

文章编号: 0253-2239(2010)03-0686-06

基于拉杆结构的光纤布拉格光栅渗压传感器研究

王 静¹ 冯德军² 隋青美¹ 刘 斌³

(¹ 山东大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250061; ² 山东大学信息科学与工程学院, 山东 济南 250100)

³ 山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061

摘要 根据目前大坝、隧道和煤矿等工程领域和模型试验中对渗压检测的特殊要求,设计并实现了一种新型的光纤布拉格光栅(FBG)渗压传感器,采用波纹膜片和对称拉杆机械结构通过改变光纤光栅的轴向应变实现渗压传感。利用有限元软件 ANSYS 分别对传感器膜片的压力特性和传感器外壳抗压特性进行了仿真设计和性能分析,提高了传感器的可靠性并缩短了设计周期。对该传感器进行了压力标定试验,得出该传感器在 0~100 kPa 的测量范围内,压力灵敏度达 20 nm/MPa,比普通 FBG 提高了 6683 倍。迟滞特性和重复性试验表明迟滞为 0.85%,且重复性好。

关键词 光纤光学;渗压传感器;光纤布拉格光栅;拉杆结构;波纹膜片;ANSYS 软件

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103003.0686

Study of Optical Fiber Bragg Grating Seepage Pressure Sensor Based on Draw-Bar Structure

Wang Jing¹ Feng Dejun² Sui Qingmei¹ Liu Bin³

¹ School of Control Science and Engineering, Shandong University, Ji'nan, Shandong 250061, China

² School of Information Science and Engineering, Shandong University, Ji'nan, Shandong 250100, China

³ Geotechnical & Structural Engineering Research Center, Shandong University, Ji'nan, Shandong 250061, China

Abstract According to special requirement of seepage monitoring in engineering and model experiment of dams, tunnels and coal mines, a novel optical fiber Bragg grating (FBG) based seepage pressure sensor is designed and fabricated. A draw-bar structure and a corrugated diaphragm are adopted to change the axial strain of optical fiber grating. The diaphragm pressure characteristics and sensor's shell resistance characteristics are simulated and analyzed by using the finite element software ANSYS respectively, which can shorten the design cycle and improve the reliability of the sensor. Calibration experiments show that the pressure sensitivity of the sensor is 20 nm/MPa in the range of 0~100 kPa, which is 6683 times higher than that of ordinary optical FBG. The hysteresis and repeatability experiments indicate that the hysteresis factor is 0.85% and the sensor has good reproducibility.

Key words fiber optics; seepage pressure sensor; fiber Bragg grating (FBG); draw-bar structure; corrugated diaphragm; ANSYS software

1 引 言

光纤布拉格光栅(FBG)传感器因其具有波长编码、抗电磁场干扰、防水性能强、动态范围宽、灵敏度高、易于组网以及可实现准分布式测量等优

点^[1~4],得到了广泛的应用。近些年来,利用 FBG 对应变和温度测量的研究和工程应用已取得很大的进展^[5~8]。但利用 FBG 进行渗压检测,还属于全新的研究领域。吴永红等^[9]设计了双光纤型反射式水

收稿日期: 2009-04-21; 收到修改稿日期: 2009-05-13

基金项目: 山东省自然科学基金项目(Z2006G06)和山东省中青年科学家奖励基金(2006BS01001)资助课题。

作者简介: 王 静(1983—),女,博士研究生,主要从事新型光纤传感器的研究和应用等方面的研究。

E-mail: sduwangjing@qq.com

导师简介: 隋青美(1963—),女,博士,教授,主要从事新型检测技术方面的研究。E-mail: qmsui@sdu.edu.cn

工渗压传感器,测量精度高,但设计原理和制作工艺都非常复杂;夏元友等^[10]设计了基于聚氨酯弹性材料的 FBG 渗压传感器,并应用在公路软基等土木工程中,但是弹性材料的重复性能差。

基于拉杆结构和波纹膜片设计了一种新型光纤光栅渗压传感器,该传感器体积小、灵敏度高、重复性能好,并且具有很强的防水性。

2 传感器设计

2.1 传感器结构

如图 1 所示,FBG 渗压传感器由外壳、压力导杆、波纹膜片、支撑架和光栅等结构组成。传感器外壳包括三部分,不锈钢柱壳通过螺丝分别与膜片上部 and 传感器底部的外壳连接。波纹膜片焊接在外壳上,其一侧是进压口,此处有滤网,防止泥沙阻塞进压口。另一侧是支撑架和压力导杆,压力导杆为直径 3 mm 锰钢材料的金属柱,粘结在波纹膜片中心位置,支撑架焊接在外壳上。FBG₁ 和 FBG₂ 一端固定在压力导杆上,另一端粘贴在支撑架上,FBG₃ 一端固定在支撑架上,另一端处于自由状态,光栅均为丙烯酸酯涂覆。

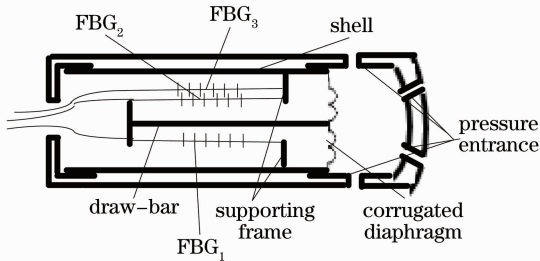


图 1 渗压传感器结构示意图

Fig. 1 Structure sketch of seepage pressure sensor

孔隙水通过进压口进入渗压计,作用在波纹膜片上,使波纹膜片发生挠度变形,因此波纹膜片的中心产生位移,同时转化成集中力作用在压力导杆上,压力导杆拉动光栅,使 FBG₁ 和 FBG₂ 在轴向拉力作用下中心波长发生变化。用波长解调仪检测温度补偿 FBG₃ 及压力 FBG₁ 和 FBG₂ 的中心波长,并由软件采集存储数据。根据温度补偿光栅和压力光栅中心波长的变化即可实现渗压检测。

由于 FBG 的横向应变系数是纵向应变系数的 0.0133^[11],只考虑轴向变形的弹光效应。FBG 在轴向弹性变形下的波长变化量表示为^[12]

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\epsilon = K_e\epsilon, \quad (1)$$

式中 λ_B 为 FBG 的中心波长, $\Delta\lambda_B$ 为中心波长的变

化量, P_e 为 FBG 的有效弹光系数,对石英系光纤来说, $P_e \approx 0.22$, ϵ 为 FBG 在轴向的应变, K_e 为测量应变的灵敏度。对于中心波长为 1550 nm 的光栅,应变灵敏度为 1.2 pm/ $\mu\epsilon$ 。

2.2 波纹膜片参数选择

膜片是渗压传感器的压力敏感元件,膜片的灵敏度和量程范围直接决定传感器的特性,选择合适的膜片至关重要。该传感器选用了线性范围大,且灵敏度高的波纹膜片。波纹膜片的弹性特性方程为

$$\frac{pR^4}{Eh^4} = a\frac{w_0}{h} + b\frac{w_0^3}{h^3}, \quad (2)$$

式中 a 和 b 是和膜片材料和膜片形状有关的系数,并且 a 的绝对值比 b 的绝对值大得多; h 为膜片厚度; E 为弹性模量; p 为作用在膜片上的压强; R 为膜片的工作半径。膜片材料和参数确定后,其中心位移 w_0 和压强 p 有关,当 w_0 很小时,二者近似呈线性关系。

为了对(2)式进行简化,取 $\bar{w} = w_0/h$, $\bar{p} = pR^4/(Eh^4)$, 可得膜片中心位移

$$w_0 = \frac{pR}{E} \left(\frac{R}{h} \right)^3 \frac{\bar{w}}{\bar{p}}, \quad (3)$$

式中 \bar{p}/\bar{w} 为无量纲参数,和波纹深度与膜片厚度的比值有关。假设传感器中受拉光纤的长度为 L (即支撑架和压力导杆之间的光纤长度为 L), 则由(1)式和(3)式可得

$$\Delta\lambda_B = K_e \frac{w_0}{L} = K_e \frac{pR}{LE} \left(\frac{R}{h} \right)^3 \frac{\bar{w}}{\bar{p}}. \quad (4)$$

由(4)式可以看出,在其它参数确定的情况下,可以认为光栅中心波长变化量 $\Delta\lambda_B$ 和膜片中心位移 w_0 呈线性关系。

令 $\bar{\sigma} = pR^2/(Eh^2)$, 膜片承受的最大应力

$$\sigma = p \frac{\bar{\sigma}}{\bar{p}} \left(\frac{R}{h} \right)^2, \quad (5)$$

式中 $\bar{\sigma}/\bar{p}$ 也是和波纹深度与膜片厚度的比值有关的无量纲参数。由(5)式可以看出,膜片承受的最大应力 σ 和压强 p 呈线性关系。

膜片的安全系数

$$n = \frac{\sigma_s}{\sigma}, \quad (6)$$

式中 σ_s 为材料的屈服限,为了保证膜片处于弹性应变范围之内,而不能发生塑性变形, n 取大于 1 的实数。

该传感器选用了材料为 3J1 的波纹膜片,其弹性模量 E 为 210 GPa,泊松比 μ 为 0.3,屈服限 σ_s 为 882 MPa,膜片厚度 h 为 0.1mm,波纹深度为 0.4 mm。由于波纹沿半径具有恒定的深度,根据文献[13],可以得出无量纲参数 $\bar{p}/\bar{w} = 36$, $\bar{\sigma}/\bar{p} = 0.28$,当压强 $p =$

100 kPa时,由(4)~(6)式可得:膜片中心位移 w_0 为 0.068 mm;最大应力 σ 为 316.09 MPa;安全系数 n 为 2.79。

该传感器光纤受力长度为 32 mm,假设光纤和光栅的应变系数相同,因此当波纹膜片受到压强为 100 kPa 时,光栅的应变为 $2125 \mu\epsilon$, $\mu\epsilon$ 为微应变,而裸光栅的应变灵敏度为 $1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$,因此光栅中心波长变化为 2.55 nm。

3 传感器的 ANSYS 仿真分析

3.1 膜片模型仿真

ANSYS 是由世界上最大的有限元分析软件公司之一的美国 ANSYS 开发的计算机辅助工程分析软件。它利用有限元法及数值分析法相结合完成分析工作,能够降低设计成本、缩短设计周期、提高产品的可靠性、降低材料的消耗和进行模拟实验分析等^[14]。为了更精确地分析膜片中心位移和应力分布情况,对膜片进行了模拟仿真分析。

首先在 ANSYS 软件中建立实体模型,然后采用壳单元 SHELL63 进行有限元网格划分,生成有限元模型。膜片的实体模型和有限元模型分别如图 2,3 所示。

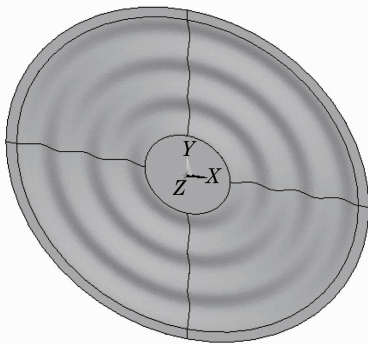


图 2 波纹膜片的实体模型

Fig. 2 Material model of the corrugated diaphragm

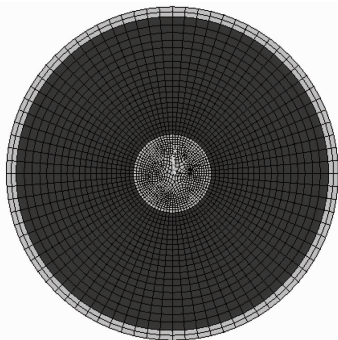


图 3 波纹膜片的有限元模型

Fig. 3 Finite element model of the corrugated diaphragm

ANSYS 自动生成的有限元模型结点数为 90,单元数为 2632,在膜片中心附近应力梯度较大,所以节点较密、单元较小。而远离中心的地方,应力变化较缓,所以节点较疏,单元较大。

在膜片边缘施加零位移约束,膜片在 100 kPa 压强下,其 Z 方向的位移云图和应力云图分别如图 4,5 所示。

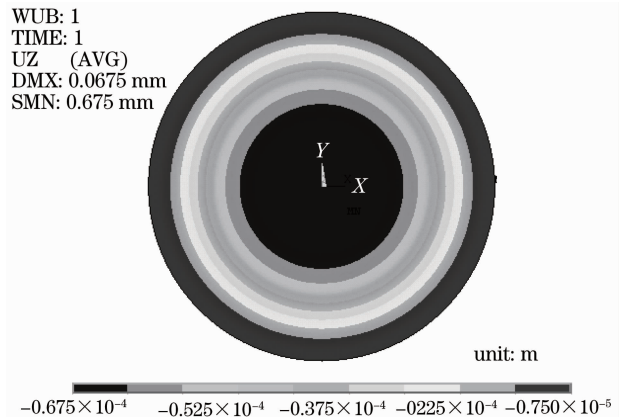


图 4 100 kPa 条件下膜片的位移云图

Fig. 4 Displacement cloud of the diaphragm under 100 kPa

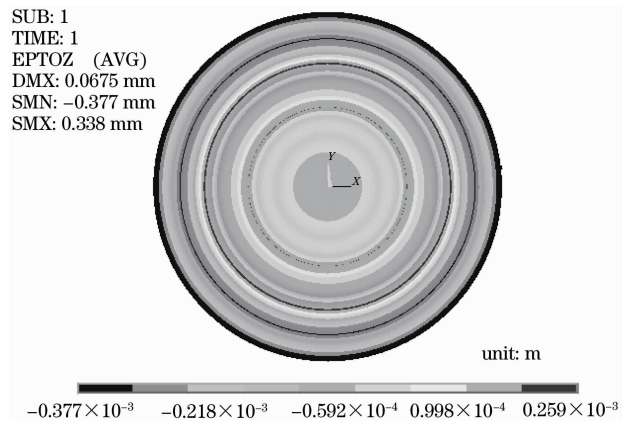


图 5 100 kPa 条件下膜片的应力云图

Fig. 5 Strain cloud of the diaphragm under 100 kPa

图 4 中,膜片在 Z 方向的位移量沿着半径方向减小,膜片中心处总位移和 Z 方向的位移最大值都是 0.0675 mm,可见膜片的中心位移值发生在沿膜片法向的 Z 方向。膜片带动压力导杆移动的距离为 0.0675 mm,忽略光纤对导杆的反作用力,传感器中 FBG_1 和 FBG_2 的伸长量也为 0.0675 mm,光纤受力长度为 32 mm,所以经仿真分析光栅中心波长漂移量为 2.53 nm。

图 5 中,膜片的应力以膜片中心为圆心呈环状分布,膜片中心处应力较小,膜片波纹的波峰和波谷处应力最大。

3.2 传感器抗压仿真

为了防止传感器外壳受到压力时对测量结果产生影响,对传感器进行优化设计。传感器外壳为厚 2 mm 的不锈钢,由于传感器结构较复杂,会对仿真结果和计算时间产生不良影响,对传感器模型进行简化,简化为金属不锈钢圆筒和焊接在里面的膜片,传感器实体模型如图 6 所示。传感器模型采用了 solid185 单元,共生成节点数为 13113,单元数为 9264。

对传感器外壳施加 100 kPa 压强,膜片不受压力作用时,传感器 Z 方向位移云图如图 7 所示。

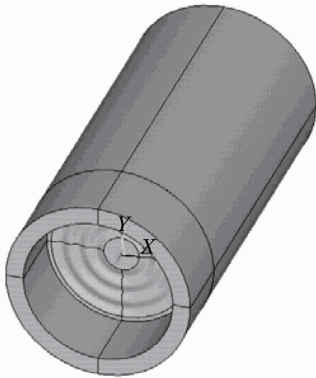
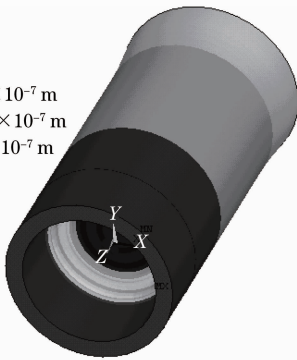


图 6 传感器实体模型

Fig. 6 Hardware model of the sensor

SUB: 1
TIME: 1
UZ (AVG)
DMX: 0.953×10^{-7} m
SMN: -0.953×10^{-7} m
SMX: 0.334×10^{-7} m



unit: m

-0.953×10^{-7} -0.667×10^{-7} -0.381×10^{-7} -0.950×10^{-8} 0.191×10^{-7}

图 7 传感器 Z 方向位移云图

Fig. 7 Displacement cloud at direction Z of the sensor

图 7 中,传感器外壳在 100 kPa 压强下,对膜片产生影响,使其中心沿 Z 方向产生 0.953×10^{-7} m 的位移,与膜片中心位移 0.0675 mm 相比,对膜片中心位移的影响仅为 0.14%。

4 标定试验与结果分析

该渗压传感器中 3 根光栅的光谱图如图 8 所示,FBG₁,FBG₂ 和 FBG₃ 的中心波长分别为 1543.20, 1553.09 和 1548.21 nm,3 dB 带宽分别为 0.21,0.25 和 0.22 nm。对该传感器分别在恒温条件下进行了

压力标定试验和恒压条件下的温度标定试验。

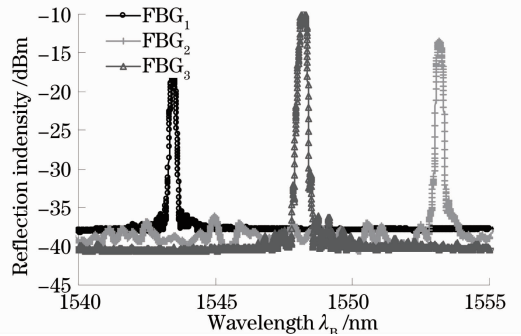


图 8 渗压传感器光谱图

Fig. 8 Optical spectra of seepage pressure sensor

4.1 恒温条件下压力标定试验

在恒温条件下对 FBG 的压力敏感特性进行标定。首先,保持室温恒定,待水温、室温和传感器温度相同时,将传感器放入液压机中。然后,每 10 kPa 为一步,逐步增大液压机的压强,最大压强为 100 kPa,所得传感器光栅中心波长与水压的关系曲线如图 9 所示。

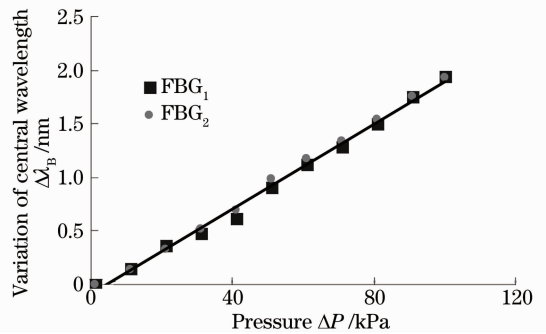


图 9 渗压传感器的压力曲线

Fig. 9 Pressure curve of seepage pressure sensor

图 9 中 FBG₁ 和 FBG₂ 的中心波长变化量和压强的关系分别为 $\Delta \lambda_B = 0.0199 \Delta P + 1543.1$ 和 $\Delta \lambda_B = 0.0202 \Delta P + 1553$,线性度 R^2 分别为 0.9945 和 0.9982。FBG₁ 和 FBG₂ 的压力灵敏度分别为 19.9 和 20.2 nm/MPa,而普通 FBG 的压力灵敏度为 0.003 nm/MPa^[15],试验设计的 FBG 渗压传感器中两个压力测量光栅的压力灵敏度分别是普通 FBG 的 6633 和 6733 倍,传感器的测量值取 FBG₁ 和 FBG₂ 的平均值,因此该传感器的压力灵敏度是普通光栅的 6683 倍。

传感器测量 FBG₁ 和测量 FBG₂ 在 100 kPa 的水压下波长变化量分别为 1.948 和 1.934 nm,和理论值 2.27 nm 及仿真值 2.53 nm 相比,标定值较小。因为在实际工作中,在膜片带动压力导杆移动的同时,光栅给压力导杆一个反作用力,这个力使得

膜片的位移量减小。FBG₁ 和 FBG₂ 的中心波长变化量也有微小的差异,这是由传感器机械结构误差、光栅之间的微小差异以及粘贴光栅时的人为误差共同作用的结果。

4.2 温度特性标定试验

由于 FBG 具有温度和应变交叉敏感的特性,并且不同光栅的温度特性是有差异的,为了能够对传感器的压力测量值进行有效的温度补偿,对传感器进行了温度标定。

将传感器放入恒温箱中,逐渐加温,试验所得渗压传感器中 FBG₁,FBG₂ 和 FBG₃ 的中心波长随温度的变化关系如图 10 所示,中心波长变化量和温差的变化关系分别为 $\Delta\lambda_B = 0.0159\Delta T + 1543.2$, $\Delta\lambda_B = 0.0154\Delta T + 1552.8$ 和 $\Delta\lambda_B = 0.016\Delta T + 1548.2$,线性度 R^2 分别为 0.9973,0.9973 和 0.9955。由于采用了丙烯酸酯涂覆光栅,渗压传感器光栅的温度灵敏度分别为 0.0159,0.0154 和 0.016 nm/°C,高于普通光栅的 0.0103 nm/°C。

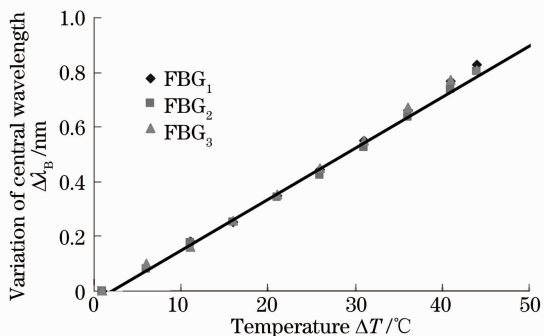


图 10 渗压传感器的温度曲线

Fig. 10 Temperature curve of seepage pressure sensor

在现场检测中,首先根据温度补偿光栅的中心波长变化情况,得出待测点温度的变化情况,再根据 FBG₁ 和 FBG₂ 的中心波长随温度的变化情况进行温度补偿,最后可由两个压力光栅中心波长随渗压的变化关系,测得待测点的渗压变化情况。

4.3 传感器的重复性能分析

在相同条件下对传感器的压力特性进行多次标定,所得试验结果如图 11 所示。

图 11 中,3 条曲线所表示的中心波长变化量与压力的关系分别为 $\Delta\lambda_B = 0.0201\Delta P - 0.1168$, $\Delta\lambda_B = 0.0203\Delta P - 0.1346$ 和 $\Delta\lambda_B = 0.0201\Delta P - 0.1255$,线性相关系数分别为 0.9922,0.9879 和 0.9935,可见该传感器重复测量性能良好。

4.4 传感器的迟滞性分析

将传感器放入液压机中,每 10 kPa 为一步,先

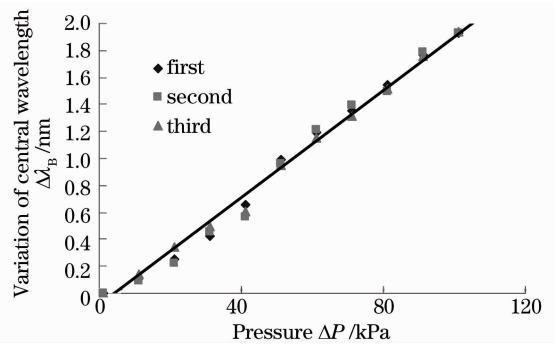


图 11 传感器重复性能测试曲线

Fig. 11 Repeat performance curve of the sensor

逐步增大液压机的压强,直至 100 kPa,再逐渐减小液压机的压强,所得实验结果如图 12 所示。

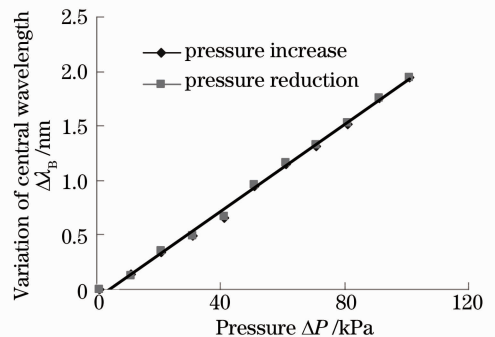


图 12 传感器迟滞曲线

Fig. 12 Hysteresis curve of the sensor

图 12 中,压强逐渐增大和压强逐渐减小时测得的两条曲线的关系式分别为 $\Delta\lambda_B = 0.0200\Delta P - 0.0815$ 和 $\Delta\lambda_B = 0.0201\Delta P - 0.0756$,线性相关系数分别为 0.9936 和 0.9966。两条曲线的最大偏差为 0.0165 nm,因此该传感器的迟滞为

$$\delta_h = \frac{0.0165}{1.94045} \times 100\% = 0.85\%$$

能够正确实现渗压测量。

5 结 论

该传感器采用了拉杆结构,将 FBG 所受的压力转化成了轴向拉力,使传感器的渗压灵敏度提高了 6683 倍,同时避免了因光栅弯曲而造成测量不准。用两根光栅同时进行压力检测,提高了机械结构的对称性,避免因压力导杆倾斜使测量不准,并且最终结果取两光栅的平均值,进一步提高了测量的准确度。采用波纹膜片,提高了传感器的线性度和检测范围,其线性拟合度高于 0.99,检测范围为 0~100 kPa。

该光纤渗压传感器基于全光信号设计,没有电子器件,且具有良好的防水性能,不存在电火花隐患,并且抗电磁干扰,体积小。

参 考 文 献

- 1 Alan D. Kersey, Michael A. Davis, Heather J. Patrick *et al.*. Fiber grating sensors [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1442~1463
- 2 Sungchul Kim, Seungwoo Kim, Jaejoong Kwon *et al.*. Fiber Bragg grating strain sensor demodulator using a chirped fiber grating [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(8): 839~841
- 3 Agostino Iadicicco, Andrea Cusano, Stefania Campopiano *et al.*. Thinned fiber Bragg gratings as refractive index sensors [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2005, **5**(6): 1288~1295
- 4 Zhu Haohan, Qin Haikun, Zhang Min *et al.*. Peak-detection algorithm in the demodulation for the fiber Bragg grating sensor system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 893~897
朱浩瀚, 秦海琨, 张 敏等. 光纤布拉格光栅传感解调中的寻峰算法[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 893~897
- 5 Chang Tianying, Li Dongsheng, Sui Qingmei *et al.*. Experiment research of fiber grating sensor in the forked tunnel model [J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2008, **29**(1): 103~108
常天英, 李东升, 隋青美等. 光纤光栅传感技术在分岔隧道模型中的实验研究[J]. *仪器仪表学报*, 2008, **29**(1): 103~108
- 6 Zhou Changzun, Chen Yang, Peter Kung. Research on thermal stability of fiber Bragg gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(4): 434~437
周长尊, 陈 阳, Peter Kung. 布拉格光纤光栅热稳定性研究 [J]. *光学学报*, 2003, **23**(4): 434~437
- 7 Liu Jinxuan, Chai Jing, Zhu Lei *et al.*. Theory of fiber Bragg grating multi-point sensing of rock deformation and its engineering application [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2143~2147
刘金瑄, 柴 敬, 朱 磊等. 岩层变形检测的光纤光栅多点传感理论与工程应用[J]. *光学学报*, 2008, **28**(11): 2143~2147
- 8 Feng Yan, Zhang Hua, Li Yulong *et al.*. Temperature sensitization model of fiber Bragg grating with metal coating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 336~341
冯 艳, 张 华, 李玉龙等. 金属化保护的光纤布拉格光栅温度传感模型[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 336~341
- 9 Wu Yonghong, Yan Qixiang *et al.*. Investigation on reflective fiber-optic seepage pressure sensors [J]. *J. Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2003, **35**(3): 26~29
吴永红, 晏启祥, 丁 睿等. 反射式光纤水工渗压传感器的研究与实验[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2003, **35**(3): 26~29
- 10 Xia Yuanyou, Rui Rui, Liang Lei *et al.*. An attempt of embedding fiber optic Bragg grating sensors in freeway foundation to detect the pore-water pressure [J]. *Chinese J. Geotechnical Engineering*, 2005, **27**(2): 162~166
夏元友, 芮 瑞, 梁 磊等. 光纤渗压传感器与公路软基监控试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2005, **27**(2): 162~166
- 11 Zhu sirong, Tan Minfeng, Guo Mingjing *et al.*. Research on the transverse effect of the fiber Bragg grating [J]. *J. Wunan University of Technology*, 2005, **27**(9): 7~9
朱四荣, 谭敏峰, 郭明金等. 光纤布拉格光栅的横向效应研究 [J]. *武汉理工大学学报*, 2005, **27**(9): 7~9
- 12 Fu Haiwei, Qiao Xueguang, Jia Zhen'an *et al.*. Stress sensitivity enhanced in-fiber Bragg grating pressure sensor [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(4): 473~476
傅海威, 乔学光, 贾振安等. 应力增敏的光纤布拉格光栅压强传感器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(4): 473~476
- 13 Cheng Daxian. *Mechanical Design Handbook* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. 7-179~7-182
成大先. *机械设计手册* [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 7-179~7-182
- 14 Chen Jingyi, Cai Guozhong. *Computer-Aided Engineering Analysis ANSYS User Guide* [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2001. 5~25
陈精一, 蔡国忠. *电脑辅助工程分析 ANSYS 使用指南* [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001. 5~25
- 15 M. G. Xu, L. Reekie, Y. T. Chow *et al.*. Optical in-fiber grating high pressure sensor [J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(4): 398~399