

激光与光电子学进展

基于超声 Lamb 波的不同种类积冰厚度检测

詹湘琳^{**}, 陈晨^{*}, 孙李明恒

中国民航大学电子信息与自动化学院, 天津 300300

摘要 针对静止状态下飞机蒙皮表面残冰检测问题, 提出一种超声导波检测技术, 通过提取时域和频域的特征参数变化, 实现板状结构表面的透明冰、混合冰、霜冰 3 种类型区分和积冰厚度判断。首先通过 ABAQUS 仿真软件采集超声 Lamb 波 S0 模态信号, 在时域内观察随厚度和类型变化引起的 S0 模态幅值衰减程度, 同时在频域内引入积冰系数, 最终实现了关于厚度和类型的非线性映射。其次, 对使用 Lamb 波分辨 3 种不同类型积冰的厚度进行了实验验证, 对比仿真结果表明该方法存在一定可行性。最后, 总结了判断积冰种类和厚度的方法。

关键词 材料; 超声 Lamb 波; 积冰检测; 积冰系数; ABAQUS 仿真

中图分类号 TB559

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP212885

Detection of Different Ice Thickness Types Based on Ultrasound Lamb Waves

Zhan Xianglin^{**}, Chen Chen^{*}, Sun Limingheng

College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

Abstract Detection of ice on the skin surface of aircraft in the stationary state is a challenging task. In this study, an ultrasonic guide detection technique is proposed to distinguish among three ice types (glaze ice, mixed ice, and rime ice on plate-like structure surfaces) and determine the ice thickness by extracting the characteristic parameters of the time and frequency domains. First, the S0 mode signal of the ultrasonic Lamb wave is acquired using ABAQUS simulation software. The degree of S0 mode amplitude attenuation influenced by the ice thickness and type is observed in the time domain. In the frequency domain, the ice coefficient is introduced to realize nonlinear mapping on the ice thickness and type. Subsequently, experimental verification is performed on the three ice thickness types with Lamb waves. A comparison with the simulation results indicates that the method is feasible. Finally, a method of analyzing the type and thickness of ice is described.

Key words materials; ultrasonic Lamb wave; ice detection; ice coefficient; ABAQUS simulation

1 引言

民用航空飞机在寒冷时节以及高空飞行时, 如果遇上雨、雪天气或者空气的湿度较大等情况, 机身表面经常会发生结冰、挂霜现象, 容易对飞机飞行造成重大安全隐患。例如机翼前缘结冰、挂霜不仅会对飞机的气动性能造成不利影响, 还会改变飞机本身的升力系数^[1]。积冰或者积雪会导致皮托管、静压孔和迎角传感器工作失误, 误导飞行员的判断^[2-3]。

根据数据表明, 积冰厚度达到 1 mm 就会对飞机的稳定性造成不利影响, 6 mm 的积冰厚度将会使失速速度上升 25~40 节^[1,4]。同时, 在地面进行除冰作业

时, 允许机翼下表面的冷浸泡区域, 存在小于 3 mm 的一层霜。在前后梁之间的机翼下表面则允许存在最大厚度为 3.17 mm 的霜层。因此, 有必要在判别积冰类型后, 再对冰层厚度进行检测。

目前飞机上广泛使用谐振式结冰传感器^[5]。白天等^[6]和武晋文等^[7]研制了一款结冰传感器, 主要运用磁致伸缩原理判断是否有积冰附着。任宏宇等^[8]研制的复阻抗式结冰探测传感器有望薄膜化, 期望能够齐平地安装在机翼表面。高建树^[9]利用近红外多光谱来检测积冰。但是以上的传感器都存在明显的缺点。首先是谐振式传感器的安装方式破坏了飞机的气动外形。其次是测量范围不够理想, 大部分传感器只能安装在

收稿日期: 2021-11-05; 修回日期: 2021-12-01; 录用日期: 2021-12-13; 网络首发日期: 2021-12-24

基金项目: 国家自然科学基金(61102097)

通信作者: *286405090@qq.com; **xlzhan@cauc.edu.cn

飞机关键区域。而红外光传感器则需要在蒙皮上开一个玻璃窗口以便于光的透射。除此之外,没有兼顾到积冰的类型和厚度检测。

而国内外的研究人员之前也使用不同的超声波对积冰做出了各种检测和研究。例如利用超声回波技术建立了积冰厚度和声波衰减程度之间的线性关系^[10]。吴荣兴等^[11]总结了瑞利波波速随积冰厚度的变化规律。江城等^[12]发现可以根据 Love 波的相速度区分飞机蒙皮表面的水和冰层。但超声回波的测量范围小,瑞利波和 Love 波在接触到水时会发生强烈衰减^[13],都不是理想的探测波。2018 年,赵伟伟等^[1]进行了 Lamb 波检测积冰的实验,证明了 Lamb 波检测积冰厚度和长度的可行性。但是,上述研究对积冰厚度和长度的定量检测没有深入研究,并且没有实现积冰类型的分类检测。

Lamb 波检测操作简单、传播距离长,尤其适合板状结构的大面积无损检测^[14-15]。相比于外伸式传感器,Lamb 波传感器可以使用压电晶片作为传感元件,以便于齐平地安装在机身上,并且不会破坏机身。同时大距离的传播距离也极大地提升了检测范围。

本文提出一种超声导波检测技术,求解了铝板的频散方程,介绍了本文实验的整个流程,并对铝板表面不同厚度和类型的积冰进行了仿真研究。最后进行了实验验证,总结了 Lamb 波对积冰的判断依据。

2 Lamb 波频散曲线计算

超声导波的频散曲线是所有实验的基础部分,需要依此选择合适的频率和模式^[16]。

已知在当传播介质为各向同性时,Lamb 波的频散方程为

$$\frac{\tan(\beta h)}{\tan(\alpha h)} = - \left[\frac{4k^2 \alpha \beta}{(k^2 - \beta^2)^2} \right]^{\pm 1}, \quad (1)$$

式中: α 、 β 的定义分别为 $\alpha^2 = \omega^2/C_L^2 - k^2$ 、 $\beta^2 = \omega^2/C_T^2 - k^2$, k 表示波数, $k = \omega/C_p$, ω 表示使用的导波

频率; h 表示各向同性介质的厚度, ωh 表示频厚积。其中 C_p 表示相速度, C_L 表示纵波速度, C_T 表示横波速度;式中的正一次幂表示该频散方程中的对称模式,而负一次幂则相应地为反对称模式。先以对称模式为例进行推导,将以上 3 个等式代入到式(1)中,通过化简可得

$$\frac{\tan\left(\frac{\sqrt{C_p^2 - C_T^2} \omega h}{C_p C_T}\right)}{\tan\left(\frac{\sqrt{C_p^2 - C_T^2} \omega h}{C_p C_L}\right)} = - \frac{4C_T^3 \sqrt{(C_p^2 - C_T^2)(C_p^2 - C_T^2)}}{C_L(2C_T^2 - C_p^2)^2}, \quad (2)$$

将式(2)移项之后可得

$$\begin{aligned} \tan\left(\frac{\sqrt{C_p^2 - C_T^2} \omega h}{C_p C_T}\right) C_L(2C_T^2 - C_p^2)^2 + \\ \tan\left(\frac{\sqrt{C_p^2 - C_L^2} \omega h}{C_p C_L}\right) 4C_T^3 \sqrt{(C_p^2 - C_L^2)(C_p^2 - C_T^2)} = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

群速度可以由相速度推导得到:

$$C_g = C_p^2 \left(C_p - f \frac{dC_p}{df} \right)^{-1}, \quad (4)$$

式中: C_g 为群速度; $f = \omega/2\pi$ 。

很明显,如果想要保证式(3)有实数解,必须要保证 $C_p > C_T$ 并且 $C_p > C_L$ 。通过已有的研究可以得知,当传播介质为铝板时,其中的超声波横波速度为 $C_T = 3100 \text{ m/s}$,纵波速度为 $C_L = 6300 \text{ m/s}$ ^[3],因此它们与相速度之间的关系为 $C_p > C_L > C_T$ 。

式(3)作为超越方程,一般在 Matlab 中使用数值法中的二分法进行频散曲线求解^[17]。最终将得到的结果绘制成图,如图 1 所示,图 1(a)为相速度曲线,图 1(b)为群速度曲线。其中 S0 表示 0 阶对称模式,A0 表示 0 阶反对称模式。

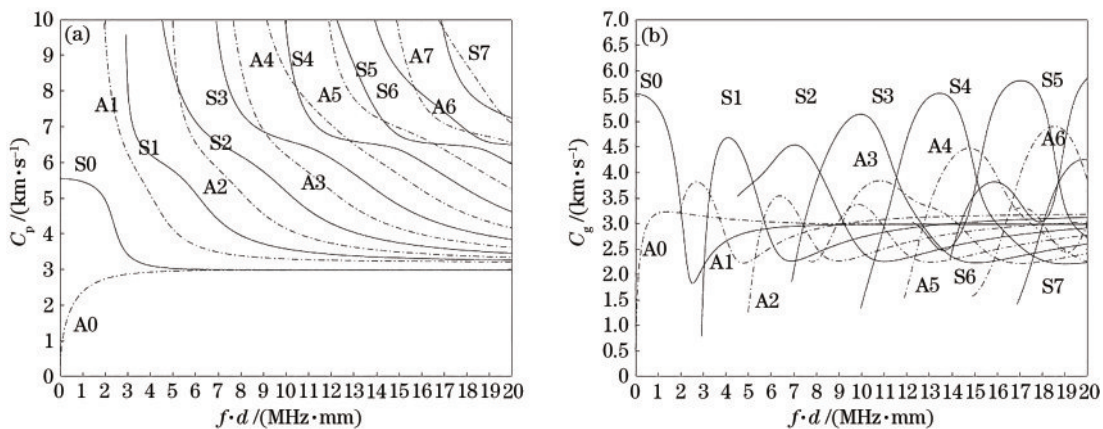


图 1 铝板频散曲线。(a) 相速度曲线;(b) 群速度曲线

Fig. 1 Aluminum plate frequency dispersion curves. (a) Phase velocity curves; (b) group velocity curves

3 仿真实验

图 2 为对铝板表面积冰进行检测的流程图。

3.1 建立模型

仿真实验主要使用 ABAQUS 无限元仿真软件。首先进行预处理,先进行两种模型的创建:第一种是无冰铝板模型,将铝板的大小设置为 400 mm × 400 mm,厚度设置为 2 mm。将坐标原点(0, 0, 0)设置在铝板底面正中心位置上,并以此建立三维坐标系。第二种是面积为 10 mm × 10 mm 的积冰模型,冰的类型主要分

为透明冰、混合冰、霜冰 3 种。

其次,将积冰设置在铝板正面,保持二者的中心位置一致。Lamb 波激发传感器的坐标为(-100, 0, 0),接收传感器的坐标为(100, 0, 0),保证两个传感器和积冰的中心位置始终处于同一条直线上。按照国际民航标准,对积冰的检测精度需要达到 0.5 mm,因此铝板的初始状态为无冰状态,之后积冰的厚度以 0.5 mm 递增,直至 6 mm。

激励波为经过汉宁窗调制,100 kHz、5 周期的正弦波,确保能量更加集中,在传播过程中的衰减更少^[18]。

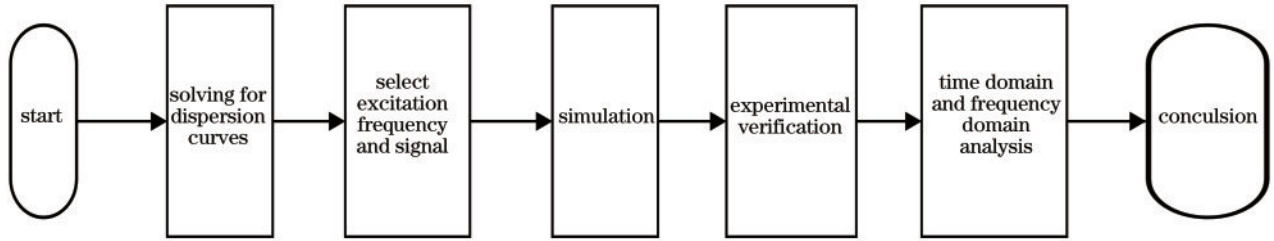


图 2 积冰检测流程图

Fig. 2 Flow chart of ice detection

3.2 积冰厚度和类型检测

接收传感器接收到超声波之后会生成波形图,图中波包的到达时间各不相同。观察图 1(a)中的相速度频散曲线,可以发现 S0 模态的速度远远大于 A0 模

态,因此首先到达的是 S0 模态 Lamb 波。

当铝板表面有积冰附着时,Lamb 波在传播过程中会与积冰相互作用导致波形发生显著改变^[19]。图 3 是一部分铝板上的不同厚度透明冰的 S0 模态幅值图。

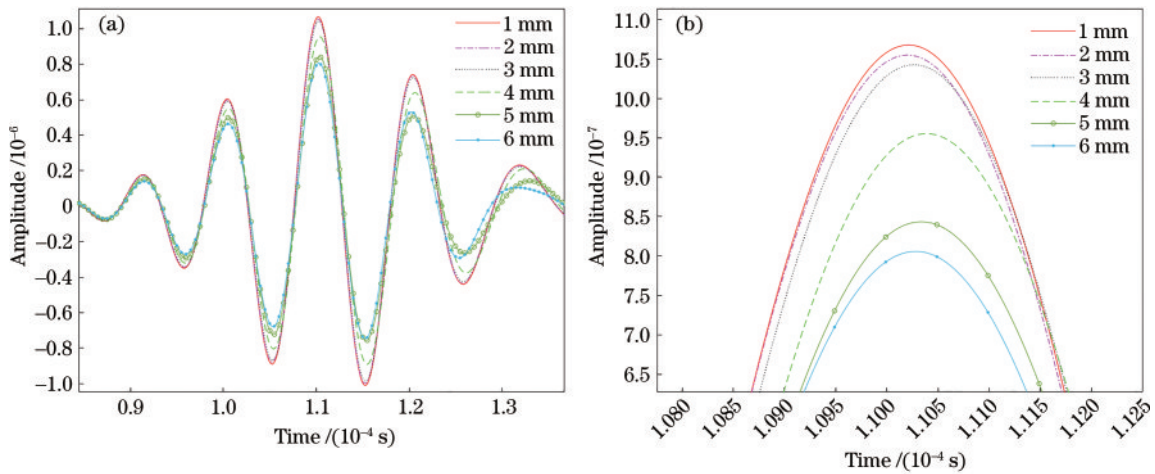


图 3 不同厚度透明冰 S0 模态幅值。(a) 全局图;(b) 局部放大图

Fig. 3 S0 mode amplitude of different thick glaze ice. (a) Global map; (b) partial enlargement map

观察图 3(b)可以发现 S0 模态的变化规律:透明冰的厚度越大,S0 模态所呈现出来的幅值衰减程度就越大。

而对于不同类型的积冰,其特征参数存在显著差异^[20],具体参数见表 1。

表 1 3 种类型冰的特征参数

Table 1 Characteristic parameters of three types of ice

Material	Density / (g · cm ⁻³)	Young's modulus / GPa	Poisson's ratio	Lame constant λ	Lame constant μ
Glaze ice	0.9	8.3	0.351	7.24	3.070
Mixed ice	0.8	6.3	0.326	4.45	2.380
Rime ice	0.6	2.5	0.282	1.26	0.975

不同类型积冰的特征参数都不一样,即使厚度相同,Lamb波的衰减程度也不一样。

图 4 为积冰厚度为 4 mm 时,透明冰、混合冰和霜冰的 S0 模态波形图。

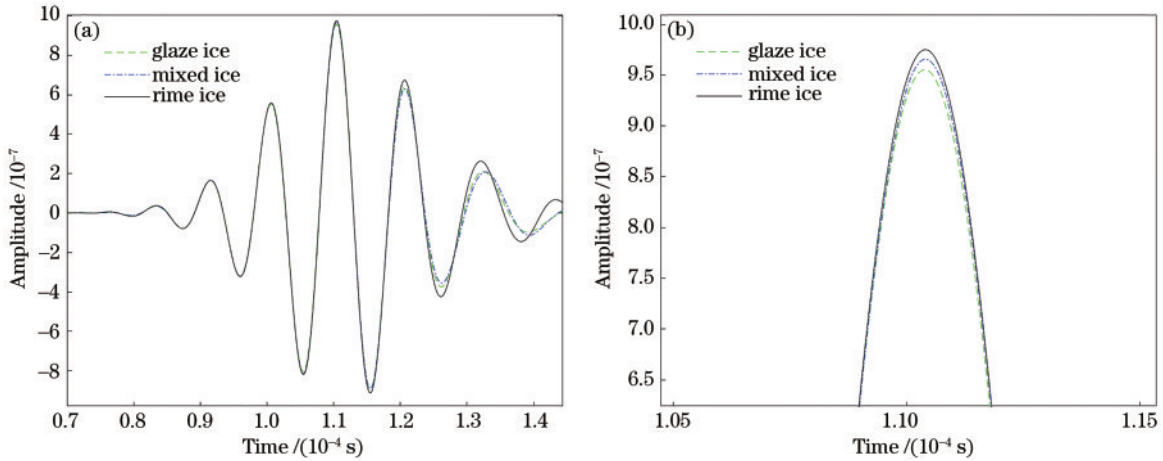


图 4 积冰厚度为 4 mm 时 S0 模态幅值。(a)全局图;(b)局部放大图

Fig. 4 S0 mode amplitude of 4 mm ice. (a) Global map; (b) partial enlargement map

从图 4(b)中可以发现,在同一厚度时,透明冰的衰减程度最大,霜冰的衰减程度最轻,混合冰居于中间。

3.3 数据处理

首先在时域范围内对数据进行处理,将仿真实验中不同类型和不同厚度积冰的 S0 模态幅值绘制成图 5,以体现其变化趋势和衰减程度。

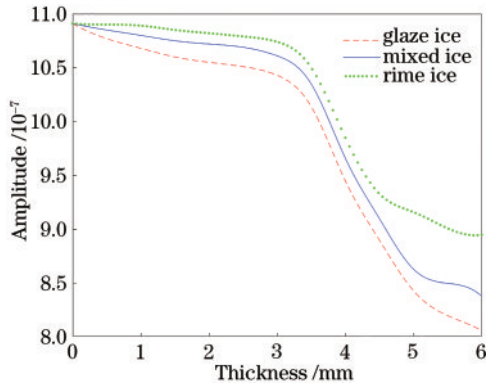


图 5 不同类型和不同厚度积冰的 S0 模态幅值变化

Fig. 5 S0 mode amplitude changes of different type ice with different thicknesses

从图 5 中可以发现,3 种类型积冰的变化趋势基本一致。当积冰厚度在 0~3 mm 范围内,Lamb 波的幅值下降程度在 2%~5% 之间。在 3~5 mm 内,幅值迅速下降,在 15%~20% 之间。而在 5~6 mm 之间,幅值下降程度只有 3% 左右。

其次对数据进行快速傅里叶变换,图 6 为 2 mm 厚度时不同类型积冰的数值结果。

观察图 6 可以发现,当厚度为 2 mm 时,霜冰的幅值最高,其次是混合冰,透明冰的幅值最小。除此之外,存在 50 kHz 和 150 kHz 的频率分量。根据非线性超声波系数的概念^[21],引入积冰系数 Q 这一特征参量,

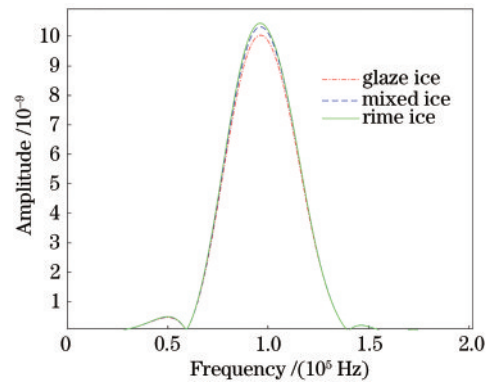


图 6 2 mm 厚度不同类型积冰的幅值

Fig. 6 Amplitude of 2 mm ice of different types

定义为 1/2 频幅值与激励频率幅值的平方的比值:

$$Q = \frac{A_{f_0}}{A_{f_0}^2}, \quad (5)$$

式中:A 表示 S0 模态在频域中的幅值; f_0 表示激励波频率。图 7 为最终得到的 3 种不同类型以及不同厚度积冰的积冰系数。

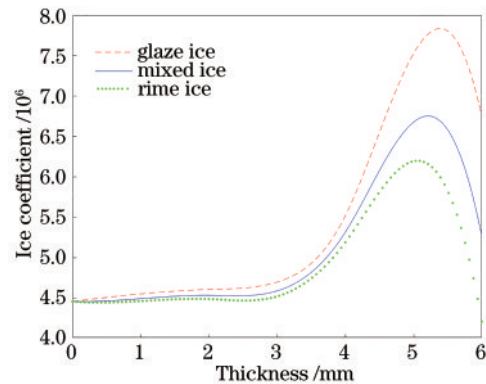


图 7 积冰系数

Fig. 7 Ice coefficient

在 0~3 mm 范围内, 积冰系数随厚度发生变化, 但是与类型基本无关。而在 3~6 mm 范围内, 受到积冰种类影响所形成的积冰系数有十分明显的差别。其中, 在 3~5 mm 范围内, 积冰系数随厚度增加呈现上升趋势; 在 5~6 mm 范围内, 积冰系数则呈现下降趋势。

4 实验验证

本次实验的设备主要有信号发生器、功率放大器、超声可变角探头、示波器以及铝板, 如图 8 所示。

4.1 实验前准备

信号发生器产生电压为 10 V, 频率为 100 kHz 的超声波, 功率放大器的放大倍数固定为 50 倍。Lamb 波主要通过调整斜探头的角度产生, 入射角 θ 可以利用 Snell 定律进行计算:

$$\frac{\sin \theta}{C_L} = \frac{1}{C_P} \quad (6)$$

经过计算得到探头的入射角 θ 为 32° 。

3 块铝板的厚度为 2 mm, 面积大小均为 $400 \text{ mm} \times$



图 9 制冰过程。(a) 胶带布置区域;(b) 透明冰

Fig. 9 Process of making ice. (a) Tape arrangement area; (b) glaze ice

制作时, 使用喷壶对铝板喷洒水, 通过调整喷头的粗细、相对铝板的距离以及喷洒时间, 可以制造出不同类型以及不同厚度的冰。制作霜冰时, 使用的喷头较细, 离铝板距离较远, 冰箱的环境温度较低, 必须保证小水滴在到达铝板前就已经在寒冷空气中凝结成小冰晶。制作透明冰时, 喷头较粗, 离铝板距离很近, 确保在铝板上聚集足够的液态小水滴, 等待之后冷冻成冰。对于冰厚度的控制, 主要通过缓慢地喷洒水以达到使冰厚度缓慢增加。除此之外, 在制冰过程中, 需要经常使用游标卡尺来测量冰厚, 最终确保冰厚度的测量精度达到 0.1 mm。如果冰的厚度超过了预期目标, 就需要重新开始制冰。制造出的透明冰如图 9(b) 所示。

4.2 数据处理

实验中, 对示波器中的 Lamb 波信号数据, 一般使

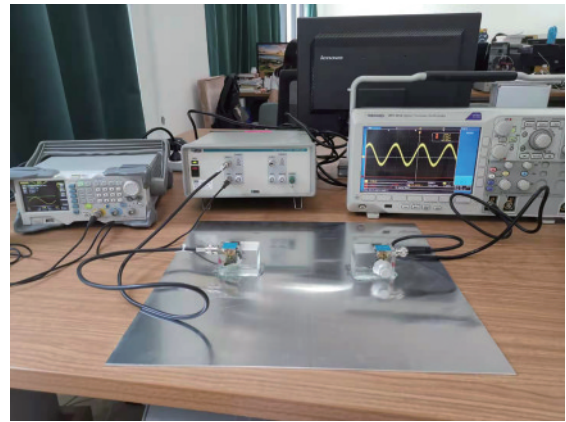


图 8 实验设备

Fig. 8 Experimental equipment

400 mm。整个实验都需要将铝板放置在冰箱里制造寒冷环境以便于在铝板上制作冰^[22-23], 并且保证每块铝板上的积冰种类都不一样。制作前, 先使用胶带在铝板上布置出 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的积冰区域, 如图 9(a) 所示。

用数据采集卡进行采集。其中透明冰的数据如表 2 所示。

观察表 2 得到透明冰 S0 模态波包的抵达时间基本一致, 都在 $0.110 \times 10^{-3} \text{ s}$ 左右, 而 S0 模态波包的幅值大小则有明显的区别。

使用同样的方法采集不同厚度的混合冰和霜冰的数据。之后首先在时域对数据进行处理, 使用 Matlab 软件将数据归一化后再绘制成图, 结果如图 10 所示。

其次再转换到频域对数据进行处理, 进行快速傅里叶变换后, 采集频率为 50 kHz 和 100 kHz 时的幅值参数, 计算出此时的积冰系数。如图 11 所示, 是在对积冰系数进行归一化处理后得到的结果。

表 2 透明冰数据
Table 2 Data of glaze ice

Thickness /mm	Time / 10^{-3} s	Amplitude / 10^{-4} V
0	0.11023	5.45470
0.5	0.11023	5.38500
1.0	0.11021	5.33830
1.5	0.11019	5.29955
2.0	0.11019	5.27410
2.5	0.11022	5.25480
3.0	0.11027	5.21265
3.5	0.11033	5.07175
4.0	0.11039	4.77605
4.5	0.11038	4.44805
5.0	0.11034	4.21690
5.5	0.11030	4.09955
6.0	0.11028	4.02905

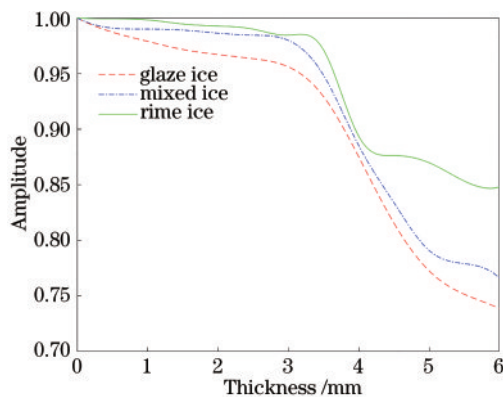


图 10 S0 模式的幅值变化

Fig. 10 S0 mode amplitude change

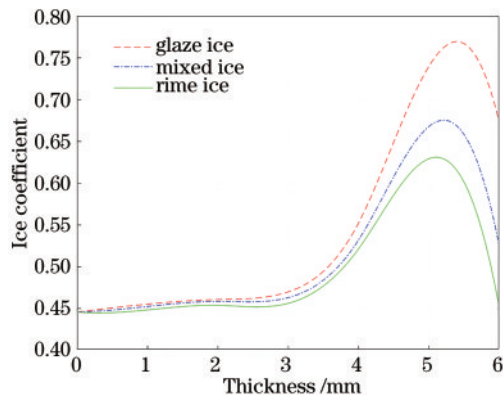


图 11 积冰系数

Fig. 11 Ice coefficient

5 结 论

通过仿真和实验验证,得到以下结论:

1) 对比实验的结果图与仿真结果图,两者趋势相似,证明了超声 Lamb 波在积冰厚度和类型检测上的可行性;

2) 从结果图中可以得出,在已知积冰种类的情况下,可以根据 Lamb 波幅值得到积冰厚度信息。也能在已知积冰厚度的情况下,根据 Lamb 波幅值分辨出积冰种类;

3) 总体来看,积冰厚度在 3~5 mm 时变化趋势最为明显。而不同类型中,则是透明冰的变化趋势最为明显。在 0~3 mm 时,积冰系数的大小与积冰种类无关。可以先根据积冰系数判断出积冰厚度,再根据 S0 模态的幅值衰减程度判断积冰种类。在 3~5 mm 时,积冰系数与 S0 模态幅值都出现了明显的变化。可以根据积冰系数的增长斜率判断积冰种类,然后再根据积冰系数或者 S0 模态幅值的大小判断积冰厚度。而当积冰厚度到达 5~6 mm 时,在 S0 模态幅值图中可以发现不同类型的积冰的厚度拥有不同的范围,能够仅以此同时判断出积冰厚度和种类;

4) 误差分析。仿真与实验的误差主要来自于两方面。第一部分来自于仪器设备所造成的误差。首先,金属铝板中存在的阻尼是一大原因。其次,实验时在铝板和超声可变角斜探头之间需要使用耦合剂,影响了一部分误差的形成。最后仪器的精密程度也会对结果造成误差。第二部分误差在实验中产生,无法保证积冰的厚度以及不同类型积冰的参数与仿真完全一致;

5) 改进建议。对于耦合剂造成的误差,可以通过使用空耦传感器来消除。对于积冰厚度的确定,可以使用超声脉冲回波法测量,此后再进行实验。

参 考 文 献

- [1] 赵伟伟,朱春玲,陶明杰,等. 超声导波技术用于飞机结冰探测的实验研究[J]. 压电与声光, 2018, 40(2): 269-275.
Zhao W W, Zhu C L, Tao M J, et al. Experimental study on ultrasonic guided wave technology for aircraft icing detection[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2018, 40(2): 269-275.
- [2] 赵伟伟. 基于压电材料的飞机结冰探测系统[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
Zhao W W. Aircraft icing detection system based on piezoelectric materials[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [3] 李浩然,段玉宇,张宇飞,等. 结冰模拟软件 AERO-ICE 中的关键数值方法[J]. 航空学报, 2021, 42(S1): 726371.
Li H R, Duan Y Y, Zhang Y F, et al. Numerical method of ice-accretion software AERO-ICE[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(S1): 726371.
- [4] 刘亚慈,王永忠. 飞机结冰探测技术与方法分析[C]//第十五届中国科协年会第 13 分会场:航空发动机设计、制造与应用技术研讨会论文集. 北京:中国科学技术协会, 2013.
Liu Y C, Wang Y Z. Research on methods and

- technology of aircraft icing detection[C]//13th Site Field of the 15th China Association of Science and Technology: Aviation Engine Design, Manufacturing and Application Technology Seminar Papers. Beijing: Chinese Science and Technology Association, 2013.
- [5] 章儒宸, 葛俊锋, 桂康, 等. 双梭型SLD探测器结冰特性研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2021(2): 6-17.
Zhang R C, Ge J F, Gui K, et al. Icing characteristics of dual-spindle structure ice detector[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2021(2): 6-17.
- [6] 白天, 朱春玲, 李清英, 等. 压电双晶片悬臂梁结构用于结冰探测的研究[J]. 航空学报, 2013, 34(5): 1073-1082.
Bai T, Zhu C L, Li Q Y, et al. Study of bimorph piezoelectric cantilever structure used on icing detection [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34 (5): 1073-1082.
- [7] 武晋文, 王华征, 宋继红. 振筒式结冰探测器硬件电路设计[J]. 集成电路应用, 2020, 37(7): 20-21.
Wu J W, Wang H Z, Song J H. Design of hardware circuit of ice detector with vibrating cylinder[J]. Application of IC, 2020, 37(7): 20-21.
- [8] 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.
- [9] 高建树. 基于近红外光谱的飞机残冰检测技术研究与应用[D]. 天津: 天津大学, 2014.
Gao J S. Research and application on aircraft remnant ice detection technology based on NIR[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [10] 陶明杰. 多冰型超声脉冲结冰探测技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
Tao M J. Research on multi-ice ultrasonic pulse ice detection technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [11] 吴荣兴, 胡海柯. 表面波飞机结冰传感器的研究[J]. 压电与声光, 2011, 33(5): 679-682, 686.
Wu R X, Hu H K. Study on surface acoustic wave aircraft ice sensor[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2011, 33(5): 679-682, 686.
- [12] 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 C, Ni S H, Li H L, et al. Study of love wave aircraft ice sensor[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(5): 906-911.
- [13] 吴荣兴, 李建中, 于兰珍, 等. 兰姆波飞机结冰传感器的最佳工作模态研究[J]. 工业安全与环保, 2016, 42(7): 8-10, 14.
Wu R X, Li J Z, Yu L Z, et al. Analysis of optimal functioning modes of lamb wave aircraft ice sensor[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2016, 42 (7): 8-10, 14.
- [14] 王高平, 李波, 徐志勇, 等. 基于ABAQUS的Lamb波时间反转薄板损伤研究[J]. 压电与声光, 2021, 43(3): 346-351.
Wang G P, Li B, Xu Z Y, et al. Study on damage detection of thin plate by time reversal method based on ABAQUS[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2021, 43 (3): 346-351.
- [15] de Luca A, Perfetto D, de Fenza A, et al. A sensitivity analysis on the damage detection capability of a Lamb waves based SHM system for a composite winglet[J]. Procedia Structural Integrity, 2018, 12: 578-588.
- [16] 张林文. 板结构材料中超声兰姆波信号传播特性的理论与实验研究[D]. 上海: 上海大学, 2017.
Zhang L W. Theoretical and experimental study on propagation characteristics of ultrasonic lamb wave signal in plate[D]. Shanghai: Shanghai University, 2017.
- [17] 王高平, 徐志勇, 徐博, 等. 基于Lamb波椭圆法的铝板损伤检测仿真分析[J]. 化学工程与装备, 2021(3): 1-3.
Wang G P, Xu Z Y, Xu B, et al. Simulation analysis of aluminum board damage detection based on LAMB wave elliptical method[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2021(3): 1-3.
- [18] Mendig C, Riemenschneider J, Monner H P, et al. Ice detection by ultrasonic guided waves[J]. CEAS Aeronautical Journal, 2018, 9(3): 405-415.
- [19] Moll J, Simon J, Memmolo V. Surface ice detection on composite plates with ultrasonic guided waves[C]//2019 IEEE 5th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace), June 19-21, 2019, Turin, Italy. New York: IEEE Press, 2019: 87-91.
- [20] Gao H D, Rose J L. Ice detection and classification on an aircraft wing with ultrasonic shear horizontal guided waves [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2009, 56(2): 334-344.
- [21] 刘素贞, 杨圣哲, 袁路航, 等. 含微裂纹铝材的电磁超声Lamb波混频非线性检测及量化分析[J]. 电工技术学报, 2021, 36(17): 3639-3648.
Liu S Z, Yang S Z, Yuan L H, et al. Nonlinear detection and quantitative analysis of electromagnetic ultrasonic lamb wave mixing for aluminum with micro crack[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(17): 3639-3648.
- [22] Wang P, Zhou W S, Bao Y Q, et al. Ice monitoring of a full-scale wind turbine blade using ultrasonic guided waves under varying temperature conditions[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2018, 25(2): e2138.
- [23] Shoja S, Berbyuk V, Boström A. Guided wave-based approach for health monitoring of composite structures; Application to wind turbine blades[J]. Wind Engineering, 2018, 42(5): 483-495.