

# 基于支持向量机的 主动红外式结冰冰型分类方法研究\*

张 镇, 叶 林, 陆海鹰, 周建军, 吴相林, 孙忠周

(华中科技大学 控制科学与工程系, 武汉 430074)

**摘 要:** 针对飞机机翼等部位的结冰探测, 提出了一种主动式红外结冰冰型分类的方法。该方法基于支持向量机, 通过测量不同冰型结冰表面的红外激光反射系数, 达到对结冰冰型分类的目的。初步试验结果表明, 该方法能够以一定的准确性对物体结冰的冰型进行实时动态分类, 为飞机结冰探测提供了一种新的技术思路。

**关键词:** 冰型分类; 支持向量机; 结冰冰型; 红外探测

中图分类号: V244.15 文献标志码: A 文章编号: 1001-3695(2010)07-2560-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2010.07.044

## Active infrared method of ice type classification based on SVM

ZHANG Zhen, YE Lin, LU Hai-ying, ZHOU Jian-jun, WU Xiang-lin, SUN Zhong-zhou

(Dept. of Control Science & Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** This paper proposed an active infrared method to classify the ice types with the purpose of detecting icing on aircraft airfoils. This method was based on support vector machine technique by detecting reflection coefficients to infrared laser beam as to realize the classification of ice types. The initial experiment results show that the method is feasible in real-time classifying ice types in satisfying accuracy, which may result in a novel detection technique for aircraft icing.

**Key words:** ice type classification; support vector machine(SVM); ice type; infrared detection

结冰现象普遍存在于自然界中, 给工农业生产带来了诸多不便, 甚至造成安全事故。因此, 开展结冰探测器的研究变得日益重要, 欧美等国家都在进行结冰探测器研制, 国内在这方面的研究也正在进行中。结冰探测器是用来探测物体表面的结冰信息, 它能准确探测出物体表面的结冰状态并给出结冰告警信号, 目前国内外开发出的结冰探测器的种类及探测方法已有十多种<sup>[1]</sup>。大部分结冰探测器是以探测结冰程度为目的, 但是不同的结冰冰型也会造成不同的安全事故<sup>[2]</sup>, 因此对物体表面结冰冰型的分类也是具有重大意义的。

本文针对飞机机翼结冰的特点, 提出一种新型的主动式红外结冰探测方法。该方法采用红外激光直接照射物体的结冰表面, 通过物体结冰表面反射回来的激光回波能量提取不同入射角和观测角下结冰表面的反射系数, 然后运用支持向量机的方法对其进行分类; 最后给出物体表面结冰冰型的信息。

### 1 主动式红外结冰冰型分类的原理

当红外激光照射到结冰表面时, 结冰表面的反射系数会随着结冰冰型的变化而不同, 冰的物理特性研究表明: 在相同的人射角和观测角下, 结冰的冰型不同, 反射能量不同<sup>[3]</sup>。因此, 本探测方法从不同的人射角向物体的结冰表面照射, 利用光电探测器接收不同观测角下的结冰表面激光回波能量, 光电探测器将光信号转换成电信号, 随后通过放大和滤波电路处理信号, 进行 A/D 转换传输到计算机以作进一步的信号处理和

分析。探测原理如图 1 所示。

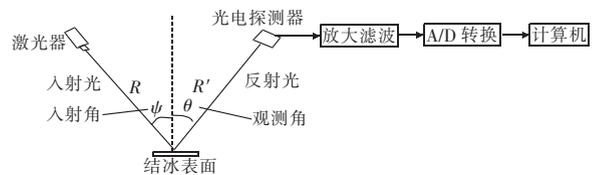


图 1 探测原理示意图

假设激光器发射的光功率为  $P_t$ , 则光电探测器接收被激光照射结冰表面反射回来的光功率  $P_r$  为<sup>[4]</sup>

$$P_r = P_t \times G \frac{\cos(\psi) \times \cos(\theta)}{R^2 \times R'^2} f(\psi, \theta) \quad (1)$$

其中:  $G$  为探测器系数;  $\psi$  为激光器入射角;  $\theta$  为探测器观测角;  $R$  为激光器与结冰表面的距离;  $R'$  为探测器与结冰表面的距离;  $f(\psi, \theta)$  为入射角为  $\psi$  和观测角为  $\theta$  下结冰表面的反射系数。这样通过改变激光器的入射角  $\psi$  和探测器的观测角  $\theta$ , 就可以知道结冰表面的反射系数  $f(\psi, \theta)$ , 便可以对结冰表面的结冰冰型进行判断。

需要指出的是, 在飞机飞行时, 采用主动式红外结冰方法对机翼结冰进行探测, 红外激光反射能量还会受背景和气象条件影响, 这些影响主要包括大气吸收、大气散射和各种雨雪天气的影响。本文选择波长为 940 nm 的红外激光器, 这一波长属于 0.4 ~ 1.3 μm 波段的大气窗口, 这一波段的反射能量的衰减系数比较小, 大气分子散射的影响可以忽略不计, 适合红外激光的探测。另外, 飞机飞行时有严格的适航条例, 如果飞

收稿日期: 2009-11-11; 修回日期: 2009-12-25 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60975030)

作者简介: 张镇(1982-), 男, 湖北武汉人, 博士研究生, 主要研究方向为结冰探测技术、传感器技术及应用、智能检测技术(zhangzhen\_hust@126.com); 叶林(1960-), 男, 湖北武汉人, 所长, 教授, 主要研究方向为新型传感器技术、智能化自动检测系统技术、飞机结冰探测传感器及信号检测处理电子系统。

机飞行中遇到雨雪天气,需要及时避开,以免造成安全事故,所以本文对雨雪天气对反射能量的影响可以不予考虑。

飞机飞行在不同的气象条件时,过冷水滴与机翼撞击、冻结等特性不同,就会导致结冰的物理过程不同。按照机翼结冰的物理过程不同,分别针对飞机机翼结冰的特点,进行以下分类:

a) 明冰。它的表面光滑、冰体透明、又叫“透明冰”“玻璃冰”。明冰的外形不规则,冰中没有气泡,冰体透明,组织致密,而且沿表面流向的分布较广。机翼表面结了这类冰,将会破坏机翼的气动外形,又由于它与机翼表面的结合力较大而难以脱落,对飞行安全造成的危害最大。

b) 凇冰。其透明度差,外表呈现乳白色,又叫“霜冰”“不透明冰”。凇冰的表面粗糙而且不透明,冰中含有气泡,组织比较松散。凇冰容易脱落,会对飞机飞行带来较大的危害。

c) 混合冰。其由凇冰和明冰混合组成,又叫“毛冰”“瓷冰”。混合冰表面粗糙,又不容易脱落,对飞行的危害不亚于明冰。

除了上述讨论的冰型外,还可以形成霜状冰,它是由于水蒸气凝华在飞机机翼表面形成的,其厚度不大,对飞机飞行影响较小。各种结冰冰型的描述如表 1 所示。

表 1 结冰冰型描述

不同冰型的描述	结冰冰型
表面光滑,冰体透明	明冰
透明度差,外表呈现乳白色	凇冰
冰表面粗糙	混合冰

通过对物体结冰表面的反射系数测量,最后达到对物体结冰冰型的分类,这是主动式红外结冰探测的根本任务。

## 2 数据标定的方法

利用式(1),可以将探测器接收到的激光回波能量信息,转换成不同观测角下的结冰表面不同入射角和观测角下的结冰表面反射系数  $f(\psi, \theta)$ 。但是由于探测器系数  $G$  确定困难,本文采用相对比较的方法对结冰表面的反射系数  $f(\psi, \theta)$  进行标定:在相同的红外激光照射下,通过使用四氟乙烯压制的标准漫反射板作为参考表面(其反射系数为  $\rho_0/\pi$ ),分别测量在相同入射角和观测角下参考表面和结冰表面的探测器输出电压为  $V(\psi, \theta)$ ,则结冰表面的反射系数可用式(2)进行计算。

$$f(\psi, \theta) = \frac{V_s(\psi, \theta)}{V_r(\psi, \theta)} \times \frac{\rho_0}{\pi} \quad (2)$$

其中:  $V_s(\psi, \theta)$  为参考表面的输出电压;  $V_r(\psi, \theta)$  为结冰表面的输出电压;  $\rho_0$  为参考表面的半球反射系数。

## 3 基于支持向量机的判别方法

本文采用支持向量机对物体表面的结冰冰型进行分类,支持向量机是在统计学理论上发展起来的一种性能优良的学习方法。支持向量机基本思想是通过非线性变换,将输入空间变换到一个高维特征空间,在这个特征空间中求取最优分类超平面,使得在原输入空间中线性不可分的数据变成线性可分<sup>[5]</sup>,并使用结构误差最小理论代替期望误差最小,支持向量机的二分类模式识别问题,是解决多分类问题的基础。

以二分类线性可分问题<sup>[6]</sup>为例,假设线性可分样本为  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_l, y_l), x \in R^n, y \in \{-1, 1\}$ 。样本学习的目标是构造一个决策函数,将测试数据尽可能正确地分类。二分类线性问题的分类面方程为

$$y_i((w \times x_i) + b) - 1 \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, l \quad (3)$$

构造最优分类面有两个条件必须满足,即经验风险最小化原则和置信范围最小。其中经验风险最小化原则满足式(3)即可,而置信范围最小条件可转换为

$$\Phi(w) = \frac{1}{2} \|w\|^2 = \frac{1}{2}(w \times w) \quad (4)$$

在数据线性可分的情况下,构造最优分类面实际上是解下面的二次约束优化问题,即

$$\begin{aligned} \min \Phi(w) &= \frac{1}{2} \|w\|^2 = \frac{1}{2}(w \times w) \\ \text{s. t. } y_i(w \times x_i + b) - 1 &\geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, l \end{aligned} \quad (5)$$

将约束化问题转换为构造 Lagrange 函数求解,由对偶原理,上述问题可被转换为

$$\begin{aligned} \max w(a) &= \sum_{i=1}^l a_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^l a_i a_j y_i y_j (x_i \times x_j) \\ \text{s. t. } \sum_{i=1}^l y_i a_i &= 0 \quad a_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, l \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)为二次规划问题,通过求解可得到最优解  $a^*$ ,随后求得  $w^*$  和  $b^*$  可以构造出划分超平面,应得分类判别函数为

$$f(x) = \text{sgn} \left\{ \sum_{i=1}^l a_i^* y_i (x_i \times x) + b^* \right\} \quad (7)$$

对线性不可分问题,可通过在其分类面方程中引入一个松弛项  $\xi_i \geq 0$  解决。当样本集为非线性可分问题时,往往是将输入样本映射到一个维数更高的特征空间,并在该空间中构造最优分类面,在这一空间求解最优分类面。

支持向量机已把分类问题转换为一个约束最优化问题,即二次规划问题。最优化学理论中的许多算法都需要利用整个 Hessian 矩阵,因此这些算法仅适用于训练集较小的情况。当样本集规模较大时,这种做法使得系统消耗急剧增大,因此这些方法不适合处理大规模数据。本文中采取序列最小优化<sup>[7]</sup>算法来解决上述问题。

主动式红外结冰探测最根本的任务在于识别物体结冰表面的结冰冰型,为此构造支持向量机对结冰冰型进行分类。将每种结冰冰型下三组不同激光器入射角  $\psi$ 、探测器观测角  $\theta$  和结冰表面的反射系数  $f(\psi, \theta)$  作为特征量,随后通过支持向量机判断物体表面的结冰冰型信息,从而达到对物体结冰表面探测的目的。

## 4 实验及其结果

### 4.1 实验方案

为了获取不同结冰厚度下结冰表面的反射系数  $f(\psi, \theta)$ ,构建了结冰检测标定实验平台,以获得训练样本和测试样本数据。实验平台如图 2 所示,主要由半导体恒温阱、标准板、激光器、光电探测器和信号检测电路组成。半导体恒温阱是通过半导体制冷片对工作面制冷,可以提供  $-35^\circ\text{C} \sim +0^\circ\text{C}$  的测试环境,生成不同的结冰冰型。信号检测电路将光电探测器接收的激光回波能量转换成输出电压。标准白板是由四氟乙烯压制成的漫反射板,其半球反射率为 0.97。激光器采用 940 nm 红外激光器,连续发光的最大功率为 100 mW。

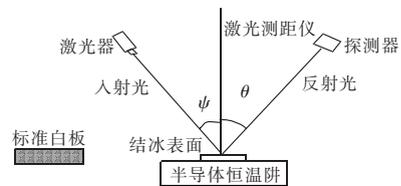


图 2 结冰实验平台

通过结冰标定实验可以得到不同冰型的结冰表面,利用激

光器、光电探测器和标准白板可以通过式(2)得到结冰表面不同入射角和观测角下的反射系数 $f(\psi, \theta)$ , 实验中分别对明冰、淤冰和混合冰对应的结冰冰型的结冰表面的反射系数 $f(\psi, \theta)$ 进行采集和分析。

### 4.2 实验数据及支持向量机判断结果

分别对实验中不同结冰冰型的三种情况所测的激光回波能量提取其对应的不同入射角和观测角下的结冰表面反射系数 $f(\psi, \theta)$ , 作为后续分类器输入, 结冰表面反射系数分布如图 3 所示。

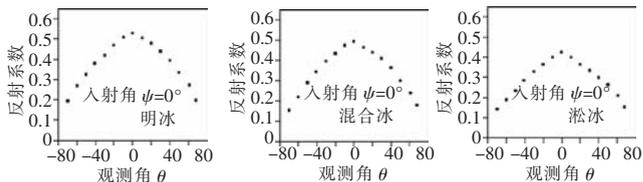


图 3 不同结冰冰型反射系数分布图

支持向量机的结冰冰型判别输出如表 2 所示。

表 2 支持向量机输出

结冰冰型	输出
明冰	0
混合冰	1
淤冰	2

实验对不同结冰冰型的三种情况分别采集 400 组激光器入射角 $\psi$ 、探测器观测角 $\theta$ 和结冰表面反射系数 $f(\psi, \theta)$ 数据, 每种结冰冰型分别取出 100 组激光器入射角 $\psi$ 、探测器观测角 $\theta$ 和结冰表面的反射系数 $f(\psi, \theta)$ 对支持向量机进行训练, 随后每种情况取 2 组数据进行测试, 输出如表 3 所示。

表 3 测试样本输出

样本序号	1	2	3	4	7	8
结冰冰型	明冰	明冰	混合冰	混合冰	淤冰	淤冰
$\psi_1$	0	0	0	0	0	0
$\theta_1$	30	60	45	60	60	30
$f(\psi_1, \theta_1)$	0.48	0.28	0.35	0.25	0.2	0.35
$\psi_2$	30	45	30	45	60	45
$\theta_2$	30	30	45	45	30	60
$f(\psi_2, \theta_2)$	0.36	0.34	0.30	0.25	0.17	0.14
$\psi_3$	60	45	45	30	45	30
$\theta_3$	60	45	60	45	45	60
$f(\psi_3, \theta_3)$	0.14	0.28	0.17	0.30	0.20	0.16
判断结果	0	0	1	1	2	2

本文以三组不同入射角、观察角和结冰表面反射系数作为特征向量, 以明冰、混合冰和淤冰三个模式类进行分类训练和测试, 利用支持向量机(SVM)和传统的 BP 人工神经网络(ANN)进行分类比较, 两种分类器的分类效率如表 4 所示。

表 4 两种分类器的分类效率 %

冰型	SVM	ANN
明冰	0.93	0.85
混合冰	0.89	0.81
淤冰	0.91	0.83

结果表明, 系统采用的支持向量机判别物体的结冰冰型的方法, 与神经网络分类器相比较, 支持向量机的分类效率更高, 效果更为理想。

### 5 结束语

初步试验结果表明, 该方法能够以一定的准确性对物体结冰的冰型进行实时动态分类, 为飞机结冰探测提供了一种新的技术思路。基于支持向量机的主动式红外结冰探测方法非接触式探测的特性, 可以不破坏被探测物体的结构特性, 具有准确性好、可靠性高、重量轻、使用方便等特点, 这使它在飞机、公路、石油传输管道、高山电力传输设备等容易发生结冰的环境中具有良好的应用前景。

### 参考文献:

- [1] 张杰, 周磊, 张洪. 飞机结冰探测技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(12): 1578-1586.
- [2] 袁燮纲, 韩风华. 飞机防冰系统[M]. 北京: 航空专业教材编审组出版, 1985.
- [3] PETRINKO V F. Physics of ice[M]. Oxford: Oxford University Press, 1999.
- [4] 戴永江. 激光雷达原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [5] 邓乃扬, 田英杰. 数据挖掘中的新方法: 支持向量机[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [6] VAPNIK V N. The nature of statistical learning theory[M]. NY: Springer-Verlag, 1995.
- [7] 李建民, 张钊, 林福宗. 支持向量机的训练算法[J]. 清华大学学报, 2003, 43(1): 120-124.

(上接第 2532 页)

- [2] EZPELETA J, COLOM J M, MARTINEZ J, et al. A Petri net based deadlock prevention policy for flexible manufacturing systems[J]. IEEE Trans on Robot Automat, 1995, 11: 173-184.
- [3] LI Z W, ZHOU M C. Elementary siphons of Petri nets and their application to deadlock prevention in flexible manufacturing systems[J]. IEEE Trans on Syst, Man, Cybern A Syst, Humans, 2004, 34(1): 38-51.
- [4] LI Z W, ZHOU M C, WU N Q, et al. A survey and comparison of Petri net based deadlock prevention policies for flexible manufacturing systems[J]. IEEE Trans on Syst, Man, Cybern C Appl, Reviews, 2008, 38(2): 173-185.
- [5] FANTI M P, MAIONE B, TURCHIANO B, et al. Comparing digraph and Petri net approaches to deadlock avoidance in FMS[J]. IEEE Trans on Syst, Man, Cybern B Cybernetics, 2000, 30(5): 783-795.
- [6] 李志武, 徐平江, 朱荣明, 等. 柔性制造系统活性监督控制器的简化设计[J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版, 2006, 33(3): 442-447.
- [7] 李志武, 马雄. 一种利用基本信标的柔性制造系统死锁控制器设计

- 方法[J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版, 2006, 33(2): 262-267.
- [8] YUE H. One type of special resources in Petri nets models of flexible manufacturing Systems[C]//Proc of the 8th World Congress on Intelligent Control and Automation. 2010.
- [9] HUANG Y S. Design of deadlock prevention supervisors using Petri nets[J]. Int J Adv Manuf Tech, 2007, 35(3): 349-362.
- [10] XING K Y, HU B S. Optimal liveness Petri net supervisor synthesis for automated manufacturing systems[C]//Proc of IEEE Int Conf Syst, Man, Cybern. 2005: 282-287.
- [11] CHAO D Y. Computation of elementary siphons in Petri nets for deadlock control[J]. Comp J, 2006, 49(4): 470-479.
- [12] CHAO D Y. Incremental approach to computation of elementary siphons for arbitrary simple sequential processes with resources[J]. IET Control Theory Appl, 2008, 2(2): 168-179.
- [13] PARK J, REVELIOTIS S A. Deadlock avoidance in sequential resource allocation systems with multiple resource acquisitions and flexible routings[J]. IEEE Trans on Automat Contr, 2001, 46: 1572-1583.