

Fiber Bragg Grating Flow Sensor*

HU Yurui¹, TANG Yuanhong¹, LI Chuan^{2*}

(1. China National Aviation Fuel Yunnan Company, Kunming 650200, China;
2. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China)

Abstract: Flow sensor with Fiber Bragg Gratings as transducer and target-type sensing structure as elastic component is designed. Two FBG's are stuck to the upper and lower areas of the cantilever. An effective solution Double-grating structure has been taken for the strain and temperature cross-sensitivity, the measurement sensitivity is improved. The experimental results show that the response sensitivity of the sensor is 33.6 pm/kg, and the accuracy is 0.5 %.

Key words: flow sensor; fiber Bragg grating; Double FBG; temperature compensation; Bragg wavelength; load
EEACC: 7230E;7320C

光纤 Bragg 光栅流量传感器*

胡玉瑞¹, 唐源宏¹, 李川^{2*}

(1. 中国航空油料有限责任公司云南公司, 昆明 650200;
2. 昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 昆明 650051)

摘要: 采用靶式结构作为光纤 Bragg 光栅流量传感器的换能元件, 其中两片光栅分别粘贴于等强度悬臂梁的上下两表面。采用双光栅粘贴方式对传感器进行温度补偿, 有效的解决了应变与温度交叉敏感的问题, 提高了测量灵敏度。实验表明该靶式光纤 Bragg 光栅流量传感器的载荷响应灵敏度为 33.6 pm/kg, 测量精度为 0.5 %。

关键词: 流量传感器; 光纤 Bragg 光栅; 双光栅; 温度补偿; Bragg 波长; 载荷

中图分类号: TP212.1; TN253

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2010)04-0471-04

由于光纤 Bragg 光栅传感器的独特抗电磁干扰能力及易燃易爆环境中的本质安全特性, 基于光纤 Bragg 光栅的传感技术发展迅速。该类型传感器的测量及传输信号介质均为激光, 信号为波长编码, 可实现测量数据实时自我校正。特别之处在于可以在一根光纤中连续多个光栅, 形成分布式的传感网络, 能够极大地提高测量的安全性和准确性。因此在易燃易爆环境的流量检测领域, 基于光纤 Bragg 光栅的传感器具有广阔的应用前景^[1-8]。本文设计了一种轴封膜片结构的靶式光纤 Bragg 光栅流量传感器。根据测量要求对靶式光纤 Bragg 光栅流量传感器结构和尺寸进行设计, 双光栅的粘贴方式解决了传感器温度补偿, 最后进行了传感器流量传感系统的砝码干校法实验。

1 光纤光栅流量传感器原理

温度、应力的变化均会引起光纤光栅栅距和折射

率的变化, 从而使光纤光栅的反射谱和透射谱发生变化^[1-3]。通过检测光纤光栅反射谱或透射谱的变化就可以获得相应的温度、应变等信息。根据光纤耦合模理论, 光纤 Bragg 光栅的中心波长 λ_B 表示为

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (1)$$

式中 n_{eff} 为纤芯的有效折射率, Λ 为光栅周期。由式 (1) 可知, 光纤光栅的布拉格波长取决于光栅周期 Λ 和反相耦合模的有效折射率 n_{eff} , 任何使这两个参量发生改变的物理过程都将引起光栅布拉格波长的移位。应变引起光栅布拉格波长移位表示为

$$\Delta\lambda_B = 2n_{eff}\Delta\Lambda + 2\Delta n_{eff}\Lambda \quad (2)$$

式中 $\Delta\Lambda$ 表示光纤本身在应力作用下的弹性变性; Δn_{eff} 表示光纤的弹光效应。外界不同的应力状态将导致 $\Delta\Lambda$ 和 Δn_{eff} 的不同变化。光纤产生应变时, 光纤光栅的栅距和折射率发生变化, 引起后向反射光波长移位, 因此有

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\Delta\varepsilon + (\alpha_f + \xi)\Delta T = K_e\Delta\varepsilon + K_T\Delta T \quad (3)$$

式中 α_f 是光纤的热膨胀系数; ξ 是光纤材料的热光系数; P_e 是光纤材料的弹光系数; K_e 是光纤 Bragg 光栅的应变响应系数; K_T 是光纤 Bragg 光栅的温度响应系数。

可见温度、应变的变化都能够引起光纤光栅 Bragg 波长变化, 所以解决光纤光栅温度、应变的交叉敏感的问题, 可以提高传感器测量精度。

此光纤 Bragg 光栅流量传感器的测量原理为: 流体流动时冲击圆形靶片, 流体作用靶片上的力通过杠杆并以轴封膜片为支点将转动效应(力矩)传递给等强度悬臂梁, 等强度悬臂梁产生挠度(形变量)变化, 从而引起光纤 Bragg 光栅波长移位变化。通过合适的数学模型换算便可得到被测液体的流量值, 即测量过程为: 流量变化→圆形靶片受力变化→等强度悬臂梁发生挠度变化→光纤 Bragg 光栅波长发生移位→用光纤光栅解调仪检测波长移位量→通过数学模型计算出流体流量变化量。

图 1 为传感器的探头结构, 其中: 1 圆形靶片、2 测量管道、3 等强度悬臂梁、4 光纤 Bragg 光栅、5 导杆。当靶片直接与流体环境接触时, 流体流动时冲击靶片, 使靶受到一个合力的作用, 这个合力由三种力组成: 流体动压力、流体压力差和粘滞摩擦力, 流量大的时候前两种力起主导作用。它与流速 \bar{v}_1 的平方、流体密度 ρ 及靶的受力面积 A 成正比, 它们之间的正比关系为^[5]

$$F = k\rho\bar{v}_1^2 A/2 \quad (4)$$

式中: F 为靶所受到的力; A 为靶的迎流面积; \bar{v}_1 为靶和环流面间的平均流速; ρ 为流体密度; k 为阻力系数。由式(4)可以看出, 合力 F 与流速 \bar{v}_1 具有函数关系, 已知 F 的大小就可以计算出流速 \bar{v}_1 , 进而算出单位时间通过一定横截面积的流量。这样能够将流量测量转化为对力的测量。根据杠杆的力矩平衡公式

$$F_1 l_1 = F_2 l_2 \quad (5)$$

式中 $F_1 = F$ 是靶片受到的力, l_1 是靶片与杠杆的连接点到转动轴(轴封膜片)的长度; F_2 是杠杆另一端作用在等强度悬臂梁上的力; l_2 是轴封膜片到杠杆

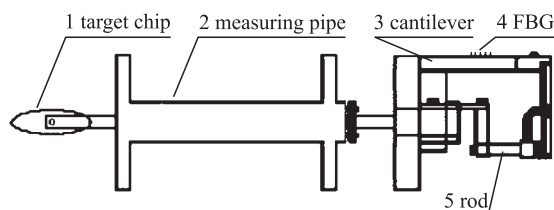


图 1 光纤 Bragg 光栅靶式流量传感器的传感探头结构

与等强度悬臂梁自由端连接处的长度。根据光纤 Bragg 光栅波长移位与悬臂梁自由端应变关系公式^[4], 由等强度悬臂梁自由端移位 ε_x 与应力 F_2 的关系得到^[4]:

$$\varepsilon_x = \frac{6 \cdot F_2 \cdot L}{E \cdot b_0 \cdot h^2} \quad (6)$$

式中, L 、 h 分别为悬臂梁的长度和厚度; E 为悬臂梁材料的杨氏模量; b_0 为悬臂梁固定端的长度。将式(5)、(6)代入到式(3)可以得到靶片受力 F_1 与光纤 Bragg 光栅波长移位之间的关系如下

$$\frac{\Delta\lambda_B}{F_1} = (1 - P_e) \cdot \frac{6 \cdot l_1 \cdot L}{E \cdot b_0 \cdot l_2 \cdot h^2} \lambda_B + (\alpha_f + \xi) \Delta T \lambda_B \quad (7)$$

通过式(7)将靶片受力 F_1 与光纤 Bragg 光栅波长移位之间的关系建立了数学模型, 通过测量光纤 Bragg 光栅波长移位就可以计算出靶片受力大小, 从而计算出流体流量值。等强度悬臂梁, 尺寸参数为: $L = 50 \text{ mm}$, $h = 7 \text{ mm}$, $b_0 = 10 \text{ mm}$; 等强度悬臂梁, 材料参数为: 铸钢的杨氏模量为 $E = 200 \text{ GPa}$; 杠杆, 尺寸参数为: $l_1 = 150 \text{ mm}$, $l_2 = 300 \text{ mm}$ 。实验中已对传感器做了温度补偿, 故可不考虑式(7)中温度对波长的影响, 将各常量代入式(7), 理论计算表明, 该传感器的灵敏度为 36 pm/kg 。

2 传感器的实验测试

光纤光栅传感器以及系统的基本构成由两大部分: 传感器系统和解调仪系统, 实验系统图如图 2 所示。光纤光栅波长解调系统为上海紫珊光电技术有限公司生产的光纤光栅传感网络分析仪 FONA-2 系列, 通道数 2, 波长范围 $40 \text{ nm} \sim \text{C-Band}$, 分辨率 1 pm , 重复性 3 pm (典型), 扫描频率 FONA-20XXA 50 Hz , 连接形式 FC/APC 或其他, 接口 $\text{USB} \times 2$ 、 $\text{VGA} \times 1$ 、 $\text{LAN} \times 1$ 、 $\text{PS} \times 2$ 、 $\text{COM} \times 1$, 尺寸(长×宽×高) $450 \text{ mm} \times 360 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$ 。



图 2 实验中的传感器与解调系统实物图

实验中,光纤 Bragg 光栅(由深圳太辰光通信有限公司提供)1、2 分别粘结在等强度悬臂梁的上下表面,因此悬臂梁发生形变时,双光栅产生的应变大小相等方向相反依据式(3),当传感头所处温度改变 ΔT ,所受应力产生的形变为 $\Delta \varepsilon$ 时有^[4,8]

$$\Delta \lambda_{B_1} = K_T \Delta T + K_\varepsilon \Delta \varepsilon \quad (8)$$

$$\Delta \lambda_{B_2} = K_T \Delta T - K_\varepsilon \Delta \varepsilon \quad (9)$$

两式相减得:

$$\Delta \lambda_{B_1} - \Delta \lambda_{B_2} = 2K_\varepsilon \Delta \varepsilon \quad (10)$$

由(5)式可知,双光栅中心反射波长的差值与 $\Delta \varepsilon$ 两倍的形变成线性关系,这不但有效的补偿了温度变化对应变测量的影响,而且将应变测量灵敏度提高了一倍。

加载从 0 kg 开始,依次增加重量,每次增加 0.5 kg,一直到 4.0 kg,然后再开始卸载,每次减少 0.5 kg;每增加或减少一次砝码计数一次即记录 FBG 中心反射波长的值,此过程反复 6 次。将得到的实验数据,以传感器的靶片固定端的载荷重量为 x 轴、加载过程中相应光纤 Bragg 光栅中心波长变化值为 y 轴,创建二维坐标图。根据测量数据按最小二乘法原理绘制出线性拟和曲线,传感器的线性度就可以很直观的从图表显现出来。

从图中可以看出,实验中过程中传感器的线性和相关性都比较好,基本无迟滞现象;波长与载荷有着很好的线性关系,同时证明了将光纤光栅粘贴于金属表面后仍然是个理想的传感元件。图 3 可以看出传感器的靶片固定端的载荷重量和光纤 Bragg 光栅中心波长移位呈线性关系,分析实验数据得出灵敏度为 33.6 pm/kg;滞后为 2.8%;重复性误差 4.3%;测量精度为 0.5%。

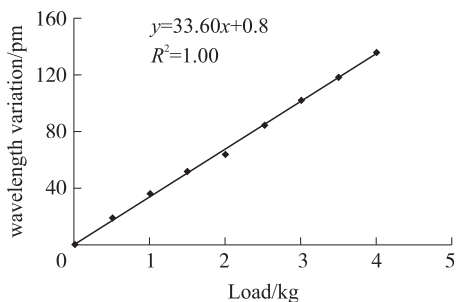


图3 实验过程拟合曲线图

在温度范围从 20 °C 至 60 °C,每隔 10 °C,对分别加载 1、2、3、4 kg 的传感器进行温度应变实验测试,结果如图 4 所示。实验中光栅 1 和 2 波长移位相减可以消除环境温度的影响,图 4 中横线代表不同温度下测得的光栅 1 和 2 的波长移位差。实验结果表明:在相同的荷载下,温度变化对传感器的数

据测量基本没有影响。

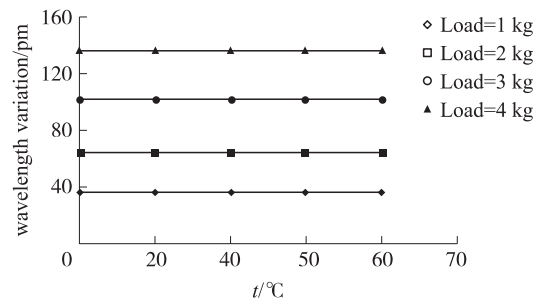


图4 不同温度下光栅 1 和 2 波长综合变化值(新增图)

由实验得出的传感器特性参数看出,光纤光栅流量传感器的灵敏度实际测量值与理论值有部分差别;经过分析认为可能由有以下两原因引起:

(1)传感器理论的灵敏度是在理想状况下得出的,而实验过程中机械传动存在阻力因素,机械传动阻力可能是产生测量误差的主要来源;

(2)在用 EPO-TEK3 53ND 型双组分环氧树脂胶粘剂时,光纤光栅与等强度悬臂梁粘贴得不够紧密,导致应力不能有效地传递到光纤光栅上,造成了传感器的灵敏度的下降。

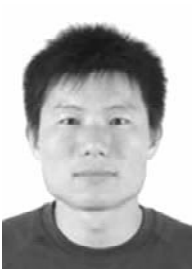
3 结论与展望

此光纤 Bragg 光栅流量传感器中换能元件采用双光栅方式粘贴,有效的解决了温度与应变的交叉敏感问题,提高了测量精度。通过对实验结果的分析,得出传感器中的光纤 Bragg 光栅波长移位值与靶片端悬挂砝码重量呈线性关系,该传感器的载荷响应灵敏度为 33.6 pm/kg,测量精度为 0.5%。考虑到目前光谱分析仪测量数据为静态数据,对流量等动态数据的解调存在较大的偏差,难以考究传感器信号的真实性和可靠性,故本阶段采用的是砝码干校法进行静态测量。此次实验数据属于初级实验室成果,若将该传感器进一步推向市场,需从其实用角度改进,进行实流测试。

参考文献:

- [1] Rao Yun-jiang, Wang Yi-ping, ZHU Tao. Fiber-Optic Bragg Grating Principle and Its Applications. Beijing: Science Press, 2005: 100.
饶云江,王一平,朱涛. 光纤光栅原理及应用[M]. 北京:科学出版社,2006.
- [2] Wang Yu, Li Chuan, Hu Yu-rui, et al. Fiber Bragg Grating Weighting Sensor Based on Double Holed Cantilever Beam[J]. Optical Technique, 2008, 34(5): 678-680.
王昱,李川,胡玉瑞,等. 双孔平行梁光纤 Bragg 光栅称重传感器[J]. 光学技术,2008,34(5):678-680.

- [3] Hill K O, Fujii Y, Johnson D C, et al. Photosensitivity in Optical Fiber Waveguides: Application to Reflection Filter Fabrication [J]. *Applied Physics Letters*, 1978, 32(10): 647-649.
- [4] Li Chuan, Zhang Yi-mo, Zhao Yong-gui, et al. *Fiber Grating Principles, Techniques, and Sensing Applications* [M]. Beijing: Science Press, 2005: 100.
李川,张以谟,赵永贵,等. 光纤光栅:原理、技术与传感应用 [M]. 北京:科学出版社,2005.
- [5] Yuan Zhong-lin, Liang Jun-ying. Sorts and Application of Target Flowmeter [J]. *Shanghai, Process Automation Instrumentation*, 2008, 29(4): 67-70.
袁中林,梁君英. 靶式流量计的分类及应用 [J]. *自动化仪表*, 2008, 29(4): 67-70.
- [6] Chen Jian-jun, Zhang Wei-gang, Tu Qin-chang, et al. High-Sensitivity Flow Velocity Sensor Based on Fiber Grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(8): 136-139.
陈建军,张伟刚,涂勤昌,等. 基于光纤光栅的高灵敏度流速传感器 [J]. *光学学报*, 2006, 26(8): 136-139.
- [7] Yu Da-kuan, Jia Zhen-an, Qiao Xue-guang, et al. Research on Fiber Bragg Grating Flowmeter and Its Progress [J]. *Study on Optical Communications*, 2008, 150(6): 37-39.
禹大宽,贾振安,乔学光,等. 光纤 Bragg 光栅流量传感器的研究及进展 [J]. *光通信研究*, 2008, 150(6): 37-39.
- [8] Wang Hai-pin, Cheng Rong, Lin Bin, et al. Temperature Compensation of FBG Sensors with Double Fiber Bragg Gratings [J]. *Laser & Infrared*, 2003, 33(3): 218-220.
王海平,陈荣,林斌,等. 双光纤 Bragg 光栅用于 FBG 型传感器的温度补偿 [J]. *激光与红外*, 2003, 33(3): 218-220.



胡玉瑞(1982-),男,山东菏泽人,硕士,目前工作于中国航空油料有限责任公司云南公司,研究方向为光电检测技术, huyurui123@163.com;



李川(1971-),男,四川成都人,博士,教授,研究方向为光纤 Bragg 光栅传感应用研究。