

基于红外光谱吸收的结冰速率传感器设计*

赵勇^{1,2}, 张波³

(1 北京理工大学宇航学院, 北京 100081; 2 中航机电系统有限公司, 北京 100028;

3 武汉航空仪表有限责任公司, 武汉 430074)

摘要:结冰速率传感器是保证飞机在结冰气象条件下安全飞行的重要部件。基于红外光谱吸收的结冰速率传感器较其他型式的精度更高。对红外结冰速率传感器进行研究, 推导了双波长对比吸收测量冰厚的理论模型。设计了一种采用对光源驱动电路进行脉冲调制驱动双光源的红外结冰速率传感器。提出了其关键技术并给出了解决方案。研究内容为红外结冰速率传感器的实际应用提供了参考依据。

关键词:红外光谱吸收; 朗伯-比尔定律; 结冰速率传感器; 光源驱动电路; 光电检测电路

中图分类号: V244.15 **文献标志码:** A

Icing Velocity Sensor Based on Infrared Spectrum Absorption

ZHAO Yong^{1,2}, ZHANG Bo³

(1 School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2 Electromechanical Systems Co. Ltd, Aviation Industry Corporation of China, Beijing 100028, China;

3 Wuhan Aviation Instrument Co. Ltd, Wuhan 430074, China)

Abstract: Icing velocity sensor is an important component to protect aircraft flight under icing conditions. The icing velocity sensor based on infrared spectrum absorption is more precise than others and was studied in this paper. The theoretical model of ice thickness measurement using double contrast wavelength absorption method was deduced. An icing velocity sensor based on the infrared spectrum absorption was designed, in which two infrared laser diodes driven by pulse circuit were used. The key technologies of the icing velocity sensor based on infrared spectrum absorption were proposed, along with solutions. The study provides a reference for the practical application of the infrared icing velocity sensor.

Keywords: infrared spectrum absorption; Lambert-Beer law; icing velocity sensor; lamp-house drive circuit; photo-electricity detection circuit

机悬停状态下测试飞机表面的结冰速率^[1]。

0 引言

飞机结冰是影响飞机安全飞行的重要因素之一。严重结冰会破坏机翼等表面的气动力学, 导致飞行效率或飞行能力的降低, 使得消耗更多的发动机动力。结冰还会导致控制面板、制动器和起落架等的故障。清洁的冰能够以超过 12.7mm/min 的速度凝结, 飞机结冰后会导致飞机抬升力降低, 拖曳力升高, 飞机操纵特性下降。严重结冰时, 飞行员往往有较少的反应时间, 飞机就失去控制。为了探测飞机的结冰, 一般在飞机上安装有结冰探测器, 目前已有的结冰探测系统包括基于测谐振频率变化、电容量变化、热容量变化、导电率变化和超声波测厚等等各种, 它们各有优缺点。文中设计了一种基于红外光谱吸收的结冰速率传感器, 其显著优点是精度较高, 并且可以在直升

1 红外光谱吸收测厚原理

当物质分子被光照射时, 将吸收能量引起能级跃迁。如果用红外线(1~0.025eV)照射分子, 此能量不足以引起电子能级的跃迁, 而只能引发振动能级和转动能级的跃迁, 得到的光谱则为红外光谱。红外吸收光谱又称红外分光光度法。它是利用物质对红外电磁辐射的选择性吸收特性来进行定性、定量和结构分析的一种分析方法。具体的红外光谱吸收测厚如下: 一束光照射到透明或半透明的被测物体(如图1), 入射光强度和透射光强度之间的关系满足朗伯-比尔定律^[2]:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot \exp[-\alpha(\lambda) \cdot D] \quad (1)$$

式中: $I_0(\lambda)$ 为入射光强度; $I(\lambda)$ 为透过被测物体的

* 收稿日期: 2013-01-08

作者简介: 赵勇(1978-), 男, 山西太原人, 高级工程师, 博士研究生, 研究方向: 飞行器设计。

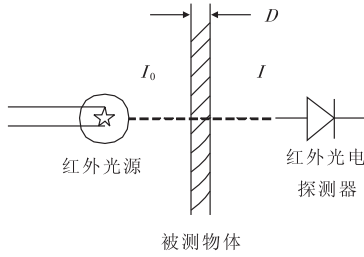


图 1 红外测厚原理

透射光强度; $\alpha(\lambda)$ 为被测物体的红外光吸收系数; D 为被测物体的厚度。

对于某种特定成分的被测物体, $\alpha(\lambda)$ 是常数,可精确测定,因此原则上只要固定 $I_0(\lambda)$,测定 $I(\lambda)$,即使用单一波长可以测出 D 。但由于存在着红外光源老化、光电探测器及电子系统漂移等不稳定因素的影响,精确稳定的测量系统难以实现。因而实际中采用了能减少上述不良影响的双波长交替吸收测量方式,即选择吸收系数大的红外波长为测量波长 λ_M ,吸收系数小的波长为参考波长 λ_R ,当以这两种光交替透过厚度为 D 的被测物体时,其透射光强分别为^[3]:

$$I(\lambda_R) = I_0(\lambda_R) \cdot \exp[-\alpha(\lambda_R) \cdot D] \quad (2)$$

$$I(\lambda_M) = I_0(\lambda_M) \cdot \exp[-\alpha(\lambda_M) \cdot D] \quad (3)$$

将式(2)除以式(3),然后取对数,并令 $\alpha = \alpha(\lambda_M) - \alpha(\lambda_R)$,则有:

$$\ln \frac{I(\lambda_R)}{I(\lambda_M)} = \ln \frac{I_0(\lambda_R)}{I_0(\lambda_M)} + \alpha D \quad (4)$$

等式右边第一项是由光源与接收器等特性决定的常数,不受被测物体影响,并可通过电器调整使其为零,因此,只要检出 $I(\lambda_M)$ 、 $I(\lambda_R)$ 后,再经对数电路演算处理,就能求出厚度 D 。

$$D = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{I(\lambda_R)}{I(\lambda_M)} \quad (5)$$

2 红外光谱吸收的结冰速率传感器方案设计

为了得到冰的测量波长 λ_M 和参考波长 λ_R ,对冰进行红外光谱扫描试验。图 2 是 4 块不同冰样品试验测定的近中红外光谱,图 3 是 2 块不同冰样品试验测定的近红外光谱。

从图 2、图 3 可初步确定 7350cm^{-1} 为冰的弱吸收峰,对应波长为 1360.54nm ; 6800cm^{-1} 为冰的强吸收峰,对应波长为 1470.59nm 。试验结果可作为红外结冰速率传感光源、光电探测器及光传输方式选型的依据。若采用强弱吸收对比分析法,则红外光源输出光谱应至少包括 1361 和 1471nm 两波长。

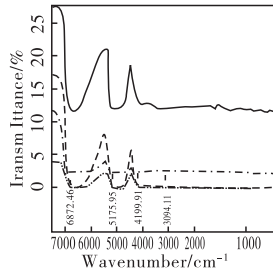


图 2 不同冰块的近中红外光谱

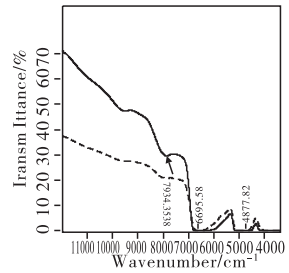


图 3 不同冰块的近红外光谱

红外光谱吸收结冰速率传感器的具体实现方案如图 4 所示。光源 1、2 分别由光源驱动电路 1、2 控制,通过控制电路发出的电脉冲控制光源驱动电路 1、2 交替通断。两只光源发出交替出现的光强脉冲分别通过 1550nm 的光纤 A、B 进入 1×2 的光纤耦合器,然后进入同一个光源探头交替照射到被测冰面上,透过冰面的透射光强被光电探测器感知并转换为相应的电信号。交替出现的两路电信号分别被前置放大电路放大,然后滤波,滤波后的电信号分别通过信号检测电路的 AD 变换器转换为数字信号。两路数字信号在信号检测电路中按照式(2)~式(5)运算,得到厚度对应的数字电压信号。数字信号经信号检测电路的 DA 变换器转换为模拟信号,表征冰厚的模拟电信号经信号检测电路的通讯接口电路送上级系统或显示装置。

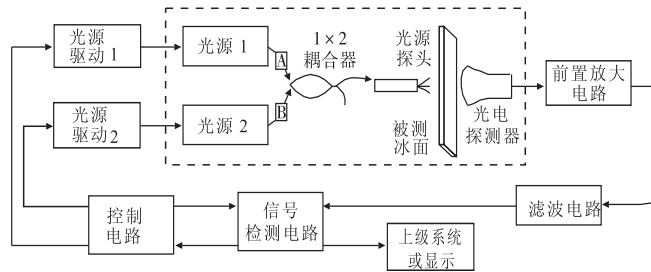


图 4 红外结冰速率传感器原理框图

3 关键技术及其解决措施

3.1 光源调制技术

基于红外光谱吸收的结冰速率传感器对光源的光强和光谱稳定性要求很高,除了光源自身性质外,光源所处工作环境温度和光源驱动电流对光源的光强和光谱稳定性影响最大,因此控制光源的光强和光谱稳定性是红外结冰速率传感器的一项关键技术,本方案拟设计高精度的恒流源驱动电路和温控电路来保证获得高性能的光源。

本方案恒流源采用 ACC 工作方式,整体设计方案采用深度负反馈控制原理。恒流源电路原理如图 5 所示,由电压基准电路、电压电流转换电路、保护电

路组成。采用 2.5V 的电压基准,产生的基准电压经过放大后送入运放的同相端,该运放控制跨导放大器的导通程度,从而获得相应的输出电流并在取样电阻上产生取样电压,该取样电压经放大后作为反馈电压反馈回电压放大器的反相输入端,并与同相输入端的电压(即由电压基准产生并经前级放大的电压)进行比较,对输出电压进行调整,进而对输出电流进行调整,使整个闭环反馈系统处于动态平衡中,以达到稳定输出电流的目的^[4]。

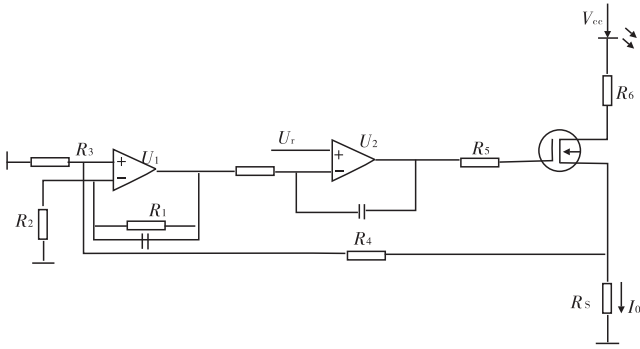


图 5 反馈型恒流源电路图

3.2 红外光电信号检测技术

红外探测器接收红外光产生的电信号十分微弱,极易受干扰,因此稳定可靠的前置放大电路也是红外结冰速率传感器的关键技术之一。本方案采用以 AD8304 为核心的高精密、低漂移的模拟放大电路,并采用窄带滤波电路来提高系统的信号检测性能。

由于光强信号的动态范围较大,从微瓦到瓦量级变化,采用普通的线性放大器难以满足要求。本方案采用光功率测量专用芯片,即 AD 公司的对数放大器 AD8304,该芯片直接将电流信号转换为电压信号,并将光功率的大动态范围压缩到一个很小的范围,可以有效解决信号的大动态范围的问题。此外该芯片还集成了二级放大功能,可以简化电路,以提高系统的可靠性^[5]。

4 红外结冰速率传感器的系统建模

如 2 节所述被测冰厚与透射光强的关系为式(5)。

AD8304 输入光强与输出电压的关系为:

$$V_{\text{LOG}} = V_Y \log_{10}(I_{\text{PD}}/I_Z) \quad (6)$$

式中: V_{LOG} 为对数放大器的输出电压, V_Y 为 0.2V, I_{PD} 为输入光强, I_Z 为 100pA。

因此:

$$V_{\text{LOGR}} = V_Y \log(I_R/I_Z) \quad (7)$$

$$V_{\text{LOGM}} = V_Y \log(I_M/I_Z) \quad (8)$$

所以:

$$I_R = I_Z 10^{\frac{V_{\text{LOGR}}}{V_Y}} \quad (9)$$

$$I_M = I_Z 10^{\frac{V_{\text{LOGM}}}{V_Y}} \quad (10)$$

将式(9)和式(10)代入到式(5)中得到:

$$D = \frac{1}{\alpha} \ln 10^{\frac{(V_{\text{LOGR}} - V_{\text{LOGM}})}{V_Y}} = \frac{1}{\alpha} \frac{\lg 10^{\frac{(V_{\text{LOGR}} - V_{\text{LOGM}})}{V_Y}}}{\lg e} \quad (11)$$

式中, V_{LOGR} 为对数放大器输出的参考光强对应的电压; V_{LOGM} 为对数放大器输出的测量光强对应的电压; $V_Y = 0.2\text{V}$;e 为自然对数。所以:

$$D = \frac{11.5129}{\alpha} (V_{\text{LOGR}} - V_{\text{LOGM}}) \quad (12)$$

令式(12)中 $V_{\text{LOGR}} - V_{\text{LOGM}} = V_{\Delta}$; $\frac{11.5129}{\alpha} = k$ 为

冰厚的标度因子,单位为 mm/V,因此冰厚与对数放大器一个周期内输出的电压差成线性关系,并且可以根据红外结冰速率传感器灵敏度和测量阈值的需要,灵活的选取测量波长和参考波长,以改变 k 值。

5 结束语

文中设计的双光源方案较传统的旋转滤波镜斩波方案,具有体积小,质量轻,易于扩展传感路数,全固态,成本较低等显著的优点。本方案还可用于红外光谱吸收的气体检测及薄膜测厚等应用中,具有较为广泛的实用和经济价值。但是该方案的缺点是光路较为复杂,光源驱动电路的性能要求较高,文中对这两个问题均进行了详细的论述,并给出了解决方案。

参考文献:

- [1] J. F. Marchman. A cheap, effective icing detector for general aviation aircraft[J]. AIAA Aircraft Systems and Technology Meeting, 1979(8): 23 - 31.
- [2] 熊友辉,蒋泰毅. 电调制非分光红外 (NDIR) 气体传感器[J]. 仪表技术与传感器, 2003(11): 22 - 26.
- [3] 甘宏,潘丹,张洪春. 便携式非分光红外吸收型二氧化碳传感器[J]. 桂林电子科技大学学报, 2007, 27(1): 19 - 22.
- [4] 王忠林,阎明媚. 半导体激光器恒流驱动电路的研制[J]. 滨州学院学报, 2007, 23(3): 30 - 32.
- [5] Analog Devices. 160dB Range (100pA - 10mA) Logarithmic Converter[OL]. www.analog.com.