

温度实时补偿的高精度光纤光栅压力传感器

何少灵 郝凤欢 刘鹏飞 桑卫兵 刘 瑞 葛辉良

中国船舶重工集团公司第七一五研究所, 浙江 杭州 310023

摘要 提出了一种新型的温度实时补偿的高精度光纤光栅压力传感器。传感器基于弹性膜片结构,测压光栅直接与膜片连接,膜片在压力作用下产生轴向位移来拉动测压光栅以实现压力传感;温补光栅与弹性膜片分离,使之对外界压力不敏感,用以作测压光栅的温度补偿。测压光栅和温补光栅都施加一定大小的预拉力,使其对环境的温度响应基本相同,从而实现了温度实时补偿。传感器测压光栅与弹性膜片直接连接,消除了力的中间传递,在实现压力快速响应的同时又确保了高精度测量。实验中,传感器在温度快速变化的环境中,压力测量值的变化范围小于 $\pm 0.7\%$ F.S.;在25 MPa的压力测量范围内,压力精度达到了0.19%F.S.。

关键词 光纤光学; 光纤光栅; 温度补偿; 压力传感器

中图分类号 TN 212.14

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0605003

High Precision Fiber Bragg Grating Pressure Sensor with Real-Time Temperature Compensation

He Shaoling Hao Fenghuan Liu Pengfei Sang Weibing Liu Rui Ge Huiliang

715th. Institute of China Shipbuilding Industry Company, Hangzhou, Zhejiang 310023, China

Abstract A novel high precision fiber Bragg grating (FBG) pressure sensor is proposed. The sensor is based on the structure of elastic diaphragm. The pressure sensing FBG (PS FBG) is connected directly to the diaphragm. Axial displacement occurs under pressure and compresses the PS FBG to realize pressure measurement. The temperature compensating FBG (TC FBG) departs from the diaphragm. So it is insensitive to external pressure. Both FBGs are applied with certain pretensions. Therefore, their response to environmental temperature is nearly the same. Accordingly, real-time temperature compensation can be realized. Without strain delivery among structures, the proposed sensor responds to external pressure immediately and ensures a high precision measurement. In the experiment, the pressure measurement fluctuation of the sensor is less than $\pm 0.7\%$ F.S. during temperature variation. The pressure precision reaches 0.19%F.S. in the range of 25 MPa.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; temperature compensation; pressure sensor

OCIS codes 060.2370; 060.3735; 130.6010

1 引 言

光纤光栅压力传感器在海洋测深、油井测压、道路内部土壤压力测量等方面具有广阔的应用前景,因而受到人们广泛关注^[1-5]。但由于光纤光栅对应变和温度都敏感,要将其应用于压力测量领域中,首先要解决应变-温度交叉敏感问题。蔡安等^[6]提出了一种基于平面膜片的光纤光栅压力传感器,膜片在压力作用下产生轴向位移来压缩压力敏感光栅以实现压力传感,温度补偿通过引入一根自由状态的光栅得以实现,但由于两根光栅所处的状态完全不同,无法做到温度实时补偿。潘洪亮等^[7]提出了一种分程式双灵敏度的光纤光栅压力、温度一体化监测装置。利用分程式的封装结构在没有改变光纤光栅其他监测指标的前提下,增大了压力测量范围。通过设定封装结构尺寸及材料使该装置实现压力、温度双灵敏度一体化监测。但该传感器存在着力的机械传递,从而降低了压力测量的精度。且压力测量过程中引入了另外的温度传感器作为

收稿日期: 2015-01-09; 收到修改稿日期: 2015-02-11

基金项目: 国家863计划(2013AA09A412)

作者简介: 何少灵(1986—),男,硕士,工程师,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: heshaoing@139.com

温度参考,也无法做到实时、精确的温度补偿。

本文提出了一种新型的光纤光栅压力传感器,在实现温度实时补偿的同时,又达到了压力高精度测量的目标。实验结果表明,该光纤光栅压力传感器在温度快速变化的环境中,压力测量值的变化范围小于 $\pm 0.7\%F.S.$ (full scale),在 25 MPa 的压力测量范围内,压力精度达到了 0.19%F.S.。

2 原 理

温度实时补偿的高精度光纤光栅压力传感器如图 1 所示。传感器基于弹性膜片结构,测压光栅(PS FBG)和弹性膜片直接连接,膜片在环境压力的作用下其中心挠度发生改变,从而引起测压光栅伸长量的变化,造成其中心波长的漂移,通过检测该漂移量就可以计算出压力的变化量。温补光栅(TC FBG)与弹性膜片分离,使之对环境的温度敏感,用以作为测压光栅的温度补偿。为了使两根光栅对环境温度的响应基本相同,在传感器的设计上,采用给测压光栅和温补光栅都施加了一定大小的预拉力的方式。传感器中的弹性膜片和耐压外壳间通过两道 O 型圈和挡圈进行密封,传感器的尾纤通过光纤护套和尾纤保护套进行保护。

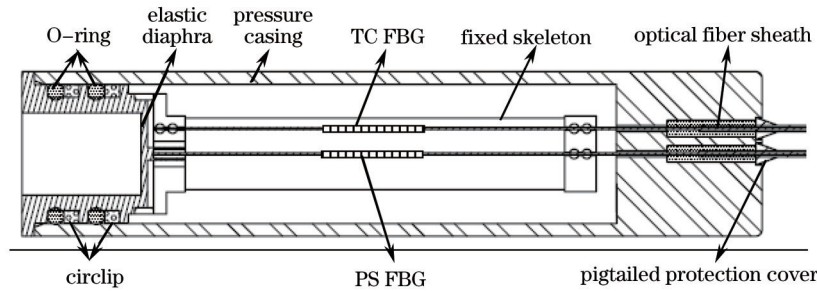


图 1 压力传感器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the proposed pressure sensor

在压力测量过程中,传感器中的测压光栅同时受温度和压力的影响,温补光栅只受温度影响,因此在光栅线性范围内,测压光栅与温补光栅的波长与压力、温度变化存在如下关系:

$$\lambda_p = K_{p1}P + K_{T1}T, \quad (1)$$

$$\lambda_T = K_{T2}T, \quad (2)$$

式中 λ_p 和 λ_T 分别为测压光栅和温补光栅的波长, K_{p1} 为测压光栅的压力系数, K_{T1} 和 K_{T2} 分别为测压光栅和温补光栅的温度系数, P 和 T 分别为环境的压力和温度。将上两式约去 T ,可得

$$\lambda_p - \lambda_T K_{T1}/K_{T2} = K_{p1}P, \quad (3)$$

令 $\lambda_p - \lambda_T K_{T1}/K_{T2}$ 为 λ ,则有

$$\lambda = K_{p1}P, \quad (4)$$

式中 λ 与 P 成正比。当测得 λ 的值时,即可计算出环境的压力。

3 实验结果与讨论

3.1 测压光栅压力系数理论仿真

传感器的仿真计算采用 Solidworks 工具完成。仿真计算中为了节约计算资源,提高计算效率,在 Solidworks 建模中将传感器结构中某些对仿真结果影响甚微的细节(如点胶小孔)进行了优化。传感器的封装材料选用弹性良好的 17-7PH 不锈钢,其杨氏模量 $E=2.034 \times 10^{11}$ Pa,密度 $\rho=7870$ kg/m³,泊松比 $\mu=0.3$,线膨胀系数 $\alpha=15.3 \times 10^{-6}$ °C⁻¹。弹性膜片的有效受压直径 $D=10$ mm,膜片厚度 $h=1$ mm。给传感器施加 1 MPa 的环境压力,弹性膜片中心挠度的位移仿真结果如图 2 所示。

从图中可以看出,在 1 MPa 的压力作用下,弹性膜片的中心挠度变化为 2.494×10^{-6} m。该中心挠度引起的光栅伸长量变化也为 2.494×10^{-6} m,光栅的有效受拉长度为 60 mm,由此可计算出光栅中心波长的漂移量约为 49.88 pm,即测压光栅的压力系数为 49.88 pm/MPa。若传感器在封装过程中,给测压光栅施加预拉力使其中心波长漂移不小于 1.5 nm,则该传感器的量程可达 30 MPa 以上。

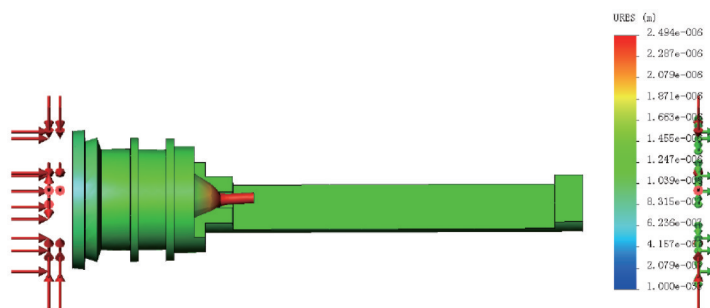


图2 传感器在 1 MPa 压力作用下的形变仿真结果

Fig.2 Simulation result of the sensor's deformation under the pressure of 1 MPa

3.2 实验结果

实验中使用的解调仪型号为 MOI 130, 波长解调精度为 1 pm。传感器封装采用的光纤光栅参数如下: 光栅栅区长度为 10 mm, 边模抑制比不小于 15 dB, 反射率不小于 80%。其中, 测压光栅的初始波长为 1560 nm, 温补光栅的初始波长为 1540 nm。封装过程中, 给测压光栅和温补光栅都施加一定大小的预拉力, 使其产生的波长漂移量约为 1.5 nm。传感器封装完成后, 经过老化处理后, 测压光栅和温补光栅的波长分别为 1561.73 nm 和 1541.62 nm。

3.2.1 压力系数测试

在传感器的压力系数测试过程中, 将传感器放入压力罐内, 压力罐内的压力从 0 MPa 开始以 2.5 MPa 的间隔逐渐加压至 25 MPa, 记录每个压力测试点测压光栅和温补光栅的波长值。将测压光栅温补光栅的波长值与压力进行拟合, 如图 3 所示。

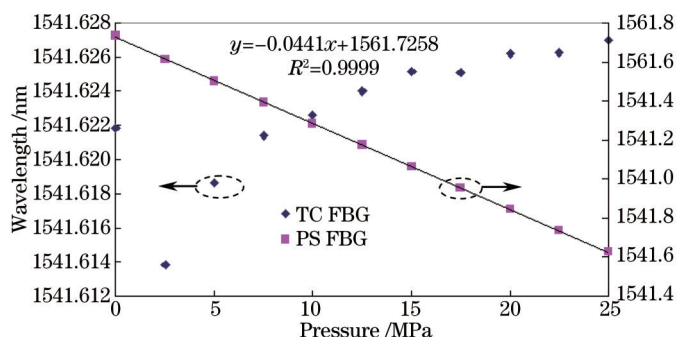


图3 测压光栅和温补光栅与压力的关系曲线

Fig.3 Relations of both FBGs with the pressure

从图中可以看出, 温补光栅的波长对压力基本不敏感, 其波动可能与测试过程中室温的浮动有关。测压光栅的波长与压力存在线性关系, 其线性拟合度达到了 0.9999, 从而确保了传感器可以高精度测压的基础。测压光栅的压力系数为 44.1 pm/MPa, 为理论值的 88.4%。这可能与仿真过程中一些边界条件与实际存在一定差异造成的。

3.2.2 温度系数测试

在传感器的温度系数测试过程中, 将传感器放入恒温水槽内, 水槽的温度从 0 °C 开始以 5 °C 的间隔升至 45 °C, 记录每个温度测试点下测压光栅和温补光栅的波长, 水槽内的实际温度由高精度温度计读取。将测压光栅和温补光栅的波长与温度进行拟合, 可得测压光栅和温补光栅的温度系数, 如图 4 所示。

从图中可以看出, 测压光栅和温补光栅与温度的线性拟合度都达到了 0.9999, 使得温补光栅可以在压力测量时对测压光栅提供精确的温度补偿, 确保了传感器的高精度压力测量。如图 5 所示, 对 $\lambda_p - \lambda_T K_{T1} / K_{T2}$ 与压力进行拟合时, 两者的线性拟合度达到了 0.99996, 二次拟合度更是达到了 0.999999 以上。

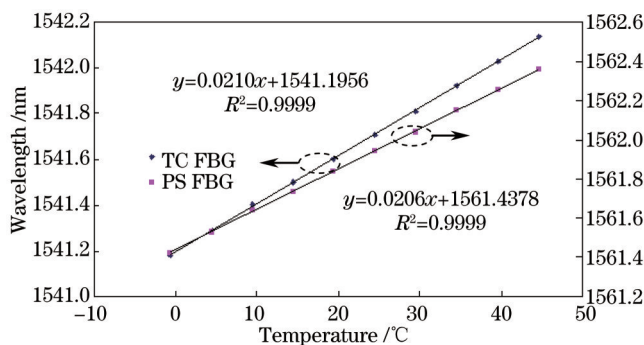


图4 测压光栅和温补光栅的波长与温度的关系曲线

Fig.4 Wavelength relation of both FBGs and the temperature

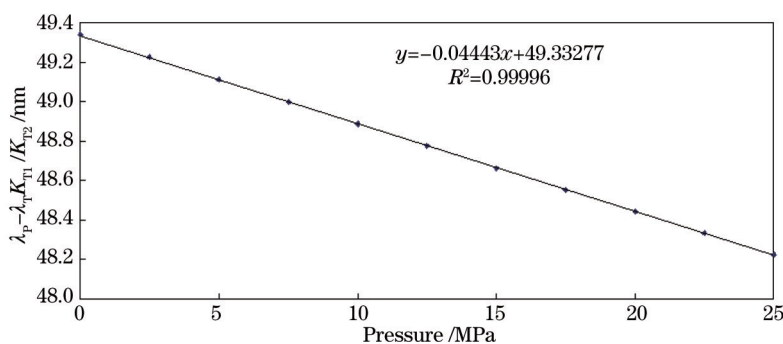


图5 波长差 $\lambda_p - \lambda_T K_{T1}/K_{T2}$ 与压力的关系曲线

Fig.5 Relation between $\lambda_p - \lambda_T K_{T1}/K_{T2}$ and the pressure

3.2.3 双光栅温度响应测试

在传感器的双光栅温度响应测试过程中,将传感器置于某一温度的水中,待其稳定后将其迅速放入另一温度的水中,实时记录该过程中测压光栅和温补光栅测得的温度值及传感器的压力零点输出值,测试结果如图6和7所示。从图中可以看出,当传感器从约25℃的水中放入约15℃的水中时,测压光栅和温补光栅对温度的响应几乎同步,不同时刻两者的温度差最大仅为0.16℃,温度差平均值仅为0.02℃。压力传感器的零点输出值波动最大仅为0.18MPa,约为0.7%F.S.。可见,温补光栅能够实时地对测压光栅进行温度补偿,即传感器在压力测量过程中可以做到对温度基本不敏感。

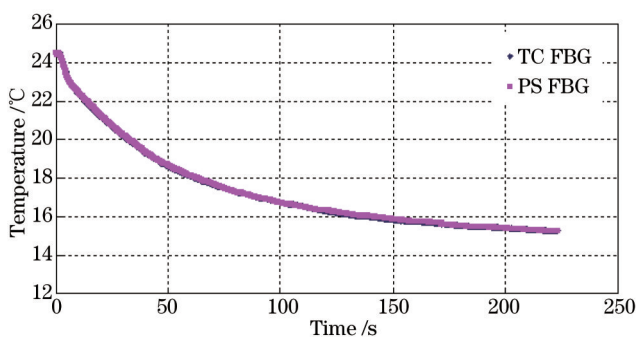


图6 测压光栅和温补光栅温度响应测试结果

Fig.6 Test result of two FBGs' response to temperature variety

3.2.4 压力精度测试

在传感器的压力精度测试过程中,将标定后的传感器放入压力罐内,对压力罐施加不同的压力,对传感器测量的压力精度进行测试。压力罐内的压力值以标准压力表(FLUKE 2700G)作为参考,传感器的压力值由软件实时读取。测试结果如表1所示。可见,在25MPa的压力量程范围内,传感器的压力精度可达0.19%F.S.。

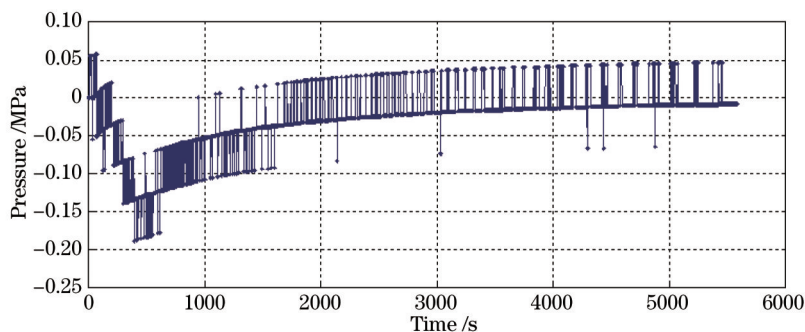


图7 压力零点输出值在温度快速变化环境中的波动曲线

Fig.7 Fluctuation of the sensor's output during temperature quickly changing

表1 传感器压力精度测试

Table 1 Precision test of the sensor

Reference pressure /MPa	Measured pressure /MPa	Pressure error /%F.S.
5.000	5.024	0.096
10.000	10.029	0.118
15.000	15.048	0.194
20.000	20.039	0.158
25.000	25.023	0.092
Pressure accuracy /%F.S.		0.194

4 结 论

提出了一种新型的温度实时补偿的高精度光纤光栅压力传感器,传感器基于弹性膜片结构,采用双光栅施加预拉力的方式。实现了在压力测量过程中的温度实时补偿,并达到了高精度压力测量的目标。实验中,传感器在从约为25℃~15℃的温度跃变条件下,压力测量值的变化范围小于±0.7%F.S.,在25 MPa的压力测量范围内,压力精度达到了0.19%F.S.。

参 考 文 献

- 1 Fu Haiwei, Qiao Xueguang, Jia Zhen'an, *et al.*. A high-Sensitivity in-fiber Bragg grating pressure sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(2): 187-189.
傅海威, 乔学光, 贾振安, 等. 高灵敏度的光纤光栅压强传感器[J]. 光学学报, 2004, 24(2): 187-189.
- 2 Guo Tuan, Qiao Xueguang, Jia Zhen'an, *et al.*. Simultaneous measurement of temperature and pressure using a single fiber Bragg grating based on reflected wave's broadened bandwidth[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(10): 1401-1405.
郭 团, 乔学光, 贾振安, 等. 单光纤光栅波谱展宽温度压力同时区分测量[J]. 光学学报, 2004, 24(10): 1401-1405.
- 3 Wei Ting, Qiao Xueguang, Jia Zhen'an, *et al.*. Temperature insensitive fiber Bragg grating pressure sensing with plane round metal diaphragm[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(1): 80-84.
尉 婷, 乔学光, 贾振安, 等. 平面圆形膜片式光纤布拉格光栅温度补偿压强传感[J]. 光学学报, 2007, 27(1): 80-84.
- 4 Guo Tuan, Zhao Qida, Liu Lihui, *et al.*. Light intensity-referred and temperature insensitive fiber Bragg grating dynamic pressure sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(2): 207-211.
郭 团, 赵启大, 刘丽辉, 等. 光强检测型光纤光栅温变不敏感动态压力传感研究[J]. 光学学报, 2007, 27(2): 207-211.
- 5 Wang Jing, Feng Dejun, Sui Qingmei, *et al.*. Study on optical fiber Bragg grating seepage pressure sensor based on draw-bar structure[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(3): 686-691.
王 静, 冯德军, 隋青美, 等. 基于拉杆结构的光纤布拉格光栅渗压传感器研究[J]. 光学学报, 2010, 30(3): 686-691.
- 6 Cai An, Yin Xinda, Chang Xiaodong, *et al.*. Optical fiber grating temperature and pressure sensor based on diaphragm with temperature compensation[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2013, 32(4): 98-100.
蔡 安, 印新达, 常晓东, 等. 具有温度补偿的膜片型光纤光栅温度压力传感器[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(4): 98-100.
- 7 Pan Hongliang, Dong Huijuan, Zhang Guangyu, *et al.*. Research on fiber grating pressure/temperature monitoring device of distinguish range and double sensitivity[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0205005.
潘洪亮, 董惠娟, 张广玉, 等. 分程式双灵敏度光纤光栅压力/温度监测装置的研制[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0205005.

栏目编辑: 刘丰瑞