

## Research on Identification Method of Airfoil Thin Ice Based on Multi-Parameter Spectrum Feature\*

MA Yue<sup>1</sup>, LI Ziyin<sup>2</sup>, DU Zhenyu<sup>2</sup>, LI Zejun<sup>1</sup>, ZHANG Lin<sup>3,4</sup>, DENG Xiao<sup>1,3\*</sup>

(1. College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan Shanxi 030024, China; 2. AVIC Taiyuan Aero-Instruments Co., Ltd., Taiyuan Shanxi 030006, China; 3. Key Lab of Advanced Transducers and Intelligent Control System of Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan Shanxi 030024, China; 4. College of Architecture, Taiyuan University of Technology, Taiyuan Shanxi 030024, China)

**Abstract:** Airfoil icing is a major hidden danger affecting the flight safety of aircraft. Aiming at the deficiencies of the existing airfoil thin ice detection methods in shape, accuracy and anti-environmental interference, a planar electrode suitable for the identification and detection of airfoil thin ice is designed, an experimental platform for preparing different ice types is built, and the frequency sweep data of thin ice impedance, capacitance and transmission coefficient is collected. The spectrum curve shape is quantitatively analyzed, and the ice type classification and ice thickness regression model based on support vector machine is established. The temperature drift of each parameter is analyzed through the variable temperature experiment, and a temperature compensation method is established. At the same time, the influence of possible residues on the airfoil surface on the identification of thin ice is studied. The results show that the proposed method can realize the identification and detection of thin ice in the thickness range of 0.2 mm~2.5 mm, and is not affected by common interferences.

**Key words:** airfoil thin ice; multi-parameter; spectrum feature; planar electrode; ice type identification; ice thickness measurement  
EEACC: 7310; 7630D doi: 10.3969/j.issn.1005-9490.2024.01.043

## 基于多参数频谱特征的机翼薄冰识别方法研究\*

马玥<sup>1</sup>, 李子寅<sup>2</sup>, 杜振宇<sup>2</sup>, 李泽军<sup>1</sup>, 张琳<sup>3,4</sup>, 邓霄<sup>1,3\*</sup>

(1. 太原理工大学物理与光电工程学院, 山西太原 030024; 2. 航空工业太原航空仪表有限公司, 山西太原 030006; 3. 太原理工大学新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 山西太原 030024; 4. 太原理工大学建筑学院, 山西太原 030024)

**摘要:** 机翼结冰是影响飞机飞行安全的重大隐患。针对现有机翼薄冰探测方法存在的外形、精度、抗环境干扰方面的不足, 设计了一种适用于机翼薄冰识别探测的平面电极, 搭建制备不同冰型的实验平台, 采集薄冰阻抗、电容、传输系数的频扫数据。定量分析频谱曲线形态, 建立基于支持向量机的冰型分类与明冰厚度回归模型。通过变温实验对各参数的温度漂移进行分析并建立温度补偿方法, 同时对机翼翼面可能存在的残留物对薄冰识别的影响进行了研究实验, 结果证明所提方法能够实现 0.2 mm~2.5 mm 厚度范围内薄冰的识别和探测, 且不受常见干扰物的影响。

**关键词:** 机翼薄冰; 多参数; 频谱特征; 平面电极; 冰型识别; 冰厚测量

中图分类号: TP212.9; V244

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2024)01-0265-09

飞行器上升至一定高度, 云层中可能会存在过冷水滴, 这些过冷水滴撞击在飞机机体上时会凝结成冰。飞机结冰会对机身的气动布局造成很大影响, 尤其机翼积冰时, 飞机的空气动力和飞行特性显著变差, 导致飞机起飞困难甚至发生失速的危险<sup>[1]</sup>。因此开展机翼表面覆冰的识别并及时预警对于飞行安全具有重要意义。

飞机结冰初始阶段冰层厚度薄、冰型种类不同,

给结冰识别探测及预警带来了困难。目前飞机结冰探测的技术主要基于机械谐振、光学或电学的原理<sup>[2-4]</sup>。王华等<sup>[5]</sup>利用磁致伸缩原理对飞机结冰进行探测, 通过谐振偏移确定机翼表面是否结冰。该方法简单可靠, 但传感器需要凸出机身表面安装, 一定程度上影响了飞机的气动外形。张龙浩等<sup>[6]</sup>提出了一种基于光强调制的光纤传感机翼薄冰探测方法, 可以较准确地测量薄冰厚度。但相关光学设备

项目来源: 国家自然科学基金项目(62375198); 山西省回国留学人员科研项目(2023-039); 山西省应用基础研究计划项目(201901D111061, 202303021221028); 山西省重点研发计划项目(201903D321001)

收稿日期: 2022-05-09

修改日期: 2022-08-05

对振动及环境光强敏感,较难在高空中使用。电学法多使用平面电极采集飞机表面介质电学特征进行结冰探测。Stocksreiter 等<sup>[7]</sup>将一种多通道的平面电极传感器安装于实验飞机上,通过采集多对电极间电容变化来分析机翼表面结冰状态。Longo 等<sup>[8]</sup>向叉指电极发送不同频率的信号并分析阻抗谱特征,在 100 Hz 至 10 MHz 范围内对空气、去离子水、异丙醇、乙二醇和硅油做出了良好的区分,并在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下监测了水相变至冰的过程。任宏宇等<sup>[9]</sup>利用平面电极在 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内采集机翼表面介质复阻抗信息来识别飞机结冰状态,同时针对温度漂移问题通过有限元仿真给出了温度补偿方法。Dean 等<sup>[10]</sup>使用简易叉指电极在 1 kHz 与 64 kHz 两个频率下测量了电极表面介质的电容比值,利用水冰的介电弛豫特性区分传感器表面是否结冰。综上所述,相比机械谐振法与光学法,电学法所依赖的平面电极结构简单,对振动等环境干扰不敏感,且可齐平机身安装,不会对机身原有气动外形造成影响;但近年来使用电学法探测机翼表面薄冰的研究大多集中在是否结冰,对涉及冰型识别及厚度精确测量方面的研究较少,且往往使用单一参数,所依赖的算法模型易受环境因素影响。

基于上述研究现状存在的不足,本文提出了一种利用多参数频谱特性识别机翼薄冰的方法,搭建实验平台模拟机翼结冰环境,使用设计的平面电极与数据采集系统记录并分析电极表面介质的阻抗模、阻抗角、电容、传输系数的频谱数据,利用支持向量机建立频谱特征与冰型、冰厚的关系;同时分析各参数温度漂移规律,最后针对飞机翼面可能存在的除冰液、润滑油等物质对结冰探测的潜在干扰进行了对比实验,数据表明该方法能较准确地识别冰型并预测明冰厚度。

## 1 飞机薄冰探测原理与平面电极设计

### 1.1 水冰介电频谱特性

冰不是传统意义的介电材料,但其介电特性在理论与实验中已得到了广泛的研究。自然环境下形成的冰为 1h 相,水分子间通过氢键连接构成六方晶系,同时冰晶体中存在 4 种特殊的质子点缺陷,这些点缺陷两两形成偶极子,当对冰层施加交变电场时,冰层的介电特性会随电场频率变化而发生改变,从而对外界表现出电学参数的变化<sup>[11]</sup>。

环境温度在  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,水与冰的相对介电常数和电导率在频率  $1\text{ Hz}\sim 10^7\text{ Hz}$  下的变化规律如图 1 所示。对于相对介电常数,水在整个频率范围内基本

不发生变化,冰在频率  $10^3\text{ Hz}\sim 10^5\text{ Hz}$  范围内有剧烈下降;对于电导率,水在中低频段稳定,从  $10^6\text{ Hz}$  后的高频段大幅上升;冰的电导率在低频下稳定,在  $10^2\text{ Hz}\sim 10^5\text{ Hz}$  范围内上升,之后趋于稳定<sup>[12]</sup>。综合水与冰相对介电常数及电导率在频域内的特性,选择在  $10^3\text{ Hz}\sim 10^5\text{ Hz}$  频率范围内对冰层进行频扫,寻找不同电参数与冰层种类、厚度的关系,本文选取阻抗模、阻抗角、电容和传输系数四种参数的频谱特征对飞机机翼结冰的类型与厚度进行探测。

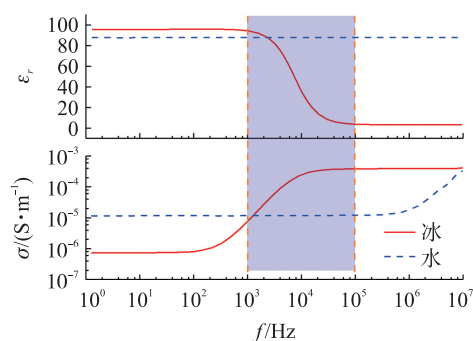


图 1 水冰介电性质差异

### 1.2 平面电极设计与拟部署位置

使用平面电极测量电介质特性,需要根据被测物的特征对平面电极的形状、面积、间距进行设计来满足探测性能需求。平面电极的性能指标主要为信号强度、穿透深度、灵敏度三项,其中平面电极形状影响信号强度,电极间距影响灵敏度与穿透深度<sup>[13]</sup>。基于飞行实验数据,结冰厚度在  $0.1\text{ mm}\sim 5\text{ mm}$  时为弱结冰,需要进行预警<sup>[14]</sup>。冰的相对介电常数在中高频较小,对探测方法的灵敏度有较高要求,因此需要设计一种信号强度适中,具有尽可能高灵敏度,且穿透深度达到  $3\text{ mm}$  的平面电极。相关研究表明叉指型电极信号强度较高,灵敏度分布均匀,且叉指电极的穿透深度约等于电极空间波长(同侧相邻两个叉指的间距)的  $1/3$ <sup>[15-16]</sup>。因此最终设计面积为  $55\text{ mm}\times 75\text{ mm}$ ,表面密集分布 7 对叉指的平面采样电极(图 2)。其电极间距为  $0.4\text{ mm}$ ,且电极中心布置铂电阻测量冰温,使用

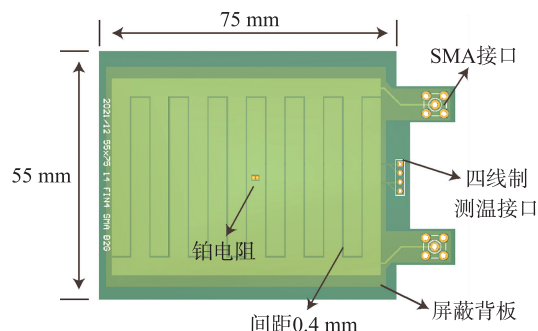


图 2 平面电极设计

SMA 同轴线缆进行信号的传输, 并布设屏蔽背板减少外界电磁环境的干扰。

飞机机翼结冰由过冷水滴撞击在机翼上凝结形成, 在这个过程中由于飞机翼型与气流相互作用导致同一时刻机翼各部位结冰厚度与速率不同, 通常机翼前缘正对气流位置结冰厚度最大, 速率最快, 而沿机翼剖面流线向后结冰厚度与速率逐渐放缓<sup>[17]</sup>。考虑到该特性, 平面电极的部署位置既要保证能够探测到飞机结冰的发生, 也要避免结冰速率过快导致超出量程(穿透深度), 同时尽量贴合机翼表面不破坏气动外形。相关研究显示不同攻角下的过冷水滴在飞机机翼上的撞击范围存在极限<sup>[18]</sup>, 故平面电极应该部署于靠近该极限(弧 AB)范围的边缘位置(图 3)。

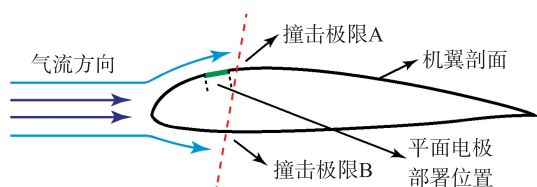
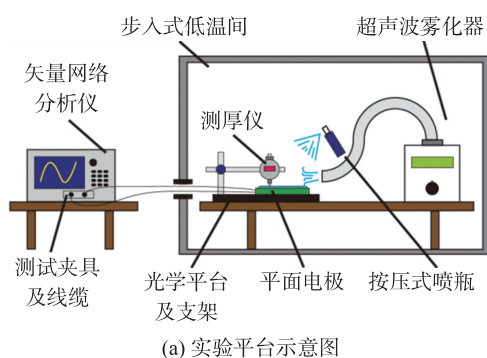


图 3 平面电极拟部署位置



(a) 实验平台示意图

## 2 实验方案与数据采集系统设计

使用大型步入式低温间模拟高空机翼结冰所处的低温环境。相比小型制冷设备, 步入式低温间拥有足够大的空间, 环境温度更加稳定, 同时可供实验人员进入进行制冰与测量操作。在低温间中将平面电极放置在经过水平校正的光学平台上, 冷却至预定低温, 通过水雾喷淋的方式模拟过冷小水滴凝结在平面电极表面的过程(图 4(a))。飞机机翼结冰根据质地特征可分为明冰、霜冰、混合冰。在高空真实飞行环境下, 机翼结冰的冰型与环境温度、风速、液滴径粒大小有关<sup>[19]</sup>。在实验室条件下难以实现温度和风速的同时控制, 故通过控制液滴径粒来实现对冰型的模拟, 具体为交替使用按压式喷瓶与超声波雾化器混合不同粒径液滴, 与平面电极呈一定角度喷淋, 模拟飞机飞行时不同冰型的形成。测量冰厚时, 对于明冰(图 4(b))使用机械千分测厚仪标定多点厚度取均值; 对于霜冰与混合冰(图 4(c)、图 4(d)), 由于冰层表面结构疏松脆弱无法直接测量, 故基于喷淋时间进行厚度估算。



(b) 明冰表面



(c) 霜冰表面



(d) 混合冰表面

图 4 实验平台示意图与不同冰型表面状态

实验数据的采集与控制由单片机模块、矢量网络分析仪(下称矢网仪)、转接板组成(图 5)。使用 Keysight E5061B 矢网仪采集频扫数据, 矢网仪夹具与平面电极通过转接板连接, 转接板将平面电极与 SMA 接口的屏蔽层引出并连接至矢网仪的激励端

构成等电位屏蔽。使用 STM32 单片机及 MAX31865 完成冰层温度测量与采集控制, 在每次喷淋操作模拟冰层增长之后, 持续监测冰层温度, 由 MAX31865 获取平面电极中央铂电阻的阻值计算冰层温度。使用 STM32F103CET6 读取温度数据, 当冰层温度达

到-15℃时向矢量网仪发送一次外部触发信号,对冰层在1 kHz~100 kHz 频率范围内进行一次频扫,记录此时数据并重复实验步骤直至冰层厚度超过平面电极穿透深度(约3.5 mm)。重复多组实验,记录不同冰型阻抗模、阻抗角、电容、传输系数与对应厚度。由于明冰性状稳定,厚度标定方法精度相对较高,故对数据的定量分析首先以明冰模拟实验为主。

### 3 数据分析与模型建立

#### 3.1 频扫曲线形态分析

如图6所示为单次明冰实验中,电极表面冰层在约0.25 mm~3.25 mm 厚度内变化时薄冰阻抗模、阻抗角、电容、传输系数的频扫曲线,单条曲线为一次喷淋操作后冰层温度再次下降至-15℃时,对某一参数进行一次频扫后记录的数据。实验记录的4个参数频扫曲线与冰层叠加次数的变化有共同点:冰层叠加次数越多(冰层厚度越厚),曲线分布越密集,符合平面电极边缘电场的非线性检测特性。图6(a)与图6(c)分别为薄冰阻抗模与电容的频扫曲线,不同冰厚的曲线形态近似,相同厚度下数值与

频率呈负相关关系;图6(b)为薄冰阻抗角的频扫曲线,阻抗角曲线形态相对复杂,数据波动幅度较大,降噪后曲线平滑度仍较差。在1 kHz~20 kHz 低频段,阻抗角与频率呈正相关,而在20 kHz~100 kHz 的中高频段,阻抗角与频率呈负相关。图6(d)为薄冰传输系数的频扫曲线,传输系数在整个频扫频率段内近似呈线性,不同厚度的薄冰传输系数曲线斜率近似,截距与冰层叠加次数呈正相关,依据以上规律建立频谱特征与冰型、冰厚的模型。

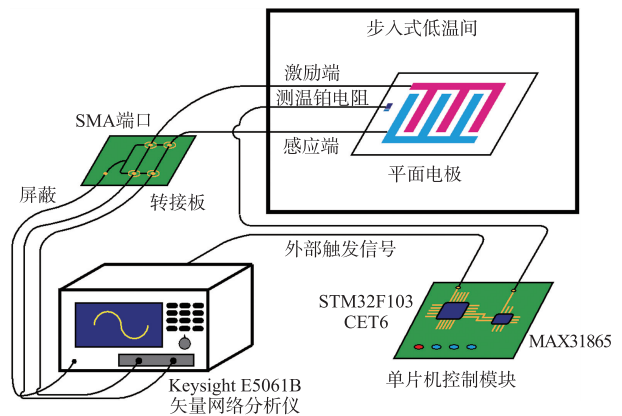


图5 实验装置连接示意图

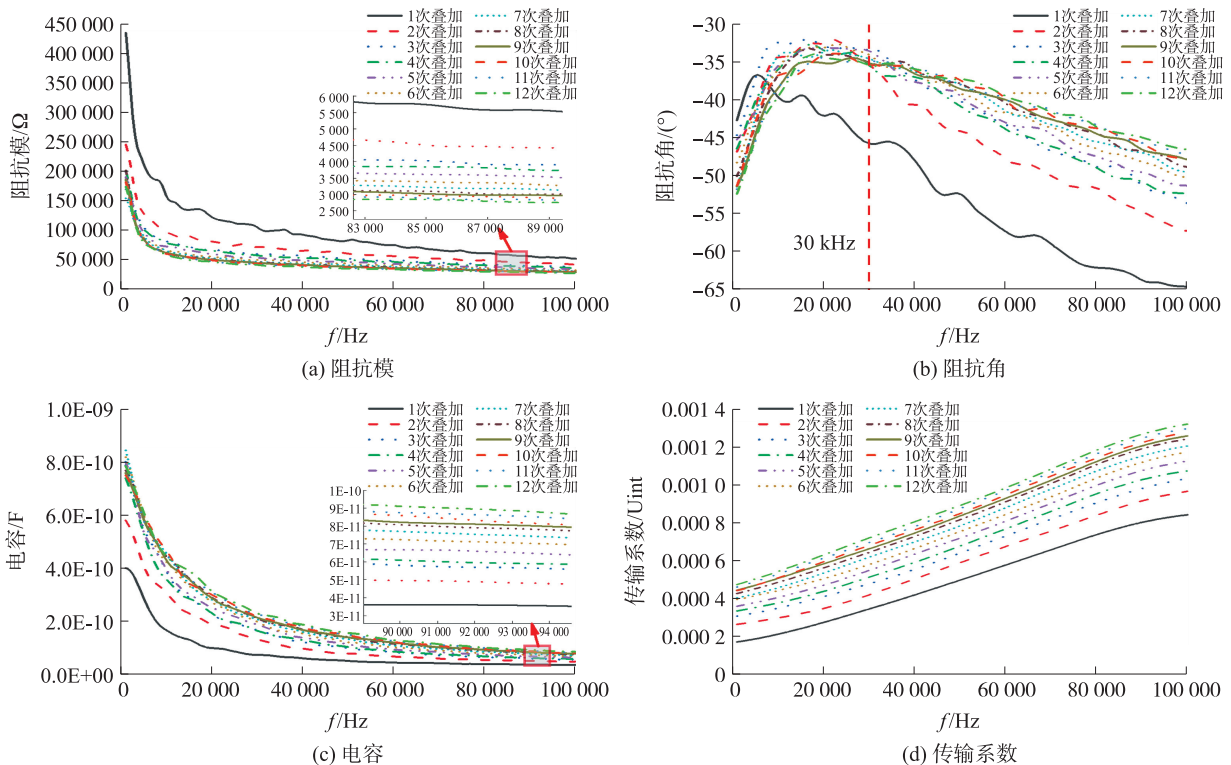


图6 明冰各参数频扫曲线

#### 3.2 冰型分类与厚度回归模型

对于机翼薄冰的测量涉及分类与回归两个方面。针对明冰,在实验室条件下可以相对稳定地模拟出规律增长且质地相似的冰层,有利于控制变量进行数据采集,从而进行冰厚回归模型的建立,而霜

冰与混合冰由于难以控制一致的冰层质地与温度,同时厚度标定误差较大,回归模型准确率低,现阶段实用价值较低,故只进行冰型分类。

在实验测量四种参数的频扫曲线中,阻抗模与电容为电学传感中常用的检测参量,阻抗角能很好

地反映冰型及物质改变而产生的介电差异, 传输系数表现出较好的线性规律。为综合四种参数在数值与形态上的特征, 本文使用支持向量机 (Support Vector Machine, SVM) 进行冰型分类和厚度回归。SVM 在小样本多参数数据的分类与回归方面有较强的泛化与学习能力<sup>[20]</sup>, 同时使用灰狼优化算法 (Grey Wolf Optimizer, GWO) 寻找性能最佳的模型。在进行特征样本的选取时, 使用多点频率采样来描述频扫曲线形态, 具体为从 40 kHz 开始, 每间隔 5 kHz 进行一次采样, 直到 100 kHz 共 13 个采样点, 能较好地还原中高频段频扫曲线的形态。采集参数为阻抗模、阻抗角、电容、传输系数共 4 项, 则单次实验样本维数为 52 维。设训练样本集为

$$T = \{ (X_i, y_i) \mid i = 1, 2, \dots, n \} \quad (1)$$

式中:  $X_i = (x_1, x_2, \dots, x_{52})$  为单次实验输入向量,  $y_i$  为冰型标签或归一化后的冰厚测量值。引入高斯核函数:

$$\kappa(x, x') = e^{-\gamma \|x - x'\|^2} \quad (2)$$

将样本映射到更高维空间进行分类与回归; 将

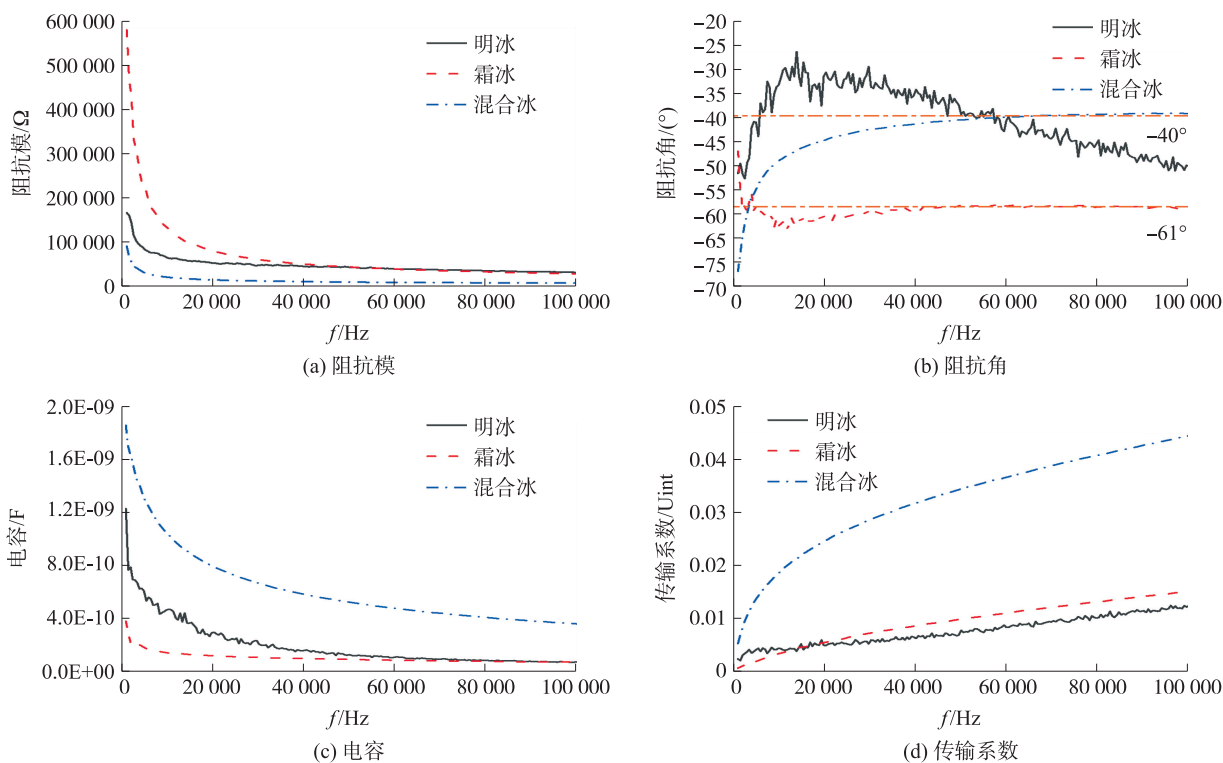


图 7 明冰、霜冰、混合冰典型频扫曲线差异

表 1 冰型分类效果

冰型	明冰	霜冰	混合冰
分类准确率/%	100	100	83.33

当冰型为明冰时对数据进行 GWO-SVR 训练, 寻找冰厚与样本间的关系。在 10 次重复实验中

单次 SVM 的分类准确率或厚度预测的均方误差作为 GWO 的适应度函数, 利用 GWO 的搜索能力对 SVM 的惩罚系数  $c$  与高斯核参数  $g$  进行寻优, 意图找到具有最佳分类效果与回归误差的超平面:

$$\omega^T x + b = 0 \quad (3)$$

式中:  $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$  为超平面的法向量, 指定了超平面的方向,  $b$  为位移项, 指定了该超平面至原点间的距离。

实验显示对于不同形态的薄冰, 其各参数频扫曲线的数值与形态均存在差异, 其中阻抗角频扫曲线的差异最明显。由图 7 可知混合冰与霜冰的阻抗角随频率的上升分别在  $-40^\circ$  和  $-61^\circ$  附近趋于稳定, 而明冰的阻抗角在 30 kHz 后随频率升高近似线性下降; 对于阻抗模、电容与传输系数, 不同冰型的频扫曲线形态相似, 但取值范围有较大不同。选取明冰、霜冰、混合冰各 30 个样本进行训练, 用得到的模型对独立随机选取的另外 18 个样本进行分类检验, 训练所得模型对验证集中明冰及霜冰的分类正确率达到 100%, 对混合冰的分类正确率为 83.33% (表 1)。

计有 130 个样本, 为使训练样本能覆盖所有实验厚度, 按照试验次数随机将 8 次实验结果作为训练集, 将 2 次实验结果作为验证集。图 8(a) 显示明冰冰厚预测值曲线能较好跟随测量值曲线, 图 8(b) 显示在冰厚小于 2.5 mm 时预测残差较小, 均在 0.2 mm 内。当冰厚大于 3 mm 时残差增大至 0.4 mm, 推测

此时冰层厚度已接近实验用电极的穿透深度,所检测参数趋近饱和,模型预测精度下降。在五折交叉检验中,使用均方误差(MSE)与平方相关系数( $R^2$ )评价回归效果。由表 2 可知,回归效果较稳定,其准确性并不依赖训练集与验证集的划分。

由表 3 可知,在与已有相关研究方法对比中,本文使用多个电学参数,虽然一定程度上增加了实验

操作的步骤,对工程实现提出了更高的要求,但实现了对冰型的分类和对明冰厚度的预测,对机翼结冰状态的变化进行了更为细致的量化。

表 2 五折交叉检验效果

分组	1	2	3	4	5
MSE	0.007 7	0.003 9	0.013 2	0.006 9	0.010 6
$R^2$	0.972	0.983	0.962	0.976	0.988

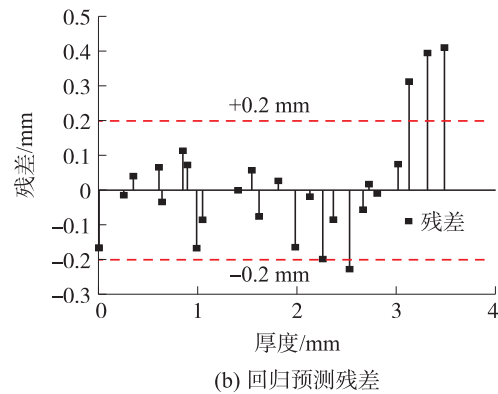
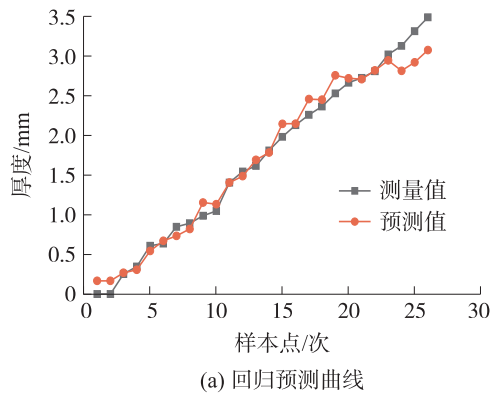


图 8 明冰厚度回归效果

表 3 与已有研究方法的对比

作者	使用参数	冰型识别能力	冰厚测量精度
Stocksreiter <sup>[7]</sup> 等	电容	能反映冰型变化	能反映冰层厚度变化
Longo <sup>[8]</sup> 等	阻抗谱	可区分介质	能反映冰层厚度变化
Dean <sup>[10]</sup> 等	电容比值	可区分冰与霜	最小检出冰厚约 20 $\mu\text{m}$
Kozak <sup>[21]</sup> 等	传输系数、谐振幅频	-	反映 0.5 mm~3.5 mm 厚度变化
本文	阻抗、电容、传输系数	可进行冰型分类	0.5 mm~2.5 mm 内明冰预测误差小于 0.2 mm

## 4 温度补偿与干扰物影响分析

### 4.1 温度漂移与补偿冰型

温度会影响材料的介电特性,进而影响在交变电场中的测量值。对于机翼薄冰,其交流参数测量值在试验中的温度漂移比较严重,若不严格控制环境与冰层温度,温度造成的参数数值变化会远远大于冰层厚度所造成的变化<sup>[22]</sup>。因此需要对薄冰构建温度补偿,使固定实验温度下得到的明冰厚度回归模型具有参考价值。

制备不同厚度的明冰进行变温实验,归纳不同温度、厚度下的薄冰各频率采样点的数值变化规律。以阻抗模为例,图 9 所示为明冰厚度为 0.5 mm 和 2.0 mm 时,采样频率分别在 60 kHz 与 90 kHz 的阻抗模温度漂移曲线。由图可知冰层电学参数在温度较高时( $-15\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ )有明显变化,在温度更低的区间( $< -20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )变化相对平缓。同时温度漂移规律与冰层厚度、采样频率均有耦合,无法建立简单模型分离变量精确描述,但图 9

显示各参数温度漂移曲线在趋势上相对一致,故从变化量的角度描述变化规律,忽略冰层厚度与采样频率带来的差异。

将明冰温度漂移曲线在各参数变化区间内归一化。取多次变温实验中不同采样频率下归一化参数的均值,对均值散点进行最佳拟合,一阶衰减指数拥有最佳拟合性能:

$$y = y_0 + a \times e^{-\frac{x}{t}} \quad (4)$$

式中: $y_0, a, t$  为拟合系数。使用拟合函数(表 4)对各参数的温度漂移进行比例补偿。图 10(a)为在  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  时明冰各参数的原始厚度预测曲线与补偿厚度预测曲线。由图 10(b)可见,未经温度补偿时,在第七次(约 1.5 mm)冰层叠加后的厚度预测残差开始出现超过 0.5 mm 的较大偏差。而使用表 4 对各参数采样频率点样本进行补偿之后,在第十次(约 2.5 mm)冰层叠加后的厚度预测误差均在 0.25 mm 内,经补偿修正后的预测曲线对真实冰层厚度的跟随性更好,在 1 mm~3.5 mm 厚度区间最大预测残差减少了 0.42 mm。

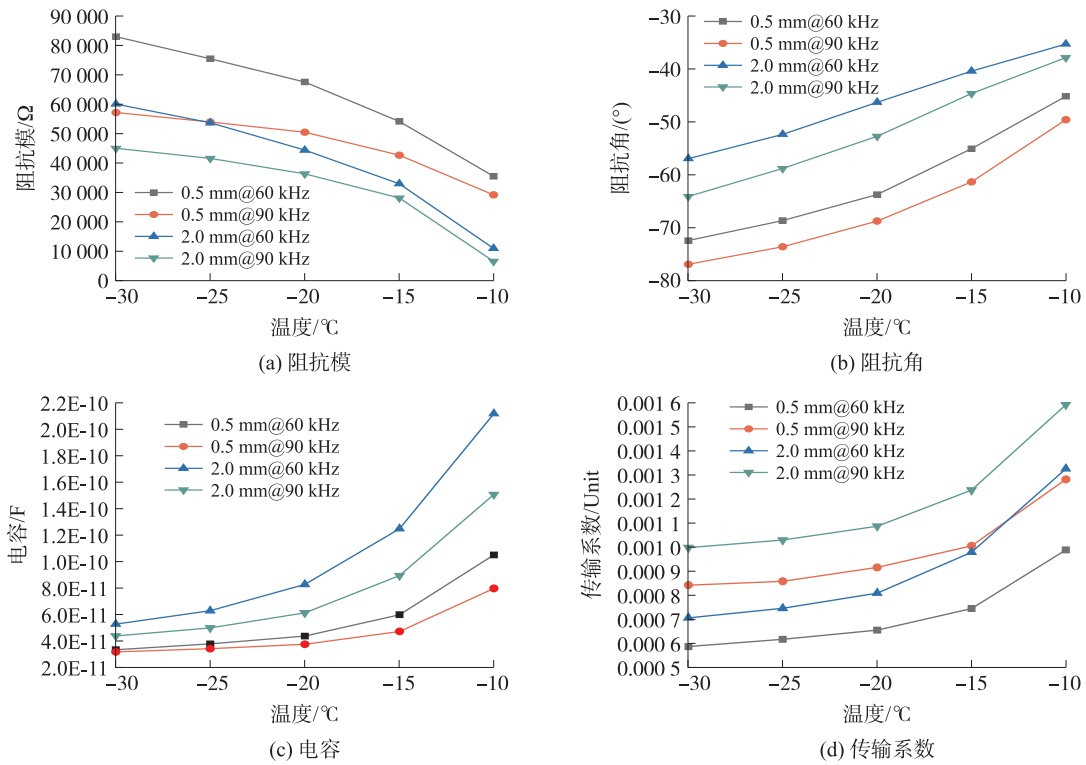


图 9 明冰各参数频扫曲线温度漂移

表 4 阻抗模、阻抗角、电容与传输系数温度漂移曲线的拟合函数

参数	函数	相关系数	残差平方和
阻抗模	$y = 1.14224 - 3.16305e^{\frac{x}{9.79495}}$	0.99965	$1.09815 \times 10^{-4}$
阻抗角	$y = -0.92817 + 2.80212e^{\frac{x}{26.96305}}$	0.99933	$2.15231 \times 10^{-4}$
电容	$y = -0.02454 + 5.98486e^{\frac{x}{5.66299}}$	0.99987	$4.3343 \times 10^{-5}$
传输系数	$y = -0.02732 + 5.5795e^{\frac{x}{5.90551}}$	0.99976	$7.93159 \times 10^{-5}$

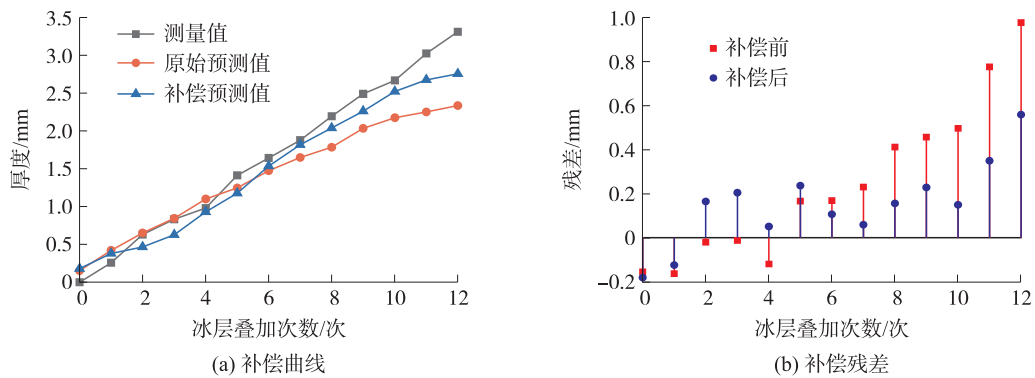


图 10 温度漂移补偿效果

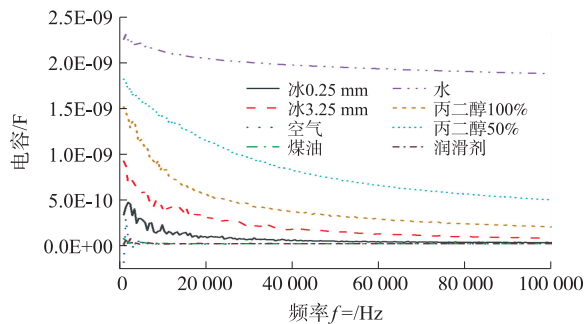
4.2 机身翼面干扰物影响分析

在真实的飞行与维护环境下,飞机表面除了水与冰外,还可能残留有除冰液、航空煤油、润滑脂等,这些物质成分复杂且具有不同的性状和电学特性,需要实验验证这些物质是否会对平面电极的结冰探测性能产生干扰。

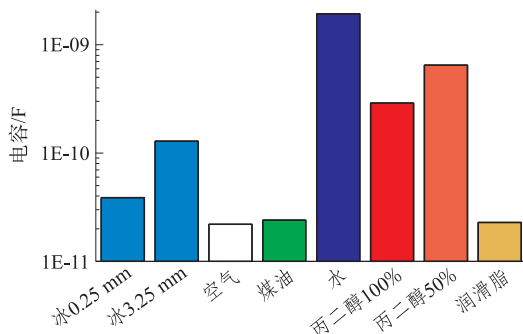
将机翼表面可能存在的污染物的频扫曲线与空载电极、水、冰的频扫曲线进行比较。其中冰层分别

取-15℃下厚度为 0.25 mm 与 3.25 mm 的明冰,水为室温 15℃中平面电极上厚度约为 1 mm 的水层,除冰液主要成分为丙二醇,分别配制 100% 与 50% 浓度的丙二醇溶液,由于实验条件限制,使用煤油代替航空煤油。由图 11(a)可知,不同物质各参数频扫曲线在同一坐标轴下区分度不同,其中电容频扫曲线区分度明显。取 60 kHz 频率下各物质电容值进行比较(图 11(b)),可以得出明冰在最薄

(0.25 mm)与最厚(3.25 mm)时的电容区间相对独立,在电极空载时电容曲线平稳,电容值最小。煤油与润滑脂的电容频扫曲线几乎与电极空载时重合,说明油脂类介质对结冰探测的干扰极小,可忽略影响。水的电容数值最大,同频率下比冰层电容大1个数量级,100%与50%浓度的丙二醇溶液位于冰与水的电容值之间,且溶液浓度越低电容值越大。综上,理想情况下飞机翼面的常见残留物质不会对本文结冰识别探测方法造成影响。



(a) 不同物质电容频扫曲线



(b) 60 kHz下不同物质电容值对比

图 11 机翼表面潜在干扰物影响分析

## 5 结论

针对现有机翼薄冰探测识别方法存在的不足,提出了一种利用多参数频谱特性的机翼薄冰识别探测方法,使用设计的平面电极与实验平台模拟飞机翼不同冰型的形成,采集并分析所结冰型的阻抗模、阻抗角、电容、传输系数的频谱特征,建立了 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下机翼薄冰分类识别与明冰厚度回归预测模型。数据显示验证样本中本文研究方法对于明冰与霜冰的识别正确率达100%,混合冰识别正确率为83.33%;当冰型为明冰时厚度预测在2.5 mm内残差小于0.2 mm。同时构建了温度补偿方法,经实验验证在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,经过补偿后,在1 mm~3.5 mm范围内,最大预测残差减少了0.42 mm。同时该方法不会对飞机翼面可能存在的除冰液、润滑脂等物质产生误报,在机翼薄冰识别探测领域具有一定的应用潜力。

## 参考文献:

- [1] 邱玲. 飞机翼面积冰对飞行的影响分析[J]. 无线互联科技, 2018, 15(1): 120-121.
- [2] Aicardi I, Lingua A, Mazzara L, et al. Ice Detection on Airplane Wings Using a Photogrammetric Point Cloud: A Simulation[J]. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2020, 43: 183-189.
- [3] Musci M A, Mazzara L, Lingua A M. Ice Detection on Aircraft Surface Using Machine Learning Approaches Based on Hyperspectral and Multispectral Images[J]. Drones, 2020, 4(3): 45.
- [4] 胡义明. 积冰对飞机的危害及防除冰方法[J]. 科技风, 2021(5): 17-18.
- [5] 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): 77-80.
- [6] 张龙浩. 光纤阵列式结冰探测系统的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [7] Stocksreiter W, Zangl H, Glaser D, et al. Compact Wireless Ice Detection System with Electrode Used as Antenna[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 1065(10): 102001.
- [8] Longo J P N, Leitzke J P, Morales R E M, et al. Simple Measuring System for Impedance Spectroscopy Analysis of Fluids[C]//2016 1st International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT), Belo Horizonte, Brazil, IEEE, 2016: 77-80.
- [9] 任宏宇, 苑丹丹, 桂康, 等. 复阻抗式结冰探测技术的温度补偿方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(6): 88-94.
- [10] Dean R N. A PCB Sensor for Detecting Icing Events[J]. IEEE Sensors Letters, 2021, 5(1): 2000104.
- [11] Petrenko V F, Whitworth R W. Physics of Ice[M]. Oxford, UK: Clarendon Press, 1999: 8-30.
- [12] Felsberger R, Schweighofer B, Flatscher M, et al. Low Power Ice Detection with Capacitive and Impedance Spectroscopy-Based Measurements[C]//2018 IEEE 27th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Cairns, QLD, Australia, IEEE, 2018: 809-813.
- [13] Hu X, Yang W. Planar Capacitive Sensors-Designs and Applications[J]. Sensor Review, 2010, 30(1): 24-39.
- [14] Zheng D S, Li Z Y, Du Z Y, et al. Design of Capacitance and Impedance Dual-Parameters Planar Electrode Sensor for Thin Ice Detection of Aircraft Wings[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(11): 11006-11015.
- [15] Riaño A B, Peña H F V, Rodriguez O M H, et al. High Spatial and Temporal Resolution Film Thickness Planar Sensor: Comparison of Geometries[J]. Sensor Review, 2018, 39(1): 78-86.



- [16] 王文霞. 边缘电场传感器设计及应用研究[D]. 太原: 中北大学, 2018.
- [17] 吴佩佩, 晏涛, 任杰. 飞机结冰探测器安装位置研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(2): 274-280.
- [18] Zhu C X, Tao M J, Zhao N, et al. Study of Droplet Shadow Zone of Aircraft Wing with Diffusion Effects[J]. AIAA Journal, 2019, 57(8): 3339-3348.
- [19] 鞠嘉俊, 杨志刚, 易贤, 等. 不同温度的水滴在冰层上撞击与结冰过程的实验研究[C]//第十届全国流体力学学术会议, 杭州, 2018: 278.
- [20] 朱子东, 吕辅勇, 李雪峰. 融合 MFCC 特征的声发射故障检测[J]. 仪表技术与传感器, 2021(9): 121-125.
- [21] Kozak R, Khorsand K, Zarifi T, et al. Patch Antenna Sensor for Wireless Ice and Frost Detection[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 13707.
- [22] Ezeoru I C. Marine Icing Sensor Design Using Capacitive Techniques[D]. St. John's, Canada, Memorial University of Newfoundland, 2017.



马 玥(1997—), 男, 汉族, 江苏南京人, 太原理工大学控制工程专业硕士在读, 主要研究方向为飞机翼面结冰探测技术, hs8057@163.com;



邓 霄(1980—), 男, 汉族, 博士/教授/博士生导师, 山西太原人, 太原理工大学物理与光电工程学院, 中国仪器仪表学会传感器分会理事, 主要从事新型光电传感器的设计与系统集成方面的研究工作, dengxiao@tyut.edu.cn。