

文章编号:1000-6893(2000)06-0575-10

## 一种飞机结构结冰监测及自适应除冰的模拟试验

袁慎芳, 陶宝祺, 石立华

(南京航空航天大学 智能材料结构研究所, 江苏 南京 210016)

### RESEARCH ON SELF-ADAPTIVE DEICING USING WAVELET ANALYSIS AND SHAPE MEMORY ALLOY

YUAN Shen-fang, TAO Bao-qi, SHI Li-hua

(Smart Material and Structure Institute, Nanjing Univ. of Aero. and Astro., Nanjing 210016, China)

**摘 要:** 利用小波分析对飞机复合材料结构表面结冰的出现及程度进行诊断,并在诊断的基础上,提出利用埋入的形状记忆合金进行除冰,将飞机防冰工作由被动变为主动的设想。该方法如果能够实现,将节省能源,同时不受飞机某些复杂区域的限制。

**关键词:** 小波分析;压电传感器;形状记忆合金;除冰;数值分析

**中图分类号:** V244.1

**文献标识码:** A

**Abstract:** This work was aimed to monitor the ice accumulation on flight structures and deice after self-diagnosing by using embedded sensors and actuators. Wavelet analysis was applied to diagnose the emergency of ice and its grade. The deicing could be done by shape memory alloy. The method proposed could be an active deicing method, which can save energy and can be used to complex structures.

**Key words:** wavelet analysis; piezo-electric sensor; shape memory alloy; deice; numerical simulation

飞机在飞行时发生结冰,会增加飞行器的重量,引起飞机机翼形状发生畸变,从而导致其空气动力特性的严重变化。汽化器的结冰会造成进口系统的堵塞,引起发动机振动、转速下降,并有可能导致发动机停车。飞机起飞时,冷透燃油所引起的机翼结冰也有可能发生冰层破碎,使飞机尾部的发动机吸入冰块,这些都可能导致机毁人亡。现有飞机的防冰系统大多采用加热后的废气喷射除冰及化学方法除冰,需要在飞机飞行过程中不间断工作,消耗了大量能源,增加对飞机功率的需求。美国 NASA 在 Cleveland (Ohio) Lewis 研究中心开展了利用压电驱动器及压电传感器检测飞机结冰的研究,他们利用响应信号在不同频带的能量分布来检测结冰的厚度,最大可检测的结冰厚度为 1.27cm,同时采用结冰橡皮套膨胀变形除冰<sup>[1-3]</sup>。美国塞米翁 (Thermion) 公司正在研究一种采用非编织镀镍石墨纤维压制的防冰纤维,通过加热防冰,其优点在于可自动调节通电电流大小,这仍是一种被动防冰,但也可起到一定的节省能源的作用<sup>[2]</sup>。南京航空航天大学已对采用压电驱动器及压电传感器检测飞机复合材料结构表面

结冰进行了探索<sup>[3]</sup>。

### 1 结冰监测信号的小波分析方法

小波分析非常适合于分析信号的突变点<sup>[4,5]</sup>,利用这一点,将小波分析用于对传感器监测到的结冰信号的出现时刻进行诊断。平方可积函数可进行小波变换,考虑其逼近范围在整个实轴,引入平移和尺度 2 个参数,即用 1 个基小波膨胀和平移来得到对原信号的分解。

具有有限能量的函数  $f(t) \in L^2(R)$ ,  $f(t)$  的小波变换的定义为

$$\langle f, \psi_{a,b} \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{a,b}(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

其中:  $a$  为尺度参数;  $b$  为定位参数; 函数  $\psi_{a,b}(t)$  称为小波;  $\psi_{a,b}(t)$  在是复变函数时,上述积分中要用复共轭函数  $\bar{\psi}_{a,b}(t)$ 。

如果对  $a, b$  进行离散化处理,选取  $a = a_0^m, b = nb_0, a_0, m, n$  是整数,  $a_0$  是大于 1 的固定伸缩步长,  $b_0 > 0$ , 则离散小波变换为

$$\langle f, \psi_{m,n} \rangle = a_0^{-m/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi(a_0^{-m}t - nb_0) dt \quad (2)$$

在本文的研究中,母小波采用 Daubechies 小波,该小波是紧支撑的正交小波,没有明确的函数

收稿日期:1999-11-05; 修订日期:2000-06-02

基金项目:国家自然科学基金(19872033),航空基金(97B5204),

江苏省 333 专项基金资助项目

文章网址: <http://www.hkxb.net.cn/hkxb/2000/06/0575/>

表达式,研究中选用具有4个系数的 Daubieches 小波(DB4)。

(1) 结构结冰的数值分析结果 结构表面结冰,相当于在结构表面附加了一层均布载荷,势必会影响结构的刚度和阻尼。为了给实验工作中利用小波分析提取特征参数提供一个指导,进行了数值分析。

分析采用如图1所示的三自由度的系统,该

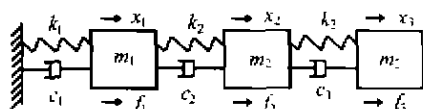


图1 模拟的三自由度结构

系统可用如下常系数线性微分方程描述

$$M\ddot{q}(t) + C\dot{q}(t) + Kq(t) = Fu(t) \quad (3)$$

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix};$$

$$C = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 \\ 0 & -c_3 & c_3 \end{bmatrix};$$

$$K = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix}$$

式中:  $M$  为质量矩阵;  $C$  为阻尼矩阵;  $K$  为刚度矩阵;  $F$  为广义输入矩阵;  $q(t)$  为广义位移;  $\dot{q}(t)$  为广义速度;  $\ddot{q}(t)$  为广义加速度;  $u(t)$  为广义力。

由式(3)可得系统的状态方程

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (4)$$

式中:

$$x(t) = \begin{bmatrix} q(t) \\ \dot{q}(t) \end{bmatrix}; A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1} \end{bmatrix} F \quad (5)$$

对该结构系统施加正弦激励信号。结构正常时,取  $m_1 = m_2 = m_3 = 1$ ,  $k_1 = k_2 = k_3 = 4$ ,  $c_1 = c_2 = c_3 = 0.02$ , 结构响应如图2所示。结冰仿真时,取

$$m = m_2 = m_3 = 1,$$

$$k_1 = k_2 = k_3 = \begin{cases} 4 & t \leq 150 \\ 4.4 & 150 < t \leq 300 \\ 4.8 & t \geq 300 \end{cases}$$

$$c_1 = c_2 = c_3 = \begin{cases} 0.02 & t \leq 150 \\ 0.022 & 150 < t \leq 300 \\ 0.024 & t \geq 300 \end{cases}$$

由于结构表面结冰,结构的刚度及阻尼必然

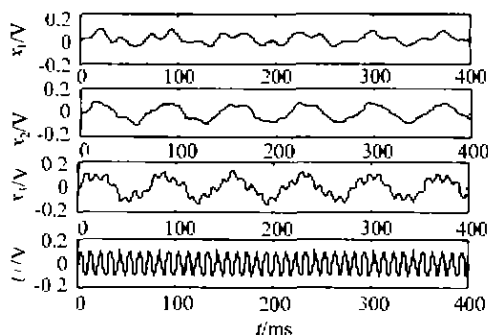


图2 正常结构的仿真响应

发生变化,分别按 10% 及 20% 在时刻  $t = 150$  ms 及  $t = 300$  ms 改变系统的刚度和阻尼,计算结构的动态响应,计算结果及其采用 DB4 小波进行小波变换的结果如图3所示。分析图3中的波形,单从结构响应上看,很难看出结构状态的改变,但通过小波分析以后,在其一水平细节信号上,却有非常明显的对应于结构状态改变时刻的信息出现,分别在  $t = 150$  ms 及  $t = 300$  ms 时刻,信号具有尖峰出现。这是因为小波分析可将被分析信号分解到不同的水平上,不同水平的信号代表了不同的频带,1 水平所代表的频带最高,而且小波分析具有很好的时频特性,分析出的不同水平的细节信号仍保留其时域特征。因此结构表面结冰,所导致的系统状态的突变及其发生时刻,可以反应在 1 水平的小波分析细节信号中。

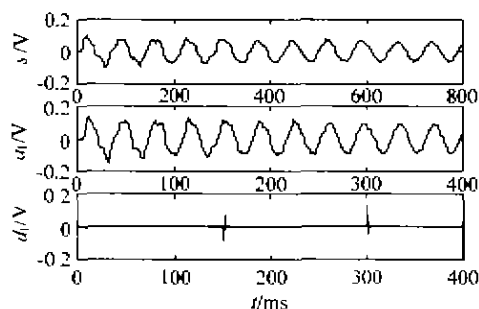


图3 结构仿真结冰的响应及小波分析结果

(2) 实验研究 依据数值分析结果,进行实验仿真。实验系统结构如图4所示。采用环氧一玻璃纤维复合材料平板模拟飞机结构,其4边用螺钉连接在刚性支座上,其上粘贴4只压电传感器,1只压电驱动器。传感器、驱动器均采用 PZT 压电陶瓷。计算机测控系统发出的驱动信号经功率放大器放大驱动压电激励器激励平板结构,使其处于非常轻微的振动状态。压电传感器监测结构的动态响应,监测结果经电荷放大器输入计算机测控系统,供小波分析软件分析,以确定是否出现结冰及结冰的程度。计算机测控系统具有 250

kHz 的采样频率。实验中,选用正弦信号激励结构,通过实验比较,选取 2 kHz 信号频率激励。由于实验条件的限制,采用均布载荷来模拟不同厚度的结冰,均布载荷的质量分别为 250g,500g。4 只传感器中的 1 只所测得的响应信号及其采用 DB4 小波进行分析的结果如图 5 所示。实验结果仍表明 1 水平的细节信号可靠反映了结构状态的变化时刻。

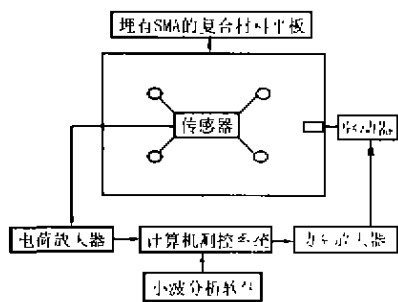


图4 实验系统

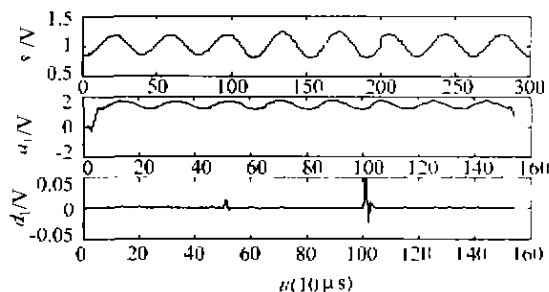


图5 实验响应的小波分析结果

上述研究主要用于监测结冰的出现,对于结冰厚度,可通过对不同厚度冰层情况下结构的响应信号进行多水平的分析,考查各水平细节信号的不同参数加以确定,可考查的参数为:能量、均值、最大值、最小值、标准偏差、绝对偏差的均值等。

## 2 利用形状记忆合金的除冰设想

形状记忆合金(SMA)在发生塑性变形后,经加热到某一温度时,能够回复到变形前的形状,即具有形状记忆效应。形状记忆合金产生形状回复时,如果没有任何约束,则它只是产生动作或应变,当它回复受到制约时,则形状记忆合金将对约束体作用较大的回复应力,从而导致结构的轻微变形。按形状记忆合金的动作情况,可将其分为单程形状记忆合金和双程形状记忆合金,前者在温度激励下只能动作一次,而后者可由高低温分别激励,可重复动作。由于目前制备出的双程形状记忆合金性能还不够稳定,因此在研究过程中,未采用双程形状记忆合金,而是采用单程 SMA 替代双程 SMA。如果将含有预变形的 SMA 丝埋入复

合材料,实验表明:采用单程 SMA 埋入复合材料后,由于变形回复受到复合材料的限制,因此单程可反复使用,以替代双程形状记忆合金<sup>[6]</sup>。采用 NiTi SMA 作为除冰材料。在相变过程中,若 NiTi SMA 处于自由状态,可使 6%~8% 的塑性变形完全恢复;若形状回复受到约束,则可产生高达 690MPa 的回复应力。设计以直径为 0.1mm NiTi SMA 按图 6 所示形式埋入复合材料,一旦自诊断

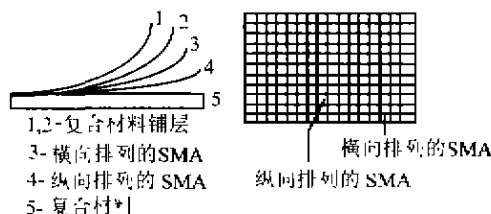


图6 形状记忆合金的埋入

发现结冰,则可分别激励横向排列及纵向排列的形状记忆合金丝。利用形状记忆合金除冰的原理为:首先形状记忆合金可采用电激励或直接利用飞机所排放的废热空气进行激励,这本身就是一个加热过程;其次,由于形状记忆合金在回复过程中所产生的较大的回复应力,可使结构表明产生轻微变形,在冰层较薄的情况下,使冰层破碎,利用高气流将其吹落。这种除冰方法是在前述对冰层的自诊断基础上进行的,可将结冰状态清除在初始状态且不需要不间断工作。

## 参 考 文 献

- [1] Hickman G A, Gerardi J J, Feng Y. Application of smart structures to aircraft health monitoring[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1991, 13(3): 411~430.
- [2] 王克芳. 自调节导热纤维防冰系统[J]. 国际航空, 1992, 19(2): 22~25.
- [3] 石卫华. 基于压电元件的损伤自诊断自适应智能结构研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 1997.
- [4] 崔锦泰. 小波分析导论[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1995. 1~20.
- [5] 秦前清, 杨宗凯. 实用小波分析[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 1994. 5~10.
- [6] 丹久保, 栗康. 形状记忆合金[M]. 北京:机械工业出版社, 1992.

作者简介:



袁慎芳 女, 1968 年生, 博士, 副教授。先后获国家发明奖 1 项, 省部级奖 5 项, 主持国家自然科学基金 2 项, 省部级基金 2 项, 发表文章 20 余篇。