

脉冲加热红外无损检测中的图像处理

梅林¹⁾ 吴立德¹⁾ 王裕文²⁾

¹⁾ 复旦大学计算机科学与工程系, 上海, 200433;

²⁾ 西安交通大学机械工程学院, 陕西, 西安, 710049

摘要 针对红外无损检测的特殊性, 讨论适用于红外无损检测的图像处理, 设计适合于红外无损检测的图像处理算法, 重点解决了非均匀加热条件下红外图像的校正和局部对比度不同条件下的缺陷分割问题. 使红外无损检测与评价达到可视化、智能化、自动化, 以充分发挥红外无损检测的优势.

关键词 红外线无损检测, 图像处理, 图像分析, 计算机视觉.

IMAGE PROCESSING IN PULSE HEATING INFRARED NONDESTRUCTIVE TEST

MEI Lin¹⁾ WU Li-De¹⁾ WANG Yu-Wen²⁾

¹⁾ Department of Computer Science and Engineering, Shanghai 200433, China;

²⁾ School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China

Abstract According to the peculiarity of infrared nondestructive test, image processing and analysis approach suited for that test was proposed. As two focal points, the correction problem of infrared image under non-uniform heating condition, and defect separation problem of infrared image under different location contrast condition, both were solved. The results show that both approaches can improve the evaluation ability of the infrared vision testing system, make it visual, intelligent and automatic.

Key words infrared nondestructive test, image processing, image analysis, computer vision.

引言

脉冲加热红外热成像无损检测是近年来发展起来的红外无损检测新技术^[1, 2]. 其单面法检测的原理如图 1 所示: 用一束脉冲强热流 $q(t)$ 照射被测物, 同时用红外探测器记录被测物表面加热—冷却过程的温度场, 由于被测物中有缺陷部分和无缺陷部分

的热物理性质不同, 将产生热流的不均匀, 从而造成被测物中有缺陷与无缺陷部分各自对应表面温度的不同, 于是可以判定是否存在缺陷.

红外无损检测的难点在于对热图数据的定量理解. 由于红外无损检测的红外图像和一般可见光图像相比具有其特殊性, 决定了必须设计新的图像处理算法来从热图信息中提取出所需要的特征. 这些特殊性主要表现在几个方面: (1) 红外成像是物体自身的辐射成像, 而可见光图像是由光反射产生的, 因而不可避免地存在边缘模糊的现象. (2) 红外图像往往存在较大的噪声. (3) 用于红外无损检测的红外图像往往还存在局部对比度差的问题, 这是因为脉冲加热的时间很短, 强度很高, 而在随后的冷却过程中温度降低很快, 造成了大多数的热图均存在对比度差的现象. 因此, 怎样在低对比度(退化的图像)条件下仍然能准确地提取出缺陷的位置、尺寸信息也是一个需要解决的问题. (4) 红外无损检测

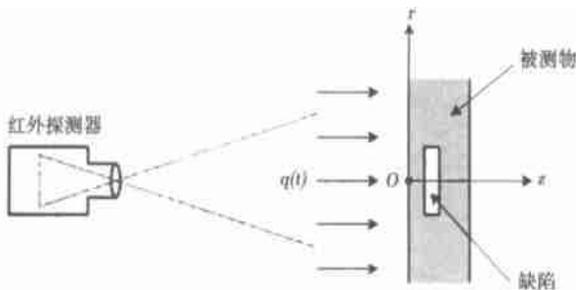


图 1 脉冲加热红外无损检测机理

Fig. 1 Diagram of pulse heating infrared nondestructive test system

的红外图像还存在非均匀加热的问题。

本文主要针对脉冲加热红外无损检测的特殊要求,讨论了非均匀加热条件下的红外图像增强以及红外图像边缘检测和图像分割技术。

1 非均匀加热条件下红外图像恢复

由于理论上的无限大平面热源不存在,实际应用中都是选择对称放置的大功率灯泡(如红外灯泡等)作为热源,虽然对称放置热源对非均匀性加热有一定程度的改善,但仍存在靠近热源的部位受热集中,远离热源的部位受热不足的问题,使得红外热图的定量理解更加困难。因此有必要研究非均匀加热条件下的红外图像增强技术,提高非均匀加热条件下红外无损检测的缺陷识别能力^[3]。

如果在对含缺陷物体脉冲加热时,对一块同样材料、同样大小的无缺陷物体也进行脉冲加热,并记示下这两组热图,则由对应时刻含缺陷物体的热图减去无缺陷物体的热图,就可以消除因加热不均匀而带来的影响。但由于空间定位精度问题和时间吻合问题不易解决,这样的两组热图在实际应用中是不易获得的。

在可见光图像处理领域有一种关于照度不均匀性补偿的所谓阴影校正技术。本文把这一技术的思想引入红外无损检测的图像处理中。

非均匀加热条件下的图像信号 $f(m, n)$ 可以表示为均匀加热条件下的图像信号 $a(m, n)$ 与照度图像 $I(m, n)$ 的乘积,即

$$f(m, n) = a(m, n) \cdot I(m, n). \quad (1)$$

对式(1)两边取对数,得

$$\ln f(m, n) = \ln a(m, n) + \ln I(m, n). \quad (2)$$

其中 $I(m, n)$ 为一低频图像,这样通过低通滤波处理后,从原图像中减去滤波后的图像,就能得到校正后的图像。

低通滤波效果的好坏直接影响到校正的效果,一般是采用基于快速傅立叶变换(FFT)的同态滤波,本文研究发现,采用基于数学形态学的形态滤波也能达到很好的效果,并在此基础上进一步实现了基于数学形态学的缺陷分割,为解决非均匀加热条件下红外图像理解的问题提供了另一种思路。

2 灰度图像形态学的基本理论^[4]

2.1 灰度图像形态学分析

灰度图像的形态学基本运算定义为:(1)灰度图像形态学膨胀为

$$D_G(A, B) = \max_{[j, k] \in B} \{ a[m - j, n - k] + b[j, k] \}, \quad (3)$$

(2)灰度图像形态学腐蚀为

$$E_G(A, B) = \max_{[j, k] \in B} \{ a[m + j, n + k] - b[j, k] \}, \quad (4)$$

(3)灰度图像形态学开为

$$O_G(A, B) = D_G(E_G(A, B), B), \quad (5)$$

(4)灰度图像形态学闭为

$$C_G(A, B) = - O_G(-A, -B). \quad (6)$$

灰度图像的开运算去掉图像上与结构函数的形态不相吻合的凸的(图像中相对亮的)灰度分布结构,同时保留那些相吻合的凸结构。闭运算则填充那些图像上与结构函数形态不相吻合的凹的(图像中相对暗的)灰度分布结构,同时保留那些相吻合的凹结构。图像的形态滤波正是利用了这种的性质。

2.2 Top-Hat 变换

Top-Hat 变换算子有两种定义方式:(1)检测暗色背景下的亮物体为

$$\text{Top Hat}(A, B) = A - (A \ominus B) = A - \max_B(\min(A)). \quad (7)$$

(2)检测亮色背景下的暗物体为

$$\text{Top Hat}(A, B) = (A \oplus B) - A = \min_B(\max(A)) - A. \quad (8)$$

按式(7)定义的 Top-Hat 变换视作波峰检测器,它可以在暗背景下检测出较亮的物体;按式(8)定义的 Top-Hat 变换视作波谷检测器,它可以在亮背景下检测出较暗的物体。

3 非均匀加热条件下红外图像校正算法

本文采用基于数学形态学的非均匀加热条件下红外图像校正算法,其步骤为:(1)对采集到的 N ($N=100$) 帧图像进行多帧平均处理,(2)采用不同尺度的圆形结构元素对处理后的图像进行形态滤波,(3)对 2 步的结果按式(7)进行 Top-Hat 变换处理得到校正后的图像。

4 试验

试样尺寸参数如图 2 所示,采用内部平底孔来模拟缺陷。它由两块硬酯塑料板粘合而成,第一块板厚 10mm,背部钻有 4 个直径为 20mm、厚度及深度各异的平底孔;第二块板厚 3mm。表 1 为缺陷的尺寸参数,其中,缺陷深度指缺陷表面距加热面的距离。

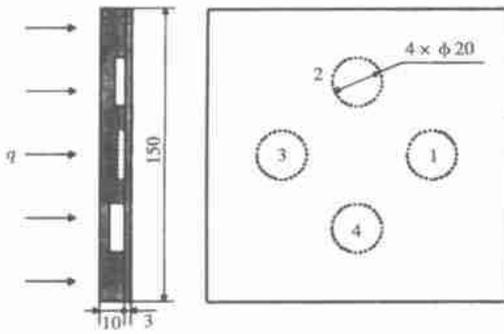


图 2 试样尺寸

Fig. 2 Sample dimensions

表 1 缺陷尺寸

Table 1 Defect dimensions

缺陷编号	缺陷深度(mm)	缺陷厚度(mm)
1	3.90	6.00
2	4.40	5.50
3	5.20	4.90
4	5.40	4.50

本文主要研究非均匀加热条件下的图像校正问题,这是一个普遍存在的问题.并假定缺陷尺寸足够大,试样中人工缺陷尺寸大小也都一致.由于微缺陷的问题也比较复杂,提高系统最小缺陷的检测能力也是今后要研究的课题.

本文采用主动式单面检测法,使用 A GA 780 红外热像仪,配以自主开发的红外图像采集处理软件,热源为 2 个 1000W 牛头灯泡,采集速度为 1 帧/s.

5 结果

图 3 为基于数学形态学 Top-Hat 变换的非均匀加热图像的校正结果,其中原图像(a)为经过多帧图像处理后的图像,从其三维效果图可以看出,图像的下部比上部受热较多,如果直接用这样的图像进行

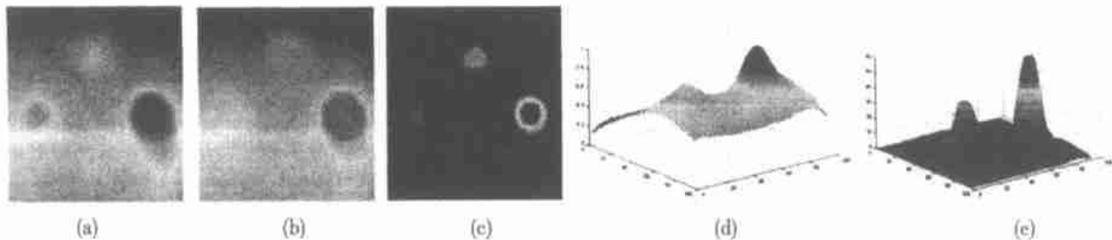


图 3 非均匀加热条件下图像的校正

(a)原图像 (b)形态滤波后 (c)校正后图像 (d)原图像(三维图) (e)校正后的图像

Fig. 3 Infrared image correction under nonuniform heating condition
 (a) original Image (b) after morphological filtering (c) corrected image
 (d) original image (3D Profile) (e) corrected image (3D profile)

分析,势必带来较大的误差.本文采用圆形结构元素,但不同大小,对图像进行多结构元素并行形态学滤波,结果如图(b)所示,图(c)为经过 Top-Hat 变换处理后的校正图像,从其三维效果图(d)与(e)比较可以看出,其非均匀受热现象得到了校正,但又未丧失缺陷的结构特征,使信号较弱的缺陷也能明显地显示出来,为进一步进行边缘检测和缺陷分割准备了条件.

6 红外图像分割

红外图像分割是实现可视化红外无损检测的重要内容,经过这一步骤,可以把缺陷在红外热图中标识出来,使无损检测人员对红外视觉热图的理解更加直观、方便.

图像分割的算法很多,如灰度阈值、区域生长、纹理结构分析等结构分割方法以及应用统计模式识别、神经网络方法或利用景物的先验知识实现的图像分割方法的非结构方法.灰度阈值方法的难点在于选取适当的阈值,如果阈值选得太低,不但会产生假的边缘,而且得到的边缘很厚,必须作细化处理,而细化后的边缘位置往往不够精确;如果阈值选得太高,那么许多边缘可能检测不到,或边缘出现过多的断裂部分.另一方面,一幅红外热图中可能含有大小、深度各不相同的多个缺陷,它们分别对应于不同的阈值,采用单一阈值的方法显然会造成缺陷的漏检.因此,怎样在一幅热图中把不同的缺陷识别出来是红外无损检测所要解决的一个问题.近年来属于结构分割方法的分水线算法(Watershed Algorithm)受到了广泛重视,本文将这一算法应用于红外图像分割中,取得了很好的效果.

有关这一算法的数学描述如下:令 $M_1, M_2, M_3, \dots, M_r$ 表示极小区域, $C(M_i)$ 表示与极小区域相关的流域, \min 和 \max 分别表示梯度的极小值和

极大值.假设溢流过程都是以单灰度值增加的, n 表示溢流增加的数值(即在第 n 步时溢流的深度), $T[n]$ 表示满足 $f(x) < n$ 的所有点 x 的集合, $f(x)$ 为梯度图像信号.对于一个给定流域,在第 n 步将有可能出现一定程度的溢流.假设在第 n 步时极小区域 M_i 发生溢流,令 $C_n(M_i)$ 为与极小区域 M_i 相关流域的一部分,即在溢流深度 n 时,在流域 $C(M_i)$ 中形成的水平面构成的区域,则 $C_n(M_i)$ 为一二值图像,可表示为

$$C_n(M_i) = C(M_i) \cap T[n]. \quad (9)$$

如果极小区域 M_i 的灰值为 n ,那么在第 $n+1$ 步时,流域的溢流部分与极小区域完全相同,即有 $C_{n+1}(M_i) = M_i$.令 $C[n]$ 表示在第 n 步流域中溢流部分的并,则 $C[\max+1]$ 为所有流域的并.算法在初始时取 $C[\min+1] = T[\min+1]$.

从上面的描述可以看出,分水线算法以形态学梯度的极小点作为溢流的标记点,因此标记点的选取很重要.由于原始信号中的噪声或一些微小灰度值的波动,在梯度图像中可能存在许多假的波动,在梯度图像中可能存在许多假的极小值,造成分割过度.即使对梯度图像平滑,存在的极小点也往往会多于原始图像中物体的数目.本文选取原图像局部极大点作为标记点,通过恰当选择结构元素大小,产生的标记点比较理想.

基于分水线分割算法的红外图像分割算法过程为:(1)对经过上一节非均匀性加热校正后的图像选取局部极大点作为初始标记点;(2)计算其梯度图像;(3)由分水线分割算法生成分水线;(4)得到分割后的二值图像;(5)由标记算法对不同的物体(缺陷)进行标记完成最终的缺陷标识.

利用上述算法,本文在微机的 Matlab 环境下实现了基于分水线算法的红外图像分割,图 4 为分割实例.图 4(a)为待分割图像,这里取前面已讨论的经过消除非均匀加热影响后的图像,即对比度校正后的图像;(b)为图像的局部极大点,它作为分水线算法的标记点;(c)为梯度图像;从(d)梯度图像的三维效果图可以看出梯度图像的极小区域和积水盆地(流域);(e)为经过分水线算法后形成的分水线,背景为原图像;(f)为图像分割的结果;(g)为利用标识物体的算法用不同的颜色对缺陷进行标识结果.

从图 4 可以看出,采用分水线的算法进行红外图像分割,结果较为理想,它能把一幅热图中对比度各不相同的缺陷同时显示出来,尤其是对于对比度较强的缺陷,基本上保持了缺陷的结构信息.

7 结论

本文讨论了红外无损检测的图像处理,主要研究了非均匀条件下红外图像的校正技术和基于分水

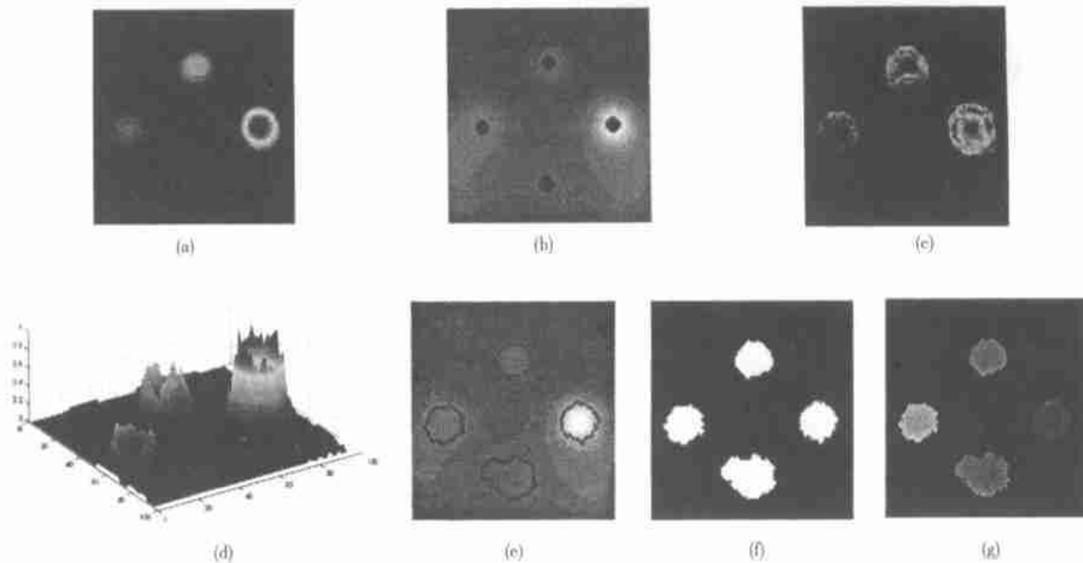


图 4 基于分水线算法的图像分割

(a)待分割图像(取经过对比度校正后的图像) (b)图像的局部极大点 (c)梯度图像
(d)梯度图像(三维效果图) (e)形成的分水线 (f)图像分割结果 (g)缺陷标识

Fig. 4 Infrared image segmentation based on the watershed algorithm

(a) image to be segmented (after corrected) (b) local maximum point of the image (c) gradient image
(d) gradient image (3D Profile) (e) watershed line (f) segment result (g) labeled defects

线算法的红外图像分割,得出以下结论:

(1) 针对红外无损检测的特点,提出了基于数学形态滤波的红外图像增强技术,有效地解决了非均匀加热条件下红外图像的校正问题,为进一步进行红外图像理解创造了条件.

(2) 提出基于分水线算法的红外图像分割技术,它能把一幅热图中对比度强弱各不相同的缺陷同时显示出来,使其在低对比度条件下仍然能准确地提取出缺陷的位置,尺寸信息,避开了求多阈值的过程,算法更加简练、有效.

REFERENCES

- [1] Maldague X. Nondestructive Evaluation of Materials by Infrared Thermography. London: Springer-Verlag, 1993: 1—176
- [2] MEI Lin, WANG Yu-Wen, XUE Jin. A new method to evaluate the subsurface defect by thermal nondestructive testing. *J. of infrared and millimeter waves* (梅林,王裕文,薛锦. 红外热成像无损检测缺陷的一种新方法. *红外与毫米波学报*), 2000, 19(6): 457—459
- [3] MEI Lin. Research on intelligent technique of infrared vision testing and evaluation. Xi'an Jiaotong University, Ph. D. thesis (梅林. 智能化红外视觉检测与评价技术的研究, 西安: 西安交通大学, 博士论文), 2000, 88—104
- [4] CUI Yi. Image Processing and Analysis—mathematical Morphology Method and Its Applications. Beijing: Scientific press (崔屹. 图像处理与分析—数学形态学方法及应用. 北京: 科学出版社), 2000: 98—148