

基于超声合成孔径的孔缺陷成像与重构研究

武 静¹ 林泽宇¹ 杨颖锋¹ 刘 阳¹ 郑明方² 张伟伟¹

(1. 东莞理工学院 机械工程学院, 东莞 523808)

(2. 东莞理工学院 生态环境与建筑工程学院, 东莞 523808)

摘要:【目的】针对超声波传播衰减导致缺陷回波幅值减小、漏检率升高,以及传统合成孔径成像受硬件成本与数据处理方法制约的问题,提出一种基于超声合成孔径的缺陷成像与三维重构方法,为金属构件内部孔缺陷检测提供参考。【方法】首先,采用单个圆形直探头结合合成孔径聚焦技术实现缺陷二维成像,以降低硬件成本与系统复杂度;其次,构造基于信号强度变化的自适应时间增益补偿曲线,对不同深度回波信号进行增益处理,以补偿声波衰减;然后,采用双线性插值提升图像分辨率,结合-6 dB 阈值分割与 Canny 边缘检测算法完成缺陷定量分析;最后,引入动态阈值改进 Marching Cubes 算法,实现缺陷三维重构。【结果】结果表明,该方法可将孔缺陷直径检测相对误差从 40%、74% 降至 9%、8.5%,轴向分辨率提升 24.7%~32.5%,二维成像与三维重构运算效率分别提升 16.9%、3.2%,能够快速、高质量完成金属构件内部缺陷检测。

关键词: 超声成像; 合成孔径聚焦技术; 时间增益补偿; 缺陷三维重构; 孔缺陷检测

中图分类号: TG115.28 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2026.07.017

0 引言

超声检测技术作为五大常规检测技术之一,具有检测范围广、探测深度大、检测速度快、穿透能力强和对缺陷定位准确等诸多优势^[1]。声波在被测物体与其缺陷之间传播,或物体内部结构发生改变时,会产生不同程度的声学物性差别^[2-3],因此利用超声检测技术能够实现金属构件内部缺陷的检测^[4]。超声检测技术凭借上述优势,广泛应用于工业制造、管道运输等领域的金属构件内部缺陷检测中。

金属构件内部缺陷若未及时检出,或因检测不当无法判断缺陷的大小与种类,会为工业生产安全带来隐患。超声成像技术作为超声波检测领域极为重要的技术之一^[5],能够快速直观地探查金属构件内部缺陷的大小与形状,三维重构技术的应用可进一步掌握构件内部情况,已有大量学者对超声成像技术开展了深入研究。

合成孔径聚焦技术(Synthetic Aperture Focusing Technology, SAFT)是一种综合 B 扫描和动态孔径等技术的成像方式,由 20 世纪 50 年代的合成孔径雷达演变而来。Magnaflux 公司于 1967 年申请的合成孔径超声成像系统专利,是合成孔径聚焦技术在超声成像

中的首次应用^[6]。合成孔径聚焦技术利用探头在目标表面或附近的移动合成大虚拟孔径,从而获得高分辨率图像^[7]。其优势在于不受菲涅尔区声场传播特性的影响,具有良好的声束形成能力^[8]。

近年来,合成孔径超声成像已在多个领域得到广泛应用,同时衍生出多种改进方法。郭业才等^[9]利用声波分布特征对波束主、旁瓣进行优化,提高了图像对比度。Fendt 等^[10]将合成孔径聚焦技术与迭代反演法结合,实现了小缺陷的定位与检测。此外,部分学者开始关注基于合成孔径的三维成像技术。工业领域使用的超声三维成像技术,主要用于无损检测中物体内部的缺陷检测^[11]。Nakahata 等^[12]将合成孔径聚焦技术与激光脉冲产生的高频超声波结合,提出了复合纤维板内部缺陷的三维表征方法。然而,上述方法在应用中仍存在若干挑战。一方面,合成孔径成像方法受孔径数量以及换能器类型的影响^[13]较大,为达到高分辨率,通常需采用先进的超声相控阵换能器、增加子孔径数量等方法,进而需要采集大量数据进行后处理,增加了数据处理的复杂度和硬件成本。另一方面,金属构件内部超声检测中,若构件在相同方向上存在不同深度的缺陷,下方缺陷的回波幅值会因介质衰减与声束扩散衰减而减弱,导致成像分辨率较低甚

收稿日期: 2024-08-26 修回日期: 2024-12-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(12202103); 广东省基础与应用基础研究联合基金项目(2021B1515120090); 广东省基础与应用基础研究基金面上项目(2022A1515011324); 广东省高校重点平台和重大科研项目(2022ZDZX3032)

作者简介: 武静,女,1988 年生,山东济宁人,博士,副教授,硕士研究生导师; 主要研究方向为无损检测; E-mail: jingjinglulie@163.com。

张伟伟(通信作者),男,1978 年生,山西长治人,博士,教授,硕士研究生导师; 主要研究方向为工程力学、无损检测; E-mail: zwwps@126.com。

引用格式: 武静,林泽宇,杨颖锋,等. 基于超声合成孔径的孔缺陷成像与重构研究[J]. 机械强度,2026,48(7):148-155.

Wu Jing, Lin Zeyu, Yang Yingfeng, et al. Research on imaging and reconstruction of hole defects based on ultrasonic synthetic aperture[J].

Journal of Mechanical Strength, 2026, 48(7): 148-155.



免费获取

至出现缺陷漏检,在数据量和孔径数量有限的情况下,该问题尤为突出。

本文提出一种基于超声合成孔径的缺陷成像与三维重构方法,通过单个圆形直探头,采用合成孔径聚焦技术,实现缺陷的二维成像与三维重构。该方法构造自适应时间增益补偿曲线,并对信号进行增益,然后基于超声信号特性采用动态阈值完成缺陷三维重建,可快速、高质量实现金属构件内不同深度缺陷的成像与重构。

1 合成孔径聚焦技术原理

合成孔径聚焦技术通过延时叠加等方法对待测件内任意位置实现聚焦,从而提高检测信号信噪比和缺陷分辨能力^[14]。

根据激励数量,合成孔径聚焦技术可分为单阵元和多阵元合成孔径聚焦^[15]。单阵元合成孔径即由单个阵元激励和接收信号。与多阵元模式相比,在探头中心频率较高的情况下,利用单个直探头单发单收采集数据,可在保持较好空间分辨率的同时降低硬件成本与系统复杂度。此外,单发单收模式下的数据处理相对简单,无需考虑多探头之间的同步和数据融合问题。因此,本文开展基于单个直探头的合成孔径成像方法研究。

图 1 所示为单发单收模式的计算模型。设 X 方向为换能器移动方向, Z 方向为深度方向。首先,从第 1 位置 U_0 发射和接收回波信号,完成第 1 次检测。然后,换能器依次在 X 方向按等距离 r 移动并采集数据。

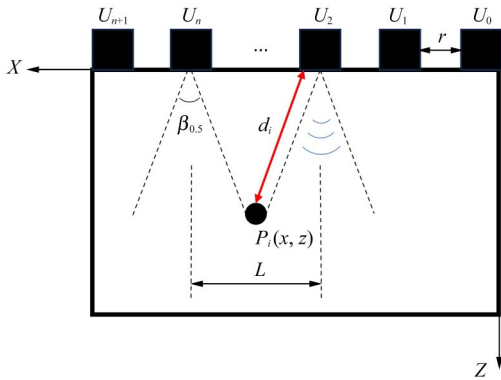


图 1 单发单收模式计算模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the calculation model for the single-transmit single-receive mode

超声换能器的声束指向特性通常用半功率波束角 $\beta_{0.5}$ 表示,计算式为

$$\beta_{0.5} = 0.84 \frac{\lambda}{d_p} \quad (1)$$

式中, λ 为声波波长; d_p 为单个换能器晶片直径。当换能器移动至 U_2 位置时,聚焦点 P_i 进入其声场范围;移动至 U_n 时,聚焦点开始脱离其声场范围。则 $U_2 \sim U_n$ 的距离称为合成孔径的有效长度 L ,计算式为

$$L = \beta_{0.5} d_i = 0.84 \frac{\lambda d_i}{d_p} \quad (2)$$

式中, d_i 为聚焦点 (x, z) 与换能器的距离。

当换能器到达平面某一位置 U_i 时,由于信号的激励和接收均为同一换能器,可由式(3)求出聚焦点 (x, z) 与换能器的距离 d_i 。

$$d_i = \sqrt{(x - U_i)^2 + z^2} \quad (3)$$

式中, z 为聚焦点到换能器所在探测平面的垂直深度。

声波从 U_i 处激发并到达聚焦点 (x, z) 后再返回的延时时间 τ_i 为

$$\tau_i = \frac{2d_i - 2z}{c} \quad (4)$$

式中, c 为介质声速。联立式(3)和式(4)求解可得

$$\tau_i = \frac{2[\sqrt{(x - U_i)^2 + z^2} - z]}{c} \quad (5)$$

N 个换能器所接收到的 A 扫查(A-Scan)回波信号经过叠加,可得到聚焦点的幅值总和为

$$I_{\text{SAFT}}(x, z) = \sum_{i=0}^{N-1} S_i(t - \tau_i) \quad (6)$$

式中, S_i 为第 i 个换能器阵元采集到的 A 扫查原始时域回波信号。

算法通过遍历每个数据进行延时叠加计算。为确保输入数据质量,获得更准确的合成孔径成像结果,聚焦前需对采集数据进行后处理。数据后处理包括滤波、时间增益补偿等。为补偿传播路径导致的信号衰减,需使用时间增益补偿曲线。

2 超声波的衰减特性与时间增益补偿方法

超声波在介质中的衰减使回波信号幅值呈指数衰减。同时,在同一方向上存在不同深度的缺陷时,下方缺陷的回波幅值会因声束扩散衰减而减弱。根据相控阵的声场分布,回波信号的幅值衰减与声波传播深度之间的关系为

$$A_i = \frac{A_0}{\sqrt{d_i}} \quad (7)$$

式中, A_i 为传播深度为 d_i 时衰减后的回波信号幅值; A_0 为激励信号的幅值; d_i 为传播深度。

时间增益补偿是一种超声信号后处理方法,可使不同深度下的超声回波获得不同的放大倍数,从而得到相同的增益。通常,高频超声波的衰减速度比低频快,会进一步影响深层区域的成像效果。本文提出一种基于单发单收模式下平均信号强度的自适应时间增益补偿曲线进行补偿。

首先,根据采集的试验数据定义声波传播的深度范围为

$$R = [1, 2, 3, \dots, N']^T \quad (8)$$

式中, N' 为试验数据声波传播方向上的数据行数。

然后,根据试验数据计算每个深度位置上的平均信号强度

$$\delta = \frac{1}{D} \sum_{i=1}^D \text{data}(:, i) \quad (9)$$

式中, D 为试验的扫描线数; $\text{data}(:, i)$ 为矩阵切片, 取第 i 列全部行, 即第 i 条扫描线所有深度点的原始信号强度。对平均信号强度进行指数拟合, 构造时间增益补偿曲线的拟合模型并求得衰减系数 β 。拟合模型为

$$\delta = \alpha e^{-\beta \times R} \quad (10)$$

式中, α 为拟合模型中深度为 0 时的初始幅值系数, 为常数; R 为深度向量。

最终, 根据求得的衰减系数 β 定义时间增益补偿曲线, 当 $\beta > 0$ 时, 得

$$y = e^{\beta \times R} \quad (11)$$

采用该方法对数据进行增益后, 进行合成孔径聚焦, 生成二维图像; 对图像进行二值化处理后, 利用算法完成缺陷的三维重构。

3 试验验证

3.1 试验设备与工件试块

试验采用 Vantage 多通道相控阵平台作为激励电脉冲信号及数据采集设备, 外接圆形直探头向金属试块施加激励超声信号。平台接收到探头的回波信号后传输至计算机, 进行数据存储及后处理。图 2 所示为试验设备整体示意图。

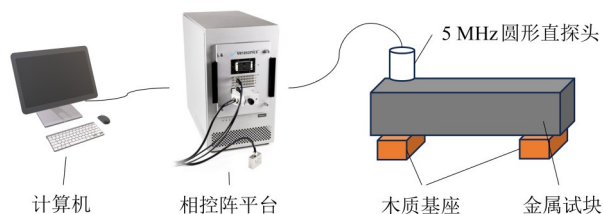


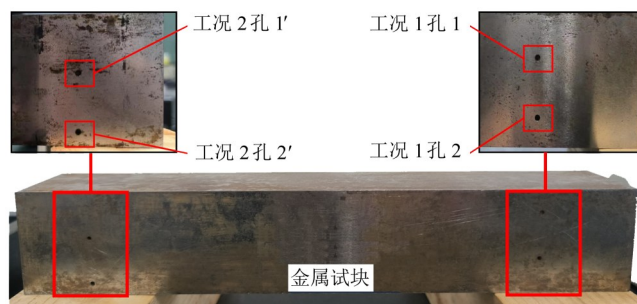
图 2 试验设备整体示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the overall test equipment

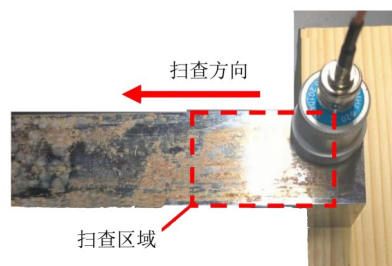
选取的金属试块包含 2 组缺陷, 每组均为 2 个在同一方向上不同深度、直径为 2 mm 的横通孔, 用于模拟金属构件加工过程中可能产生的气孔等缺陷。缺陷设置用于验证和评估金属构件内部存在大小相同、深度不同的缺陷时, 所使用方法的适用性与可靠性。

图 3 所示为检测对象与试验设备示意图, 其中图 3(a) 和图 3(b) 分别为金属试块和探头扫查的实物图。由图 3 可知, 金属试块长 2 500 mm、宽 50 mm、高 50 mm, 架设在木质基座上以减小环境干扰。探头采用河北奥索生产的 5 MHz 直探头。中心频率为 5 MHz, 以 5 周期的汉宁窗函数为激励信号, 对金属试块上两片均为长 30 mm、宽 50 mm 的区域进行单发单收检测并采集数据。由于主要目的是验证算法在实际金属构件上缺陷检测和重构的有效性, 不依赖整个试块的

成像, 因此选择局部区域进行采集和成像操作不会影响结果的普适性。每采集 1 次数据, 沿水平方向手动等距移动探头进行 1 次检测和采集。



(a) 金属试块



(b) 探头扫查

图 3 试验设备与检测对象示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the detection object and test equipment

圆形直探头的设定参数如表 1 所示。缺陷设置如表 2 所示。

表 1 圆形直探头设定参数

Tab. 1 Setting parameters of the circular normal probe

中心频率/ MHz	采样频率/ MHz	探头直径/ mm	扫查间隔/ mm	扫查组数
5	50	20	1.2	25

表 2 2 种工况参数设置

Tab. 2 Parameter settings of two cases

参数	工况 1		工况 2	
	孔 1	孔 2	孔 1'	孔 2'
孔直径/mm	2	2	2	2
与上端面距离/mm	15	35	20	45
与下端面距离/mm	35	15	30	5

3.2 超声波的衰减与时间增益补偿处理

如图 4 所示, 对试块进行超声检测时, 下方缺陷的回波幅值出现较大衰减。因此, 超声信号处理时需先进行时间增益补偿。

常规时间增益补偿法需要手动调节增益参数; 另一种常用的方差法时间增益补偿, 需通过计算每个深度上所有阵元信号包络、归一化处理后的幅值与校正增益之间的方差来设计时间增益补偿曲线, 以使各深度上的方差值趋于一致^[16]。其中, 校正增益是一条随深度递增的线性增益曲线, 用于补偿信号随深度增加的衰减。与上述 2 种增益方法相比, 所提方法可基于采集的信号强度变化自动调节增益指数。

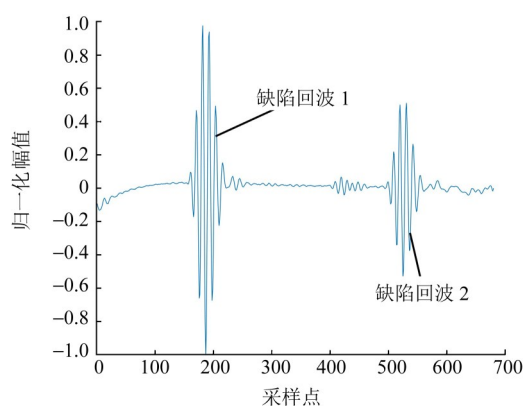


图 4 试验 A 扫描信号缺陷回波曲线

Fig. 4 Defect echo curve of the A-scan test signals

图 5 所示为自适应增益后的缺陷回波曲线。由图 5 可知,经增益处理后,较深处缺陷的回波幅值被增益至与前一个回波基本一致;在幅值归一化处理下,缺陷回波的幅值与增益前第一个缺陷回波的幅值保持一致。

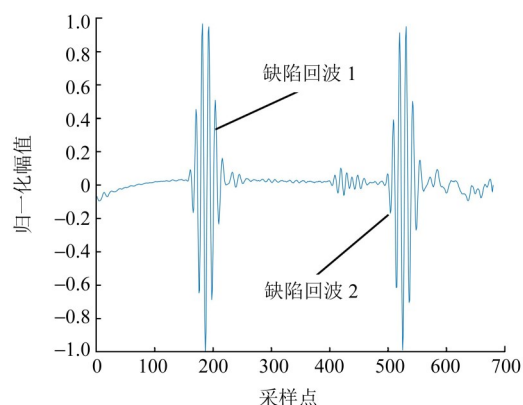


图 5 自适应增益后缺陷回波曲线

Fig. 5 Defect echo curve after adaptive gain

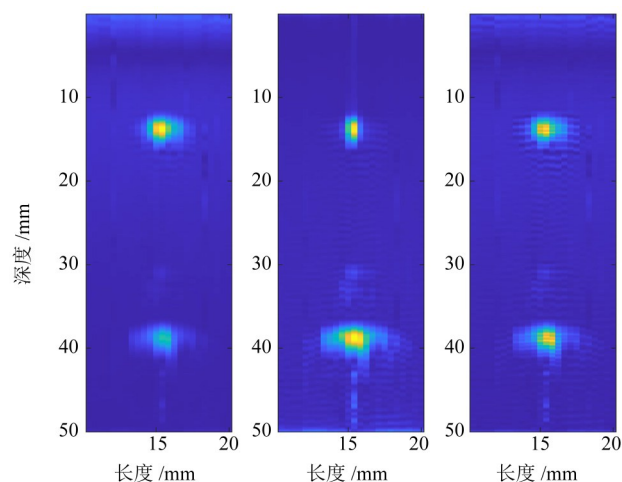
3.3 基于合成孔径聚焦技术的缺陷二维成像

回波信号经幅值归一化处理后,进行合成孔径成像。图 6 所示为不同方法的合成孔径成像对比。由图 6 可知,与原始数据成像[图 6(a)]相比,经方差法[图 6(b)]和自适应法[图 6(c)]增益后的数据成像均能辨识下方缺陷。方差法和自适应法增益后的成像效果存在明显差异:方差法对距缺陷较近的信号强度变化反应较敏感,且校正增益的幅度随深度增加而增大,导致这些位置的方差值较高,出现过度增益现象。在相同增益条件下,经方差法增益后的下方缺陷图像横向结构扩大,影响缺陷大小与形态的准确识别;而自适应法增益后的成像更接近实际缺陷,效果更合理。

采用方差法增益信号并生成图 6(b)所示二维图像的算法运算时间为 0.89 s,采用自适应法增益并生成图 6(c)所示二维图像的运算时间为 0.74 s,计算效率有所提升。计算机配置为 Ryzen 7 5800H 处理器、16 GB RAM。

为进一步提高合成孔径成像的图像分辨率,需对生成的图像进行插值处理。采用双线性插值法对成像

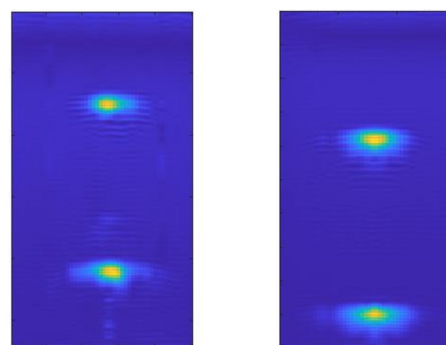
数据进行后处理。图 7 所示为不同工况下的缺陷二维成像。由图 7 可知,经双线性插值后,两种工况生成的图像分辨率均得到有效提高。图 7(b)中缺陷孔 2' 处的成像质量低于孔 1',原因是该缺陷与金属试块下端面的距离较小,缺陷回波与试块端面回波发生重叠。回波重叠导致信号干扰,使得该缺陷的成像质量即使经过滤波等后处理,仍低于另一个距金属试块端面较远的孔缺陷,但图像仍可辨识缺陷的形状与大小。



(a) 原始 SAFT 成像 (b) 方差法增益成像 (c) 自适应增益成像

图 6 不同方法合成孔径成像对比

Fig. 6 Comparison of the synthetic aperture imaging with different methods



(a) 插值后工况 1 图像 (b) 插值后工况 2 图像

图 7 不同工况下缺陷二维成像

Fig. 7 Two-dimensional defect imaging under different working conditions

3.4 缺陷边缘识别与评估

为了进一步对缺陷进行定量分析,需对缺陷区域与非缺陷区域进行分割。超声波探伤检测中常采用 -6 dB 法,即半波高法^[17]对缺陷进行定量检测,其原理是通过测量回波信号的幅值并找到最大值,然后将幅值下降至最大值一半(-6 dB 处)的位置作为缺陷边界,该位置处的回波信号宽度可反映目标尺寸。在超声图像的阈值分割处理中,灰度值可表示回波信号的强度,因此降低 -6 dB 的灰度值对应信号强度降至最大值的 1/2。将 -6 dB 灰度值作为阈值对图像进行二值处理,可有效区分缺陷区域与非缺陷区域。

对二维图像进行插值处理后,将选定的-6 dB作为灰度阈值对生成图像进行二值处理。图8所示为工况1的原始SAFT成像和自适应增益补偿处理结果对比。由图8可知,原始合成孔径超声成像二值处理后的图像中,下方缺陷孔2未进行时间增益补偿,在二值图像中仍难以识别。

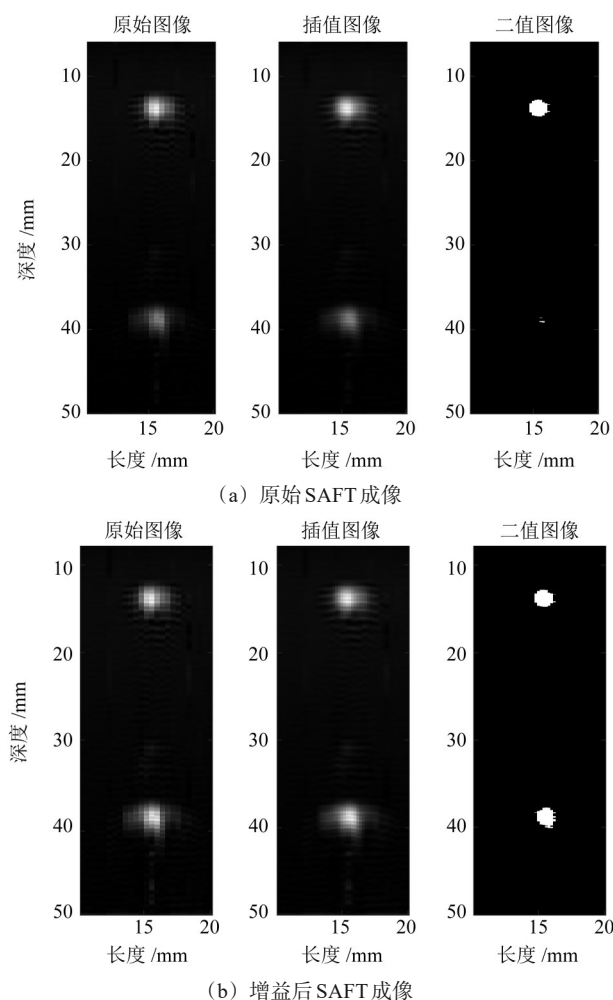


图8 工况1的原始SAFT成像和自适应增益补偿处理结果对比

Fig. 8 Comparison of original SAFT images and adaptive gain compensation processing results under working condition 1

图9所示为工况2自适应增益后的缺陷SAFT成像。结合图8(b)和图9可知,经自适应法增益补偿后最终得到的二值图像,可较为清晰地分辨出缺陷的形状、大小以及位置。

得到二值图像后,为进一步计算缺陷大小,采用边缘检测确定缺陷位置并计算其尺寸。Canny边缘检测算法可通过非极大值抑制法确保检测到的边缘具有单像素宽度,避免边缘模糊问题。

图10所示为2种工况的缺陷边缘局部图像。由图10可知,2种工况的缺陷边缘图像均能识别出缺陷的形状与位置。

得到缺陷边缘图像后,对近似圆形的缺陷形状采用Regionprops函数检测和定位圆孔,计算其质心和等效直径,最后转换为物理单位毫米输出结果。等效直

径的计算式为

$$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (12)$$

式中, d 为圆孔的等效直径; A 为函数检测到的圆孔面积。

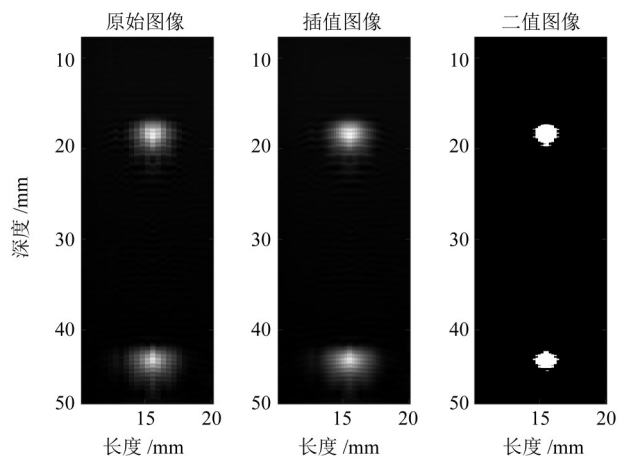


图9 工况2自适应增益后缺陷SAFT成像

Fig. 9 SAFT image of defects after adaptive gain compensation under working condition 2

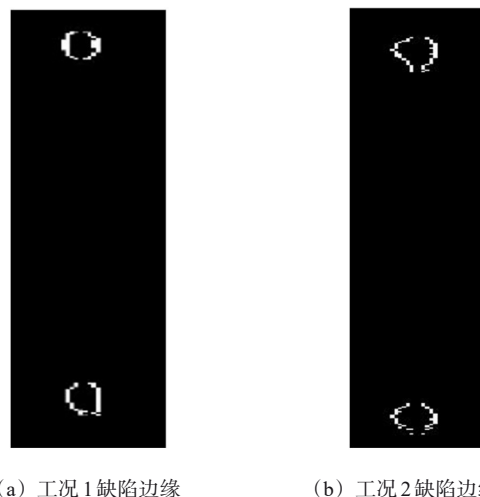


图10 2种工况缺陷边缘局部图像

Fig. 10 Local images of defect edges in two cases

计算得到的成像图像缺陷直径如表3所示。由表3可知,与原始SAFT成像相比,经自适应法增益后的SAFT图像的缺陷直径相对误差得到显著改善。

表3 工况1成像相对误差对比

Tab. 3 Comparison of imaging relative errors in case 1

处理方式	孔1			孔2		
	成像直径/mm	实际直径/mm	相对误差/%	成像直径/mm	实际直径/mm	相对误差/%
原始成像	2.80	2.00	40	0.52	2.00	74
增益后成像	2.18	2.00	9	2.17	2.00	8.5

超声成像中,成像分辨率是评估图像质量的重要指标之一,通常分为轴向分辨率和横向分辨率^[18]。轴向分辨率是沿超声波传播方向的分辨率,横向分辨率是垂直于超声波传播方向的分辨率。由瑞利判据

(Rayleigh Criterion) 可得线型阵列的横向分辨率 $\delta_x^{[19]}$ 为

$$\delta_x \cong \frac{\lambda d_i}{2L} \quad (13)$$

结合有效长度 L 的计算式(2)^[20], 且满足:

$$\frac{\lambda}{d_p} \ll 1 \quad (14)$$

可得

$$L = 0.84 \frac{\lambda}{d_i} \quad (15)$$

$$\delta_x \cong \frac{d_p}{2} \quad (16)$$

可见, 横向分辨率仅由换能器晶片直径决定, 与超声激发频率和距离无关。得到的图像分辨率如表 4 所示。由表 4 可知, 自适应法增益后, SAFT 图像的横向分辨率较原始成像有一定程度提升。

表 4 改进算法成像分辨率对比

Tab. 4 Comparison of the imaging resolution of the improved algorithm

工况	原始 SAFT 图像横向分辨率/mm	增益后 SAFT 图横向分辨率/mm
工况 1	0.85	0.64
工况 2	1.14	0.86

3.5 基于 MC 算法的缺陷三维重构

Marching Cubes(MC)算法在医学超声成像领域(如 CT 或 MRI 数据标准化处理)已得到广泛应用^[21]。该算法将一系列二维切片数据看作三维数据场, 通过提取三维数据的等值面, 构造相应的三角面片并进行拼接, 从而显示三维图像。

图 11 所示为多断层扫描方式示意图。由图 11 可知, 试验采用的扫描方式为: 使用合成孔径技术扫描完单个断层的数据后, 沿与单个断层扫描方向垂直的方向每隔一定距离重复一次断层扫描, 得到待测件一系列等间距的断层扫描数据。

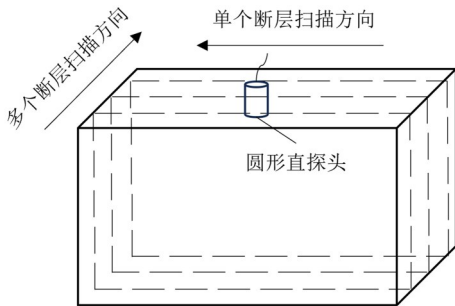


图 11 多断层扫描方式示意图

Fig. 11 Schematic diagram of the multi-slice scanning method

图 12 所示为 MC 算法三维重构示意图。由图 12 可知, 得到待测件一系列等间距的断层数据后, 通过 MC 算法提取三维数据的等值面, 最终完成缺陷的三维重构。

为提高等值面的位置精度, 算法采用线性插值确

定等值面与立方体边的交点位置。算法运行前, 为提高数据分辨率, 需预先对二值化数据集进行插值处理。插值处理后, 数据分布会发生改变。阈值选择对缺陷的三维重构质量具有重要影响, 决定了提取等值面的位置和形状, 进而影响等值面的精准度。在三维重构的 MC 算法中引入动态阈值, 以适应插值后的数据分布变化。动态阈值在数据分布不固定或变化较大的情况下, 可显著提高结果的准确性和可靠性。因此, 将 MC 算法与基于数据分布变化的动态阈值相结合, 通过运算得到的动态阈值提取相应结构, 使改进后的 MC 算法具有更好的自适应性与鲁棒性。

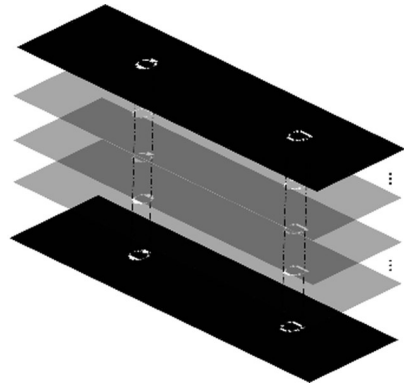


图 12 MC 算法三维重构示意图

Fig. 12 Schematic diagram of the 3D reconstruction using MC algorithm

基于超声数据的特性, 动态阈值的计算式定义为

$$T = \mu_D + k\sigma_D \quad (17)$$

式中, T 为动态阈值; D 为由一系列二维数据定义得到的三维标量场数据集; μ_D 为数据集 D 的均值; k 为常数; σ_D 为数据集 D 的标准差。

数据集 D 的均值 μ_D 与标准差 σ_D 计算式分别为

$$\mu_D = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M d_{ijk} \quad (18)$$

$$\sigma_D = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (d_{ijk} - \mu_D)^2} \quad (19)$$

式中, M 为数据集中所有体素的数量; d_{ijk} 为三维数据集划分得到的每个体素的顶点值。

图 13 所示为工况 1 缺陷的三维重构模型。由图 13 可知, 所提方法能够较为清晰、完整地重构出正确的缺陷模型, 可进一步判断金属构件内部缺陷的位置和方向, 这在多重缺陷情况下尤为重要。此外, 对相同的工况 1 三维数据组进行三维重构时, 采用传统体绘制光线投射算法的运算时间为 1.26 s, 改进 MC 算法的运算时间为 1.22 s, 运算效率有所提高。

图 14 所示为工况 2 的缺陷三维重构模型。由图 14 可知, 不同断层图像中, 因手动扫描导致的二维图像缺陷位置误差, 经改进后的 MC 算法自适应调整后得到了较为平滑的修正。

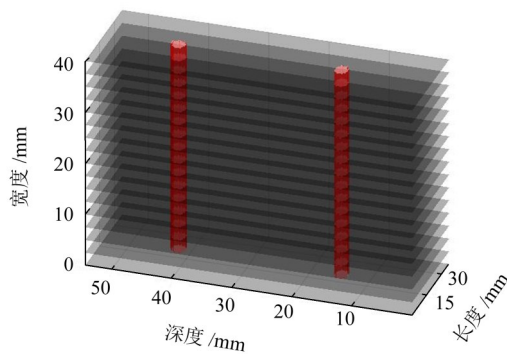


图 13 工况 1 缺陷三维重构模型

Fig. 13 3D reconstruction model of defects in case 1

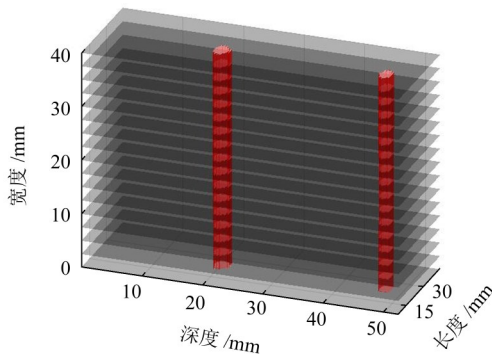


图 14 工况 2 缺陷三维重构模型

Fig. 14 3D reconstruction model of defects in case 2

4 结论

研究了基于超声合成孔径聚焦技术的缺陷二维成像及三维重构方法,重点分析了合成孔径成像算法中的时间增益补偿曲线和三维重构方法,提出了改进的自适应时间增益补偿曲线与缺陷三维重构方法,并通过基于超声合成孔径的孔缺陷成像试验进行验证,得到如下主要结论:

1)采用单个圆形直探头结合超声一维相控线阵中的合成孔径聚焦技术实现缺陷二维成像。针对超声波在介质中的衰减,以及同一方向上不同深度缺陷回波信号显著衰减的问题,提出一种改进的自适应时间增益补偿曲线,可基于采集信号的强度变化自动调整增益。该曲线能根据超声数据强度给予对应增益,有效提高了图像分辨率。

2)结合断层扫描方式,采用MC算法进行缺陷三维重构。针对超声数据强度分布不均匀的特性,提出一种结合动态阈值的改进MC算法,提高了缺陷模型的重构质量,使算法具有更好的自适应性与鲁棒性。

参考文献(References)

[1] 刘振兴. 频域合成孔径超声成像算法研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2023:1-6.
Liu Zhenxing. Research on frequency domain synthetic aperture ultrasound imaging algorithm[D]. Shenyang:Shenyang University of Technology,2023:1-6. (In Chinese)

[2] 王彤彤,孙灵芳. 基于改进CoSaMP的管道污垢超声检测信号的压缩重构研究[J]. 机械强度,2020,42(6):1316-1322.
Wang Tongtong, Sun Lingfang. Research on compression and reconstruction of tube fouling ultrasonic testing signal based on improved CoSaMP[J]. Journal of Mechanical Strength, 2020, 42 (6):1316-1322. (In Chinese)

[3] 武静,饶子玉,沈宇驰,等. 利用分形维数和BP神经网络实现超声导波缺陷分类的试验研究[J]. 机械强度,2024,46(2):328-338.
Wu Jing, Rao Ziyu, Shen Yuchi, et al. Experimental research on ultrasonic guided waves defect classification based on fractional dimension and BP neural network [J]. Journal of Mechanical Strength,2024,46(2):328-338. (In Chinese)

[4] 张文学. 金属柱状体内部缺陷的超声检测及重构[J]. 无损检测,2023,45(7):7-10.
Zhang Wenxue. Ultrasonic detection and reconstruction of internal defects in metal cylinders [J]. Nondestructive Testing, 2023, 45 (7):7-10. (In Chinese)

[5] 张碧星,张萍,阎守国,等. 超声成像检测研究进展[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版),2022,50(6):1-16.
Zhang Bixing, Zhang Ping, Yan Shouguo, et al. Research progress of ultrasonic imaging detection [J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2022, 50 (6): 1-16. (In Chinese)

[6] Erikson K R, Flaherty J J, Van L M. Synthetic aperture ultrasonic imaging systems:US3548642 A[P]. 1970-12-22.

[7] 叶城保. 水浸超声检测合成孔径聚焦成像技术研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2018:5-9.
Ye Chengbao. Synthetic aperture focusing imaging in ultrasonic immersion testing[D]. Changsha:Changsha University of Science & Technology, 2018:5-9. (In Chinese)

[8] 杜英华,张聪颖,陈世利,等. 合成孔径聚焦超声成像方法研究[J]. 海洋技术,2010,29(2):94-96.
Du Yinghua, Zhang Congying, Chen Shili, et al. Research of synthetic aperture focus technology in ultrasonic imaging [J]. Ocean Technology,2010,29(2):94-96. (In Chinese)

[9] 郭业才,季晓星. 基于稳健Capon波束形成的合成孔径超声成像算法[J]. 系统仿真学报,2019,31(8):1646-1652.
Guo Yecai, Ji Xiaoxing. Synthetic aperture ultrasonic imaging algorithm based on robust Capon beamforming in eigenspace[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31 (8): 1646-1652. (In Chinese)

[10] Fendt K T, Mooshofer H, Rupitsch S J, et al. Ultrasonic defect characterization in heavy rotor forgings by means of the synthetic aperture focusing technique and optimization methods [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2016,63(6):874-885.

[11] 张棣. 基于超声合成孔径的物体三维轮廓成像技术研究[D]. 成都:西南交通大学,2019:3-6.
Zhang Di. Research on 3D contour imaging technology of objects based on ultrasonic synthetic aperture [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2019:3-6. (In Chinese)

[12] Nakahata K, Karakawa K, Ogi K, et al. Three-dimensional SAFT imaging for anisotropic materials using photoacoustic microscopy

- [J]. *Ultrasonics*, 2019, 98: 82-87.
- [13] 乌伟. 基于超声合成孔径缺陷检测技术的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018: 12-16.
Wu Wei. Study on defect detection based on ultrasonic synthetic aperture technology [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018: 12-16. (In Chinese)
- [14] 李雅哲, 杨春, 秦开怀. 基于 SAFT 的超声波无损检测时域方法[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(9): 1762-1767.
Li Yazhe, Yang Chun, Qin Kaihui. Time-domain approach for ultrasonic non-destructive detection based on synthetic aperture focusing technique [J]. *Journal of System Simulation*, 2012, 24(9): 1762-1767. (In Chinese)
- [15] Selim H, Trull J, Prieto M D, et al. Fully noncontact hybrid NDT for 3D defect reconstruction using SAFT algorithm and 2D apodization window[J]. *Sensors*, 2019, 19(9): 2138.
- [16] 张浩. 合成孔径超声成像中自适应波束合成算法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023: 16-20.
Zhang Hao. Adaptive beamforming algorithm for synthetic aperture ultrasound imaging [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2023: 16-20. (In Chinese)
- [17] 孙少卿, 王艳云, 王立民, 等. 半波高度法在大壁厚焊管超声波手工检测定位中的应用[J]. 焊管, 2021, 44(4): 62-64.
Sun Shaoqing, Wang Yanyun, Wang Limin, et al. Application of half wave height method in ultrasonic manual inspection and location of large wall thickness welded pipe [J]. *Welded Pipe and Tube*, 2021, 44(4): 62-64. (In Chinese)
- [18] 蒲素兰, 谢慧雯, 郭昊, 等. 结合维纳滤波的相干波束合成超声成像研究[J]. CT理论与应用研究, 2022, 31(6): 793-808.
Pu Sulan, Xie Huiwen, Guo Hao, et al. Coherent beam-forming combined with Wiener filter in ultrasound imaging [J]. *Computerized Tomography Theory and Applications*, 2022, 31(6): 793-808. (In Chinese)
- [19] Liu J. Synthetic aperture focusing technique in ultrasonic imaging [D]. Sweden: Chalmers University of Technology, 2007: 29-32.
- [20] 孙宝申, 沈建中. 合成孔径聚焦超声成像(一)[J]. 应用声学, 1993, 12(3): 43-48.
Sun Baoshen, Shen Jianzhong. Synthetic aperture focused ultrasound imaging (I) [J]. *Journal of Applied Acoustics*, 1993, 12(3): 43-48. (In Chinese)
- [21] Zhang F, Zou J, Huang D. Reconstruction algorithm-based computed tomography image feature for evaluating the effect of internal administration and medicated bath of Liangxue Xiaoyin Decoction on psoriasis vulgaris [J]. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, 2022, 2022: 7638507.

Research on imaging and reconstruction of hole defects based on ultrasonic synthetic aperture

WU Jing¹ LIN Zeyu¹ YANG Yingfeng¹ LIU Yang¹ ZHENG Mingfang² ZHANG Weiwei¹

(1. College of Mechanical Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China)

(2. School of Eco-Environment and Architectural Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China)

Abstract: [Objective] Ultrasonic wave attenuation during propagation leads to reduced defect echo amplitude and increased missed detection rate. Meanwhile, traditional synthetic aperture imaging quality is constrained by hardware costs and data processing methods. A defect imaging and three-dimensional reconstruction method based on ultrasonic synthetic aperture was proposed to provide reference for internal hole defect detection of metal components. [Methods] Firstly, a single circular straight probe combined with synthetic aperture focusing technology was used to realize two-dimensional imaging of defects, so as to reduce hardware cost and system complexity. Secondly, an adaptive time gain compensation curve based on signal intensity variation was constructed to perform gain processing on echo signals at different depths, so as to compensate for acoustic wave attenuation. Then, bilinear interpolation was adopted to improve image resolution, and -6 dB threshold segmentation combined with Canny edge detection algorithm was applied to complete quantitative analysis of defects. Finally, dynamic threshold was introduced to improve the Marching Cubes algorithm for three-dimensional reconstruction of defects. [Results] The results show that the proposed method can reduce the relative error of hole defect diameter detection from 40% and 74% to 9% and 8.5%, and improve the axial resolution by 24.7%~32.5%. The operation efficiency of two-dimensional imaging and three-dimensional reconstruction is increased by 16.9% and 3.2% respectively, which can complete internal defect detection of metal components quickly and with high quality.

Key words: Ultrasound imaging; Synthetic aperture focusing technique; Time gain compensation; 3D reconstruction of defects; Hole defect detection

Corresponding author: ZHANG Weiwei, E-mail: zwwps@126.com

Fund: National Natural Science Foundation of China (12202103); Joint Fund of Basic and Applied Basic Research Foundation of Guangdong Province (2021B1515120090); General Program of Basic and Applied Basic Research Foundation of Guangdong Province (2022A1515011324); Key Platforms and Major Scientific Research Projects in Universities in Guangdong Province (2022ZDZX3032)

Received: 2024-08-26 Revised: 2024-12-20

(编辑: 李凯阳)