

机翼铝蒙皮积冰及冰厚的近红外多光谱检测

高建树¹, 郑大川², 于之靖², 诸葛晶昌²

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:提出一种机翼铝蒙皮积冰及冰厚的近红外多光谱检测方法,并根据理论模型进行实验验证。首先,根据冰和水在近红外光谱下的光谱曲线不同,取 $1.16\ \mu\text{m}$ 和 $1.26\ \mu\text{m}$ 两个通道的图像的灰度值,求得对比度 C 值;然后,通过实验获得 C 的阈值 C_{th} 。 $C > C_{th}$ 时,则认为是冰, $C < C_{th}$ 时,则认为没有冰,以此法来识别铝蒙皮表面上积冰的位置。本文通过实验证明了冰厚与对比度 C 值存在线性关系。根据 C_{th} 和线性比例系数 k 两个参数,由对比度 C 值的大小,可以获得冰的厚度值。

关键词:积冰探测;冰厚;近红外多光谱;铝蒙皮

中图分类号:TN219 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2014.04.009

Near infrared multispectral detection on icing and ice thickness of aluminum wing cover

GAO Jian-shu¹, ZHENG Da-chuan², YU Zhi-jing², ZHUGE Jing-chang²

- (1. College of precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University 300072, China;
2. Aeronautical Automation College, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: In order to distinguish the icing from aluminum wing cover and measure the ice thickness, a near infrared multispectral detection method is presented. Firstly, the contrast value C is calculated by using an algorithm for ice detection based on the different reflectance spectra between water and ice in a certain wavelength band. Then, the threshold C_{th} of C is obtained by experiments. When $C > C_{th}$, it is considered that the ice exists, vice versa. The location of the icing on the aluminum wing cover is identified. A linear relationship between ice thickness and C is also proved by the experiment. According to the value of C_{th} and k , the ice thickness is calculated.

Key words: ice detection; ice thickness; near infrared multispectral; aluminum wing cover

1 引言

飞机表面的冰、雪、霜等污染物对飞机飞行安全造成极大的危害。据美国国家运输安全委员会(NTSB)1975—1981年间飞机结冰事故数据统计。单是起飞阶段就有82%的事故是在飞机上带有霜、雪或冰的情况下强行起飞造成的,而且70%以上是灾难性事故,即致命的或对飞机产生重大的整体破坏性的事故^[1]。因此,飞机除冰问题是影响民航冬季安全的重要因素之一。目前地面积冰检测是靠除

冰检测人员的视觉和触觉来完成的。眩光引起视觉疲劳和漏检;高空作业和严寒的环境,触觉检查范围有限,作业危险。检查效率较低,花费时间较长,而除冰液的防结冰保持时间有限,可能造成二次结冰,

基金项目:国家自然科学基金(No. 60939001);中央高校基本科研业务费(No. ZXH2012C008)资助。

作者简介:高建树(1966-),男,博士研究生,研究员,硕士生导师,主要从事机场除冰雪系统以及机场特种设备的研究。E-mail: jsgao@cauc.edu.cn

收稿日期:2013-08-26

成为冬季飞机航班延误的重要原因之一^[2-3]。

飞机结冰探测技术已受到各国的极大重视,并投入了大量人力和物力进行研究^[4-13]。结冰传感器目前已比较成熟,多种测量方法都在采用,如图1所示。

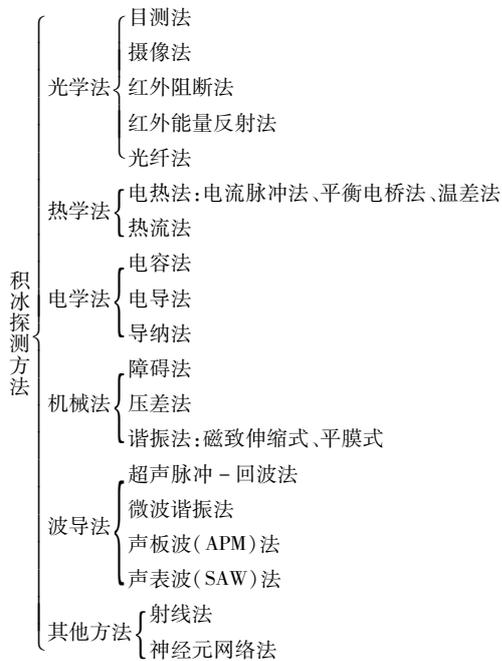


图1 结冰探测方法

在摄像法中,加拿大 spar 航空航天系统公司在加拿大运输部支持下,提出一种探冰方法。摄像机在几个不同的光谱段内,探测机翼表面反射的红外辐射,采集的图像进行后续处理识别0.2 mm的冰厚。本文在摄像法的基础上,根据冰和水在近红外光谱下的反射率不同,提出针对铝蒙皮上的积冰和冰厚的近红外多光谱探测方法。

2 理论

当基底表面覆有一层电介质(冰或水)的时候,对近红外光的影响如图2所示。一部分光在电介质与空气接触表面反射,其余光进入电介质。透过电介质传播到基底再被反射回空气与电介质接触表面,一部分返回空气,一部分再次被反射。如此重复,在传播过程中一部分光电介质和基底吸收。根据电介质的不同对近红外光的吸收率和反射率不同,得到不同的反射光谱。

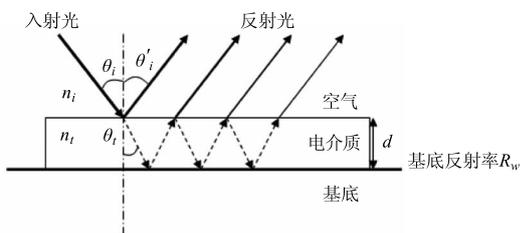


图2 飞机蒙皮表面电介质的光谱反射/吸收模型

$$R_e(\lambda, \theta_i) = R_0(\lambda, \theta_i) + (1 - R_0(\lambda, \theta_i))^2 \cdot R_w(\lambda) e^{-2a(\lambda)d} + (1 - R_0(\lambda, \theta_i))^2 \cdot R_w(\lambda)^2 R_0(\lambda, \theta_i) e^{-4a(\lambda)d} + \dots + (1 - R_0(\lambda, \theta_i))^2 R_w(\lambda)^n \cdot R_0(\lambda, \theta_i)^{(n-1)} e^{-2na(\lambda)d} (n \rightarrow \infty)$$

$$= R_0(\lambda, \theta_i) + \left[\frac{(1 - R_0(\lambda, \theta_i))^2 R_w(\lambda) e^{-2a(\lambda)d}}{1 - R_0(\lambda, \theta_i) R_w(\lambda) e^{-2a(\lambda)d}} \right] \quad (1)$$

式中, d 为冰厚; $a(\lambda)$ 为光谱的吸收率; $R_0(\lambda, \theta_i)$ 为第一次反射的光谱反射率; $R_w(\lambda)$ 为基底的光谱反射率; $R_e(\lambda, \theta_i)$ 为实际反射率。

残冰检测的原理^[5]由图3可知。选取低波段为1.16 μm 处反射光强度用 R_L 来表示,高波段为1.26 μm 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,可得:

$$C = \frac{R_L - R_U}{R_L + R_U} \quad (2)$$

通过光谱对比度 C 值的大小和阈值的设定来判定冰的有无以及厚度。

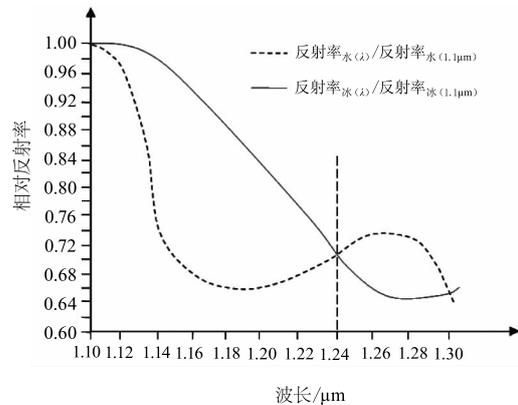


图3 水和冰在近红外光谱下的相对反射率曲线

3 实验

实验使用近红外像机为比利时 Xenics 公司的 Xeva-2858。

实验环境为阴天,环境光稳定。在机翼蒙皮使用的铝合金 2024 上,分多次喷洒冰并结冻成冰,由测冰厚传感器记录每次喷洒后冰的厚度的变化,同时使用近红外像机采集在 1.10, 1.16, 1.26 和 1.28 μm 四个通道数据,每个通道所使用的滤光片带宽相同。图像如图4所示。



(a) 1.10 μm 参考通道 (b) 1.16 μm 通道 (c) 1.26 μm 通道 (d) 1.28 μm 通道

图4 四个近红外通道的图像

4 数据分析

铝在近红外波段反射率很高,图5所示其对应的灰度值最高,并且其光谱曲线反应的是外界环境光的近红外光谱;而结冰位置随着冰厚的增加,由式(1)可知,图像的灰度值减小,且光谱曲线也随之变化;归一化后的四通道的灰度值,则更清晰反映了随着冰厚的增加,该近红外波段光谱曲线的变化。原因在于,水结冰后在 1.26 μm 附近存在一个近红外光谱吸收峰,随着冰厚的增加,吸收率增加,反射率则相对减小。

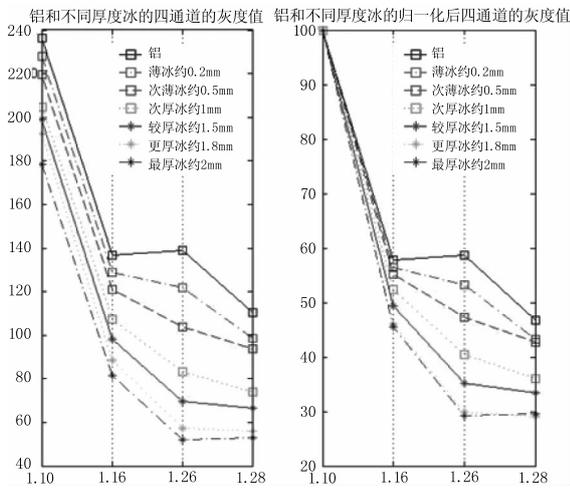


图5 铝和不同厚度冰的四个通道的灰度值

根据式(2)求得的对比度 C 值分布(如图6所示)并与冰厚存在线性关系(如图7所示)。可得公式(3)由此估算冰厚:

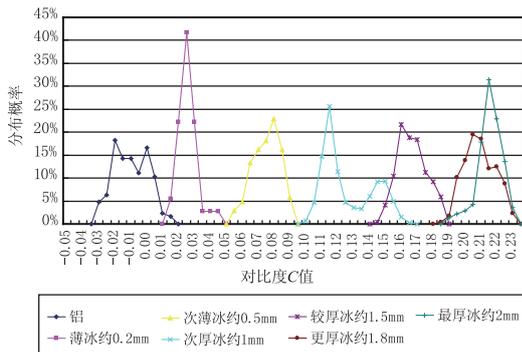


图6 铝和不同厚度冰的对比度 C 值

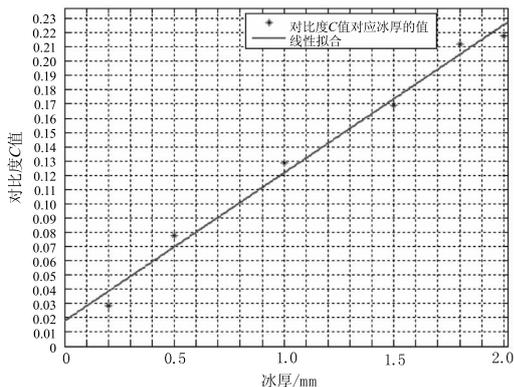


图7 对比度 C 值与冰厚的关系

$$d = k \times (C - C_{th}) \tag{3}$$

其中, d 为冰厚; k 为冰厚与对比度 C 值的线性比例系数(根据实验数据 k = 9.625); C_{th} 为铝蒙皮上积冰识别的阈值, C > C_{th} 时,则认为是冰, C < C_{th} 时,则认为没有冰(根据实验数据 C_{th} = 0.0178)。

5 结论

通过实验验证可得,本文提出近红外多光谱检测方法可以应用与铝蒙皮表面的积冰和冰厚的检测。本文实验数据在阴天情况下获得,不同的天气环境[14-15]光谱曲线存在变化,对于对比度 C 值与冰厚的线性关系存在影响,即对线性比例系数 k 和阈值 C_{th} 存在影响。因此,在后续研究中加入积分球对外界环境光进行补偿。

参考文献:

- [1] XIE Yi. Aircraft icing accidents statistical analysis[J]. Overseas flight, 1996(3): 23-28. (in Chinese)
谢毅. 飞机结冰事故的统计分析[J]. 国外试飞, 1996(3): 23-28.
- [2] Edmundo A Sierra Jr, Kimberlea Bender, Isabelle Marcil, et al. Human visual and tactile ice detection capabilities under aircraft post deicing conditions [C]//William J. Hughes Technical Center IRC. Springfield, Virginia; Nation Technical Information Service(NTIS), 2006.
- [3] Doug Ingold. Gambit holdover time determination system (HOTDS) canadian regulatory initiatives [C]. 2007 SAE Aircraft & Engine Icing International Conference and Exhibition. Seville, Spain; 2007-9-24.
- [4] ZHANG Jie, ZHOU Lei, ZHANG Hong, et al. Aircraft icing detection technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(12): 1578-1586. (in Chinese)
张杰, 周磊, 张洪, 等. 飞机结冰探测技术[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(12): 1578-1586.
- [5] GAO Jianshu, HAN Renyi, YU Zhijing, et al. Near infrared multispectral solution to ice detection on CF composite material wings [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(6): 1250-1255. (in Chinese)
高建树, 韩仁义, 于之靖. 复合材料结构机翼表面残冰的近红外多光谱检测[J]. 光学精密工程, 2011, 19(6): 1250-1255.
- [6] YE Lin, WANG Ying, HUANG Qin, et al. The study on the method of icing-thickness measuring based on imaging [J]. Measurement and Testing, 2006, 33(6): 4-5, 8. (in Chinese)
叶林, 王颖, 黄琴, 等. 基于摄像的结冰厚度测量方法的研究[J]. 计量与测试技术, 2006, 33(6): 4-5, 8.
- [7] WANG Hua, WANG Yilun, ZHANG Binhua. Theory of

- designing ice detector based on magnetostriction [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18 (6): 77280. (in Chinese)
- 王华, 王以伦, 张滨华. 基于磁致伸缩原理的结冰传感器设计理论[J]. 电工技术学报, 2003, 18(6): 77280.
- [8] Pimpecml. Ultrasonic technology: a solution for inflight and onground ice detection [D]. ICAS and the American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1992, 03: 126.
- [9] YIN Shengsheng, CHEN Bin, GE Junfeng, et al. Fiber-optical icing sensor for detecting the icing type [J]. Instrument Technique and Sensor, 2012 (5): 9 - 11, 23. (in Chinese)
- 尹胜生, 陈斌, 葛俊锋, 等. 可识别冰型的光纤结冰传感器[J]. 仪表技术与传感器, 2012, (5): 9 - 11, 23.
- [10] LI Zongxing, CHEN Deyong, WANG Junbo. Design and fabrication of MEMS strain gauge icing sensors [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2011, 24 (8): 1108 - 1113. (in Chinese)
- 李宗兴, 陈德勇, 王军波. MEMS 应变式结冰传感器设计与制作 [J]. 传感技术学报, 2011, 24 (8): 1108 - 1113.
- [11] Blair A Barbour. Ice monitoring and detection system [P]. United States patent, 005557261A, 1996 - 9 - 17.
- [12] Gregiris, Dennis, John Etobicoke. Electro-Optic ice detection [P]. European patent, 0785890B1, 1996 - 5 - 9.
- [13] Robert E Gagnon. Method and apparatus for layer thickness measurement [P]. United States patent, 0074415A1, 2007 - 4 - 5.
- [14] CHEN Xiuhong, WEI Heli. Variation of infrared Atmospheric transmittance based on atmospheric models in typical regions of china [J]. Laser & Infrared, 2008, 38 (11): 1090 - 1093. (in Chinese)
- 陈秀红, 魏合理. 基于中国典型地区大气模式的红外透过率变化特征 [J]. 激光与红外, 2008, 38 (11): 1090 - 1093.
- [15] LI Xuebin, GONG Chunwen, LI Chao, et al. Size distribution and attenuation for infrared radiation of fog particles [J]. Laser & Infrared, 2009, 39 (7): 1090 - 1093. (in Chinese)
- 李学彬, 宫纯文, 李超, 等. 雾滴谱分布和雾对红外的衰减 [J]. 激光与红外, 2009, 39 (7): 1090 - 1093.