文章编号:1001-5078(2015)05-0584-05

图像与信号处理。

# 红外热波无损检测图像噪声分析与抑制

王冬冬,田干,杨正伟,陶胜杰,张 炜 (第二炮兵工程大学,陕西西安710025)

**摘** 要:分析了红外热波检测图像中噪声生成机理,针对图像的噪声去除增强问题,提出了一种改进的非线性偏微分方程的热波检测图像去噪增强方法。对偏微分方程在图像处理应用中的理论基础进行研究,针对现有的偏微分方程模型在图像去噪中存在的问题,并结合热波图像的特点,改进相应的偏微分方程数学模型,在此基础上对获得原始热图进行编程处理,试验结果表明:经过处理后的图像信噪比提高,对比度得到了改善,为后续的缺陷提取及损伤识别奠定了基础。

关键词:红外热波无损检测;红外热图;图像去噪;偏微分方程 中图分类号:TP391 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2015.05.024

# Analysis and suppression of image noise for infrared thermal wave non-destructive testing

WANG Dong-dong, TIAN Gan, YANG Zheng-wei, TAO Sheng-jie, ZHANG Wei (The Second Artillery Engineer University, Xi'an 710025, China)

Abstract: The noise mechanism of infrared thermal wave non-destructive testing is analyzed. In order to suppress the noise and enhance the image, a new image denoising algorithm for infrared thermal wave NDT based on the improved nonlinear partial differential equation (PDE) is proposed. Firstly, the theoretical basis of PDE for image processing was studied. To solve the existing problems of the PDE in image processing, and combined the characteristics of the thermal wave images, the mathematical model of PDE was improved, and then the original infrared image was processed by programming. The results show that the SNR of image and the contrast are improved, which lays a foundation for the defect extraction and damage identification.

Key words: infrared thermal wave non-destructive testing; thermo grams; image denoising; partial differential equation

### 1 引 言

红外热波无损检测是一种新型的无损检测技术,该方法通过对被检测对象施加主动的热激励 (如高能脉冲闪光灯激励、超声热激励等),然后通 过红外热像仪采集试件表面的温度变化信息,将结 构中的损伤或缺陷信息通过热图序列的形式表现出 来。该方法因其速度快、非接触、直观显示、能够在 线在役检测等优点,获得了广泛的应用。然而从试 验中获取的原始热图序列,因为试件表面不均匀、红 外热像仪的成像探测器及环境等因素的影响使得原 始热图中存在强烈的噪声,降低了热波图像的质 量<sup>[1]</sup>,严重影响后续对结构中损伤或缺陷的定量分 析。因此,对红外热波检测图像中噪声的分析和处 理,以增强图像对比度就成了红外热波检测技术的 重要研究内容。

目前,对红外热波图像的去噪增强处理已有大

**基金项目:**国家自然科学基金项目(No. 51305447)资助;陕西省自然科学基金项目(No. 2013JM7021)资助。 作者简介: 王冬冬(1986 – ),男,博士研究生,主要研究方向为红外热波无损检测。E-mail:wd286478419@126.com 收稿日期:2014-10-22;修订日期:2014-11-20

量的研究<sup>[1-6]</sup>。除将传统机器视觉中的相关方法引 入到热波图像处理中,还针对热波图像的特点发展 了相应的去噪增强算法。本文针对获取的红外热波 原始图像中存在的高噪声、低对比度等问题,为了改 善热波图像的噪声抑制效果,在分析热波图像中噪 声的基础上,将偏微分方程方法引入到热波图像的 去噪处理中。偏微分方程方法因具有高度的灵活性 及较强的局部自适应性<sup>[7]</sup>,能够在去除图像噪声的 同时,有效地保持图像中非噪声信号的细节<sup>[8]</sup>,显 著提高图像中目标与背景的对比度。相应的试验结 果表明:无论是从视觉效果还是客观的评价指标,本 文所提出的算法均具有较好的噪声抑制效果。

#### 2 热波检测图像噪声分析

热波检测技术获得的图像代表了被检测对象表 面温度分布信息,这为后续对被测对象进行损伤识 别与评估提供了重要的信息。但是热波成像的机理 决定了热波图像的信噪比、灰度及纹理等信息,使得 获取的热波图像质量受到一定的影响。如果在原始 热图上对结构中的损伤进行提取和识别,将严重影 响识别的精度和准确性,对损伤的预测和评估产生 严重的干扰。因此,在对后续研究进行之前必须对 获得的热图中的噪声进行分析和处理,以保证后续 研究内容的精度和准确性。热波检测技术的原理如 图1 所示。



图 1 热波检测技术的基本原理

Fig. 1 Fundamental principle of infrared thermography

从上述热波检测技术获取热图的过程中可知, 热图中的噪声主要来源于被测结构表面情况的干 扰、环境干扰及热像仪获取图像的过程中。红外热 波图像反映的是被测对象中损伤区域与完好区域向 外界发射红外辐射能量之间的差异。因此,被检测 对象表面的特性(包括表面的光洁度及颜色等)将 引起被测对象在主动加热过程中对热量的吸收不 等,从而导致物体向外的红外辐射能力不同,造成获 取的热波图像中存在一定的噪声干扰;在试验过程 中,环境温湿度、操作人员的相关操作动作等都将引 起一定的干扰量,从而导致采集到的热波图像中存 在相应的干扰量,引起图像质量的下降;试验过程中 采用的红外热像仪与普通的可见光成像设备不同, 红外成像元件存在光敏响应非均匀的特点<sup>[9]</sup>,特别 是个别的光敏元件还存在哑元的可能,因此,红外热 像仪采集到的热波图像存在多种复杂的噪声干扰。

从上述的分析可以看出,热图序列中的噪声在 图像采集的过程中是不可避免的,噪声的存在严重 降低了热图像的可视性和质量,因此,必须对获取的 热图像进行去噪增强处理,以提高图像中损伤区域 与背景区域的对比度,为损伤的提取和识别奠定 基础。

#### 3 偏微分方程用于图像去噪的理论基础

偏微分方程方法用于图像处理的研究是从高斯 滤波器引入的<sup>[10]</sup>。相关的研究表明多数的局部滤 波器在使用时均可以转换为相应的微分算子进行运 算,对于微分方程在图像处理中的应用来说,应用最 为广泛的是热扩散方程。其相应的物理模型为:一 个局部被加热的物体,随着加热过程的持续,物体本 身吸收到的热量会慢慢扩散,直至整个物体的温度 达到一致。将该模型应用到图像去噪过程中,就好 比将图像中的噪声进行扩散使整个图像的灰度达到 一致<sup>[11]</sup>,从而使图像中的噪声得以消除。

利用 I(x,y) 表示待处理的原始图像, I(x,y,t)表示时间 t 时刻的扩散图像, 忽略计算过程中无关 紧要 的 常数, 可 得 图 像 的 线 性 扩 散 偏 微 分 方 程为<sup>[7]</sup>:

$$\frac{\partial I(x, y, t)}{\partial t} = div(\nabla I) = \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I}{\partial y^2}$$
(1)

通过傅里叶变换,可得式(1)的解为:

$$I(x, y, t) = I(x, y) * G_t(x, y)$$
(2)

式中:

$$G_t(x,y) = \frac{1}{4\pi t} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{4t}\right)$$

*G<sub>i</sub>(x,y)* 表示中心在坐标原点的二维高斯函数。从上述的分析可见,对图像进行扩散即为计算 原始图像与高斯函数的卷积,实际上就是采用传统 的高斯滤波器对图像进行滤波处理。

# 4 基于改进的非线性扩散偏微分方程的热波检测 图像去噪增强

在使用热扩散偏微分方程对图像进行处理时, 是沿着图像中所有的方向进行滤波的,因此在平滑 图像的同时,也破坏了图像中边缘等细节信息<sup>[12]</sup>。 为了同时达到去除噪声并保护边缘等细节信息的目 的,应该根据图像的内容在扩散过程中采用不同的 "热扩散系数",具体来说,就是将平滑的强度在边 缘的位置减弱,在非边缘区域增强;在平行于边缘的 方向进行平滑而在垂直于边缘的方向不进行平滑, 从而实现在去除噪声的同时较好的保持图像中的边 缘的细节信息<sup>[13]</sup>。为了实现上述目标,Perona 和 Malik于1990年对热扩散方程进行了改进,引入一 个具有单调递减的非负函数g(r),将由热扩散方程 推导得到的线性扩散偏微分方程(1)修改为:

$$\frac{\partial I(x, y, t)}{\partial t} = div[g(\nabla I)\nabla I]$$
(3)

公式(3)通常被称为 P – M 方程,其中 g(r)称 为边缘停止函数,简称为边缘函数。公式(3)中的 "热扩散系数"  $g(| \nabla I |)$ 依赖于演化过程中的图像 I(x,y,t),因此 P – M 方程属于非线性扩散偏微分 方程<sup>[14]</sup>。

在实际图像去噪增强的应用中,图像的边缘信 息无法预先得到,因此就需要构造出一个边缘函数 作为边缘点的估计,常用的边缘函数为:

$$g(r) = \frac{1}{1 + (r/K)^p}$$
  $p = 1,2$  (4)

式中,*K*是常数,它可控制边缘函数的下降速率。 在 P – M 方程中,常用的两种边缘函数为:

$$PM1: g(r) = \frac{1}{1 + \left(\frac{r}{K}\right)^2}$$
(5)

和

$$PM2: g(r) = \exp\left(-\left(\frac{r}{K}\right)^2\right)$$
(6)

在上述方程中,边缘函数的值越大扩散性越强, 合适的 K 值能够起到增强图像边缘的效果。公式 (5)和公式(6)的取值范围为 [0,1]。在 P – M 方 程中的两种边缘函数均是图像梯度的函数,随着图 像梯度的增加而单调下降。该方程虽然在抑制图像 噪声和增强图像边缘方面有了一定的改进,但当被 处理图像中的噪声程度较为强烈或图像的对比度较 低时,图像的梯度震荡较大,导致对图像的去噪增强 效果较差。为了解决这一问题,必须重新构造新的 边缘函数。

在参考文献[14]的基础上,对非线性扩散偏微 分方程的边缘函数进行如下改进:

$$g(r) = \begin{cases} [1 - (r/K)^2]^2, |r| \le K \\ 0, \text{ , 其他} \end{cases}$$
(7)

根据公式(7),针对不同的 K 值(分别取值为 K = 10,20,50)画出边缘函数与图像梯度的关系如 图2所示。



图 2 辺缘函数与图像种度之间的天示 Fig. 2 The relationship between edge function and image gradient

从图 2 边缘函数与图像梯度的关系可知,当梯 度值较小时,图像的扩散幅度较大,可以快速地滤除 图像中的噪声;随着梯度值的增加,扩散幅度逐渐减 小,知道边缘函数取值为0,这种趋势能够很好地保 留图像中的边缘等细节信息。为了改善本方法在图 像去噪增强中的实际应用效果,可以根据具体的被 处理对象,选用合适的常数 K 来控制边缘函数的下 降速率,从而取得较好的图像去噪效果。

从上述的理论分析,可得改进后方法在图像去 噪处理中应用流程如图3所示。



图 3 文中方法在图像去噪应用中的流程图 Fig. 3 The flow chart of this method in image denoising

#### 5 试验及结果分析

5.1 试验概述

针对复合材料脱粘损伤试件(如图4所示),采 用课题组自主研发的脉冲红外热波检测系统对试件 进行检测研究。检测系统中脉冲红外热像仪采用德 国 InfraTec 公司生产的 Vhr 680 非制冷性红外热像 仪,其光谱响应范围为 7.4 ~ 14 μm,可提供640 × 480 像素的热图像,热灵敏度为 0.04 ℃(30 ℃);脉 冲激励装置由两个高能氙灯提供,每个灯的最大激 励能量为4.8 kJ,激励脉冲宽度为0.2 ms。通过实 验得到的原始热图如图5所示。



图4 试件图 Fig. 4 Test specimen photo



图 5 热波检测原始热图 Fig. 5 Original thermal image of thermal wave testing

试件厚度为5 mm,其中预埋了三个利用聚四 氟乙烯模拟的脱粘缺陷,从得到的热图中可以观 察到三个亮斑,其分别对应预埋的三个缺陷。但 是原始热图中存在的噪声等干扰,降低了热图的 对比度。

5.2 结果处理分析

对试验中获取的原始热图采用上述提出的改进 算法进行去噪增强处理,并将处理结果与低通滤波 及传统的两种 P-M 边缘函数的处理结果进行对 比,得到的三种偏微分方程方法的边缘函数曲线如 图 6 所示,相关热图的去噪处理结果如图 7 所示。



图 6 边缘函数与图像梯度的关系(K=16) Fig. 6 The relationship between edge function and image gradient (K = 16)

从图 7 的处理结果中可以看出,经过改进的非 线性偏微分方程方法对热图的处理效果要优于低通

滤波及传统的两种 P-M 边缘函数的处理结果,为 了更好地说明方法的优劣性,采用如下定义的信噪 比(SNR)对方法的处理结果进行客观评价。

$$SNR = 10 \times \lg \frac{\sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} [I(i,j)]^{2}}{\sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} [I(i,j) - I'(i,j)]^{2}}$$

式中, I 表示待处理的原始热图; I' 表示去噪处理后 的热图; M 和 N 分别表示图像像素的长度和宽度。 信噪比越大,表明算法处理的效果越好。上述四种 方法处理后图像的信噪比如表1所示。





(a)文中改进算法处理结果 (a) results of presented method (b) results of low-pass filter

(b)低通滤波处理结果





(a)PM1 模型处理结果 (a) results of PM1 model

(b)PM2 模型处理结果 (b) results of PM2 model 图7 原始热图去噪增强结果

Fig. 7 Denoising and enhancement of original thermal image

表1 图像处理结果的信噪比

Tab. 1 SNR of image processing

算法	SNR
低通滤波	8. 5974
PM1 模型	3. 101
PM2 模型	8. 5153
文中改进的方法	9. 6806

从表1中的结果可知,改进后偏微分算法的 SNR 要优于其他三种方法,这也证明了文中改进算 法在热图去噪处理中的有效性。

#### 6 结 论

文中对红外热波检测图像的噪声进行了分析研 究,为了解决热波检测图像高噪声、低对比度等问 题,提出了一种改进的非线性偏微分方程方法。研 究了偏微分方程在图像处理应用中的数学基础,针 对热波图像本身的噪声特点,对现有的非线性偏微 分方程模型进行了改进,并将处理结果与传统 PM 方程的结果进行对比,试验结果表明:文中提出的改 进算法能够明显去除原始热图中的噪声,改善图像 的质量。

## 参考文献:

- [1] Xiangzhi Bai, Fugen Zhou, Bindang Xue. Infrared image enhancement through contrast enhancement by using multiscale new top-hat transform [J]. Infrared Physics & Technology,2011,54(2):61-69.
- [2] Francisco J. Madruga, Clemente Ibarra-Castanedo, Olga M Conde, et al. Infrared thermography processing based on higher-order statistics [J]. NDT & E International, 2010, 43(8):661-666.
- [3] W L Gong, Y X Gong, A F Long. Multi-filter analysis of infrared images from the excavation experiment in horizontally stratified rocks [J]. Infrared Physics & Technology, 2013,56:57-68.
- [4] LIU Tao, ZHANG Wei, HE Fujun, et al. Research on image enhancement in infrared thermal waves NDT[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(7):1922 1927. (in Chinese)
  刘涛,张炜,何付军,等. 红外热波检测方法图像增强环节研究[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(7):

[5] LIU Tao, XU Weichang, TANG Tao, et al. Application of

- [5] Life Tab, Re weichning, Finito Tab, et al. Application of wavelet transform to images enhancement in thermal wave NDT[J]. Laser & Infrared, 2012, 42(6):709 – 712. (in Chinese) 刘涛,徐卫昌,唐涛,等. 小波变换在热波检测图像增 强中的应用[J]. 激光与红外, 2012, 42(6):709 – 712.
- [6] XU Weichang, HUANG Wei, LI Yongfeng, et al. Application of low-pass filtering and gray adjusting to image enhancement [J]. Laser & Infrared, 2012, 42 (4): 458 – 462. (in Chinese)

徐卫昌,黄威,李永峰,等.低通滤波与灰度值调整在 图像增强中的应用[J].激光与红外,2012,42(4): 458-462.

[7] WANG Dakai, HOU Yuqing, PENG Jinye. Partial differential equation in image processing [M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)

王大凯,侯榆青,彭进业.图像处理的偏微分方程方法 [M].北京:科学出版社,2008.

- [8] ZHANG Tong, ZHU Hong, ZHANG Ran, et al. Based on the dual-tree complex wavelet with 6 directional Wiener filter combine partial differential equation in image denoising[J]. Journal of Image and Graphics, 2009, 14(5): 848-852. (in Chinese) 张瞳,朱虹,张然,等. 复小波域维纳滤波与偏微分扩 散相结合的图像去噪方法[J]. 中国图象图形学报, 2009,14(5):848-852.
- [9] WANYAN Dandan. Study of infrared image contrast enhancement algorithm [D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2012. (in Chinese) 完颜丹丹. 红外图像对比度增强算法研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2012.
- [10] Perona P, Malik J. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1990, 12 (7): 629-639.
- [11] WU Wei, WANG Hongzhi, SONG Yu. Image denoising algorithm based on partial differential equation [J]. Journal of Changchun University of Technology: Natural Science Edition, 2011, 32(6):554 557. (in Chinese) 武伟, 王宏志, 宋宇. 基于偏微分方程的图像去噪算法 [J]. 长春工业大学学报:自然科学版, 2011, 32(6):554 557.
- [12] WANG Yu, ZHANG Huiyan. Fluorescence microscopic image denoising based on forth-order PDEs and contrast enhancement[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2012, 41(4):564 567. (in Chinese)
  王瑜,张慧妍. 基于四阶 PDEs 和对比度增强的荧光显 微图像去噪[J]. 电子科技大学学报, 2012, 41(4):564 567.
- [13] WANG Lisheng, XU Zongben. Review on PDE-based image processing techniques and their applications in biomedical images analysis[J]. Chinese Journal of Engineering Mathematics, 2004, 21(4):475-490. (in Chinese) 王利生,徐宗本. 偏微分方程在生物医学图像分析中 的应用[J]. 工程数学学报, 2004, 21(4):475-490.
- [14] Guillermo Sapiro. Geometric partial differential equations and image analysis [M]. New York: Cambridge University Press, 2001.