

doi: 10.3788/gzxb20144305.0506001

基于光纤光栅的物体表面附近温度场测量

余有龙, 薛航, 王彦晓, 段营营

(合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 合肥 230009)

摘 要:提出一种利用光纤布喇格光栅温度传感器测量物体表面法向局域内温度场分布的新方法. 将多个毛细管封装的波分复用光纤光栅温度传感器串接, 沿待测位置法线方向平行于表面等间距放置, 对法向局域内的温度进行准分布式监测, 封装后的传感器响应时间为 2.74 s. 利用 ANSYS 软件对空气的热稳态层流进行分析, 获得温度场分布的等值线图. 实验得到温度随高度变化的一阶变化率为 -24.262 , 二阶变化率为 10.1172 , 而 ANSYS 仿真结果给出的分别为 -22.842 和 8.613 , 两者基本相符, 验证了此测量方法的可靠性. 该技术为了解温度场的局域分布提供了技术支持, 为航空器选材和构型的确定提供新的测试方案.

关键词: 光纤光学; 光纤布喇格光栅; 波分复用; 温度分布; 传感器; 分布式传感; 流场

中图分类号: TN247

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)05-0506001-4

Temperature Distributed Sensing Technique for the Local-area of the Surface Based on Fiber Bragg Gratings

YU You-long, XUE Hang, WANG Yan-xiao, DUAN Ying-ying

(School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Micro-packaged fiber Bragg grating temperature sensor is used to perform the distributed temperature sensing for the local area of the object surface. Packaged with steel capillary, ten wavelength-division-multiplexed temperature sensors are cascaded and placed in parallel along the tangential direction at the observed point for making quasi-distributed detection. The response time of the packaged sensors is 2.74 s. Using ANSYS software to analyze the thermal steady-state laminar flow of air the contour plots of temperature distribution was obtained. Experiments show that the first-order change rate of the curves of temperature change with height is -24.262 , and the second-order change rate is 10.1172 . Comparing with the result of ANSYS simulation (its first-order change rate is -22.842 , and second-order change rate is 8.613), the reliability of this measurement method was verified. This technology provides a technical support for knowing the local distribution of temperature as well as a new testing program for aircraft material selecting and configuration determining.

Key words: Fiber optics; Fiber Bragg gratings; Wavelength division multiplexing; Temperature distribution; Sensors; Distributed sensing; Flow fields

OCIS Codes: 060.2300; 060.3735; 120.6780

0 引言

航空器(如:飞机、飞船或飞艇)飞行时,由于光照强度的差别,引起表面不同区域的温度相差很大.即便同一位置,辐射和热对流也将引起法向不同位置上温

度的明显差别,造成航空器周围气流的不平衡,以致影响飞行姿态^[1-4].若能准确探测局域内的温差,可及时予以修正.

现有的非接触式测量方式中无论是热成像法^[5]还是光谱观测法^[6],由于准确度有限,无法用于局域内温

第一作者:余有龙(1965-),男,教授,博导,主要研究方向为光纤光栅传感器及网络化技术、光纤激光以及光无源器件的研究. Email: youlongyu@163.com

通讯作者:薛航(1988-),女,硕士研究生,主要研究方向为光纤光栅传感. Email: xuehang88@163.com

收稿日期:2013-09-11;录用日期:2013-12-20

<http://www.photon.ac.cn>

差探测. 而接触式温度传感器(如:热电偶、热敏电阻、水银温度计等),因拥有较大热容或体积且其响应速度慢而无法准确、及时地捕获温度及其变化信息.

考虑光纤布喇格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)比热容小,其传感结果不受光路中光强波动和环境电磁场的干扰,还免受潮湿空气的影响. 本文利用微型化管状封装的波分复用 FBG 温度传感器串,对发热物体表面法向等间距处的温度进行精确监测,获得温度的分布信息^[7-10]. 该技术为了解温度场的局域分布提供了技术支持.

1 理论分析

对流传热时,流体与壁面间存在传热温差^[11],使得壁面附近受层流影响温度梯度较大,而湍流层内温度变化则较平缓.

由于没有外加的气体流速和压强,空气的流动主要是由物体表面和环境之间的温差引起的密度差异. 流动的 Rayleigh 数定义为^[12]

$$Ra = g\beta\Delta TL^3\rho^2 C_p / \kappa\mu \quad (1)$$

式中 g 为重力加速度, β 为温度 T 的倒数, ΔT 为冷热流体的温度差, L 为物体的特征长度, ρ 为流体密度, C_p 为流体比热容, κ 为流体导热性系数, μ 为流体粘度.

通过对飞艇在低空飞行时的实验及仿真分析可知,环境温度为 25℃ 时,低空飞艇上表面温度最高可达 80℃^[13]. 实验室环境温度为 16℃,模拟物体表面温度实测为 88℃. 为便于对比,以实验室环境参量作为仿真参量,设定物体表面温度为 88℃,环境温度为 16℃,相对湿度为 60%,标准大气压下,重力加速度为 9.81 N/kg,物体表面尺寸为 140×140 mm².

用 ANSYS13.0 FLOTRAN 软件进行空气的热稳态层流分析. 气体温度变化导致了气体密度的变化,后者引起层流流动. 取物体及其上方空气的纵截面建立平面二维几何模型,采用 FLUIN141 热-流耦合单元进行求解,对流传热系数取 10K/(m² K),仿真得到温度场分布等直线图如图 1.

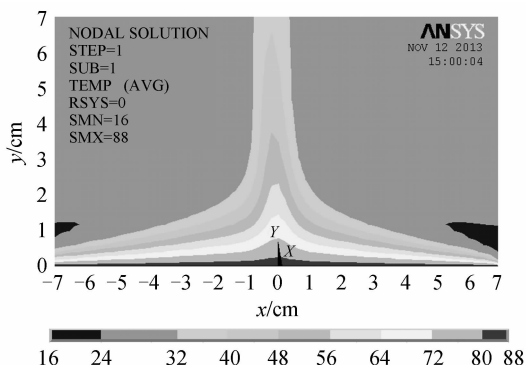


图1 ANSYS 仿真温度场分布等直线图

Fig. 1 Linear view of the temperature distribution by ANSYS simulation

图 1 是温度场等值线,其中 x 表示水平位置, y 表示物体上方高度. 在流体对流传热的情况下,流体与壁面间存在着传热温差,靠近表面附近空气的热对流使其温度跟着上升,与表面越近,流体温度变化越激烈,升温越明显,这样便出现温度的梯度分布,而随着 y 的增加变化逐渐缓和. 为了能测得物体表面小区域内的温度场分布,所选传感器必须要有足够小的体积,且不能有太大的热容使局域内温度场发生变化.

FBG 传感器的比热容为 966 J/kg℃,受热光效应和热膨胀效应的影响,其布喇格波长(λ_B)的相对漂移量为^[14]

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \xi)\Delta T \quad (2)$$

式中, $\Delta\lambda_B$ 为波长漂移值, α 为光纤材料的热膨胀系数, ξ 为热光系数. 硅纤中 $\alpha = 5.5 \times 10^{-7}$ nm/℃, $\xi = 6.67 \times 10^{-6}$ ℃⁻¹^[15].

式(2)反映了 FBG 布喇格反射波长的相对漂移量与温度变化成线性关系,1.55 μm 窗口处其灵敏度为 13 pm/℃. 在室温至 100℃ 范围对封装的 FBG 传感器进行标定,其温度曲线的线性拟合度均超过 99.7%. 由于光路中多个波分复用 FBG 传感元提供的信号互不干扰,可用来对上述局域温度进行多点分布式探测.

2 实验及结果分析

2.1 物体表面垂直方向温度场测量

实验所用解调仪具有四个输入通道,每个通道可级联最多 16 根光栅. 其内嵌光源的波长扫描范围为 1 528~1 568 nm.

为了减小应变给光栅带来的影响并对光栅进行必要的保护,要对光栅做适当的封装. 考虑传感器自身不能对温度场有过大的影响,用毛细金属管对光栅进行微型化管式封装,封装后其外径为 0.5 mm,长度为 10 mm,封装后的传感器如图 2 所示,其热容为 6.35 × 10⁻³ J/℃.

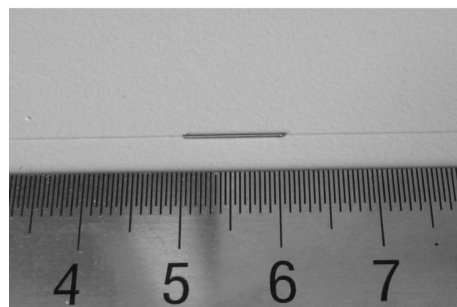


图2 毛细钢管封装 FBG 实物图

Fig. 2 Figure of FBG packaged by capillary tube

本实验选用波长间隔为 3 nm 的十个波分复用光栅级联成的光栅串作为传感器,将各光栅按照波长由小到大的顺序平行置于待测位置上方,沿法向排列,相

邻光栅间距为 1 mm,如图 3(实物图见图 4). $FBG_1 \sim FBG_{10}$ 的布喇格波长分别为:1 535. 01、1 538. 05、1 541. 02、1 544. 01、1 547. 03、1 550. 01、1 553. 02、1 556. 01、1 559. 04 和 1 562. 02 nm.

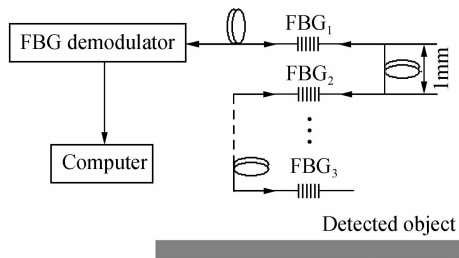


图 3 实验装置

Fig. 3 Schematic of experimental

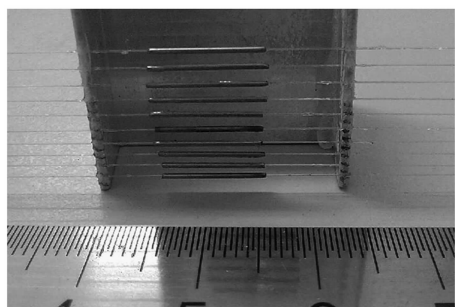


图 4 级联的温度传感器阵列

Fig. 4 Temperature sensor array

环境温度为 16℃时,用电加热器对物体被测位置加热,使其表面温度稳定在 88℃.将图 4 所示传感器阵列接入解调仪,并分布在待测物体表面,记录传感器的温度值.

2.2 FBG 温度传感器与热电偶测温对比

为了验证 FBG 温度传感器测量温度的优越性,现用测量端为裸露式 K 型热电偶与毛细管式封装 FBG 温度传感器同时测量物表上方 1 mm 处温度.两传感器的体积相近,而热容分别为 $3.21 \times 10^{-2} \text{ J/}^\circ\text{C}$ 、 $6.35 \times 10^{-3} \text{ J/}^\circ\text{C}$.保持二者接近,记下两传感器捕获的温度-时间变化关系曲线如图 5 所示.

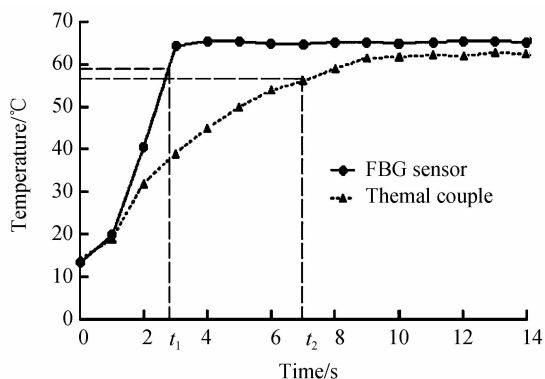


图 5 置于同一温度场,FBG 温度传感器和热电偶升温过程
Fig. 5 Comparison curve of FBG sensors and thermocouple
取二者达到最大温度值的 90% 处的时间为传感

器的反应时间,由图 5 可知,FBG 温度传感器的反应时间 $t_1=2.74 \text{ s}$,热电偶的反应时间 $t_2=7.14 \text{ s}$.且 FBG 温度传感器测得的温度稳态值比热电偶更接近仿真值.由此可知,在相同条件下,FBG 温度传感器的测量结果较热电偶不仅准确,而且其反应速度快,这决定前者有利于捕获动态变化的温度信息.

2.3 物体表面垂直方向温度场测量结果分析

对于实验观测的温度场,用如图 4 所示级联的 FBG 温度传感器阵列获得物表上方不同高度处温度值见图 6 所示,高度为 0 处表示被测物体表面温度.实线为根据所测数据进行四阶多项式拟合的曲线.

从图 1 的仿真结果,获得温度随高度分布的理论曲线如图 6 中虚线所示.

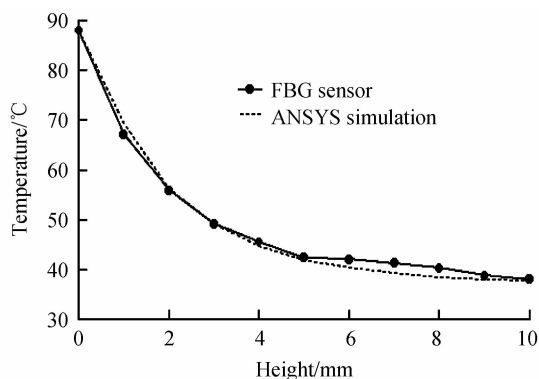


图 6 FBG 传感和 ANSYS 仿真所得温度分布图

Fig. 6 Temperature distribution by experiment and simulation

通过四阶多项式拟合可以得到温度随高度变化的函数关系:

ANSYS 仿真所得曲线为

$$T_s(h) = 0.0127h^4 - 0.3802h^3 + 4.3067h^2 - 22.842h + 87.93 \quad (3)$$

FBG 传感器测得曲线为

$$T_{FBG}(h) = 0.0167h^4 - 0.4795h^3 + 5.0586h^2 - 24.262h + 87.674 \quad (4)$$

对式(3)和式(4)分别求一阶导数得到温度场的温度梯度,即

$$T'_s(h) = 0.0508h^3 - 1.1406h^2 + 8.6134h - 22.842 \quad (5)$$

$$T'_{FBG}(h) = 0.0668h^3 - 1.4385h^2 + 10.1172h - 24.262 \quad (6)$$

由图 6 可知,利用 FBG 温度传感器测得的温度值与 ANSYS 仿真得到的结果基本相符.由式(3)~(6)可以看出二者各阶变化率相近,从而验证毛细管封装的 FBG 温度传感器测量物体表面流体温度方法的准确性和可靠性.

图 6 中,当测量高度高于 5 mm 时,测量值略高于仿真值,造成这一偏差的原因为:1) 实验室空气的流

动不全是由物体表面与周围环境的温度差造成,还存在其他的原因(温差以外的其它因素造成空气流动);2)所用电阻丝电炉,其温度值不稳定;3)表面的热辐射也会引起局域内空气出现温升,但其与热对流引起的温升相比可忽略不计,所以在仿真中忽略了热辐射的影响。

对于未封装的温度传感器,由于测点间影响更小而使得传感器感知的温度更加精确,但气流直接冲击光栅使其产生轴向应变对测量结果的影响不能忽略。对于粗管封装的传感器由于热惯量和体积的增加,将影响所测温度的真实性和及时性,因此对光纤光栅进行毛细管式封装非常必要。

3 结 论

利用FBG温度传感器对物体周围空气温度场进行了测量,得到温度随高度变化的一阶变化率为-24.262,二阶变化率为10.117 2,与ANSYS仿真结果基本一致(一阶变化率为-22.842,二阶变化率为8.613 4)。误差主要取决于实验环境条件与仿真理想条件的差别。验证了FBG对流场温度测量的可靠性,为流场温度测量提供了一种新的可行的方法。

参 考 文 献

- [1] REN Yi-peng, TIAN Zhong-wei, WU Zi-niu, *et al.* Some aerodynamics problems of airship[J]. *Acta Astronautica Sinica*, 2010, **31**(3): 431-433.
仁一鹏, 田中伟, 吴子牛. 飞艇空气动力学及其相关问题[J]. *航空学报*, 2010, **31**(3): 431-433.
- [2] YANG C, WANG Y. Thermal analysis of a stratospheric airship in working process [C]. AIAA Balloon Systems Conference, Seattle, USA, May 4-7, 2009.
- [3] YAO Wei, LI Yong, WANG Wen-jun, *et al.* Thermodynamic model and numerical simulation of a stratospheric airship take-off process[J]. *Journal of Astronautics*, 2007, **28**(3): 603-607.
姚伟, 李勇, 王文隽, 等. 平流层飞艇热力学模型和上升过程仿真分析[J]. *宇航学报*, 2007, **28**(3): 603-607.
- [4] LI Zhi-bin, WU Lei, ZHANG Jing-rui, *et al.* Review of dynamics and control of stratospheric airships[J]. *Advances in Mechanics*, 2012, **42**(4): 482-493.
李智斌, 吴雷, 张景瑞, 等. 平流层飞艇动力学与控制研究进展力学进展[J]. *力学进展*, 2012, **42**(4): 482-493.
- [5] MERIAUDEAU F. Real time multispectral high temperature measurement; Application to control in the industry [J]. *Image and Vision Computing*, 2007, **25**(7): 1124-1133.
- [6] DAI Jing-min. Survey of radiation thermometry [J]. *Techniques of Automation and Application*, 2004, **23**(3): 1-7.
戴景民. 辐射测温的发展现状与展望[J]. *自动化技术与应用*, 2004, **23**(3): 1-7.
- [7] YU Da-kuan, QIAO Xue-guang, JIA Zhen-an, *et al.* A novel packaged fiber Bragg grating temperature sensor with high temperature-resistance[J]. *Acta Photoica Sinica*, 2006, **35**(2): 232-234.
禹大宽, 乔学光, 贾振安, 等. 一种新颖封装的耐高温光纤Bragg光栅温度传感器[J]. *光子学报*, 2006, **35**(2): 232-234.
- [8] ZHOU Zhi, ZHAO Xue-feng, WU Zhan-jun, *et al.* Study on FBG sensor's steel capillary encapsulating technique and sensing properties[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, **29**(12): 1089-1092.
周智, 赵雪峰, 武湛君, 等. 光纤光栅毛细钢管封装工艺及其传感特性研究[J]. *中国激光*, 2002, **29**(12): 1089-1092.
- [9] YU You-long, TAN Hua-yao, WANG Qi. Fiber-laser based wavelength division multiplexed fiber Bragg grating sensor system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(5): 592-595.
余有龙, 谭华耀, 王骥. 基于光纤激光器的波分复用光纤光栅传感系统[J]. *光学学报*, 2002, **22**(5): 592-595.
- [10] ZHANG Wei-gang, ZHOU Guang, LIANG Long-bin, *et al.* Experiment of temperature sensitivity fiber grating component packaged with mixed polymer [J]. *Acta Photoica Sinica*, 2001, **30**(8): 1003-1005.
张伟刚, 周广, 梁龙彬, 等. 混合聚合物光纤光栅封装元件的温敏实验[J]. *光子学报*, 2001, **30**(8): 1003-1005.
- [11] 戴炳生. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 第二版, 1998: 105-109.
- [12] SUN Liang, SUN Yi-feng, SUN De-jun, *et al.* Horizontal convection in a narrow rectangular cavity [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2006, **21**(2): 252-258.
孙亮, 孙一峰, 孙德军, 等. 水平自然热对流中流量和热通量的研究[J]. *水动力学研究与进展*, 2006, **21**(2): 252-258.
- [13] HU Sheng, FENG Wei-bing, ZHANG Wu, *et al.* Analysis of thermal environment of low-altitude airships[J]. *Computer Engineering and Design*, 2011, **32**(4): 1474-1477.
胡晟, 封卫兵, 张武, 等. 低空飞艇太阳辐射热环境分析[J]. *计算机工程与设计*, 2011, **32**(4): 1474-1477.
- [14] 余有龙. 光纤光栅传感器及其网络化技术[M]. 黑龙江: 黑龙江科学技术出版社, 2003: 112-115.
- [15] 吴朝霞, 吴飞. 光纤光栅传感原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 41-42.