

文章编号 1004-924X(2011)06-1250-06

# 复合材料结构机翼表面残冰的近红外多光谱检测

高建树<sup>1</sup>, 韩仁义<sup>2\*</sup>, 于之靖<sup>2</sup>, 乔文<sup>2</sup>

(1. 天津大学 精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072;

2. 中国民航大学 航空自动化学院, 天津 300300)

**摘要:**提出了一种新的近红外多光谱检测法对碳纤维复合材料结构机翼表面的残冰进行检测。建立了该方法的理论模型并进行了实验验证。首先,根据冰与水 and 除冰液在不同红外波段下具有不同反射光谱特性,提出了用于残冰检测的理论算法。然后对参考通道,低通道及高通道所测图像的灰度值进行比较分析,总结得到了判断机翼蒙皮上残冰存在的对比度阈值  $C$ 。最后,分析了误差可能产生的区间及消除方法。实验结果表明,对于白色涂层的复合材料结构蒙皮,当  $C > 0.03$  时,就可以断定结构表面上存在残冰;当  $C < 0$  时,可以断定表面上肯定没有冰;当  $C$  处于  $0 \sim 0.03$  时,为安全起见需要对蒙皮进行二次检查以消除不确定因素产生的误差。而对于其他颜色涂层蒙皮的残冰检测,要根据不同的颜色设定不同的对比度阈值  $C$ 。本研究证明了可以将冰与水的近红外反射光谱差异特性应用到以复合材料结构为机翼蒙皮的残冰检测中。

**关键词:**近红外多光谱;残冰检测;机翼蒙皮;对比度

**中图分类号:**V267.3;O434.33 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111906.1250

## Near infrared multispectral solution to ice detection on CF composite material wings

GAO Jian-shu<sup>1</sup>, HAN Ren-yi<sup>2\*</sup>, YU Zhi-jing<sup>2</sup>, QIAO Wen<sup>2</sup>

(1. College of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Aeronautical Automation College, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

\* Corresponding author, E-mail: hry0519@163.com

**Abstract:** In order to realize the ice detection for aircraft wings made of carbon fiber composite materials, a near infrared multispectral solution to ice detection and measurement is presented. Firstly, a new algorithm for ice detection is proposed based on the different reflectance spectra of water and ice in a certain wavelength band. Then, by analyzing the gray value of reflectance spectra between water and ice detected in the reference sub-band, the lower sub-band and the upper sub-band, the threshold of contrast  $C$  to ice detection and measurement on aircraft wings is determined. Finally, this paper analyses the position region of contrast  $C$  that error may happen in the measurement, and describes the method to eliminate the error. Experimental results show that for the white painted wing, if the contrast is greater than 0.03, it is considered that the ice is present on the surface; but if the contrast is

收稿日期:2010-12-27;修订日期:2011-02-27.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60939001)

less than zero, no ice is present. While the contrast is between zero and 0.03, a second detection should be done to reduce or eliminate the effects of uncertain factors. Furthermore, while the aluminum is painted by other colors, different thresholds of contrast should be set to remove this effect. It is proved that the different reflectance spectra of water and ice in a certain wavelength band can be used to detect and measure the ice on aircraft wings made of carbon fiber composite materials.

**Key words:** near infrared multispectra; ice detection; aircraft wing; contrast

## 1 引言

飞机除冰问题已经成为影响民航冬季安全运行的重要因素之一<sup>[1]</sup>。据美国国家运输安全委员会(NTSB)统计,1981~1988年的7年期间,美国共发生542起飞机因结冰而引起的飞行事故,其中约有一半事故是因机体结冰造成的。为防止此类事故的发生,在飞机起飞前都需对其进行除冰和残冰检测。目前对残冰进行检测主要采用人工法,即由防冰员对飞机除冰区域进行视觉或触觉检查,以判断是否还存在剩余冰块。有关研究表明,采用视觉检查法在残冰区域较少的情况下具有很高的失误率,而触觉检查法由于需要防冰员直接接触飞机表面,因而具有检查速度慢、受活动范围限制的缺点,有时还带有一定的危险性<sup>[2]</sup>。

基于以上存在的问题,国外已有机构开始研究和开发地面结冰检测系统(Ground Ice Detection System, GIDS)来替代人工视觉和触觉检测方法<sup>[3-5]</sup>。典型的有MDA的Ice Camera和Goodrich Aerospace的Goodrich IceHawk。前者采用的是多光谱红外成像检测法,可以检测厚度0.5 mm以上的结冰;后者采用的是激光检测法,由于检测效率低,目前仍处于实验室研究阶段。这两种方法都是基于以铝为机翼蒙皮结构而进行的残冰检测研究,对以复合材料结构件为蒙皮的红外光谱特性研究却相对较少。然而,现在的飞机蒙皮结构已经很多采用复合材料,而复合材料结构件的光谱特性与铝材料结构件存在着很大差异。国内现在对飞机残冰检测主要涉及到结冰传感器的设计<sup>[6-9]</sup>以及对机翼的结冰机理进行数值模拟和风洞试验研究<sup>[10-11]</sup>,对用红外光谱法进行残冰探测的研究涉及得很少。

考虑到目前Goodrich IceHawk的缺陷和Ice Camera的不足,以及近红外光谱分析技术无须对样品进行任何预处理和检测速度快的优势,本文

采用近红外反射光谱法对飞机机翼复合材料结构件表面的残冰进行红外光谱分析<sup>[12]</sup>,研究其光谱特性,以找到一种全新的自动化方法用于机翼表面的残冰检测。相比人工视觉法、触觉法,该方法在准确率、出错率和稳定性方面都要好一些,可以大大提高除冰的工作效率和效果,因而具有较好的研究价值和发展前景。

## 2 近红外多光谱残冰检测原理

建立在飞机机体表面3种状态(清洁表面、水、残冰)的反射模型基础上的红外多光谱残冰检测方法是基于不同被测体的红外反射率随着波长的变化而变化,并且对于不同的材料其反射率在特定光谱范围内存在明显差异<sup>[13-15]</sup>,利用这些差异可以实现被测区域表面状态的区分。实现飞机残冰检测的前提条件是建立正确的基于飞机蒙皮表面的残冰反射/吸收模型。因此根据飞机蒙皮结构特点,本文建立的水或冰的光谱反射/吸收模型如图1所示:

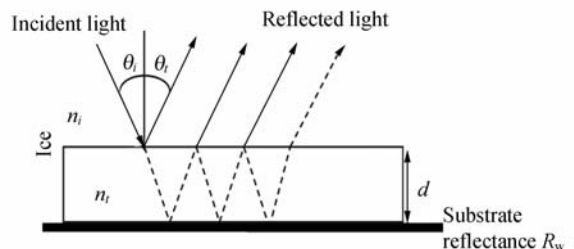


图1 飞机蒙皮表面水或冰的光谱反射/吸收模型  
Fig. 1 Mathematical model of light reflected from ice and water on aircraft wings made of carbon fiber composite materials

当近红外光照射在附有一层电介质(冰或水)的基底(此处为蒙皮)上时,一部分光直接在空气与电介质的接触面发生反射,其余的光进入电介质。透过电介质的光继续传播直到从基底反射回

来,从基底反射回来的光到达空气与电介质的表面时再次发生反射,一部分返回空气,另一部分仍旧反射回电介质。在光传播的过程中一部分会被电介质和基底吸收。反射回电介质的光仍旧不断地在电介质内发生循环,直到所有的光都被吸收或反射回空气。由于水或冰在特定的波长范围内对红外光的吸收率和反射率不同,因此能得到两者不同的反射光谱。

假设电介质的厚度为  $d$ ,实际的反射率可由如下式子得到:

$$R_e(\lambda, \theta_i) = R(\lambda, \theta_i) + (1 - R(\lambda, \theta_i))^2 R_w(\lambda) e^{-2a(\lambda)d} + (1 - R(\lambda, \theta_i))^2 R_w(\lambda)^2 R(\lambda, \theta_i) e^{-4a(\lambda)d} + (1 - R(\lambda, \theta_i))^2 R_w(\lambda)^3 R(\lambda, \theta_i)^2 e^{-6a(\lambda)d} + \dots + (1 - R(\lambda, \theta_i))^2 R_w(\lambda)^n R(\lambda, \theta_i)^{(n-1)} e^{-2na(\lambda)d} (n \rightarrow \infty) = R(\lambda, \theta_i) + \left[ \frac{(1 - R(\lambda, \theta_i))^2 R_w(\lambda) e^{-2a(\lambda)d}}{1 - R(\lambda, \theta_i) R_w(\lambda) e^{-2a(\lambda)d}} \right]$$

其中  $R_e(\lambda, \theta_i)$  为实际反射率,  $R(\lambda, \theta_i)$  为电介质的光谱反射率,  $a(\lambda)$  为光谱的吸收率,  $R_w(\lambda)$  为基底的光谱反射率。

将垂直入射光分别照射在 2 mm 厚的冰与水上,通过计算机可求出其在近红外区的光谱反射率如图 2 所示<sup>[16]</sup>。

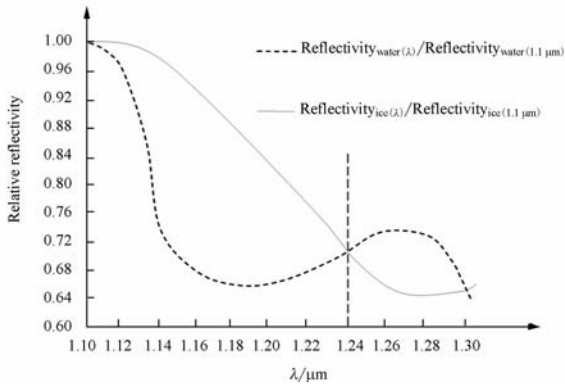


图 2 水和冰在近红外光谱下的相对反射率曲线

Fig. 2 Relative spectral reflectivity of ice and water

从图中可以看出,水和冰的反射率在近红外光谱下的 1.1~1.3  $\mu\text{m}$  区间内有明显差异,转折点大约在 1.24  $\mu\text{m}$ 。因此通过在 1.1~1.24  $\mu\text{m}$  和 1.24~1.3  $\mu\text{m}$  两个光谱区内选取两个合适波长下的反射强度进行分析,如果表面覆盖为残冰,则低波段(1.16~1.20  $\mu\text{m}$ )反射光强度高于高波段(1.24~1.28  $\mu\text{m}$ )反射光强度;反之,如果表面覆盖为水,则低波段反射光强度低于高波段反射

光强度。因此根据两个波段的反射光强度的差值大小可判断反射表面覆盖的是水还是冰。

根据曲线上各个波段的值,选取低波段为 1.16  $\mu\text{m}$  处反射光强度用  $R_L$  来表示,高波段为 1.26  $\mu\text{m}$  处的反射光强度用  $R_U$  来表示,且两个波段的光具有相同的带宽。表示二者差异的量,即对比度  $C$  可以用下式来进行表示:  $C = \frac{R_L - R_U}{R_L + R_U}$ 。

由于照射在待测物体表面的光强不能确定,利用对比度  $C$  将会大大减小由于光强不同而产生的误差。如果  $C$  为正,则认为有冰覆盖在表面,反之,如果对比度为负,则认为没有冰覆盖在表面。并可以根据对比度  $C$  的大小关系判断冰层的厚度。

对于除冰后的蒙皮表面的残冰检测,由于蒙皮上存在除冰液,而实验发现除冰液在 1.1~1.3  $\mu\text{m}$  光谱区内的反射率曲线与水的基本相同,因此除冰液的存在与否不会影响实验对残冰的检测,可以采用该方法检测除冰后残冰存在与否及残冰存在的区域及其厚度。

### 3 数据采集和分析

在实验室环境下,利用高低温试验箱对一块面积约 1  $\text{m}^2$  的复合材料结构的飞机机翼蒙皮做冰和水的实验。实验采用比利时 XenlCs 公司生产的型号为 XEVA-658 的红外相机,以及美国 CrownTech 公司生产的型号为 CTTH-150W 的高稳定光源。所采用的自动残冰检测系统如图 3 所示,左侧三角架所支撑的为光源,右侧三角架所支撑的为红外相机,相机前面的设备为高低温试验箱。实验时,将飞机蒙皮材料放入试验箱进行冷冻,通过设置箱体内部的环境参数,使蒙皮表面附上一层实验所需求的冰,然后打开试验箱即可进行数据采集。

实验分 4 组进行,各组实验所对应的环境参数如表 1 所示。根据冰与水的特性,选取了 3 块滤波片,所能通过的光谱波段分别为 1.1, 1.16, 1.26  $\mu\text{m}$ 。针对各组实验,分别对每个通道的蒙皮表面连续采集 5 次数据。

数据采集完后,将每一通道的 5 幅图通过灰



图 3 自动残冰检测系统

Fig. 3 Automatic ice detection system

度值求平均得到 1 幅新的图,以降低由于外界因素和系统原因造成的误差。最后,每组实验均获得 3 幅图像,其中每幅图像的大小为  $320 \times 256$  (长 $\times$ 宽)。

对于每组图像数据,分别求同一坐标值下某一点在各通道的图像灰度值,并求其对比度  $C$ 。本文对每组实验均随机选取了 1 组数据列表如表 2 所示。

表 1 实验环境对照

Tab. 1 Comparison of experiment environment

| 组别    | 实验项目      | 实验外界光照 | 实验温度/ $^{\circ}\text{C}$ |
|-------|-----------|--------|--------------------------|
| 第 1 组 | 干燥板       | 相同     | -15                      |
| 第 2 组 | 水         | 相同     | 20                       |
| 第 3 组 | 冰厚 0.5 mm | 相同     | -15                      |
| 第 4 组 | 冰厚 1 mm   | 相同     | -15                      |

表 2 某一点灰度值和对比度

Tab. 2 Gray value and contrast at a point

| 组别       | 1.1 $\mu\text{m}$ | 1.16 $\mu\text{m}$ | 1.26 $\mu\text{m}$ | 对比度 $C = \frac{R_L - R_U}{R_L + R_U}$ |
|----------|-------------------|--------------------|--------------------|---------------------------------------|
| 干净表面     | 209               | 141                | 143                | -0.007                                |
| 水 2 mm   | 197               | 66                 | 74                 | -0.057                                |
| 冰 0.5 mm | 143               | 88                 | 77                 | 0.067                                 |
| 冰 1 mm   | 141               | 83                 | 68                 | 0.099                                 |

同理,根据以上实验方法,对于每组实验,在  $320 \times 256$  的点阵图像上均随机选取了 100 个试验点进行研究,求出每个点在同一坐标值下各个通道的灰度值和对比度  $C$ ,并对对比度  $C$  进行区间统计,得到对比度分布图如图 4 所示。

从图 4 中可以发现,干净蒙皮表面的对比度  $C$  主要处在  $-0.01 \sim 0$  这个区间;附有水的表面的对比度  $C$  主要处在区间  $-0.06 \sim -0.04$ ,附有 0.5 毫米左右冰的蒙皮表面的对比度主要处在区间  $0.05 \sim 0.07$ ,附有 1 毫米左右冰的蒙皮表面的对比度主要处在区间  $0.09 \sim 0.11$ 。同时可以发现随着冰的厚度的增加,对比度也随着增加。

本文根据以上数据得到如下结论:白色涂层的复合材料结构件在讨论的低波段和高波段的反射率几乎相同,对比度  $C$  接近于 0。因此无论其上面有没有冰或水,其对实验测量结果所产生影响都会很小,此处可以忽略。当对比度  $C > 0.03$  时,就可以断定结构件表面上存在残冰;当  $C < 0$  时,可以断定表面上肯定没有冰;当  $C$  处于  $0 \sim 0.03$  时不能确定是否有冰存在。

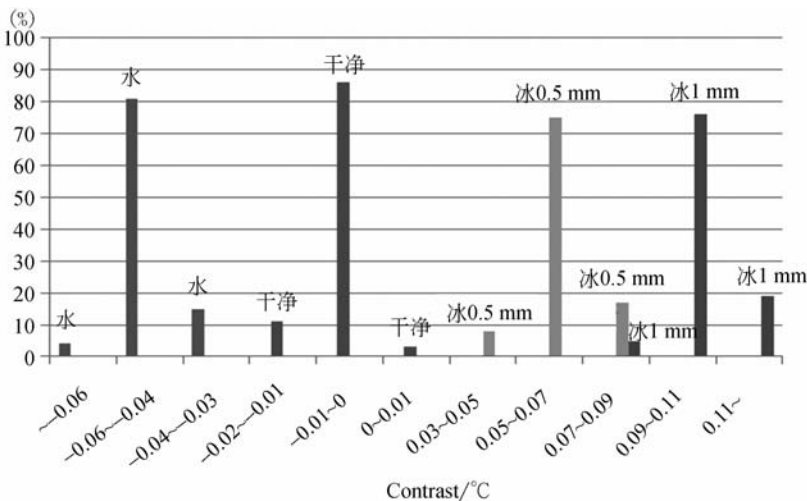


图 4 对比度分布图

Fig. 4 Contrast distribution map

本实验可能存在的误差是在  $C$  处于区间  $0 \sim 0.03$  时,此时无法判断蒙皮上是否有冰存在。无论有冰与否, $C$  处于这个区间的概率都比较小,假若出现这种情况,从安全起见需要对蒙皮进行二次检查,以消除不确定因素产生的误差。对于其他颜色喷涂的复合材料结构件,其在所讨论的低波段和高波段的反射率是不一样的,为了消除这种影响,判断一个表面上是否有冰应该根据不同的颜色设定不同的对比度阈值  $C$ ,这个数值的大小取决于喷涂的颜色。

## 4 结 论

本文针对冰和水的近红外反射光谱特性进行了理论研究,并对碳纤维复合材料结构蒙皮的表面光谱进行了实验验证和数据分析。实验结果表明:当对比度  $C > 0.03$  时,就可以断定结构件表面上存在残冰;当  $C < 0$  时,可以断定表面上肯定没有冰;当  $C$  处于  $0 \sim 0.03$  时需要蒙皮进行二次测量。实验证明了可以将冰与水的近红外反射光谱差异特性应用到以复合材料结构为机翼蒙皮的残冰检测中。

## 参考文献:

- [1] 陈年旭,桑为民,陈迎春,等.民用飞机结冰研究相关技术及进展[J].飞行力学,2007,27(5):11-14.  
CHEN N X, SANG W M, CHEN Y C, *et al.*. Development and technologies to the study of civil aircraft icing[J]. *Flight Dynamics*, 2007, 27(5): 11-14. (in Chinese)
- [2] TERRACE S M, BENDER K D, SIERRA E A, *et al.*. Comparison of human ice detection capabilities and ground ice detection system performance under post deicing conditions [C]. *Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings*, 2006:2051-2055(5).
- [3] BLAIR A B. Ice monitoring and detection system; United States Patent; 005557261A [P]. 1996-9-17.
- [4] GREGORIS D, ONTARIO J E. Electro-Optic ice detection; European patent; 0785890B1 [P]. 1996-5-9.
- [5] Robert E. Gagnon. Method and apparatus for layer thickness measurement; United States Patent; 0074415A1 [P]. 2007-4-5.
- [6] 王颖.压电谐振式结冰传感器数学模型研究[D].湖北:华中科技大学,2008.  
WANG Y. *Modeling of Resonant Piezoelectric Ice Sensor* [D]. Hubei: Huazhong University of Science and Technology, 2008. (in Chinese)
- [7] 李薇,叶林,张杰,等.光纤式结冰传感器的试验研究[J].华中科技大学学报(自然科学版),2009,37(8):16-22.  
LI W, YE L, ZHANG J, *et al.*. Experimental study on the fiber-optic sensor for direct ice detection[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2009, 37(8): 16-22. (in Chinese)
- [8] 李薇,陈迎春,张森,等.基于光波导技术的新型飞机结冰探测系统[J].仪表技术与传感器,2009,(12):85-87.  
LI W, CHEN Y CH, ZHANG M, *et al.*. Novel icing detection system based on optical waveguide technique[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2009, (12): 85-87. (in Chinese)
- [9] 王起达,王同光.机翼结冰探测技术进展[J].航空制造技术,2009,(3):62-64.  
WANG Q D, WANG T G. Development of detecting icing technology for aircraft wing[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2009, (3): 62-64. (in Chinese)
- [10] 范杰川,于涛.飞机结冰风洞试验模拟研究[J].试验流体力学,2007,21(01):68-74.  
FAN J CH, YU T. A study of simulation for airplane icing tests in icing wind tunnel[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2007, 21(01): 68-74. (in Chinese)
- [11] 朱春玲,李宇钦,张泉.基于旋转多圆柱的冰风洞水滴参数分析方法[J].航空动力学报,2007,22(2):180-186.  
ZHU CH L, LI Y Q, ZHANG Q. Analysis meth-

od of droplets parameters based on rotating multi-cylinder in an icing wind tunnel[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2007, 22(2): 180-186. (in Chinese)

- [12] 文峰,罗志全. 自然光在反射与折射过程中的能量分配[J]. 西华师范大学学报(自然科学版), 2008, 29(2): 208-211.

WEN F, LUO ZH Q. Energy distribution of natural light in the process of reflection and refraction [J]. *Journal of China West Normal University (Natural Sciences)*, 2008, 29(2): 208-211. (in Chinese)

- [13] 姜良广,孙鹏. 水的折射率与波长间函数关系的模型[J]. 光谱实验室, 2002, 19(4): 554-556.

JIANG L G, SUN P. Models of the wavelength

dependence for the index of refraction of water[J]. *Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory*, 2002, 19(4): 554-556. (in Chinese)

- [14] PALMER K F, WILLIAMS D. Optical properties of water in the near infrared[J]. *JOSA*, 1974, 64(8): 1107-1110.

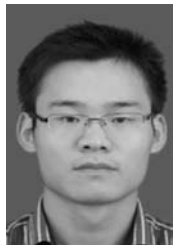
- [15] CLARK R N. Water frost and ice: the near-infrared spectral reflectance 0.65-2.5  $\mu\text{m}$ [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1981, 86(B4): 3087-3096.

- [16] MEITZLER T, BRYK D, SOHN E, et al.. An infrared solution to a national priority NASA ice detection and measurement problem[C]. *NASA Kennedy Space Center*, 2007.

#### 作者简介:



高建树(1966—),男,河南周口人,博士研究生,研究员,硕士生导师,1993年于燕山大学获得硕士学位,主要从事机场除冰雪系统,以及机场特种设备的研究。E-mail: gjianshu@yahoo.com



韩仁义(1986—),男,浙江杭州人,硕士研究生,2009年于浙江理工大学获得学士学位,主要从事基于近红外多光谱特性的机翼表面残冰检测研究。E-mail: hry0519@163.com



于之靖(1963—),男,河北沧州人,博士,教授,博士生导师,1996于燕山大学获得硕士学位,2003年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事自动化测试技术、光纤传感技术和计算机视觉测量等方面的研究及教学工作。E-mail: hit\_yu@126.com



乔文(1987—),男,陕西宝鸡人,硕士研究生,2009年于中南大学获得学士学位,主要从事基于近红外多光谱特性的机翼表面残冰检测与定位的研究。E-mail: wqiao\_yjs09@cauc.edu.cn