

基于超声脉冲波的飞机原位冰厚测量实验研究^{*}

曾行昌^{1,2} 贺敬³ 王智育¹ 惠刚阳² 何洋¹

(1.西北工业大学机电学院 西安 710072;2.西安应用光学研究所 西安 710065;3.中国飞行试验研究院测试所 西安 710089)

摘要: 飞机结冰探测对于保障飞机飞行安全具有重要意义,冰厚测量可以对飞机不同关键部位结冰情况给出定量评估。本文利用超声波在跨介质传播时产生脉冲回波的原理,通过采集超声脉冲回波反射信号,确定超声波在冰层中传输的时间,进而来感应被测表面覆盖冰层的厚度。根据超声波的测量原理及飞机实际蒙皮的材料,搭建了超声波产生系统装置、半导体制冷结冰平台。通过对飞机蒙皮上模拟产生的1~17 mm厚的冰层进行实验测量,超声波对较大厚度(≥ 2 mm)的冰层测量结果准确,测量值与实际模拟冰层厚度吻合,精度可达 ± 0.5 mm,但对于薄冰层测量精度差,甚至无法检测。本文的研究为基于超声脉冲波的飞机原位冰厚测量提供了工程应用的实验依据,并为进一步开发出优良的超声波结冰探测传感器奠定了基础。

关键词: 飞机结冰;超声脉冲波;冰层;冰厚测量

中图分类号: V244.1;TN609 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.3

Study on in-situ measurement of aircraft ice thickness based on ultrasonic pulse wave

Zeng Xingchang^{1,2} He Jing³ Wang Zhiyu¹ Hui Gangyang² He Yang¹

(1. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China;

3. Chinese Flight Test Establishment Testing Institute, Xi'an 710089, China)

Abstract: Aircraft icing detection is crucial for ensuring flight safety. Ice thickness measurement can provide a quantitative assessment of ice accretion on different key parts of the aircraft. This paper utilizes the principle that ultrasonic waves generate pulse echoes when propagating across media. By collecting the reflected signals of ultrasonic pulse echoes, the time of ultrasonic wave transmission in the ice layer is determined to sense the thickness of the ice layer covering the measured surface. Based on the measurement principle of ultrasonic waves and the actual material of the aircraft skin, an ultrasonic generation system device and a semiconductor refrigeration icing platform were built. Through experimental measurements on simulated ice layers with thicknesses ranging from 1 to 17 mm on the aircraft skin, it was found that the ultrasonic wave measurement results for thicker ice layers (≥ 2 mm) were accurate, with the measured values matching the actual simulated ice layer thicknesses, and the precision could reach ± 0.5 mm. However, for thinner ice layers, the measurement accuracy was poor, and in some cases, detection was even impossible. The research in this paper provides experimental evidence for the engineering application of in-situ ice thickness measurement based on ultrasonic pulse waves on aircraft and lays the foundation for the further development of excellent ultrasonic icing detection sensors.

Keywords: aircraft icing; ultrasonic pulse wave; ice layers; ice thickness measurement

0 引言

机结冰严重影响飞机性能,威胁飞行安全,重则引发空难^[1-3]。因此,世界各国针对飞机表面结冰探测提出了重要

需求^[4-5],目前国内外学者根据不同测量原理开发了多种形式的结冰传感器^[6],包括谐振式^[7]、微波式^[8]、光纤式^[9]、电容式^[10]、光学成像式^[11]等,这些类型的结冰传感器都有各自优点和局限性,如谐振式结冰传感器对小范围结冰不敏

感,易受各种环境因素的影响^[12];微波式结冰传感器易受结构或环境噪音影响,不易集成^[13];光纤式结冰传感器结构复杂,光能量衰减快,很难测量厚冰层^[14];电容式结冰传感器温度对传感元件的性能有较大影响,测量精度低^[15];光学成像式结冰对是否结冰探测准确,但是对冰厚测量误差较大^[16]。得益于微系统制造技术的发展,高性能超声波器件的制造更加便捷,利用超声波进行结冰探测和防除冰的研究已成为近些年研究热点。Liu 等^[17]提出了两种超声传感器,用于冰的原位探测和厚度测量。一种传感器是直接 1.3 mm 厚的铝(Al)合金表面沉积 40 μm 的压电薄膜和叉指电极制备获得,另一种传感器是在 50 μm 厚的柔性聚酰亚胺上镀制压电薄膜和电极制备获得,然后黏附在飞机表面。这些传感器可以在 3 mm 厚的铝板上检测 1~1.5 mm 的冰层。这些超声波传感器的测量结果与千分尺的测量结果相吻合。江城等^[18]利用超声 Love 波,检测冰层厚度和状态,研究表明超声 Love 波的结冰传感器可以有效区分空气、冰和水;Yang 等^[19]研究了声表面波的纳米级振动及表面热效应对霜冰的影响机理;Zeng 等^[20]研究了声表面波降低冰粘附力的机理,研究表明声表面波的界面热效应可大幅度降低冰的粘附力;陈晨等^[21]通过 ABAQUS 有限元软件模拟了超声 Lamb 波在附有不同厚度及不同类型冰的铝板中的传播过程,实现金属板状结构表面的透明冰、混合冰、霜冰 3 种积冰类型的区分和检测。

Stefan 等^[22]利用声表面波对釉冰的融冰和除冰过程进行了研究,实现了几平方厘米釉冰覆盖的表面除冰。Zeng 等^[6]对声表面波传感器在结冰气象环境中,水蒸气、雾及冰对声表面波谐振频率的影响机理和规律进行了研究,为开发高性能声表面波结冰传感器奠定了基础。

由上述可知,基于超声波的结冰探测多应用的是声表面波,其对空气、水和冰等不同相的分辨及薄冰层的探测较为准确。本文结合飞机结冰的实际工况,搭建了模拟飞机蒙皮的超声脉冲波的结冰探测系统,利用超声脉冲波的强穿透力和良好的回波信号提取特性进行结冰探测。该研究为基于超声脉冲波的飞机原位冰厚测量提供了工程应用的实验依据,并为进一步开发出优良的超声波结冰探测传感器奠定了基础。

1 超声脉冲波的测冰厚原理

超声脉冲波冰厚测量的原理是利用超声波脉冲反射法进行探测的,其采用一个超声脉冲波探头(压电式换能器)进行脉冲超声波的发射与接收,根据超声波在不连续介质及界面中传播时发生反射的特点,通过测量超声波在待测介质内往返一次的时间和待测介质的声速,计算待测介质的厚度,厚度计算公式如下:

$$d = \frac{c \times t}{2} \quad (1)$$

式中: d 为待测介质厚度, c 为待测介质中的声速, t 为待测

介质中相邻回波时间差,也称为渡越时间(time of flight, TOF)。其原理如图 1 所示。

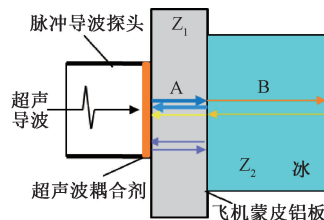
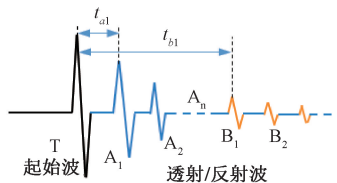


图 1 超声结冰厚度测量原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ultrasonic icing thickness measurement principle

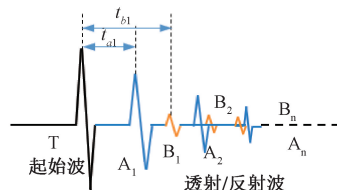
超声脉冲探头产生脉冲波,脉冲波穿过介质 A,在 A/B 介质接触面发生反射和折射,反射波到达超声探头接受感应,形成一次脉冲回波 A_1 ;同理 A_1 会再次被反射形成二次回波 A_2 ;另外,起始波透射 A/B 介质接触面进入介质 B 中,会在介质 B/空气界面反射后返回介质 B 中,并透过介质 A,到达超声探头,形成介质 B 的一次回波 B_1 。显然,介质 B 所形成的回波会与 A 介质的回波发生叠加,典型的波形如图 2(b)所示,主要取决于介质 B 的厚度。

如图 2(a)所示 T 为起始波, A_n 是超声脉冲波透过飞机蒙皮铝板后,在铝板与冰的接触面反射回来的 n 次回波, B_n 表示 A_n 波透过铝板透射进冰层,从冰与空气界面反射回来的回波。由超声波的反射特点可知,直到其能量衰减完之前,其会在待测件内一直发生超声波的反射,从而有多次回波被超声探头接收到。



(a) 超声脉冲波反射波分离示意图

(a) Diagram of ultrasonic pulse wave reflection separation



(b) 超声脉冲波反射波相互波叠加意图

(b) Diagram of ultrasonic pulse wave reflection superposition

图 2 超声波脉冲透射测冰厚的原理

Fig. 2 Principle of ultrasonic pulse transmission for measuring ice thickness

由图 2 可知,冰层的厚度计算如下:

$$d_{ice} = \frac{c_{ice}(t_{b1} - t_{a1})}{2} \quad (2)$$

式中: d_{ice} 为待测冰层厚度, c 是超声波在冰层中的声速为

3 700 m/s; t_{b1} 为起始波穿过铝蒙皮和冰层,第一次被冰/空气界面反射会来波的渡越时间; t_{a1} 为起始波穿过铝蒙皮第一次被铝/冰界面反射会来波的渡越时间。

2 测冰厚系统搭建与实验

2.1 测试系统的搭建

图3为基于超声波的飞机原位冰厚测量实验研究系统连接示意图。超声波发生与接收仪采用型号是 CTS-8077PR; 超声探头为 ULS 的 10 MHz 探头, 示波器为 Agilent MSO6064a; 飞机蒙皮选用与 XX 运输机相同的 7075 型铝材, 半导体制冷及结冰装置为自制。

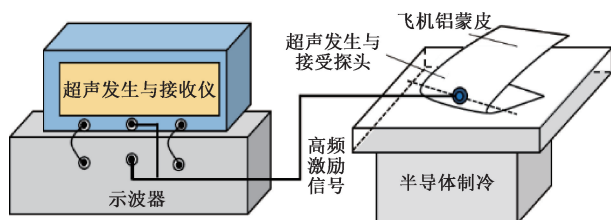
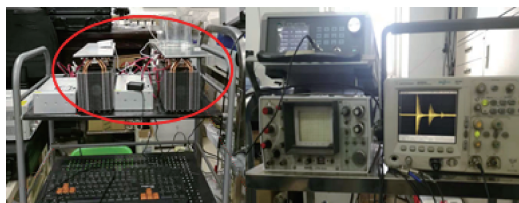


图3 冰厚测量实验系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of ice thickness measurement experimental system

图4为超声波结冰厚度探测实物系统图, 实验过程中采用 4 mm 厚 7075 型铝板替代飞机蒙皮; 将 4 mm 厚的 7075 型铝板放置在半导体制冷平台上, 打开制冷平台降温, 观察制冷平台上的温度, 当温度降低到 -5°C 时, 将无底板、周围密封处理的结冰筒放置在飞机铝板蒙皮上, 按预结厚度冰的体积计算水量, 添加纯净水。继续降温, 半导体温度降低到 -20°C 时, 等待结冰筒中水完全冻结后, 进行冰厚测量。实验中超声波发生与接收仪发射出的脉冲信号为单脉冲的连续信号, 中心频率为 10 MHz。



(a) Picture of semiconductor refrigeration platform and ultrasonic pulse wave signal excitation and acquisition system



(b) Picture of icing process (c) Picture of 7 mm thick icing

图4 超声波结冰厚度探测系统实物图

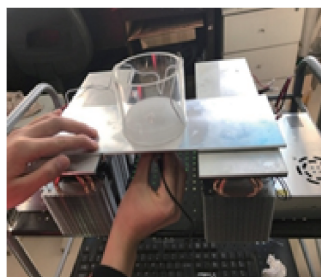
Fig. 4 Picture of ultrasonic icing thickness detection system

2.2 基于超声脉冲波测量的结冰实验

实验研究中进行了 8 组实验, 分别为结冰厚度为 0、1、1.5、2、3、7、12、17 mm 的测量实验。其中 0 mm 厚的冰层, 即未结冰的探测实验是为了校准蒙皮的厚度及初始信号的状态。实验过程中, 为了进行测量原理及测量精度的分析, 每组实验均开展超声波探头直接与冰面接触的测量和超声波探头隔着铝板(模拟飞机蒙皮)从内侧进行非接触测量式的冰厚测量实验, 测量方式分别如图 5(a) 和(b) 所示。



(a) 接触式冰厚测量
(a) Contact ice thickness measurement



(b) 非接触式冰厚测量
(b) Non contact ice thickness measurement

图5 冰厚测量的两种方式

Fig. 5 Two methods of ice thickness measurement

3 结果与分析

在实验结果和分析部分, 主要是结合实验结果和理论对 0 mm 厚冰层探测的超声波信号初始状态信号分析、信号提取导致的测量精度误差的理论分析、较薄冰层(3 mm 厚)和较厚冰层(17 mm)典型反射波的测量结果进行分析及相关实验数据的对比分析。

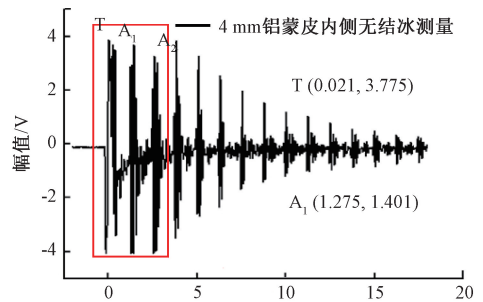
图6为 0 mm 厚冰层探测实验结果, 即超声波仅透过飞机蒙皮的测量结果, 超声波发生/接受仪器发出的单尖脉冲波透过 4 mm 铝蒙皮接受到的反射回波波形, 由图 6(a) 波形可知, 首先是单脉冲信号在 4 mm 铝蒙中发生了多次反射, 信号每次反射都发生了衰减, 探头接受的信号呈多次介递减的信号。首个脉冲信号 T 波与 A_1 波的波峰时间差 $\Delta t_0 = 1.275 - 0.021 = 1.254$ ns。由式(1)可获得铝蒙皮的厚度:

$$d_{\text{铝}} = \frac{c_{\text{铝}} \times t_0}{2} = 3.951 \text{ mm} \quad (3)$$

其中, $c_{\text{铝}} = 6300$ m/s 是超声纵波在铝中的传输速率。由计算结果可知超声波测出的铝板厚度为 3.952 mm 近似

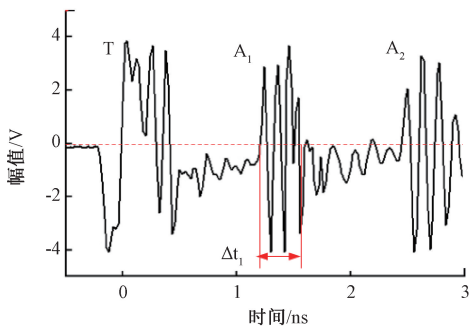
为 4 mm。

其次,由图 6(b)可知,单尖脉冲波发生了衰减振荡,变成了衰减振荡脉冲信号,信号衰减宽度为 $\Delta t_1 = 0.281$ ns,这是由于超声传感器压电陶瓷受到了电场激励产生了振荡及铝蒙皮表面粗糙导致的,是不可避免的。



(a) 透过 4 mm 铝蒙皮接受到的反射波形

(a) Reflected waveform received through 4 mm aluminum skin



(b) 起始波和一次回波的局部放大图

(b) Local magnification of initial wave and primary echo

图 6 超声波回波波形

Fig. 6 Ultrasonic echo waveform

但是,在冰厚的测量过程中,如图 2 所示若是冰厚测量信号的首次回波 B_1 和二次回波 B_2 全部耦合进行单脉冲的衰减信号宽度中,则无法进行信号的提取,就无法进行冰厚的测量,因此信号衰减宽度 Δt_1 对冰厚的测量精度至关重要。

图 6(b)超声波脉冲回波宽度 Δt_1 为 0.281 ns,由式(1)即可获得冰厚测量精度 δ_1 :

$$\delta_1 = \frac{C_{ice} \times \Delta t}{2} = \frac{3\,700 \times 0.281 \times 10^{-2}}{2} = 0.519 \text{ mm} \quad (4)$$

由此可知,因超声波信号衰减产生有限带宽,导致冰厚测量的精度为 ± 0.5 mm。但是,需要说明的是随着超声波探头研制质量的提高及铝蒙皮表面粗糙度的降低,该测量精度是可以进一步提高的。

另外,在利用的超声波进行冰厚测量时,冰厚的测量精度还与超声波脉冲的时间分辨率有关,若是冰厚太薄,薄冰层上下表面的两个反射回波在时域上无法分离,就无法提取出渡越时间,此时可以如式(5)所示。

$$\Delta t = \frac{2d_{\text{薄冰层}}}{c} \leq \tau \quad (5)$$

其中, Δt 表示两个回波的时间差, τ 表示超声脉冲的时间宽。对于中心频率为 f_0 的探头,其脉冲时宽 $\tau \approx 1/f_0$ 。

由式(5)可知,本实验中所用的探头中心频率 $f_0 = 10$ MHz 的超声波探头,可探测的冰层厚度精度为 δ_2 :

$$\delta_2 = d_{\text{min冰层}} \geq \frac{c_{\text{冰}} \times \tau}{2} \quad (6)$$

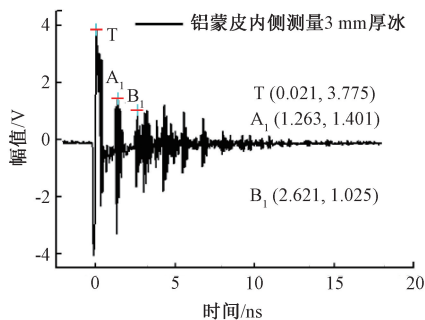
其中, $\tau = 1 \times 10^{-4}$ s。由式(6)计算可得 $\delta_2 = 0.185$ mm。

通过上述分析可知,基于本实验的测量的数据分析获得,冰厚的测量最小值为 $\delta_2 = 0.519$ mm。基于本实验超声探测器的性能,即超声波脉冲的时间分辨率,获得冰厚的测量最小值为 $\delta_2 = 0.185$ mm。因此冰厚的探测精度 δ ,可用式(7)表示。

$$\delta = \max(\delta_1, \delta_2) \quad (7)$$

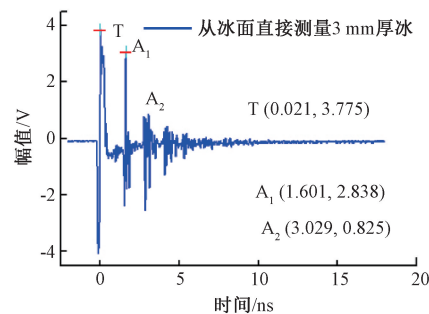
由式(7)可知基于超声波的冰厚探测的精度可达 ± 0.5 mm。

图 7 为基于超声波进行 3 mm 厚冰的测量结果。从图 7(a)可知从铝蒙皮内侧进行冰厚测量的渡越时间为 1.358 ns,由式(2)计算冰厚为 2.512 mm;从图 7(b)可知直接从冰面进行冰厚测量的渡越时间为 1.580 ns,由式(2)计算冰厚为 2.923 mm。



(a) 从铝蒙皮内侧进行冰厚测量

(a) Ice thickness measurement from the inner side of Al skin



(b) 直接从冰面自上而下进行冰厚测量

(b) Measure directly from top to bottom on the ice surface

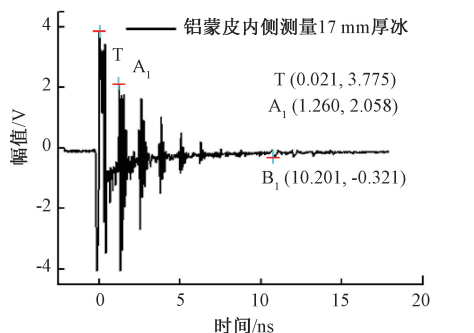
图 7 3 mm 厚冰的测量曲线图

Fig. 7 Measurement curve of 3 mm thick ice

从图 7 可知,首先冰层较薄 B_n 波与 A_n 波有交叉和重合,但是可以明显判断出各自峰值,测算出渡越时间;其次,从铝蒙皮内测及直接冰面测量冰厚,其厚度分别为 2.512 mm 和

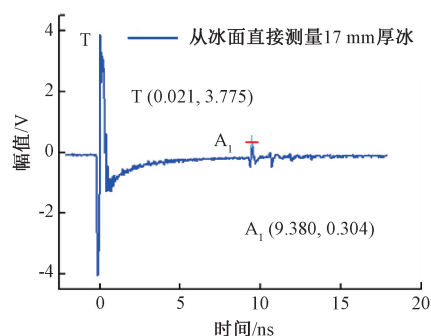
2.923 mm,显然直接测量更准确,但在精度误差范围内与预结冰厚度相符,与理论保持一致。

图8为冰层厚度达17 mm的测量结果。从图8(a)可知从铝蒙皮内侧进行冰厚测量的渡越时间为9.141 ns,由式(2)计算冰厚为16.910 mm;由图8(b)可知直接从冰面进行冰厚测量的渡越时间为9.359 ns,由式(2)计算冰厚为17.314 mm。



(a) 从铝蒙皮内侧进行冰厚测量

(a) Ice thickness measurement from the inner side of Al skin



(b) 直接从冰面自上而下进行冰厚测量

(b) Measure directly from top to bottom on the ice surface

图8 17 mm厚冰的测量曲线图

Fig. 8 Measurement curve of 17 mm thick ice

从图8可知,冰层较厚 B_n 波与 A_n 波无交叉, B_n 波与 A_n 波的峰值容易判断,渡越时间容易测算。相比图7所示的较薄冰层,其冰厚度测量的更加准确。然而,随着冰厚的增加 B_n 的衰减更加显著,虽然其受到 A_n 的影响小,但是自身的波峰幅值小,可分辨的也更加困难。

4 结 论

本论文提出了基于超声波的飞机原位冰厚测量方法,并通过实验测试、实验结果对比和理论分析验证了基于超声波的飞机原位冰厚测量的可行性。论文中根据超声脉冲的测量原理及飞机实际蒙皮的材料,搭建了超声脉冲产生系统装置、半导体制冷结冰平台。通过对飞机蒙皮上产生模拟产生的1~17 mm厚的冰层进行实验测量,得到超声波对较大厚度(≥ 1 mm)的冰层测量准确。获得基于超声波的冰厚测量精度为 ± 0.5 mm,分析了误差产生的原因及测量精度提高的方法。

对比本文实验研究结果,基于超声波的冰厚探测方法,适用于较厚(≥ 1 mm)冰层的探测。对于薄冰层测量,由于多次声波的叠加及数据采集与处理误差,很难精确测量,甚至无法检测。本研究为基于超声脉冲波的飞机原位冰厚测量提供了工程应用的实验依据,并为进一步开发出优良的超声波结冰探测传感器奠定了基础。

参考文献

- [1] NICKOVIC S, CVETKOVIC B, PETKOVIC S. Cloud icing by mineral dust and impacts to aviation safety [J]. Scientific Reports, 2021, 11 (1): 6411-6426.
- [2] APPIAH K P U S. Inflight icing accidents and incidents, 2006 to 2010 [D]. Knoxville: The University of Tennessee, 2011.
- [3] 陈宇, 罗艳春, 刘国庆, 等. 飞机结冰对飞行安全的影响[J]. 装备制造技术, 2014, 3(5): 254-256.
CHEN Y, LUO Y CH, LIU G Q, et al. The impact of aircraft icing on flight safety [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2014, 3(5): 254-256.
- [4] Federal Aviation Administration. 33.68 amendment 33-34 induction system icing [R]. United States: Federal Aviation Administration, 2015.
- [5] 高郭池, 张波, 全敬泽, 等. 正常类飞机自然结冰试飞适航审定技术[J]. 航空学报, 2024, 45(1): 195-216.
GAO G CH, ZHANG B, QUAN J Z, et al. Airworthiness certification technology for natural ice formation flight tests of normal category aircraft [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(1): 195-216.
- [6] ZENG X C, ONG H, HAWORTH L. Fundamentals of monitoring condensation and frost/ice formation in cold environments using thin-film surface-acoustic-wave technology [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2023, 15(29): 35648-35663.
- [7] 王岩, 王渊, 朱程香, 等. 谐振式飞机结冰探测传感器仿真及实验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(2): 267-273.
WANG Y, WANG Y, ZHU CH X, et al. Simulation and experimental research on resonant aircraft icing detection sensor [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 54(2): 267-273.
- [8] KOZAK R, WILTSHIRE B D, KHANDOKER M. Modified microwave sensor with a patterned ground heater for detection and prevention of ice accumulation [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(49): 55483-55492.
- [9] IKIADES A A. Direct ice detection based on fiber optic sensor architecture [J]. Applied Physics Letters, 2022, 121(10): 011101.

- 2007, 91(10), DOI: 10.1063/1.2772183.
- [10] 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.
REN H Y, YUAN D D, GUI K, et al. A temperature compensation method for complex impedance ice detection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(6): 88-94.
- [11] ZHUGE J C, YU Z J, GAO J S, et al. Ice detection based on near infrared image analysis [C]. International Conference on Frontiers of Manufacturing and Design Science, 2012, 121: 3960-3964.
- [12] TIAN B, ZHU C L, LI Q Y, et al. Study of bimorph piezoelectric cantilever structure used on icing detection[C]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34: 1073-1082.
- [13] LU B, ZHAO H, MA J, et al. Electrothermal-coupled flexible microwave resonant icing sensor Array [J]. Microelectronic Engineering, 2025, 300: 112360-112366.
- [14] GE J, YE L, ZOU J. A novel fiber-optic ice sensor capable of identifying ice type accurately[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2012, 175: 35-42.
- [15] STOCKSREITER W, ZANG H. Compact multifunctional wireless capacitive sensor system and its application in icing detection[J]. Sensors, Sensors-Basel, 2019, 19(24): 5562-5576.
- [16] PAPPALARDO G, MINEO S, ZAMPELLI S P, et al. InfraRed thermography proposed for the estimation of the cooling rate index in the remote survey of rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 83: 182-196.
- [17] LIU Q, WU K T, KOBAYASHI M, et al. In-situ ice and structure thickness monitoring using integrated and flexible ultrasonic transducers[J]. Smart Materials and Structures, 2008, 17: 045023.
- [18] 江城,倪世宏,李红浪,等. Love 波飞机结冰传感器研究[J]. 航空学报, 2009, 30(5): 906-911.
JIANG CH, NI SH H, LI H L, et al. Research on the ice detection sensor for love wave aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(5): 906-911.
- [19] YANG D, TAO R, HOU X, et al. Nanoscale "Earthquake" effect induced by thin film surface acoustic waves as a new strategy for ice protection[J]. Advanced Materials Interfaces, 2021, 8(2): 2001776.
- [20] ZENG X, YAN Z, LU Y, et al. Reduction of ice adhesion using surface acoustic waves: Nanoscale vibration and interface heating effects[J]. Langmuir, 2021, 37(40): 11851-11858.
- [21] 陈晨. 基于超声波的结冰探测方法研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2022.
CHEN CH. Research on ice formation detection method based on ultrasound [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2022.
- [22] STEFAN J, SHILPI P. Surface acoustic waves equip materials with active de-icing functionality: unraveled glaze ice de-icing mechanisms and application to centimeter-scale transparent surfaces [J]. Advanced Materials Technologies, 2023, 8(16): 2300263.

作者简介

曾行昌, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为微机电系统及纳米技术、应用光学、防雾除冰技术等。

E-mail: zxchangd@163.com

何洋(通信作者), 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为仿生微纳结构及飞机防除冰技术。

E-mail: heyang@nwpu.edu.cn