

机翼结冰探测技术进展

Development of Detecting Icing Technology for Aircraft Wing

南京航空航天大学民航学院 王起达 王同光

结冰传感器作为检测结冰状态的设备在飞行器中扮演着相当关键的角色。它能给出飞机航行中结冰的信息,高性能结冰传感器还能定量给出结冰严重程度的信息,配合机载除冰装置,可使飞机在结冰气象条件下减小失事的可能性。

机翼结冰是指飞机在含有过冷却水滴的云层中飞行,当表面温度达到 0°C 以下时,机翼表面一些部位产生的冰层聚积的现象。机翼结冰会使飞机的空气动力学性能恶化,表现为升力减小,阻力增大,增加飞行的油耗,妨碍静压系统仪表指示,严重影响飞机的稳定性和操纵性。

结冰传感器作为检测结冰状态的设备在飞行器中扮演着相当关键的角色。它能给出飞机航行中结冰的信息,高性能结冰传感器还能定量给出结冰严重程度的信息,配合机载除冰装置,可使飞机在结冰气象条件下减小失事的可能性。西方发达国家对结冰传感器的研究相当重视,给予了巨大的人力和财力支撑,在理论研究和科研成果方面处于国际领先地位。由于结冰传感器在技术上的先进性及在军事应用方面的重要性,美国一直把它列为对中国的禁运产品。

结冰传感器研究至今,国外已在

理论研究方面取得了很大进展,结冰探测方法已发展到十几种。这些方法各有特点,有些已经应用于各种结冰探测的系统中,有些还处于研究阶段。下面着重介绍几种新型结冰传感器的原理和应用。

热学法结冰传感器

1 热流法结冰传感器

这是一种表面型结冰探测方法,热流原理通过测量流过物体表面热流的变化来确定物体表面存在的污染物,像霜、非冰流体、冰等。如果传感器表面有冰层,实际热流梯度将比计算值或理论热流梯度单调减小。表面条件的变化被传感器探知后送到信号处理电路,在这里与流过同一环境空气中干净物体表面的热流值进行计算比较。这种热流特性的差别可以用来指示物体表面的特定状况,如结冰量^[1]。

2 潜热式传感器

潜热式传感器的原理是通过测量物体表面冰层被加热融化所需要的潜热来判断其存在,通过对这种传感器输出信号的电路处理还能指出结冰的速率。这种传感器有2种类型:一种类型采用电流脉冲方式,另一种类型采用恒温方式^[2]。

电流脉冲方式使用周期的脉动电流流过电阻加热探头,如果冰聚积在探头上,探头温度会在 0°C 暂时停止升高。传感器对温度敏感并指出这种状况。

恒温方式测量在恒定温度(典型值 90°C)下加热探头所需的功率,仪器必须在无冰条件下置“零”,由水的冲击产生的功率的增加会指出水或冰的存在。

机械法结冰传感器

1 磁致伸缩结冰探测系统

铁磁性物质由于磁场的变化,其长度和体积都要发生微小的变化,这

种现象称为磁致伸缩。当磁致伸缩结冰传感器振管表面出现冰层时，其轴向固有频率会产生偏移，使电路的谐振频率也产生偏移。通过检测轴向固有频率偏移量即可确定结冰状态。1967年，美国 Rosemount 公司的 Frank D. Werner 和 Ear A. Gridhein 等人开始研究设计了振管式冰传感器。国内哈尔滨工程大学研究的结冰传感器，也基于磁致伸缩原理，在研究的基础上还进行了建模仿真、温度补偿等，技术较成熟。振管探头与传感器外壳采用一体化设计，属于插入式结构^[3]。这种冰传感器采用磁致伸缩振动管式结构，探头与传感器为一体化设计，具有强度高、可靠性好、性能稳定等特点。波音 747、波音 767、MD-11 和 MD-80 型飞机安装的均为这种结构原理的冰传感器。

2 基于压电效应的结冰传感器

瑞典 Vibro-Meter 公司产品基于固体的谐振频率随着质量和刚度的变化而改变这个原理，使用一个在谐振频率振动的膜片测量结冰。传感器膜片上冰的沉积引起膜片刚度和质量的改变，刚度的增加使膜片谐振频率增加，质量增加的影响则与其相反。由于结冰造成刚度增加的影响比质量增加的影响大，故使得振动膜片的谐振频率增加；而当水或其他液体附着在膜片上时，使质量增加但不增加刚度，谐振频率降低。因此，通过监测振动膜片的谐振频率的改变，可以判断是否有冰结成及冰厚的大小。此装置的优点主要是体积小、结实，可齐平安装在机翼表面，抗环境干扰，测量精度高，测量范围大，可持久工作，并能区分冰或其他附着物。除瑞典的产品外，国内华中科技大学在吸收国外经验的基础上，自主研发出新型平膜式结冰传感器^[4]，产品测量范围为 0 ~ 2.0mm，测量灵敏度达到了 0.1mm，响应速度快，工作温度在 -55℃ ~ +180℃。除测冰

外，该传感器还集成了微型测温元件，有智能化软件进行温度补偿，并具有弱、中、强 3 级结冰强度报警功能，报警阈值设定点和阈值点增量均可由人工设定或系统软件设定，具有很高的应用价值。

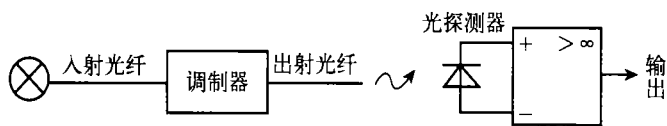
光学法结冰传感器

1 红外阻断法结冰传感器

红外阻断法结冰传感器通常采用探针型，固定安装在机身外^[5]。

当传感器探头没有结冰时，红外线发生器发射的红外线可以直接被接收器接收，此时接收器不输出电压；当传感器探头结冰时，发射的红外线会被阻断，随着结冰厚度的增加，接收器接收到的红外线逐渐减少，使输出电压逐渐增加。接收器输

的一种新型传感器，目前已有一些产品投入市场，但多数光纤传感器还处于试验和研究阶段。研究较早的有美、日、英、德等国家。光纤测冰的原理是根据不同冰型条件下光的回散射、反射以及传输特性的不同来确定不同的冰型，根据光在不同冰厚中反射和散射回来的光强的不同确定冰厚。这种传感器有一个玻璃表面，光源发射出红外光，由发射光纤传输，透过玻璃表面到达探测面。当探测端面没有结冰时，发射光将射入空气，接收器端面将基本探测不到任何发射光。当探测表面有冰结成时，光在冰层内发生反射、散射、透射、吸收等一系列作用，其中的冰层空气界面的反射光以及在冰层内的散射光经过玻璃表面进入接收光纤，通过检测



光纤结冰传感器工作原理

出的电压与接收到的红外线量成反比，当冰厚增加到一定值时，红外线被全部阻挡，此时输出电压达到最大值，引发冰探头内部加热器工作，把冰除去，使输出电压变低。传感器工作在结冰环境中时，由探头反复地进行结冰 - 除冰操作。

2 光纤结冰传感器

光纤传感器是 70 年代发展起来

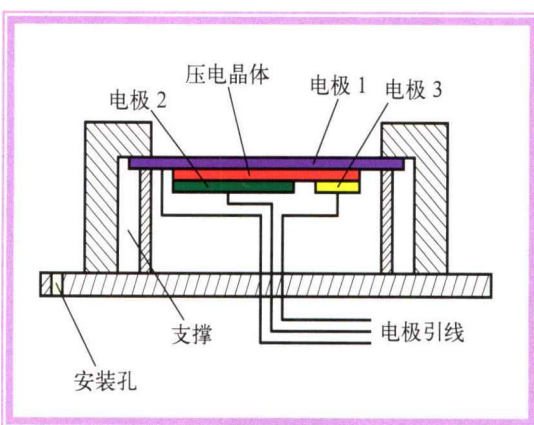
接收光信号的强度及变化趋势，结合不同冰型的特性，能达到测量冰厚和区分冰型的目的。

波导法结冰传感器

1 微波式结冰传感器

微波式结冰传感器由一个安装在物体表面的表面有绝缘层的波导管构成，当有冰聚集在波导管绝缘层的表面时，增加了波导管的有效厚度，从而降低了它的谐振频率，可以通过谐振频率的偏移量计算出冰层的厚度。

在实验室条件下测量的冰层厚度可以达到 25mm，理论上它可以测量更重的冰。这种结冰传感器已在空中加油机 Cessna Crusader 303 上成功地进行了飞行试



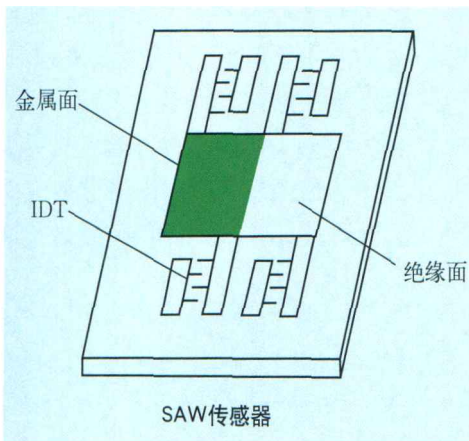
平膜式传感器结构图

验^[6]。

这种传感器的优点是没有可动部件,分辨率非常高,可用于初期结冰指示或精确测量结冰速率。这种微波器件的设计可以忽略水和其他液体的影响,或用其他仪器来测量这些影响。

2 回波式结冰传感器

高频声波在冰和空气的界面会被反射,把一个小压电探头和一个发射超声波的器件安装于机翼的表面,如果有冰出现在机翼表面时,被冰和



空气界面反射的超声波会被压电器件接收,通过电路处理,就可以由声波在冰中的传播而产生的发射和接收的时间延迟确定。这种冰传感器的优点是它的非插入式结构,缺点是需要两个探头,体积较大。

3 表面声波(SAW)传感器

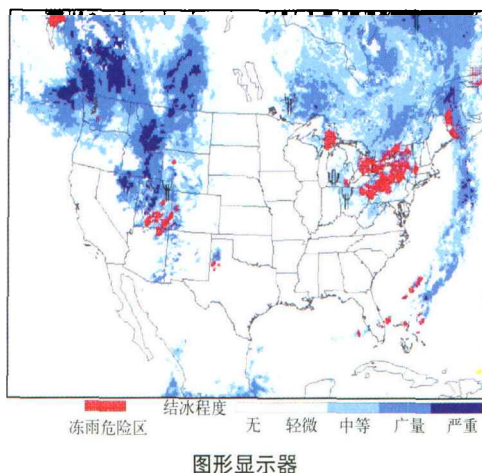
表面声波谐振传感器是根据超声表面波振荡器的频率随被测量物体声特性的变化而变化的原理来实现对被测量物体进行检测的。这种传感器由天线发射电磁波,由与SAW装置相连的一个小天线接收,随后将这种EM波转换成声波,并转发回给读系统。采用的电磁波形式通常为乐甫波,因为乐甫波本质上是SH偏振导波,而探测结冰本质上是在一种液体环境中进行的,纵波模式不能有效地应用,且乐甫波能量集中在薄的导向层中,它对传播特性的改变与相等的SH-APM或纯SH模式相比更加灵敏^[7]。该传感器使用

叉指换能器(IDE或IDT)在传感器表面的接触面及周围介质中产生乐甫波,由于被测的液体或固体的机械和电子特性的影响,波的波速和衰减会发生改变。传感器由2个IDT传感装置组成,一个是金属化的,另一个是绝缘的。在金属化传感装置表面传播的乐甫波特特性受液体的机械特性的影响,作为由机械原因产生的参考信号。另一方面,在绝缘传感器表面传播的乐甫波特特性受液体的机械和电子特性影响,可作为传感信号。乐甫波的速度转移和衰减改变可根据参考信号和传感信号间的相差和幅值比率测取,获得结冰信息。

其他结冰探测技术

在美国,航空气象用户能从一种称为“图形显示器”上收看到飞行中飞机结冰情况的最新的详细报告。

图为新的CIP系统显示的9000英尺(约2740m)高空可能结冰的范围和严重程度,其中红色标志区存在 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ 的液态过冷的大水滴,这些冻雨中的水滴对飞机能造成特殊的危害。因此,所有的飞机都必须避免进入红色标志区。图形显示器是“通用结冰预报产品”(CIP)系统升级后的一部分,新产品由联邦航空管理局资助并已在NCAR研发出来,可以提供飞机调度员、飞行员和其他航空气象用户使用。由NCAR科学



家研发的图形显示器将能在第一时间报告各地区飞机遭遇结冰的可能性和严重性。这一高性能预报产品能让飞机避开有潜在危险的结冰环境而达到提高飞行安全性的目的。

结束语

结冰传感器出现的历史并不长,然而由于它在军事领域的重要性,一出现就受到世界发达国家的重视。到了90年代中期,美国的多种军用及民用飞机都先后安装了结冰传感器。不仅如此,美国还把结冰传感器应用于导弹、雷达及无线电发射塔等^[2,8]。经过50多年的研究和开发,目前探测机翼结冰的技术已经比较成熟,除已生产出一系列较完善的产品外,对新技术的研发也很活跃。振动法测量结冰技术是美、俄等发达国家正在研究的方法,它具有很高的分辨能力,可采用一体化设计,可靠性高,是目前国际上少数具有实用价值的结冰探测方法中应用前景最好的一种。瑞典Vibro-Meter公司的平膜式结冰传感器因具较高的灵敏度和准确度,获得了较为广泛的应用;国内华中科技大学自主研发的平膜式结冰传感器也获得了成功。光纤传感器具有灵敏度高、结构简单、体积小、耐腐蚀、电绝缘性好、光路可弯曲、便于实现遥测等特点,与集成光路技术相结合,使光纤传感器有高的带宽、低的信号处理电压,可靠性高,成本低。目前,各种新型结冰探测方法的研究

开发都具备了一定的理论基础,其高性能及独特的优点会对传统的结冰探测技术产生较大冲击,特别是与气象产品相结合,将具有更好的研发前景和应用价值。

注:本文有参考文献8篇,因篇幅所限未能一一列出,读者如有需要,请向编辑部索取。

(贞编 侧卫)