

文章编号: 2095-2163(2020)04-0186-04

中图分类号: TP399

文献标志码: A

基于区域生长的蜂窝积冰红外图像检测

李宝磊, 李清英, 郝路, 潘炜琛

(上海工程技术大学 航空运输学院, 上海 201600)

摘要: 本文利用自制铝蜂窝结构, 注水至蜂窝夹芯, 对其制冷后用模拟飞机机翼蒙皮内部运营时因故障导致的积冰现象, 并运用闪光灯热激励红外无损检测设备, 检测实验效果。采用区域生长法, 改善手动选取积冰图像中种子点的缺点, 提高其自适应性。研究表明, 该方法根据蜂窝特有结构, 可以高效识别出蜂窝结构中的积冰, 边界信息明确, 且可以精确积冰缺陷面积及定量到具体格数数量, 对飞机蜂窝结构部件维修起着重要作用。

关键词: 积冰; 铝蜂窝; 红外无损检测; 区域生长法

Infrared image detection of cellular ice based on region growing

LI Baolei, LI Qingying, HAO Lu, PAN Weichen

(Air transport institute of Shanghai University Of Engineering Science, Shanghai 201600, China)

[Abstract] In this paper, a self-made aluminum honeycomb structure is used to inject water into the honeycomb sandwich. After refrigeration, the phenomenon of ice accumulation caused by faults in the inner operation of aircraft wing skin is simulated. The experimental results are tested by flash thermal excitation infrared thermal imager. The region growing method is used to improve the shortcomings of manual selection of seed points in Icing Image and its adaptability. The results show that the method can effectively identify the ice deposit in honeycomb structure according to the unique structure of honeycomb. The boundary information is clear, and the defect area and the number of specific cells can be accurately quantified. It plays an important role in the maintenance of aircraft honeycomb structure components.

[Key words] Ice accretion; aluminum honeycomb; infrared nondestructive testing; Regional growth method

0 引言

蜂窝结构作为工字梁结构, 具有轻质、高承载、结构稳定等特点, 广泛应用于飞机承力结构件, 如机翼、机身、尾翼和方向舵等关键部位。飞机飞行过程中, 机翼等部位受到冲击, 铝蜂窝结构密封性能下降。在恶劣环境下, 受到雨水、冷凝水等共同影响, 容易造成内部积水, 如果在飞行过程中温度过低, 内部积水形成积冰, 积冰会向蜂窝夹层扩张, 使蜂窝芯和面板脱层或脱粘, 从而危及飞机的飞行安全。检测飞机蒙皮内部及表面缺陷有多种方法, 而红外无损检测技术具有直观、快速、不需要与缺陷样件表面接触等优点, 有较高的可靠性, 适合在线检测。利用红外热像仪对积冰缺陷检测, 并采用合适的热像图图像处理方法凸显缺陷, 对其定量显得尤为重要。余成波将 OTSU 算法应用于区域生长中, 对电气设备故障处理取得了一定效果; 李欣和曹彪等人也对区域生长法进行改进, 取得了比较好的效果; 刘刚利用模糊 C 均值聚类算法分割红外图像, 改善了红外图像中噪声的干扰。针对图像的分割方法虽然很多, 但是不同的图像有各自的特

点, 很难找到具有适应性的通用的方法, 所以图像分割依然是图像处理的难点^[1]。

1 区域生长原理概述

区域生长是由 Levine 等人提出的, 基本原理较其他分割算法简单, 可以将相同特质的区域分割出来, 边缘信息十分明确^[2]。该方法一般有两种方式: 一种是先给定图像中的种子点, 确定生长规则, 判断种子点邻域像素点是否满足规则, 满足即纳入种子区域, 达到最终将所有具有相同属性的像素点结合成一个区域的目的^[3]; 另一种是将目标图像分割成多个具有相同特征的区域, 按照规定规则融合相近的小区域, 达到分割图像的目的^[4]。

红外图像中每一像素点都有相应的灰度值, 在蜂窝结构中, 积冰区域相应的灰度值偏小, 为缺陷部位, 以二值图为例:

(1) 首先设置种子点, 在图 1(a) 中设框选点 $T(m_0, n_0)$ 为种子点;

(2) 将种子点的特性与其四邻域或八邻域未归类像素点的特性相比较。事先设定判断标准, 如果

作者简介: 李宝磊(1993-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 红外无损检测及红外数字图像处理; 李清英(1982-), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向: 飞机防除冰技术与红外无损检测技术等。

通讯作者: 李清英 Email: liqy_2013@163.com

收稿日期: 2019-10-30

符合标准,在相应范围内,则把它们合并为同一区域,同时被纳入区域的点作为新的种子点;在图1(b)中可以看出其八邻域左上像素不满足特性要求,其他邻域均满足要求,一次迭代后的区域结果为图1(b)所示;

(3)生成新的种子点后,重复步骤(2),直到最后达到停止生长条件。在蜂窝积冰缺陷检测上,边缘即为其停止生长的条件,如图1(c)、(d)所示。黑圈区域即代表种子区域,白圈区域则为非种子区域。

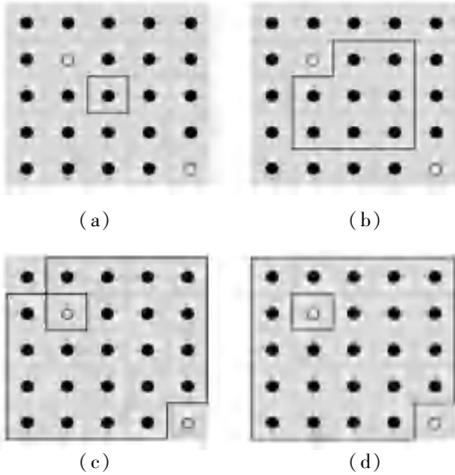


图1 区域生长示意图

Fig. 1 Regional growth diagram

因此区域生长算法一般有以下3个步骤:(1)确定生长种子点;(2)规定生长准则;(3)确定生长停止条件。

2 方法实现

区域生长法比较适合分割相同特质的联通区域,飞机蒙皮的积冰处一般与良好区域形成不同红外图像特点的区域,在此基础上结合区域生长法分割图像精确高效。但一般手动选取种子点,或者手动选取多个种子点,人为因素影响较大,可能不能够全部选出缺陷区域,会造成分割缺陷不全,无法精确定位,无法确定缺陷面积,所以自动选取种子点会更具高效性和自适应性。

2.1 确定种子点

红外热像图可显示的蜂窝积冰缺陷特征^[5]。通过热激励后,样件缺陷区域的温度会明显高于良好背景区域,因此可以设定种子点为图像中像素灰度值最大的点。选用 $N \times N$ 卷积矩阵遍历图像区域,分别计算滑动矩阵内所有像素点像素的均值,计算出平均值最大的区域的中心点为种子点,区域像素的均值计算公式(1)如下:

$$f(i,j) = \frac{1}{N^2} \sum_{m=i-1}^{m=i+1} \sum_{n=j-1}^{n=j+1} f(m,n), \quad (1)$$

其中, $f(i,j)$ 为以 (i,j) 为中心的 $N \times N$ 矩阵像素点的均值, $f(m,n)$ 为矩阵内的像素, N 为卷积矩阵大小,本文选取值为3。

蜂窝积冰区域存在多处积冰的可能性,因此红外图像中有可能形成多个缺陷区域,卷积矩阵在遍历图像区域时,一般会有多处像素点均值高。一般程序中可以为人为设置种子点,三到五个,但这种方法往往不具有适应性,可以通过公式(2),避免少选或者多选种子点:

$$T = c \cdot f(m,n)_{\max}. \quad (2)$$

其中, $f(m,n)_{\max}$ 是卷积矩阵遍历结果后的最大值, c 是常数,缺陷区域的像素值差别较小,一般在0-0.1范围内均有可能是种子点,即 c 取值0.05。

2.2 设置生长准则

种子点确定后开始区域生长,生长的过程中需要生长条件。本文选用基于区域灰度差的灰度变化的自适应阈值与计算梯度幅值相结合的方法作为生长准则。

设生长区域为 S ,像素点总数为 p ,区域内灰度均值为 q ,每次生长完成,种子区域的像素有所变动,均值 q 每次都需重新计算,计算公式(3):

$$q = \frac{1}{p} \sum_{(x,y) \in S} f(x,y), \quad (3)$$

将图像中待判断的像素点 $f(m,n)$ 与已生长区域的像素均值 q 比较,若像素差值的绝对值小于阈值 T ,则 $f(m,n)$ 作为新的种子点继续生长,否则停止生长:

$$|f(m,n) - q| \leq T. \quad (4)$$

式中, $f(m,n)$ 为待判断的像素点, q 为生长的区域像素均值。

2.3 确定生长停止条件

热处理图像中的积冰缺陷边缘是基于积冰与背景灰度值变化较大的区域,如果依旧按照上述生长条件生长,可能会导致过分割。借鉴梯度边缘检算法的思想,设置如下准则:设定阈值 W ,当梯度幅值 $G(i,j) > W$ 时,认为该点是边缘点。加入Sobel梯度算子可以对噪声起到平滑作用,消除噪声的影响。本文使用Sobel梯度算子,计算种子点和待生长点的梯度幅值,作为方向限定条件加入到生长准则中^[6]。

图像中像素点的梯度计算公式(5):

$$\text{grad}(f) = \frac{\partial f}{\partial x} i + \frac{\partial f}{\partial y} j, \quad (5)$$

式中: f 表示红外图像; i,j 分别表示 x,y 方向上的单位矢量。

梯度的幅值定义为 $W(x,y)$, 即公式(6):

$$W(x,y) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2}, \quad (6)$$

梯度的方向定义为公式(7):

$$\theta = \arctan \frac{\frac{\partial f}{\partial x}}{\frac{\partial f}{\partial y}}, \quad (7)$$

中心为 (x,y) 的八邻域为(8):

$$\begin{matrix} x-1, y-1 & x, y-1 & x+1, y-1 \\ x-1, y & x, y & x+1, y \\ x-1, y+1 & x, y+1 & x+1, y+1 \end{matrix} \quad (8)$$

中心点 (x,y) 沿 x,y 方向上的梯度值分别为公式(9)、公式(10):

$$G_x(x,y) = [f(x-1,y+1) + 2f(x,y+1) + f(x+1,y+1)] - [f(x-1,y-1) + 2f(x,y-1) + f(x+1,y-1)], \quad (9)$$

$$G_y(x,y) = [f(x-1,y-1) + 2f(x-1,y) + f(x-1,y+1)] - [f(x+1,y-1) + 2f(x+1,y) + f(x+1,y+1)], \quad (10)$$

梯度幅值为公式(11):

$$G(x,y) = \sqrt{G_x(x,y)^2 + G_y(x,y)^2}, \quad (11)$$

则边缘点判定条件为:

$$|W_0(x,y) - W(x,y)| \leq K_0,$$

其中: $W_0(x,y)$ 表示当前种子点的梯度幅值; K_0 表示阈值。

因此,改进过的生长准则为:

$$\begin{cases} |f(k,l) - m| \leq T, \\ |G_p(x,y) - G_N(x,y) - G_S(x,y)| \geq T_e. \end{cases}$$

因为加入了停止生长条件,可以适当放宽生长条件,增加阈值 T , 防止灰度变化导致的欠分割现象,区域生长算法流程图如图2所示。

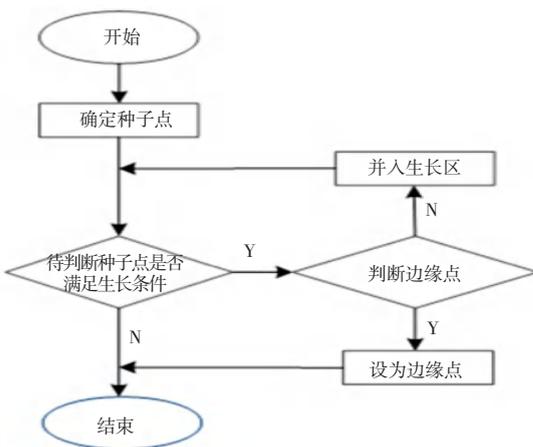


图2 算法流程图

Fig. 2 Algorithm flow chart

3 实验及结果分析

根据波音 767 航空无损检测手册关于热成像检测蜂窝结构零件积冰检查方法,一般模拟检测飞机降落一个小时候左右的状态。本文采用南京诺威尔光电有限公司的 ThermPulse-S12 分体式热波成像无损检测系统,该系统搭配非制冷焦平面红外热像仪,热像仪分辨率为 $384(H) \times 288(V)$,热激励源为最高能量 12000 焦耳的闪光灯。特制蜂窝夹芯为铝合金材质,夹芯外形尺寸为 $250\text{ mm} \times 250\text{ mm} \times 20\text{ mm}$,蜂窝边长为 4 mm,蜂窝壁厚为 0.4 mm。制作缺陷过程中,参照标准 DNT1046 填充水、冷冻等操作,使用吸管吸取定量清水,随机注入蜂窝夹芯中,记录注水格数,将样件放入冰箱,等待 20 mins 后取出。考虑到缺陷与背景区域温差大,检测效果会更好,将样件放于室温环境下 5 mins,随即利用红外热像仪对其进行检测。图3为蜂窝样件:

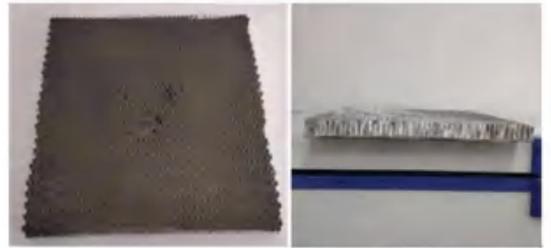


图3 铝蜂窝夹芯

Fig. 3 Aluminum honeycomb sandwich

对蜂窝样件进行热激励,采集图像,在 Matlab 2016a 中进行图像处理,图4为采集到的原始红外热图像,图5为传统算法分割结果,图6为本文算法分割结果。从主观的视觉上就可以看出,改进后的区域生长法可以较为完全的检测出积冰部位,与样件原始注水缺陷一致。而传统区域生长法则只检测出两处缺陷,边界也不一致,有偏差。



图4 原始红外热像图

Fig. 4 Original infrared thermogram



图 5 传统算法分割结果

Fig. 5 Segmentation results of traditional algorithm



图 6 本文算法分割结果

Fig. 6 Segmentation results of the algorithm in this paper

因为蜂窝结构有内壁隔离,可以清晰看出蜂窝个数,所以可以将蜂窝个数作为计量单位,用于分析评价蜂窝板的缺陷情况。为了客观地评价该方法对缺陷区域的提取,特建立表 1 指标参数评价缺陷分割效果:

表 1 评价指标参数

Tab. 1 Evaluation index parameters

指标	代表含义
S_1	实际缺陷区域面积
S_2	检测缺陷区域面积
S_3	全局区域面积
S_0	单个蜂窝面积
N_1	实际积冰蜂窝格数
N_2	计算的积冰蜂窝格数
W_1	实际缺陷率
W_2	计算缺陷率

所以样件真实缺陷率计算公式(12),计算缺陷率为公式(13):

$$W_1 = \frac{S_1}{S_3} \times 100\%, \quad (12)$$

$$W_2 = \frac{S_2}{S_3} \times 100\%, \quad (13)$$

计算蜂窝缺陷个数公式(14):

$$N_2 = \frac{S_1}{S_0}. \quad (14)$$

通过分析图像,比较本文算法以及传统分割效果,获得评价结果如表 2 所示。

表 2 指标评价结果

Tab. 2 Index evaluation results

	实际缺陷率 $W_1 / \%$	计算缺陷率 $W_2 / \%$	实际积冰蜂窝 个数 N_1	计算积冰蜂窝 个数 N_2
传统算法	6.39	3.90	50	30
本文算法	6.39	6.26	50	49

4 结束语

本文根据蜂窝结构材料特点,引用区域生长法对积冰红外热像图进行分割,利用自动选取种子点精确定位缺陷位置,在优化生长规则与停止生长条件的基础上,排除了噪声的干扰,保留了缺陷细节,提高了分割精度,最后利用评价指标计算出的结果与实际情况偏差不大,相对于传统的区域生长法的分割效果有了很大的改善。

参考文献

[1] 孙欢欢,程耀瑜,冀钰. 改进 OTSU 算法和边缘检测的图像分割算法研究[J]. 山西电子技术, 2014(2): 82-84.

[2] JAFFERY Z A, Irshad. Performance comparison of image segmentation techniques for infrared images [C]//IEEE India Conference, 2015: DOI: 10.1109/INDICON.2015.7443391.

[3] 方鑫鑫. 高分辨率城市遥感影像半自动道路提取方法研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2017.

[4] 薛卫鹏. 基于 Otsu 算法与数学形态学的图像分割算法研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2009.

[5] MALARVEL M, SETHUMADHAVAN G, BHAGI P C R, et al. Region growing based segmentation with automatic seed selection using threshold techniques on X-radiography images[C]//IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research, 2017: 1-4.

[6] 施兢业, 刘俊. 基于改进区域生长法的电力设备红外图像分割[J]. 光学技术, 2017, 43(004): 381-384.