

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107795

# 复阻抗式结冰探测技术的温度补偿方法研究

任宏宇<sup>1</sup>, 苑丹丹<sup>2</sup>, 桂康<sup>1</sup>, 葛俊锋<sup>1</sup>, 叶林<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学人工智能与自动化学院 武汉 430074; 2. 成都凯天电子股份有限公司 成都 610091)

**摘要:**针对复阻抗式结冰探测技术中急需解决环境温度影响的问题,分析了冰的弛豫极化过程,并结合实验数据求解出了冰的复介电常数与温度的关系,提出了一种复阻抗式结冰探测技术下的温度补偿方法。为了提高温度补偿准确性,降低标定工作量,通过对弛豫极化理论的分析及温度漂移模型的构建,实现了准确可靠的温度测量补偿方法,该方法减小了结冰厚度对温度补偿效果的影响,极大降低了复阻抗参数温度补偿工作的复杂度。结冰实验结果表明,本文提出的温度补偿方法在 $-24^{\circ}\text{C}$ ~ $-3^{\circ}\text{C}$ 的环境温度条件下,可将温度漂移对测量结果的影响减少80%以上,有望显著提高复阻抗式结冰探测器的温度补偿准确性及标定效率,具有一定的工程应用价值。

**关键词:** 结冰探测; 温度补偿; 复介电常数

**中图分类号:** TM934.73 TH73 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

## A temperature compensation method for complex impedance ice detection

Ren Hongyu<sup>1</sup>, Yuan Dandan<sup>2</sup>, Gui Kang<sup>1</sup>, Ge Junfeng<sup>1</sup>, Ye Lin<sup>1</sup>

(1. School of Artificial Intelligence and Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;  
2. Chengdu Kaitian Electronics Co., Ltd., Chengdu 610091, China)

**Abstract:** Aiming at the urgent need of solving environmental temperature influence in the complex impedance icing detection, analyzes the relaxation polarization process of ice, combines the experimental data to obtain the relationship between the complex permittivity and temperature of ice, and proposes a temperature compensation method for complex impedance icing detection. In order to improve the accuracy of temperature compensation and reduce the workload of calibration, implements an accurate and reliable temperature measurement compensation method through the analysis of the relaxation polarization theory and the construction of a temperature drift model. It weakens the influence of icing thickness on temperature compensation, and greatly reduces the complexity of temperature compensation for complex impedance parameters. Icing experiment results show that the proposed method can reduce the influence of temperature drift on the measurement results by more than 80% under ambient temperature of  $-24^{\circ}\text{C}$  to  $-3^{\circ}\text{C}$ , which significantly improves the compensation accuracy and calibration efficiency. The proposed method has certain value of engineering application.

**Keywords:** icing detection; temperature compensation; complex permittivity

## 0 引言

结冰是航空界认定的影响飞机飞行的六大气象因素之一<sup>[1]</sup>。在飞行过程中,机翼前缘、发动机唇口等关键部位容易发生结冰现象,导致飞机升力减小、阻力增加,飞行稳定性和操纵性恶化<sup>[2-4]</sup>。近年来,飞机结冰引发了较

多严重事故,2006年,我国的空警-200预警机因为飞机结冰而坠毁,机上40人罹难,是中国空军史上最严重的一次空难;2009年,法航447班机因空速管结冰坠毁,228人罹难;2018年,俄航安-148因结冰坠毁,71人罹难。在此背景下,为了让飞行员更加及时、准确地掌握机翼结冰情况,并提升结冰防护系统的性能及效率,结冰探测技术得到长足发展。

复阻抗式结冰探测是近年来新兴的飞机结冰探测技术,其原理是通过测量传感器表面物质的复阻抗参数,推断表面结冰状态。复阻抗式结冰探测器通常包含一对同平面布置的柔性电极由于两极板间的电容受到电介质的介电常数和电介质厚度的影响,因此复阻抗式结冰探测不仅可以识别表面的干燥、湿润、结冰状态,还能够测量结冰厚度。

应用复阻抗式结冰探测技术的探测器可以齐平保型安装于机翼,而且具有薄膜化优势,能够支撑飞机表面结冰的探、防、除一体化技术。但由于冰的介电常数会受到温度、湿度、盐度等因素影响,目前复阻抗式结冰探测技术的测量精度及稳定性还有待提高。

近几年,为实现准确的冰厚测量,研究人员进行了多种尝试。2015年,韩国国立釜山大学 Zhi 等<sup>[5]</sup>通过叉指电极制作 100 kHz 电容传感器,完成了两相流中冰或水的探测,但该传感器极易饱和,无法判断相态或测量表面结冰厚度;2016年,中国东南大学刘佳杰<sup>[6]</sup>提出了冰层偶极子转向极化过程中频率及温度因素对测量的干扰问题,并通过试验证实了频率及温度对冰厚测量结果的影响;2017年,奥地利格拉茨技术大学 Flatscher 等<sup>[7]</sup>依据冰与水的介电常数特性,基于转向极化原理及复阻抗谱测量方法实现了多频条件下冰与水状态的稳定区分;同年,加拿大纽芬兰纪念大学 Ikechukwu<sup>[8]</sup>优化了电容传感器的拓扑结构及驱动频率,实现了恒定温度点处的冰厚测量,然而试验结果表明,传感器响应的温度漂移现象十分严重,远远超出了冰层厚度对电容值的影响。

为此,本文通过研究冰介电常数的温度特性,提出了一种针对复阻抗式结冰探测技术的温度漂移补偿方法,并结合试验验证了本文所提方法的可行性与有效性。

### 1 复阻抗式结冰探测原理的研究

尽管冰看似不是一种“电气材料”,但它的介电性和导电性已在理论和实验上得到了广泛的研究。冰由非极性分子组成,由于分子偶极子在电场中的重新定向而具有较大的介电常数。当对冰施加电场时,冰会被电场极化,电子会相对于原子核发生位移,且偶极子会重新取向,从而引发电子位移极化与分子电矩的转向极化。电子位移极化响应迅速,但分子电矩的转向极化响应时间较长,约为  $10^{-2} \sim 10^{-6}$  s,所以对冰施加高频电场时,转向极化过程将落后于电场的周期变化<sup>[9-11]</sup>,导致电介质的极化强度  $P$  (单位体积中电介质感应偶极矩的矢量和) 明显滞后于电场强度  $E$ 。因此在一定的频率下,同一电介质中会同时存在两种速度的极化现象,这就导致了分子、电荷之间会发生摩擦、碰撞等现象,从而产生热量并导致能量损耗,即弛豫极化损耗,也称电介质损耗<sup>[12]</sup>。

德拜弛豫方程指出<sup>[13]</sup>,电介质介电常数  $\epsilon$  的复数表达式为:

$$\begin{cases} \epsilon'(\omega) = \epsilon_{\infty} + \frac{(\epsilon_s - \epsilon_{\infty})}{1 + \omega^2 \tau_D^2} \\ \epsilon''(\omega) = \frac{(\epsilon_s - \epsilon_{\infty}) \omega \tau_D}{1 + \omega^2 \tau_D^2} \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $\epsilon_s$  表示静态介电常数,  $\epsilon_{\infty}$  为光频介电常数。  $\omega$  表示正弦电场的角频率,  $\tau_D$  为弛豫时间,具有时间量纲,称为时间常数。式(1)中介电常数的实部  $\epsilon'(\omega)$  表示储能电容项,虚部  $\epsilon''(\omega)$  则表示弛豫极化损耗。  $\epsilon'(\omega)$  与  $\epsilon''(\omega)$  的关系图如图 1 所示。

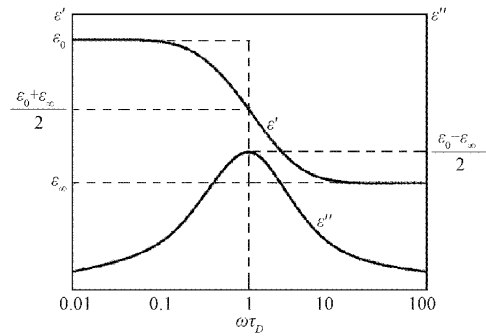


图 1 复介电常数中实部与虚部的关系图

Fig. 1 Relationship between the real and imaginary part of the complex permittivity

冰在 0℃ 的静态介电常数  $\epsilon_s$  约为 96,光频介电常数  $\epsilon_{\infty}$  约为 3,弛豫时间  $\tau_D$  的值为  $2.2e^{-5}$ 。结合式(1)可知,冰在不同的频段内具有不同的介电常数,其在在 0℃ 的复介电常数的实部如图 2 所示。

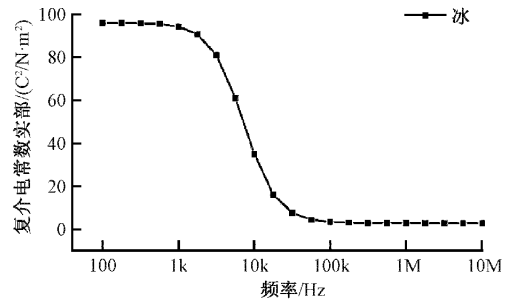


图 2 冰的复介电常数实部曲线(0℃)

Fig. 2 The real part curve of the complex permittivity of ice (0°C)

从图 2 可以发现,0℃ 冰在低于 1 kHz 频段的电场中,能达到其相对介电常数的最大值。如果定义复介电常数由高值降低至低值的频段为弥散区间,则 0℃ 冰的弥散区间在 1.7~100 kHz。所以电场频率高于 100 kHz 时,冰的储能电容已经降至低位。

对于图3所示的平行板电容器模型,其极间电容值可以表示为:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d} \quad (2)$$

其中,  $\varepsilon_r$  为极板间电介质的介电常数,  $S$  表示两平行板的相对面积,  $d$  表示两极板之间的距离。但如果将两个电极板平行放置于同一水平面上, 冰在两个极板上生长时, 两平行极板间的电容也将发生改变。

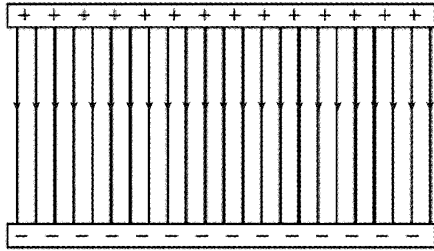


图3 平行板电容器模型

Fig. 3 Parallel plate capacitor model

复阻抗式结冰探测技术所使用的电极为了满足齐平保型的要求,其探测电极将两电极板水平放置,图4为复阻抗式结冰探测技术使用的某一电极模型图,灰色的是金属铜,其中铜层上面覆盖有一层 27.5  $\mu\text{m}$  的聚酰亚胺材料的绝缘层,避免铜与冰直接接触。图4所示的电极模型尺寸为 25 mm, 电极A的面积为 192.83  $\text{mm}^2$ , 电极B面积为 187.16  $\text{mm}^2$ , 两电极间距 2 mm。

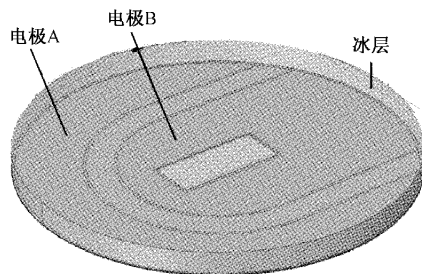


图4 复阻抗式结冰探测系统电极的COMSOL建模图

Fig. 4 COMSOL modeling diagram of the electrode of the complex impedance ice detection system

使用COMSOL软件对图4所示的电极进行仿真,冰的相对介电常数使用0 $^{\circ}\text{C}$ 的数据。通过设置交变电场的频率参数,可以仿真获得不同结冰厚度下的极间电容值的变化曲线,其结果如图5所示。

如图5所示,电极的极间电容值与结冰厚度呈正相关,且电场频率越低,极间电容值的增量越大。需要说明的是,实际使用该电极测量得到的极间电容值与仿真得到的极间电容值差异较大,这是由于仿真时设置电极的背面处于空气中,但实际使用时电极背面存在金属隔离

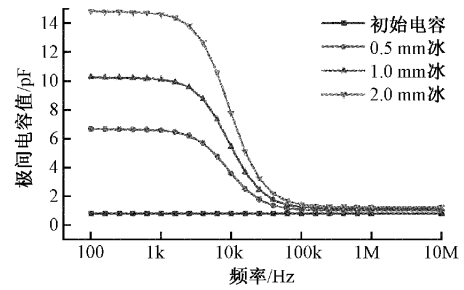


图5 不同厚度的冰对极间电容值的影响

Fig. 5 Effect of ice thickness on capacitance between electrodes

层和屏蔽连接线,电极背面的金属隔离层不仅可以使电极的初始电容增加,而且可以避免电极背面的其他材料对电极产生不可预估的影响。其次,电极表面的聚酰亚胺薄膜并非完全平整,没有敷铜的部位存在凹陷,而凹陷处也会结冰,所以电极在实际使用时会与仿真结果存在差异。

## 2 考虑温度的复阻抗结冰探测方法研究

图5所示的仿真结果是依据冰在0 $^{\circ}\text{C}$ 的参数得到的,所以仿真得到的极间电容值是该电极在环境温度为0 $^{\circ}\text{C}$ 时的极间电容值。式(1)中的 $\varepsilon'$ 虽然没有直接表示与温度 $T$ 的关系,但式(1)中的 $\tau_D$ 是会受温度影响而变化的。 $\tau_D$ 与温度 $T$ 存在如下关系:

$$\tau_D = \frac{1}{2\nu} e^{U/kT} \quad (3)$$

其中, $\nu$ 表示角振动频率, $U$ 表示内能, $k$ 表示玻尔兹曼常数, $T$ 表示绝对温度。从式(3)可以发现,弛豫时间与温度呈指数关系,而且随着温度的上升, $\tau_D$ 是指数式的下降。所以当温度升高时,电介质的弥散区间也会相应的向高频移动。复阻抗式结冰探测技术的本质是测量电极间的电容,结合式(1)可知,温度影响极间电容的机理是温度的变化导致复介电常数的实部发生了变化。

参考平行板电容器的电容计算公式(2)和图5的仿真结果,当结冰厚度为 $d_1$ ,环境温度为 $T_1$  $^{\circ}\text{C}$ ,交变电场的角频率为 $\omega$ 时,复阻抗式探测电极的极间电容值应为:

$$C_1(\omega, T_1, d_1) = a(\omega, T_1, d_1) \varepsilon'_1(\omega, T_1) + C_0(\omega, T_1) \quad (4)$$

其中, $C_1(\omega, T_1, d_1)$ 表示环境温度 $T_1$ 和冰厚 $d_1$ 条件下的极间电容值, $a(\omega, T_1, d_1)$ 为冰厚为 $d_1$ ,温度为 $T_1$ 时的比例系数, $\varepsilon'_1(\omega, T_1)$ 表示冰在温度为 $T_1$ 时的复介电常数的实部, $C_0(\omega, T_1)$ 表示电极在温度为 $T_1$ 时的初始电容值。所以,极间电容值与介电常数的实部存在如下关系:

$$\varepsilon'_1(\omega, T_1) = \frac{C_1(\omega, T_1, d_1) - C_0(\omega, T_1)}{a(\omega, T_1, d_1)} \quad (5)$$

即,极间电容值的增量与复介电常数的实部存在比例关系,且该比例关系的值与频率、温度和结冰厚度有关。图 6 为仿真得到的 0℃ 时,某一结冰厚度的极间电容值增量与复介电常数实部的关系图,从图 6 中可以发现,极间电容增量与复介电常数实部的下降频率点相同,极间电容值增量曲线的斜率与复介电常数实部曲线的斜率近似相同。即:

$$k[\varepsilon'_1(\omega, T_1)] \approx k[C_1(\omega, T_1, d_1) - C_0(\omega, T_1)] \quad (6)$$

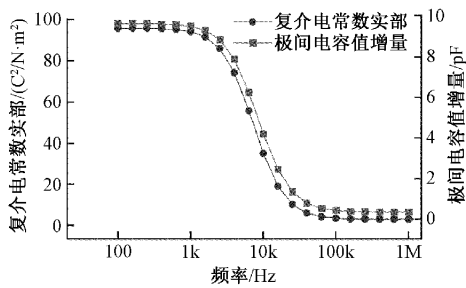


图 6 复介电常数实部与极间电容值增量的关系图  
Fig. 6 Relationship between the real part of the complex permittivity and the increase in capacitance between electrodes

图 7 为使用仪器测量得到的从 -4℃ ~ -24℃ 的某一厚度冰所对应的复阻抗式结冰探测电极的极间电容值。通过式(6)可知,图 7 的曲线变化趋势也可以近似代表 -4℃ ~ -24℃ 的复介电常数实部的变化趋势,但 Y 轴的示数应为某一倍数下的复介电常数的实部值。从图 7 中可以发现,在 1 kHz~1 MHz 的频段内,随着温度升高,复介电常数的实部曲线会向右偏移,即温度升高使弥散区间发生了右移,符合上文分析的时间常数随温度升高而减小的结论。

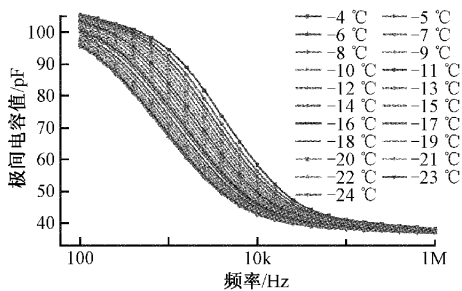


图 7 同一厚度的冰在不同温度下所对应的极间电容值  
Fig. 7 The capacitance between electrodes of the same thickness of ice at different temperatures

从图 1 中可以发现,复介电常数的虚部取得最大值时,存在:

$$\begin{cases} \omega\tau = 1 \\ \omega = 2\pi f \end{cases} \quad (7)$$

而且虚部曲线的积分为介质损耗。虽然介质损耗无法直接测量得到,但损耗角  $\delta$  的正切值却可以直接通过仪器测量得到。介质损耗角  $\delta$  又称为功率因数的余角,其正切值与复介电常数有如下关系:

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (8)$$

结合式(5)可以推导出,复介电常数的虚部表达式满足:

$$a(\omega, T_1, d_1)\varepsilon''_1(\omega, T_1) = a(\omega, T_1, d_1)\varepsilon'_1(\omega, T_1)\tan\delta \approx \tan\delta(C_1(\omega, T_1, d_1) - C_0(\omega, T_1)) \quad (9)$$

结合图 7、式(9)和测量得到的  $\tan\delta$ , 便可以计算出 -4℃ ~ -24℃ 的  $a$  倍的复介电常数的虚部值。图 8 所示为 -14℃ 时的  $a$  倍的复介电常数的虚部值。结合图 1 可以发现,图中虚部值的最大值处的频率的能够满足式(7)的等式,从而可以计算出冰在该温度下的时间常数  $\tau_D$ 。图 9 为冰在 -4℃ ~ -24℃ 的温度区间内,满足式(7)的频率点及其拟合曲线。对频率进行拟合是因为  $\tau_D$  的数值太小,对  $\tau_D$  拟合会造成较大的误差。

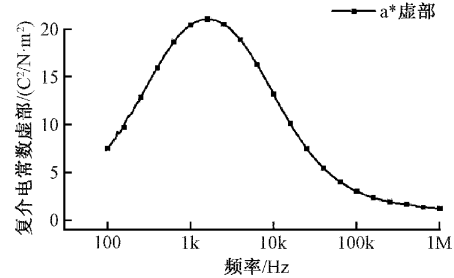


图 8 -14℃ 的某一倍数下的复介电常数的虚部值图  
Fig. 8 Diagram of the imaginary part of the complex permittivity at a certain multiple of -14℃

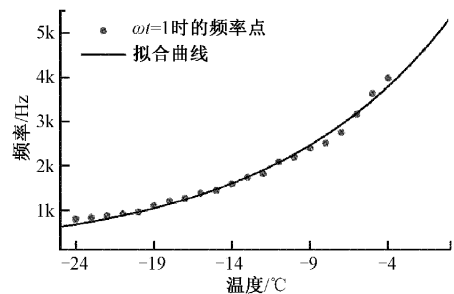


图 9 反映不同温度下冰的时间常数的频率点及其拟合曲线  
Fig. 9 Frequency points and fitting curves reflecting the time constant of ice at different temperatures

通过查阅文献可知,Humbel、Worz 和 Cole<sup>[14]</sup> 分别在 1953 年和 1969 年测得冰在 253 K (-19.15℃) 的时间常

数为  $1.5 \times 10^{-4}$  s, 图 9 中拟合得到该温度下的频率为 1 061.03 Hz, 折算  $\omega\tau = 1$  时的时间常数为  $1.486 \times 10^{-4}$  s, 与文献数据接近, 故图 9 的拟合函数有一定的可信度。

在  $0^\circ\text{C} \sim -24^\circ\text{C}$  的区间内,  $\varepsilon_s$  会随着温度的升高而降低<sup>[14]</sup>, 但  $\varepsilon_\infty$  基本不会发生变化<sup>[15]</sup>,  $\varepsilon_s$  与温度的关系如图 10 所示。

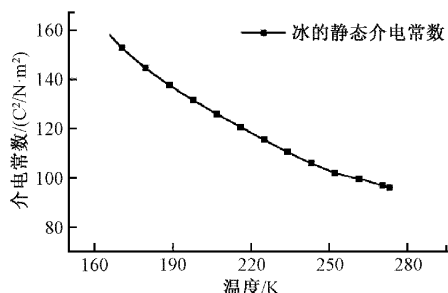


图 10 冰的静态介电常数随温度的变化曲线

Fig. 10 The static dielectric constant of ice varying with temperature

将冰在  $0^\circ\text{C}$  的参数以及图 9 和 10 中的数据带入式 (1)、(7) 中, 可以绘制出  $-4^\circ\text{C} \sim -24^\circ\text{C}$  的冰的复介电常数的实部与温度及频率的关系图, 如图 11 所示。其函数关系式为:

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \left(2\pi f + \frac{1}{2\pi f_0(T)}\right)^2} \quad (10)$$

其中,  $f$  为交变电场的频率,  $f_0(T)$  为  $T$  温度下满足式 (7) 的频率点。

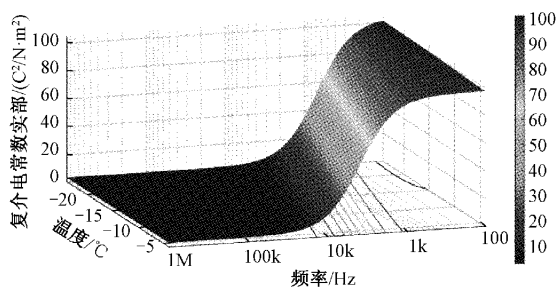


图 11 冰的复介电常数实部与温度及频率的关系

Fig. 11 Relationship between the real part of the complex permittivity of ice and the temperature and frequency

假设在环境温度为  $T_1^\circ\text{C}$  时, 测量  $d_1$  厚度的冰的极间电容值  $C_1$  应为:

$$C_1(\omega, T_1, d_1) = a(\omega, T_1, d_1) \varepsilon'(\omega, T_1) + C_0(\omega, T_1) \quad (11)$$

其中,  $a(\omega, T_1, d_1)$  为比例系数,  $\omega$  为交变电场的角频率,  $C_0(\omega, T_1)$  表示电极的初始电容。当环境温度变为  $T_2^\circ\text{C}$  时, 此时的极间电容  $C_2$  为:

$$C_2(\omega, T_2, d_1) = a(\omega, T_2, d_1) \varepsilon'(\omega, T_2) + C_0(\omega, T_2) \quad (12)$$

联立式 (11) 和 (12) 可以得出:

$$C_2(\omega, T_2, d_1) = [C_1(\omega, T_1, d_1) - C_0(\omega, T_1)] \times \frac{a(\omega, T_2, d_1) \varepsilon(\omega, T_2)}{a(\omega, T_1, d_1) \varepsilon(\omega, T_1)} + C_0(\omega, T_2) \quad (13)$$

使用 COMSOL 仿真  $0^\circ\text{C}$  和  $-19.15^\circ\text{C}$  时的不同结冰厚度的极间电容值的关系, 其仿真结果如图 12 所示。

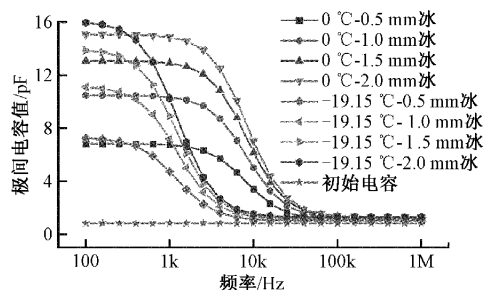


图 12 不同温度和厚度下的极间电容值仿真

Fig. 12 Simulation of capacitance between electrodes under different temperature and thickness

根据图 12 中的数据可以计算出不同温度下, 同一结冰厚度的比例系数  $a(\omega, T, d)$  之间的比值关系, 即  $\frac{a(\omega, T_1, d_1)}{a(\omega, T_2, d_1)}$  的比值关系, 其结果如图 13 所示。

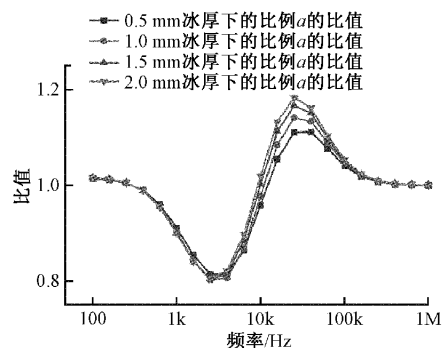


图 13 不同结冰厚度及温度的比例系数之间的比值关系

Fig. 13 Ratio relationship between the proportional coefficients of different icing thickness and temperature

从图 13 中可以发现, 不同厚度下的比例系数的比值在大部分频率下是近似相同的, 即存在:

$$\frac{a(\omega, T_1, d_1)}{a(\omega, T_2, d_1)} \approx \frac{a(\omega, T_1, d_2)}{a(\omega, T_2, d_2)} \quad (14)$$

所以,  $\frac{a(\omega, T_1, d_1)}{a(\omega, T_2, d_1)}$  的值与厚度几乎无关, 其主要影响因素为温度和频率。故式 (13) 可以简化表示为:

$$C_2(\omega, T_2, d_1) \approx \frac{a(\omega, T_2)}{a(\omega, T_1)} \times [C_1(\omega, T_1, d_1) - C_0(\omega, T_1)] \times \frac{\varepsilon(\omega, T_2)}{\varepsilon(\omega, T_1)} + C_0(\omega, T_2) \quad (15)$$

图 14 为在 1 kHz 的频率下,使用复阻抗式结冰探测电极测量得到的同一结冰厚度但不同环境温度下的比例系数  $a(1 \text{ kHz}, T)$  的值。根据图 11 和图 14 中的数据,结合式(15),只要已知测量极间电容时的环境温度,便可以将 1 kHz 激励时测量得到的不同温度下的极间电容值转换为同一温度下的极间电容值,这样便可以解决极间电容值随温度变化而偏移的问题。对于其他频率下的极间电容值的校正,也仅需测量其他频率下的比例系数  $a(\omega, T)$ ,即可实现温度漂移的校正。复阻抗式结冰探测技术在传统的温度漂移校正方法中,需要标定不同的频率、温度和结冰厚度下的极间电容值来校正温度漂移,而本小节研究的温度漂移校正模型减少了结冰厚度对温度补偿效果的影响,极大降低了复阻抗参数温度补偿工作的复杂度。

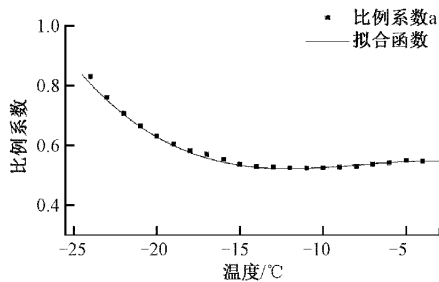


图 14 1 kHz 时某一结冰厚度下不同温度对应的比例系数  $a$  的值及其拟合曲线

Fig. 14 The value of the proportional coefficient  $a$  corresponding to different temperatures at a certain icing thickness at 1 kHz and its fitting curve

### 3 试验验证

图 15 是对上述冰的温度漂移校正模型的验证实验数据。使用图 4 所示的电极进行结冰温度漂移试验,测量得到在 1 kHz 交变电场下的 11 447 个同一结冰厚度在  $-5^\circ\text{C} \sim -20^\circ\text{C}$  环境温度下的电极的极间电容值。采用本文的温漂校正方法,将极间电容值  $C(\omega, T, d_1)$ 、与该极间电容值对应的环境温度  $T$ 、交变电场频率  $f$  和比例系数  $a(1 \text{ kHz}, T)$ ,以及该温度下的电极初始值带入校正公式式(15)中,再将  $-10^\circ\text{C}$  相关的数据带入到式(15)即可将不同温度下的极间电容值统一校正到  $-10^\circ\text{C}$  时的极间电容值。

校正后电容数据的不确定度增大是由于系统的温度测量数据不稳定造成的。虽然图 15 中原始数据曲线的不确定度较小,但校正模型中,还引入其他与温度相关的

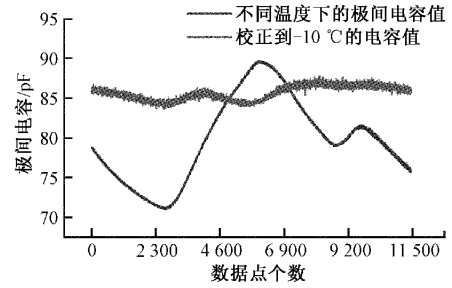


图 15 冰的温度漂移校正模型的验证实验数据

Fig. 15 Validation experimental data of the ice temperature drift correction model

变量。所以温度会严重影响校正模型的准确性,如对图 15 实验中的温度数据滤波,则校正后的不确定度会有所改善,滤波后的数据如图 16 所示。

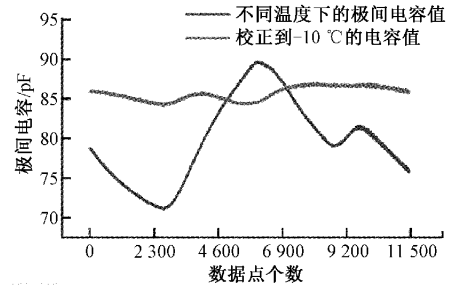


图 16 对温度滤波后的温度漂移校正模型的验证实验数据

Fig. 16 Experimental data validation of temperature drift correction model after temperature filtering

从图 16 中可以发现,原始极间电容值随着温度变化最高产生了 20 pF 偏移量,方差为 5.31。使用本文的温度补偿方法进行校正后,极间电容值随着温度的变化仅有 3 pF 以内的偏移量,方差为 0.84。

### 4 结 论

本文针对复阻抗式结冰探测技术中的温度补偿问题,结合理论分析与试验数据求解出了冰在不同温度下的复介电常数,并建立了针对复阻抗式结冰探测的温度漂移校正模型。试验结果表明,采用本文的温漂补偿方法可将温度漂移对测量结果的影响减少 80% 以上,有望显著提高复阻抗式结冰探测器的温度补偿准确性及标定效率。本文提出的温漂校正方法计算简便,校正精度高,对于复阻抗式结冰探测技术的实际应用具有积极的意义。

#### 参考文献

[1] 张杰,周磊,张洪,等. 飞机结冰探测技术[J]. 仪器仪表学报,2006(12):1578-1586.  
ZHANG J, ZHOU L, ZHANG H, et al. Aircraft icing

- detection technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006 (12): 1578-1586.
- [2] KIND R J, POTAPCZUK M G, FEO A, et al. Experimental and computational simulation of in-flight icing phenomena [J]. Progress in Aerospace Sciences, 1998, 34(5-6): 257-345.
- [3] FAA. Performance and handling characteristics in icing conditions: AC 25-25A[R]. Washington, D. C FAA, 2014.
- [4] 肖春华, 林伟, 杨升科, 等. 结冰云雾参数对冰与固壁间剪切强度影响的初步研究 [J]. 航空动力学报, 2019, 34(12): 2627-2634.
- XIAO CH H, LIN W, YANG SH K, et al. A preliminary study on the effect of icing cloud parameters on the shear strength between ice and solid wall [J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(12): 2627-2634.
- [5] ZHI X, CHANG H, WANG B, et al. Development of a capacitive ice sensor to measure ice growth in real time [J]. Sensors, 2015, 15(3): 6688-6698.
- [6] 刘佳杰. 路面覆盖物多频分辨算法的分析与改进 [D]. 南京: 东南大学, 2016.
- LIU J J. Analysis and improvement of multi frequency resolution algorithm for road cover [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [7] FLATSCHER M, NEUMAYER M, BRETTERKLIEBER T. Maintaining critical infrastructure under cold climate conditions: A versatile sensing and heating concept [J]. Sensors and Actuators A Physical, 2017, 267 (1): 538-546.
- [8] IKECHUKWU C. Marine icing sensor design using capacitive techniques [D]. St. Johns: Memorial University of Newfoundland, 2017.
- [9] 吕艳丽. 铝粉/聚合物复合材料的制备及介电性能研究 [D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2011.
- LYU Y L. Preparation and dielectric properties of aluminum powder / polymer composites [D]. Baotou: Inner Mongolia University of science and technology, 2011.
- [10] BOGATIN A S, BULANOVA A L, KOVRIGINA S A, et al. Frequency management of the capacitance and conductivity of a dielectric upon relaxation polarization [J]. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2020, 84(9): 1172-1174.
- [11] ZHAO J, CHEN H, WEI M, et al. Effects of Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content on the structure, dielectric properties and dielectric tunability of BaTiO<sub>3</sub> ceramics [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2019, 30(21): 19279-19288.
- [12] 杨英芸. 绝缘纸板微水分介电测量中接触压力问题研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- YANG Y Y. Research on contact pressure in dielectric measurement of moisture content in pressboard [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007.
- [13] 桂康. 路面气象状态识别关键技术研究 [D]. 武汉:

华中科技大学, 2019.

GUI K. Research on key technologies of pavement meteorological State Recognition [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.

- [14] TROIANO A, PASERO E, MESIN L. New system for detecting road ice formation [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2010, 60 (3): 1091-1101.

- [15] PETRENKO V F, WHITWORTH R W. Physics of ice [M]. Oxford: Oxford University Press, 2002: 73-74.

### 作者简介



任宏宇, 2018 年于中南大学获得学士学位, 现为华中科技大学硕士研究生, 主要研究方向为飞机结冰探测和热辐射测量。

E-mail: renhongyu@foxmail.com

**Ren Hongyu** received his B. Sc. degree from Central South University in 2018. He is currently a master student at Huazhong University of Science and Technology. His main research interests include aircraft icing measurement and thermal radiation detection.



苑丹丹, 2009 年于山东大学获得学士学位, 2012 年于北京航空航天大学获得硕士学位, 现为成都凯天电子股份有限公司高级工程师, 主要研究方向为飞机结冰探测。

E-mail: 497074420@qq.com

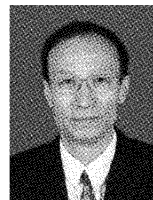
**Yuan Dandan** received her B. Sc. degree from Shandong University in 2009, and received her M. Sc. degree from Beihang University of in 2012. She is currently a senior engineer of Chengdu Kaitian Electronics Co., Ltd. Her main research interests include aircraft icing measurement.



桂康 (通信作者), 2013 年于华中科技大学获得学士学位, 2019 年于华中科技大学获得博士学位, 现为华中科技大学博士后, 主要研究方向为结冰探测与结冰防护技术。

E-mail: guikang2021@163.com。

**Gui Kang** (Corresponding author) received his B. Sc. degree and Ph. D. degree both from Huazhong University of Science and Technology in 2013 and 2019, respectively. He is currently a postdoctor at Huazhong University of Science and Technology. His main research interests include ice detection and ice protection technology.



叶林, 1982 于原华中工学院获得学士学位, 1988 年于原华中理工大学获得硕士学位, 现为华中科技大学教授, 主要研究方向为飞机结冰探测和热辐射测量。

E-mail: lye@mail.hust.edu.cn

**Ye Lin** received his B. Sc. degree from Huazhong Institute of Technology in 1982, and received his M. Sc. degree from Central China University of Science and Engineering in 1988. He is currently a professor at Huazhong University of Science and Technology. His main research interests include aircraft icing measurement and thermal radiation detection.