

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209916

基于阵列式压电振动频谱衰减的结冰区域定位研究*

葛俊锋^{1,2}, 白鸿飞¹, 毛俊伟¹, 桂 康^{1,2}, 叶 林¹

(1. 华中科技大学人工智能与自动化学院 武汉 430074; 2. 中国空气动力研究与发展中心
结冰与防除冰重点实验室 绵阳 621000)

摘 要:为克服传统结冰传感器无法实现翼面大范围多区域结冰探测问题,提出了一种基于灰度重心法的多结冰区域定位方法。该方法通过采集结冰前后压电阵列的振动谱,提取频谱幅值衰减率作为定位特征值,并结合基于多点结冰概率检测的重构算法和灰度重心法计算得到多个结冰区域的中心坐标,实现对平面或曲面上多个结冰区域的定位。当扫频频率范围 0.5~5 kHz 时,在 70 mm 直径的结冰条件下,铝板单结冰区域定位平均误差为 27.4 mm,两结冰区域定位平均误差为 29.04 mm;翼面结冰横向定位平均误差为 22.6 mm。为了进一步提高定位精度,提出了一种基于小波包分解的敏感频带选择的特征提取方法。优化后的实验结果表明,铝板单结冰区域定位精度提高了 34.59%,定位误差波动程度降低了 45.67%,翼面结冰的横向定位精度提高了 54.87%,横向定位误差波动程度降低了 46.63%,实现了较高精度的多结冰区域定位探测,为面式结冰探测提供了一种新思路。

关键词: 结冰区域定位;灰度重心法;小波包分解;敏感频带

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

The icing area localization method based on piezoelectric array vibration spectrum attenuation

Ge Junfeng^{1,2}, Bai Hongfei¹, Mao Junwei¹, Gui Kang^{1,2}, Ye Lin¹

(1. School of Artificial Intelligence and Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
2. Key Laboratory of Icing and Anti/De-icing, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: To overcome the problem that traditional ice sensors cannot detect multiple icing areas in a wide range of airfoils, a multiple icing area localization method based on the grayscale centroid method is proposed. The vibration spectrum of piezoelectric array before and after icing is collected, and the attenuation rate of spectrum amplitude is extracted as the positioning eigenvalue. Combined with the reconstruction algorithm based on multi-point icing probability detection (RAMIPD) and the grayscale centroid method, the center coordinates of the multiple icing areas are calculated to get the positions of the icing regions on a plane or a curved surface. When the sweep frequency range is the full band of 0.5~5 kHz and the diameter of icing area is 70 mm, the average positioning error of single icing area on the aluminum plate is 27.4 mm. The average positioning error of two icing areas is 29.0 mm. The average lateral positioning error of icing areas on the airfoil is 22.6 mm. To improve the positioning accuracy, a feature extraction method for sensitive frequency band selection based on wavelet packet decomposition (WPD) is proposed. Experimental results show that the single icing area positioning accuracy on the aluminum plate is increased by 34.59%, the fluctuation of the positioning error is reduced by 45.67%, the lateral positioning accuracy on the airfoil is increased by 54.87%, and the fluctuation of the lateral positioning error is reduced by 46.63%. The proposed icing area localization method can detect the multiple icing areas with high precision and provide a new idea for icing area detection.

Keywords: icing area localization; grayscale centroid method; wavelet packet decomposition; sensitive frequency band

0 引言

飞机在飞行过程中, 飞机的风挡、机翼前缘、螺旋桨、发动机进气道等迎风部位经常发生结冰现象。据美国联邦航空管理局 (federal aviation administration, FAA) 统计^[1], 空难事故中有 10% 以上是因为飞机结冰造成舵面操纵失效。风洞实验表明^[2], 机翼表面结有薄如砂纸的冰、霜或雪, 便能造成高达 30% 的升力损失、增大 40% 的阻力, 更大、更临界的冰积聚可能产生更大的升力损失和阻力。总之, 翼面结冰会造成飞机在飞行过程中升力减小、阻力增大, 飞行性能变差, 飞机操纵困难, 严重时会导致空难事故。因此, 及时探测和清除飞机关键部位表面积冰对于降低飞机能耗和保障飞机飞行安全至关重要^[3-6]。

现有多种不同原理的结冰传感器可用于探测飞机重要部位是否结冰, 主要使用的探测方法包括光学法、电学法、热学法、机械法和波导法等^[7-9]。

虽然现有结冰传感器种类较多, 但只有部分结冰传感器技术相对成熟。光纤式结冰传感器具有高灵敏度、高精度的优势, 实际测量冰厚范围仅限 0.1~3 mm, 能够区分冰型, 但由于冰层中光的复杂传播特性导致难以精确标定不同冰型的生长曲线, 且难以区分表面沾染的非冰物质; 压电谐振式结冰传感器对冰厚的测量精度较高, 能够很好的区分冰和水, 但是无法区分冰型^[10]; 电容式结冰传感器能够识别干燥、积水、积雪和结冰状态, 但当电容两极之间的介质为冰水混合物时, 由于两者的低频介电常数相接近, 冰厚测量精度较低^[11]; 超声波结冰探测技术在区分冰型、冰厚测量及结冰区域识别等结冰信息探测方面具备较好的应用前景^[12]。

目前大部分结冰传感器主要针对其敏感面进行结冰探测, 属于单点探测方法。其安装数量及位置受机翼结构强度、传感系统重量及复杂度等因素限制, 无法实现机翼表面大范围的结冰探测。而当前的结冰区域探测方法大多对压电传感器进行脉冲激励或中心频率固定的激励^[12], 虽然可以获得结冰区域的信号, 但容易受到噪声和振动影响, 结冰区域定位精度低。2021 年, 陈前焱^[13]采用线性扫频信号作为激励源研究压电阵列结冰探测方法, 利用压电-铝板的振动时域信号衰减实现了结冰区域的粗定位。本文采用线性快速正弦扫频激励压电阵列, 并将压电-铝板的振动频谱衰减作为特征量, 实现了一种基于灰度重心法的铝板和翼面多结冰区域高精度定位方法。

1 多结冰区域定位原理

1.1 压电阵列布设方式

为了实现平面或曲面上结冰区域的探测, 需要将多个压电换能器以某种形状组装成压电阵列。压电阵列从多个方向覆盖整个监测区域, 换能器的数目越多, 被监测区域的检测效果就越好, 但随之系统的复杂度和成本也会增加。Zhao 等^[14]提出了圆形布局、矩形布局和平行线布局等 3 种排布方式, 如图 1 所示。

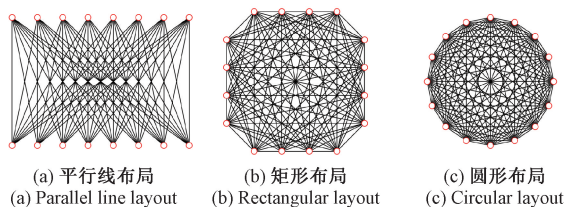


图 1 压电阵列的三种布局方式

Fig. 1 Three layout modes of piezoelectric array

从理论分析可知, 监测区域内连线越密集的位置, 探测精度越高。因此, 在换能器数量一定的情况下, 圆形阵列所围成的区域内连线最为密集, 矩形其次, 平行线次之; 从安装角度来看, 压电阵列适合以平行线布局安装在机翼内表面较为平坦的部位; 从监测区域来看, 平行线布局的监测区域最大, 而且 3 种布局的横向中心线位置的连线密度相近。另外, 飞机翼面结冰大都发生在机翼前缘。综上所述, 本文采用平行线布局, 以翼面中心线为基准在其内侧较为平整的部位安装压电阵列。

对于平行线阵列, 考虑中心小四边形 EFGH, 为了获得良好的形状保真度, 应尽量满足结冰区域位于中心周围。由图 2 可以得出: $\overline{EG} = d/2$, 因此, $S_{EFGH} = \overline{FH} \times \overline{EG}/2 = d/4 \times \overline{FH}$ 。通过运算可得 $\overline{FH} = d \tan \alpha \tan \beta / (\tan \alpha + \tan \beta)$, $\tan \alpha = D/[N_L - 1]d$, $\tan \beta = D/[N_L - 2]d$, N_L 是每条线路上的传感器数量。通过替换运算, $S_{EFGH} = Dd/[4(2N_L - 3)] = S_{\min}$ 。所以用线性阵列检测最小结冰尺寸 S_{EFGH} 所需的最少传感器数量 $N_{\min}^{\text{lin}}$ 为:

$$N_{\min}^{\text{lin}} = 2N_L = \text{int}\left(\frac{Dd}{4S_{\min}}\right) + 3 \quad (1)$$

式中: d 和 D 是图 2 所示的尺寸。从式 (1) 可以看出预期的空间分辨率越高, 所需要最小结冰尺寸 $S_{\min}$ 越小, 所需的传感器数量越大^[14]。

1.2 基于多点结冰概率检测的重构算法

多点结冰概率检测重构算法 (reconstruction algorithm based on multi-point icing probability detection, RAMIPD)

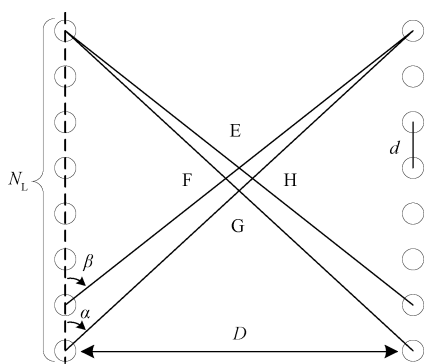


图2 平行线布局分辨率评估

Fig. 2 Resolution evaluation of parallel line layout

通过面阵网络来重构结冰区域,在发射和接收压电换能器间的传播路径决定了这对换能器的有效监测区域,如图3所示。图3中的椭圆区域表示一对换能器的监测范围,从采集的振动信号中提取每对换能器因结冰所引起振动信号变化的特征量,振动信号的变化可归因于直达传播路径及其周围区域的结构变化,该特征量表征了结冰前后振动信号的变化程度。因此对于监测区域中的每个点,都可以利用每对换能器采集的振动信号变化程度及其相对于换能器对的位置来重建该点的结冰概率。RAMIPD 包含以下3个特性^[15-18]。

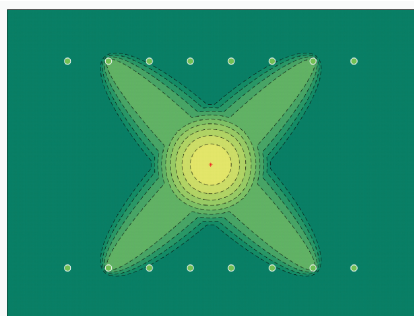


图3 RAMIPD 算法示意图

Fig. 3 Diagram of RAMIPD algorithm

1) RAMIPD 包含一个反演过程,将整个被测区域均分为多个小区域,根据相应的换能器对提取的振动信号特征量进行简单的反演计算。

2) RAMIPD 需考虑换能器直达路径以及其附近椭圆区域对振动信号特征量的影响。即直达路径上结冰会对测量信号产生影响,直达路径的周边区域结冰也会通过声波的散射对信号产生影响。

3) RAMIPD 通过每一个传播途径上的振动信号变化量来计算监测区域内的结冰特征,将多个传播路径的计算结果线性叠加后作为最终监测区域的结冰特征分布结果。

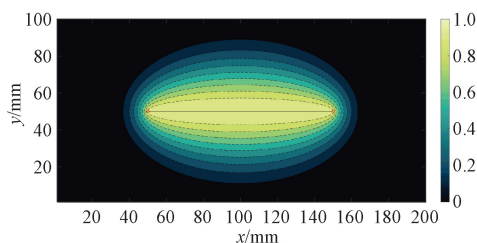
RAMIPD 算法的数学表达式为:

$$P(x, y) = \sum_{k=1}^N p_k(x, y) = \sum_{k=1}^N A_k \left(\frac{-1}{\beta - 1} R(x, y, x_{1k}, y_{1k}, x_{2k}, y_{2k}) + \frac{\beta}{\beta - 1} \right) \quad (2)$$

$$R(x, y, x_{1k}, y_{1k}, x_{2k}, y_{2k}) = \frac{\sqrt{(x - x_{1k})^2 + (y - y_{1k})^2} + \sqrt{(x - x_{2k})^2 + (y - y_{2k})^2}}{\sqrt{(x_{1k} - x_{2k})^2 + (y_{1k} - y_{2k})^2}} \quad (3)$$

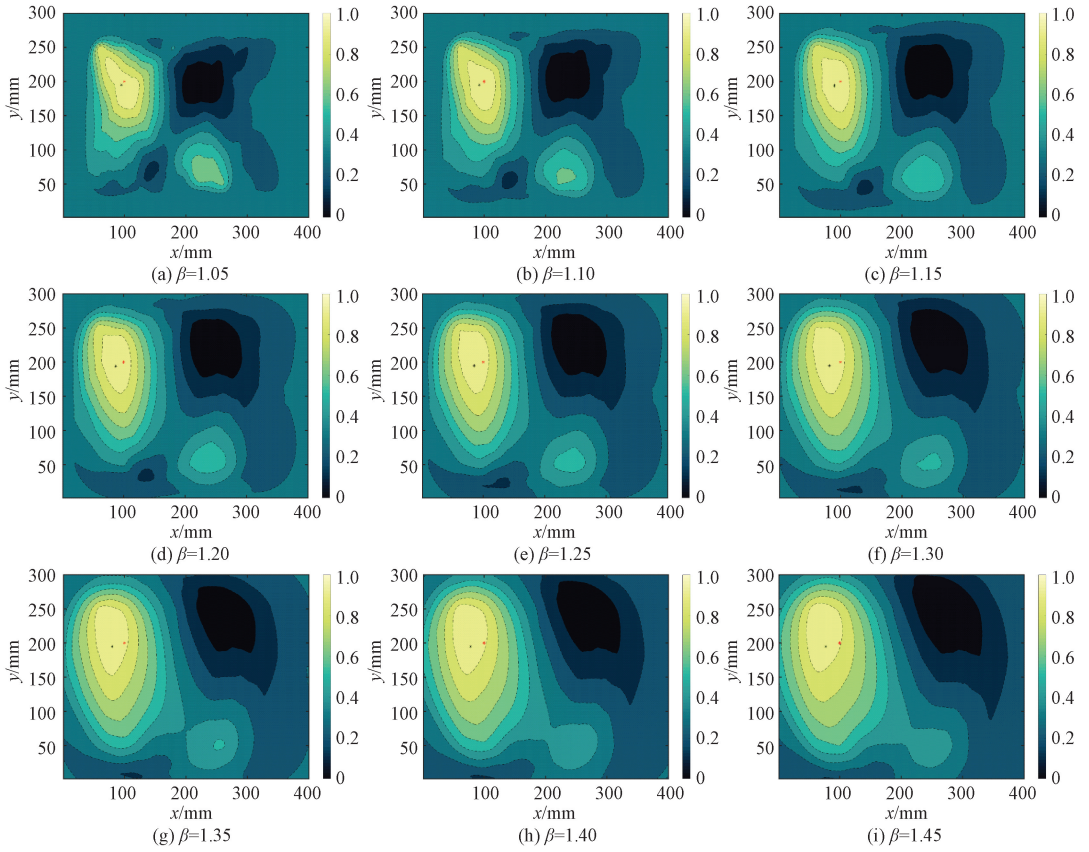
式中:假设共有 N 个换能器对组合, A_k 表征结冰前后第 k 个换能器对测量的信号差异程度, (x_{1k}, y_{1k}) 为发射换能器的位置, (x_{2k}, y_{2k}) 为接收换能器的位置, (x, y) 为格点的位置。 R 定义为格点到发射和接收换能器的距离之和与发射和接收换能器直达距离的比值。参数 β 表征每个换能器对的监测范围,在监测范围内结冰特征值的大小随着 R 的增加而减小,在监测范围外结冰特征值为0。从式(2)可知,影响结冰概率分布的影响因子有 A_k 和 β ,其中 A_k 影响单个换能器对监测范围内的特征值大小,而 β 影响着单个换能器对的监测范围。

如图4所示, β 取值为1.05 ~ 1.45,步长为0.05条件下的换能器对的影响范围,随着 β 的增大,成像范围就越大。为了研究结冰定位区域必须将 A_k 和 β 对成像区域的影响进行解耦,但目前并没有合适的特征进行解耦,故本文针对覆冰直径为70 mm、覆冰厚度为2 mm的结冰条件进行实验研究。对覆冰位置为(100, 200)的实验数据进行处理,得到在不同 β 取值下的成像结果如图5所示。

图4 不同 β 取值下的影响范围Fig. 4 Influence range of different β values

由图5可以看出随着 β 的增大,成像区域中阈值大于0.8的范围在逐渐增大,并且实际坐标和定位坐标的距离也随之增大,因此 β 的取值不仅影响着结冰区域的识别也影响着定位精度。由于 β 的取值影响着整个成像结果,因此需要标定出最优的 β 值进行结冰区域的识别。

为了更好地描述结冰区域识别效果的好坏,引入两个评价指标即准确率 A_r 和偏差率 D_r ,准确率定义为识别的结冰区域中实际结冰面积占整个区域识别面积的比例;偏差率定义为未正确识别的结冰区域面积占实际结冰面积的比例。故可认为准确率越高,偏差率越低,结

图 5 β 参数化扫描的成像结果Fig. 5 β parametric scan imaging results

冰区域的识别效果越好。准确率 A_r 表达式为:

$$A_r = \frac{S_c}{S_r} \quad (4)$$

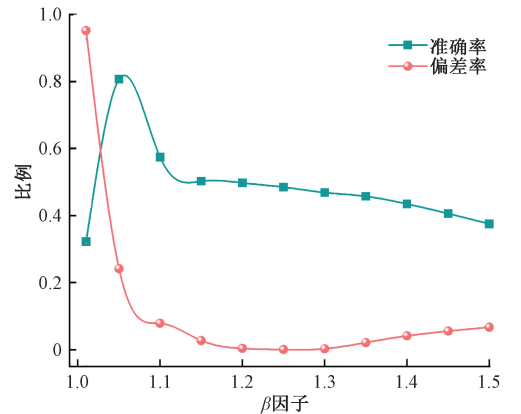
式中: S_c 表示正确识别的结冰面积; S_r 表示识别的结冰区域的面积。偏差率 D_r 的表达式为:

$$D_r = \frac{S_a - S_c}{S_a} \quad (5)$$

式中: S_a 表示实际的结冰区域面积。

确定合适的 β 值才能得到较好的结冰区域识别效果,根据准确率 A_r 和偏差率 D_r 两个评价指标对翼面结冰实验进行最优 β 值的标定。在翼面不同位置单区域结冰定位实验数据上计算得到的平均准确率与平均偏差率随 β 的变化曲线如图 6 所示。

由图 6 可以看出准确率随 β 的增大先增加后减小,而偏差率大体上呈现下降趋势,由于翼面结冰位置处于翼面前缘中心线处,中心线处连线密度较大,在较小的 β 取值处就有较高的准确率和较低的偏差率。综合图 6 的结果来看,认为 β 取值 1.05 时结冰区域定位效果较好。

图 6 准确率、偏差率随 β 的变化曲线Fig. 6 Curve of accuracy rate and deviation rate with β

在压电阵列传感系统的监测区域内,若发生结冰现象,则采集的振动信号相较于无冰时存在不同程度的差异。通过提取振动信号中的特征量 A_k 并结合 RAMIPD 算法即可得出监测区域内的结冰特征分布结果,对结冰特征分布结果进行归一化得到结冰概率分布。根据结冰概率分布结果,本文提出了一种基于灰度重心法的多结冰区域定位算法。

灰度重心法将结冰区域内每一像素处的灰度值作为该点的质量, 求取结冰区域中心的计算公式如式(3), $f(x, y)$ 是坐标为 (x, y) 像素点的灰度值; Ω 是连通区域的集合; $(\bar{x}, \bar{y})$ 是结冰区域的重心坐标。灰度重心法提取的是区域的能量中心, 一般结冰概率分布结果中概率值达到 0.8 以上即认为存在结冰情况, 因此设置图像阈值化的大小为 0.8。

$$\begin{cases} \bar{x} = \sum_{(x,y) \in \Omega} x \cdot f(x,y) / \sum_{(x,y) \in \Omega} f(x,y) \\ \bar{y} = \sum_{(x,y) \in \Omega} y \cdot f(x,y) / \sum_{(x,y) \in \Omega} f(x,y) \end{cases} \quad (6)$$

2 基于振动谱统计特征的定位方法

2.1 压电阵列振动实验平台设计与实现

根据多结冰区域定位方法的原理, 本文设计了压电阵列振动实验平台, 包含信号发生器、压电面阵传感系统、电荷信号采集器、上位机软件以及高精度恒温试验箱等设备, 平台设计如图 7 所示。根据平行线阵列布局搭建压电阵列传感系统, 选择直径 20 mm, 厚度 1 mm 的 PZT-5A 型号的压电陶瓷片作为激励和接收换能器, 利用信号发生器激励 PZT-5A 使其产生厚度方向的振动。

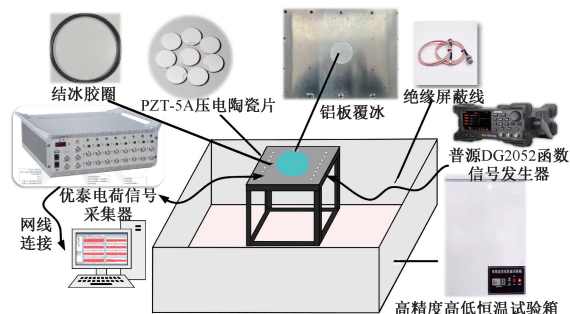


图7 压电阵列振动实验平台设计

Fig. 7 Piezoelectric array vibration test platform

搭建的压电阵列传感系统如图 8 所示, 铝板尺寸为 300 mm×400 mm×1 mm, 相邻 PZT-5A 的间距为 40 mm, 平行线间距为 200 mm。PZT-5A 压电陶瓷片直接通过导电银胶固化在铝板背面。由于连接线与实验平台间的相对运动会引起连接线的动力弯曲、拉伸、压缩等变形, 使 PZT-5A 的电容或电荷发生改变, 产生干扰和低频晃动影响^[19]。因此, 为了尽量避免绝缘线和实验平台间的相对运动, 将连接的屏蔽线穿过矩形支架孔, 并使用环氧胶将其与实验平台进行固定。在铝板表面结冰时, 先将结冰胶圈(内径 70 mm, 厚度 2 mm)预冷放置于需要结冰的区域, 当胶圈与铝板粘连后, 用滴管将纯净水滴在胶圈内, 滴至胶圈上表面即可获得 2 mm 厚的覆冰, 如图 7 所示。实验原理如图 9 所示, 信号发生器仅能单路激励对应标记的压电换能器,

优泰电荷采集器最大采样频率为 128 kHz, 能够同步采集最多 8 路来自压电换能器的电荷信号。

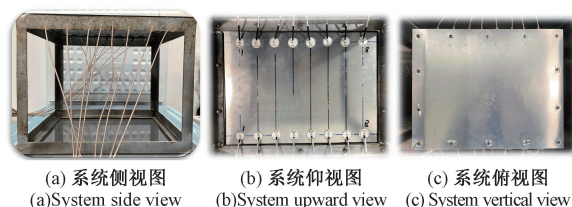


图8 铝板结冰区域定位系统实物图

Fig. 8 Aluminum plate icing area localization system

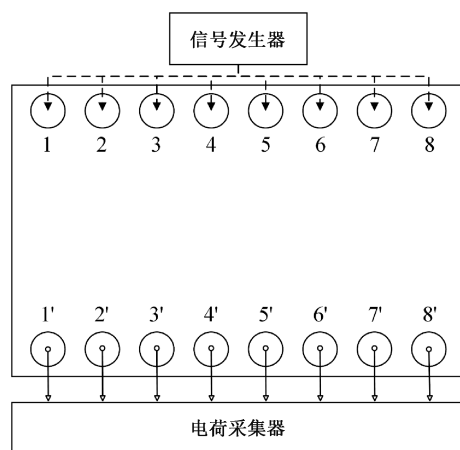


图9 实验平台工作原理示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the test platform

2.2 频谱统计特征选择

设定信号发生器激励电压为 10 V, 线性扫频范围为 0.5~5 kHz, 扫频时间为 60 s; 电荷采集器采样频率为 10.24 kHz, 采样时间为 62 s。对实验平台进行温度漂移测试, 测试铝板空载时 4-4' 换能器对分别在 15℃、0℃、-10℃和-25℃条件下的温漂结果。测试结果如图 10 所示, 从图 10 可以看出, 温度对结冰探测系统的测试结果影响较大, 在响应峰值附近的 2~2.3 kHz 频段, 铝板的谐振频率和谐振峰值均随着温度的降低而增大, 因此不能忽略温漂对实验结果的影响, 考虑到仪器设备的控温范围和实验效率, 且经多次实验验证得出频谱数据在温度 -15℃~-25℃ 范围内变化较小, 因此设定实验温度为 -15℃。

在恒温箱温度为 -15℃ 下, 铝板结冰实验如图 11 所示, 以铝板左下角为坐标原点建立直角坐标系, 两组实验结冰均为圆形冰且直径为 70 mm, 冰层厚度为 2 mm, 实验(a)和实验(b)的结冰中心坐标分别为 (100, 200)、(200, 150)。根据两组实验的结冰位置, 选择第 4 号接收换能器采集的振动信号进行频谱分析, 对比结果如图 12 所示。

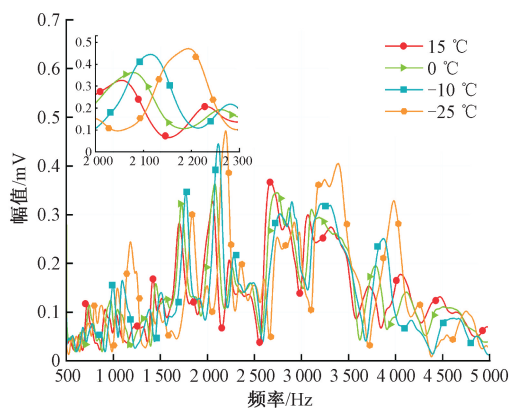


图 10 铝板结冰区域定位系统空载下温度漂移测试结果

Fig. 10 Temperature drift test results of aluminum plate icing area localization system with no load

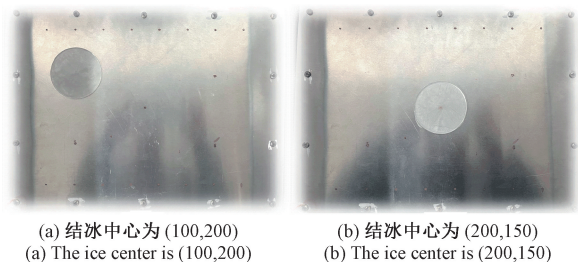


图 11 铝板结冰实验实物图

Fig. 11 Aluminum plate icing experiment image

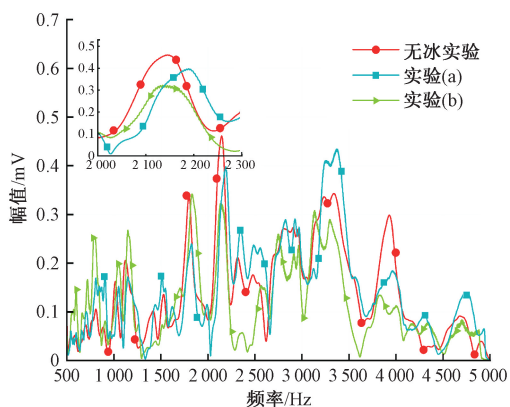


图 12 铝板结冰实验频谱分析

Fig. 12 Spectrum analysis of aluminum plate icing experiments

由图 12 可知,在 2~2.3 kHz 频段内铝板结冰相比于无冰状态,其谐振峰呈现衰减和后移的趋势。计算结冰实验(a)和实验(b)相比无冰时频谱曲线的相关系数分别为 0.81 和 0.74,全频带频谱幅值衰减率分别为 3.49% 和 18.2%。分析可知,由于实验(b)中结冰位置位于 4 号换能器对连线上,而实验(a)中结冰位置距 4 号换能器对连线较远,因此实验(b)频谱幅值的衰减程度要大

于实验(a),说明频谱信号在渡越冰层前后的信号差异较大即探测系统能够识别出换能器对连线所处位置是否结冰。

A_k 表征的信号差异程度影响着一对换能器监测范围内的特征值幅值,需要提取的特征量必须对结冰前后频谱的差异有较明显的区分度。由于频谱的相关系数和谐振频率对结冰前后的敏感度较低,而频谱幅值在渡越冰层前后的衰减程度显著。因此选择全频带频谱幅值衰减率表征 RAMIPD 成像算法中特征值 A_k , 其计算式为:

$$E = \int_{500}^{5000} f_x^2 dx \quad (7)$$

$$A_k = \frac{E_0 - E}{E_0} \quad (8)$$

式中: f_x 表示在 x 频率点处的频谱幅值。

2.3 基于小波包分解的敏感频带选择

基于全频带的频谱特征提取并未忽略谐振峰后移所造成的差异,并且非谐振峰所在的频段对结冰信息并不敏感。因此进行简单的频谱幅值相减所提取的特征对结冰敏感度的影响较大。故利用小波包分解 (wavelet packet decomposition, WPD) 分析全频带的能量特征分布,选取谐振峰所在的敏感频带进行结冰定位方法的研究。

以空载铝板上第 4 号换能器对所采集的压电微振动数据进行 WPD 特征提取,图 13 是利用三层 WPD 的小波包分解树示意图。其中(0,0)为第 4 号换能器采集的振动信号,坐标中第 1 位数字表示分解的层数,第 2 位数字表示该层的节点编号。利用 WPD 进行能量特征提取的步骤如下^[20-21]:

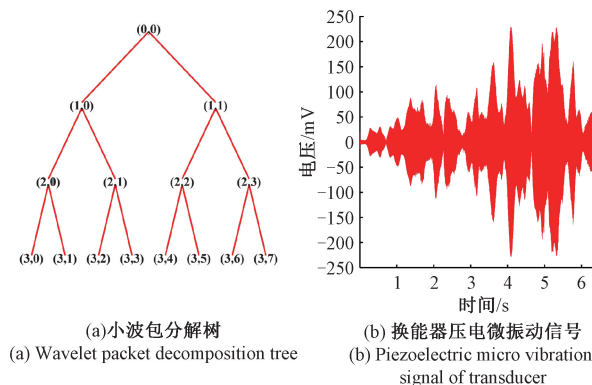


图 13 小波包分解树示意图

Fig. 13 Diagram of wavelet packet decomposition tree

首先,对采集的振动信号进行三层 WPD 分解,分解后得到的三层小波包树如图 13 所示。

其次,对第三层小波包节点进行信号重构,重构的信号中包含着从低频段到高频段的频域信息。

然后,计算第三层各个节点的频谱能量特征值。设 $S_{(3,i)} (i = 0, 1, \dots, 7)$ 为第三层各小波包节点的重构信号, 求出各重构信号的单边幅度频谱 $S_{F(3,i)} (i = 0, 1, \dots, 7)$, 再分别求各单边频谱的向量二范数即:

$$E_{(3,i)} = \| S_{F(3,i)} \|_2 = \sqrt{\sum_{j=1}^n |S_{F(3,i)}(j)|^2} \quad i = 0, 1, \dots, 7 \quad (9)$$

最后,求出振动信号第三层各个节点的频谱能量特征值。

按照上述步骤对第4号接收换能器采集的微振动信号进行三层 WPD, 分解后各小波包节点的重构频谱如图14所示, 图14中从上至下分别是从低频段到高频段的频谱信息, 横轴为对应的频率范围, 纵轴为频谱幅值, 单位为 V。经过计算得到各频段的能量百分比分布如图15所示。

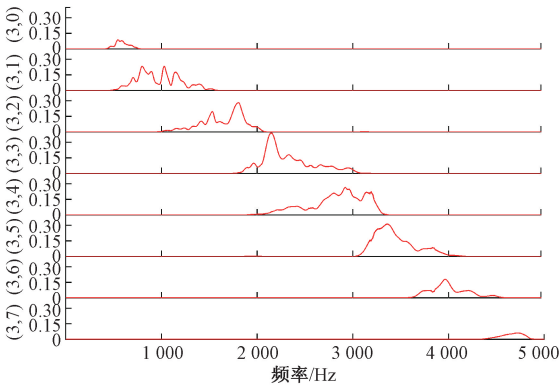


图14 各小波包节点重构后的频谱信号

Fig. 14 Spectrum signal reconstructed by each wavelet packet nodes

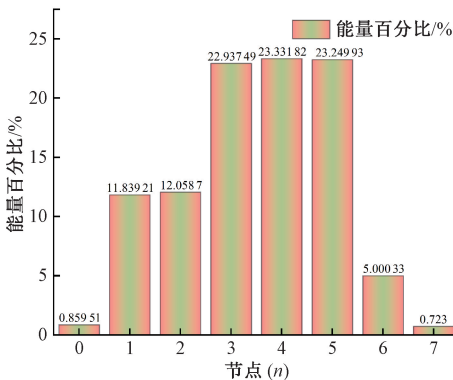


图15 各小波包节点能量百分比

Fig. 15 Energy percentage of each wavelet packet nodes

根据结冰实验(b)测试第4号换能器对结冰时各频段的能量百分比分布, 铝板结冰前后多组数据平均能量占比对比结果如图16所示, 能够看出结冰前后能量主要

集中在第3~5频段并且存在较大的差异。因此可以将第3~5频段作为4号换能器对的敏感频段。

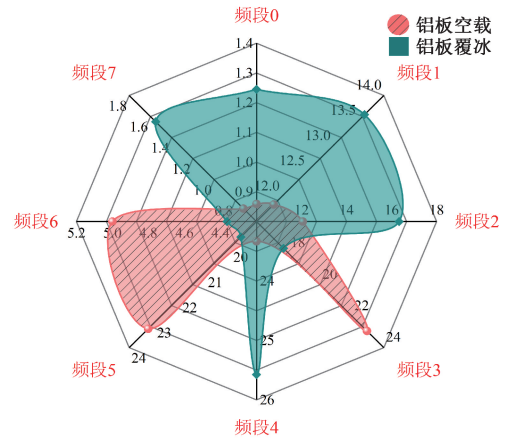


图16 结冰前后各节点平均能量占比对比

Fig. 16 Comparison of average energy ratio of each node before and after icing

基于上述实验结果, 由于铝板结冰前后能量主要集中在谐振峰所在的频段, 因此选取能量占比前三的频段作为结冰定位实验的敏感频段。根据平行线阵列布局可以获取 $8 \times 8 = 64$ 组频谱信息, 通过计算得到64组频谱的敏感频带并构建出信息谱阵, 按照式(4)和(5)计算出基于 WPD 敏感频带选取的结冰成像特征值 A_k 。

3 结冰区域定位实验

3.1 单结冰区域定位实验

分别在铝板的9个位置进行了结冰实验, 结冰直径均为70 mm, 冰层厚度均为2 mm, 基于全频带和敏感频带的结冰定位结果分别如图17和18所示。

由图17和18可知, 结冰概率分布呈现横窄纵宽的成像效果。从 RAMIPD 算法和平行线布局角度分析可知, 平行线布局的连线密度呈横密纵疏分布。根据式(2)可知, 因横向的连线密度较大, 故计算结冰特征时的修正次数就越多, 而纵向上连线密度较小修正效果较差。计算得到基于全频带特征提取的单结冰区域定位平均误差为27.4 mm、标准差为15.5 mm。基于敏感频带特征提取的单结冰区域定位平均误差为17.8 mm、标准差为8.4 mm。

基于全频带和基于 WPD 敏感频带特征提取的结冰定位误差对比结果如图19所示, 图19中红色阴影误差带范围小于蓝绿色阴影误差带。相比全频带特征提取方法, 基于敏感频带特征提取的平均定位误差减小34.95%, 定位误差波动程度降低45.67%。实验验证了基于 WPD 敏感频带特征提取方法对于铝板单结冰区域定位的精度有较大提高。

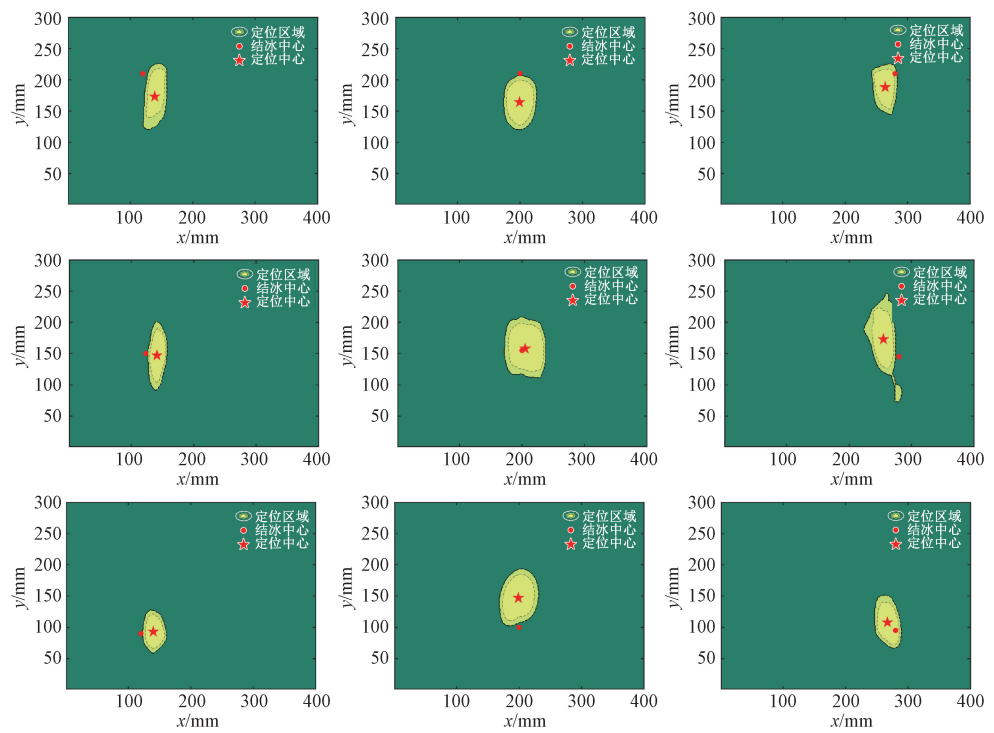


图 17 基于全频带的铝板单结冰区域定位结果

Fig. 17 Location results of single icing area of aluminum plate based on full band

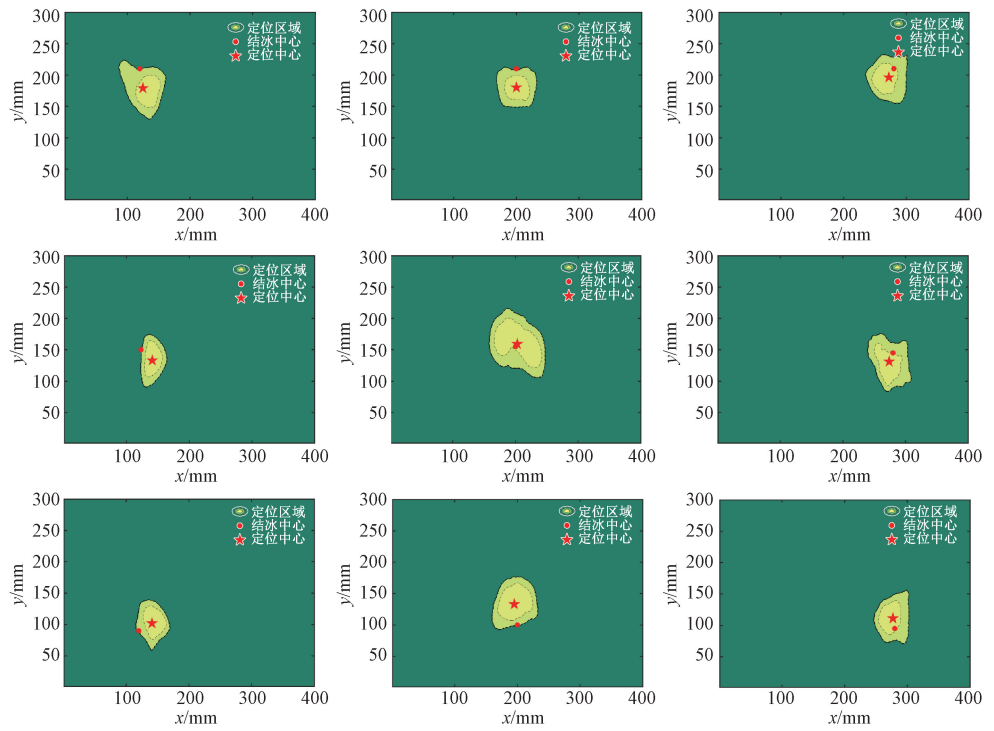


图 18 基于敏感频带选择的铝板单结冰区域定位结果

Fig. 18 Single icing area localization results on the aluminum plate based on sensitive frequency band selection

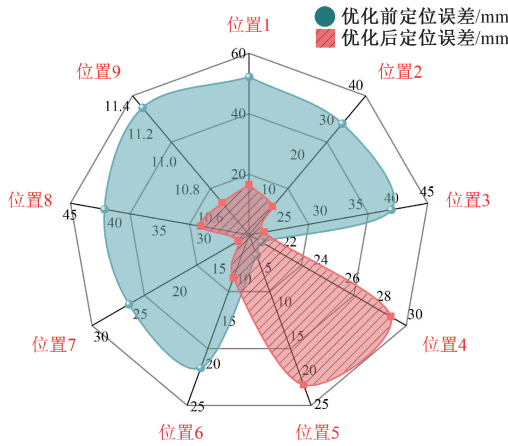


图 19 优化特征前后结冰定位误差结果对比
Fig. 19 Comparison of icing area localization errors before and after optimization of features

3.2 多结冰区域定位实验

进行两点结冰定位实验,基于全频带和敏感频带的两结冰区域定位结果分别如图 20 和 21 所示,其中横向及对角线方向的结冰定位结果较好,纵向结果较差。计算基于全频带特征提取的两结冰区域定位平均误差为 29.0 mm、标准差为 26.1 mm。基于敏感频带特征提取的两结冰区域定位平均误差为 27.2 mm、标准差为 28.0 mm。

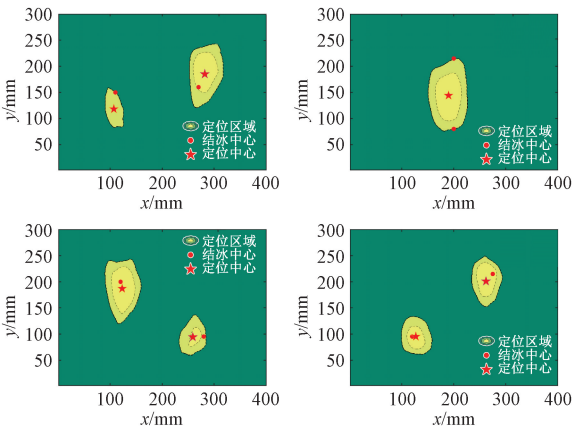


图 20 基于全频带的铝板两结冰区域定位结果
Fig. 20 Two icing area localization results of aluminum plate based on full frequency band

综合单结冰区域和多结冰区域定位实验结果可知,基于谱阵信息的 RAMIPD 成像算法能够实现多结冰区域定位,其中图 18 和 21 中,位置相近的结冰区域的定位结果在误差范围内,说明系统的可重复性较好。但由于平行线布局在连线密度上存在横密纵疏的特性导致计算的结冰特征分布结果呈现横窄纵宽的不均匀

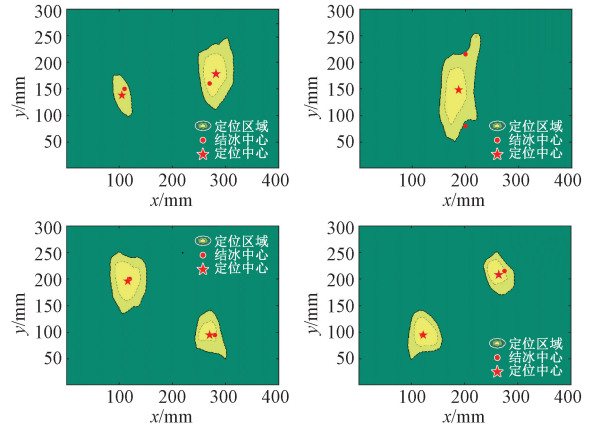


图 21 基于敏感频带选择的铝板两结冰区域定位结果
Fig. 21 Two icing area localization results on the aluminum plate based on sensitive frequency band selection

分布,因此造成较大的定位误差。观察发现,在铝板中心线附近的结冰定位误差均较小,对比机翼结冰部位来看,机翼前缘即中心线附近结冰概率较大,因此平行线布局的结冰探测系统能够很好地满足机翼结冰定位探测的需求。

3.3 翼面结冰定位实验

将压电阵列传感系统布局在翼型上进行实验验证,搭建的翼面结冰传感系统如图 22 所示。翼型表面尺寸为 590 mm×570 mm×1 mm,相邻 PZT-5A 的间距为 70 mm,平行线间距为 200 mm。

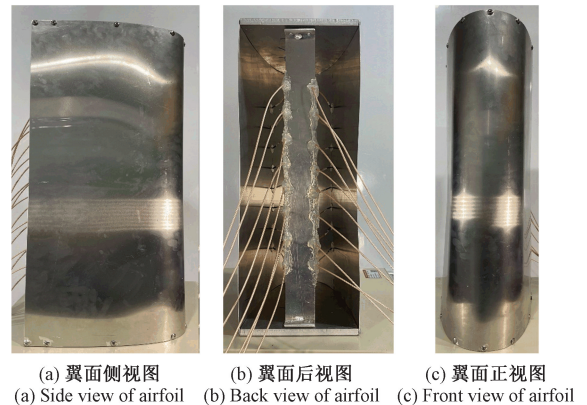


图 22 翼面结冰区域定位系统实物图
Fig. 22 Photos of icing area localization system on the airfoil

在翼面上分别进行单区域和两区域结冰定位实验,以翼面左下角为坐标原点建立坐标系。圆形冰的结冰直径为 70 mm,结冰厚度为 2 mm。结冰位置均位于翼面中心线附近,如图 23 所示。结冰定位结果如图 24 所示,计算得到基于全频带特征提取的翼面结冰横向定位平均误差为 22.6 mm、标准差为 20.3 mm。基于敏感频带特征

提取的平均定位误差为 10.2 mm、标准差为 10.9 mm。优化后的横向定位平均误差减小了 54.87%，横向定位误差的波动程度降低了 46.63%。因此相比于全频带特征提取方法，基于 WPD 敏感频带选择的特征提取方法极大提高了翼面横向结冰定位精度。

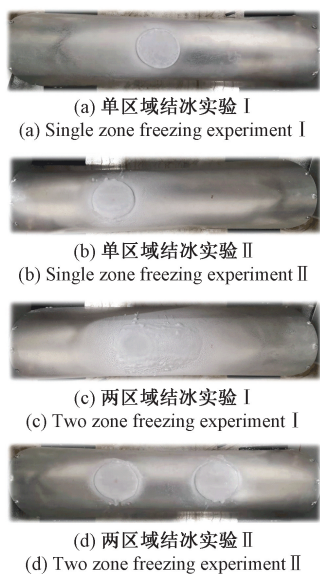


图 23 翼面结冰实验实物图

Fig. 23 The photos of airfoil icing experiments

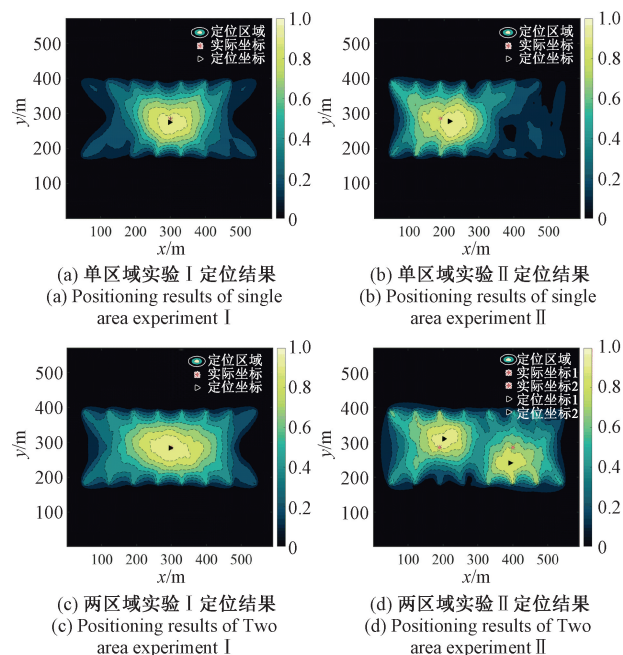


图 24 基于敏感频带选择的翼面结冰区域定位结果

Fig. 24 Icing area localization results on the airfoil based on sensitive frequency band selection

4 结 论

针对传统结冰传感器无法实现翼面大范围结冰区域探测的问题,本文提出了一种基于灰度重心法的多区域结冰定位方法,实现了铝板和翼面的多结冰区域定位。搭建了基于平行线布局的压电阵列振动实验平台,并根据采集的振动谱提出了一种基于 WPD 的敏感频带选择的特征提取方法。相比于全频带特征提取方法,基于敏感频带特征提取方法得到的铝板单结冰区域定位精度提高了 34.59%,翼面结冰的横向定位精度提高了 54.87%,具备较好的定位效果,后续将基于结冰定位结果对冰厚测量方法进行研究,实现翼面结冰三维成像。

参考文献

- [1] CEBECI T, KAFYEKE F. Aircraft icing [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2003, 35(1): 11-21.
- [2] HEINRICH A, ROSS R, ZUMWALT G, et al. Aircraft icing handbook. Volume 2 [M]. Civil Aviation Authority, 2000.
- [3] FAA. Aircraft ice protection (AC 25-73A) [S]. FAA, 2016.
- [4] 李焱鑫, 张辰, 刘洪, 等. 大粒径过冷水溢流结冰的翼型气动影响分析[J]. 空气动力学学报, 2014, 32(3): 376-382.
- LI Y X, ZHANG CH, LIU H, et al. Aerodynamic analysis of airfoil with large particle size supercooled water overflow icing[J]. Journal of Aerodynamics, 2014, 32(3): 376-382.
- [5] 桂业伟, 周志宏, 李颖晖, 等. 关于飞机结冰的多重安全边界问题[J]. 航空学报, 2017, 38(2): 6-17.
- GUI Y W, ZHOU ZH H, LI Y H, et al. Multiple safety boundaries protection on aircraft icing [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(2): 6-17.
- [6] 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 study of aircraft icing detection sensor by resonant[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(2): 267-273.
- [7] 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.

- [8] 陈若冰, 何舟东, 白茹. 结冰传感器研究现状与应用分析[C]. 第十八届中国航空测控技术年会论文集, 2021: 31-35.
- CHEN R B, HE ZH D, BAI R. Research status and application analysis of icing sensor[C]. Proceedings of the 18th China Aviation Tt&C Annual Conference, 2021: 31-35.
- [9] 张子恒, 姜予涵, 彭畅喧. 道路积水结冰检测技术的概述及展望[J]. 山西建筑, 2021, 47(3): 103-105.
- ZHANG Z H, JIANG Y H, PENG CH X. Overview and prospect of road water icing detection technology[J]. Shanxi Architecture, 2021, 47(3): 103-105.
- [10] 金城, 熊艳梅, 柳楷, 等. 压电平膜结冰传感器工程样机的结冰风洞试验研究[C]. 第十八届中国航空测控技术年会论文集, 2021: 480-483.
- JING CH, XIONG Y M, LIU K, et al. Icing wind tunnel test research on the engineering prototype of voltage level film icing sensor[C]. Proceedings of the 18th China Aviation Tt&C Annual Conference, 2021: 480-483.
- [11] 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. Research on temperature compensation method of complex impedance icing detection technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(6): 88-94.
- [12] 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.
- [13] 陈前焱. 基于压电阵列的结冰探测方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- CHEN Q Y. Research on ice detection method based on piezoelectric array[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.
- [14] ZHAO X, ROYER L, OWENS S E, et al. Ultrasonic lamb wave tomography in structural health monitoring[J]. Smart Materials & Structures, 2011, 20(10): 105002.
- [15] MASURKAR F A, YELVE N P. Optimizing location of damage within an enclosed area defined by an algorithm based on the lamb wave response data[J]. Applied Acoustics, 2017, 120(5): 98-110.
- [16] LU G, LI Y, ZHOU M, et al. Detecting damage size and shape in a plate structure using PZT transducer array[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2018, 31(5): 04018075.
- [17] 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 CH L, TAO M J, et al. Experimental study on the application of ultrasonic guided wave technology in aircraft icing detection[J]. Piezoelectric & Acoustooptic, 2018, 40(2): 269-275.
- [18] 于全朋, 周世圆, 徐春广, 等. 飞机关键部件结冰的超声导波探测[J]. 无损检测, 2021, 43(8): 67-71.
- YU Q P, ZHOU SH Y, XU CH G, et al. Ultrasonic guided wave detection of icing on key components of aircraft[J]. Nondestructive Testing, 2021, 43(8): 67-71.
- [19] 曹树谦, 张文德. 振动结构模态分析理论、实验与应用[M]. 天津: 天津大学出版社. 2001.
- CAO SH Q, ZHANG W D. Theory, experiment and application of modal analysis of vibrating structures[M]. TianJin: Tianjin University Press. 2001.
- [20] 柳小勤, 汤林江, 侯凯泽, 等. 基于声发射的滚动轴承损伤定位方法研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(15): 176-182.
- LIU X Q, TANG L J, HOU K Z, et al. Fault localization for rolling bearing based on AE[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(15): 176-182.
- [21] 张磊, 郑侃, 孙连军, 等. 基于小波包敏感频带选择的复材铣边颤振监测研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(3): 140-148.
- ZHNAG L, LIU K, SUN L J, et al. Research on edge chatter monitoring of composite milling based on selection of sensitive frequency band of wavelet packet[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(3): 140-148.

作者简介



E-mail: gejf@hust.edu.cn

葛俊锋, 2003 年于华中科技大学获得学士学位, 2009 年于清华大学获得博士学位, 现为华中科技大学副教授, 主要研究方向为结冰探测与防除冰技术、智能检测技术。

Ge Junfeng received his B.Sc. degree from Huazhong University of Science and Technology in 2003 and received his Ph.D. degree from Tsinghua University in 2009. He is currently a associate professor at Huazhong University of Science and

Technology. His main research interests include ice detection and deicing technology, intelligent detection technology.



白鸿飞, 2020 年于中国海洋大学获得学士学位, 现为华中科技大学硕士研究生, 主要研究方向为结冰探测与结冰防护技术。

E-mail: baihongfei2021@163.com

Bai Hongfei received his B. Sc. degree from Ocean University of China in 2020. He is currently a master student at Huazhong University of Science and Technology. His main research interests include ice detection and ice protection technology.



毛俊伟, 2020 年于哈尔滨工程大学获得学士学位, 2022 年于华中科技大学获得硕士学位, 主要研究方向为结冰探测与结冰防护技术, 现为华为技术有限公司高级工程师。

E-mail: maojunwei@hrbeu.edu.cn

Mao Junwei received his B. Sc. degree from Harbin Engineering University in 2020, and received his M. Sc. degree from Huazhong University of Science and Technology in 2022. His main research interests include ice detection and ice protection technology. He is currently a senior engineer at Huawei Technologies Co., LTD.



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 post-doctor at Huazhong University of Science and Technology. His main research interests include ice detection and ice protection technology.



叶林, 1982 年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.