风力机超声导波结冰探测方法的数值和试验研究

朱程香*, 张玉雷, 朱春玲, 赵伟伟

南京航空航天大学飞行器先进设计技术国防重点学科实验室, 南京 210016

*联系人, Email: cxzhu@nuaa.edu.cn

收稿日期: 2016-06-11; 接受日期: 2016-10-14; 网络出版日期: 2016-11-09

国家自然科学基金(编号: 11402114)和国家重点基础研究发展计划(编号: 2015CB755800)资助项目

摘要 以结冰后的平面铝板为研究对象, 开展导波结冰探测方法的数值和试验研究. 采用两个压电元件粘贴于铝板表面, 一个作为发生器, 另一个作为接收器, 并与铝板和冰层耦合, 建立分析模型, 采用数值模拟方法计算发生器激发出的导波在结冰平面铝板中的传播特性, 分析导波的特征参数在不同频率条件下对冰层的敏感度, 并建立结冰几何参数与导波传播特性之间的规律性关系. 建立导波结冰探测试验平台, 在不同的结冰长度和结冰厚度条件下监测导波信号在铝板中的传播规律, 并与其在干净铝板中的传播特性进行对比, 分析结冰参数对导波传播波形推移时间和峰值的影响规律, 验证数值方法的正确性. 计算和试验结果表明, 导波在结冰的铝板中传播时, 波包到达时间会随着结冰厚度的增加而发生推迟, 且波包峰值随着结冰厚度的增加呈衰减趋势; 而波包到达时间随着结冰长度的增加发生延迟, 但峰值不会随之改变.

关键词 压电, 超声导波, 结冰探测, 模态分析, 结冰探测试验

PACS: 29.40.WK, 40.05.+e, 47.11.Hj, 47.50.Cd

风力机结冰破坏了风力机叶片的气动外形, 改变了风力机周围的流场特性^[1,2], 降低风能利用率; 同时不对称的结冰会引起风力机额外的过载和振动, 严重时可能导致风力机停机. 因此监测风力机的结冰情况, 并采取合适的措施进行结冰防护对于保证风力机可靠运行非常重要^[3].

目前国外最广泛应用的结冰探测器是谐振式, 传感器在一个固定频率点超声振动, 当有结冰附着时, 振动频率发生改变. 这种传感器可靠性较高, 但一般采用外伸式安装, 影响了风力机的气动外形^[4]. 比较有前景的结冰传感器^[5]包括了光纤式、平膜式、红外摄

像式等. 光纤式结冰传感器探头尺寸小, 灵敏度高, 便于安装, 但是对水、油污、灰尘的干扰较为敏感. 平膜式结冰传感器^[6]可以采用内埋式安装, 安装方便且精度较高, 能区分冰和水及其他附着物, 缺点是需要温度补偿, 最大可测冰厚度较小.

国内对结冰探测技术的研究比较滞后, 主要有哈尔滨工程大学和华中科技大学进行了一些工作. 哈尔滨工程大学研制了一种基于磁致伸缩原理的振管式结冰传感器^[7]. 华中科技大学已成功研制出基于压电效应的平膜式结冰传感器^[8], 测量灵敏度可达0.1 mm, 最大可测冰厚为2.0 mm, 此外还在光纤式结冰传感器

引用格式: 朱程香, 张玉雷, 朱春玲, 等. 风力机超声导波结冰探测方法的数值和试验研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46: 124708
Zhu C X, Zhang Y L, Zhu C L, et al. Numerical and experimental study on icing detection of wind turbine blade based on ultrasonic guided wave (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2016, 46: 124708, doi: [10.1360/SSPMA2016-00290](https://doi.org/10.1360/SSPMA2016-00290)

的研究上取得了很大成功, 应用前景良好.

总体而言, 已有的结冰传感器大部分采用伸出式安装方法, 影响了风力机附近的流场以及气动性能; 一些传感器只能探测到附近的结冰状况, 探测范围比较小; 大多数传感器设计复杂, 体积重量大, 成本高.

本文针对国内外发展现状中存在的一些问题, 结合超声波特有的传播距离长、信号稳定、不易衰减、在特定的方向沿直线传播等优点^[9,10], 将基于压电材料的超声波检测技术应用于风力机叶片的结冰探测, 并开展了相关的数值和试验研究. 需要说明的是, 本文将风力机叶片简化为平板, 针对平板表面的结冰探测开展研究, 这主要是因为无限均匀各向同性材料中, 只存在两种类型的超声波, 即横波和纵波, 且两者之间分别以各自的特性而不发生波形耦合, 虽然风力机叶片为曲面, 导波在曲面中传播的横波和纵波受到边界的制约以及边界处不断的模式转换, 但是可以通过对称加载等方法有效降低其对主信号的干扰, 从而提取出主信号, 关于信号分析及处理方法, 平板和曲面是类似的.

1 超声导波探测理论

1.1 超声导波在平板中的力学模型

超声Lamb波是一种在厚度与激励波波长为相同数量级的平板中由纵波和横波组合而成的特殊形式的应力波, 它不同厚度及激发频率下产生不同的传播模式. 在平面应变假设下, 介质中有如下的应力位移关系^[11]:

$$\tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \right), \quad (1)$$

$$\sigma_y = \lambda \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) + 2\mu \frac{\partial u_y}{\partial y},$$

其中,

$$\begin{aligned} u_x &= \left[(A_2 i k \cos p y + B_1 q \cos q y) \right] e^{i(kx - \omega t)}, \\ &+ (A_1 i k \sin p y - B_2 q \sin q y) \left] e^{i(kx - \omega t)}, \right. \\ u_y &= \left[-(A_2 p \sin p y + B_1 i k \sin q y) \right] e^{i(kx - \omega t)}, \\ &+ (A_1 p \cos p y - B_2 i k \cos q y) \left] e^{i(kx - \omega t)}. \right. \end{aligned} \quad (2)$$

由铝板上下表面处的自由边界条件得

$$\begin{aligned} \frac{(k^2 - q^2) \sin(qh)}{2ikp \sin(ph)} &= -\frac{2\mu i k q \cos(qh)}{(\lambda k^2 + \lambda p^2 + 2\mu p^2) \cos(ph)}, \\ \frac{(k^2 - q^2) \cos(qh)}{2ikp \cos(ph)} &= \frac{2\mu i k q \sin(qh)}{(\lambda k^2 + \lambda p^2 + 2\mu p^2) \sin(ph)}. \end{aligned} \quad (3)$$

根据波速与材料属性的关系:

$$(\lambda k^2 + \lambda p^2 + 2\mu p^2) = \mu(q^2 - k^2), \quad (4)$$

将(3)式化简为

$$\frac{\tan(ph)}{\tan(qh)} = \left[\frac{4k^2 p q}{(k^2 - q^2)^2} \right]^{\pm 1}, \quad (5)$$

其中, +1项对应对称模式, -1项对应反对称模式.

$$p = \sqrt{\frac{\omega^2}{c_l^2} - k^2}; q = \sqrt{\frac{\omega^2}{c_t^2} - k^2}, \quad (6)$$

其中 c_l , c_t 分别为Lamb波的横波速度与纵波速度, 均为已知常数, 波数 k 数值上可表示为 ω / c_p , c_p 为Lamb波传播的相速度, $\omega = 2\pi f$.

为了精确求解方程(3), 本文利用二分法思想采用Matlab计算软件求解方程并绘制结果^[12], 如图1所示.

由图1可以看出, Lamb波具有两个特性: (1)多模态性, 即随着频率的改变, Lamb波出现多个模式, 且频率越大, 模态数越多; (2)频散性, 即每一种模式的速度随着频率的变化而改变.

用Lamb波进行结冰探测会因为信号中夹杂着许多模态而变得复杂, 因此选择较小的加载频率, 从而只产生S0模态和A0模态. 同时, S0模态的速度大于A0模态, 信号特征参数对结冰信号更为敏感. 因此, 本文采用S0模态的特征变化检测分析表面结冰情况, 并选择50 kHz作为加载信号的中心频率.

图1 (网络版彩图)Lamb波频散曲线(相速度)
Figure1 (Color online) Lamb wave dispersion curve (phase velocity).

1.2 导波检测的物理模型

微分或者积分过程过于复杂而无法获得解析解, 因此本文使用有限元法求解. 在计算过程中通过控制单元类型, 网格划分密度等提高有限元的求解精度和计算效率. 此外, 有限元也可以作为一种验证导波理论的数值方法, 不仅可以验证导波频散曲线, 也可以直观地观察导波的传播现象, 有助于分析结冰对超声导波传播特性的影响. 导波为平面应力波, 在进行有限元建模时候只需要考虑两个维度, 且二维问题分析的效率较三维高. 本文采用的超声波发射接收示意图如图2所示, 使用一个压电片作为发生器, 激发出Lamb波在铝板中传播, 经过结冰区域后波形及模态发生改变, 之后信号被接收压电片接收. 将激励信号加载到发生压电片上, 选择合适的距离作为接收端, 通过有限元软件模拟接受点的位移响应作为接受压电片采集到的结冰信号, 并和没有结冰时的信号进行对比, 进而判断结冰程度.

2 结冰对探测信号的影响

2.1 对导波传播过程建模

使用ANSYS有限元软件模拟Lamb波在不同结冰情况下的探测信号, 对比结冰信号与健康信号, 观察结冰信号随着结冰长度与厚度的变化规律. 厚度变化时, 结冰长度统一为20 mm, 长度变化时厚度统一为1 mm. 超声导波的传播是在固体中沿着长度方向传播的, 因此, 为了简化模型本文模拟二维平面内Lamb波的传递情况, 模型如图3所示.

模型中, 铝板长400 mm, 厚度为1 mm, 距离原点4 mm处是激励压电片的位置, 冰型为明冰, 密度为919.7 g/cm³, 弹性模量为9.33×10⁹ Pa, 泊松比为0.325. 在软件中加载式(5)的激励函数^[13,14]

图2 结冰探测物理模型
Figure 2 Physical model of icing detection.

图3 (网络版彩图)铝板表面结冰模型
Figure3 (Color online) Icing model of aluminum sheet.

$$f(t) = 0.5 \left(1 - \cos \frac{2\pi f_0 t}{n} \right) \sin(2\pi f_0 t), \quad (7)$$

其中 f_0 为激励函数的中心频率, n 为所加汉宁窗的个数. 本文中取中心频率为50 kHz, $n=5$. 在对模型进行加载求解时选择纵波加载, 即压电片沿着坐标轴 x 方向进位移函数加载, 模型右端面约束, 加载完成后选择采集点的 $U(X)$ 方向, 既采集点的 X 方向位移量作为分析结果.

2.2 数值模拟结果分析

2.2.1 冰厚度变化对导波传播特性的影响

由于超声波在传播过程中遇到结冰会发生反射, 结冰处成为新的波源, 如若遇到边界又会产生边界反射, 致使压电片接收到的信号不能单一的表示为结冰的散射信号, 因此选择合适的位置作为信号接收点非常关键. 前期的实验结果表明, 当发生器和接收器之间的距离 L 满足如式(8)的关系时, 可大大削弱边界反射对探测信号的影响.

$$\begin{cases} L/V_S - L/V_A > 5/f_0, \\ 2S/V_S > 5/f_0, \end{cases} \quad (8)$$

其中 V_S, V_A 分别为S模态和A模态的速度, S 为接收压电片与边界之间距离.

以 $x=250\text{mm}$ 处上表面的节点为数据分析点. 选择时间历程后处理器, 观察接收器对应位置处位移随时间的变化关系, 如图4所示.

图4为Lamb波通过铝板表面的传播特性, 取相距5 mm的两点 n 和 $n+1$, 计算在50 kHz下S0模态的群速度, 即S0模态峰值处对应的到达时间, 如图5所示. 计算结果为相距5 mm两点S0模态峰值到达时间相差1.027 μs, 由此可计算出此模型中S0模态的群速度为4868 m/s. 采用相同的模拟方法, 分别计算铝板表面结冰厚度为0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5 mm时的Lamb波传播特性, 如图6和7所示.

图4 (网络版彩图)x处随时间的位移变化

Figure 4 (Color online) Displacement of x with different time.

图5 (网络版彩图)相距5 mm的不同两点的时间推移

Figure 5 (Color online) Relationship of displacement and time of two different points with distance of 5 mm.

图6 (网络版彩图)不同结冰厚度对Lamb波传播特性的影响

Figure 6 (Color online) The influence of different ice thickness on the propagation characteristics of Lamb wave.

图6中黑色曲线(标识为: no)为没有结冰时 $U(X)$ 的值, 其他为铝板表面覆冰后Lamb波在 X 方向的位移. 从峰值看, Lamb波在无冰铝板中传播的峰值明显比有结冰时的峰值大. 图7为 S_0 模态峰值放大图, 没有结冰时峰值为0.04844, 结冰厚度为1 mm时峰值下降到0.04819, 下降了1.46%. 随着结冰厚度的增加, 峰值逐渐下降. 这是由于结冰的存在减弱了超声波的能量,

使得采集点的波峰值变小. 从波峰出现的时间来看, 没有结冰时, Lamb波波峰出现在 0.1355×10^{-3} s, 当出现1 mm后的结冰时, 波峰出现时间变为 0.13700×10^{-3} s, 推迟了1.11%. 从表1中可以看出随着结冰厚度的增加, 波峰到达时间呈现推迟的趋势, 但是这种变化比较细微, 不易观察.

2.2.2 结冰长度对导波传播特性的影响

采用本文的有限元模拟方法, 对不同结冰长度下导波的传播特性进行数值模拟, 结冰长度范围为10 mm到100 mm, 每隔10 mm计算一次. 得到不同结冰长度下超声波的传播特性, 如图8和图9所示.

图9中黑色曲线为没有结冰情况下的Lamb波传播特性, 其他为不同结冰长度下的Lamb波传播特性, 从峰值看, 结冰后峰值比结冰前小, 并且随着结冰长度的增加, 峰值数值基本保持不变, 这主要是受到模态转换的影响. 结冰厚度与长度对导波传播的影响是不一样的, 并且波包发生时间推移的机理也是不同的, 冰

图7 (网络版彩图)Lamb波峰值处的局部放大图

Figure 7 (Color online) Local display of Lamb wave crest value.

图8 (网络版彩图)不同结冰长度对Lamb波传播特性的影响

Figure 8 (Color online) The influence of different ice length on the propagation characteristics of Lamb wave.

表 1 不同结冰厚度的模拟数值对比**Table 1** Numerical simulation of different icing thickness

冰厚 (mm)	峰值时间 (μs)	变化幅度 (%)	峰值 (mm)	变化幅度 (%)
0.0	0.13550×10^{-03}	0.74	0.04844	0.52
0.5	0.13650×10^{-03}		0.04819	
1.0	0.13700×10^{-03}	1.11	0.04774	1.46
1.5	0.13750×10^{-03}	1.48	0.04695	3.08
2.0	0.13800×10^{-03}	1.85	0.04596	5.12
2.5	0.13850×10^{-03}	2.21	0.04493	7.24
3.0	0.13900×10^{-03}	2.59	0.04330	10.61
3.5	0.13950×10^{-03}	2.95	0.04163	14.07
4.0	0.14000×10^{-03}	3.32	0.04038	16.64
4.5	0.14050×10^{-03}	3.69	0.03952	18.42
5.0	0.14100×10^{-03}	4.06	0.03858	20.36

表 2 不同结冰长度的数值模拟结果**Table 2** Results of numerical simulation of different icing lengths

长度 (mm)	峰值时间 (μs)	变化幅度 (%)	峰值 (mm)	变化幅度 (%)
0	0.13550×10^{-03}	0.80	0.04844	2.66
10	0.13659×10^{-03}		0.04715	
20	0.13680×10^{-03}	0.95	0.04725	2.45
30	0.13694×10^{-03}	1.03	0.04719	2.58
40	0.13706×10^{-03}	1.15	0.04726	2.43
50	0.13726×10^{-03}	1.29	0.04723	2.49
60	0.13737×10^{-03}	1.38	0.04720	2.56
70	0.13772×10^{-03}	1.64	0.04718	2.60
80	0.13788×10^{-03}	1.76	0.04708	2.80
90	0.13804×10^{-03}	1.87	0.04718	2.60

图 9 (网络版彩图)Lamb波峰值处的局部放大图**Figure 9** (Color online) Local display of Lamb wave crest value.

厚对模态时间推移是由于其对群速度的影响而引起的, 而冰长度的影响是由于Lamb波穿过结冰区的距离发生变化导致的。

3 结冰对导波传播特性影响试验

3.1 结冰探测试验台

根据超声波结冰探测原理搭建实验台. 采用的仪器包括泰克AFG3022C型信号发生器, T&C Power Conversion公司生产的AG1020功率放大器, 阿尔泰公司的PXI8502S型数据采集卡, 此外本文的试验控制集成在Labview平台上编程形成的采集程序, 具有控制方便、采集简单的特点. 结冰探测实验台的原理示意图如图10(a)所示, 实物图如图10(b)所示. 试验模型与数值模拟模型保持一致, 通过发生传感器激发的Lamb波在结冰的平面铝板传播, 并被接收传感器采集, 通过对比试验测得的结冰前后超声波信号的S0模态差异, 探索结冰几何参数与导波传播特性之间的规律性关系. 本实验的实验模型是长400 mm, 宽200 mm, 厚1 mm的

图10 (网络版彩图)(a) 实验连接顺序图; (b) 信号发生器与数据采集卡; (c) 结冰的平面铝板

Figure 10 (Color online) (a) Experimental connection sequence diagram; (b) signal generator and data acquisition card; (c) ice plane.

光滑平面铝板, 图10(c)所示, 激励压电片位于距离边界50 mm位置处, 接收压电片位于边界100 mm处, 压电片的规格为两个大小一致的 $\Phi 15 \times 2$ 的P4压电片^[15].

3.2 数据采集

实验中是按照采集卡设置的采样频率20 MHz进行采样, 采样点数为4096个, 采集一个点需要0.05 μs , 采集完整个信号共需要时长为204.8 μs , 第一个采样点为激励波传播到采集点的第一次位移. Lamb波在光滑平面传播时波能量随着传播距离的增加逐渐衰弱, 为了采集到的信号便于分析计算, 也为了能够实时观察结冰引起的信号变化, 本文采用功率放大器对输入之前的信号进行功率放大. 采集信号过程中, 通过功率放大器将导波的幅值稳定在合适的位置后保持功率

不变, 观察在不同结冰厚度下超声波中S0模态的传播特性. 依次采集四组不同结冰厚度的信号, 观察结果.

3.3 实验结果分析

将采集到的健康信号与不同结冰厚度的结冰信号进行对比, 分析结冰前后S0模态的变化情况. 结果如图11和12所示.

同样观察导波S0模态的变化, 表面没有结冰时, 在第136.6 μs 时S0模态波包的幅值达到本次实验的最高值738 mV, 当结构表面出现1 mm厚的结冰时, S0模态波包的峰值点延迟了0.36%, 随着结冰厚度的增加, S0模态波包出现依次延迟的趋势, 但是变化细微. 随着结冰厚度的增加, S0模态波包峰值点呈现明显的衰减趋势, 这也是由于结冰厚度的增加, 对超声波的衰减越厉害所造成的, 如图12所示. 造成这种变化是由于导

图11 (网络版彩图)不同结冰厚度传感器处的位移

Figure 11 (Color online) Displacement of the same ice thickness sensor.

图12 (网络版彩图)S0模态处峰值的局部显示

Figure 12 (Color online) Local display of the peak value of S0 mode.

表3 不同结冰长度的探测信号数据对比

Table 3 Comparison of detection signal data of different ice thickness

结冰厚度 (mm)	峰值时间 (μs)	变化幅度 (%)	电压峰值 (μV)	变化幅度 (%)
0	136.6	—	738.54124	—
1	137.1	0.36	588.92619	20.1
2	137.3	0.51	452.28396	38.7
3	137.5	0.66	313.92263	60.4
4	137.7	0.81	214.94525	71.6

波遇到结冰时能量损失, 致使模态波峰值降低. 峰值由于是通过功率放大器调节, 将功率放大到合适的位置即结冰发生时的振幅衰减幅度和数值模拟一致时, 比较其他结冰厚度的变化幅度.

最后, 将试验结果和数值计算结果进行了对比, 如图13和14所示, 可以看出两者基本吻合, 验证了本文数值方法的正确性. 但是两者也存在差异, 造成误差的原因可能有以下几方面:

- 1) 模拟计算没有对导波的反射, 映射进行模拟;
- 2) 模拟时候激励函数通过加载方式之间作用到铝板模型左端面, 对压电片的具体参数并没有考虑;
- 3) 实验中的影响因素比较多, 首先, 外界振动引起的干扰, 其次实验是在冷环境中进行, 而模拟高空真实结冰环境存在差异.

图13 (网络版彩图)模拟结果与数值结果的峰值点时间推移对比

Figure 13 (Color online) Comparison of simulation results between the numerical results and the experimental results.

图14 (网络版彩图)模拟结果与实验结果的峰值点变化幅度对比

Figure 14 (Color online) Comparison of simulation results between the numerical results and the experimental results.

4 结论

本文建立了结冰冰层-压电元件-平面铝板耦合的有限元分析模型, 采用数值模拟方法, 计算并对比分析了结冰前后Lamb波传播特性的差异, 验证了Lamb波用于结冰探测的可行性. 通过计算不同结冰长度和厚度条件, Lamb波在铝板中的传播特性, 获得结冰长度和厚度条件对Lamb波峰值出现的时间延迟和幅值的影响规律. 建立的超声导波结冰探测试验台实现了结冰条件的近似模拟和超声导波传播特性的准确监测, 试验结果验证了数值模拟方法的正确性和本文建立的结冰长度和厚度与传播特性之间规律的正确性. 结果表明, 随着结冰厚度的增加, S0模态波包的出现时间发生延迟, 同时, 波包的峰值呈现逐渐衰减的趋势; 随着结冰长度的增长, S0模态波包到达时间也出现依次延迟, 但波包峰值变化不大.

参考文献

- 1 Lee S, Bragg M B. Investigation of factors affecting iced-airfoil aerodynamics. *J Aircraft*, 2003, 40: 499–508
- 2 National Transportation Safety Board. NTSB Safety Alerts: Aircraft Inflight Icing. SA-014, 2008
- 3 Han Y, Palacios J. Analytical and experimental determination of airfoil performance degradation due to ice accretion. In: Proceedings of 4th AIAA Atmospheric and Space Environments Conference. New Orleans: AIAA, 2012
- 4 Baumgardner D, Rodi A. Laboratory and wind tunnel evaluations of the Rosemount icing detector. *J Atmosph Ocean Technol*, 1989, 6(6): 971–979
- 5 Roy S, DeAnna R, Izad A, et al. Miniature ice detection sensor systems for aerospace applications. In: Proceedings of the 11th Annual International Workshop on MEMS. Heidelberg: IEEE, 1998. 75–80
- 6 Li X, Shih W Y, Vartuli J, et al. Detection of water-ice transition using a lead zirconate titanate/brass transducer. *J Appl Phys*, 2002, 92: 106–111
- 7 Zhang B H, Wang H, Wang J S, et al. A method for ice detecting based on the principle of vibration (in Chinese). *Chin J Sci Instrum*, 2003, 24(4): 384–386 [张滨华, 王华, 王劲松, 等. 一种基于振动原理的结冰探测方法. 仪器仪表学报, 2003, 24(4): 384–386]
- 8 Ye L. Ice sensor based on piezoelectric device (in Chinese). *Instrum Sensors*, 2001, 9: 6–8 [叶林. 基于压电器件的冰传感器. 仪表技术与传感器, 2001, 9: 6–8]
- 9 Gao H, Rose J L. Ice detection and classification on an aircraft wing with ultrasonic shear horizontal guided waves. *IEEE Trans Ultrason Ferroelec*

- Frequ Control, 2009, 56(2): 334–344
- 10 Hongerholt D D, Willms G, Rose J L. Summary of results from an ultrasonic in-flight wing ice detection system. *Quant Nondestruct Evaluat*, 2002, 615(1): 1023–1028
 - 11 Rose J L, 著. 何存富, 吴斌, 王秀彦, 译. 固体中的超声波. 北京: 科学出版社, 2004. 89–91
 - 12 Zheng X M, Zhao Y Z, Shi Y W. Calculation of Lamb wave dispersion curve (in Chinese). *Nondestruct Test*, 2003, 25: 66–69 [郑祥明, 赵玉珍, 史耀武. Lamb波频散曲线的计算. 无损检测, 2003, 25: 66–69]
 - 13 Yu Z H. Research on active Lamb wave health detection technology for aviation structure (in Chinese). 2007, 5: 23–29 [余振华. 面向航空结构的主动Lamb波健康检测技术研究. 南京航空航天大学, 2007, 5: 23–29]
 - 14 Xu Y D. Damage localization of material structure based on Lamb wave active detection technique (in Chinese). *Nanjing Unive Aeron Astron*, 2004, 2: 37–41 [徐颖娣. 基于Lamb波主动检测技术的符合材料结构损伤定位研究. 南京航空航天大学, 2004, 2: 37–41]
 - 15 Qiu L, Yuan S F, Wang Q. Development of Lamb wave based active structural health monitoring system (in Chinese). *Piezoelec Acoustoopt*, 2009, 5: 763–766 [邱雷, 袁慎芳, 王强. 基于Lamb波主动结构健康监测系统的研制. 压电与声光, 2009, 5: 763–766]

Numerical and experimental study on icing detection of wind turbine blade based on ultrasonic guided wave

ZHU ChengXiang^{*}, ZHANG YuLei, ZHU ChunLing & ZHAO WeiWei

College of Aeronautics and Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

The numerical and experimental study on ultrasonic icing detection method based on guided wave is carried out on the surface of aluminum plate. Two piezoelectric elements are bonded to the surface of the aluminum plate, one works as a generator and the other works as a receiver, which are coupling with the ice and the aluminum plate to establish the numerical simulation model. Propagation characteristics of Lamb wave excited by the generator are calculated using numerical simulation method. Analysis of characteristic parameters of lamb wave in different frequency conditions is carried out to obtain the relationship between ice and ultrasonic wave propagation characteristics. The ultrasonic icing detection test platform is established and ultrasonic signals in the conditions of ice with different length and thickness are monitored, which are compared with that in a clean plate of waveform. Analysis of effects of icing parameters on the guided wave propagation time and peak waveform was investigated. The results show that the peak time of ultrasonic guided wave propagation is delayed, and with the increase of the ice thickness and length, the peak time of ultrasonic guided wave propagation increases linearly.

piezoelectric, ultrasonic guided wave, ice detection, modal analysis, experiment of ice detection

PACS: 29.40.WK, 40.05.+e, 47.11.Hj, 47.50.Cd

doi: [10.1360/SSPMA2016-00290](https://doi.org/10.1360/SSPMA2016-00290)