

# 激光超声可视化图像处理研究

朱洪玲<sup>1,2</sup>, 刘畅<sup>1</sup>, 张博<sup>1\*</sup>, 蔡桂喜<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院金属研究所分析测试部, 辽宁 沈阳 110016;

<sup>2</sup>中国科学技术大学材料科学与工程学院, 安徽 合肥 230026

**摘要** 在激光超声可视化成像过程中, 外界噪声、入射波等干扰导致了图像质量下降, 造成了缺陷识别能力不足。利用局部统计滤波算法降低散斑噪声干扰, 通过考察平均梯度和熵值以评估降噪效果。利用二阶微分算子对降噪后的图像进行图像增强, 比较了不同微分算子的图像增强效果。提出利用罚函数方法抑制入射波对缺陷散射波的干扰, 通过权重因子和正则化因子的变化考察了峰值信噪比和结构相似性的变化趋势, 并与相邻波相减抑制入射波方法进行了对比。结果表明, 通过图像处理方法可以改善激光超声可视化图像质量, 突显缺陷信息。

**关键词** 测量; 激光超声; 可视化成像; 罚函数

中图分类号 TP751.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0104004

## Research on Laser Ultrasonic Visual Image Processing

Zhu Hongling<sup>1,2</sup>, Liu Chang<sup>1</sup>, Zhang Bo<sup>1</sup>, Cai Guixi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Analysis and Testing Department, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China;

<sup>2</sup>School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

**Abstract** In the process of laser ultrasonic visualization, the external noise and incident wave lead to lower image quality and defect identification capability. In this paper, local statistic filtering is used to reduce the interference of speckle noise, and average gradient and entropy are investigated in order to evaluate denoising results. Two-order differential operator is applied to the enhancement of denoised image, and the image enhancement effects with different differential operators are compared. The penalty function is used to restrain the interference of incident wave on defect scattering wave. The variation trend of peak signal-to-noise ratio and structural similarity are investigated by weighting factor and regularization coefficient, and the method is compared with the method of suppressing incident wave by subtraction of adjacent waves. The results show that the laser ultrasonic visual image quality can be improved by image processing method, and the defect information can be highlighted.

**Key words** measurement; laser ultrasound; visual imaging; penalty function

**OCIS codes** 120.2040; 110.7170; 100.2000

## 1 引 言

激光超声可视化技术是一种新型的无损检测手段, 通过激光作用于构件表面形成热弹机制或烧蚀机制进而激励产生超声波, 利用声学换能器、超声波信号采集与处理系统将超声波信号进行可视化成像处理以还原超声波传播动态变化过程, 为实现直观

地检测构件表面或内部的损伤和缺陷情况提供可靠的数据支撑<sup>[1-2]</sup>。基于声场互易原理的声场可视化方法是对发射声源和接收声源进行互换以完成超声波声场的动态重构技术, 具有实时、直观、频带宽及检测可达性好等优点, 尤其适用于几何形状复杂或受限制部位的工业现场的快速检测<sup>[3-4]</sup>。

在激光超声可视化成像过程中, 采集获取的超

收稿日期: 2017-07-19; 收到修改稿日期: 2017-08-30

基金项目: 国家自然科学基金(51605468)

作者简介: 朱洪玲(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事材料无损检测与评估方面的研究。E-mail: hlzhu15s@imr.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: zb@imr.ac.cn

声回波信号时受到了外界噪声的干扰,导致了图像清晰度降低,为了便于后续的缺陷识别,需要突出图像中感兴趣的区域以弱化不需要的图像信息,特别地,当入射波遇到缺陷后会发生散射现象,引起了散射波与入射波的叠加,从而导致了较难观察缺陷信息。为了有效地滤除噪声,通常采用硬件或软件方式对原始超声回波信号的噪声进行抑制, Truong 等<sup>[5]</sup>采用多个多普勒振动测试仪的硬件处理方式提高超声回波信号的信噪比,尹向宝<sup>[6]</sup>利用小波阈值降噪对激光超声回波信号进行降噪处理,结果表明,可以提高超声信号的信噪比。利用参考信号或图像进行差分运算是抑制入射波对缺陷散射波干扰的主要方法, Yashiro 等<sup>[7-8]</sup>提出的超声波同期差分法提高了缺陷可视化效果, Lee 等<sup>[9]</sup>提出了相邻波相减

算法、参考波相减算法、参考图像相减算法等处理手段以实现突出缺陷信号的目的。本文提出对激光超声可视化图像直接进行图像处理以改善图像质量与突显缺陷信息,利用局部统计滤波以降低噪声干扰,利用二阶微分算子进行图像增强,提出无需参考图像的罚函数方法来抑制入射波对散射波的干扰。

## 2 激光超声可视化成像基本原理

### 2.1 激光超声可视化无损检测系统

激光超声可视化无损检测系统主要包括激励单元、数据采集单元和控制单元三部分,如图 1 所示。激励单元包括 Q 开关 Nd:YAG 激光器和振镜式激光反射仪,数据采集单元由换能器、数据采集卡组成,控制系统是基于外设部件互连标准(PCD)的运动控制平台。

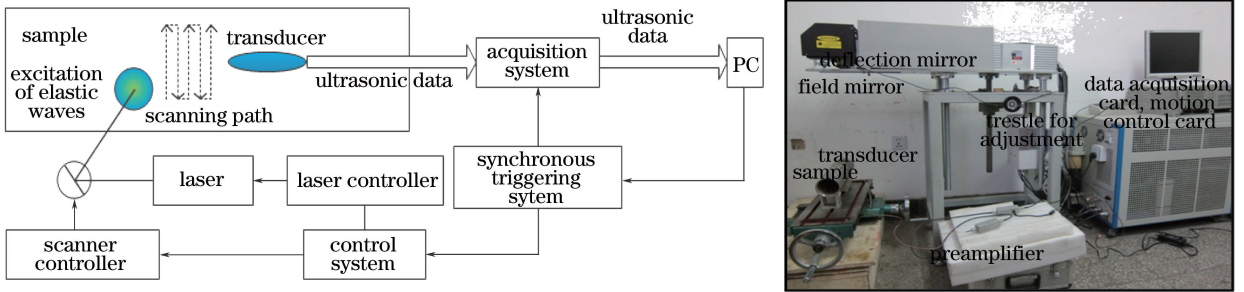


图 1 激光超声可视化无损检测系统。(a)原理图;(b)实物图

Fig. 1 Laser ultrasonic visualization nondestructive testing system. (a) Principle diagram; (b) physical map

该设备是采用调 Q 的 Nd:YAG 脉冲激光器(脉宽 10 ns,重复频率最高达 1000 Hz,脉冲能量最高 10 mJ)激励激光,经偏转镜控制激光点在被测工件上进行扫描,采用宽带型声发射传感器(共振频率为 500~2000 kHz,直径为 6 mm)接收超声波信号,经放大滤波(放大器增益 60 dB),同步触发信号采集卡(采样频率 16.66 MHz,采样深度 2000 点)采集

数据存储在计算机中,用自主研发的超声波传播可视化软件来进行成像显示。采用上述设备对大直径管壁焊缝进行检测实验,试样及检测区域示意图如图 2 所示。激光超声检测区域尺寸为 47 mm × 94 mm,通过偏转镜控制激光点在检测区域内作“弓”字形扫描运动,激励点数为 121 × 241,相邻激光点之间的间距为 0.39 mm。

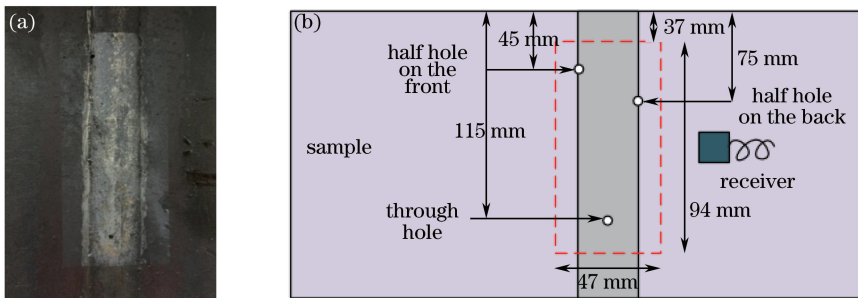


图 2 具有模拟缺陷和扫描面积的焊接试验样品。(a)实物图;(b)尺寸

Fig. 2 Welding test sample with simulated defect and scanning area. (a) Physical map; (b) size

### 2.2 基于声场互易原理的激光超声可视化技术

基于声场互易原理<sup>[12]</sup>(图 3),激光脉冲在 T 位置激励超声波在位置 R 处的超声换能器接收响应

信号,与激光脉冲在 R 位置激励超声波在位置 T 处接收超声波响应信号的结果是一致的。即激光沿着指定激励路径激励时,固定在 R 位置的超声换能器

接收到的响应信号,等同于激光对  $R$  位置激励,相同指定路径上各点采集到的一系列响应信号。检测区域内各激励位置所对应的响应信号在同一时刻的幅值分布表征了这一时刻的波场状态。在激励位置  $(x, y)$  处激励超声波并采集响应信号  $I(x, y, t)$ , 建

立三维矩阵用于存储  $I(x, y, t)$ , 响应信号的  $x, y, t$  与三维矩阵的行、列、页(帧)相对应。一维时域数据被整合成空间-时域的三维波场数据,将三维波场数据中任意时刻(帧)的  $X$ - $Y$  数据截面用强度云图表示,就获得该帧超声波的传播波场图像。

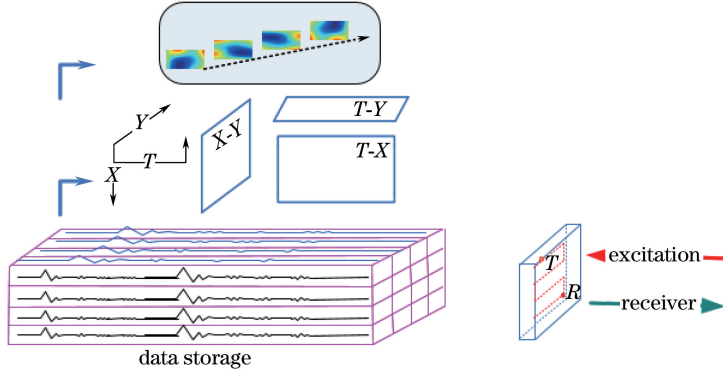


图 3 基于声场互易原理的激光超声可视化

Fig. 3 Laser ultrasonic visualization based on the reciprocity theorem of acoustic wave fields

由于激光超声波场传播图像质量受到激光激励点的空间分辨率和超声换能器中心频率的限制,因此为了改善可视化质量,需要对激光超声波场传播图像进行有效的处理与分析,以实现提升缺陷识别的能力。在激光超声波场传播图像中,散斑噪声是主要的噪声形式之一。散斑噪声是超声波入射到介质粗糙界面时,折射波和背向散射波在空间相互干涉,形成的振幅和相位随机分布的散斑场,影响成像质量与信号失真。为了滤除散斑噪声,采用局部统计滤波算法进行处理。在滤除散斑噪声后,需要进一步凸显缺陷信息特征而衰减不需要的特征,通过图像增强方法或者采用某些数学变换,以易于通过激光超声波场传播可视化图像来辨识缺陷。

### 3 激光超声可视化图像处理方法

#### 3.1 散斑噪声滤除

针对散斑噪声干扰,采用局部统计滤波算法进行滤除,设散斑噪声统计模型为

$$Z_{i,j} = X_{i,j} \cdot V_{i,j}, \quad (1)$$

式中  $Z_{i,j}$  为被观测到的图像强度,  $X_{i,j}$  为无散斑噪声的图像强度,  $V_{i,j}$  表示均值为 1、标准差为  $\sigma$  的乘性噪声。

假设一个像素采样均值和方差等于其像素邻域的局部均值和方差,把(1)式进行一阶泰勒展开后,根据最小平方估计可得:

$$\hat{X}_{i,j} = \bar{X} + k_{i,j} (Z_{i,j} - \bar{X}), \quad (2)$$

式中  $\hat{X}_{i,j}$  和  $\bar{X}$  分别表示去噪后的图像强度和平均值,增益因子  $k_{i,j}$  的表达式为

$$k_{i,j} = \frac{\text{var}(X)}{\sigma^2 \bar{X}^2 + \text{var}(X)}, \quad (3)$$

式中  $\text{var}(X)$  和  $\sigma$  的表达式为

$$\begin{aligned} \text{var}(X) &= \frac{\text{var}(Z) + \bar{Z}^2}{\sigma^2}, \\ \sigma &= \frac{\sqrt{\text{var}(Z)}}{\bar{Z}}. \end{aligned} \quad (4)$$

式中  $\text{var}(Z)$ ,  $\bar{Z}$  分别表示图像的方差和均值。

从图 4(a) 可以看出原始超声信号含有较大的噪声,在经过局部统计滤波处理后,可以看出降噪后的图像质量得到改善,如图 4(b) 所示,由于激光超声波场传播图像没有参考图像,因此采用模糊度评价方法描述降噪前后的图像质量,模糊度评价无参考图像质量方法主要包括熵值法和平均梯度法。

熵值法用于通过计算图像能量对图像信息内容进行度量,设灰度图像  $Z(x, y)$  的尺寸为  $M \times N$ , 其中  $1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N$ 。定义该图像每个像素点所对应的  $n \times n$  邻域的平均灰度图像  $G(x, y) = \frac{1}{n^2} \sum_{i=-n/2}^{n/2} \sum_{j=-n/2}^{n/2} Z(x+i, y+j)$ , 设  $r_{ij}$  为图像  $Z(x, y)$  中某位置像素灰度值  $i$  和邻域平均灰度图像  $G(x, y)$  对应位置的像素灰度值  $j$  同时出现的频数,则可定义相应的联合概率密度  $p_{ij}$  和二维熵  $S_{\text{entropy}}$ :

$$p_{ij} = r_{ij} / (M \times N), S_{\text{entropy}} = - \sum_{i=0}^{255} p_{ij} \ln(p_{ij}). \quad (5)$$

平均梯度法通过计算图像中每个像素梯度总和的平均值来描述图像的相邻像素值的整体变化程度,如下式所示:

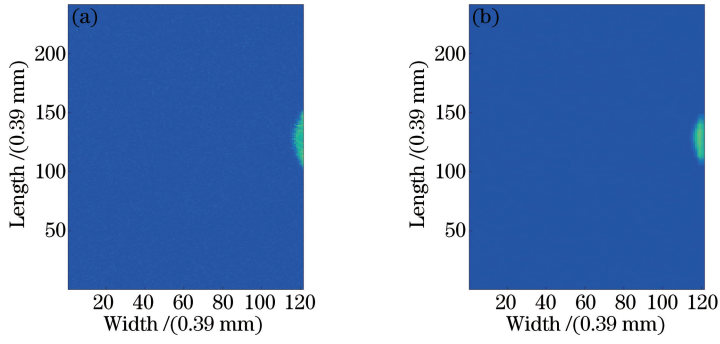


图 4 局部统计滤波前后第 57 帧超声传播图像的比较。(a)含噪声图像;(b)降噪后图像

Fig. 4 Comparison of ultrasonic wave propagation image of 57<sup>th</sup> frame before and after local statistic filtering.

(a) Noisy image; (b) denoised image

$$g = \frac{\sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=1}^{n-1} \sqrt{\frac{[X(i+1, j) - X(i, j)]^2 + [X(i, j+1) - X(i, j)]^2}{2}}}{(m-1) \times (n-1)} \quad (6)$$

从图 5(a)可以看出不同帧数下降噪前后的熵值变化,具体来说,降噪前的熵值低,意味着原始图像中的灰度级别数目较少,灰度级出现的概率高,图像模糊度高,图像不清晰;降噪后的熵值高,说明降噪后图像中的灰度级别数目较多,灰度级出现的概率低,图

像模糊度低,图像清晰。从图 5(b)可以看出不同帧数下降噪前后的平均梯度变化,具体来说,降噪前的平均梯度值较小,说明原始图像中细节反差变化的速率低,图像模糊度大;降噪后的平均梯度值较大,说明降噪后图像中的灰度值变化程度大,图像清晰度高。

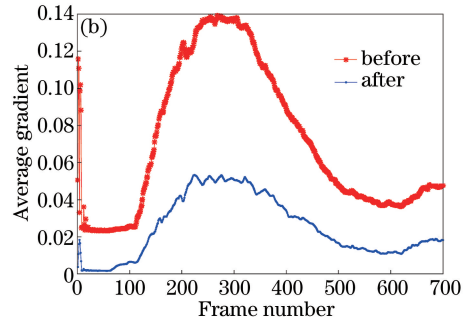
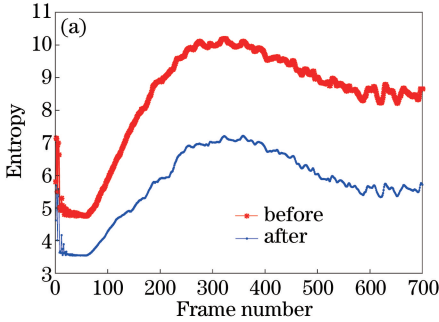


图 5 局部统计滤波前后不同帧间(a)熵和(b)平均梯度的比较

Fig. 5 Comparison of (a) entropy and (b) average gradient under different frames before and after local statistic filtering

### 3.2 图像增强

通过调整图像灰度范围,在压缩图像动态范围内增加图像各部分的对比度,以实现有效增强感兴趣细节的目的,实验采用拉普拉斯微分算子方法增强灰度突变并削弱灰度变化缓慢区域。如果在图像中一个较暗的区域出现了一个亮点,那么用拉普拉斯算子就会使这个亮点变得更亮,一般图像增强技术对于陡峭的边缘和缓慢变化的边缘很难确定其位置,但拉普拉斯算子可用二次微分正向峰和负向峰之间的过零点来确定,对孤立点或端点更为敏感,因此特别适用于以突出图像中的孤立点、孤立线或线端点为目的的场合。对于一幅图像  $f(x, y)$ ,其定义为  $\nabla^2 f(x, y) = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}$ ,其微分结果与图像方

向无关。在  $x$  和  $y$  方向上的二阶偏导数分别为

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = f(x+1, y) + f(x-1, y) - 2f(x, y), \quad \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} = f(x, y+1) + f(x, y-1) - 2f(x, y),$$

因此可得拉普拉斯微分算子的离散形式  $\nabla^2 f(x, y) = [f(x+1, y) + f(x-1, y) + f(x, y+1) + f(x, y-1)] - 4f(x, y)$ , 其拉普拉斯微分算子模板为

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

如果考虑  $45^\circ$  和  $135^\circ$  对角方向,有:

$$\nabla^2 f(x, y) = [f(x+1, y) + f(x-1, y) + f(x, y+1) + f(x, y-1) + f(x-1, y-1) + f(x+1, y-1) + f(x-1, y+1) + f(x+1, y+1)] - 8f(x, y), \quad (7)$$

则其拉普拉斯微分算子模板为  $\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$ , 利用

此微分算子对降噪后图像进行图像增强, 如图 6 所

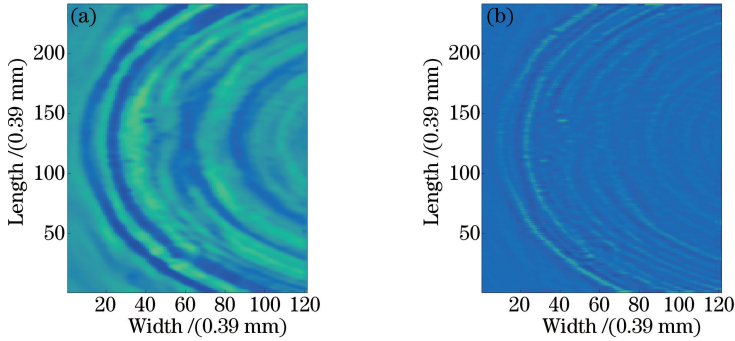


图 6 利用微分算子去噪后的图像增强。(a)第 346 帧降噪图像;(b)图像增强后的第 346 帧降噪图像

Fig. 6 Denoised image enhancement by differential operator. (a) Denoised image of 346<sup>th</sup> frame; (b) denoised image of 346<sup>th</sup> frame after image enhancement

如图 7 所示, 利用不同的二阶微分算子对降噪后的第 246 帧激光超声声场传播图像进行图像增强处理, 图 7(a)是降噪后的激光超声声场传播图像, 图 7

(b)采用的二阶微分算子是  $\mathbf{O}_{d1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$ , 图 7  
(c)采用的二阶微分算子是  $\mathbf{O}_{d2} = \begin{bmatrix} -1 & 2 & -1 \\ 2 & -4 & 2 \\ -1 & 2 & -1 \end{bmatrix}$ ,

示。图 6 是第 346 帧下对降噪后图像进行微分算子图像增强的结果对比, 可以看出, 经过图像增强处理后可以较清楚地呈现缺陷回波。

图 7(d)采用的二阶微分算子是  $\mathbf{O}_{d3} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -5 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$ 。

可以看出, 不同的二阶微分算子的图像增强效果有差异, 图 7(b)能够较好地体现图像细节信息与纹理信息, 图 7(c)中获得的细节信息较弱, 图 7(d)获得的图像的纹理比原图更清晰, 但所反映的边界不是太清晰。

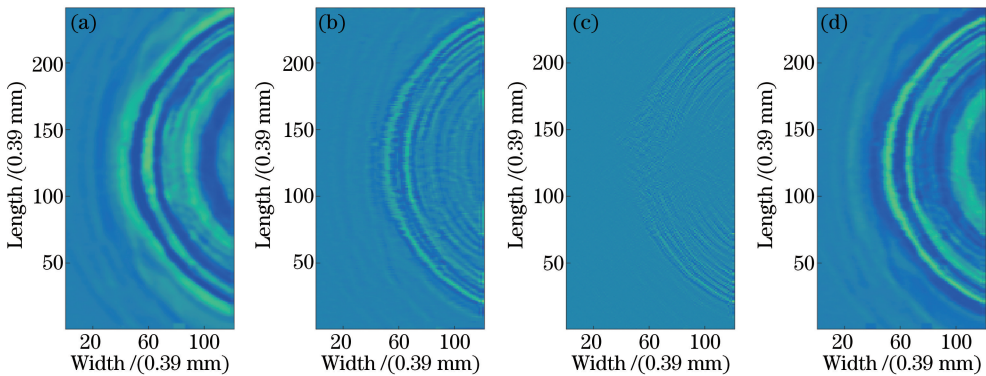


图 7 (a)第 246 帧降噪图像; 利用二阶微分算子(b)  $\mathbf{O}_{d1}$ 、(c)  $\mathbf{O}_{d2}$ 、(d)  $\mathbf{O}_{d3}$  进行图像增强后的第 246 帧降噪图像

Fig. 7 (a) Denoised image of 246<sup>th</sup> frame; denoised images of 246<sup>th</sup> frame after image enhancement with two order differential operators of (b)  $\mathbf{O}_{d1}$ , (c)  $\mathbf{O}_{d2}$  and (d)  $\mathbf{O}_{d3}$

类似地, 如图 8 所示, 利用不同的二阶微分算子对降噪后的第 346 帧激光超声声场传播图像进行图像增强处理。可以看出, 随着入射波的前进, 与缺陷相互作用后, 通过图像增强可以更有效地显示缺陷信息, 如果微分算子选择不当, 会导致缺陷信息在图像上的显示效果不理想, 因此二阶微分算子的图像增强需要对细节信息与边缘信息进行兼顾。

### 3.3 入射波抑制方法

激光激励形成的超声波遇到缺陷会发生散射现象, 散射波与入射波混叠在一起, 给激光超声波传播可视化图像识别缺陷造成了严重干扰。在经过噪声滤除与图像增强后的图像中, 缺陷像素信息与周围像素信息的相对差异不大, 为了增加两者之间的相对差异, 实验采用罚函数方法抑制入射波对散射波

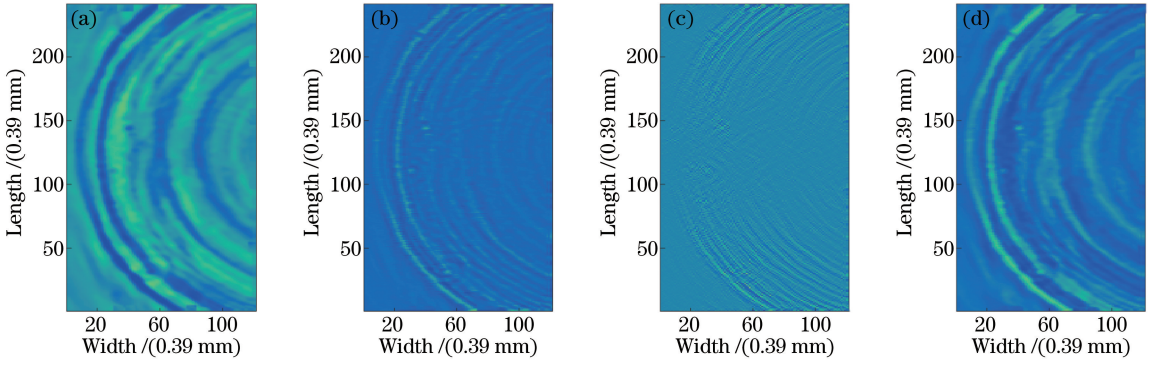


图 8 (a)第 346 帧降噪图像;利用二阶微分算子(b)  $\mathbf{O}_{d1}$ 、(c)  $\mathbf{O}_{d2}$ 、(d)  $\mathbf{O}_{d3}$  进行图像增强后的第 346 帧降噪图像

Fig. 8 (a) Denoised image of 346<sup>th</sup> frame; denoised images of 346<sup>th</sup> frame after image enhancement

with the two order differential operators of (b)  $\mathbf{O}_{d1}$ , (c)  $\mathbf{O}_{d2}$  and (d)  $\mathbf{O}_{d3}$

的干扰,设目标函数为

$$\arg \min_z \left[ \sum_i \omega_i d_i^2 + \lambda \sum_i (\Delta^2 z_i)^2 \right], \quad (8)$$

式中  $d_i = y_i - z_i$ ,  $y_i$  代表原始图像信号,  $z_i$  代表入射波图像信号,  $\omega_i$  代表权重因子,  $\lambda$  代表正则化系数,  $\Delta^2 z_i = D^2 z = (z_i - z_{i-1}) - (z_{i-1} - z_{i-2}) = z_i - 2z_{i-1} + z_{i-2}$ 。(7)式表达的是原始图像与估计图像的逼近程度,目标是寻找一组图像,使得(8)式值最小。(7)式中的第一项描述原始图像与估计图像的相似性,第二项代表估计图像的光滑程度。正则化系数  $\lambda$  起到了平衡非对称逼近程度和光滑性的作用。由(8)式可推导出:

$$\begin{aligned} S &= \| \mathbf{W}^{\frac{1}{2}} (\mathbf{y} - \mathbf{z}) \|_2^2 + \lambda \| \mathbf{D} \mathbf{z} \|_2^2 = \\ & (\mathbf{y} - \mathbf{z})^T \mathbf{W} (\mathbf{y} - \mathbf{z}) + \lambda \mathbf{z}^T \mathbf{D}^T \mathbf{D} \mathbf{z} = \\ & \begin{bmatrix} \mathbf{y} \\ \mathbf{z} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \mathbf{W} & -\mathbf{W} \\ -\mathbf{W} & \mathbf{W} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{y} \\ \mathbf{z} \end{bmatrix} + \lambda \begin{bmatrix} \mathbf{y} \\ \mathbf{z} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{D}^T \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{y} \\ \mathbf{z} \end{bmatrix} = \\ & \begin{bmatrix} \mathbf{y} \\ \mathbf{z} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \mathbf{W} & -\mathbf{W} \\ -\mathbf{W} & \mathbf{W} + \lambda \mathbf{D}^T \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{y} \\ \mathbf{z} \end{bmatrix} \\ \Rightarrow \nabla S &= 2 \begin{bmatrix} \mathbf{W} & -\mathbf{W} \\ -\mathbf{W} & \mathbf{W} + \lambda \mathbf{D}^T \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{y} \\ \mathbf{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \Rightarrow (\mathbf{W} + \lambda \mathbf{D}^T \mathbf{D}) \mathbf{z} &= \mathbf{W} \mathbf{y}, \end{aligned} \quad (9)$$

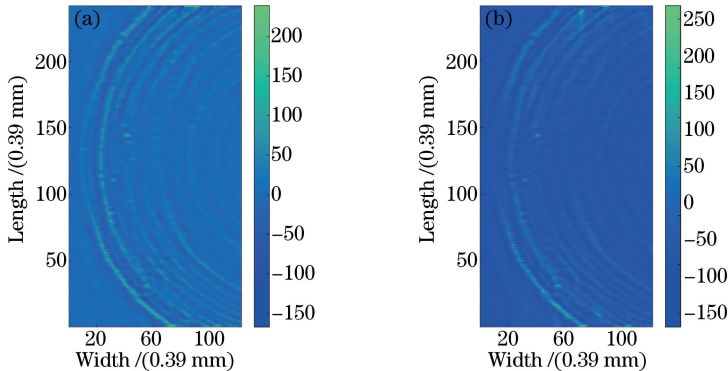


图 9 入射波(a)抑制前和(b)抑制后的第 346 帧降噪图像

Fig. 9 Denoised images of 346<sup>th</sup> frame (a) before and (b) after incident wave suppression

式中  $\mathbf{W}$  是向量  $\mathbf{w}$  组成的对角阵,即  $\mathbf{W} = \text{diag}(\mathbf{w})$ ,  $\mathbf{D}$  是  $\mathbf{z}$  的二阶导数矩阵,即  $\mathbf{D} \mathbf{z} = \Delta^2 \mathbf{z}$ 。求解估计入射波图像信号:

$$\mathbf{z} = (\mathbf{W} + \lambda \mathbf{D}^T \mathbf{D})^{-1} \mathbf{W} \mathbf{y}, \quad (10)$$

式中  $\mathbf{W}$  是由  $w_i$  组成的权重因子矩阵,权重因子  $w_i$  采用非对称方式进行选择,引入参数  $p$  和  $\lambda$ ,当  $d_i > 0$  时,  $w_i = q$ ;当  $d_i \leq 0$  时,  $w_i = 1 - q$ 。通常  $q$  取值较小,在  $0.001 \sim 0.1$  之间,  $\lambda$  取值很大,在  $10^2 \sim 10^9$  之间。图 9(a)是入射波抑制前的降噪图像,图 9(b)是入射波抑制后的降噪图像,可以看出,入射波抑制前的缺陷像素幅值信息与周围像素幅值信息的差异不大(约 150 mV),导致较难从图像中观察到缺陷信息。经过入射波抑制后,加大了缺陷像素幅值信息与周围像素幅值信息的差异(约 260 mV),从而达到了更易于观察缺陷信息的目的。

在入射波抑制过程中,需要选择的关键参数是权重因子  $w_i$  和正则化系数  $\lambda$ ,通过图像的平均梯度、熵、峰值信噪比 (PSNR)  $R_{\text{PSNR}}$  和结构相似性 (SSIM)  $S_{\text{SSIM}}$  来考察两个参数的变化规律。峰值信噪比是计算对应像素点间的误差,即基于误差敏感的图像质量评价,其计算公式如下:

$$E_{MS} = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [X(i, j) - Y(i, j)]^2,$$

$$R_{PSN} = 20 \ln \frac{2^k - 1}{\sqrt{E_{MS}}}, \quad (11)$$

式中  $E_{MS}$  表示当前图像  $X$  和图像  $Y$  的均方误差 (MSE),  $m, n$  分别为图像的高度和宽度;  $k$  为每像素的比特数, 一般取 8, 即像素的灰度阶数为 256. 峰值信噪比的单位是 dB, 数值越大表示失真越小.

结构相似性用均值 ( $\mu_x, \mu_y$ ) 作为亮度的估计, 用标准差 ( $\sigma_x, \sigma_y$ ) 作为对比度的估计, 用协方差  $\sigma_{xy}$  作为结构相似程度的度量,  $C_1 = K_1 L = 0.01 \times 255 = 2.25$ ,  $C_2 = K_2 L = 0.03 \times 255 = 7.65$ , 其中  $K_1, K_2$  表示经验参数,  $L$  表示像素灰度参数,  $C_1, C_2$  表示常数.  $S_{SSIM}$  的取值范围是  $[0, 1]$ ,  $S_{SSIM}$  值越大, 两幅

图像的结构相似性越好, 反之亦然:

$$S_{SSIM}(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)}. \quad (12)$$

图 10 是权重因子、正则化系数与平均梯度、熵、峰值信噪比和结构相似性的变化趋势等值线. 可以看出,  $\omega$  取值越小, 平均梯度值越大. 类似地,  $\omega$  取值越小, 熵值越大.  $\omega$  取值越大,  $\lambda$  取值越小,  $R_{PSN}$  值越大; 相应地,  $\omega$  取值越大,  $\lambda$  取值越大,  $S_{SSIM}$  值越大. 为了降低图像模糊度, 需要  $\omega$  取值小些, 同时为了保证峰值信噪比和结构相似性指标, 需要  $\lambda$  取值应该大些, 对  $\omega$  取值无要求, 因此所选择的  $\omega$  取值略小,  $\lambda$  取值略大, 研究选用  $\omega = 0.05, \lambda = 6500$ .

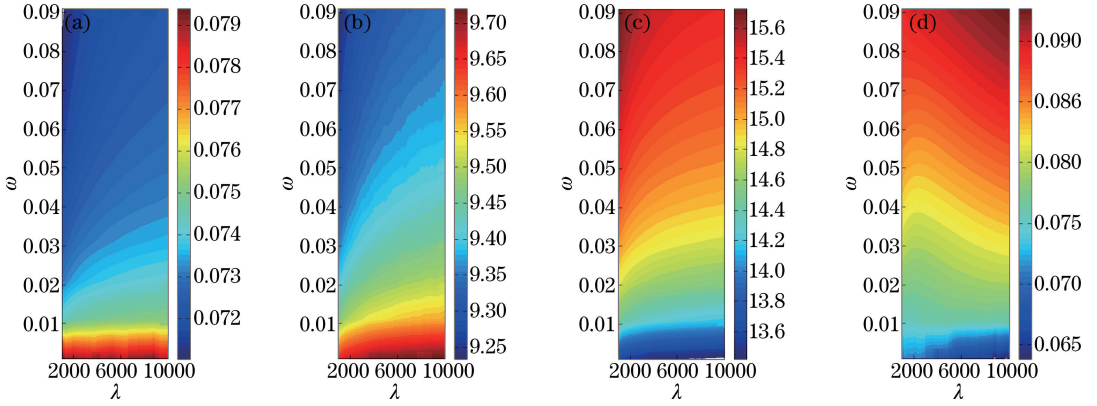


图 10 (a) 权重因子  $\omega$ 、正则化系数  $\lambda$  与平均梯度的等值线; (b) 权重因子  $\omega$ 、正则化系数  $\lambda$  与熵的等值线; (c) 权重因子  $\omega$ 、正则化系数  $\lambda$  与峰值信噪比的等值线; (d) 权重因子  $\omega$ 、正则化系数  $\lambda$  与结构相似性的等值线

Fig. 10 (a) Contour lines of weighting factor  $\omega$ , regularization coefficient  $\lambda$  and average gradient; (b) contour lines of weighting factor  $\omega$ , regularization coefficient  $\lambda$  and entropy; (c) contour lines of weighting factor  $\omega$ , regularization coefficient  $\lambda$  and PSNR; (d) contour lines of weighting factor  $\omega$ , regularization coefficient  $\lambda$  and SSIM

另外, 为了考察罚函数方法抑制入射波干扰的效果, 将其与相邻波相减法抑制入射波干扰进行了

对比. 图 11(a) 和 (b) 是两种方法对第 346 帧图像进行入射波抑制的结果, 可以看出, 罚函数方法可以

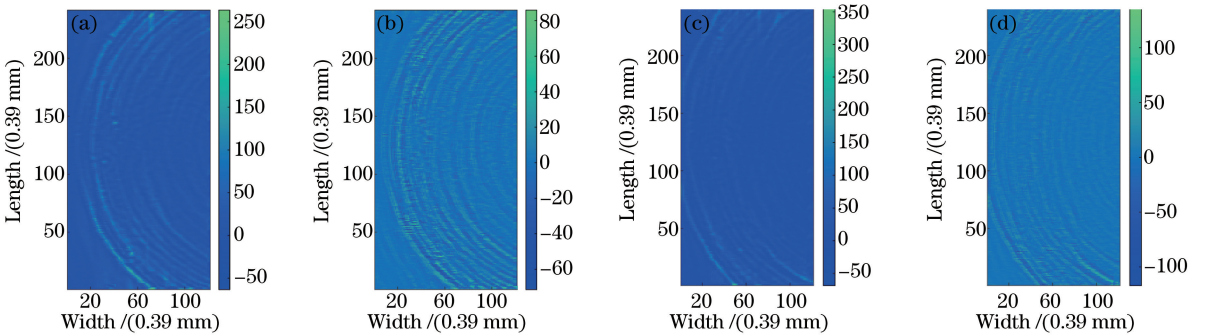


图 11 (a) 罚函数法和 (b) 相邻波相减法对第 346 帧图像进行入射波抑制的结果; (c) 罚函数法和 (d) 相邻波相减法对第 376 帧图像进行入射波抑制的结果

Fig. 11 Effect of (a) penalty function and (b) adjacent wave subtraction on incident wave suppression on 346<sup>th</sup> frame images; effect of (c) penalty function and (d) adjacent wave subtraction on incident wave suppression on 376<sup>th</sup> frame images

更好地抑制入射波干扰以突显缺陷信息。类似地,图 11(c)和(d)是两种方法对第 376 帧图像进行入射波抑制的结果,可以看出,基于同步差分处理的相邻波相减方法无法提高缺陷像素幅值信息与周围像素幅值信息的差异,造成了入射波抑制效果不明显。

## 4 结 论

为了提升激光超声声场传播图像的可视化质量,采用局部统计滤波滤除噪声干扰,通过拉普拉斯二阶微分算子进行图像增强,提出罚函数方法抑制入射波对散射波的干扰,得到如下结论:1) 滤波处理后可以使图像的清晰度提高;2) 采用拉普拉斯二阶微分算子进行图像增强后增强了灰度突变区域;3) 提出罚函数方法抑制入射波对散射波的干扰,实现了缺陷的专注分析。

### 参 考 文 献

- [1] Wang Jijun, Shen Zhonghua, Xu Baiqiang, *et al.* Analysis on precursor in laser ultrasonics in metal and non-metallic materials[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(8): 1127-1132.  
王纪俊, 沈中华, 许伯强, 等. 金属和非金属材料中激光超声前驱小波分析[J]. 中国激光, 2006, 33(8): 1127-1132.
- [2] Ding Yishan, Yang Shixi, Gan Chunbiao. Detecting features of defect metal based on laser ultrasonic technique[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(14): 33-37.  
丁一珊, 杨世锡, 甘春标. 利用激光超声技术研究金属裂纹缺陷的检测波特性[J]. 振动与冲击, 2015, 34(14): 33-37.
- [3] Bychkov A S, Zarubin V P, Karabutov A A, *et al.* On the use of an optoacoustic and laser ultrasonic imaging system for assessing peripheral intravenous access[J]. Photoacoustics, 2017, 5: 10-16.
- [4] Zeng W, Wang H T, Tian G T, *et al.* Detection of surface defects for longitudinal acoustic waves by a laser ultrasonic imaging technique [J]. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2016, 127(1): 415-419.
- [5] Truong T C, Lee J R. SNR enhancement for composite application using multiple Doppler vibrometers based laser ultrasonic propagation imager [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 84: 82-88.
- [6] Yin Xiangbao. Wavelet transformation based laser ultrasonic nondestructive detection for signal denoise processing [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2009, 28(1): 39-41.  
尹向宝. 小波变换在激光超声无损检测信号去噪中的应用[J]. 实验室研究与探索, 2009, 28(1): 39-41.
- [7] Yashiro S, Takatsubo J, Toyama N. An NDT technique for composite structures using visualized Lamb-wave propagation[J]. Composites Science and Technology, 2007, 67(15/16): 3202-3208.
- [8] Yashiro S, Takatsubo J, Miyauchi H, *et al.* A novel technique for visualizing ultrasonic waves in general solid media by pulsed laser scan [J]. NDT & E International, 2008, 41(2): 137-144.
- [9] Lee J R, Chia C C, Shin H J, *et al.* Laser ultrasonic propagation imaging method in the frequency domain based on wavelet transformation [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2011, 49(1): 167-175.
- [10] Lee J R, Shin H J, Chia C C, *et al.* Long distance laser ultrasonic propagation imaging system for damage visualization [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2011, 49(12): 1361-1371.
- [11] Lee J R, Chia C C, Park C Y, *et al.* Laser ultrasonic anomalous wave propagation imaging method with adjacent wave subtraction: algorithm[J]. Optics and Laser Technology, 2012, 44(5): 1507-1515.
- [12] Wan Quan, Zhang Haibin, Jiang Weikang. The research about the multi-freedom degree reciprocity principle for diffuse sound field based on the sound pressure field description [J]. Acta Acustica, 2009, 34(5): 445-452.  
万泉, 张海滨, 蒋伟康. 基于声压场描述的扩散声场多自由度互易原理研究 [J]. 声学学报, 2009, 34(5): 445-452.