

数字细节增强技术在脉冲热成像无损检测中的应用

徐超, 陈一鹤

(北京理工大学 光电学院 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

摘要: 针对脉冲热成像法红外检测图像对比度低、缺陷目标边缘模糊、受不均匀照明影响大的问题, 提出一种基于目标轮廓的结合数字细节增强技术与多阈值最大熵的缺陷大小定量估算方法。首先, 脉冲红外检测图像经自动对比度增强算法优化的数字细节增强方法处理后, 缺陷与背景间对比度显著提升, 从而不均匀照明对缺陷识别效果的影响明显减弱; 其次, 再通过遗传算法优化的最大熵多阈值分割方法提取缺陷目标, 对其进行八邻域法轮廓跟踪, 以提取各缺陷区域的轮廓像素点并排序; 最后, 对具有一定方向的缺陷轮廓分别采用欧氏距离法和格林公式对缺陷的周长和面积进行定量估算。实验结果表明: 该方法对缺陷大小进行定量估算的可行性, 且数字细节增强技术可在一定程度上提高脉冲热成像检测系统的缺陷探测水平。

关键词: 脉冲热成像; 数字细节增强; 多阈值最大熵; 缺陷测量

中图分类号: TP274 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1104005

Application of digital detail enhancement technology in pulsed thermography NDT

Xu Chao, Chen Yihe

(Key Laboratory of Photo-electronic Imaging Technology and System, Ministry of Education, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Pulsed thermographic image has the disadvantages of low-contrast, fuzzy-edge, and non-uniformity of illumination for the defect detection, thus, a defect determination method which combines digital detail enhancement (DDE) technology with maximum entropy multi-threshold segmentation method was proposed for the improvement of pulsed thermographic image. Firstly, the contrast between defects and the background was improved significantly after the image was processed with digital detail enhancement algorithm optimized with adaptive contrast enhancement (ACE) algorithm, and reducing the influence of illuminative non-uniformity on defect recognition. Secondly, the target defects with maximum entropy multi-threshold segmentation method optimized with genetic algorithm, and the contours of each defect with eight neighborhood method to get the contour pixels in a certain sequence. Finally, based on the sequential contour pixels, the perimeter and the area of each defect could be estimated respectively with Euclidean distances formula and Green's theorem. The experimental result shows that this method is feasible to estimate defect size quantitatively, and digital detail enhancement

收稿日期: 2018-06-10; 修订日期: 2018-07-20

基金项目: 国防预研基金(40405030202); 光电成像技术与系统教育部重点实验室 2015 开放基金(2015OEIF04)

作者简介: 徐超(1979-), 男, 讲师, 博士, 主要从事光电图像处理和光电成像技术与系统方面的研究。Email: rockyxu@bit.edu.cn

technology could improve the defect detectability of pulsed thermographic system in a certain extent.

Key words: pulsed thermography; digital detail enhancement; multi-threshold maximum entropy; defect measurement

0 引言

近年来, 复合材料被广泛应用于航空航天及机械工程领域, 而复合材料在加工及使用过程中产生的孔隙、脱粘、积水等各种内部缺陷将严重影响材料及设备的使用寿命, 因此无损检测技术的进步对于航空航天及机械工程等领域的发展显得尤为重要。随着红外技术的发展, 主动热成像无损检测技术因其可靠、快速、大范围、高灵敏度、非入侵性等优点, 尤为适合作为复合材料内部缺陷的检测方法。

脉冲热成像是主动热成像无损检测技术的分支, 该技术依据材料缺陷处与非缺陷处传热特性不同的特点, 通过外加激励使材料表面在缺陷处及非缺陷处形成温差, 再利用红外热成像技术将材料表面红外辐射变化过程转化为温度场图像序列。在温度场图像序列中不仅包含了缺陷的位置、几何信息, 而且隐藏着缺陷的深度信息及材料的固有特征信息, 因此可以通过对温度场图像的分析实现对材料内部缺陷的定性检测和定量测量。近年来, 国内外针对主动热成像技术中的缺陷定量测量方法提出了许多新的思路, 并取得了很好的检测效果^[1-3]。

脉冲热成像无损检测是基于红外成像的检测技术, 而红外检测图像普遍有对比度低、噪声复杂、边缘细节模糊的缺点。同时由于横向热扩散的影响, 缺陷检测结果与缺陷目标的实际特性存在偏差, 从而影响检测人员对缺陷的判断, 降低系统检测能力。因此寻找一种能有效并准确地检测出材料内部缺陷特征的方法是脉冲热成像无损检测技术的研究重点。

针对以上问题, 文中从红外图像的特点出发, 提出一种应用于脉冲热成像的缺陷几何大小定量估算方法, 即通过将数字细节增强 (Digital Detail Enhancement, DDE) 技术引入到脉冲热成像红外检测图像序列的预处理中, 以增强缺陷目标与背景的对比度, 以及检测目标自身细微结构的对比度。然后采用遗传算法优化的多阈值最大熵分割方法对经过预处理的红外检测图像进行缺陷目标提取, 再利用面内几何

测量原理实现对材料内部缺陷几何特征的定性检测与定量估算, 从一定程度上提升了系统的缺陷检测能力。

1 原理与方法

1.1 双边滤波原理

双边滤波 (Bilateral Filter, BF) 是结合了由像素间空间距离决定的空域滤波与由像素强度差值决定的值域滤波的双重滤波器。因此, 经过双边滤波提取的基图像信息, 不仅包括了大范围 (低频) 强度变化的信息, 而且包括了具有很强局部对比度或其他不需要进行很强程度增强的细节信息^[4]。双边滤波的原理如公式(1)所示:

$$f_{BF}(x, y) = \frac{1}{k(x, y)} \sum_{x', y'} s(x-x', y-y') \cdot g[f_{IN}(x', y') - f_{IN}(x, y)] \cdot f_{IN}(x', y') \quad (1)$$

式中: (x, y) 为空间滤波窗口中心点的像素坐标; (x', y') 为 (x, y) 的邻域坐标; $f_{BF}(x, y)$ 为输入图像灰度 $f_{IN}(x, y)$ 经过双边滤波后的输出灰度值; $k(x, y)$ 为归一化因子。

定义如公式(2)所示:

$$k(x, y) = \sum_{x', y'} s(x-x', y-y') \cdot g[f_{IN}(x', y') - f_{IN}(x, y)] \quad (2)$$

式中: $s(x, y)$ 为一种线性的空域低通滤波函数, 是由滤波窗口中心像素点 (x, y) 与邻域像素点 (x', y') 间的像素空间距离决定的空域权重值计算函数, 在文中取标准高斯滤波函数, 如公式(3)所示:

$$s(x, y) = \exp \left\{ -\frac{(x'-x)^2 + (y'-y)^2}{2\sigma_s^2} \right\} \quad (3)$$

$g(\alpha)$ 是一个值域低通滤波函数 (如高斯函数), 是由空间滤波窗口内像素点 (x', y') 与 (x, y) 的像素强度差值 $f_{IN}(x', y') - f_{IN}(x, y)$ 决定的权重值, 文中 $g(\alpha)$ 取标准高斯函数, 如公式(4)所示:

$$g(f(x', y') - f(x, y)) = \exp \left\{ -\frac{[f_{IN}(x', y') - f_{IN}(x, y)]^2}{2\sigma_g^2} \right\} \quad (4)$$

由上式可知,当像素灰度差值很小时 $g[f_{IN}(x', y') - f_{IN}(x, y)] \approx 1$, 像素灰度差值很大时 $g[f_{IN}(x', y') - f_{IN}(x, y)] \approx 0$, 从而通过值域滤波函数对一些明显的边缘细节信息进行补偿限制, 而强度剧烈变化的灰度信息则被滤除。换言之, 双边滤波仅对具有相似灰度值的像素点进行传统的低通滤波操作, 从而在双边滤波之后的输出图像中平滑了灰度值均匀变化的背景区域, 并且保留了图像边缘、小目标等细节信息。

1.2 最大熵阈值分割原理

信息熵是衡量信息不确定度的物理量, 其定义为信息源中所有随机变量 X_0, X_1, \dots, X_{n-1} (对应概率分别为 p_0, p_1, \dots, p_{n-1}) 自信息量的数学期望, 如公式(5)所示^[5]:

$$H(x) = - \sum_{i=0}^{n-1} p_i \log p_i \quad (5)$$

信息熵的概念应用于图像分割领域, 其目的在于使分割后图像整体信息量最大化。因此对于最大灰度级为 $L-1$ 的图像, 取阈值 t 将图像分为背景区域(各灰度级概率为 $\frac{P_0}{P_t}, \frac{P_1}{P_t}, \dots, \frac{P_t}{P_t}$) 和目标区域(各灰度级概率为 $\frac{P_{t+1}}{1-P_t}, \frac{P_{t+2}}{1-P_t}, \dots, \frac{P_{L-1}}{1-P_t}$), 其中 $P_t = \sum_{i=0}^t p_i$ ($0 \leq t < L-1$), 则分割后图像整体的信息熵函数如公式(6)所示:

$$H(t) = - \sum_{i=0}^t \frac{p_i}{P_t} \ln \frac{p_i}{P_t} - \sum_{i=t+1}^{L-1} \frac{p_i}{1-P_t} \ln \frac{p_i}{1-P_t} \quad (6)$$

如公式(7)所示, 当 $H(t)$ 最大时, t^* 为最佳阈值:

$$t^* = \arg \max_{0 \leq t < L-1} \{H(t)\} \quad (7)$$

2 DDE 与多阈值最大熵结合的缺陷定量估算方法

2.1 基于 DDE 技术的红外图像预处理

14 位红外图像通常具有很高的动态范围以及很多场景中的细节信息, 由于场景中温差目标(大范围的小深度缺陷)的存在, 使得小温差目标(如缺陷边缘、深层缺陷)在整个场景中并不占优势。因此在将 14 位图像压缩到 8 位进行观察的过程中会丢失许多缺陷细节信息, 影响检测效果, 从而导致系统检测能力的降低。而数字细节增强技术在将场景中

大动态信息进行压缩的同时, 可以保护小动态的细节信息不被过分压缩以致丢失。

数字细节增强技术的原理是通过滤波将小动态的高频细节图像与低频基图像分离开来, 再分别进行增强和压缩处理^[6]。文中的数字细节增强技术是基于双边滤波的方法分离图像中的高低频信息。

数字细节增强技术的整体实现流程如图 1 所示。原始图像经双边滤波后得到 $f_{BF}(x, y)$ 的为与原图

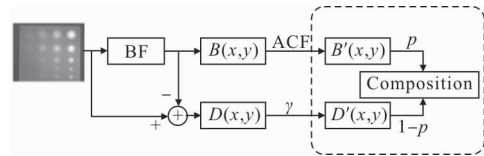


图 1 数字细节增强技术实现流程图

Fig.1 Processing procedure of digital detail enhancement technology

像相似的低频背景图像, 称基图像, 记为 $B(x, y)$ 。原图像中的高频细节图像 $D(x, y)$ 由公式(8)获得:

$$D(x, y) = f_{IN}(x, y) - B(x, y) \quad (8)$$

当背景基图像与细节图像被提取出来后, 分别采用自动对比度增强 (Adaptive Contrast Enhancement, ACE)^[7] 和 γ 变换的方法对其进行增强并压缩至合适的输出范围。然后引入权重系数 p 将增强压缩后具有互补信息的基图像与细节图像按照公式(9)所示方法加权合成至输出范围。

$$f_{out}(x, y) = p \cdot D'(x, y) + (1-p) \cdot B'(x, y) \quad (0 < p < 1) \quad (9)$$

式中: $f_{out}(x, y)$ 即为重新融合了背景与细节信息的最终输出的 8 位图像。

2.2 缺陷阈值分割

图像分割是图像测量的基础, 对图像面内几何测量具有重要的意义。而由于检测的缺陷目标形态各异、深度不一, 同时脉冲热成像法无损检测通常存在照明不均匀的问题, 通过单阈值的分割方法通常不能取得理想的效果, 因此需采用不同的阈值以满足同时检测不同深度或不同背景下缺陷的需求, 因此将最大熵单阈值分割方法推广到多阈值情况。

假设选取 n 个阈值 t_1, t_2, \dots, t_n ($0 \leq t_1 < t_2 < \dots < t_n < L-1$), 将最大灰度级为 $L-1$ 的图像分为 $n+1$ 区域, 各区域灰度级概率分别为: $\left\{ \frac{P_0}{P_{t_1}}, \frac{P_1}{P_{t_1}}, \dots, \frac{P_{t_1}}{P_{t_1}} \right\}$,

$$\left\{ \frac{P_{t_1+1}}{P_{t_1}}, \frac{P_{t_1+2}}{P_{t_1}}, \dots, \frac{P_{t_1}}{P_{t_1}} \right\}, \dots, \left\{ \frac{P_{t_2+1}}{1 - \sum_{i=0}^{t_2} P_{t_1}}, \frac{P_{t_2+2}}{1 - \sum_{i=0}^{t_2} P_{t_1}}, \dots, \frac{P_{t_2}}{1 - \sum_{i=0}^{t_2} P_{t_1}} \right\},$$

则图像整体信息熵为各区域信息熵之和^[8]如公式(10)所示:

$$H(t_1, t_2, \dots, t_n) = - \sum_{i=0}^{t_1} \frac{P_i}{P_{t_1}} \ln \frac{P_i}{P_{t_1}} - \sum_{i=t_1+1}^{t_2} \frac{P_i}{1 - \sum_{i=0}^{t_1} P_{t_1}} \ln \frac{P_i}{1 - \sum_{i=0}^{t_1} P_{t_1}} - \dots - \sum_{i=t_{n-1}+1}^{L-1} \left| \frac{P_i}{1 - \sum_{i=1}^{t_{n-1}} P_{t_i}} \right| \ln \frac{P_i}{1 - \sum_{i=1}^{t_{n-1}} P_{t_i}} \quad (10)$$

式中: $P_{t_1} = \sum_{i=0}^{t_1} p_i$; $P_{t_2} = \sum_{i=t_1+1}^{t_2} p_i$, \dots ; $P_{t_n} = \sum_{i=t_{n-1}+1}^{L-1} p_i$; $0 \leq t_1 < t_2 < \dots < t_n < L-1$ 。

各最佳阈值使得总信息熵 $H(t_1, t_2, \dots, t_n)$ 最大, 即:

$$(t_1^*, t_2^*, \dots, t_n^*) = \operatorname{argmax}_{0 \leq t_1 < t_2 < \dots < t_n < L-1} \{H(t_1, t_2, \dots, t_n)\} \quad (11)$$

考虑到在多阈值选取中, 迭代过程计算量大速度较慢, 采用遗传算法对搜索过程进行优化, 提升计算速度, 遗传算法优化的多阈值最大熵图像分割的流程如图 2 所示。

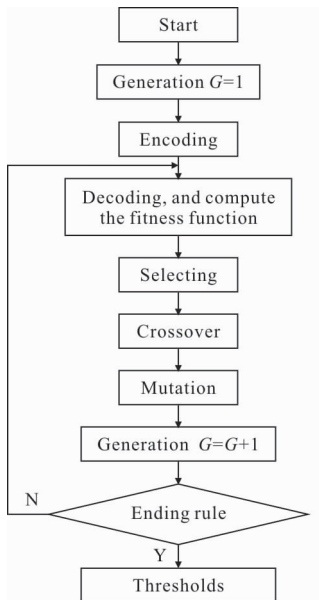


图 2 遗传算法优化的多阈值最大熵图像分割流程

Fig.2 Image segmentation procedure of multi-threshold method using maximum entropy optimized with genetic algorithm

将每一个灰度分割阈值作为一个染色体进行二进制编码, 并设置一定的种群规模和最大进化代数

分别作为初始群体和终止条件, 并计算群体中每个个体的适应度, 适应度函数如公式(10)所示, 然后通过选择、交叉和变异操作得到下一代群体, 当满足终止条件时, 群体中具有最大适应度的个体为最优解输出, 并以此作为阈值进行图像分割。

2.3 轮廓提取及定量估算

对检测图像进行多阈值分割后, 采用八邻域的方法对缺陷轮廓进行跟踪, 实现缺陷轮廓识别和轮廓像素点提取, 得到封闭的边缘, 并对提取出的轮廓像素按一定的方向进行排序。八邻域法的处理流程如图 3 所示。

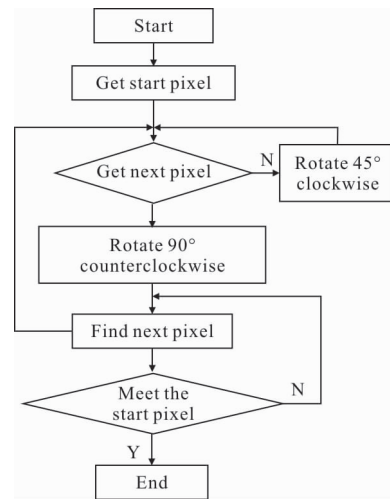


图 3 八邻域法轮廓跟踪流程图

Fig.3 Processing procedure of eight neighborhood contour tracking method

传统的基于图像的几何测量通常采用像素累加的方法, 将检测到的轮廓像素累加乘以系数得到目标周长, 或将区域像素累加乘以系数得到目标面积。但是考虑到缺陷几何属性的计算精度受到图像分辨率及缺陷提取算法精度的影响, 在文中采用欧式距离公式(公式(12))及格林公式(公式(13))分别对缺陷的像素周长和像素面积进行计算^[9]。

$$L = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (12)$$

$$S = \oint x dy - y dx \quad (13)$$

离散化的格林公式如公式(14)所示:

$$S = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (x_i (y_{i+1} - y_i) - y_i (x_{i+1} - x_i)) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (x_i y_{i+1} - y_i x_{i+1}) \quad (14)$$

对计算得到的缺陷像素周长和像素面积乘以相应的计算系数即得到缺陷周长和面积，实现对缺陷实际大小的估算。

为测量得到缺陷实际尺寸，首先对热成像系统的几何测量系数进行标定，得到单位像素对应物平面的实际尺寸，然后以此作为系数对缺陷的像素周长和像素面积进行换算。

3 实验方案与评价方法

3.1 实验方案

实验对象为 7 mm 厚的玻璃纤维增强环氧树脂板，背面由右至左加工有 4 列深度分别为 4、3、2、1 mm 的不同大小的平底洞作为模拟缺陷，图 4 所示为试件结构示意图及实物图。

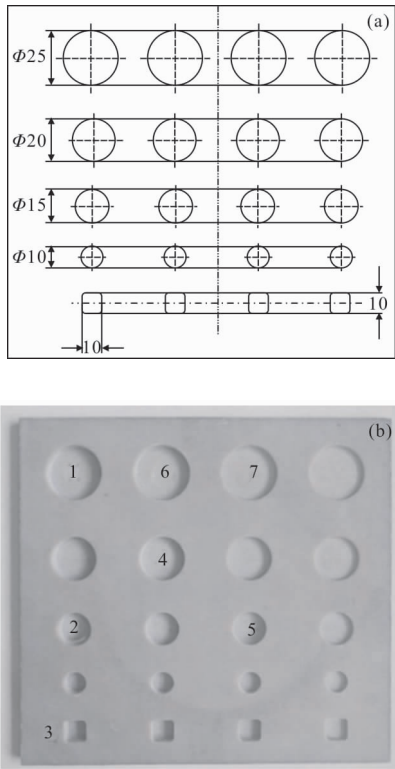


图 4 实验试件结构图(a)与实物图(b)

Fig.4 Structure diagram of experimental specimen (a) and picture of the experimental specimen(b)

实验设备采用两个最大输出功率 1 kW 的卤素灯作为激励源，以及实验室自主研发的热像仪作为图像采集设备。热像仪基于中波制冷型 320×256 红外焦平面探测器，性能指标如表 1 所示。

表 1 热像仪性能指标

Tab.1 Performance index of thermal imaging system

Parameter	Specification
Pixel pitch/ μm	30 × 30
Spectral response/ μm	3.7–4.8
Operating temperature	90 k typical
Signal output	1 or 4
Window modes	320×256
Pixel output rate	Up to 6.6 MHz per output
Frame rate	Up to 320 Hz full frame rate
Average NETD/km	8

此次实验过程中采用长脉冲对试件进行激励，激励功率 2 kW，激励加载时间 40 s，采集时间 80 s，热像仪采集频率为 50 Hz。

3.2 评价方法

文中采用缺陷图像视觉效果评价与缺陷定量检测能力评价结合的方法对系统的检测效果进行评价。

对图像视觉效果的评价采用对比度信噪比 (Contrast to Noise Ratio, CNR) 作为评价标准^[10]。对比度信噪比提供了一个目标区域与背景区域相对差异的属性值，其定义如公式(15)所示：

$$\text{CNR} = \frac{\mu_{ROI} - \mu_{BG}}{\left[\omega_{ROI} \sigma_{ROI}^2 + \omega_{BG} \sigma_{BG}^2 \right]^{1/2}} \quad (15)$$

式中： μ_{BG} 与 μ_{ROI} 分别为背景区域与目标缺陷区域的灰度平均值； σ_{ROI} 与 σ_{BG} 分别为目标区域与背景区域的标准差。

由于目标区域与背景区域面积不同，需要引入目标区域噪声权重值与背景区域噪声权重值。噪声权重值表示某区域噪声对整体区域噪声的贡献值，其定义如公式(16)、(17)所示：

$$\omega_{ROI} = S_{ROI} / (S_{ROI} + S_{BG}) \quad (16)$$

$$\omega_{BG} = S_{BG} / (S_{ROI} + S_{BG}) \quad (17)$$

式中： ω_{ROI} 为目标噪声权重； ω_{BG} 为背景噪声权重； S_{ROI} 与 S_{BG} 分别为目标与背景区域的面积。

对于系统的缺陷检测能力采用缺陷几何特征的估算误差作为评价标准。其中缺陷几何特征选取缺陷面积及缺陷周长两个方面作为评价对象。

4 实验结果与讨论

4.1 图像预处理

如图 5(a)所示为实验得到的原始红外检测图像的 AGC 处理显示结果, 由图中可以看出检测图像对比度较低、边缘细节模糊, 并且由于外部激励原因图像动态范围较大, 较深层的缺陷反应在表面的温差在整个温度场范围内并不占优势。因此首先采用 DDE 的方法对原始红外检测图像进行预处理, 以提升缺陷边缘清晰度以及深层缺陷与背景间的对比度。

在 DDE 处理过程中, 对双边滤波后获得的背景和细节图像分别采用 γ 变换及 ACE 的方法进行增强处理, 最后选取权重系数 $p=0.5$ 对增强后的两幅图像进行合成, 处理结果如图 5(c)所示。在预处理前可以检测到深度 4 mm 直径 20 mm 的缺陷, 经 DDE 处理后的检测图像可以清晰观察到深度 4 mm 直径 10 mm 的缺陷, 并且可以清晰观察到深度为

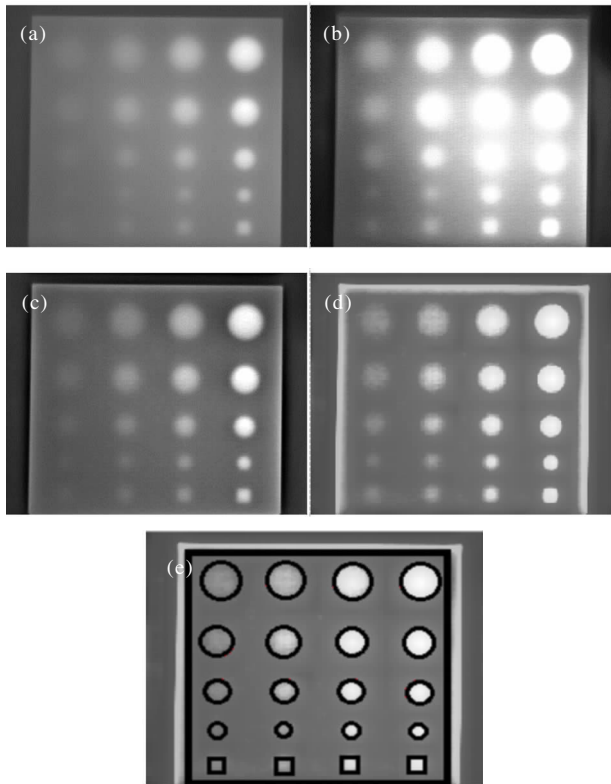


图 5 原始 AGC 检测图像(a), 直方图均衡图像(b)、同态滤波图像(c)和 DDE 增强图像(d), 及目标、背景区域选择示意图(e)

Fig.5 Original AGC image (a) and image enhanced by PHE (b), Homomorphic filter(c) and DDE(c), and a sketch of target area and background area (e)

1 mm 及 2 mm 的小缺陷目标的几何形状信息, 提升了缺陷边缘对比度。并且通过与 AGC(图 5(a))、直方图均衡(PHE, 图 5(b))及同态滤波(Homomorphic Filter, 图 5(c))效果的比较可以看出, DDE 的方法可以在提升缺陷与背景之间的对比度的同时, 减小不均匀照明影响, 在一定程度上提高了脉冲热成像检测系统的缺陷探测水平。脉冲热成像中的不均匀照明是由于辐照不均匀或材料表面发射率不均匀造成的材料表面热辐射不均匀性, 难以通过图像处理的方法进行补偿或消除, 但可以通过图像后处理的方法显著提高缺陷与背景的差异性, 即提高对比度和信噪比, 减弱照明不均匀性对缺陷识别与判定的影响。

为了量化预处理对检测图像效果的提升程度, 使用对比度信噪比作为评价指标对预处理前后的图像对比度及噪声情况进行整体评价。在对比度信噪比的计算过程中, 如图 5(e)所示, 将理想的实际缺陷区域作为目标区域, 目标区域外部至试件边缘粗黑矩形框内为背景区域。对比度信噪比的计算结果如表 2 所示。

表 2 各处理方法的对比度信噪比

Tab.2 CNR for image processing methods

Method	CNR
AGC	1.92
PHE	1.07
Homomorphic filter	2.56
DDE	3.18

通过对三种增强方法处理后的图像 CNR 的计算可知, DDE 的 CNR 最大, 可以有效增强缺陷与背景间对比度, 提升图像质量; 直方图均衡化的 CNR 最小, 并且会放大不均匀照明的影响, 并不适合作为脉冲热成像检测图像的增强处理方法。

4.2 缺陷轮廓提取与识别

对预处理后的检测图像采用遗传算法优化的最大熵阈值分割算法进行缺陷目标提取, 提取过程中采用多阈值以适应同一检测对象中存在不同深度缺陷的检测需求。

图 6 为对 DDE 与几种传统方法处理后的图像分别进行多阈值分割的效果, 由图中可以看到经过 DDE 预处理后的检测图像(图 6(c))在对比度与信噪比方面都有所提升, 可以通过多阈值分割的方法检

测到试件上的所有缺陷。同时由于 DDE 的方法可以有效提升目标边缘对比度，因此同时提升了试件边缘与背景间对比度，在阈值分割中提取试件边缘可以直接体现缺陷在试件上的相对位置。并且通过对比可知，DDE 的方法在一定程度上平衡了动态范围，降低了照明不均匀问题对检测效果的影响，从而提升了对缺陷目标的提取精度。

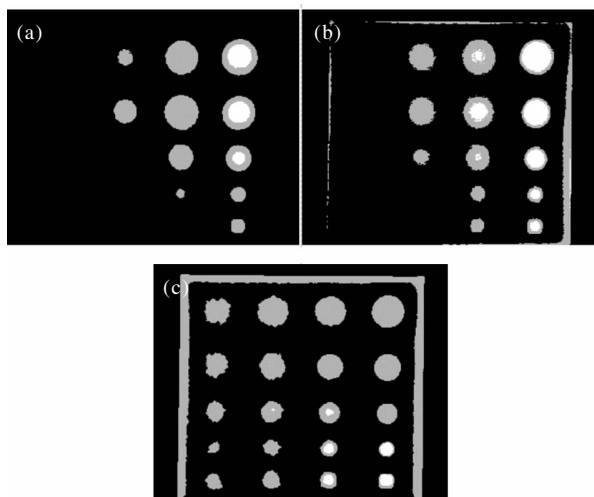


图 6 原始 AGC 图像(a)同态滤波后图像(b)和 DDE 图像(c)的多阈值分割结果

Fig.6 Multithresholding result of original AGC image (a), homomorphic-filtered image (b) and DDE (c) image

算奠定了良好的基础。如图 4(b)所示，为验证文中方法在整个试件平面上的缺陷检测能力，对深度为 1~3 mm 的 3 列缺陷分别在横向、纵向和对角线 3 个方向对缺陷区域进行采样，编号 1~7，并对其大小进行估算。受激励能量和红外探测器分辨率的制约，第 4 列 4 mm 深的缺陷设计作为系统缺陷探测能力和算法处理效果的参考，不用于定量分析。

在定量估算之前首先采用八邻域的方法对各缺陷轮廓进行跟踪，分别得到各区域像素及顺序，各目标缺陷区域的轮廓如图 7 所示。再对按顺序排列的各缺陷区域轮廓像素点应用欧氏距离公式及格林公式，计算得到各缺陷区域的像素周长和像素面积。在文中实验条件下对探测器的几何测量系数进行标定，得到像素长度计算系数为 0.740 mm/pixel，像素面积计算系数为 0.547 mm²/pixel，由此可估算各目标缺陷的实际周长和实际面积。1~7 号缺陷区域的像素测量值及实际估算值如表 3 所示。

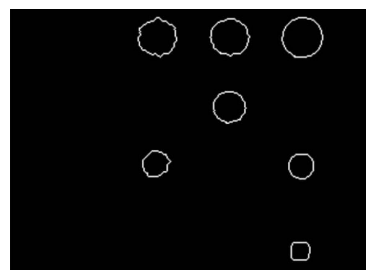


图 7 部分缺陷轮廓图

Fig.7 Contours of defect samples

4.3 缺陷定量估算

缺陷目标提取精度的提高为缺陷大小的定量估

表 3 缺陷大小定量估算结果

Tab.3 Quantitative estimation results of defect sizes

Defect	Geometric feature	Estimation/pixel	Estimation	Real value	Error
1	Perimeter/mm	114.57	84.73	78.54	7.88%
	Area/mm ²	927	507.08	490.87	3.30%
2	Perimeter/mm	71.11	52.60	47.12	11.63%
	Area/mm ²	363	198.56	176.71	12.36%
3	Perimeter/mm	56.14	41.52	40	3.8%
	Area/mm ²	222	121.44	100	21.44%
4	Perimeter/mm	93.25	68.97	62.83	9.77%
	Area/mm ²	571	312.34	314.16	0.58%
5	Perimeter/mm	76.18	56.35	47.12	19.59%
	Area/mm ²	381.50	208.68	176.71	18.09%
6	Perimeter/mm	109.15	80.73	78.54	2.79%
	Area/mm ²	799.5	437.33	490.87	10.9%
7	Perimeter/mm	113.88	84.23	78.54	7.24%
	Area/mm ²	796	435.42	490.87	11.2%

由实验结果可知,该方法对实验试件缺陷周长的估算精度在 20% 以下,对缺陷面积的估算精度在 22% 以下。并且对于相同范围的缺陷,缺陷深度越小,对其实际面积的估算误差越小。由于基于像素的图像几何测量方法受图像分辨率和噪声的影响较大,因此对于较小范围的缺陷采用更高分辨率的红外探测器可以提高缺陷大小的估算精度。

5 结 论

文中针对脉冲热成像法红外检测图像对比度低、缺陷目标边缘模糊、受不均匀照明影响大的问题,提出一种对缺陷大小的定量估算方法。首先使用 DDE 与 ACE 结合的方法对红外检测图像预处理,在提高缺陷目标与背景之间对比度的同时对缺陷轮廓进行增强,经由对比度信噪比这一指标进行评价后证明,该方法相对于传统红外图像增强方法在目标-背景对比度与信噪比方面有更好的综合属性;然后采用遗传算法优化的多阈值最大熵方法提取缺陷目标,提升小目标缺陷的分割精度并提高多阈值迭代的计算速度;接着采用八邻域的方法分别提取各缺陷样本轮廓,并基于缺陷轮廓像素点分别使用欧氏距离公式和格林公式估算缺陷周长和面积。实验结果显示,该方法对实验试件缺陷周长的估算精度在 20% 以下,对缺陷面积的估算精度在 22% 以下。缺陷深度越小,红外热像仪的分辨率越高,估算精度越高。

参考文献:

- [1] Liu Tao, Li Yongfeng, Huang Wei. Application of BP neural network to quantitative identification in thermal wave NDT [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2304-2310. (in Chinese)
刘涛, 李永峰, 黄威. BP 神经网络在红外热波无损检测定量识别中的应用 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(9): 2304-2310.
- [2] Liu J, Tang Q, Yang W, et al. Defects' geometric feature recognition based on infrared image edge detection [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, 67(4): 387-390.
- [3] Song Yuanjia, Zhang Wei, Wang Dongdong, et al. Defect quantitative identification and image reconstruction based on thermal wave inspection [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2012, 2(5): 39-46. (in Chinese)
宋远佳, 张伟, 王冬冬, 等. 热波检测缺陷定量识别与图像重建研究[J]. 材料工程, 2012, 2(5): 39-46.
- [4] Branchitta F, Diani M, Romagnoli M. New technique for the visualization of high dynamic range infrared images[J]. *Optical Engineering*, 2009, 48(9): 6401.
- [5] Kapur J N, Sahoo P K, Wong A K C. A new method for gray-level picture thresholding using the entropy of the histogram [J]. *Computer Vision Graphics & Image Processing*, 1985, 29(3): 273-285.
- [6] Jin Minglei, Fan Yongjie, Jin Weiqi, et al. Adaptive smoothing and dynamic range partitioning compression algorithm for IRFPA and hardware implementation [J]. *Optical Technique*, 2013, 39(2): 163-167. (in Chinese)
金明磊, 范永杰, 金伟其, 等. IRFPA 的自适应细节增强算法及其硬件实现[J]. 光学技术, 2013, 39(2): 163-167.
- [7] Zhang A F, Jiang D. Adaptive contrast enhancement by a Gaussian function of local standard deviation [J]. *Image Matching & Analysis*, 2001: 7-11.
- [8] Wang Xiaohong, Xu Wenbo. Study on maximum entropy multilevel threshold segmentation based on genetic algorithm [J]. *Journal of Guizhou University*, 2007, 24(4): 401-403. (in Chinese)
汪筱红, 须文波. 遗传算法在最大熵多阈值分割的应用研究[J]. 贵州大学学报, 2007, 24(4): 401-403.
- [9] Feng Yanming. The special-shape parts geometric dimension shape parts geometric dimension measurement and defect detection based on image processing technology [D]. Hengyang: University of South China, 2015. (in Chinese)
冯彦铭. 基于图像处理技术的异形件几何尺寸测量及缺陷检测[D]. 衡阳: 南华大学, 2015.
- [10] Song X, Pogue B W, Jiang S, et al. Automated region detection based on the contrast-to-noise ratio in near-infrared tomography [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(5): 1053-1062.