于中间位置的缺陷 2 成像与实际的孔蚀缺陷大小与形状最为接近,从成像效果来看是最理想的;缺陷 3 成像相比较于缺陷 1 可看出缺陷的形状大小,但与缺陷 2 成像相比,虽然缺陷的深度与设置大致相同,但是缺陷成像宽度没有到达模型的宽

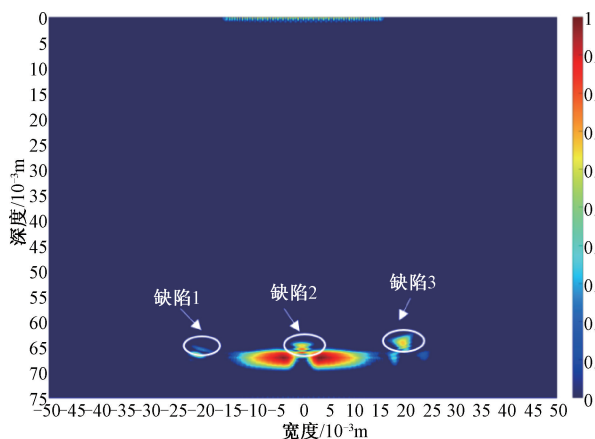


图 8 内壁多缺陷管道全矩阵全聚焦成像

度,成像效果欠佳。相控阵全矩阵全聚焦成像可以用于管道内壁多缺陷检测,但成像效果受阵元阵列尺寸的限制。

3.3 稀疏矩阵全聚焦成像仿真分析

为提高全聚焦成像的效率,按照稀疏矩阵全聚焦成像原理对有效阵元进行激发,全部阵元接收,进行稀疏矩阵全聚焦成像。如图 9 所示,当有效激发阵元数量为 16 时,可以从全聚焦成像中看出缺陷的形状、大小及位置,相较于全矩阵全聚焦成像图,缺陷比实际尺寸要小一些,未能完全表征缺陷的形状及大小,只能观察其位置,并且在两侧会出现

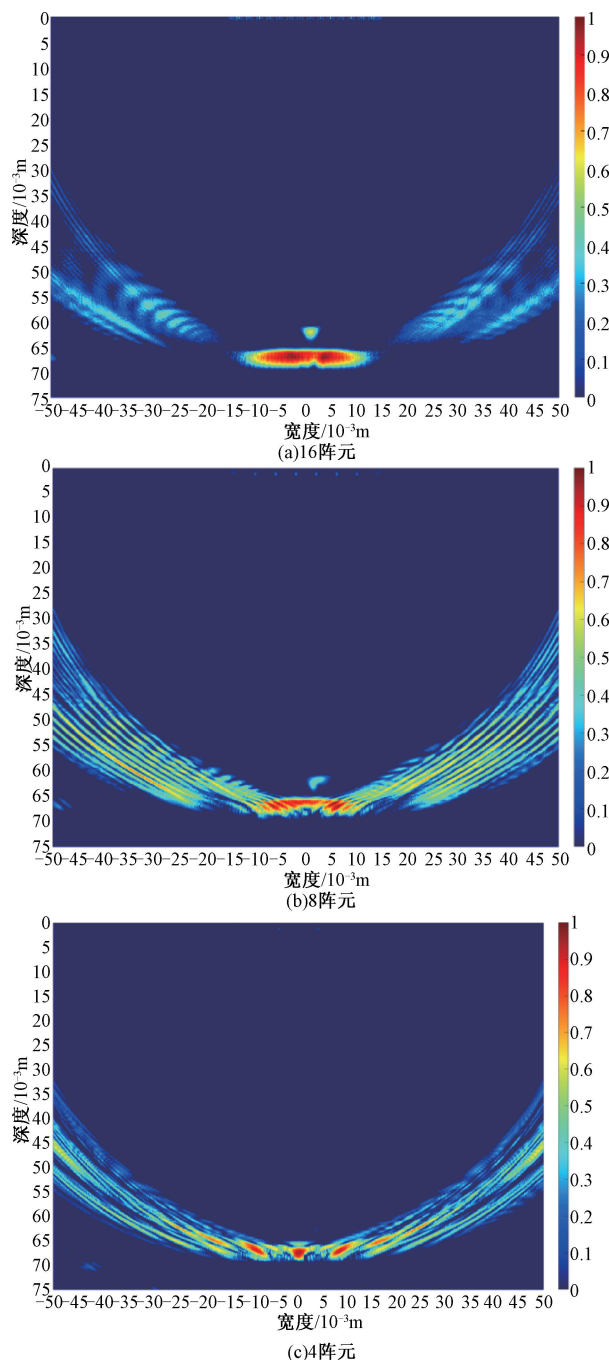


图 9 稀疏矩阵全聚焦成像

大量的伪像,但未对缺陷的形状造成影响;当阵元数量为 8 时,仅能观察出缺陷的位置,缺陷的形状和大小均发生改变,无法对缺陷进行准确表征,伪像明显增加,导致成像质量明显下降;当阵元数量为 4 时,成像图中只能看到缺陷的位置,缺陷的大小和形状无法观察,且存在较严重的伪像,导致无法检测到缺陷,出现漏检的情况。

由表 2 可知,随着有效激发阵元数量的减少,稀疏矩阵全聚焦成像的运行时间减少,成像速度大幅度提高,但伪像逐渐增多,导致成像的质量降低,聚焦能力受到影响,直至无法准确检出缺陷。因此,当采用稀疏矩阵全聚焦成像,有效激发阵元减少为 16 时,其成像质量和成像效率较好。

表 2 稀疏矩阵全聚焦成像运行时间

激发阵元数量	16	8	4
运行时间/s	3.528	0.954	0.29

4 成像效果分析与评价

分别采用传统全矩阵全聚焦成像和稀疏矩阵全聚焦成像对厚壁管道缺陷进行检测仿真,对成像结果进行比较。稀疏矩阵全聚焦成像效果要略差于传统全矩阵全聚焦成像,且在图像两侧出现了伪像。其缺陷轮廓相较于传统全矩阵全聚焦成像略小。为了进一步的探究不同全聚焦成像下缺陷成像的准确性,分别对管道内壁凹槽缺陷成像的深度和轴向宽度进行测量,结果如表 3 所示。

表 3 缺陷实际尺寸与不同全聚焦成像对比

成像算法	轴向 深度/	周向 宽度/	轴向 漏检率	周向 漏检率
	mm	mm		
缺陷实际尺寸	5	1		
传统全矩阵全聚焦成像	5	1.056	0	5.6%
稀疏矩阵全聚焦成像	4.88	1.033	2.4%	3.3%

由表 3 可知,传统全矩阵全聚焦成像和稀疏矩阵全聚焦成像对管道缺陷大小进行识别,二者漏检率都在 6%以内。当采用传统全矩阵全聚焦成像时,轴向深度检测准确度很高,轴向缺陷漏检率几乎为零,周向缺陷的最大漏检率为 5.6%;当采用稀疏矩阵全聚焦成像时,轴向缺陷的漏检率有所增高,为 2.4%,周向缺陷的漏检率较全矩阵全聚焦成像低。

传统全矩阵全聚焦成像运行时间为 14.01 s,稀疏矩阵全聚焦成像运行时间为 3.528 s,因减少了数据量,在运行时间上提高了 74.82%,有效地提高了全聚焦成像效率。

5 结 论

针对厚壁管道内部缺陷实时成像的需求,对超声检测进行模拟,建立了有限元模型,确定了相控阵激发信号、载

荷、约束等。相控阵全聚焦成像可用于管道内壁缺陷检测。

利用超声检测有限元仿真数据,模拟全聚焦成像,发现随着相控阵阵元数量增大和间距的减小,成像质量提高,但运行时间也随之增加。高质量的相控阵全聚焦成像需要在满足检测要求的前提下,确定合适的阵元数量和间距。

稀疏矩阵全聚焦成像与传统全矩阵全聚焦成像效果接近,但稀疏矩阵全聚焦成像运行效率比全矩阵全聚焦成像提高了 74.81%,运行速度大幅提高,满足了全聚焦快速成像需求。

参考文献

[1] NANEKAR P, JOTHILAKSHMI N, JAYAKUMAR T. Ultrasonic phased array examination of circumferential weld joint in reactor pressure vessel of BWR[J]. Nuclear Engineering and Design, 2013, 265:366-374.

[2] 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.

[3] Zhou Z G. Research on phased array ultrasonic total focusing method and its calibration[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(10): 1-7.

[4] 敬博通,聂鹏飞,党凯强. 基于 COMSOL 对超声相控阵特性对比分析[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(1): 53-57.

[5] 周正干,彭地,李洋,等. 相控阵超声检测技术中的全聚焦成像算法及其校准研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(10):1-7.

[6] 陈乐. 超声相控阵全聚焦成像检测缺陷的定位定量优势分析[J]. 上海煤气, 2023(2):5-8,19.

[7] SUTCLIFFE M, WESTON M, DUTTON B, et al. Real-time full matrix capture for ultrasonic non-destructive testing with acceleration of post-processing through graphic hardware[J]. NDT&E INT, 2012, 51:16-23.

[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.

[9] 杨诗安. 基于 FPGA 的超声相控阵实时全聚焦系统的设计[D]. 北京:中国科学院大学, 2020.

[10] 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.

[11] 赵大丹. 超声相控阵成像关键算法研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2015.

[12] 赵新玉,齐天之,王中亚,等. 超声检测三角矩阵聚焦成像算法[J]. 机械工程学报, 2019, 55(4):19-24.

[13] 贾乐成,陈世利,白志亮,等. 超声全聚焦成像校正模型及加速算法[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(7):1589-1596.

[14] 范学腾,伏喜斌,黄学斌,等. 复合粘接结构脱粘缺陷全聚焦成像模拟及算法优化研究[J]. 机电工程, 2019, 36(8):791-796.

[15] 张昊,陈世利,贾乐成. 基于超声相控线阵的缺陷全聚焦三维成像[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(7): 992-999.

作者简介

张鑫宇,讲师,硕士,主要研究方向为无损检测技术,故障诊断。
E-mail:7902375@qq.com

范惜梅(通信作者),硕士研究生,主要研究方向为无损检测。
E-mail:zxy_lhb@163.com

李忠虎,教授,硕士,主要研究方向为传感信息获取与处理、无损检测。
E-mail:lizhonghu@imust.edu.cn