

基于声压反射系数幅度谱的薄冰厚度测量

王 渊^{1,2}, 陈思羽¹, 王 岩¹, 张 杨¹, 朱程香¹, 朱春玲^{1,2}

(1. 南京航空航天大学航空学院, 南京 210016; 2. 南京航空航天大学航空航天结构力学及控制全国重点实验室, 南京 210016)

摘要: 针对飞机结冰初期超声测厚时回波信号混叠导致的薄冰层厚度无法定量测量的问题, 提出一种可通过蒙皮-冰层界面超声回波声压反射系数幅度谱(Ultrasonic reflection coefficient amplitude spectrum, URCAS)谐振频率反演薄冰厚度的方法。采用数值计算获得铝制蒙皮表面结冰初期原始超声回波信号并计算 URCAS, 确定入射波幅度谱-6 dB 带宽范围内对应的薄冰层厚度测量上下限; 发展用于超声时/频信号特征参数提取的信号处理方法, 对理论计算回波信号进行处理, 提取 URCAS 谐振频率点进行薄冰层厚度反演。结果表明: 基于 URCAS 的冰厚测量可以有效实现结冰初期混叠超声信号特征参数提取, 冰厚测量下限约为时域分析测量下限的 1/2, 理论测量相对误差小于 4%。

关键词: 飞机结冰初期; 回波信号混叠; 声压反射系数幅度谱; 谐振频率; 薄冰厚度测量

中图分类号: V244.15

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2025)05-0924-08

Thin Ice Thickness Measurement Based on Ultrasonic Reflection Coefficient Amplitude Spectrum

WANG Yuan^{1,2}, CHEN Siyu¹, WANG Yan¹, ZHANG Yang¹, ZHU Chengxiang¹, ZHU Chunling^{1,2}

(1. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To address the challenge of quantitative thickness measurement for thin ice layers during the initial aircraft icing phase caused by overlapping ultrasonic echo signals, this study presents a method to inversely determine thin ice thickness using the resonance frequency of the ultrasonic reflection coefficient amplitude spectrum (URCAS) at the skin-ice interface. Numerical simulations are conducted to obtain raw ultrasonic echo signals from aluminum skin surfaces during early icing, followed by URCAS calculations. The upper and lower measurement limits of ice thickness are determined based on the -6 dB bandwidth of the incident wave amplitude spectrum. Advanced signal processing techniques are developed to extract critical time-frequency features from theoretical echo signals. The resonance frequency points in URCAS are specifically utilized for ice thickness inversion. The URCAS-based method enables effective extraction of characteristic parameters from overlapping ultrasonic signals during initial icing. The lower measurement limit of ice thickness is approximately half of that achieved by conventional time-domain analysis. Theoretical relative measurement errors remain below 4%.

Key words: initial phase of aircraft icing; overlapping ultrasonic echo signals; ultrasonic reflection coefficient amplitude spectrum (URCAS); resonance frequency; thin ice thickness measurement

基金项目: 国家自然科学基金重大科研仪器研制项目(12227802), 江苏省卓越博士后计划。

收稿日期: 2025-03-05; **修订日期:** 2025-09-02

通信作者: 王渊, 男, 博士后, E-mail: feanor@nuaa.edu.cn。

引用格式: 王渊, 陈思羽, 王岩, 等. 基于声压反射系数幅度谱的薄冰厚度测量[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2025, 57(5): 924-931. WANG Yuan, CHEN Siyu, WANG Yan, et al. Thin ice thickness measurement based on ultrasonic reflection coefficient amplitude spectrum[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics (Natural Science Edition), 2025, 57(5): 924-931.

飞机在结冰气象条件下起飞、巡航和降落时,撞击在机体表面的过冷水滴会快速冻结形成积冰^[1]。机翼、尾翼和发动机唇口区域由于正对来流方向,相较于背风面更加容易形成积冰,且迎风面结冰通常会造成飞机升阻比下降、操纵性能下降,发动机唇口积冰破碎进入内部撞击损伤高温叶片等危害^[2-4]。现代飞机通过装备飞行结冰探测系统(Flight icing detection systems, FIDSs)来感知飞机结冰状况,伸出式结冰探测器通常安装在机头下方结冰敏感区域^[5-7]。FIDS作为结冰防护系统(Ice protection system, IPS)的子系统,负责将结冰预警或结冰厚度信息传递给IPS,IPS分析结冰情况后进行相应的除冰作业,保证飞行安全^[8-9]。

早期基于目视法、压差法和机械障碍法的机载结冰探测器因测量误差大、设备可靠性低,已被逐渐淘汰^[5]。目前国内外常用的飞机结冰探测方法按照物理原理分为光学法^[10-12]、电学法^[13-14]和波导法^[15-18],还发展了根据飞行姿态反演结冰程度的智能算法^[19]。其中谐振式结冰探测器应用最为广泛,具备可靠的结冰预警和冰厚测量能力,然而受限于其伸出式的安装方式,无法实现结冰敏感区域保形测量^[6]。近年来,随着低碳、低能耗全电飞机的航空发展趋势,要求进一步降低机载IPS除冰能耗,迫切需要革新传统的机头区域结冰探测信息用于全机的除冰策略,发展一种新型的原位结冰探测技术,实现分区测量和除冰。同时FIDS需要具备灵敏度高、精度高和器件嵌入安装、不破坏气动外形的优点。

近年来,基于超声脉冲回波(Ultrasonic pulse echo, UPE)技术的FIDS被国内外学者广泛研究,UPE配备的高频超声换能器传感器具有尺寸小、可保形安装在蒙皮内表面的优势,可实现高速、隐身飞机表面结冰情况原位动态探测^[17,20]。超声脉冲回波时域处理法通过测量冰层内超声渡越时间和冰内纵波声速可以定量获得冰厚增长信息,通过频谱衰减也可定性识别结冰类型^[21-22]。然而由于飞机结冰具有内部多孔、表面粗糙的特殊结构,高频超声脉冲波会在冰层内部和粗糙冰-空气界面快速衰减,极大限制了冰厚测量范围^[18,21]。虽然通过降低激励信号频率可有效增大冰厚测量范围,但是薄冰层-空气界面回波会与结构回波混叠,无法准确测量薄冰层厚度。

超声脉冲回波信号频域特征参数包含了丰富的介质孔隙形态、界面粗糙程度和介质内部声速等信息^[23-25]。Pialucha提出当薄层介质厚度为超声波半波长整数倍时,基体-薄层介质界面入射波和反射波会叠加发生共振,提取共振频率可用于薄层介

质厚度反演^[26]。已有研究表明:针对微米级薄层介质,通过求解薄层介质厚度增长对应的UR-CAS,检索谐振点对应频率可准确反演薄层介质厚度,测量误差小于5%^[27]。为解决低频信号无法测量薄层介质厚度的问题,有必要开展多层/薄层介质内超声传播特性研究,揭示薄冰厚度增长过程对超声回波信号频域特征参数影响规律,基于现有URCAS方法开发用于冰厚宽范围动态测量的超声信号处理技术。

综上所述,本文拟建立包括换能器、蒙皮、冰层和空气层在内的多层/薄层介质模型,采用数值计算的方法获得薄冰层动态增长过程中原始超声回波波形;对原始超声回波信号进行时/频分析,发展用于宽厚度范围冰层识别的信号处理方法,在结冰初期信号混叠阶段采用URCAS进行冰厚动态反演,当来自蒙皮-冰界面和冰-空气界面回波完全分离时采用TOF(Time of flight)法进行冰厚测量,实现结冰预警和全过程的冰层厚度精确测量。

1 超声传播理论及测量原理

1.1 多层/薄层介质内超声传播机理

采用超声换能器产生的超声脉冲波在多层介质内传播时,由于相邻两种介质材料声阻抗差异,两种材料界面处会产生如图1所示的声波反射和透射现象。

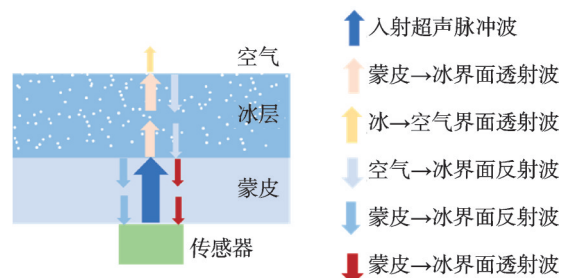


图1 多层结构内超声传播示意图

Fig.1 Schematic diagram of ultrasonic propagation in a multilayer structure

超声波从介质I入射到介质II中时,界面处声压反射系数和透射系数可由式(1)计算获得^[28]。

$$\begin{cases} R_{I-II} = \frac{Z_{II} - Z_I}{Z_I + Z_{II}} \\ T_{I-II} = \frac{2Z_{II}}{Z_I + Z_{II}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $Z=\rho c$ 为介质声阻抗,单位为 Mrayl ;声阻抗是介质密度 ρ (单位: kg/m^3)与介质内超声纵波传递速度 c (单位: m/s)的乘积。反射系数和透射系数为负数时表示反射波/透射波与入射波相位相差 180° 。

超声激励脉冲波 $f(t)$ 在入射到蒙皮中经传播后会在蒙皮-冰层界面产生反射波, 传感器接收到的该界面处超声反射波可用式(2)计算获得。

$$W_{A,m} = T'_{A-P} \cdot R_{A-1}^m \cdot R_{A-P}^{m-1} \cdot f\left(t - \frac{m \cdot 2H_A}{c_A}\right) \quad (2)$$

式中: m 为来自蒙皮-附着物界面第 m 次回波; T'_{A-P} 和 R_{A-P} 分别为蒙皮-换能器界面超声往复透射系数和反射系数; R_{A-1} 为蒙皮-冰层界面超声反射系数, 当蒙皮表面无附着物时, 界面处反射系数约等于 1; H_A 为蒙皮厚度, 单位为 10^{-6} m; c_A 为蒙皮材料内纵波声速, 单位为 m/s。

当蒙皮表面附着薄冰层时, 由于冰层厚度远小于声波波长, 超声波会在薄冰层内多次反射后透射入蒙皮内部并与蒙皮-冰层界面回波叠加, 传感器处接收到叠加后的回波信号, 如图 2 所示。

来自冰层内的第 1 到 n 次回波信号表达式为

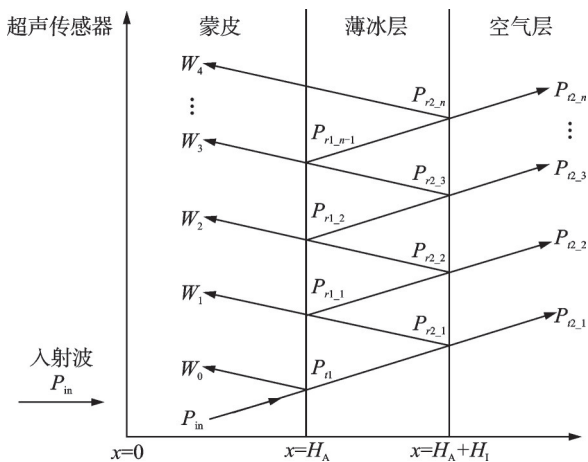


图 2 薄冰层内多次反射超声回波信号示意图

Fig.2 Schematic diagram of multiple ultrasonic echo signals reflected in thin ice

$$\begin{aligned} W_1 &= TT \cdot R_{I-a} \cdot f\left(t - \frac{2H_A}{c_A} - \frac{2H_I}{c_1}\right) \cdot \exp(-2\alpha H_I) \\ W_2 &= TT \cdot R_{I-a}^2 \cdot R_{I-A} \cdot f\left(t - \frac{2H_A}{c_A} - \frac{4H_I}{c_1}\right) \cdot \exp(-4\alpha H_I) \\ W_3 &= TT \cdot R_{I-a}^3 \cdot R_{I-A}^2 \cdot f\left(t - \frac{2H_A}{c_A} - \frac{6H_I}{c_1}\right) \cdot \exp(-6\alpha H_I) \\ &\vdots \\ W_n &= TT \cdot R_{I-a}^n \cdot R_{I-A}^{n-1} \cdot f\left(t - \frac{2H_A}{c_A} - \frac{2n \cdot H_I}{c_1}\right) \cdot \exp(-2n \cdot \alpha H_I) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $TT = T'_{A-P} \cdot T'_{A-1}$; α 为冰层内超声波衰减系数, 单位为 NP/mm; H_I 和 c_1 分别为冰层厚度和冰内纵波声速; 角标 a 代表空气层。

传感器处接收到的多层/薄层介质界面超声回波信号 W_r 可通过式(2)和式(3)叠加获得

$$W_r = W_{A,1} + TT \cdot \sum_{n=1}^{n=5} \left[R_{I-a}^n \cdot R_{I-A}^{n-1} \cdot f\left(t - \frac{2H_A}{c_A} - \frac{2n \cdot H_I}{c_1}\right) \cdot \exp(-2n \cdot \alpha H_I) \right] \quad (4)$$

1.2 薄冰层厚度超声测量原理

当蒙皮表面冰层厚度小于超声激励脉冲波长时, 来自蒙皮-薄冰界面和薄冰-空气界面的回波信号会发生混叠现象, 无法采用传统的时域分析法通过测量冰内渡越时间计算冰层厚度。声波垂直入射蒙皮、薄冰层和空气组成的多层介质时, 可采用 URCAS 分析方法对薄冰层存在时回波信号进行处理, 通过提取频域相关特征参数反演薄冰层厚度。蒙皮表面附着薄冰层时 URCAS 表达式如下

$$|R_r(f)| = \left\{ \frac{[R_{A-1} + R_{I-a} \exp(-2 \cdot \alpha(f) H_I)]^2 - 4 R_{A-1} R_{I-a} \exp(-2\alpha(f) H_I) \sin^2(k H_I)}{[1 + R_{A-1} R_{I-a} \exp(-2 \cdot \alpha(f) H_I)]^2 - 4 \cdot R_{A-1} R_{I-a} \exp(-2\alpha(f) H_I) \sin^2(k H_I)} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

式中 $k = 2\pi f / c_1^2$ 。

超声波在薄层结构中多次反射过程中信号会产生干涉现象, 导致 URCAS 上出现多个极小值点, 极小值点对应的频率为薄层介质谐振频率。对式(5)中频率 f 求导, 当导数为零时得到 URCAS 的一系列极值点 f_N

$$H_I = \frac{N c_1}{4 f_N} \quad (6)$$

式中 N 代表第 N 次谐振频率。

当采用基于 URCAS 的超声脉冲回波技术进行薄冰层厚度测量时, 需要根据原始时域信号求解

URCAS。首先对结冰前后的原始超声回波信号进行快速傅里叶变换 (Fast Fourier transform, FFT), 获得结冰前后的信号频谱复数

$$WF_{in} = \text{FFT}[W_{H_I=0}(t)] \quad (7)$$

$$WF_{in} = \text{FFT}[W_{H_I>0}(t)]$$

式中: $W_{H_I=0}(t)$ 为结冰前蒙皮-空气界面超声回波信号; $W_{H_I>0}(t)$ 为结冰后界面超声回波信号。

对结冰前后超声回波信号频谱进行运算获得 URCAS 复数

$$R_{\text{actual}} = \frac{WF_{\text{ret}}}{WF_{\text{in}}} \quad (8)$$

对式(8)计算获得的 URCAS 复数求模得到结冰前后的 URCAS

$$R_r=|R_{\text{actual}}|$$

(9)

采用式(5)计算得到的 URCAS 与式(7~9)运算得到的 URCAS 区别为:前者主要通过声波反射系数和透射系数计算 URCAS,不考虑入射波波形;后者采用结冰前后界面超声回波作为输入进行运算,真实反映了薄冰层厚度增长对应的 URCAS,更具有参考价值。

2 数值计算

2.1 参数设置

采用 Matlab 软件对由压电陶瓷 PZT-5H、铝制蒙皮、冰层和空气层组成的多层介质内超声脉冲波进行求解,获得冰层厚度增长过程对应的原始超声脉冲回波信号。激励源超声脉冲信号采用 Ricker 脉冲,表达式如下

$$f(t)=\left(1-2\left(\pi f_c(t-T)\right)^2\right)\exp\left(-\left(\pi f_c(t-T)\right)^2\right)$$

(10)

式中: f_c 为激励脉冲中心频率,单位 MHz; T 为机理脉冲波长,单位为 μs 。后续激励信号中心频率选取 5、7.5、10、12.5 和 15 MHz 进行时域波形计算。

中心频率 10 MHz 的激励脉冲时/频信号如图 3 所示。声压衰减量为 -6 dB 时其对应的频率带宽为 8.24 MHz,具有波形对称、旁瓣能量弱、带宽和分辨率高的优点。

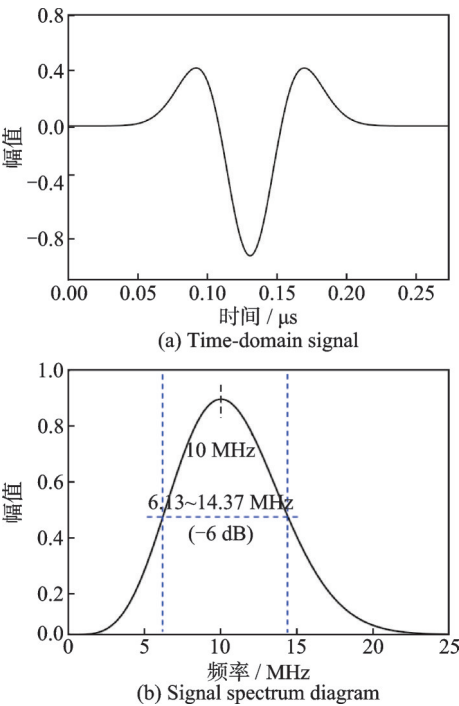


图3 中心频率 10 MHz 的激励脉冲时/频信号
Fig.3 Waveform and spectrum of the exciation signal with a center frequency of 10 MHz

飞机积冰按照形貌特征或冰内孔隙率分为明冰、混合冰和霜冰,3 种冰型内部纵波声速依次减小。由于明冰内纵波声速最大,薄层厚度测量更加困难,本文主要针对明冰进行数值计算,探讨 URCAS 用于薄层明冰厚度增长过程测量的能力。材料尺寸和物性参数如表 1 所示。

表 1 多层介质材料参数
Table 1 Multilayer dielectric material parameters

材料名称	密度 $\rho/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	纵波声速 $c/$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	衰减系数 $\alpha/$ ($\text{NP}\cdot\text{mm}^{-1}$)	厚度 $H/$ μm
PZT-5H	7 500	4 530	—	100
7075 铝	2 690	6 300	—	2 000
明冰	910	3 759	0.05	0~300
空气	1	340	—	∞

输出波形采样点间隔为 1 ns,数据长度为 $1.6\text{ }\mu\text{s}$ 。薄冰层内超声反射次数 $n=5$ 。模型中蒙皮厚度固定为 $2\text{ }000\text{ }\mu\text{m}$,由 0 至 $300\text{ }\mu\text{m}$ 逐渐增加冰层厚度,输出与冰厚增长对应的原始波形。数值计算时假设冰内无气泡,各层材料各向同性;冰层表面光滑,无粗糙元散射;只考虑蒙皮-附着物界面(简称界面 1)一次回波与冰层-空气界面(简称界面 2)回波混叠,不考虑厚冰层-空气界面回波与蒙皮-冰层界面二次回波混叠。

2.2 时域信号变化规律分析

通过数值计算获得冰层厚度增长过程对应的原始超声脉冲回波信号,如图 4 所示。其中第 1 个超声脉冲为激励源信号,第 2 个脉冲为蒙皮-附着物界面一次回波信号;第 3 个脉冲为蒙皮-附着物界面二次回波信号。当薄冰层厚度增长时,来自界面 1 和界面 2 的回波信号会叠加造成界面 1 超声回波时域信号旁瓣产生微小变化。

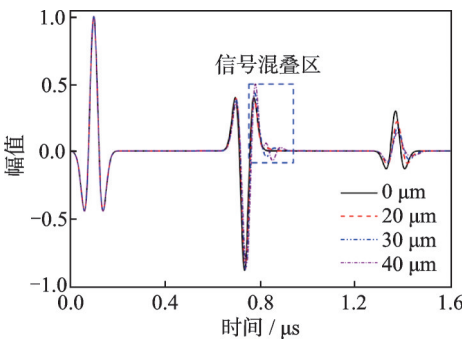


图 4 结冰初期超声脉冲回波信号
Fig.4 Ultrasonic pulse echo signal at the early stage of icing

结冰初期,随冰厚逐渐增长,来自界面 1 和界面 2 的超声回波信号共经历了如图 5 所示的 3 个阶段。以中心频率 10 MHz 的激励信号作用为例:在

不敏感阶段,冰层厚度增长时界面 1 回波信号无明显变化,无法观测到界面 2 回波;随冰厚的继续增长,来自界面 1 和界面 2 的回波信号开始混叠,该阶段虽然时域波形变化明显,但无法提取冰厚相关特征参数(界面回波峰值、峰值对应时间);当冰层厚度继续增长时,来自界面 1 和界面 2 的回波信号完全分离,界面 1 回波信号幅值稳定,可通过冰内渡越时间计算冰层厚度。

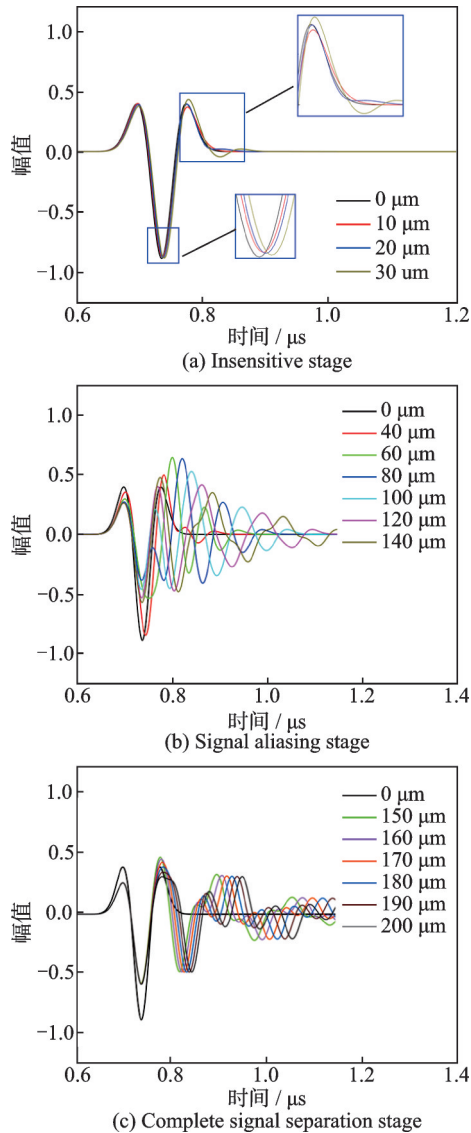


图 5 超声回波信号变化 3 个典型阶段 ($f_c=10$ MHz)

Fig.5 Ultrasonic echo signal changes in three typical stages ($f_c=10$ MHz)

蒙皮表面无冰层附着时,界面 1 超声反射系数约等于 1,采用不同中心频率激励信号进行波形计算,界面 1 超声反射系数随冰层厚度增长变化如图 6 所示。结冰初期,在超声回波波形变化第 2 阶段,界面 1 超声反射系数经历迅速降低后增大,在第 3 阶段趋于稳定。借助反射系数对于薄冰层敏感的特性可进行早期结冰预警。

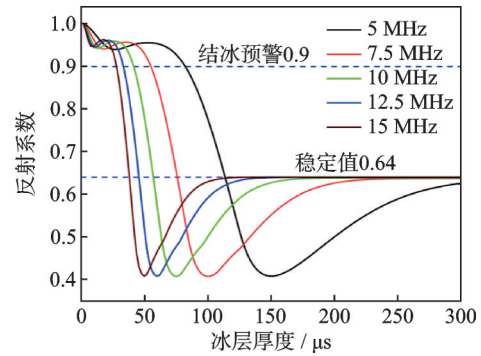


图 6 冰层厚度增长对应的超声反射系数变化曲线

Fig.6 Change curves of ultrasonic reflection coefficient corresponding to ice thickness increase

2.3 URCAS 变化规律分析

针对结冰初期冰层厚度增长,以中心频率 10 MHz 激励信号作用为例,对数值计算获得的界面 1 和界面 2 反射超声回波信号进行处理,采用式(7~9)计算得到冰层厚度增长对应的 URCAS 如图 7 所示。时域信号处于不敏感阶段时,URCAS 由于多次混叠会出现振荡,振荡幅值大于 0.5,该阶段振荡波形极值点无法用于冰厚反演,将 0.5 设为阈值进行薄冰厚度对应的幅度谱极值提取;当冰层厚度进一步增大,幅度谱出现极小值点,一次谐振频率随冰层厚度增大而减小;—6 dB 带宽范围内极小值点对应的厚度测量范围为 60~140 μm 。

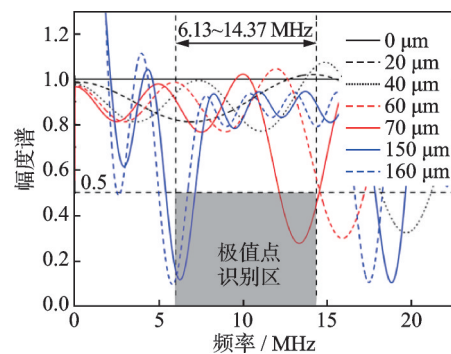


图 7 冰层厚度增长对应 URCAS

Fig.7 Ice thickness increase corresponding to URCAS

3 超声回波信号处理

3.1 原始超声回波信号预处理

动态积冰厚度超声探测时需要对原始超声脉冲回波信号进行处理,提取和计算时/频特征参数用于反演冰层厚度。首先在结冰开始前,对无冰层超声回波信号作如图 8 所示预处理。首先对原始超声脉冲回波信号做 Hilbert 变换,获得如图 9 所示信号包络线;然后全局检索信号峰值及峰值对应时间,获取激励信号范围后剔除激励源脉冲信号;截取界面 1 回波信号起始位置之后的数据,如图 10 所示,作为有效数据进行后续时/频分析。根据无冰层有效回波信号特征参数设置如图 11 所示的闸门

A、B和C: 闸门A用于检索蒙皮-冰界面回波幅值, 计算反射系数; 闸门B内数据用于进行反射系数幅度谱计算; 闸门C用于检索冰层回波信号是否达到可识别程度。

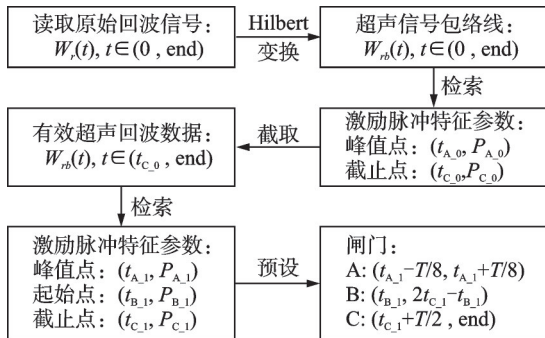


图8 原始超声回波信号预处理流程图

Fig.8 Flow chart of raw ultrasonic echo signal preprocessing

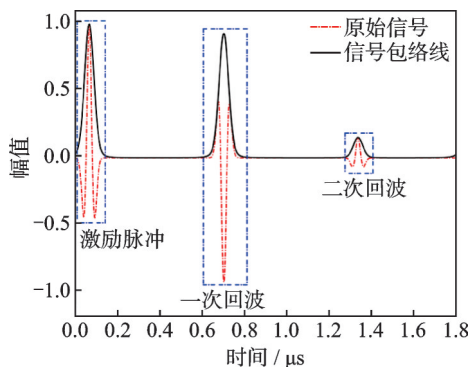


图9 原始超声回波信号及其包络线

Fig.9 Original ultrasonic echo signal and its envelope

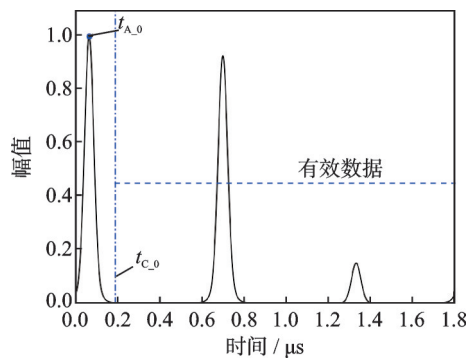


图10 截取有效超声回波信号

Fig.10 Intercepted effective ultrasonic echo signal

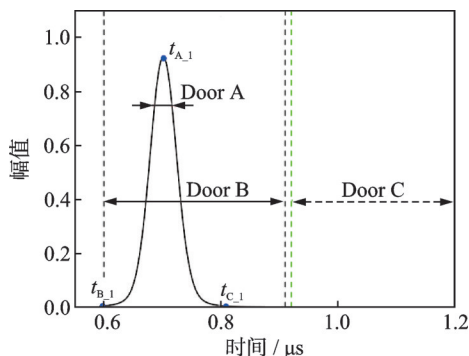


图11 后期数据处理范围及预设闸门

Fig.11 Late data processing scope and preset doors

3.2 冰厚动态测量超声信号处理

对结冰前原始超声回波信号进行预处理获得界面1回波峰值 $P_{A,0}$ 、频谱复数 WF_{in} 和回波极大值 P_{Max} 。冰层厚度动态测量信号处理流程如图12所示。测量时首先读取有效回波信号, 在闸门A检索信号包络线峰值 $P_{A,i}$, 计算界面1超声反射系数 R_{A-1} , 当 R_{A-1} 小于0.9时输出结冰预警信号, 大于0.9时判断蒙皮表面无冰层并返回检索。同时, 薄水膜存在时界面发射系数接近1, 该阈值设置可有效排除薄水膜存在时信号干扰; 当输出预警信号之后, 在闸门C内检索回波峰值 P_{Max} , 当 $P_{Max} < 0.1$ 时采用频域分析法计算冰层厚度; $P_{Max} \geq 0.1$ 时采用时域分析法计算冰层厚度。频域分析通过对闸门B内原始回波信号进行FFT获得结冰后频谱复数 WF_{ret} , 计算结冰后URCAS后在-6 dB带宽范围内检索幅度谱极小值及其对应的频率; 当极小值大于等于0.5时输出冰厚 $H_i = 0$; 当极小值小于0.5时, 采用极小值对应谐振频率, 通过式(6)计算获得冰层厚度。

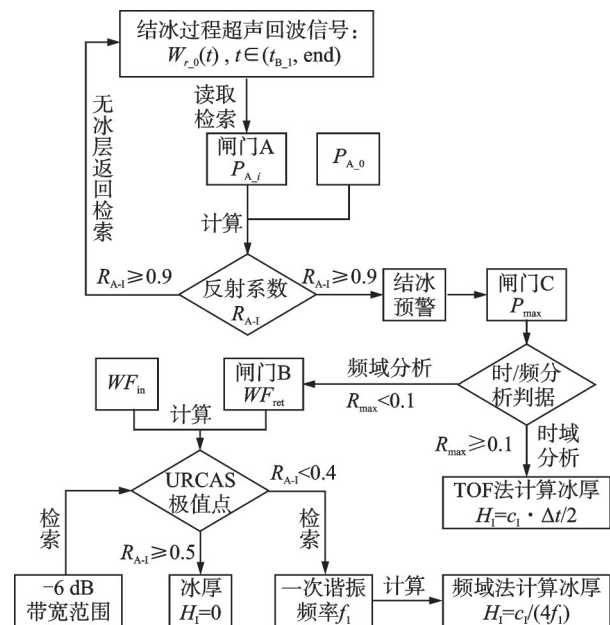


图12 超声回波信号时/频处理流程图

Fig.12 Flow chart of ultrasonic echo signal time/frequency processing

4 结果分析及讨论

4.1 超声回波信号时/频分析转换

冰厚增长过程对应的原始超声脉冲回波信号经过第3节时/频信号处理, 中心频率10 MHz激励信号作用时冰厚增长曲线如图13所示。其中横坐标为数值计算预设冰层厚度, 纵坐标为原始信号处理后得到的冰层厚度, 可以看出时/频处理转换顺畅, 输出结冰厚度信号后无明显数据波动。

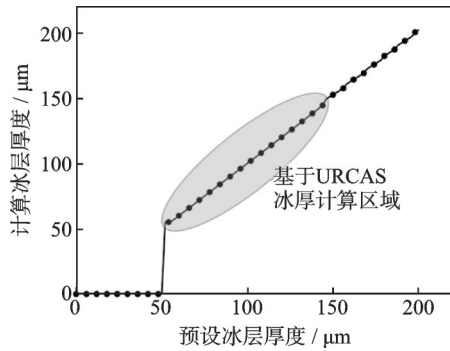


图 13 超声回波信号时/频分析冰厚测量结果 ($f_c=10$ MHz)
Fig.13 Ultrasonic echo signal time/frequency analysis of ice thickness measurement results ($f_c=10$ MHz)

不同中心频率激励信号作用时,冰厚测量曲线如图 14 所示。随激励信号中心频率增大,初始结冰测量厚度减小。对于 300 μm 内厚度冰层,经信号时/频处理后输出冰厚曲线斜率一致。

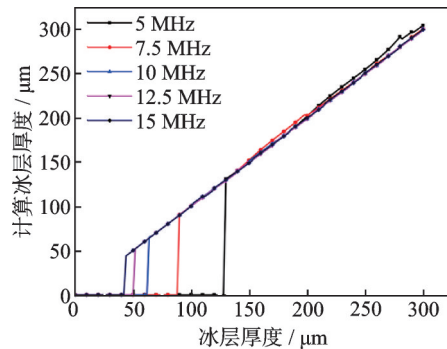


图 14 冰厚动态测量结果

Fig.14 Dynamic measurement of ice thickness

4.2 频率相关冰层厚度检出上下限

基于 URCAS 频域分析法冰厚测量上下限如图 15 所示。当蒙皮-冰和冰-空气界面回波分离时便可采用时域法进行冰厚测量,频域分析法测量上限对应时域法测量下限,频域分析法测量下限约为时域分析法冰厚测量下限的 1/2。原始信号处理后得到的冰厚测量结果与预设冰层厚度相对误差如图 16 所示,均小于 4%。

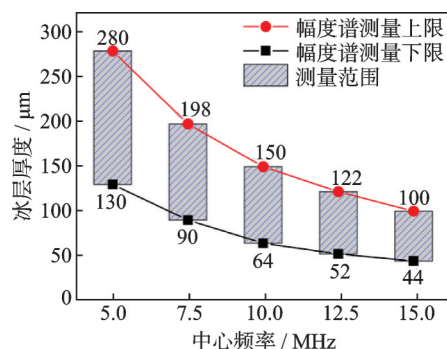


图 15 基于 URCAS 薄冰层厚度测量范围

Fig.15 Thin ice thickness measurement range based on URCAS

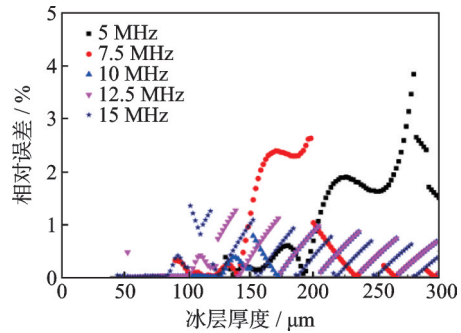


图 16 冰层厚度测量相对误差

Fig.16 Relative error of ice thickness measurement

5 结 论

本文对超声脉冲波在薄层/多层介质内的传播过程进行了数值计算,开发了用于计算冰厚的超声回波信号时/频处理技术。对原始回波信号进行处理分析后得到以下结论:

(1) 蒙皮-附着物界面超声反射系数可用于判断表面是否有冰层附着,可用于早期结冰预警。基于 URCAS 的超声信号频域处理方法可有效降低冰厚测量下限。

(2) 通过时/频分析转换实现薄/厚冰层动态测量;总结了 5~15 MHz 频率激励信号作用薄冰层测量极限;研究结果表明冰厚测量下限随激励信号中心频率增大而减小。

(3) 考虑低频激励信号能够测量更厚的冰层,本文可进一步拓宽冰厚超声测量范围。

本文在进行冰厚测量时仅对明冰进行数值计算和厚度测量,其内部纵波声速为固定值,并未考虑冰密度和温度对声速影响,下一步将通过分析频谱相位、时域信号衰减等参数在结冰初期获取冰内纵波声速,进一步提高冰厚测量精度。同时,将本文提出的信号处理技术用于实验波形的处理,实时测量动态结冰厚度。

参考文献:

- [1] YAMAZAKI M, JEMCOV A, SAKAUE H. A review on the current status of icing physics and mitigation in aviation[J]. Aerospace, 2021, 8(7): 188.
- [2] CAO Y, TAN W, WU Z. Aircraft icing: An ongoing threat to aviation safety[J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 75: 353-385.
- [3] 伍强, 孔满昭, 徐浩军, 等. 机翼前缘结冰对大飞机纵向模态特性的影响[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(2): 241-248.
WU Qiang, KONG Manzhao, XU Haojun, et al. Influence of wing leading edge icing on longitudinal modal characteristics of large aircraft[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(2): 241-248.

- [4] QI H, CHANG S, YANG Y, et al. Numerical investigations on aero-engine icing characteristics at mixed phase conditions[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 238: 122044.
- [5] LØW-HANSEN B, HANN R, STOVNER B N, et al. UAV icing: A survey of recent developments in ice detection methods[J]. *IFAC—PapersOnLine*, 2023, 56(2): 10727-10739.
- [6] 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.
WU Peipei, YAN Tao, REN Jie. Analysis on installation location of aircraft ice detectors[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2022, 54(2): 274-280.
- [7] JACKSON D G, LIAO J Y, SEVERSON J A. An assessment of Goodrich ice detector performance in various icing conditions[C]//*Proceedings of the FAA In-flight Icing/Ground De-icing International Conference & Exhibition*. [S.l.]: FAA, 2003.
- [8] FU X, SHEN Y, ZHU W, et al. Introduction and state of the art of anti/de-icing technologies[M]//*Ice-phobic Materials for Anti/De-icing Technologies*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024: 1-28.
- [9] REKUVIENE R, SAEIDIHARZAND S, MAŽEIKAL, et al. A review on passive and active anti-icing and de-icing technologies[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 250: 123474.
- [10] GE J, LIU J, GUI K, et al. Atmospheric icing measurement and online ice type recognition for aircraft utilizing optical fiber sensor and machine learning algorithms[J]. *Measurement*, 2022, 205: 112215.
- [11] GONZALEZ M, FRÖVEL M. Fiber Bragg grating sensors ice detection: Methodologies and performance[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022, 346: 1-11.
- [12] 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.
- [13] SCHLEGL T, MOSER M, LOSS T, et al. A smart icing detection system for any location on the outer aircraft surface[J]. *SAE Technical Paper Series*, 2019. DOI:10.4271/2019-01-1931.
- [14] ABDOLLAHZADEH M, RODRIGUES F, PASCOA J C. Simultaneous ice detection and removal based on dielectric barrier discharge actuators[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 315: 112361.
- [15] REKUVIENE R, SAMAITIS V, JANKAUSKAS A, et al. Early-stage ice detection utilizing high-order ultrasonic guided waves[J]. *Sensors*, 2024, 24(9): 2850.
- [16] TIAN Y, DUONGTHIPHEWA A, CHEN Q, et al. Quantitative monitoring of icing on CFRP laminate with guided wave combining forward modeling and inverse characterization[J]. *Structural Health Monitoring*, 2024, 23(6): 3599-3614.
- [17] WANG Y, WANG Y, LI W, et al. Study on freezing characteristics of the surface water film over glaze ice by using an ultrasonic pulse-echo technique[J]. *Ultrasonics*, 2022, 126(12): 106804.
- [18] WANG Y, ZHANG Y, WANG Y, et al. Quantitative measurement method for ice roughness on an aircraft surface[J]. *Aerospace*, 2022, 9(12): 739.
- [19] DEILER C, SACHS F. Design and testing of an indirect ice detection methodology[C]//*Proceedings of the SAE Icing Conference*. Vienna, Austria; SAE, 2023.
- [20] 张杨, 王渊, 王岩, 等. 飞机积冰局部脱粘现象超声回波探测[J]. *振动、测试与诊断*, 2024, 44(1): 166-171.
ZHANG Yang, WANG Yuan, WANG Yan, et al. Ultrasonic echo detection of local desticking phenomenon of aircraft ice accumulation[J]. *Vibration, Testing and Diagnosis*, 2024, 44(1): 166-171.
- [21] LIU Y, BOND L J, HU H. Ultrasonic-attenuation-based technique for ice characterization pertinent to aircraft icing phenomena[J]. *AIAA Journal*, 2017, 55(5): 1602-1609.
- [22] 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(4): 045023.
- [23] MA Z, LUO Z, LIN L, et al. Quantitative characterization of the interfacial roughness and thickness of inhomogeneous coatings based on ultrasonic reflection coefficient phase spectrum[J]. *NDT & E International*, 2019, 102: 16-25.
- [24] GUI Kang, ZHANG Yabo, GE Junfeng, et al. Study on measurement method of ice porosity based on dynamic wavelet fingerprint[J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2023, 40(S1): 118-128.
- [25] BUSTILLO J, ACHDJIAN H, ARCINIEGAS A, et al. Simultaneous determination of wave velocity and thickness on overlapped signals using Forward Backward algorithm[J]. *NDT & E International*, 2017, 86(3): 100-105.
- [26] PIALUCHA T, CAWLEY P. The detection of thin embedded layers using normal incidence ultrasound[J]. *Ultrasonics*, 1994, 32(6): 431-440.
- [27] 张伟, 马志远, 赫丽华, 等. 基于声压反射系数幅度谱匹配分析的薄层厚度和超声纵波声速双参数反演[J]. *材料工程*, 2016, 44(10): 74-79.
ZHANG Wei, MA Zhiyuan, HE Lihua, et al. Simultaneous inversion of thickness and ultrasonic longitudinal velocity for thin layered structure based on ultrasonic reflection coefficient amplitude spectrum matching analysis[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2016, 44(10): 74-79.
- [28] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀英. 声学基础[M]. 2版. 南京: 南京大学出版社, 2001.
DU Gonghua, ZHU Zhemin, GONG Xiuying. *Fundamentals of acoustics*[M]. 2nd ed. Nanjing: Press of Nanjing University, 2001.