

DOI:10.16356/j.1005-2615.2022.02.012

谐振式飞机结冰探测传感器仿真及实验研究

王岩¹, 王渊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. 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京 210016)

摘要:为实现飞机表面积冰厚度非接触式高精度测量,建立压电传感器、铝板及冰层组成的有限元仿真模型,通过机电阻抗分析法研究了飞机结冰厚度对系统谐振频率及阻抗的影响规律,获得压电传感器设计参数;搭建地面冷环境实验平台,采用阻抗分析仪测量不同结冰温度和积冰厚度作用下的系统谐振频率。结果表明:基于压电传感器的谐振探测法能够有效测量基体表面 0.2~5 mm 厚度的冰层,可有效测量不同温度下积冰厚度;系统谐振频率与结冰温度及基体表面结冰厚度成反比关系,而系统电阻抗与结冰厚度成正比关系。

关键词:压电传感器;阻抗分析;飞机结冰;谐振频率;结冰探测

中图分类号:V248.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2022)02-0267-07

Simulation and Experimental Study of Aircraft Icing Detection Sensor by Resonant

WANG Yan¹, WANG Yuan¹, ZHU Chengxiang¹, ZHU Chuling^{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: In order to study the non-contact high-precision measurement of ice thickness on aircraft surface, the three-dimensional finite element simulation model composed of piezoelectric sensor, aluminum plate and ice layer is established. The influence of ice thickness on the resonant frequency and impedance of the system is studied to obtain the design parameters of piezoelectric sensor. In this paper, the ground cold environment experimental platform is built, and the impedance analyzer is used to measure the resonant frequency of piezoelectric sensor under different icing temperature and icing thickness. It is found that the icing temperature is inversely proportional to the resonant frequency of the system. The resonant frequency of the system is inversely proportional to the icing temperature and the icing thickness of the substrate surface, while the electrical impedance of the system is directly proportional to the icing thickness. The experimental results show that the resonant piezoelectric sensor can effectively measure the 0.2—5 mm thick ice layer on the substrate surface.

Key words: piezoelectric sensor; impedance analysis; aircraft icing; resonant frequency; ice detection

飞机在地面环境遇到冻雨或冰雪等极端天气会在表面形成积冰^[1],在起飞及降落过程中穿过含有过冷水滴的云层时也极易发生结冰现象^[2]。飞

机发动机进气口积冰会减少进气量,降低发动机工作效率,造成航程缩短,严重的会引起发动机故障^[3-4]。机翼前缘在不同结冰气象条件下会形成楔

基金项目:国家自然科学基金(11832012)。

收稿日期:2021-08-13;**修订日期:**2021-12-10

通信作者:朱程香,女,副教授,E-mail:cxzhu@nuaa.edu.cn。

引用格式: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 Yan, WANG Yuan, ZHU Chengxiang, 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.

形、羊角等形状冰层,不规则的冰形状会进一步影响飞机气动特性^[5-6],降低升阻比,影响飞机操纵性能,严重的还会导致飞机发生失速,造成机毁人亡的事故^[7-8]。国外结冰风洞试验研究表明,当机翼模型结冰时间达到5 min时,升阻比会急剧下降^[9]。

现代飞机普遍配备了电热或热气防/除冰系统,能够有效地降低飞机结冰造成的安全隐患^[10]。然而现有防/除冰系统需要消耗大量机载能源,高效的结冰探测传感器能够进行结冰预警及冰层厚度测量,进而保障飞行安全的同时降低防/除冰系统能耗^[11]。结冰探测技术起源于20世纪60年代,历经60余年的发展,国内外已经开发了多种结冰探测系统,这些系统按照测量方法分为光学法、热学法、电学法、波导法和谐振法等^[12]。

光学探测通过具有收发功能的光纤传感器阵列来测量冰的厚度和类型,该方法由于光散射只可测量厚度小于2 mm冰层,且传感器端面直接安装在机体外表面会影响气动特性^[13]。热学探测采用多通道热电偶阵列,通过测量冰/水物态转变产生的温度变化探测结冰状况,该方法无法实时测量积冰厚度^[14]。电学探测通过测量两个带电圆柱体间的电容和电阻随冰体积的变化而变化探测结冰厚度,该方法只能探测到传感器附近小范围结冰状况,且传感器尺寸大,外置安装会影响气动特性^[15-16]。波导法利用超声换能器发射横向或纵向超声波,通过测量冰层中声波特征参数变化探测结冰状况,该方法采用的超声换能器结构较复杂,无法在有薄水膜状态下精确测量冰层厚度^[17-21]。谐振法采用压电传感器测量结冰后系统振动频率来探测结冰状况,该方法用于结冰探测最早可追溯到1998年,Roy等采用压电陶瓷与基体表面覆冰直接接触,研究压电陶瓷谐振频率随覆冰质量、温度的变化规律,通过阻抗分析仪测试的谐振频率、阻抗反映结冰状况,能够有效探测到0.06~0.45 mm冰层或水层^[22];国内华中科技大学叶林教授团队在谐振平膜探测法的基础上采用微型化测温元件进行温度补偿,进一步提高传感器实用性^[23];张庆辉等通过数值研究发现纵向振动换能器谐振频率随换能器尺寸参数增大而减小^[24];白天等采用压电晶片悬臂梁结构进行结冰厚度探测研究,分析有水附着与结冰两种状态下的谐振频率变化,同时使用动态信号分析仪进行实验测量,通过误差对比检验计算结果的正确性,并找出谐振频率的变化与压电梁局部质量和刚度等结构特征改变之间的联系,发现随着结冰的发生以及厚度的增加,相应的局部质量和刚度的改变对谐振频率的综合影响多变^[25]。道路结冰探测研究领域同样使用谐振法,通过人工神经网络算

法优化测试数据处理,并进行温度补偿^[26-27]。

国内外飞机结冰探测研究表明,谐振式结冰探测传感器与其他类型传感器相比具有结构简单、无需直接接触冰层的优点,但现有传感器往往需将探头伸出机体表面,影响气动性能。本文建立的结冰探测模型将压电传感器安装在平板内表面,首先建立压电陶瓷、蒙皮铝板和冰层组成固有频率系统的模型,通过COMSOL[®]仿真计算适用该系统的压电陶瓷本征频率和安装位置,并根据仿真设计结果进行实验验证。实验采用阻抗分析仪测量系统谐振频率及阻抗随冰层厚度的影响规律,并通过控制环境温度分析谐振频率和阻抗随温度的影响规律。

1 探测原理及仿真计算

1.1 冰层厚度探测原理

压电陶瓷具有正/逆压电效应,利用压电晶元逆压电效应,在施加电压后,产生机械应力导致压电晶元变形。当交变电信号施加在压电晶元上时,产生交变机械应力从而使压电晶元振动。当加载电信号频率与压电晶元固有频率一致时,压电晶元振幅达到最大,即为谐振,并且由正压电效应产生的电信号也将达到理论最大值。

金属结构物理状态变化引起的机械阻抗变化是很难直接测量的,而压电陶瓷晶元的电阻抗可以通过精密阻抗分析仪直接测量。本文采用高强度粘合剂将压电晶元粘接在铝制结构表面,压电晶元和金属结构的机械相互作用以及压电晶元的机电耦合作用,将整体结构的机械阻抗变化转变为电阻抗变化。当电阻抗最小时,结构产生共振,此频率值为谐振频率;电阻抗最大时,结构发生反共振。因此结构的电阻抗及谐振频率都可通过阻抗分析仪阻抗-频率参数曲线进行测量。

由铝板、压电陶瓷晶元和冰层组成的结构系统在外形一定的情况下,其谐振频率与质量、刚度之间存在着如下关系

$$f_0 = C \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

式中: f_0 为固体结构谐振频率; k 为结构刚度系数; m 为质量; C 为常数。

冰层附在金属铝板表面,与压电传感器非直接接触探测结冰状况时,由于压电传感器尺寸相对铝板较小,因此整体结构刚度、质量以铝板为基准。当铝板表面附着不同厚度冰层或不同温度下测量时,结构质量和刚度都会发生变化,因此系统谐振频率也会随之改变。

本文采用压电陶瓷 PZT-5A 作为传感测试材料,压电传感器与铝板组成结构的初始谐振频率为参照值。当压电传感器与铝板组成的结构表面附着冰层时,由于冰层对结构整体刚度和质量的影响,其谐振频率产生变化,因此可以通过结构谐振频率的变化判断物体表面是否结冰以及结冰厚度。然后结合温度对谐振频率的影响规律,进行低温温度修正,使冰层厚度测量值更加准确。

1.2 仿真设计

本文采用频率分析物理场进行仿真计算。模型结构示意图如图 1 所示。压电传感器与冰层非接触布置,冰层冻结在铝板上表面,压电传感器使用 epoxy-301 耐低温环氧胶水和铝板粘接,建模时不考虑胶层厚度。

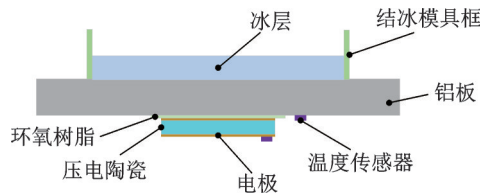


图 1 谐振式结冰探测模型

Fig.1 Model of resonant icing detection

模型选用 7075 铝合金材料,边长 54 mm、厚度 2 mm;压电传感器材料选用 PZT-5A(其信号收/发性能相对于 PZT-4、PZT-8 较好,具有较高的机电耦合系数、介电常数等),边长 10 mm,厚度 1 mm,表面镀银电极。材料参数如表 1 所示。

表 1 压电陶瓷材料参数

Table 1 Material parameters of piezoelectric ceramic

材料	介电常数		机电耦合系数	
	$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	$\epsilon_{33}^S/\epsilon_0$	k_t	k_p
PZT-4	1 300	635	0.51	0.58
PZT-5A	1 700	830	0.49	0.60
PZT-8	1 000	580	0.48	0.51

仿真计算中 PZT-5A 和铝板材料属性如表 2 所示。通过特征频率有限元仿真分析整体结构的谐振频率和结构模态。

仿真结构三维模型如图 2 所示。首先计算无冰层附着情况下结构谐振频率及位移量,由于压电材料 PZT-5A 振动模式为厚度方向的纵向振动,因

表 2 PZT-5A、铝及冰参数

Table 2 Parameters of PZT-5A, aluminum and ice

材料	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	声速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	杨氏模量/ Pa	泊松比
PZT5A	7 750	3 500	7.65E10	0.33
铝	2 690	6 320	7.2E10	0.3
冰	900	3 980	/	/

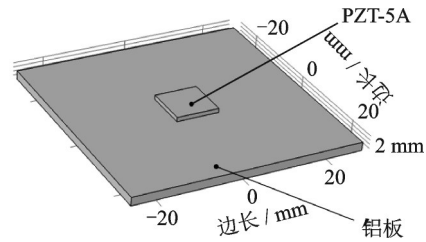


图 2 无附着物仿真结构三维模型

Fig.2 3-D structure model without ice/water

此当结构在谐振频率下工作时,结构发生共振,此时振幅达到最大,即纵向位移量最大。

无冰层附着结构纵向振型云图如图 3 所示,位移量-频率曲线如图 4 所示。由结构振动位移量随频率变化曲线图可知,在谐振频率 212.31 kHz 附近的纵向振动位移最大,故压电材料 PZT-5A 与铝板组成的结构谐振频率为 212.31 kHz。本文采用系统谐振频率作为冰层厚度表征参数,研究环境温度、冰层厚度对系统谐振频率影响规律。

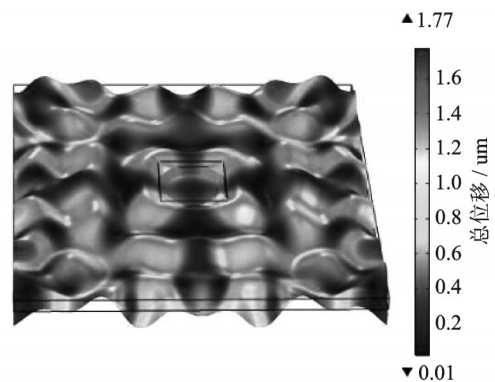


图 3 频率 212.31 kHz 时的结构振型云图

Fig.3 Structure vibration mode nephogram at 212.31 kHz

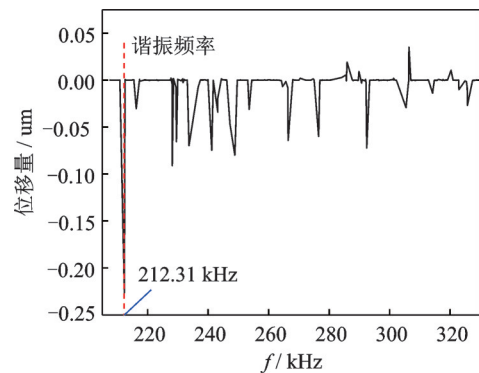


图 4 频率-位移图

Fig.4 Frequency-displacement diagram

在铝板模型表面加一定厚度的冰层,分析覆冰厚度对结构谐振频率的影响。实验时通过模具控制冰层厚度,铝板表面边缘区域无附着物,因此仿真模型表面冰层/水层覆盖范围小于铝板面积,如图 5 所示。

取附着冰层厚度范围 0~5 mm 对结构谐振频

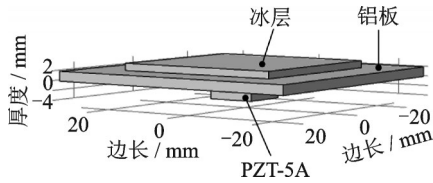


图5 覆冰结构模型

Fig.5 Model of the structure with ice

率及位移量进行分析。改变冰层厚度进行系统仿真计算,获得结构谐振频率、位移量随冰层厚度变化规律,如图6所示。

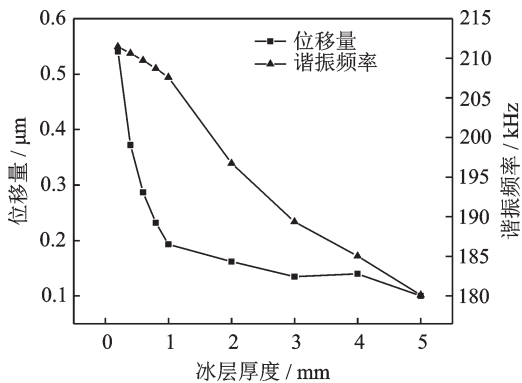


图6 谐振频率及位移量随冰层厚度变化规律

Fig.6 Variation law of resonance frequency and displacement with thickness

仿真结果表明,结构谐振频率以及位移量都随冰层厚度增加而降低。谐振频率随冰层厚度变化关系近似成正比,点位移随厚度变化先剧烈后平缓。其原因主要是由于冰层作为具有气孔的疏密性材料,附在结构表面具有阻尼作用,减缓振动,致使振动幅度严重下降,随着冰层厚度增加,阻尼效果降低,因此振动幅度即点位移的衰减也减小。附着的冰层使整体结构刚度减小、质量增加,因此由式(1)可知,谐振频率随冰层厚度增加而降低。

2 地面冷环境结冰探测实验

2.1 测量仪器及测量方法

谐振式结冰探测实验平台由高精度低温箱、喷雾模块、阻抗分析仪、温度采集模块、压电传感器和铝板及冰层组成。喷雾模块采用压电喷雾器进行水滴发生,喷雾器微孔个数600,微孔尺寸 $40\ \mu\text{m}$,喷雾直径范围10 mm,喷雾器距离平板20 cm。为保证结冰均匀性,喷雾过程中通过三轴滑台进行水平方向移动。实验系统如图7所示。

采用精密阻抗分析仪进行信号发生与采集,该设备通过扫频电压激励与压电晶元相匹配的谐振电信号,从而使压电晶元发生共振并反馈电信号,可测量压电晶元的电阻抗 Z 、共振频率 f_r 、反共振频率 f_a 和导纳 Y 等。典型的阻抗-频率曲线如图8所

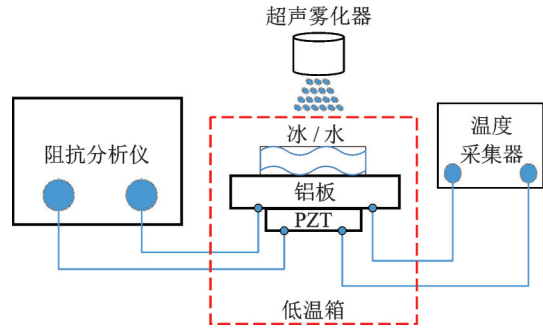


图7 谐振式结冰探测实验平台

Fig.7 Experimental platform of resonant icing detection

示,当阻抗值达到最小时,结构振幅最大,发生共振,该频率称为共振频率 f_r ;当阻抗值最大时,结构振幅最小,该频率称为反共振频率 f_a 。

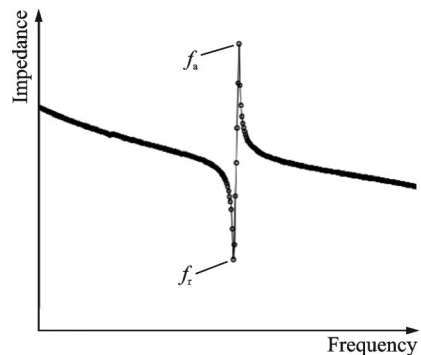


图8 典型电阻抗-频率曲线

Fig.8 Curve of electrical impedance-frequency

在进行冰层厚度探测时必须考虑低温对系统谐振频率的影响,采用多路高精温度采集设备对环境温度及系统温度进行监测。实验使用标定后的PT100-A铂电阻,测温误差为 $\pm 0.1\ ^\circ\text{C}$ 。实验测量系统及结冰模型如图9、10所示。

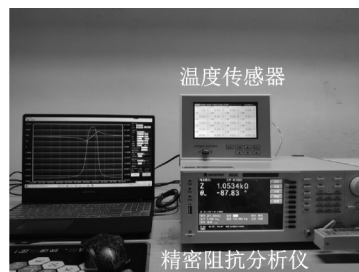


图9 阻抗分析设备连接图

Fig.9 Diagram of impedance analysis equipment

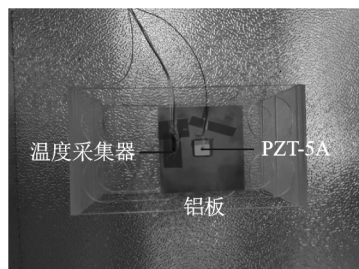


图10 实验样件结构

Fig.10 Structure of experimental sample

2.2 谐振式结冰探测实验

首先测试压电传感器 PZT-5A 谐振频率特性,阻抗分析仪设定激励电压为 1 V,电阻为 25 Ω,扫频范围为 160~230 kHz,测量阻抗-频率曲线如图 11 所示。在整个频率段范围内有多个共振频率,电阻抗最小处对应的频率下振动幅度最大,为谐振频率。实验时测量谐振频率随冰层及温度的变化,为保证实验环境一致,阻抗分析仪设定激励电压和电阻等参数不变。当阻抗分析仪测得结构电阻抗 Z 最低时,等价于结构阻尼最小,产生共振。

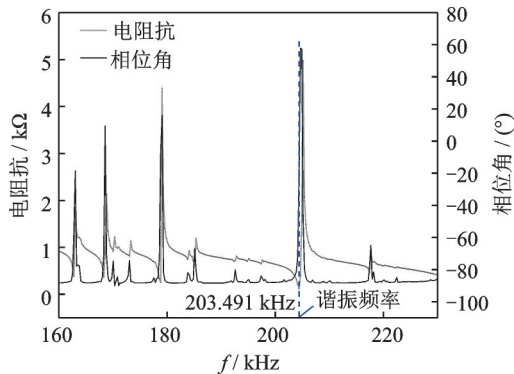


图 11 结构谐振频率扫频图

Fig.11 Diagram of structure resonance frequency

测得在 15 °C 环境温度下压电传感器与铝板粘接在一起后,其结构谐振频率 f_r 为 203.491 kHz,仿真计算结果为 212.31 kHz,误差分析如下:

(1)实验采用的压电传感器 PZT-5A 由于储存时间较长,已经产生老化,压电性能有所下降。

(2)仿真和实验所采用的 PZT-5A 材料属性不完全相同,如实验通过压电测试仪得到的压电常数 d_{33} 为 $335 \times 10^{-12} \text{ C/N}$,而仿真中压电常数为 $374 \times 10^{-12} \text{ C/N}$ 。

(3)仿真时未考虑电极和环氧树脂胶对整个结构的影响,因此仿真得到的谐振频率相对实验测试数据偏大。

由于实际试验时,没有激光测振仪等测量振动位移量的设备,因此后续未对位移量随冰层厚度的变化规律进行实验研究。

2.2.1 温度对无冰层结构谐振频率的影响

结冰温度变化会影响压电传感器及铝板刚度,进而改变结构谐振频率及阻抗值。通过实验研究低温对系统测量参数影响规律,可有效提高结冰探测精度。实验温度 $-35 \sim 0 \text{ } ^\circ\text{C}$,每降低 $5 \text{ } ^\circ\text{C}$ 采集一组数据。实验中固体结构有多个共振频率,最大谐振频率下结构振动幅度最大,振动特性最明显,因此只提取谐振频率作为结果。

如图 12 所示,实验结果表明结构表面无冰层

附着时,谐振频率和最小电阻抗值都随温度升高而降低。结构谐振频率与温度近似成正比关系,其对应变化呈一阶线性变化,根据数据拟合谐振频率 (f_r)-温度 (T) 关系公式为

$$f_r = -0.05565T + 204.73 \quad (2)$$

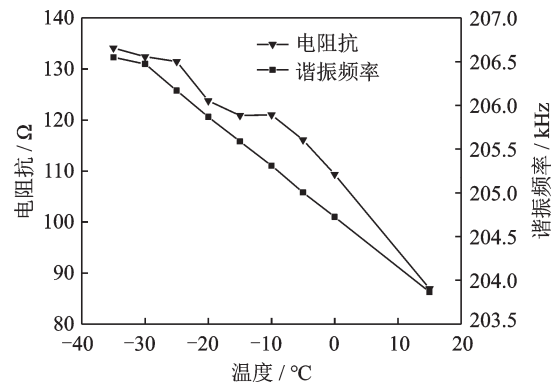


图 12 阻抗/谐振频率随温度变化规律

Fig.12 Variation law of impedance and resonance frequency with temperature

低温下结构谐振频率及阻抗实验研究对温度造成的谐振频率影响进行修正,可初步消除结冰探测时温度对结构产生的影响,进一步提高探测精度。

2.2.2 冰层厚度对结构谐振频率的影响

本实验采用超声雾化器在高精度低温冷环境箱中制作冰层,试验温度为 $-10 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。冰层冻结在 $3.5 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ 的亚克力轻型模具框内。结冰厚度通过累计喷雾量进行验证,取第 1 次喷雾和最终 10 次喷雾的厚度平均值对比验证每次喷雾的结冰量。考虑到每次喷雾量一致,因此产生的结冰厚度也比较均匀,故认为其作为研究频率随结冰厚度变化规律是可行的。根据喷雾量计算获得实验中结冰厚度范围 $0.5 \sim 4 \text{ mm}$,每增加 0.5 mm 测量一次系统谐振频率和阻抗,实验结果如图 13 所示,随着冰层厚度增加,谐振频率值降低、最低电阻抗值

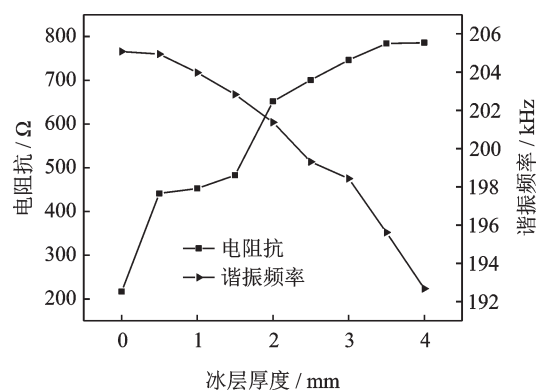


图 13 阻抗/谐振频率随冰层厚度变化规律

Fig.13 Variation law of impedance and resonance frequency with ice thickness

增大,实验结果与理论计算变化趋势一致。

将实验数据在 Origin 中通过二次多项式拟合,得到谐振频率(f_r)-冰层厚度(h)关系式为

$$f_r = -0.64h^2 - 0.62h + 205.18 \quad (3)$$

2.2.3 温度修正后冰层厚度测量规律

考虑到结冰温度对结构谐振频率及阻抗的影响,结合温度及冰厚对谐振频率的影响规律,研究结冰厚度为 2.5 mm 时谐振频率和电阻抗值随温度的变化规律。表 3 为不同温度下谐振频率和电阻抗变化规律。

表 3 结冰 2.5 mm 谐振频率随温度变化

Table 3 Variation law of resonance frequency with temperature at thickness of 2.5 mm

温度/°C	谐振频率 f_r /kHz	电阻抗 Z/Ω
-10	197.748	686.765
-15	198.436	690.215
-20	198.936	699.325
-25	199.437	710.742

基于低温箱谐振探测实验采集的 4 组数据进行温度与结冰后的结构谐振频率关系分析,在 Origin 中进行非线性曲线拟合,对数据采用指数函数分析,得到如下拟合式为

$$f_r = 201.8578 - 5.8164e^{(0.03497T)} \quad (4)$$

图 14 为厚度 2.5 mm 的冰层谐振频率随温度变化的拟合函数曲线和实验点对比,通过温度修正可以有效提高冰层厚度测量精度。温度对冰层密度、声速等参数都有影响,会造成结构刚度变化,因此相同厚度的冰层在不同温度下其谐振频率会产生较大的偏移。对结冰后的谐振探测模型进行温度影响分析,可预测不同温度下谐振频率的变化规律、有效提高探测精度。

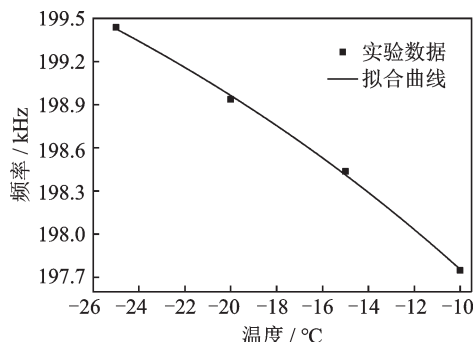


图 14 拟合函数与实验数据点对比

Fig.14 Comparison of fitting function and experimental data points

由以上分析可知,结构谐振频率和电阻抗的变化可以反映温度变化,文中在无冰层附着时对结构谐振频率随温度变化作了试验分析,如图 12 所示。

温度不仅对压电材料和铝板的刚度产生影响,对冰层的刚度也有很大影响,在外形、质量不变的结构上,表面附着一定厚度的冰层,若温度稳定,结构的谐振频率值固定;当温度变化时,结构整体刚度也会随温度产生相应的变化,此时谐振频率也会变化。通过定量分析不同厚度冰层附着结构下谐振频率随温度的变化关系,可以消除温度对谐振频率的影响,达到谐振法探测冰层厚度的温度补偿效果。

3 结 论

基于阻抗分析仪的谐振法非接触式结冰探测实验主要研究温度和冰层厚度对结构谐振频率的影响,不同于冰层直接覆盖在压电传感器表面的实验探究,本文得到如下结论:

(1)对于外形不变的物体结构,附着冰层越厚,结构阻抗值越高,谐振频率值越低。这是由于固体机械系统谐振频率受刚度、质量影响,冰层作为特殊多孔材料相当于阻尼,吸收震荡、阻碍物体振动,因此冰层越厚、阻抗越高。结冰模型上冰层增加了整体结构质量,且冰层刚度小于铝板刚度,当铝板表面附着冰层厚度增加时,结构刚度减小,由式(1)可知谐振频率随冰层厚度增加而降低。

(2)对于同一厚度覆冰结构,冻结温度越低,结构谐振频率越高,阻抗值也越高。当温度降低时,冰层内部结构孔隙率变大,导致冰密度变小、更加疏松,对系统振动吸收效果更好,即结构振动阻尼增大,最终在阻抗分析仪上则表现为电阻抗增大;并且温度越低、冰层冻结强度就越大,导致刚度增加,由式(1)可知,质量不变的情况下,刚度增大,结构的谐振频率增大。

由以上谐振式结冰探测实验结果可知,基于阻抗分析仪的谐振频率和阻抗特性分析可以识别特定结构表面是否结冰,并能有效测量结冰厚度,最后通过温度修正能有效提高冰层厚度测量精度。作者希望通过谐振式结冰探测实验研究,能初步探究谐振法探测的影响因素及规律,为谐振法非接触式结冰探测提供参考。

参考文献:

- [1] POTAPCZUK M G. Aircraft icing research at NASA glenn research center[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2013, 26(2):260-276.
- [2] GENT R W, DART N P, CANSDALE J T. Aircraft icing[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2000, 358(1776): 2873-2911.
- [3] VUKITS T. Overview and risk assessment of icing

- for transport category aircraft and components [C]// Proceedings of the 40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit[S.l.]: AIAA, 2002.
- [4] 侯乃先, 郑李鹏, 余放, 等. 风扇叶片结冰对航空发动机不平衡响应的影响[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(2): 363-366.
HOU Naixian, ZHENG Lipeng, YU Fang, et al. The influence of fan blade icing on aeroengine rotor unbalance [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(2): 363-366.
- [5] 王翊, 孔维梁, 陈航, 等. 面向自然结冰试飞评估的冰形增长规律[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(31): 13040-13046.
WANG Yi, KONG Weiliang, CHEN Hang, et al. Investigation of growth law of ice shape on aircraft for the evaluation of icing flight test[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(31): 13040-13046.
- [6] BRAGG M B, GREGOREK G M, LEE J D. Airfoil aerodynamics in icing conditions [J]. Journal of Aircraft, 1986, 23(1): 76-81.
- [7] APPIAH-KUBI P, MARTOS B, ATUAHENE I, et al. U.S. Inflight icing accidents and incidents, 2006 to 2010[C]//Proceedings of Industrial & Systems Engineering Research Conference.[S.l.]:[s.n.], 2013.
- [8] GREEN S D. The icemaster database and an analysis of aircraft aerodynamic icing accidents and incidents; DOT/FAA/TC-14/44 [R]. Springfield, Virginia: NTIS, 2015.
- [9] REEHORST A, CHUNG J, POTAPCZUK M, et al. Study of icing effects on performance and controllability of an accident aircraft [J]. Journal of Aircraft, 2015, 37(2): 253-259.
- [10] THOMAS S K, CASSONI R P, MACARTHUR C D. Aircraft anti-icing and de-icing techniques and modeling[J]. Journal of Aircraft, 2012, 33(5): 841-854.
- [11] BRAGG M B, BASAR T, PERKINS W R, et al. Smart icing systems for aircraft icing safety [C]//Proceedings of the 40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit.[S.l.]: AIAA, 2002.
- [12] JACKSON D G, GOLDBERG J I. Ice detection systems: A historical perspective: 2007-01-3325[R]. [S.l.]: SAE, 2007.
- [13] ZOU J, YE L, GE J. Ice type detection using an oblique end-face fibre-optic technique [J]. Measurement Science & Technology, 2013, 24(3): 035201.
- [14] RIEMAN L, GUK E, KIM T, et al. Development of a novel multi-channel thermocouple array sensor for in-situ monitoring of ice accretion[J]. Sensors, 2020, 20(8): 2165.
- [15] SCHLEGL T, MOSER M, ZANGL H. Wireless and flexible ice detection on aircraft [C]//Proceedings of SAE International Conference on Icing of Aircraft.[S.l.]: SAE, 2015.
- [16] OWUSU K P, KUHN D C S, BIBEAU E L. Capacitive probe for ice detection and accretion rate measurement: Proof of concept [J]. Renewable Energy, 2013, 50: 196-205.
- [17] HANSMAN JR R J, KIRBY M S. Measurement of ice growth during simulated and natural icing conditions using ultrasonic pulse-echo techniques [J]. Journal of Aircraft, 1986, 23(6): 492-498.
- [18] WANG P, ZHOU W, BAO Y, 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(4): e2138.
- [19] JIMÉNEZ A A, MÁRQUEZ F P G, MORALEDA V B, et al. Linear and nonlinear features and machine learning for wind turbine blade ice detection and diagnosis[J]. Renewable Energy, 2019, 132: 1034-1048.
- [20] MENDIG C, RIEMENSCHNEIDER J, MONNER H P, et al. Ice detection by ultrasonic guided waves [J]. CEAS Aeronautical Journal, 2018, 9(3): 1-11.
- [21] 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.
- [22] ROY S, IZAD A, DEANNA R G, et al. Smart ice detection systems based on resonant piezoelectric transducers [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1998, 69(3): 243-250.
- [23] 张杰, 王敏, 张洪, 等. 谐振平膜型结冰传感器的智能温度补偿[J]. 计量与测试技术, 2005, 32(8): 4-5.
ZHANG Jie, WANG Min, ZHANG Hong, et al. Intelligent temperature compensation of resonant flat film ice sensor [J]. Measurement and Testing Technology, 2005, 32(8): 4-5.
- [24] 张庆辉, 万晨霞. 纵振换能器谐振频率的数值研究与仿真分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(19): 43-48.
ZHANG Qinghui, WAN Chenxia. Research and analysis of the resonant frequency of the longitudinal vibration transducer[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(19): 43-48.
- [25] 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 Tian, ZHU Chunling, LI Qingying, et al. Research on ice detection with piezoelectric bimorph cantilever structure [J]. Acta Aeronautics et Astronautics Sinica, 2013, 34(5): 1073-1082.
- [26] ZHANG X, ZHOU W, LI H. Electromechanical impedance-based ice detection of stay cables with temperature compensation [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2019, 26(9): e2384.
- [27] GUI K, GE J, YE L, et al. The piezoelectric road status sensor using the frequency scanning method and machine-learning algorithms [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2019, 287: 8-20.