

文章编号: 2095-2163(2020)06-0131-04

中图分类号: V244.1+5

文献标志码: A

# 基于闪光脉冲红外热波检测技术的蒙皮外冰形分析

周家伟<sup>1</sup>, 李清英<sup>2</sup>, 郝路<sup>2</sup>, 周治荣<sup>3</sup>, 蔡铭<sup>3</sup>

(1 上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620; 2 上海工程技术大学 航空运输学院, 上海 201620;

3 上海工程技术大学 飞行学院, 上海 201620)

**摘要:** 为研究飞机蒙皮积冰的形状, 搭建了一种应用闪光脉冲红外热波检测实验台, 进行了铝制蒙皮表面冰形的检测实验。并通过经典边缘检测算子(Roberts算子、Sobel算子、Prewitt算子、Log算子、Canny算子), 分析了红外热波成像与可见光成像下的冰形差异。结论如下: 红外热波检测冰形比可见光图像的冰形具有更高的纯净度与完整性; 在各检测算子中, Roberts算子的处理结果最好, Canny次之, 其次为Prewitt和Sobel, Log算子图像处理效果最差。此结论可供飞机积冰探测研究参考。

**关键词:** 红外成像; 蒙皮积冰; 图像处理; 边缘检测

## Analysis of skin ice shape

### based on flash pulse infrared thermal wave detection technology

ZHOU Jiawei<sup>1</sup>, LI Qingying<sup>2</sup>, HAO Lu<sup>2</sup>, ZHOU Zhirong<sup>3</sup>, CAI Ming<sup>3</sup>

(1 School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2 School of Air Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

3 School of Flying, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**[Abstract]** In order to study the shape of ice accumulation on the aircraft skin, an infrared thermal wave detection experimental platform using flash pulses was set up, and the ice accretion shape detection experiment was performed on the surface of the test aluminum skin. The ice shape difference was analyzed by the classical edge detection operator (Roberts operator, Sobel operator, Prewitt operator, Log operator, Canny operator) under infrared thermal wave imaging and visible light imaging. The main conclusions are as follows: The infrared thermal wave detection for ice accumulation shape is better in purity and integrity than the visible light image. Among the detection operators, Roberts operator has the best processing results, Canny takes second place, followed by Prewitt and Sobel, and the Log operator effect has the worst image processing. This conclusion can be used as a reference for aircraft ice accretion detection research.

**[Key words]** infrared imaging; aircraft skin with ice accretion; image processing; edge detection

## 0 引言

当飞机穿越含过冷水滴的云层或接触到过冷雨滴时, 飞机表面可能会产生不同程度的结冰<sup>[1]</sup>。飞机机体表面结冰会影响气动力学性能, 造成机翼和平尾流谱平滑度的破坏, 导致飞机的横侧向稳定性变差, 各舵面效率降低以及飞机操纵性的恶化, 甚至造成机毁人亡的悲剧<sup>[2]</sup>。2018年在北京召开的首届航空器适航技术与管理国际会议上, 不少专家学者特别强调了飞机防除冰的重大意义。飞机防除冰的首要任务是探测飞机上积冰的存在。目前主要方法有超声脉冲回波检测, 激光检测和压电传感器检测法等。本文为研究积冰特性, 搭建了地面蒙皮积冰模拟实验台。由于红外热波检测具有瞬时响应、检测面积大、不受能见度影响等特点<sup>[3]</sup>, 因此采用

闪光灯脉冲激励红外热波检测设备进行蒙皮外冰形检测分析。红外检测技术可分为: 通过施加热激励使得材料内部产生温度梯度的主动式红外热波检测和利用被测物体自身温场分布产生热成像的传统被动式红外热波检测。本文采用的是以闪光脉冲作为热激励源的主动式红外热波检测, 在试件表面进行短周期的加热, 并进行图像采集与处理。

## 1 基本原理

任何温度大于绝对零度的物体, 都有向外发射电磁辐射、散发热能和吸收电磁辐射的能力。此外, 当物体受热时若内部存在杂质或分层等缺陷时, 其热传导性能会受到影响, 使得相应表面热量会有明显差异<sup>[4]</sup>。本文所研究的冰形检测方法正是基于这一原理, 利用红外热像仪记录积冰与附面层在接收热激励后, 冰与

**基金项目:** 上海工程技术大学市级大学生创新创业训练项目(CS1908007)。

**作者简介:** 周家伟(1999-), 男, 本科生, 主要研究方向: 飞机防除冰技术与红外无损检测; 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。

收稿日期: 2020-01-14

蒙皮边界上的热辐射强度变化的不一致现象,再运用图像处理相关技术判定积冰冰形。原理如图 1 所示。

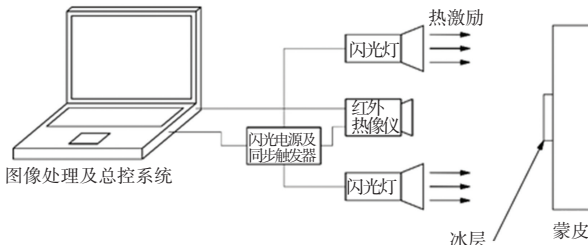


图 1 闪光脉冲红外热波检测蒙皮外形原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of flash pulse infrared heat wave detection for skin ice shape

## 2 闪光脉冲红外热波冰形检测实验

### 2.1 实验设备

本实验主要装置包括:闪光脉冲红外热波检测设备(图 2)、冷冻柜(图 3)及实验蒙皮。由南京诺威尔公司提供的 ThermPulse-S12 的分体式红外热波检测闪光脉冲热激励源,最大能量可达 12000 焦耳,可对整个视场同时进行热激励,范围大、脉冲时间短。采用英福泰克公司生产的 InfraTec Image IR 8300 红外制冷热像仪红外热像仪,可探测 2.0-5.7 μm 的红外波段。工业冷柜的最低温度可达 -65 °C,实验前冰柜的温度设定在 -40 °C 左右。实验蒙皮采用铝 6061,边长为 300 mm 的正方形铝板。为减少反射干扰,铝皮表面进行了喷漆加工处理。

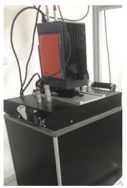


图 2 闪光脉冲红外热波检测系统  
Fig. 2 Flash pulse infrared heat wave detection system

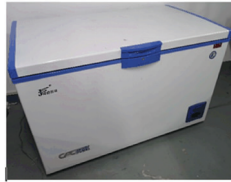


图 3 冷冻冰柜  
Fig. 3 Freezer

### 2.2 实验过程

为制作蒙皮外冰形样件,首先在铝片中心表面画出半径约 60 mm 的圆,并用滴管滴上适宜水滴,注意控制水滴的流向。放入控制在 -40 °C 的冷冻冰柜中进行凝结。冷冻结束后取出材料,先获得可见光状态下的积冰成像,再置于打开闪光脉冲热激励系统探头下,采集红外热波冰形图像。

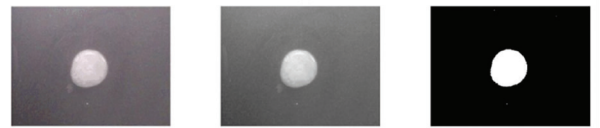
## 3 红外热波冰形图像处理结果

### 3.1 红外热波冰形检测积冰冰形基本思路

冰形检测是为辨别积冰在蒙皮上覆盖的范围,可利用边缘检测方法进行图像处理<sup>[5]</sup>。边缘检测使用某种算法,识别出图像中不同区域间灰度发生非连续且急剧变化的分界<sup>[6]</sup>。边缘主要存在于对

象与对象,对象与背景以及不同区域之间。经典的边缘检测算法是对原始图像中某些像素的领域来构造轮廓处理算子。如微分算子法中,用图像灰度分布的梯度来反映图像灰度的 Roberts 算子、在 Roberts 算子之上改进的 Sobel 算子、Prewitt 算子、Kirsch 算子,以及与边缘方向无关的 Laplacian 算子。除此之外,Log 算子、Canny 算子等<sup>[7]</sup>常被作为最优算子运用在图像处理中。进行边缘检测前需要对图像进行一定的预处理。因为对于红外热波成像图像,要从包含背景与噪声的图像中提取到所需信息,则先要将灰色图像转换为二值化处理图像。若直接对未进行二值化处理的图像进行边缘检测,则 Log 算子、Canny 算子都无法正常返回边缘检测结果。而对于可见光图像,则需将 RGB 彩色图像转成 255 位的灰阶图像,灰度化后才可进行二值化处理。

本实验分别采集了试件表面的可见光积冰图像和红外积冰图像,并将图像导入 MATLAB 中,进行预处理后,再分别使用经典图像轮廓处理算法——Sobel 算子、Roberts 算子、Prewitt 算子、Log 算子、Canny 算子进行积冰轮廓检测。之后,进一步比较可见光与红外热波检测下的不同算法的差异。边缘检测前冰形如图 4 所示。



(a) 可见光冰形原图 (b) 可见光冰形灰度图 (c) 可见光冰形二值图  
(a) Visible light ice-shaped original image (b) Visible light ice-shaped gray image (c) Visible light ice-shaped binary image



(d) 红外冰形原图 (e) 红外冰形灰度图 (f) 红外冰形二值图  
(d) Infrared thermal wave ice-shaped original image (e) Infrared thermal wave ice-shaped gray image (f) Infrared thermal wave ice-shaped binary image

图 4 可见光与红外热波冰形原图、灰图与二值图  
Fig. 4 The visible light and infrared thermal wave ice-shaped original image, gray image and binary image

MATLAB 命令如下:

```
function edge_detection();%定义函数
close all;%关闭所有的显示图像输出的窗口对象
I=imread('ice.bmp');%读取图像
PicGrey = rgb2gray(I);%用已有的函数进行 RGB 到灰度图像的转换
thresh = graythresh(PicGrey);%自动确定二值化阈值
Pic = im2bw(PicGrey,thresh);%对图像二值化
```

### 3.2 基于五种算子的冰形图像分析

(1) Roberts 算子。Roberts 算子是一种利用局部差分, 对每个像素计算  $\nabla f$  与其绝对值<sup>[8]</sup>。采用对角线方向相邻两象素之差, 近似梯度幅值检测轮廓边缘。该算子边缘定位的精度较高, 适于检测水平和垂直边缘, 对噪声敏感度高。

在 MATLAB 中的命令为: `BW1=edge(Pic, 'roberts')`, 选择 Roberts 算子并自动选择阈值进行边缘检测。运用 Roberts 算子进行边缘检测结果如图 5 所示。



(a) 可见光图像边缘 (b) 红外热波图像边缘

(a) The edge of visible light image (b) The edge of infrared thermal wave image  
图 5 Robert 算子的可见光图像和红外热波图像边缘检测效果

Fig. 5 The edge detection effects of visible light and infrared heat wave images with Roberts operator

(2) Sobel 算子。Sobel 算子是典型一阶梯度算子。其利用了像素点上下左右四个方位的相邻像素点, 并对其进行灰度加权平均, 最后在角点取极值<sup>[9]</sup>。该算子由两个卷积核来组成, 其中每个像素点都使用这两个核做卷积。其中一个收集其垂直边缘, 另一个则收集其水平边缘。由于该算子中引入了类似局部平均的运算, 对噪声具有平滑作用, 具有一定的抑噪能力, 但边缘定位精度较弱。

在 MATLAB 中的命令为: `BW1 = edge(Pic, 'sobel')`, 选择 Sobel 算子并自动选择阈值进行边缘检测。运用 Sobel 算子进行边缘检测结果如图 6 所示。



(a) 可见光图像边缘 (b) 红外热波图像边缘

(a) The edge of visible light image (b) The edge of infrared thermal wave image

图 6 Sobel 算子的可见光图像和红外热波图像边缘检测效果

Fig. 6 The edge detection effects of visible light and infrared heat wave images with Sobel operator

(3) Prewitt 算子。Prewitt 边缘检测是一种离散式的一阶微分算子, 基于 Roberts 算子所得<sup>[10]</sup>。是利用单个像素点上下、左右邻点的灰度差的极值检测边缘, 去掉部分伪边缘, 对噪声具有平滑作用。该算子由两个卷积来完成, 其中一个检测水平边缘, 一个检测垂直边缘。

在 MATLAB 中命令为 (续对图像二值化命令后): `BW3=edge(Pic, 'prewitt')`, 选择 Prewitt 算子并自动选择阈值进行边缘检测。运用 Prewitt 算子进行边缘检测结果如图 7 所示。



(a) 可见光图像边缘 (b) 红外热波图像边缘

(a) The edge of visible light image (b) The edge of infrared thermal wave image  
图 7 Prewitt 算子可见光图像和红外热波图像边缘检测效果

Fig. 7 The edge detection effects of visible light and infrared heat wave images with Prewitt operator

(4) Log 算子。Log 边缘检测算子, 是将高斯滤波和拉普拉斯检测算子结合在一起进行边缘检测的方法<sup>[11]</sup>。首先使用二维高斯滤波器进行图像预处理, 将图像与高斯滤波器卷积, 以去除噪声并平滑滤波; 之后须再通过二阶偏导数零交叉来进行轮廓探测。Log 边缘检测算子的抗干扰能力强, 边界定位精度高, 连续性好, 且能提取出对比度弱的边界。是一种较成功的检测图像边缘的算子。

在 MATLAB 中命令如下: `BW4=edge(Pic, 'log')`, 选择 Log 算子并自动选择阈值进行边缘检测运用 Log 算子进行边缘检测结果如图 8 所示。



(a) 可见光图像边缘 (b) 红外热波图像边缘

(a) The edge of visible light image (b) The edge of infrared thermal wave image

图 8 Log 算子可见光图像和红外热波图像边缘检测效果

Fig. 8 The edge detection effects of visible light and infrared heat wave images with Log operator

(5) Canny 算子。Canny 算子具有优秀的边缘检测能力。首先应用高斯平滑滤波器平滑图像以除去噪声, 随后导数算子用于找寻灰度图像中横轴及竖轴方向的导数以及梯度的大小与方向, 把边缘的渐变方向划分几个方位, 并找到其邻接像素并采用两个阈值来判断边缘<sup>[12]</sup>。

在 MATLAB 中命令为: `BW5 = edge(Pic, 'canny')`, 选择 Canny 算子并自动选择阈值进行边缘检测。运用 Canny 算子进行边缘检测结果如图 9 所示。



(a) 可见光图像边缘 (b) 红外热波图像边缘

(a) The edge of visible light image (b) The edge of infrared thermal wave image

图 9 Canny 算子可见光图像和红外热波图像边缘检测效果

Fig. 9 The edge detection effects of visible light and infrared heat wave images with Canny operator

## 4 结果分析

通过 MATLAB 辅以五种经典图像边缘算子,来处理可见光成像和红外热波成像图像后,对五种经典图像边缘算子的处理效果进行比较。主要分析积冰轮廓的完整度与图像纯净度两个特征。原因一是在实际操作中,边缘检测出的轮廓完整度直接决定对其积冰大小及形状等信息的认识;二是因为图像中的噪声不仅会影响检测结果图像纯净度,而且使检测出的轮廓难以辨认,也会影响到对积冰大小及形状等信息的认识。

通过比较黑色哑光面铝蒙皮下积冰的可见光成像,依据图5-图9的各边缘检测算子效果,可以看到:五种经典图像边缘算子均具有可以明确的识别出圆形积冰的轮廓的能力,且图像纯净度高。其中,Sobel算子、Canny算子的画面噪点最少,而Log算子及Prewitt算子的画面噪点稍多,且两者积冰轮廓的画面连续性较差。相比较之下,Roberts算子同时具备了噪点少和连续性好的特点,所以综合而言,可见光成像下Roberts算子处理效果最好。

通过比较红外热波检测的积冰试件图像,根据图5-图9的各边缘检测算子效果可见:五种经典边缘检测算子均可识别出积冰轮廓的范围,纯净度高,完整度高。其中Roberts算子和Sobel算子的轮廓完整度和纯净度都较高,Prewitt算子稍次之,而Log算子的轮廓处理效果最差,甚至出现了与轮廓边缘相平行的线段。综合而言,红外热波成像下依旧是Roberts算子处理效果较好。

综上所述,运用五种算子在进行积冰冰形的图像处理时:(1)通过可见光成像方式所提取的铝制蒙皮积冰轮廓,会因为铝皮的反射等干扰条件导致图像出现大量影响图像纯净度的噪声。这些噪声会直接掩盖一部分的积冰轮廓,从而无法直接探测出积冰轮廓的全貌。(2)通过红外热波成像方式所提取的铝制蒙皮积冰轮廓,相比较可见光成像方式,因其红外热波成像的原理是利用物体的红外光谱散发的电磁辐射强度来成像,且红外检测装置可阻隔外部大部分光线,达到有效减少铝皮反射等干扰条件。

因此,其图像会比可见光成像图像的纯净度更高,且探测积冰轮廓的完整度变高。(3)在红外热波成像与可见光成像的分析比较中,Roberts算子在处理结果中边缘完整度及图像纯净度都较好,而Canny算子的处理结果次之,Prewitt与Sobel算子表现一般,而Log算子因轮廓边缘都有与其相平行的线段出现,因此认为Log算子的效果在五种经典边缘检测算子中最差。

## 5 结束语

本文探索了利用红外热波技术进行试验蒙皮外的积冰冰形检测实验,并比较了五种传统边缘检测算子对积冰可见光与红外热波成像完整度与纯净度的影响,发现红外热波检测图像比可见光探测的纯净度与完整度要好,同时Robert算子在此计算过程中的效果最佳。该实验方法及相关结论可为飞机积冰冰形检测提供新的研究思路。

## 参考文献

- [1] 周莉,徐浩军,龚胜科,等.飞机结冰特性及防除冰技术研究[J].中国安全科学学报,2010,20(6):105-110.
- [2] 蒋天俊.结冰对飞机飞行性能影响的研究[D].南京:南京航空航天大学,2008.
- [3] GENEST M, MARTINEZ M, MRAD N, et al. Pulsed thermography for non-destructive evaluation and damage growth monitoring of bonded repairs[J]. Composite Structures, 2009, 88(1):112-120.
- [4] TAIMUR RASHID, HASSAN A, EDVARSDEN KÅRE, et al. Infrared Thermal Signature Evaluation of a Pure Ice Block[C]// Venice: The Ninth International Conference on Sensor Technologies and Applications, 2015:116-119.
- [5] 段瑞玲,李庆祥,李玉和.图像边缘检测方法研究综述[J].光学技术, 2005(3):415-419.
- [6] Rafael C. Gonzalez. Digital image processing using MATLAB[M]. Upper Saddle River; Prentice Hall, 2003:232-236.
- [7] 董鸿燕.边缘检测的若干技术研究[D].国防科学技术大学, 2008
- [8] 金胜昔.一种基于robert算子的红外图象小目标检测算法[J].电脑知识与技术,2008(12):514,536.
- [9] 张建军,罗静.基于改进Sobel算子的表面裂纹边缘检测算法[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2011,34(6):845-847,960.
- [10] 樊娜,李晋惠.图像边缘检测的Prewitt算子的改进算法[J].西安工业大学学报,2005(1):37-39,44.
- [11] 潘夏英.图像边缘检测技术的研究[D].西安科技大学,2011.
- [12] BAO P, ZHANG Lei, WU Xiaolin. Canny edge detection enhancement by scale multiplication[J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2005,27(9):1485-1490.

(上接第130页)

## 参考文献

- [1] 沈澍,蒋维乐,单玥,等.基于无线传感网的古建筑健康监测技术[J].中国测试,2017,43(11):64-69.
- [2] 赫亮,崔晓飞,张朝荃,等.智能灯光控制系统的设计[J].现代建筑电气,2017,11(10):39-42.
- [3] 李铁鹰,秦茂盛.基于Zigbee技术的家用安防系统设计[J].仪器仪表用户,2011,18(4):27-29.
- [4] 徐理政,张云翔.基于Zigbee和LabVIEW的温室温度检测系统[J].智能计算机与应用,2019,9(3):263-265.
- [5] 向红标,巴简程,杨璐,等.基于Arduino的智能楼宇无线多传感器监控系统设计[J].中国测试,2019,45(3):95-100.
- [6] LEE Z H, WANG Y D. Design of wireless monitoring system for electric equipment based on CC2530[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 1074-1078.