

分程式双灵敏度光纤光栅压力/温度监测装置的研制

潘洪亮 董惠娟 张广玉 何俊

(哈尔滨工业大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 研制出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。进行了压力/温度监测性能实验, 实验结果表明, 该监测装置的压力监测范围为 0~30 MPa, 温度监测范围 0℃~150℃。在 0~15 MPa、15~30 MPa 监测范围内压力灵敏度分别为 352.5 pm/MPa 和 223.3 pm/MPa, 线性拟合度分别为 99.42% 和 99.33%; 温度灵敏度分别为 33.5 pm/℃ 和 22.5 pm/℃, 线性拟合度分别为 99.69% 和 99.61%。该传感器结构简单、性能指标优越, 具有较高的应用价值。

关键词 光栅; 光纤光栅; 压力/温度监测; 分程式; 双灵敏度

中图分类号 TN253; TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0205005

Research on Fiber Grating Pressure/Temperature Monitoring Device of Distinguish Range and Double Sensitivity

Pan Hongliang Dong Huijuan Zhang Guangyu He Jun

(Mechanical and Electronic Engineering College, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract A fiber grating pressure/temperature monitoring device of distinguish range and double sensitivity is developed. Using the Package structure of distinguish range, the pressure measuring range of sensor under the premise of no changing monitoring index of fiber grating is expanded. The size and material of package structure are set to realize the double sensitivity and integration monitoring of pressure and temperature. The monitoring performance of pressure and temperature is tested in experiment, and the results show that the range of pressure measuring is from 0 to 30 MPa, the range of temperature measuring is from 0℃ to 150℃. Pressure measuring sensitivity are 352.5 pm/MPa and 223.3 pm/MPa respectively under the monitoring range of 0~15 MPa and 15~30 MPa, and linear degrees are 99.42% and 99.33% respectively. Temperature measuring sensitivity are 33.5 pm/℃ and 22.5 pm/℃ respectively, and linear degrees are 99.69% and 99.61% respectively. The proposed monitoring device is simple in structure, which has superior performance and high application value.

Key words gratings; fiber grating; pressure/temperature monitoring; distinguish range; double sensitivity

OCIS codes 060.2420; 060.2330; 230.1150; 060.2310

1 引言

对油水井井下压力、温度等参数的实时在线监测, 能够使人们对井下油层的开采状态、产能等情况进行分析, 从而指导人们的生产活动, 是优化采油方案, 提高石油产量和采收率、节约能源的重要措施之一^[1,2]。光纤光栅(FBG)传感技术具有体积小、抗电磁干扰、易于实现分布式监测、寿命长、易于在恶劣工

况环境下应用、易实现实时在线监测和易于组成监测网络等优点, 在桥梁、水利水电、交通运输、电力、石油工业、土木工程等领域利用相应的封装结构能够实现对应力、应变、温度、速度、振动等物理量的检测与控制, 已成为国内外学者的研究热点^[3~8]。然而, 光纤光栅的测量范围有限, 在现有的封装结构中很难保证光纤光栅传感器既具有较高的量程又具有很高的灵

收稿日期: 2012-08-28; 收到修改稿日期: 2012-10-30

基金项目: 国家自然科学基金(51074059)资助课题。

作者简介: 潘洪亮(1977—), 男, 博士研究生, 副教授, 主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: phl2005@sina.com

导师简介: 张广玉(1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光机电一体化技术、航天地面模拟与测试技术、超声波应用技术和特种材料加工技术等方面的研究。E-mail: zgy@hit.edu.cn

敏度,并同时实现压力/温度一体化监测。

本文结合我国大庆油田的特点及实际情况,研制了一种依托封装结构实现的分程式监测装置,解决了测量范围与灵敏度之间的矛盾,并利用封装结构不同的材料和尺寸参数,使得该装置具有压力/温度双灵敏度。实验结果表明,该传感装置具有较高的性能指标,其灵敏度高,测压范围大,适用于油水井下的压力/温度监测。

2 监测原理

由光纤光栅理论可知,环境参数变化导致光纤光栅应变和温度变化时,相应的中心波长改变量为^[9]

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \zeta)\Delta T + (1 - \rho_e)\epsilon = K_{T_0}\Delta T + K_e\Delta\epsilon, \quad (1)$$

式中 α 、 ζ 、 $\Delta\epsilon$ 、 ΔT 、 ρ_e 分别为光纤光栅的热膨胀系数、热光系数、轴向应变、所测温度、有效弹光系数; K_{T_0} 为光纤光栅的温度灵敏度系数; K_e 为应变灵敏度系数。由(1)式可知,光纤光栅中心波长的变化对应变和温度双参量敏感。当进行压力测量时,可通过封装结构把(1)式中的应变灵敏度系数转化为压力灵敏度系数,即

$$\Delta\lambda_B = K_T\Delta T + K_P\Delta P, \quad (2)$$

式中 ΔP 为所测压力, K_P 为压力灵敏度系数, $K_T = \alpha_z K_{T_0}$ 为温度波长变化灵敏度系数。若所测温度场

和压力场相同,则监测装置应具有双光纤光栅,且这两个光纤光栅具有不同的压力、温度灵敏度系数,则有:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{B1} \\ \Delta\lambda_{B2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{T1} & K_{P1} \\ K_{T2} & K_{P2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta P \end{bmatrix}, \quad (3)$$

由(3)式可知,当封装结构确定时,系数矩阵确定。即可通过光纤光栅中心波长的变化获得压力、温度值。

3 压力/温度监测封装结构及模型

3.1 工作原理

光纤光栅压力/温度监测装置如图1所示,包括两个光纤光栅传感器,实物图如图2所示。基本工作原理[图1(b)]为平膜片在外压力与传力螺钉的支反力作用下,产生向下的挠度,通过传力螺钉使等强度梁产生向下的变形,从而使光纤光栅产生轴向应变,由(2)式可知,光纤光栅的中心波长发生改变,由实验标定好的中心波长与压力的关系就可以得到压力的数值。但在较高的灵敏度前提下,若仅采用图1(b)所示的结构,光纤光栅的极限应变即压力测量范围有限。为解决此矛盾,采用分程式测压结构及方法,原理为当压力在0~15 MPa时,图1(b)结构中的光纤光栅中心波长的变化与压力和温度变化相关,而图1(a)所示传感器由于间隙 a 的存在,平膜片与传力螺钉还未接触,此时不受压力变化的影响,只与温度有关,此时用光纤光栅1测量压力,用光纤光栅2测温并进行温度补偿,则(3)式中 $K_{P2}=0$ 。

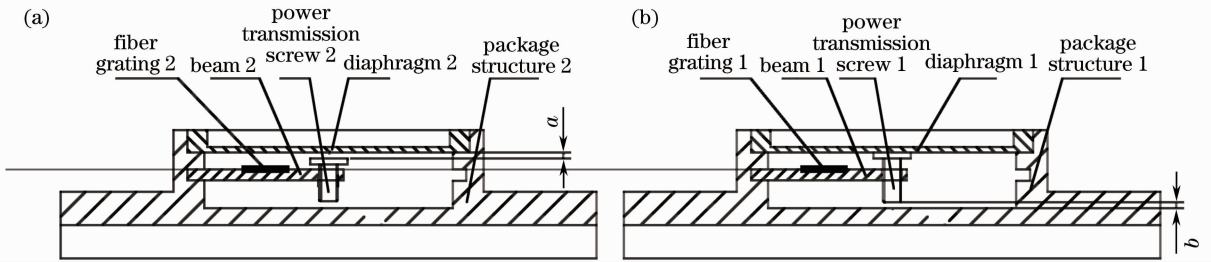


图1 分程式光纤光栅压力/温度监测结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of fiber grating pressure/temperature sensor of distinguish range

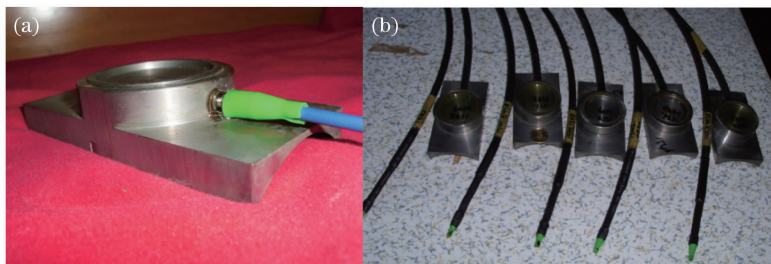


图2 监测装置实物照片。(a)单个传感器;(b)一组监测装置

Fig. 2 Object photos of monitoring device. (a) Single sensor; (b) set of monitoring device

压力在 15~30 MPa, 通过设置图 1(b) 中间隙 b 的值, 使得 15 MPa 时传力螺钉的下端与封装壳体接触, 此时继续增大压力, 图 1(b) 所示结构中的等强度梁不再变形, 即当压力大于 15 MPa 时, $\Delta\lambda_{B1}$ 与压力变化无关, 只与温度有关, 此时用光纤光栅 2 进行压力测量, 用光纤光栅 1 测温并进行温度补偿, 则 (3) 式中 $K_{P1}=0$ 。

考虑到实际工作过程中, 完全的分程式测压非常困难, 可能出现分程式测压的复合区域。例如在实验过程中图 1(b) 所示传感器实际测量范围为 0~15.4 MPa, 而图 1(a) 所示传感器的测量范围为 14.5~30 MPa, 存在着 14.5~15.4 MPa 分程式复合区域, 此时 $\Delta\lambda_{B1}$, $\Delta\lambda_{B2}$ 的变化与温度、压力都相关, 这时利用 (3) 式可解出压力/温度值。

3.2 压力与温度监测模型

图 1 中序号 2、7 为等强度梁, 其材料分别选用铝合金和 65Mn 弹簧钢材料。等强度梁在受到集中力 F 作用时其表面某一位置处的应变为^[10]

$$\epsilon_x = \frac{6L}{Eb_0h^2}F, \quad (4)$$

式中 ϵ_x 为距固支端 x 处的应变值; L 、 h 、 E 分别为等强度梁的有效长度、厚度及梁材料的杨氏模量。由 (4) 式可知等强度梁在自由端中心处作用集中力 F 时, 在梁上各处的应变相等。

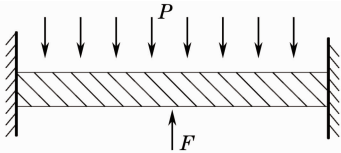


图 3 平膜片受力简图

Fig. 3 Force diagram of the diaphragm

如图 1 中序号 4、9 为平膜片, 其材料采用 65Mn 弹簧钢, 平膜片为小挠度变形, 先以图 1(b) 中的平膜片为研究对象, 其受力简图如图 3 所示, 在压力 P 和传力螺钉支反力 F 共同作用引起平膜片中心处向下的挠度为

$$y = \frac{3}{16} \frac{PR^4(1-\nu^2)}{E_m h_d^3} - \frac{3FR^2(1-\nu^2)}{4\pi E_m h_d^3}, \quad (5)$$

式中 R 为膜片半径, h_d 为膜的厚度; E_m , ν 分别为膜片材料的杨氏模量和泊松比。传力螺钉轴向变形很小, 可忽略不计, 因此, 可以认为平膜片的中心挠度与等强度梁自由端的挠度相等。对于等强度梁有应变和挠度的关系为^[11]

$$\epsilon_x = yh/L^2, \quad (6)$$

由 (4) 式和 (6) 式两式联立得到

$$y = \frac{6L^3}{Eb_0h^3}F, \quad (7)$$

将 (7) 式代入 (5) 式整理得到

$$F = \frac{Eb_0h^3R^4\pi}{4\left(8L^3\pi\frac{E_m h_d^3}{1-\nu^2} + Eb_0h^3R^2\right)}P, \quad (8)$$

(8) 式为压力 P 等效成集中力 F 的原理式, 将 (8) 式代入 (4) 式得到

$$\epsilon_x = \frac{3L}{Eb_0h^2} \frac{Eb_0h^3R^4\pi}{2\left(8L^3\pi\frac{E_m h_d^3}{1-\nu^2} + Eb_0h^3R^2\right)}P, \quad (9)$$

从而得到压力与中心波长变化的关系式为

$$\Delta\lambda_{B1} = \alpha_z \frac{3L}{Eb_0h^2} \frac{Eb_0h^3R^4\pi}{2\left(8L^3\pi\frac{E_m h_d^3}{1-\nu^2} + Eb_0h^3R^2\right)}P = K_{P1}P, \quad (10)$$

式中 $K_{P1} = \alpha_z \frac{3L}{Eb_0h^2} \frac{Eb_0h^3R^4\pi}{2\left(8L^3\pi\frac{E_m h_d^3}{1-\nu^2} + Eb_0h^3R^2\right)}$ 为

压力灵敏度系数, α_z 为压变灵敏度系数, 可以看出压力灵敏度与封装结构的材料、尺寸参数有关, 所以通过调整这些参数, 可以得到满足一定灵敏度系数的封装结构。对于图 1(b) 各参数取如下数值: $h = 1.5$ mm; $L = 22$ mm; $R = 19$ mm; $E = 210$ GPa; $h_d = 1$ mm; $b_0 = 20$ mm; $E_m = 210$ GPa; $\nu = 0.3$; $\alpha_z = 1.2$ pm/ $\mu\epsilon$ 。由 (10) 式得到图 1(b) 封装结构理论压力灵敏度系数为

$$K_{P1} = 363.7 \text{ pm/MPa}. \quad (11)$$

对于图 1(a) 结构各参数数值: $h = 1.6$ mm; $L = 22$ mm; $R = 19$ mm; $E = 70$ GPa, $h_d = 1.2$ mm, $b_0 = 20$ mm, $E_m = 210$ GPa; $\nu = 0.3$, $\alpha_z = 1.2$ pm/ $\mu\epsilon$, 代入 (10) 式得到图 1(a) 结构的压力灵敏度系数为

$$K_{P2} = 238.4 \text{ pm/MPa}. \quad (12)$$

这就是压力理论监测模型, 具有分程式监测的双灵敏度。

对于本装置选用的掺锗石英材料的光纤, 热膨胀系数为 $\alpha_0 = 0.55 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 热光系数为 $\zeta = 7.0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 选用钢材的热膨胀系数为 $\alpha_{g1} = 10.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 铝合金材料的热膨胀系数为 $\alpha_{g2} = 23.8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。温度灵敏度系数取决于光纤材料及封装结构的材料^[12~14], 当环境温度变化时, 由于封装材料和光纤光栅的热膨胀系数不同, 光栅承受一定的应变, 而此应变是光纤光栅的热膨胀系数和等强度梁材料的热膨胀系数的叠加。图 1(b)、(a) 所示的结构转换成温度对中心波长的灵敏度系数为

$$\begin{cases} K_{T_1} = \alpha_z(\alpha_1 + \zeta) = 20.1 \text{ pm}/^\circ\text{C}, \\ K_{T_2} = \alpha_z(\alpha_2 + \zeta) = 36.3 \text{ pm}/^\circ\text{C}, \end{cases} \quad (13)$$

将(11)~(13)式代入(3)式,得到温度/压力在14.5~15.4 MPa的监测模型为

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{B1} \\ \Delta\lambda_{B2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 20.1 & 363.7 \\ 36.3 & 238.4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ P \end{bmatrix}. \quad (14)$$

3.3 压力与温度耦合作用分析

本装置利用光纤光栅及其封装结构进行压力与温度同时测量,因此必须对这种耦合作用加以分析。对光纤光栅的中心波长可以看成应变与温度的函数^[15],即

$$\lambda_B = f(\epsilon, T), \quad (15)$$

将(15)式进行泰勒展开,并略去高阶项,得到

$$\begin{aligned} f(\epsilon, T) = & f(\epsilon_0, T_0) + \frac{\partial f(\epsilon_0, T_0)}{\partial \epsilon}(\epsilon - \epsilon_0) + \\ & \frac{\partial f(\epsilon_0, T_0)}{\partial T}(T - T_0) + \frac{\partial^2 f(\epsilon_0, T_0)}{\partial \epsilon \partial T} \times \\ & (\epsilon - \epsilon_0)(T - T_0), \end{aligned} \quad (16)$$

令 $f(\epsilon_0, T_0) = \lambda_{B0}$, $\frac{\partial f(\epsilon_0, T_0)}{\partial \epsilon} = K_\epsilon$, $\frac{\partial f(\epsilon_0, T_0)}{\partial T} = K_{T_0}$, $\frac{\partial^2 f(\epsilon_0, T_0)}{\partial \epsilon \partial T} = \alpha_c$, (16)式整理得到

$$\Delta\lambda_B = K_\epsilon \Delta\epsilon + K_{T_0} \Delta T + \alpha_c \Delta\epsilon \Delta T, \quad (17)$$

式中 α_c 为应变与温度耦合灵敏度系数。将(17)式转换成压力温度与中心波长的关系式为

$$\Delta\lambda_B = K_P \Delta P + K_T \Delta T + K_c \Delta P \Delta T, \quad (18)$$

式中 K_c 为压力与温度耦合的灵敏度系数。由(18)式可得,光纤光栅中心波长的改变不仅受到了压力与温度的单独作用,而且受到了压力与温度的耦合作用。与(2)式对比存在着误差项,(18)式中的压力与温度耦合作用的部分即为间接算法所产生的误差。表示成相对误差的形式为

$$\delta = \frac{K_c \Delta P \Delta T}{K_P \Delta P + K_T \Delta T + K_c \Delta P \Delta T} \times 100\%. \quad (19)$$

当温度变化不大,温度应变灵敏度系数可表示为^[14]

$$\begin{aligned} \alpha_c = & (\alpha + \zeta)(1 - \rho_\epsilon) - 2\rho_\epsilon \zeta = \\ & 2.089 \times 10^{-6} \text{ pm}/(^\circ\text{C} \cdot \mu\epsilon), \end{aligned} \quad (20)$$

转换成本装置的压力/温度耦合灵敏度系数为

$$K_c = 9.06 \times 10^{-4} \text{ pm}/(^\circ\text{C} \cdot \text{MPa}). \quad (21)$$

以图1(b)结构为例进行分析: $\Delta P_{\max} = 15.4 \text{ MPa}$, $\Delta T_{\max} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ 。根据(19)式得到: $\delta = 0.00243\%$,分别选取其他温度下的耦合灵敏度系数进行计算,同样得到误差很小的结果。所以,由压力和温度产生的耦合作用很小,对整个测量的精度影

响可以忽略不计。

文献[16]对基准波长1533.13~1558.978 nm进行了应变温度耦合分析。得出了在-50℃~80℃可以不考虑应变温度的耦合作用,只有在应变很大(达到5%),温度变化很大时才考虑应变耦合作用的影响。文献[17]做了温度与应变耦合灵敏度系数关系的实验,说明温度在-150℃~550℃,应变在0~6000 $\mu\epsilon$ 的范围内,随着温度增大,耦合系数减小。因此,本装置在80~150℃温度之间耦合系数更小,由耦合作用产生的误差将会更小。本装置的应变测量范围图1(b)结构为0~4882 $\mu\epsilon$,图1(a)结构为0~3120 $\mu\epsilon$,测温范围为0℃~150℃,所以实际工程应用中应变与温度耦合作用可以忽略。但当测量温度及压力范围很大时,必须考虑应变温度之间的耦合作用。

4 温度压力实验与分析

压力及温度实验装置如图4、5所示。实验所用解调仪选用MOI公司的sm125型光纤光栅解调仪,该解调仪扫描范围为1510~1590 nm,具有4个通道,能够同时监测多个传感器。液压泵的最大工作压力为100 MPa,液压缸能够承受的最大液压压力为60 MPa。选用光纤布拉格光栅(FBG),其中FBG1中心波长为1540 nm,FBG2采用的中心波长为1550 nm,实验曲线如图6~9所示。实验研究结果表明:该监测装置的压力监测范围为0~30 MPa,温度监测范围0℃~150℃,在0~15 MPa、15~30 MPa的监测范围内压力灵敏度分

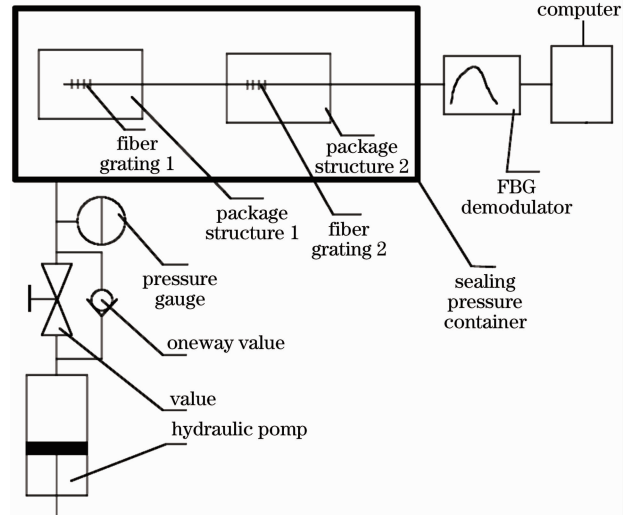


图4 压力标定实验装置示意图

Fig. 4 Schematic of experimental device of pressure calibration

别为 352.5 pm/MPa 和 223.3 pm/MPa, 线性拟合度分别为 99.42% 及 99.33%; 温度灵敏度分别为 33.5 pm/°C 和 22.5 pm/°C, 线性拟合度为 99.69% 及 99.61%。经实验修正(14)式为

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{B1} \\ \Delta\lambda_{B2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 22.5 & 352.5 \\ 33.5 & 223.3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ P \end{bmatrix}. \quad (22)$$

由图 7、8 可知, 图 1(b) 所示结构实际测压范围为 0~15.4 MPa, 而图 1(a) 所示结构实际测压范围为 14.5~30 MPa, 与理论的 0~15 MPa 及 15~30 MPa 测压范围有一定误差, 并未实现理想化的分

程式压力测量, 存在着 14.5~15.4 MPa 的重合区域, 在此压力区域图 1(a)、(b) 所示结构的光纤光栅中心波长的变化与压力、温度都相关, 压力/温度的耦合作用对整个测量精度影响很小, 可通过(20)式解出压力/温度值; 理论灵敏度与实际灵敏度也存在着误差。分析以上误差的原因主要为: 1) 装置部件在加工过程中产生的误差; 2) 在装配过程中存在着装配误差; 3) 实验过程中压力给定误差及读数误差; 4) 理论计算过程中的舍入误差; 5) 一些理想化的假设如材料的均匀性与实际上材料的不均匀性引起的误差。

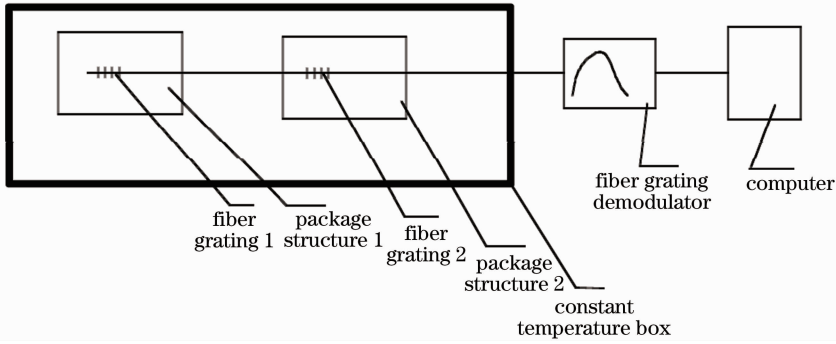


图 5 温度标定实验装置示意图

Fig. 5 Schematic of experimental device for temperature calibration

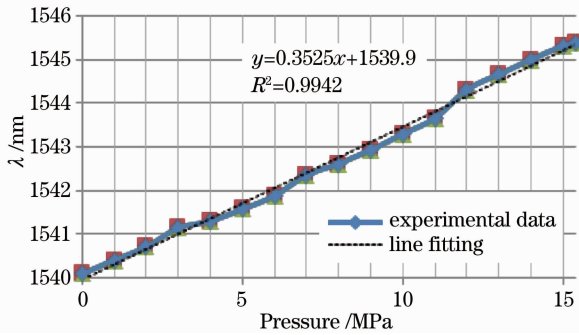


图 6 FBG1 压力-中心波长关系曲线

Fig. 6 Curves of relationship between pressure and center wavelength of FBG1

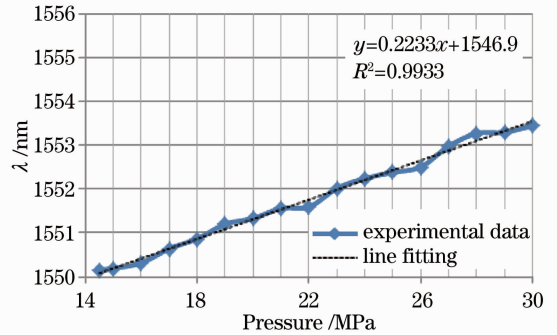


图 7 FBG2 压力-中心波长关系曲线

Fig. 7 Curves of relationship between pressure and center wavelength of FBG2

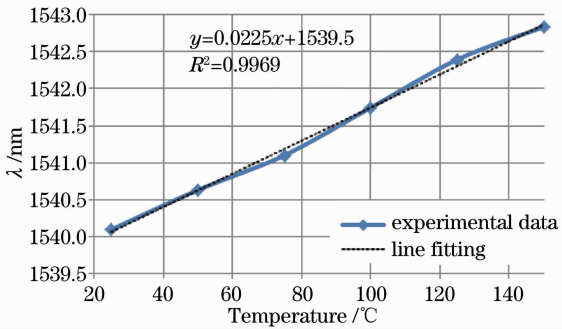


图 8 FBG1 温度-中心波长关系曲线

Fig. 8 Curves of relationship between temperature and center wavelength of FBG1

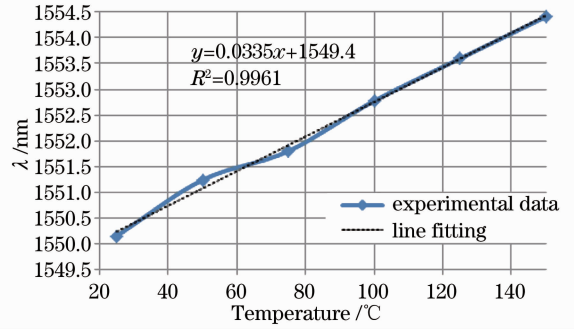


图 9 FBG2 温度-中心波长关系曲线

Fig. 9 Curves of relationship between temperature and center wavelength of FBG2

5 结 论

根据油水井下实际工况要求,利用光纤光栅作为敏感元件,结构上采用了分程式的方法,使光纤光栅的测量范围达到了 $0\sim 7190\ \mu\epsilon$;依据传感器的结构和材料的选择,使得传感器实现了压力/温度双灵敏度一体化监测;该装置的测压范围为 $0\sim 30\ \text{MPa}$,量程为 $0\sim 14.5\ \text{MPa}$ 和 $15.4\sim 30\ \text{MPa}$ 时采用温度补偿的方法进行监测,在压力为 $14.5\sim 15.4\ \text{MPa}$ 分程式复合区域采用间接计算法进行监测,在压力温度同时测量时,分析了光纤光栅的应变温度耦合作用,经分析该监测装置的应变温度耦合作用对测量精度影响很小,可以忽略不计,测温范围为 $0\ ^\circ\text{C}\sim 150\ ^\circ\text{C}$,压力/温度与光纤光栅中心波长变化的线性拟合度在99%以上。该监测装置尺寸小,结构简单易实现,能够满足油水井下压力/温度的实时、在线监测要求。

参 考 文 献

- 1 Wang Hongliang, Song Juan, Feng Dequan *et al.*. High temperature-pressure FBG sensor applied to special environments [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(3): 545~549
王宏亮, 宋娟, 冯德全等. 应用于特殊环境的光纤光栅温度压力传感器[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(3): 545~549
- 2 Qiao Xueguang, Feng Fei, Jia Zhen'an *et al.*. Study on pressure sensing technology of a compensable fiber grating[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2009, **20**(1): 9~11
乔学光, 冯飞, 贾振安等. 光纤光栅高压传感器封装技术实验研究[J]. *光电子·激光*, 2009, **20**(1): 9~11
- 3 Cao Ying, Gu Zhengtian. Optical properties of distinguish ranged long-period and fiber Bragg gratings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(4): 0405003
曹莹, 顾铮先. 级联长周期光纤光栅和Bragg光纤光栅的光学特性[J]. *中国激光*, 2012, **39**(4): 0405003
- 4 Y. Shinoda, K. Naqai, T. Higo. Fundamental experiment in real-time strain measurement of multipoint fiber Bragg grating using optical frequency sweeping [J]. *IEEE Transactions on Sensors and Micromachines*, 2010, **130**(12): 570~574
- 5 J. F. Botero-Cadavid, J. D. Causado-Buelvas, P. Torres. Spectral properties of locally pressed fiber Bragg gratings written in polarization maintaining fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2010, **28**(9): 1291~1297
- 6 Ke Wen, Rong Wang, Min Wang *et al.*. A new temperature sensor based on fiber Bragg grating in photonic crystal fibers [C]. International Conference on Communication Systems, 2008. 1218~1221
- 7 Wu Yonghong, Shao Changjiang, Qu Wenjun *et al.*. Basic theoretical model and its experimental investigation for standard embedded sensing fiber Bragg grating packaging [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1290~1293
- 8 Li Zhengying, Zhou Zude, Tong Xinglin *et al.*. Research of high-speed large-capacity fiber Bragg grating demodulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0306007
李政颖, 周祖德, 童杏林等. 高速大容量光纤光栅解调仪的研究 [J]. *光学学报*, 2012, **32**(3): 0306007
- 9 T. Benjamin Paya-zaforteza Lqunacio, A. Calderon Pedro *et al.*. Analysis of the strain transfer in a new FBG sensor for structural health monitoring [J]. *Engineering Structures*, 2011, **32**(2): 539~548
- 10 Zhang Wentao, Liu Yuliang, Li Fang. Fiber Bragg grating pressure sensor based on the deformation of flat diaphragm [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2008, **19**(7): 899~901
张文涛, 刘育梁, 李芳. 一种基于平膜片挠度的光纤光栅压力传感器 [J]. *光电子·激光*, 2008, **19**(7): 899~901
- 11 Zhu Qiongchang, Xian Jin, Huang Yihong. Optimization design on the equal strength beam using for force measurement [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1999, **20**(4): 314~315
朱琼昌, 洗进, 黄毅宏. 测力等强度梁的优化设计 [J]. *计量学报*, 1999, **20**(4): 314~315
- 12 Qiao Xueguang, Jia Zhen'an, Fu Haiwei *et al.*. Theory and experiment about in-fiber Bragg grating temperature sensing [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(2): 494~497
乔学光, 贾振安, 傅海威等. 光纤光栅温度传感理论与实验 [J]. *物理学报*, 2004, **53**(2): 494~497
- 13 Yang Xiufeng, Zhang Chunyu, Tong Zhengrong *et al.*. Experimental research of temperature sensing properties of a novel fiber grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0405005
杨秀峰, 张春雨, 童峥嵘等. 一种新型光纤光栅温度传感特性的实验研究 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(4): 0405005
- 14 Yang Zhangcheng, Xu Hanfeng, Dong Xinyong. Research development of high-temperature resistant fiber gratings [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(5): 050003
杨樟成, 徐汉锋, 董新永. 高温光纤光栅的研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(5): 050003
- 15 Zhou Zhi, Tian Shizhu, Zhao Xuefeng *et al.*. Theoretical and experimental studies on the strain and temperature sensing performance of optical FBG [J]. *Journal of Functional Materials*, 2002, **33**(5): 551~554
周智, 田石柱, 赵雪峰等. 光纤布拉格光栅应变与温度传感特性及其实验分析 [J]. *功能材料*, 2002, **33**(5): 551~554
- 16 Ma Xiao, Zhou Xuejun, Lu He. Analysis of strain monitoring temperature effect of FBG sensor of jinan Olympic center gymnasium [C]. The Eighth National Academic Conference on Modern Structural Engineering, 2008. 217~220
马晓, 周学军, 路鹤. 济南奥体中心体育馆FBG传感器应变监测温度效应分析 [C]. 第八届全国现代结构工程学术研讨会, 2008. 217~220
- 17 Zhang Xiaojing, Wu Zhanjun, Zhang Boming *et al.*. Experimental study on cross-sensitivity of temperature and strain of fiber optic Bragg gratings [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2005, **16**(5): 566~568
张晓晶, 武湛君, 张博明等. 光纤布拉格光栅温度和应变交叉灵敏度的实验研究 [J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(5): 566~568

栏目编辑:何卓铭