

## Research on Far-Focused Pixel-Based Imaging Method of Near-Surface Defects in Metal Plate\*

DU Wenjie<sup>1</sup>, ZHENG Huifeng<sup>1\*</sup>, SHEN Chao<sup>1</sup>, DUAN Xueliang<sup>1</sup>, CAO Yonggang<sup>2</sup>

(1. College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou Zhejiang 310018, China;

2. BOE Technology Group Co., Ltd., Beijing 100176, China)

**Abstract:** Targeting at the problems of excessive artifacts and inaccurate defect quantification in the detection of near-surface defects of metal plate by ultrasonic imaging method, the near-surface defect imaging of metal plate based on far-focused pixel-based imaging algorithm is studied. Firstly, the limitations of far-focused pixel-based imaging algorithm in near-surface defect imaging are analyzed, and then adaptive noise cancellation method is used to extract near-surface defect waves. For the problem of reference signal acquisition in the process of noise cancellation, combining with the acquisition characteristics of far-focused pixel-based imaging algorithm, a method of averaging echo signal to calculate the reference signal is proposed. The signal processing results show that the method can correctly extract the near-surface defect waves submerged in the blind area. Finally, the optimized far-focused pixel-based imaging algorithm is used to detect the defects of the aluminum alloy plate. The imaging results show that the SNR of the image is increased by 4.31 dB after the adaptive noise cancellation, and the maximum error of defect quantification is 0.51 mm<sup>2</sup>. The imaging resolution can reach 0.66 mm when the full-width at half-maximum is taken as the index.

**Key words:** ultrasound imaging; metal plate; near-surface detection; adaptive noise cancellation; imaging resolution

EEACC: 7230

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2024.05.017

## 金属板材近表面缺陷远聚焦像素成像方法研究\*

杜文杰<sup>1</sup>, 郑慧峰<sup>1\*</sup>, 沈超<sup>1</sup>, 段雪亮<sup>1</sup>, 曹永刚<sup>2</sup>

(1. 中国计量大学计量测试工程学院, 浙江 杭州 310018; 2. 京东方科技集团股份有限公司, 北京 100176)

**摘要:** 针对超声成像方法在金属板材近表面缺陷检测中存在的伪像过多、缺陷定量不准确的问题, 开展基于远聚焦像素成像算法的金属板材近表面缺陷成像研究。首先分析了远聚焦算法在近表面缺陷成像中的局限性, 然后采用自适应噪声抵消的方法提取近表面缺陷波。对于噪声抵消过程中的参考信号获取问题, 结合远聚焦算法的采集特征, 提出一种以平均回波信号计算参考信号的方法, 信号处理的结果表明, 该方法能够正确提取淹没于盲区中的近表面缺陷波。最后, 采用优化后的远聚焦算法对铝合金板进行缺陷检测, 成像结果表明, 自适应噪声抵消后图像的信噪比提升了 4.31 dB, 缺陷定量的最大误差为 0.51 mm<sup>2</sup>, 以半峰值宽度为指标对成像分辨率进行测试, 成像分辨率可达 0.66 mm。

**关键词:** 超声成像; 金属板材; 近表面检测; 自适应噪声抵消; 成像分辨率

中图分类号: TB553

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2024)05-0862-07

金属构件由于其出色的机械性能及化学性能, 被广泛应用于车船生产、航空航天、压力容器制造等领域。然而, 金属构件在锻冶、加工、运输等过程中, 难免会产生诸如气孔、裂纹、夹杂等内部缺陷<sup>[1-3]</sup>, 这些缺陷的存在最终都会导致材料的破坏, 引发灾难性的后果。因此, 有必要对金属构件内部存在的缺陷进行检测, 防止不合格的产品流入市场, 保障使用中的器械安全运行。

对于金属构件而言, 其近表面缺陷的检测一直以来都是一个难点<sup>[4-6]</sup>, 位于近表面波长范围内的缺陷其反射波与表面直通波叠加, 进而影响缺陷的识别。近年来, 基于像素的成像方法通过对缺陷区域的像素进行叠加, 对非缺陷区域的像素进行抵消, 从而在一定程度上提高了缺陷区域的信噪比。然而, 仅从成像方法上对近表面缺陷的检测进行优化并不足以满足现时的无损检测需求, 亟需一种能够

**项目来源:** 浙江省重点研发计划资助项目(2022C01002); 国家市场监督管理总局重点实验室(声学振动精密测量技术)开放基金项目(AVL202301); 浙江省属高校基本科研业务费专项资金项目(2023YW89, 2023YW112); 湖南省自然科学基金项目(2023JJ50237)

收稿日期: 2022-10-26

修改日期: 2024-01-03

进一步提高缺陷区域信噪比的方法来对缺陷的定量进行优化。

目前,在近表面缺陷的超声检测方面,主要是通过信号处理或是采用特殊的检测模式来使近表面缺陷得以识别。信号处理方面,程江等<sup>[7]</sup>通过经验模态分解结合希尔伯特变换的方法,对近表面缺陷信号进行了提取;张海燕、王寒露等<sup>[8-9]</sup>利用扩散场重建两点间的格林函数,将近表面区域的信号替换为了重建格林函数矩阵;迟大钊等<sup>[10]</sup>以一定能量范围内的平均信号作为背景信号进行了近表面滤波。检测模式方面,除简单的提高探头频率以减小波长<sup>[11]</sup>以及采用诸如表面波、爬波之类的特殊波型之外<sup>[12]</sup>,刘文芳等<sup>[13]</sup>通过机器学习的方法来识别近表面缺陷一次回波及二次回波,并以此综合判断缺陷位置;丁宁等<sup>[14]</sup>根据反射过程中的波型转换及转换后波型的传播几何关系对近表面缺陷进行了定位。此外,陈世利等<sup>[15]</sup>则是运用分形理论,以盒维数对信号进行量化,通过大量试验统计含有近表面缺陷的信号盒维数分布区间。

上述检测方式中,采用特殊检测模式的方法对设备的要求较高,机器学习、分形理论的应用则是需要根据检测对象针对性进行研究,方法的通用性不高,且无法与成像方法相结合。信号处理方面,经验模态分解需要根据本征模态函数的特点选择合适的模态函数进行缺陷信号重构;重建格林函数的方法计算过程复杂,实时性较差;背景信号滤波的方法则需要人为设定背景信号阈值。为了进一步提高近表面缺陷信噪比,本文在远聚焦像素(Far-Focused Pixel-Based, FPB)成像算法<sup>[16]</sup>的基础上对采集的信号进行了自适应噪声抵消处理,该种信号处理方法实时性好,且不需要人为进行参数设置。本文利用FPB方法的采集模式,提出了一种噪声抵消过程中的参考信号获取方法,通过对噪声抵消前后的信号进行分析以及实验成像结果的对比验证,发现该方法可以有效提高缺陷区域的信噪比,使得近表面缺陷的定量结果更加准确,最后,本文对优化前后的FPB方法进行了成像分辨率测试。

## 1 远聚焦像素成像算法

### 1.1 算法原理

FPB成像算法是一种基于像素的成像算法,通过提取每一个像素点位置的波形,从而实现缺陷区域的同相叠加。FPB成像的发射模式如图1所示,记每一次发射为一条扫描线,通过控制换能器阵列各阵元的发射时延,使每次发射在待测区域的不同

位置形成一个几何焦点位于 $F$ 的聚焦波束。由于FPB成像算法要求焦点位于成像区域外部,故焦深 $z_f$ 的设置应大于成像区域的深度 $z_{\max}$ ,同时,为保证聚焦过程能够正确执行,焦深 $z_f$ 也需要控制在近场区 $N$ 范围内,故实验中可参照式(1)来确定焦深。

$$z_{\max} < z_f < N = \frac{f(dn)^2}{4c_w} \quad (1)$$

式中: $f$ 为激励频率, $d$ 为阵元间距, $n$ 为单次激发的阵元数, $d$ 与 $n$ 的乘积即为单次发射的孔径, $c_w$ 为入射介质纵波波速。对于每条扫描线,采取全阵元接收的方式获取回波数据,记第 $j$ 条扫描线中第 $i$ 阵元接收到的回波数据为 $S_{ij}$ 。扫描线在完成第 $j$ 次发射后会在 $x$ 方向上移动一定间隔,控制下一组阵元进行发射,直到完成对整个成像区域的扫描。

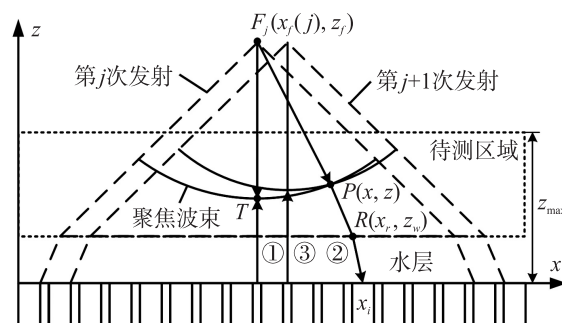


图1 FPB成像方法原理图

FPB成像通过将成像区域离散为像素矩阵,提取对应补偿时延下的回波幅值作为各像素点的像素值,以实现缺陷波的同相叠加。补偿时延为聚焦波束传播到像素点 $P$ 的时间①及缺陷波自点 $P$ 处传播到各阵元的时间②,时间②可由两点坐标以及折射关系直接求得,时间①由于 $T$ 点坐标未知,可通过计算焦深 $z_f$ 与 $TF$ 段之差得到,同时, $TF$ 段的长度等于 $PF$ 段,而 $P$ 与 $F$ 的坐标值是已知的。 $P$ 点坐标为 $(x, z)$ , $R$ 点坐标为 $(x_r, z_w)$ ,各阵元横坐标为 $x_i$ ,第 $j$ 次发射的焦点 $F$ 坐标为 $(x_f(j), z_f)$ ,各像素点所需补偿时延可由式(2)求得。

$$t_{ij}(x, z) = \frac{z_w}{c_w} + \underbrace{\frac{z_f - \sqrt{(x-x_f(j))^2 + (z-z_f)^2}}{c}}_{\text{①}} + \underbrace{\frac{\sqrt{(x_r-x_i)^2 + z_w^2} + \sqrt{(x-x_r)^2 + (z-z_w)^2}}{c}}_{\text{②}} \quad (2)$$

式中:脚标 $i$ 表示第 $i$ 个阵元,脚标 $j$ 表示第 $j$ 次发射,也即第 $j$ 条扫描线, $c$ 为待测区域纵波声速。

将多次发射中各阵元相应位置的回波幅值提取叠加,即可得到像素点 $(x, z)$ 的像素值 $I(x, z)$ ,像素值的计算如式(3)所示。

$$I(x, z) = \sum_{j=1}^K \sum_{i=j}^{j+M} S_{ij}(t_{ij}(x, z)) \quad (3)$$

式中:  $K$  表示共有  $K$  条扫描线,  $M$  表示单次激发的阵元数。

## 1.2 算法局限性

FPB 成像方法作为一种基于像素的成像方法,可以在一定程度上区分上表面直通波与近表面缺陷图像,然而,如图 2 所示,在缺陷区域提取到的回波幅值并非全部由缺陷波组成,这就导致了缺陷定量的不准确,此外,由于直通波的影响,缺陷区域周围本该提取幅值为零的区域会提取到直通波的幅值,成为缺陷图像周围的伪像。对于这个问题,本文采用自适应噪声抵消的方法对直通波进行抑制,减少近表面缺陷周围的伪像。

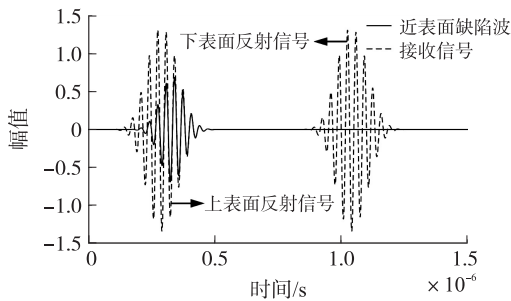


图 2 盲区信号示意图

## 2 自适应噪声抵消

### 2.1 自适应噪声抵消原理

自适应噪声抵消是一种能够根据输入自动调整自身参数的滤波方法,其优点在于对滤波器参数的依赖性小,不需要人为调控,以及软硬件实现简单,实时性高。自适应噪声抵消的原理如图 3 所示,作为参考信号的上表面直通波  $X_{\text{refer}}(t)$  经过自适应滤波器加权后,与采集到的原始信号  $X(t)$  相减,通过控制权重来使误差函数  $e(t)$  最小,以此来抵消近表面区域的直通波噪声,就能在保留缺陷波的情况下去除直通波,输出仅含有缺陷波的信号  $S(t)$ 。误差函数  $e(t)$  的计算如式(4)所示,采用式(5)所示的最小误差准则<sup>[17]</sup>。

$$e(t) = X(t) - X'_{\text{refer}}(t) \quad (4)$$

$$E(e^2(t)) = \min \quad (5)$$

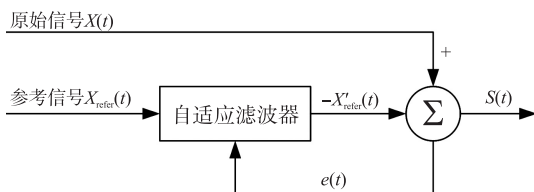


图 3 自适应噪声抵消原理图

对于自适应噪声抵消过程中需要输入的参考信号  $X_{\text{refer}}(t)$ , 本文结合 FPB 成像算法的采集特点, 提出一种平均回波信号以计算参考信号的方法, 其原理如图 4 所示。通常情况下, 我们认为缺陷的存在属于偶发现象, 并不会占据整个材料中的大部分区域, 近表面缺陷也是如此。即是说, 各阵元接收到的回波信号仅由材料上下表面的反射信号所构成, 对采集过程中不同区域的信号进行平均, 所得的结果仍可近似认为是材料的表面反射, 采集过程中包含的缺陷信号经由平均过程抑制了其幅度, 在输入为大量采集信号时, 缺陷信号对参考信号的影响可以忽略不计, 采集的次数越多, 平均信号就越接近理论参考信号。对于 FPB 过程, 由于发射过程中各阵元存在不同的延时, 所以需要对各发射阵元分别计算参考信号, 其计算过程可由式(6)表示:

$$X_{\text{refer}}(t, i) = \frac{\sum_{j=1}^N X_j(t, i + j - 1)}{K} \quad (6)$$

式中:  $i$  表示第  $i$  个发射阵元,  $j$  表示不同位置的扫描线, 扫描线的总数为  $K$ 。

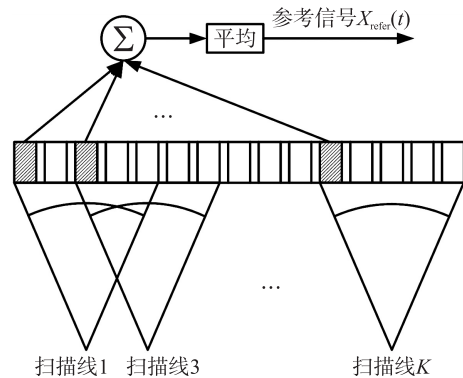


图 4 FPB 成像中的参考信号获取

### 2.2 近表面盲区噪声抵消结果

本文以 35 阵元为一组进行换能器阵列的激励, 共计得到 92 条扫描线, 对于参考信号的获取, 将实验过程中采集的带有缺陷信号的上下表面反射信号代入式(6), 即可得到与理论相近的上下表面反射信号, 将式(6)所得信号作为参考输入自适应滤波器, 使其与采集信号相减, 即可在一定程度上抑制上下表面反射信号, 使得近表面缺陷波得以凸显, 图 5 为式(6)所得的参考信号示意。

图 6 中展示了近表面缺陷位置处噪声抵消前后的铝板信号波形, 其中, 实线波形为原始信号, 虚线波形为噪声抵消后的信号, 可以观察到上表面反射信号在很大程度上被削弱了, 凸显出了近表面缺陷的波形, 对图中缺陷波的起跳位置进行读取, 并与理

论计算结果相对比,发现缺陷波的起跳位置与理论相符,可以认为自适应噪声抵消方法正确提取了近表面缺陷波。此外,铝板内部的其他缺陷波形也较为完好地保留了下来,可以认为自适应噪声抵消方法对近表面缺陷检测具有优化效果。

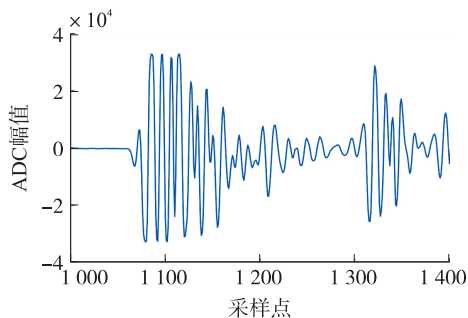


图 5 参考信号示意图

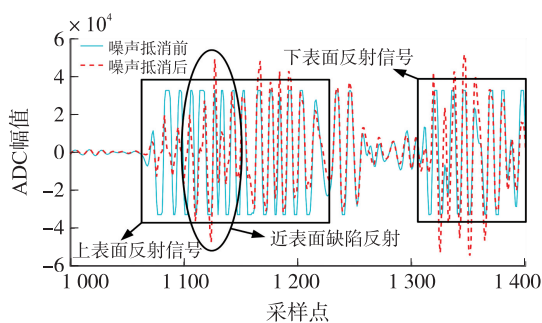


图 6 自适应噪声抵消结果

### 3 实验

#### 3.1 实验设置

为了验证自适应噪声抵消方法在成像中的有效性,本文以常见金属中近表面盲区最大的铝板为对象进行缺陷扫查,试块的材料为 5052 铝合金,厚度为 10 mm,缺陷类型设置为半径 1 mm 的贯穿孔,其中,所设缺陷距离上下表面的最短距离为 1 mm。实验装置示意图及人工预设缺陷的位置和尺寸如图 7 所示,单位为 mm。

本次研究中,采用 128 通道收发系统来控制线阵探头各阵元的激发时延与采集每条扫描线下的全阵元回波数据,扫描线的步进为 0.3 mm,发射的脉冲定义为式(7)所示形式,其波形可参照图 8,每个激励点间的时间间隔为 1 ns,其他实验参数如表 1 所示。预设的人工缺陷可分为近表面检测区及分辨率测试区,其中近表面检测区设置了 4 个线性排列的缺陷,缺陷中心点横向间距为 3 mm,纵向间距为 2 mm,位于上下表面附近的缺陷距离上下表面的最短距离皆为 1 mm;分辨率测试区设置了 5 个不同间距的缺陷,其间距分别为 0 mm、0.5 mm、1 mm 和

2 mm,所有缺陷的孔径皆为 2 mm。

$$y(t) = e^{-\left(\frac{t-2T_0}{T_0}\right)^2} \times \sin(2\pi f_0 t) \quad (7)$$

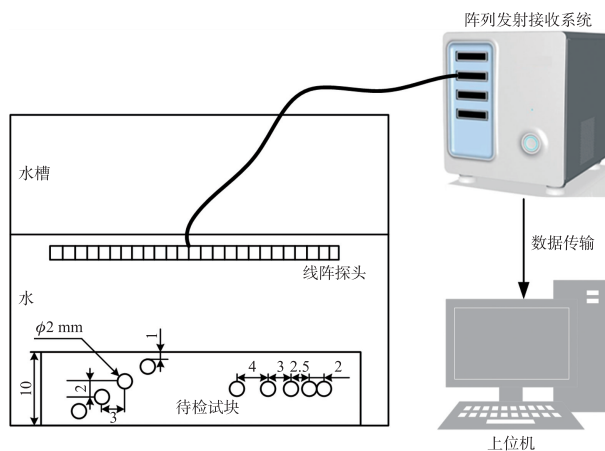


图 7 实验系统图

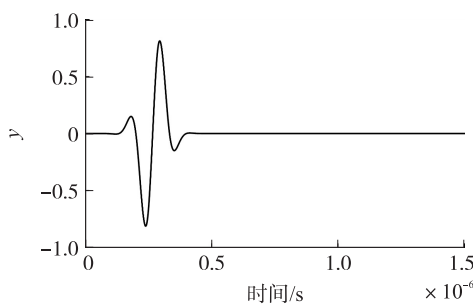


图 8 激励信号波形图

表 1 实验参数设置

系统参数	数值
换能器总通道数	128
中心频率	7.5 MHz
采样频率	75 MHz
阵元间距	0.3 mm
单次激励阵元数	35
扫描线数	92
设置焦深	130 mm
铝板声速	6 500 m/s

#### 3.2 近表面成像结果

分别采用本文算法和全聚焦算法对试块进行成像结果对比,为控制成像范围,对本文算法和全聚焦算法的原始成像结果进行了式(8)所示的对数化处理<sup>[18]</sup>,像素点的幅值由分贝表示,成像范围设置为 [0, -16.5] dB,即 85% 像素值的像素点范围内。

$$dB(x, z) = 20 \times \log_{10} \left\{ \frac{I(x, z)}{\max[I(x, z)]} \right\} \quad (8)$$

本文算法的成像数据由台湾 S-Sharp 公司生产的 Prodigy256 系统进行采集,为保证对比算法的可靠性,全聚焦成像的结果由汕头超声公司生产的 CTS-PA322T 型相控阵全聚焦实时 3D 超声成像系

统提供,同时,为了统一本文成像结果的颜色范围,将 CTS-PA322T 获得的原始数据进行了图像重建,重建后的全聚焦图像根据试块对应尺寸调整后如图 9 所示,图中虚线标记所示为缺陷在试块上的实际尺寸及位置。

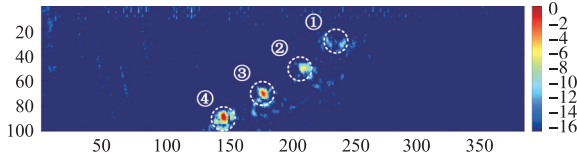


图 9 商用全聚焦成像近表面检测结果

在图 9 的成像结果中,未能观察到试块上表面所产生的表面波,可以推测,汕头超声公司对采集的全矩阵数据进行了近表面滤波处理,然而,全聚焦成像的结果中未能清晰显示出距离上表面最近的缺陷①,缺陷②的中心幅值明显低于缺陷③、④,且缺陷③、④的轮廓也较为粗糙,说明常规的滤波方法并不足以检测到金属板材的近表面缺陷。

为衡量本文噪声抵消前后的图像成像质量,本文以信噪比为评价指标,信噪比的计算方法通过式(9)给出<sup>[9]</sup>,其中  $\max$  表示取最大值,  $\text{mean}$  表示取平均值。

$$\text{SNR} = 10 \times \log_{10} \left| \frac{\max[I(x, z)]}{\text{mean}[I(x, z)]} \right| \quad (9)$$

在  $[0, -16.5]$  dB 范围下,本文算法的成像结果如图 10 所示,图 10(a)和图 10(b)分别为自适应噪声抵消前后的 FPB 成像结果图,由图 10(a)可以发现,铝板的近表面盲区很大,在表面 4 mm 范围内对成像结果干扰强烈,干扰效果最深可延续到表面以下 6 mm 左右,FPB 方法虽然可以在一定程度上给出近表面缺陷的成像结果,但由于表面直通波的干扰,其定量过程难以展开,缺陷的轮廓也较为模糊,且在缺陷周围存在弧状伪像分布,图像的信噪比为 7.02 dB。而在图 10(b)中,相同成像范围下近表面

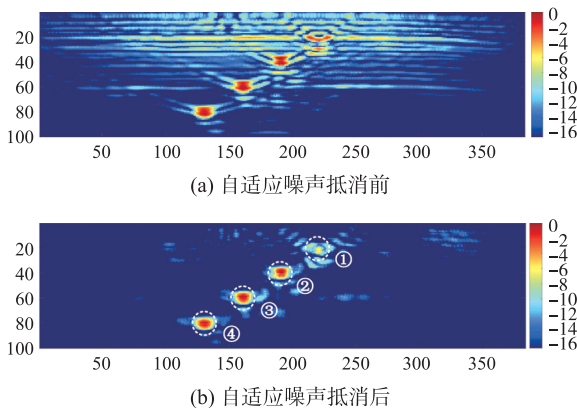


图 10 FPB 成像算法近表面检测结果

直通波已基本不显示,缺陷①到④均可较好地近表面盲区中分离出来,且缺陷周围不再存在弧状的伪像,图像的信噪比为 11.33 dB,较噪声抵消前提高了 4.31 dB。对于缺陷①,虽然自适应噪声抵消后的成像结果中基本能够分辨出其存在,但其幅值仍显著低于缺陷②到④,且周围存在的伪像较多,仍需要对该问题进行进一步研究。

### 3.3 结果分析

为分析自适应噪声抵消前后 FPB 成像结果的定量误差,对内部缺陷①到④进行评估,网格划分大小为  $0.1 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$ ,缺陷的定量常以一定 dB 下的像素点数进行计算<sup>[19]</sup>,本文中以成像范围内,即  $-16.5 \text{ dB}$  下的像素点数进行计算,缺陷的实际尺寸则参考试块,二者对比的结果列于表 2。由表 2 可知,未进行近表面滤波的成像结果在缺陷①、②、③的定量上偏差较大,缺陷④的定量结果虽有改善,但仍不及滤波后的定量结果来得准确,滤波后的成像结果在定量上有了明显的改善,缺陷①到④的定量结果本身偏差不大,其中缺陷①的定量结果偏大,实际应用中,可考虑事先对试块中一定当量的缺陷进行成像标定以提高定量精度,优化后的 FPB 成像算法最大定量误差为  $0.51 \text{ mm}^2$ 。

表 2 缺陷定量误差分析表

缺陷类型	成像大小 / $\text{mm}^2$	实际大小 / $\text{mm}^2$	定量误差 / $\text{mm}^2$	
噪声 抵消前	①	4.78	3.14	1.64
	②	5.16	3.14	2.02
	③	4.97	3.14	1.83
	④	3.84	3.14	0.70
噪声 抵消后	①	3.65	3.14	0.51
	②	3.44	3.14	0.30
	③	3.24	3.14	0.10
	④	3.22	3.14	0.08

## 4 成像分辨率测试

为了解自适应噪声抵消前后 FPB 成像算法的成像分辨率,本文对优化前后的成像算法进行了成像分辨率测试。用于测试的试块实物如图 11 所示,分辨率测试区为试块右侧五个不等间距的通孔,从



图 11 试块分辨率测试区实物图

右至左标记为①到⑤,由于加工误差的影响,②号孔的实际位置在中心线偏上部分。

在阵列成像中,成像分辨率性能常采用半峰值宽度(Full-Width at Half-Maximum, FWHM),即-6 dB范围内的像素点来进行评价<sup>[20]</sup>,FWHM值越小,则说明目标图像在空间上的幅度衰减越快,成像的分辨率越好。图12所示为优化后的FPB成像算法对分辨率测试区的成像结果,从图中可以看到,算法对于五个缺陷的成像结果与实际试块相符,②号缺陷的深度较其他缺陷而言较浅,五个不等间距的缺陷均能清晰分辨,说明算法的横向分辨率较好。优化前后成像结果的FWHM量化结果如表3所示,优化前的平均FWHM为0.84 mm,优化后的平均FWHM为0.66 mm,优化后的成像分辨率略有提高,较优化前提高了0.18 mm。

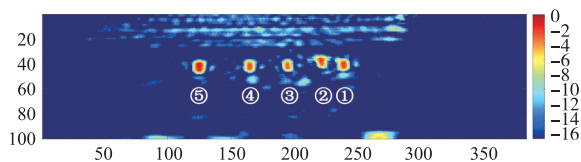


图12 FPB成像算法分辨率测试结果

表3 FPB成像算法FWHM结果

缺陷编号	①	②	③	④	⑤
噪声抵消前 FWHM/mm	0.8	0.9	0.7	0.9	0.9
噪声抵消后 FWHM/mm	0.6	0.8	0.5	0.7	0.7

## 5 结论

本文以金属板材为对象,针对超声成像中存在的表面直通波与近表面缺陷波混叠问题进行了研究,在基于像素的成像方法中结合了一种自适应噪声抵消技术,优化了FPB成像算法,并测试了优化前后算法的成像分辨率。针对自适应噪声抵消中的参考信号获取问题,本文结合采集数据的特征,提出了一种平均回波信号以计算参考信号的方法。实验结果表明,以平均信号作为参考信号的方法能够较好地原始信号中提取出混叠的近表面缺陷波,去除表面直通波;成像结果方面,应用了自适应噪声抵消技术后,图像的信噪比提升了4.31 dB,缺陷定量的最大误差为0.51 mm<sup>2</sup>,成像分辨率达到了0.66 mm,较优化前提升了0.18 mm。

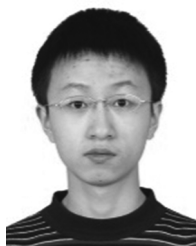
本文以5052铝板的水浸检测为例展开实验,对方法的有效性进行了验证,证明了自适应噪声抵消方法对近表面缺陷成像的优化效果,对于其他材料

(如钢、铜等)以及其他耦合方式(如直接耦合)下的成像,本文方法可直接沿用,自适应噪声抵消过程中的参考信号可由对应检测模式下的采集数据自动生成。

## 参考文献:

- [1] Shimizu K, Osumi A, Ito Y. Visualization of Defects in Thin Metal Plates by a Scanning Airborne Ultrasound Source Technique Using Guided Waves of Different Frequencies[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2022, 61(SG):SG1050.
- [2] 赵振宇. 金属薄板和动车车轮超声检测中信号处理方法的研究[D]. 北京:北京交通大学, 2016.
- [3] Ai Y B, Zhang Y J, Cao X Z, et al. A Defect Detection Method for the Surface of Metal Materials Based on an Adaptive Ultrasound Pulse Excitation Device and Infrared Thermal Imaging Technology[J]. Complexity, 2021.
- [4] Harke K J, Calta N, Tringe J, et al. Laser-Based Ultrasound Interrogation of Surface and Sub-Surface Features in Advanced Manufacturing Materials[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1):3309.
- [5] Ha J M, Seung H M, Choi W. Autoencoder-Based Detection of Near-Surface Defects in Ultrasonic Testing[J]. Ultrasonics, 2022, 119:106637.
- [6] Dai T, Jia X, Zhang J, et al. Laser Ultrasonic Testing for Near-Surface Defects Inspection of 316L Stainless Steel Fabricated by Laser Powder Bed Fusion[J]. China Foundry, 2021, 18(4):360-368.
- [7] 程江, 张旭, 涂君, 等. 超声衍射时差法近表面盲区减小算法研究[J]. 传感器与微系统, 2022, 41(6):48-51.
- [8] 张海燕, 刘建全, 张辉, 等. 扩散场重建格林函数检测钢轨近表面缺陷[J]. 应用声学, 2019, 38(5):774-781.
- [9] 王寒露, 何丽媛, 米源, 等. 扩散场扇扫重建格林函数实现近表面盲区缺陷检测[J]. 声学学报, 2021, 46(2):301-308.
- [10] 迟大钊, 刚铁. 基于超声杂波抑制的缺陷检测[J]. 焊接学报, 2015, 36(10):17-20, 113-114.
- [11] 刘波, 姚沛衡, 禹岳, 等. 高铁电机精密铜导条机器人超声无损检测技术研究[J]. 传感技术学报, 2021, 34(9):1146-1151.
- [12] 袁建中, 严智, 袁光华, 等. 异种金属焊缝超声爬波检测技术[J]. 核动力工程, 2009, 30(5):109-112.
- [13] 刘文芳, 韩军, 刘艳锋, 等. 基于机器学习的金属近表面缺陷超声检测方法[J]. 中国测试, 2022, 48(1):46-52.
- [14] 丁宁, 金士杰, 张东辉, 等. 基于波型转换的TOFD近表面盲区抑制研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(16):120-124.
- [15] 陈世利, 黄玉秋, 张慧, 等. 分形理论在近表面缺陷超声A扫检测中的应用[J]. 计算机应用, 2014, 34(11):

- 3365–3368.
- [16] Zheng C, Wang Y, Qiu W, et al. Ultrasound Far-Focused Pixel-Based Imaging Using Wiener Postfilter Scaled by Adjustable Zero-Cross Factor [J]. *Ultrasonics*, 2021, 115: 106417.
- [17] Kažys R, Svilainis L. Ultrasonic Detection and Characterization of Delaminations in thin Composite Plates Using Signal Processing Techniques [J]. *Ultrasonics*, 1997, 35 (5): 367–383.
- [18] 冒秋琴, 陈尧, 张柏源, 等. 相位环形统计矢量对提高全聚焦成像质量的影响[J]. *声学学报*, 2020, 45 (6): 913–921.
- [19] 国家机械工业局. JB/T 4009—1999 接触式超声纵波直射探伤方法[S]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [20] Zhao J, Wang Y, Yu J, et al. Short-Lag Spatial Coherence Ultrasound Imaging with Adaptive Synthetic Transmit Aperture Focusing [J]. *Ultrasonic Imaging*, 2017, 39 (4): 224–239.



杜文杰(1998—),男,汉族,浙江绍兴人,中国计量大学硕士研究生,主要从事超声无损检测、超声阵列成像方面的研究工作,1031868388@qq.com;



郑慧峰(1981—),男,汉族,浙江江山人,中国计量大学副教授,硕士研究生导师,主要从事超声无损检测及机器视觉检测等方面的研究,zjufighter@163.com。