

# 基于光强反射和压电振动的混合式 结冰探测系统

肖春华<sup>1</sup>, 王宏伟<sup>2</sup>, 乔宝英<sup>1</sup>, 谢小辉<sup>2</sup>, 赵 丹<sup>2</sup>

(1. 中国空气动力研究与发展中心 低速空气动力研究所, 四川 绵阳 621000;

2. 中国航天科技集团有限公司 四川航天技术研究院  
四川航天计量测试研究所, 成都 610100)

**摘 要:** 为解决目前飞机结冰探测存在测点单一、测量不准确、探测位置不匹配的问题,基于光强反射方法研制了光纤结冰传感器,基于压电振动方法研制了平膜结冰传感器,将两者进行组合嵌入至 NACA0012 翼型,研制了一种适合飞机翼面、多点分布测量的混合式结冰探测系统,并在低温冷库、结冰风洞中进行了测试。研究表明:多点分布测量的混合式结冰探测系统不仅能发挥光纤结冰探测和平膜结冰探测各自的优势,还能实现翼表面的结冰探测,响应时间不超过 0.5 s,结冰厚度测量范围可从 0.2 mm 到 3 mm,可靠性优于单点测量的结冰探测棒,是具有发展前景的一种新型结冰探测技术。

**关 键 词:** 结冰; 探测; 光纤; 平膜; 混合式; 翼面; 传感器; 光强

中图分类号: V275+.1

文献标志码: A

## Hybrid ice detection system based on light intensity reflection and piezoelectric vibration

XIAO Chunhua<sup>1</sup>, WANG Hongwei<sup>2</sup>, QIAO Baoying<sup>1</sup>,  
XIE Xiaohui<sup>2</sup>, ZHAO Dan<sup>2</sup>

(1. Low Speed Aerodynamics Institute,

China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang Sichuan 621000, China;

2. Sichuan Aerospace Measurement and Test Research Institute,

Sichuan Academy of Aerospace Technology,

China Aerospace Science and Technology Corporation, Chengdu 610100, China)

**Abstract:** There are some problems such as single-point measurement, inaccurate measurement and mismatching positions for current ice detection system of airplane. The optic fiber ice detection sensor was developed by the light intensity reflection method. And the flat film ice detection sensor was manufactured by the piezoelectric vibration method. These two were embedded into a NACA0012 airfoil. Thus a hybrid ice detection system suitable for airfoil surface and multi-point distributed measurement was developed, which was tested in cold storage and icing

收稿日期:2020-11-04

基金项目:国家自然科学基金面上项目(11572338)

通信作者:肖春华(1976—),男,研究员,博士,从事结冰机理和防除冰应用、低速流动与传热传质等方面的研究。

E-mail:xiaochunhua@cardc.cn

引用格式:肖春华,王宏伟,乔宝英,等. 基于光强反射和压电振动的混合式结冰探测系统[J]. 航空动力学报,2022,37(3):449-456.

XIAO Chunhua, WANG Hongwei, QIAO Baoying, et al. Hybrid ice detection system based on light intensity reflection and piezoelectric vibration[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(3): 449-456.

wind tunnel. It showed that, the hybrid ice detection system of multi-point distribution measurement can not only have the advantages of optic fiber ice detection and flat film ice detection, but also achieve ice detection on airfoil surface. The response time was less than 0.5 s and the measurement range of ice thickness was from 0.2 mm to 3 mm. The reliability of hybrid ice detection system was better than that of ice detection rod of single-point measurement, proving it is a novel and prospective ice detection technology.

**Key words:** ice; detection; optic fiber; flat film; hybrid; airfoil surface; sensor; light intensity

飞机穿越含有过冷水滴的结冰云雾时,部件迎风面,特别是旋翼叶片前缘容易结冰<sup>[1]</sup>。结冰将导致飞行性能的下降,甚至导致机毁人亡的事故<sup>[2-3]</sup>,因此,必须及时探测到旋翼叶片等关键部件的结冰信息<sup>[4-5]</sup>,为飞行员的操纵策略提供参考,为启动和控制飞机防除冰系统提供真实、准确的输入条件。

目前,飞机结冰探测主要是在机头前方安装探冰棒,这是一种谐振式的结冰传感器<sup>[6]</sup>,具有设计的固有频率,工作时超声振动,如果传感器表面发生结冰,通过检测固有频率的变化来判断是否结冰。这是属于插入式的传感器<sup>[7]</sup>,无法齐平地安装在曲率变化的翼面,灵敏度也不是很好,比如美国罗斯蒙特公司的罗斯蒙特87系列磁致伸缩结冰传感器,大量应用于波音飞机,但其灵敏度只有0.5 mm<sup>[6-7]</sup>。为此,国内哈尔滨工程大学进行了改进<sup>[7-8]</sup>,采用磁致伸缩原理成功研制一种振管式结冰传感器,增加了温度补偿<sup>[8]</sup>,提高了结冰的探测精度,但仍然是插入式传感器。

FAR 25部对机头探冰棒的安装提出了咨询建议<sup>[9-12]</sup>,要求证明探冰棒的安装位置是最先结冰的位置<sup>[10,12]</sup>。即使如此,因结冰探测导致的飞行事故还是频繁发生。其中,有两个至关重要的问题需要回答:一是安装在机头下方的探冰棒获得的结冰信息是否能代表翼面等关键部件的?二是探冰棒获得的单点结冰信息是否准确可靠?基于这两个问题,如果能结合两种或者两种以上的结冰探测方法,将其组合到机翼翼面建立分布式、混合式的结冰探测,这可能是解决目前结冰探测问题的有效手段。

2003年,英国首次研制出光纤结冰传感器<sup>[13-15]</sup>,该传感器的探头尺寸小,可做到10 mm直径,可以齐平安装在曲率变化的表面。探测的灵敏度较高,但对水、油污、灰尘比较敏感<sup>[15-16]</sup>,存在报虚警的现象,抗环境干扰的能力不强,探测的最

大结冰厚度通常小于2 mm<sup>[13-15]</sup>。为此,国内研究人员对其进行了研究,成功研发出光纤式结冰探测系统<sup>[13,17]</sup>。另外,瑞典Vibro-Meter公司首次研制出平膜结冰传感器<sup>[18-19]</sup>,该传感器的探测精度较高,虽然也可以齐平安装在有曲率的翼面,但由于探头的尺寸较大,直径通常在20 mm左右,很难安装在曲率变化较大的前缘。同时,该传感器需要激励信号,温度的补偿也比较复杂。为此,国内研究人员在平膜结冰传感器内设置了测温元件,可以对冰层进行更好的温度补偿,将测量灵敏度提高到0.1 mm<sup>[20-21]</sup>。

由此可见,光纤和平膜这两种结冰传感器可以齐平安装在一定曲率的表面。为此,本文期望借助这两种探测方法,建立一种多点分布的混合式结冰探测系统,不仅组合光纤式和平膜式的结冰探测方法,而且在翼面进行多点测量,在不影响旋翼翼面空气动力性能的前提下,以此来保证结冰探测的准确性。

本文主要是侧重于光纤和平膜这两种传感器的组合,而组合的理由主要是:一种结冰传感器(比如光纤结冰传感器)在某些环境条件下(比如空气中有灰尘时)可能会出现报虚警的不可靠现象,而平膜结冰传感器在遇到微小的灰尘颗粒时,由于质量特性差异太大,就不会出现报虚警的现象。所以,增加另外一种原理的结冰传感器(比如平膜结冰传感器)可以弥补不足、相互补充,提高结冰探测的可靠性。因此,本文主要是侧重于光纤和平膜这两种传感器的组合。

## 1 系统设计

整个系统采用光纤式和平膜式结冰传感器相结合的探测方法进行组合,采用3路光纤结冰传感器,分别安装在翼面0%、±10%弦长位置,采用2路平膜结冰传感器,分别安装在翼面±20%弦长位置,以实现翼面结冰厚度的测量。通常,

翼面的冰防护区设置在 $\pm 10\% \sim \pm 20\%$ 之间,本文将2路平膜结冰传感器设置在翼面 $\pm 20\%$ 弦长位置,主要是为了探测两种情况的结冰:一是过冷大水滴撞击后无法立刻冻结,溢流到防护区外的结冰;二是热除冰后融化的液态水溢流到防护区外的二次结冰。

### 1.1 光纤结冰传感器

首先,采用光强调制型光纤结冰传感器,这是基于一发两收差分检测原理的反射、散射式传感器(图1),由一根发射光纤束和两根接收光纤束组成,发射光纤束端部装有光发射器件(红外发光二极管),接收光纤束端部装有光电检测器件(光电二极管),光纤束的顶部端面构成探测面<sup>[15]</sup>。采用两个接收光纤以消除同性干扰,减小光源强度变化对检测器灵敏度的影响。

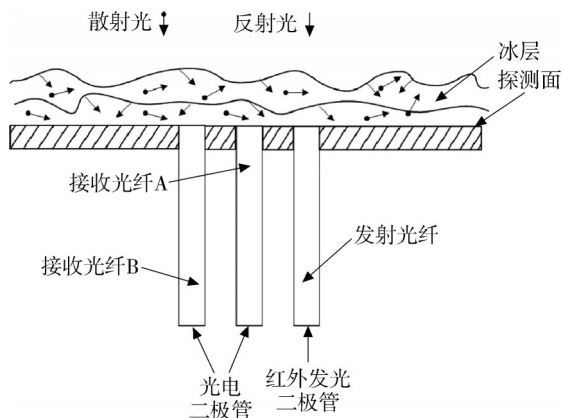


图1 光纤结冰探测原理示意图

Fig.1 Sketch of optic fiber ice detection principle

光纤结冰传感器由光纤探头、光源、检测电路和密封外壳组成(图2)。光纤探头由多模石英光纤制成,实现光信号传输,采用中心发射、外层接收的同心环光纤分布模式(图3)。光源采用砷化镓红外发光二极管<sup>[13]</sup>,峰值波长为940 nm,最大调

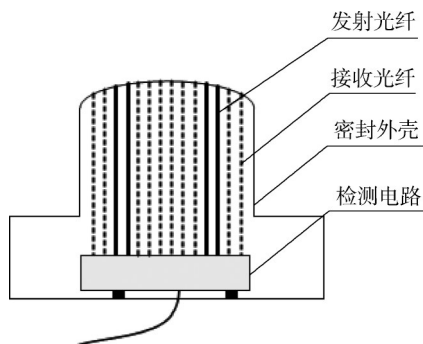


图2 光纤结冰传感器组成示意图

Fig.2 Composition diagram of optic fiber ice detection sensor

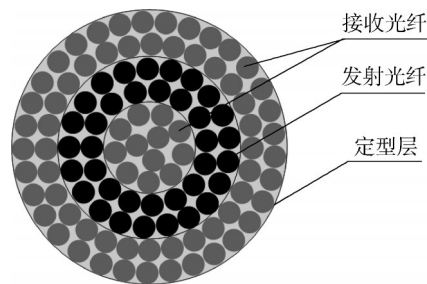


图3 光纤纤芯分布示意图

Fig.3 Sketch of optic fiber core distribution

制能力约为500 kHz,最大工作电流为100 mA,并在发射表面装有微透镜,输出光功率在mW级以上。检测电路包括红外光源驱动电路和光电转换电路。

本文采用差分结构来消除同性干扰的影响,差分结构是将两个接收光纤同侧布置,由于环境对这两个接收光纤的干扰和影响是相等的,将一个接收光纤与另外一个接收光纤进行信号之间的差分,可以将同性干扰比较好地消除掉。

为了安装在较小曲率半径的翼面部位,光纤结冰传感器探头的直径不能超过10 mm(图4),以探测翼面前缘结冰。



图4 光纤结冰传感器

Fig.4 Optic fiber ice detection sensor

### 1.2 平膜结冰传感器

其次,采用机械振动型平膜结冰传感器,这种传感器采用了一种三电极的结构。当电极之间接入一定大小的交变电压,传感器会产生逆压电效应并发生弯曲振动。当振动表面有冰时,会对传感器造成三个影响:一是增加刚度从而提高其谐振频率;二是增加质量从而降低其谐振频率;三是增加阻尼从而减小其谐振振幅<sup>[18-20]</sup>。理想情况下,传感器的谐振频率 $f$ 与其等效质量 $m$ 、等效刚度 $k$ 之间有如下关系:

$$f = c \sqrt{k/m}$$

其中 $c$ 为常数。刚度增加的影响占主导作用,传

传感器的谐振频率随结冰冰厚的增长而增加,谐振频率的变化可反映出结冰情况。

平膜结冰传感器由弹性膜片、PZT (piezo-electric transducer) 元件、电极和支撑架等构成(图 5),齐平保型地安装在翼型表面。弹性膜片结冰会引起膜片刚度和质量改变,刚度增加将使增加膜片的谐振频率,质量增加使得膜片的谐振频率下降,通过标定弹性膜片谐振频率与刚度、质量的关系,可以获得相应地标定曲线,通过监测弹性膜片谐振频率的变化,可判断传感器是否结冰以及结冰的厚度。

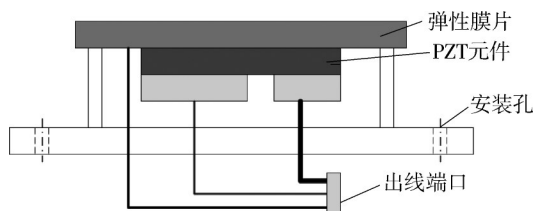


图5 平膜结冰传感器组成示意图

Fig.5 Composition diagram of flat film ice detection sensor

平膜结冰传感器采用谐振频率扫频方式,采用先粗略扫频、后精细扫频的方法,首先以间隔为 1 kHz 进行扫频,定位谐振频率点范围,再以 100 Hz 为间隔对谐振频率点进行定位。

由于平膜结冰传感器的弹性膜片直径较大,为了翼面安装的方便,平膜结冰传感器的膜片直径不超过 20 mm(图 6),主要布置在翼型表面水滴撞击极限下游的位置,用于探测冰防护区之外的结冰现象。

未结冰的情况下,平膜结冰传感器将测量到的干净翼面压力计入到初始采集数据中。结冰的情况下,平膜结冰传感器也将测量到的结冰翼面压力计入到正式测量数据中,正式测量数据与初始采集数据通过某种扣除方法,可以将翼面气动

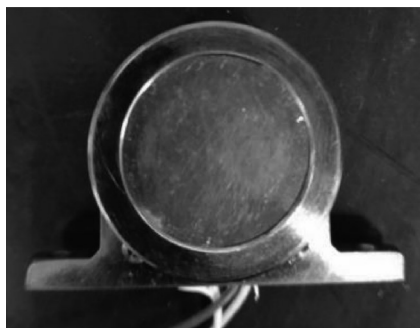


图6 平膜结冰传感器

Fig.6 Flat film ice detection sensor

压力对谐振频率的初始影响消除掉。

同时,本文将平膜结冰传感器安装在翼面曲率半径很大的部位,这样气流就不会正对着平膜,相应地减少了气流对平膜谐振频率的影响。

### 1.3 测试模型

为了实现翼面的多点分布测量模式,本文采用 NACA0012 翼型作为混合式结冰探测系统的测试模型和传感器载体(图 7)。翼型弦长为 400 mm、展长为 200 mm,最大厚度为 40 mm,位于 30% 弦长位置。模型由 5052 铝合金蒙皮、304 不锈钢框架、304 不锈钢传感器盒身、6061 铝合金电路板盒组成。在各个部件交接处打密封胶,保证翼型具有良好的密封性能。由于测试模型要在较高风速下工作,必须进行相应的强度校核,有限元分析表明:在来流风速为 150 m/s 的条件下,整个测试模型的最大形变为 0.07 mm,满足强度要求。

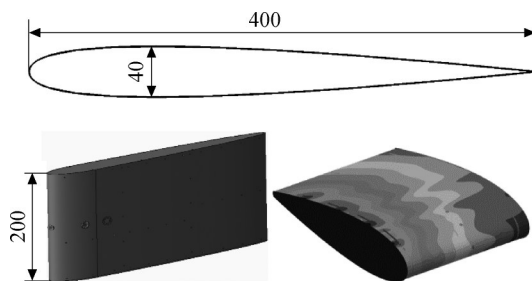


图7 测试模型及其有限元分析(单位:mm)

Fig.7 Test model and finite element analysis (unit:mm)

### 1.4 控制系统

控制系统由信号采集与调理电路模块、微处理器模块、通信模块、电源模块和测量控制软件组成(图 8)。控制系统采集 3 路光纤结冰传感器、2 路平膜结冰传感器数据,采用多源信息融合算法解算结冰厚度等参数,数据更新时间小于 0.5 s,实现结冰分档报警功能,显示结冰速率,并根据 5 个结冰厚度绘制简单冰形轮廓线。控制软件分为上位机软件和下位机软件,软件界面见图 9。上位机软件负责结冰参数解算、数据管理、人机交互和远程通信等功能(图 10);下位机软件负责将传

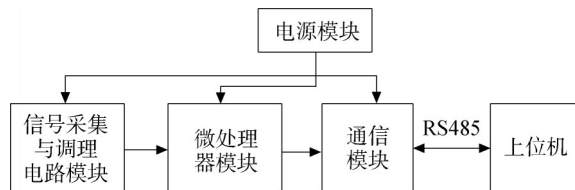


图8 控制系统组成示意图

Fig.8 Composition sketch of control system

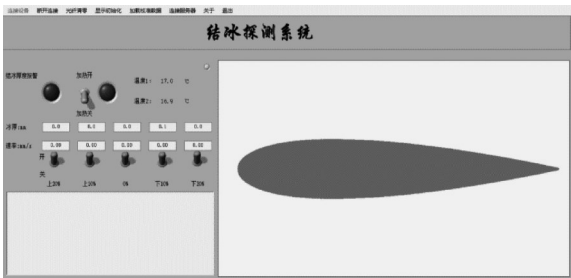


图 9 控制软件界面  
Fig.9 Interface of control software

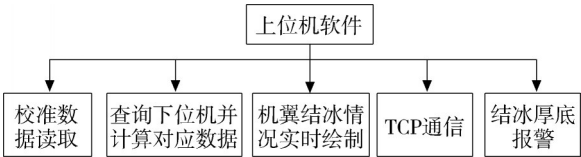


图 10 上位机软件功能框图  
Fig.10 Function block diagram of upper computer software

感器电压转换为数字信号,并发送不同频率的正弦波形驱动平膜,记录电压最大时平膜的频率值,再向上位机回报采集数据。

1.5 辅助测量工具

实际的结冰厚度采用百分表测量,百分表是长度测量工具,刻度值为 0.01 mm,是精度较高的量具,主要检测工件的形状误差和位置误差、校正零件的安装位置以及测量零件的内径等。结冰厚度的增加引起测量杆的微小位移,经过齿轮传动放大后变成指针在刻度盘上的转动,进而读出结冰厚度的大小。

2 测试与分析

2.1 低温冷库环境测试

将光纤结冰传感器放置于低温冷库环境中(图 11),往结冰传感器探头表面进行喷雾,探头表面的水在低温环境下发生结冰。根据光纤结冰

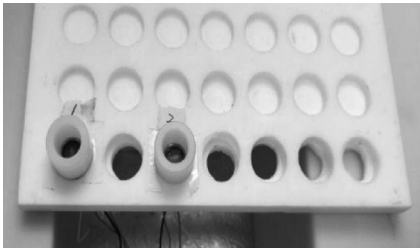


图 11 低温冷库环境中的光纤结冰传感器  
Fig.11 Optic fiber ice detection sensor in cold storage environment

传感器获得的电信号,采用百分表测试模型表面的结冰厚度,建立两者之间的曲线关系。

测试结果如图 12~图 14 所示,采用拟合方法对数据进行拟合,获得光纤结冰传感器输出电压和冰厚之间的关系。拟合公式可以采用多种,本文采用了幂函数拟合公式。其中  $h$  是光纤结冰探

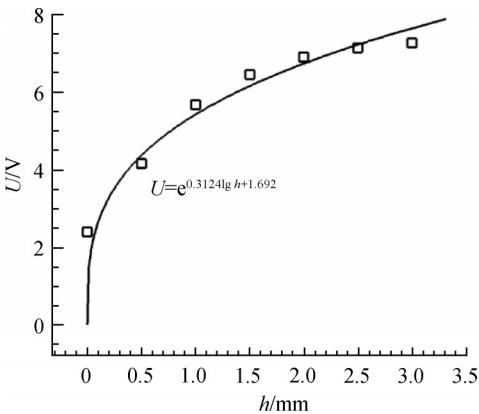


图 12 光纤结冰传感器 1 输出电压和冰厚的关系曲线  
Fig.12 Relationship between output voltage and ice thickness of optic fiber sensor 1

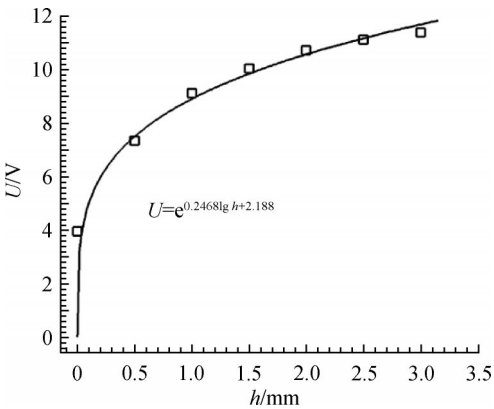


图 13 光纤结冰传感器 2 输出电压和冰厚的关系曲线  
Fig.13 Relationship between output voltage and ice thickness of optic fiber sensor 2

测器测量的结冰厚度(mm),  $U$  是光纤结冰传感器输出的电压(V)。

同时,将平膜结冰传感器也放置于低温冷库环境进行测试(图 15)。往平膜结冰传感器表面上进行喷雾,利用低温环境进行冻结,采用百分表测量模型表面的结冰厚度,根据平膜结冰传感器获得的电信号和实际冰厚,建立两者之间的关系。

为了保护电极,在平膜结冰传感器背面增加异形电极保护片。增加电极保护片后,谐振频率会降低,但趋势依旧是单调递增。测试结果如图 16、图 17 所示。其中,拟合公式也可以采用多种,

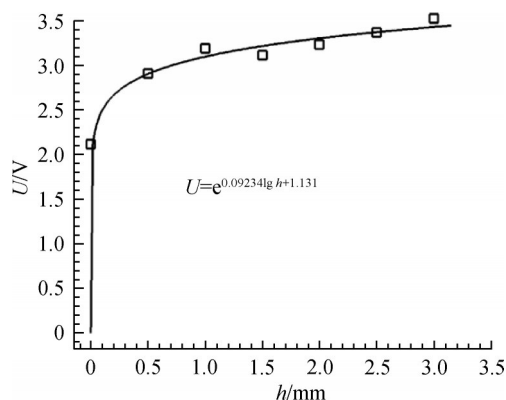


图 14 光纤结冰传感器 3 输出电压和冰厚的关系曲线  
Fig.14 Relationship between output voltage and ice thickness of optic fiber sensor 3

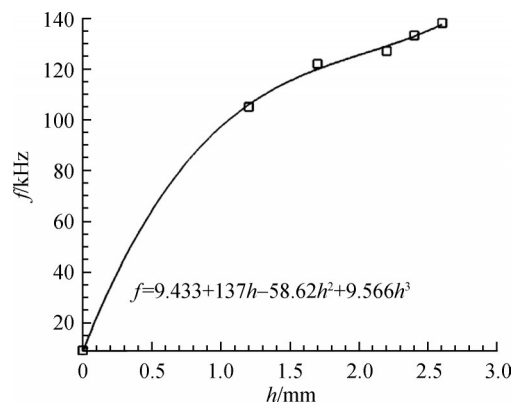


图 17 平膜传感器 2 输出频率和冰厚的关系曲线  
Fig.17 Relationship between output frequency and ice thickness of flat film ice detection sensor 2

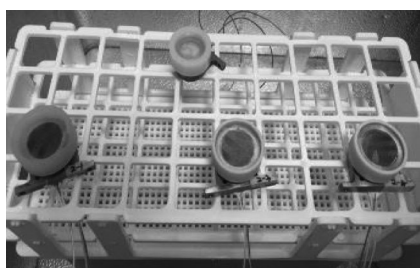


图 15 低温冷库环境中的平膜结冰传感器  
Fig.15 Flat film ice detection sensor in cold storage environment

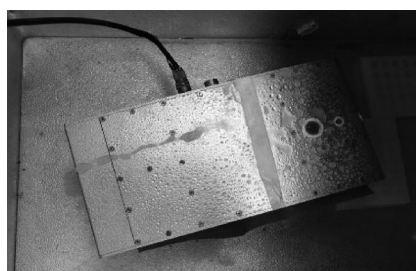


图 18 低温冷库环境中的测试模型  
Fig.18 Test model in cold storage environment

本文采用了多项式拟合公式。其中  $f$  是平膜传感器输出的频率 (kHz)。

将光纤结冰传感器和平膜结冰传感器组合到测试模型中,并放置到低温冷库环境中进行测试(图 18),不仅考核传感器在低温下的响应,也考核传感器在低温下的输出信号。

## 2.2 结冰风洞测试

结冰风洞的实验环境非常复杂,不仅环境温

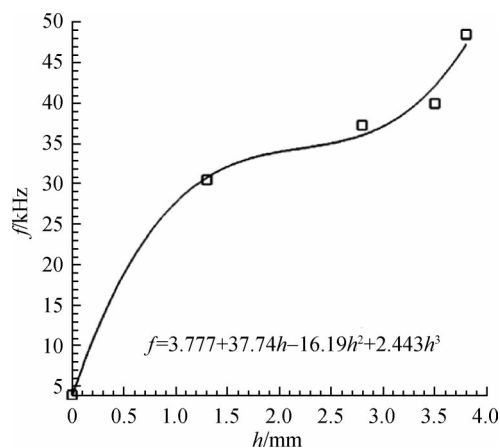
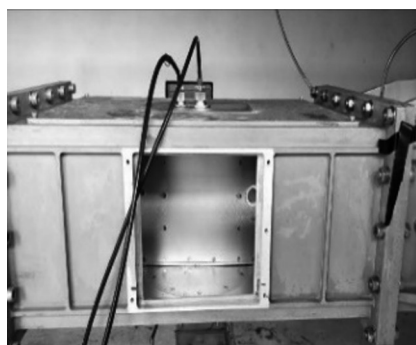


图 16 平膜传感器 1 输出频率和冰厚的关系曲线  
Fig.16 Relationship between output frequency and ice thickness of flat film ice detection sensor 1

度很低,而且是空气和水滴的两相流动,整个结冰探测系统必须进行密封处理,防止液态水进入系统内影响电路板的工作。

将测试模型放置到  $0.3\text{ m} \times 0.2\text{ m}$  结冰风洞实验段的低温环境中进行测试(图 19),针对典型的实验条件和状态进行了测试(表 1),主要是采用不同的环境温度进行实验,以反映不同结冰类型的影响。模型表面的结冰厚度通过光纤结冰传感器和平膜结冰传感器的电信号获取测量值,然后采用百分表获得模型表面冰厚的实际值。

将光纤结冰传感器、平膜结冰传感器的电信号输出值对应的结冰厚度( $h$ )与实际测量的结冰厚度( $h'$ )进行比较(图 20、图 21)得了两者之间的



(a)

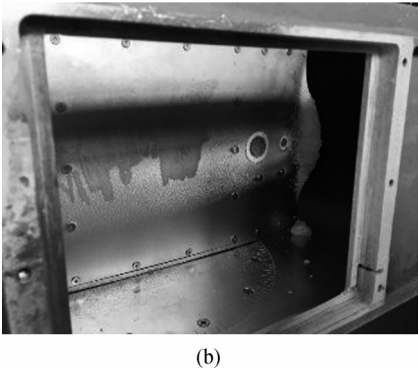


图 19 0.3 m×0.2 m 结冰风洞实验段中的测试模型  
Fig.19 Test model in test section of 0.3 m×0.2 m icing wind tunnel

表 1 结冰风洞测试的实验状态

| 来流速度/<br>(m/s) | 环境<br>温度/℃ | 液态水含量/<br>(g/m <sup>3</sup> ) | 平均水滴<br>直径/μm |
|----------------|------------|-------------------------------|---------------|
| 40             | −10        | 0.7                           | 40            |
| 40             | −5         | 0.7                           | 40            |
| 40             | −15        | 0.7                           | 40            |
| 40             | −20        | 0.7                           | 40            |

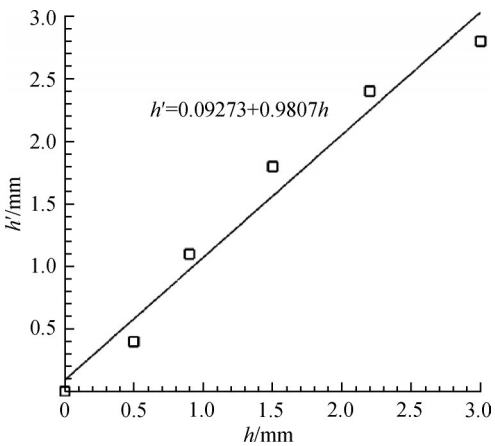


图 20 光纤结冰传感器测量值与实际值的偏差  
Fig.20 Deviation between measured value and actual ice thickness by optic fiber ice detection sensor

测量误差。

2.3 响应时间测试

本文在数据采集和处理软件中设置计时程序,记录开始采集数据的时间以及完成冰厚测量的处理时间,采集冰厚需要的响应时间在 0.1~0.4 s 之间,小于 0.5 s,具体数据如表 2 所示。其中测量时刻是指测量信号反馈时刻减去开始时刻的时间(s);平膜结冰传感器 1、2 的频率信号分别是 1 和 2 号平膜结冰传感器反馈信号的频率(Hz);光

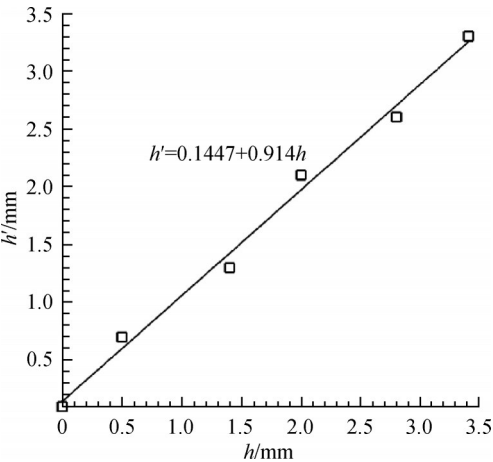


图 21 平膜结冰传感器测量值与实际值的偏差  
Fig.21 Deviation between measured value and actual ice thickness by flat film ice detection sensor

表 2 各个传感器的响应时间

| 测量<br>时刻/s | 频率信号/kHz          |                   | 光强信号/V            |                   |                   |
|------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|            | 平膜结<br>冰传感<br>器 1 | 平膜结<br>冰传感<br>器 2 | 光纤结<br>冰传感<br>器 1 | 光纤结<br>冰传感<br>器 2 | 光纤结<br>冰传感<br>器 3 |
|            | 器 1               | 器 2               | 器 1               | 器 2               | 器 3               |
| 27.500     | 23                | 22                | 2.312             | 1.599             | 1.728             |
| 28.000     | 23                | 22                | 2.307             | 1.628             | 1.729             |
| 28.490     | 23                | 22                | 2.343             | 1.623             | 1.752             |
| 28.990     | 23                | 22                | 2.330             | 1.594             | 1.741             |
| 29.440     | 23                | 22                | 2.325             | 1.617             | 1.746             |
| 29.960     | 23                | 22.25             | 2.311             | 1.596             | 1.729             |
| 30.470     | 23                | 22                | 2.342             | 1.610             | 1.725             |
| 30.940     | 23                | 22                | 2.329             | 1.609             | 1.739             |

纤结冰传感器 1、2、3 的光强信号分别是 1、2、3 号光纤结冰传感器反馈信号的电压(V)。

综上所述,经过低温冷库环境和结冰风洞低温环境的测试,本文的混合式结冰探测系统(图 22)的

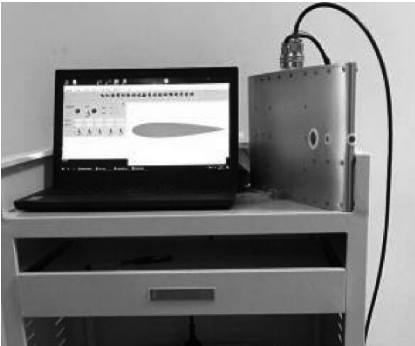


图 22 混合式结冰探测系统  
Fig.22 Hybrid ice detection system

单路测量时间不超过 0.5 s, 结冰厚度测量范围为 0.2~3 mm。

### 3 结 论

本文基于光学反射方法研制了光纤结冰传感器, 基于机械振动方法研制了平膜结冰传感器, 将两者进行组合嵌入至 NACA0012 翼型, 发展了一种基于翼面、多点分布测量的混合式结冰探测系统, 获得如下结论:

1) 混合式结冰探测系统不仅能发挥光纤结冰探测和平膜结冰探测优势, 还能实现翼面的结冰探测, 具有较好的发展前景。

2) 低温冷库环境和结冰风洞测试表明, 混合式结冰探测系统的单路测量时间不超过 0.5 s, 结冰厚度测量范围为 0.2~3 mm。

目前, 这只是初步的研究工作, 下一步还需要针对平膜结冰传感器的扫频方法、光纤结冰传感器的光纤布置方式进行研究。

### 参考文献:

- [1] KIND R J, POTAPCZUK M G, FEO A, et al. Experimental and computational simulation of in-flight icing phenomena [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 1998, 34(5/6):275-345.
- [2] BRAGG M B, BROEREN A P, BLUMENTHAL L A. Iced-airfoil aerodynamics[J]. *Progress in Aerospace Science*, 2005, 41(5):323-362.
- [3] 肖春华, 桂业伟, 易贤, 等. 结冰翼型表面明冰的压力分布和应力计算[J]. *航空动力学报*, 2009, 24(7):1457-1463.  
XIAO Chunhua, GUI Yewei, YI Xian, et al. Pressure distribution and stress calculation of glaze ice on iced airfoil[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2009, 24(7):1457-1463. (in Chinese)
- [4] 肖春华, 于昆龙, 陈辅政, 等. 结冰环境下结冰/除冰过程的气动参数测量实验技术[J]. *航空动力学报*, 2018, 33(12):2817-2826.  
XIAO Chunhua, YU Kunlong, CHEN Fuzheng, et al. Test technique of aerodynamic parameters measurement during icing/de-icing process under icing environment[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2018, 33(12):2817-2826. (in Chinese)
- [5] US Department of Transportation Federal Aviation Administration. Aircraft ice protection[R]. FAA AC20-73A, 2006.
- [6] 张杰, 周磊, 张洪, 等. 飞机结冰探测技术[J]. *仪器仪表学报*, 2006, 27(12):1582-1583.  
ZHANG Jie, ZHOU Lei, ZHANG Hong, et al. Aircraft icing detection technology[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(12):1582-1583. (in Chinese)
- [7] 王华, 王以伦, 张滨华. 基于磁致伸缩原理的结冰传感器设计理论[J]. *电工技术学报*, 2003, 18(6):77-80.  
WANG Hua, WANG Yilun, ZHANG Binhua. Theory of designing ice detector based on magnetostriction[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2003, 18(6):77-80. (in Chinese)
- [8] 王华, 张滨华, 王以伦, 等. 结冰传感器的温度补偿[J]. *传感器技术*, 2002, 21(10):31-33.  
WANG Hua, ZHANG Binhua, WANG Yilun, et al. Temperature compensation of ice detector[J]. *Journal of Transducer Technology*, 2002, 21(10):31-33. (in Chinese)
- [9] SAE Society of Automotive Engineers. Aircraft inflight ice detectors and icing rate measuring instruments[R]. AIR 4367A: 1-22, 2012.
- [11] 朱程香, 孙志国, 付斌, 等. 探头式结冰探测器安装位置分析[J]. *航空动力学报*, 2011, 26(12):2676-2683.  
ZHU Chengxiang, SUN Zhiguo, FU Bin, et al. Analysis on installation location of probe-style ice detectors[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2011, 26(12):2676-2683. (in Chinese)
- [12] 李盼, 朱家乐. FAR25 第 129 号修正案对结冰探测系统的影响研究[J]. *飞机设计*, 2018, 38(1):76-80.  
LI Pan, ZHU Jiale. Research on effect of amendment FAR 25-129 on ice detection system[J]. *Aircraft Design*, 2018, 38(1):76-80. (in Chinese)
- [13] 张龙浩. 光纤阵列式结冰探测系统的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.  
ZHANG Longhao. The research of optical fiber array icing detection system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [14] IKIADES A A, ARMSTRONG D J, HARE G G, et al. Fiber optic sensor technology for air conformal ice detection[J]. *Industrial and Highway Sensors Technology*, 2004, 5272: 357-368.
- [15] IKIADES A A, ARMSTRONG D J, HOWARD G. Optical diffusion and polarization characteristics of ice accreting in dynamic conditions using a backscattering fiber optic technique[J]. *Sensors and Actuators*, 2007, 140(1):43-50.
- [16] ZHAO Z Q. Modulation function of the reflective optical fiber sensor for peculiar and diffuse reflection[J]. *Optical Engineering*, 1994, 33(9):2986-2991.
- [17] 李薇, 侯睿, 程立. 基于忆阻桥效应的光纤式双光路结冰探测方法[J]. *传感技术学报*, 2017, 30(2):206-210.  
LI Wei, HOU Rui, CHENG Li. An icing detection method using double optical paths based on memristor-bridge effect [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2017, 30(2): 206-210. (in Chinese)
- [18] PIMPEC M L. Ultrasonic technology: a solution for in-flight and on-ground ice detection[R]. Melbourne, Australia: 21st Congress of International Council of the Aeronautical Sciences, 1992.
- [19] ROY S, IZAD A, RUSSELL G D, et al. Smart ice detection systems based on resonant piezoelectric transducers[J]. *Sensors and Actuators A*, 1998, 69(3):243-250.
- [20] 叶林. 基于压电器件的冰传感器[J]. *仪表技术与传感器*, 2001(9):6-7.  
YE Lin. A new ice sensor based on piezoelectric device[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2001(9):6-7. (in Chinese)
- [21] 张洪, 邢科新, 张杰, 等. 平膜压电谐振式结冰传感器信号检测方法[J]. *仪表技术与传感器*, 2006(4):6-11.  
ZHANG Hong, XING Kexin, ZHANG Jie, et al. Signal detection of resonant diaphragm piezoelectric ice sensors[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2006(4):6-11. (in Chinese)

(编辑: 陈 越)