

光纤光栅传感网络在油气出地管内腐蚀监测的应用研究

杨牧 刘秀红 刘伟 李再春

天津亿利科能源科技发展股份有限公司, 天津 300384

摘要 油气管线内部腐蚀是导致管线失效的主要因素。针对这一问题,采用复用技术设计了一种基于光纤布拉格光栅的管线内腐蚀监测系统。该系统通过出地管线外表面的应力变化来确定内表面的腐蚀程度,利用7路光纤光栅传感器组成阵列式传感网络,通过温度补偿光栅实现温度补偿。实验表明,该系统测压精度较高,系统误差小于2.23%。用现场实际压力数据验证了系统的可行性与稳定性,该系统完全满足油气管线内部缺陷在线监测的要求。

关键词 光纤光学;管道腐蚀;布拉格光纤光栅;复用技术;温度补偿

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.020604

Applied Research of Optical Fiber Sensor in Oil and Gas Pipe Corrosion Monitoring

Yang Mu Liu Xiuhong Liu Wei Li Zaichun

E-Tech Energy Technology Development Co., Ltd., Tianjin 300384, China

Abstract Internal corrosion of oil and gas pipeline is one of the main factors leading to pipeline failure. Based on principle of the fiber Bragg grating strain sensor as well as the multiplexing technology, an on-line monitoring system based on optical fiber grating sensors is studied. The corrosion degree of the inner pipeline can be determined by the surface stress changes, and array sensor network using 7 channels of FBG sensor is set up in the monitoring system, through temperature compensation grating to realize temperature compensation. Experiments show that the system pressure measuring accuracy is high, with the system error less than 2.23%. The feasibility and stability of the system are validated by comparing the measurement results with the actual pressure from the scene of the production, meeting the requirements of internal corrosion online monitoring.

Key words fiber optics; pipeline corrosion; fiber Bragg grating; multiplexing technology; temperature compensation

OCIS codes 060.3735; 060.4250; 280.4788

1 引言

油气管道是油气田开发与输送的主要通道。随着油气管道服役年限的增加,由腐蚀引起的管道穿孔和断裂是引起油气管道失效的主要因素^[1]。易失效位置大多在焊缝、弯头、变径、分支等位置。油气出地管线连接浮式生产储油装置(FPSO)传输至陆地处理厂终端,是油气处理的主要输入端的一级弯头管线。由于受到各类腐蚀性介质、累积游离水、冲刷腐蚀以及较大的运行压力等因素影响,大大增加了油气出地管道的腐蚀失效风险。

目前,输油气管腐蚀检测方式主要有应力波法、负压波法、超声波法、流量平衡等。由于油气管输送介质的特殊性,在保证高灵敏度、高定位精度以及安全可靠的前提下,要求实现实时在线监测。光纤传感技术是利用光纤光栅元件,通过光栅波长变化量将被测信号转换成光信号输出的一种新型传感技术^[2]。其具有灵敏度高、不受电磁干扰、电气绝缘好、耐腐蚀、无电火花、可以在易燃易爆的环境中测量等优点,非常适用

收稿日期: 2013-10-20; 收到修改稿日期: 2013-10-24; 网络出版日期: 2014-01-20

作者简介: 杨牧(1987—),男,硕士,工程师,主要从事光学传感方面的研究。E-mail: yangmu640000@126.com

于油气管道的安全监测^[3]。

本文基于复用技术设计了一种光纤布拉格光栅(FBG)在线监测系统。该系统采用7路多波长光纤光栅传感器组成阵列式传感系统,通过参考温度补偿光栅实现温度补偿^[4-5],实时监测油气出地管线弯头表面应力的变化,并能够记录管线内表面缺陷从无到有、从轻微到严重整个过程中外表面的应力变化,当缺陷处的外表面应力达到报警阈值时启动报警。实验表明,该系统灵敏度较高、稳定性较好,可实现管线内部腐蚀的在线监测^[6-7]。

2 FBG传感器敏感特性

FBG传感器检测原理是:一束宽带光经过不同的光纤光栅中,满足布拉格波长的窄带光发生全反射,其反射光谱在布拉格波长处出现峰值。当FBG受到外部因素影响(温度、应力应变等)时,其栅距发生变化,从而改变后向反射光波长,因此通过测量FBG的波长漂移量可测得温度与应力变化量^[8],如图1所示。

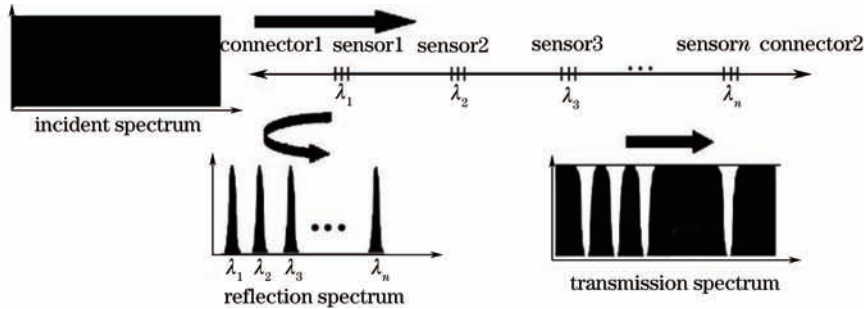


图1 FBG反射光谱与透射光谱示意图

Fig.1 Diagram of FBG reflection spectrum and transmission spectrum

在图1中,在一根光纤上串联 n 个FBG传感器,其反射中心波长 λ_B 满足

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

式中 n_{eff} 为光纤纤芯有效折射率, Λ 为光栅周期。由(1)式可知, n_{eff} 和 Λ 决定了反射中心波长 λ_B 。因此, n_{eff} 和 Λ 的变化会使FBG反射波长产生漂移:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - p_e)\xi_z + \lambda_B(a_A + a_n)\Delta T, \quad (2)$$

式中 p_e 为应光常数, ξ_z 为微应变, a_A 为光纤热膨胀系数, a_n 为热光系数。对于常用的锗硅光纤,当FBG的反射中心波长 $\lambda_B \approx 1550 \text{ nm}$ 时,应光常数 $p_e \approx 0.144$,其应变灵敏度约为 $1.33 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 。 $a_A \approx 0.55 \times 10^{-6}$, $a_n \approx 8.6 \times 10^{-6}$,温度灵敏度约为 $14.2 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。代入(2)式可得

$$\Delta\lambda_B = 1.33\xi_z + 14.2\Delta T, \quad (3)$$

从(3)式可以看出,应变和温度变化同时引起反射中心波长变化,因此会产生波长的交叉敏感现象。本系统采用温度补偿技术,利用温度补偿去敏光栅作为参考光栅抵消温度变化所引起的波长漂移的影响^[9-10]。

3 管线应力监测系统设计

油气出气管线内部受到各类腐蚀介质以及较大的运行压力的影响,一级弯头管线位置最容易被腐蚀。由于管线内部运行压力较大,因此内部压力对腐蚀点外壁产生较大的应变。通过对出气管线内部应力进行模拟,确定容易腐蚀监测点位置,采用多个FBG传感器通过串/并联形成传感网络,实现对出气管线弯头内部腐蚀在线实时监测^[11-12]。

3.1 管线模拟仿真

管线监测系统通过对弯头管线的模拟,确定弯头管线内部容易发生腐蚀点,同时在此位置安装FBG传感器以监测此位置的应力变化量。通过应变与温度物理量变化的模拟,数据分析模块获取FBG传感器的波长漂移量,实现应变值与漂移量的数据转换,以不同的功能模块展示不同的数据解析,如图2所示。

图2(a)中将油气管线以三维(3D)的形式虚拟显示,同时标出了监测点位置,并配有状态指示灯,如红色报警、黄色预警、绿色正常。图2(b)管线运行参数主要显示管线的运行压力、管线屈服强度、管线温度、设计压力及系统的预警和报警值。

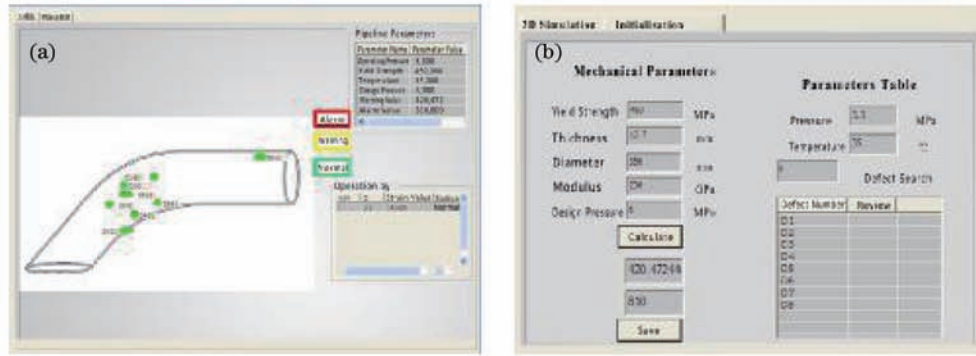


图2 (a) 三维弯头管线示意图; (b) 管线运行参数图

Fig.2 (a) Three-dimensional pipeline schematic diagram; (b) pipeline operation parameters

根据天然气处理厂出地端管线材质的实际情况,管道的设计压力应为内压(或外压)在极端苛刻条件下的极限压力。正常工作压力应小于极限压力,若超出极限压力,会发生爆炸等危险。某油气处理厂油气管线材质选用X60钢材,外径为356 mm,厚度为12.7 mm,屈服强度为451~480 MPa,抗拉强度为543~597 MPa,弹性模量 E 为206 GPa,伸长率为24%,泊松比为0.3,极限压力为6.0 MPa,工作温度为25℃,正常工作压力为3.3 MPa。在此极限压力下产生的管线整体应变(应力)值为基础安全应变值。设管道的环向应力为 σ ,极限压力为 P ,管线外径为 D ,壁厚为 d ,则有

$$\sigma = (P \times D) / 2d, \quad (4)$$

代入上述数值得 $\sigma = 84.094$ MPa。则基础应变值 ξ_b 为

$$\xi_b = \sigma / E = 84.094 / 206000 = 4.08 \times 10^{-4}, \quad (5)$$

即其基础安全应变值为408 $\mu\epsilon$ 。

通过输入管线参数值,可快速计算出监测点管线正常运行的微应变与预警值。通过不同位置FBG的返回信号,可实现同一路径的串联FBG返回信号以及不同路径并联FBG返回信号,如图3所示。

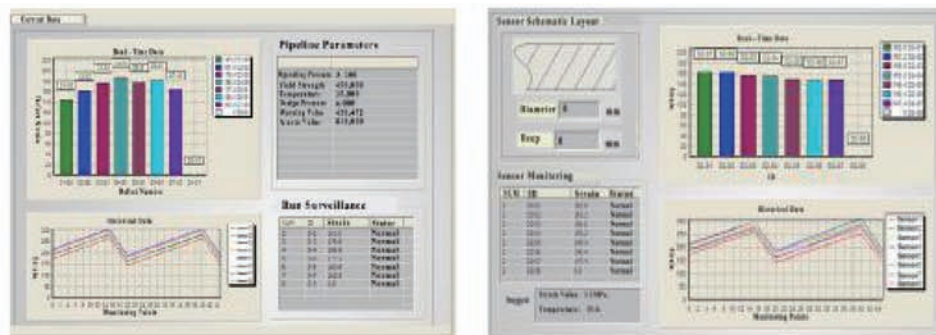


图3 不同通道监测数据图

Fig.3 Monitoring data of different channel

3.2 监测系统设计

本系统结合了波分/空分复用技术,将多个FBG传感器以串/并联的形式组成FBG传感网络,可同时监测多个点。针对油气出地管线应力监测,光纤光栅传感网络由7路传感器并联,第一路串联8个FBG,其余每路串联7个FBG。其中第一路第8个传感器为参考光栅以实现温度补偿。系统结构如图4所示。

图4中,系统光源选用LSM-ASE-CF13型ASE110405放大自发辐射(ASE)宽带光源,光源中心波长为1545 nm,输出功率为13.7 dB。耦合器选用1×8熔锥型光纤耦合器。系统光开关选用FSW 1×8-SM-A型单模光开关模块,其工作波长为1260~1625 nm。光栅解调模块选用BaySpec公司生产的光纤布拉格光栅分析仪(FBGA)。系统采用的传感器中心反射波长分别为 $\lambda_1 = 1551$ nm、 $\lambda_2 = 1548$ nm、 $\lambda_3 = 1545$ nm、 $\lambda_4 = 1542$ nm、 $\lambda_5 = 1539$ nm、 $\lambda_6 = 1536$ nm、 $\lambda_7 = 1533$ nm、 $\lambda_8 = 1530$ nm,其中 λ_8 为温度补偿光栅中心反射波长,其余7个传感器封装成一组传感器,共计7组。

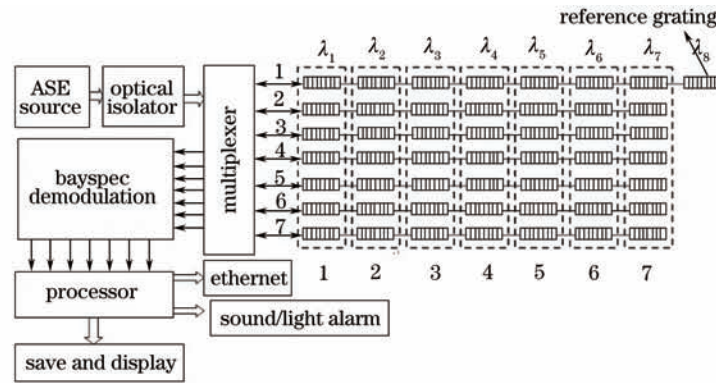


图4 光栅光纤传感器应力监测系统

Fig.4 FBG stress sensor monitoring system

4 实验结果与分析

本监测系统在现场安装完毕后,系统监测点为7个,正常工作15 d,其监测数据总量近310万个。每个监测点安装一组传感器,每组传感器由7个FBG并联。监测期间管线工作压力为 3.1 ± 0.1 MPa,由于数据量比较庞大,因此选择每个监测点一天当中波长漂移最大/最小值为当前监测点有效值。正常工作15 d的监测数据如表1所示。

表1 系统运行15 d的检测数据最大/最小值(单位: $\mu\varepsilon$)Table 1 Maximum and minimum detection data in 15 days (unit: $\mu\varepsilon$)

Location		1	2	3	4	5	6	7
2013-08-12	Max	190.8	192.0	193.4	194.4	193.4	192.8	190.8
	Min	189.6	189.4	191.0	190.2	191.8	191.6	190.2
2013-08-13	Max	194.6	195.6	196.8	199.2	197.2	199.8	195.6
	Min	188.2	189.8	192.0	193.8	195.2	193.8	191.0
2013-08-14	Max	192.0	191.6	195.8	199.2	196.0	197.6	194.4
	Min	185.4	188.0	190.6	193.6	194	193.4	187.8
2013-08-15	Max	191.2	193.6	194.8	198.6	195.2	196.8	193.4
	Min	184.6	186.8	190.2	193.2	193.8	191.8	186.8
2013-08-16	Max	192.0	194.2	195.2	199.6	196.8	195.8	194.8
	Min	185.8	187.8	190.4	193.2	193.8	192.8	187.2
2013-08-17	Max	191.4	193.8	195.0	197.4	196.2	199.2	194.2
	Min	185.6	187.2	190.8	192.2	193.6	192.4	187.0
2013-08-18	Max	191.8	194.0	195.0	198.4	196.4	196.6	193.4
	Min	185.0	187.4	190.6	192.6	193.6	192.8	187.4
2013-08-19	Max	192.0	194.8	195.6	200.0	196.6	200.4	195.2
	Min	186.0	187.6	191.4	194.0	194.4	193.6	187.8
2013-08-20	Max	191.4	193.2	195.4	199.4	196.0	197.2	193.8
	Min	184.8	187.8	190.2	193.6	193.6	192.6	187.2
2013-08-21	Max	194.2	196.4	196.4	199.2	198.0	197.6	195.4
	Min	187.4	189.6	191.8	192.8	194.8	194.0	191
2013-08-22	Max	191.8	193.8	195.0	198.6	196.0	197.6	194.2
	Min	184.8	186.8	190.4	193.6	193.0	192.0	186.4
2013-08-23	Max	190.2	192.8	191.8	198.0	195.6	195.8	193.2
	Min	184.6	186.4	189.6	192.0	192.4	191.8	185.8
2013-08-24	Max	191.8	194.0	195.0	198.6	196.6	198.0	194.6
	Min	185.2	188.0	190.2	193.8	194.0	193.2	187.4
2013-08-25	Max	191.8	194.4	195.2	200.8	196.6	199.0	194.4
	Min	184.8	187.4	191.6	1942.2	194.8	193.2	192.2
2013-08-26	Max	190.8	193.0	194.4	199.2	195.8	195.2	192.2
	Min	184.4	186.2	190.2	192.8	192.6	191.0	191.8

从监测数据可以看出,各监测点的应变波动范围为 $190\pm 10 \mu\varepsilon$ 。整体监测数据平均值为 $192 \mu\varepsilon$,7个监测点之间应变极差为 $19.4 \mu\varepsilon$,单个FBG应变极差为 $16.2 \mu\varepsilon$ 。根据表1的监测数据,可得监测系统正常

运行期间的最大漂移量与最小漂移量,如图5、图6所示。

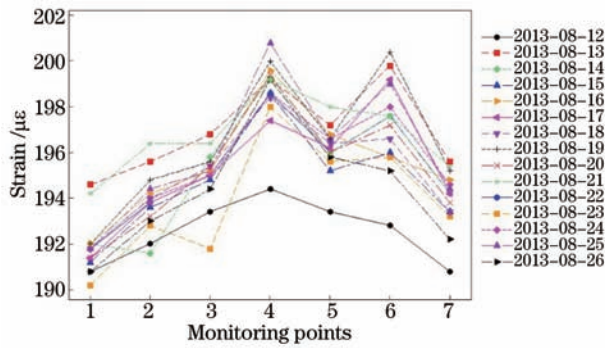


图5 阶段性监测点FBG传感器最大漂移量

Fig.5 Maximum drifts of periodic monitoring FBG sensor

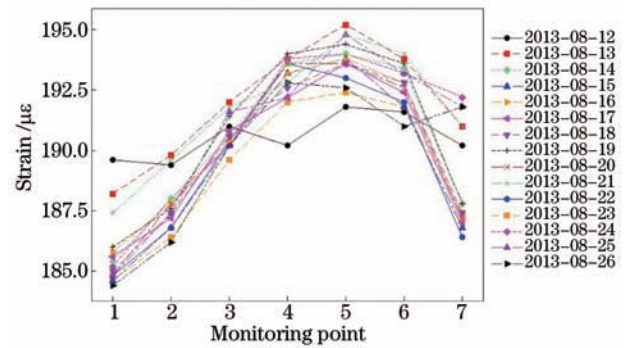


图6 阶段性监测点FBG传感器最小漂移量

Fig.6 Minimum drifts of periodic monitoring FBG sensor

根据15 d的监测数据,各个监测点之间的监测数据的变化情况如图7所示。

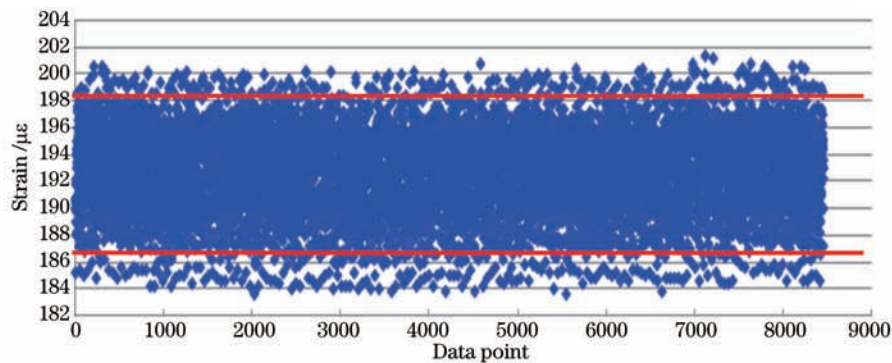


图7 15 d内FBG传感器监测数据样图

Fig.7 Sample figure of FBG sensor monitoring data

从图7可以看出,整个系统监测的应力波动范围为3.067~3.233 MPa,对应管线强度变化为187~198 $\mu\epsilon$,应力波动与FBG应变波动范围基本一致。在系统监测期间没有出现明显腐蚀现象,油气管线内部压力变化为主要影响因素。

从15 d的监测数据统计出发,设定小于最小应变值187 $\mu\epsilon$ 和大于最大应变值198 $\mu\epsilon$ 的数据为不稳定值,应变处于[187 $\mu\epsilon$,198 $\mu\epsilon$]的数据为稳定点,得到表2所示15 d监测系统稳定数据统计结果。

表2 系统运行15 d的稳定数据统计表

Table 2 Stability statistics of the system running in 15 days

Datt	Less than 187 $\mu\epsilon$	187~198 $\mu\epsilon$	Less than 198 $\mu\epsilon$	Total	Instability /%
2013-08-12	2125	207032	2523	211680	2.20
2013-08-13	2612	206939	2129	211680	2.24
2013-08-14	2506	207065	2108	211680	2.18
2013-08-15	2398	207066	2216	211680	2.18
2013-08-16	2712	206874	2093	211680	2.27
2013-08-17	2510	206981	2189	211680	2.22
2013-08-18	2395	206769	2516	211680	2.32
2013-08-19	2115	207151	2414	211680	2.14
2013-08-20	2317	207135	2128	211680	2.10
2013-08-21	2289	206663	2728	211680	2.37
2013-08-22	2415	206769	2496	211680	2.32
2013-08-23	2089	206875	2716	211680	2.27
2013-08-24	2285	207044	2315	211680	2.17
2013-08-25	2334	206939	2407	211680	2.24
2013-08-26	2282	207002	2396	211680	2.21
Total	35384	3104304	35374	3175200	2.23

由表2可以看出,整个系统监测时间内不稳定性处于2.10%~2.37%之间,系统正常工作15 d的平均不稳定性为2.23%。

5 结 论

基于复用技术设计了一种高灵敏度的油气管线内腐蚀监测系统,可实时记录管线内表面缺陷从无到有、从轻微到严重的整个过程中外表面的应力变化。利用管线内部压力对缺陷的应力变化使FBG产生波长漂移,采用温度补偿光栅补偿温度影响,从而实现管线内部缺陷在线监测。该系统采用的FBG传感器应变灵敏度为 $1.33 \text{ pm}/\mu\epsilon$,温度灵敏度为 $14.2 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,实验表明,该系统测压精度较高、稳定性较好,系统误差小于2.23%。现场实际工作压力数据验证了此系统的可行性与稳定性,表明其可满足油气管线内部缺陷在线监测的要求。

参 考 文 献

- 1 Cui Qian. Research and Application of Oil and Gas Pipeline Leak Detection Method[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005. 19-37.
崔 谦. 油气管道泄漏检测方法的研究及应用[D]. 天津: 天津大学, 2005. 19-37.
- 2 Sun Guodan, Wang Rong, Pu Tao, *et al.*. Dual-wavelength sampled fiber Bragg grating by changing refractive index of fiber[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0405001.
孙幅丹, 王 荣, 蒲 涛, 等. 改变光栅折射率实现双波长采样光栅的方法[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0405001.
- 3 Cao Changcheng. Experiment Research on Engineering Structure Based on FBG Strain Sensor Immunity and Fracture Monitoring[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2012. 11-15.
曹长城. 工程结构基于FBG应变传感器抗度及裂缝监测的实验研究[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2012. 11-15.
- 4 Wang Junjie, Liu Bo, Zhang Fengtao, *et al.*. New-style optical fiber Bragg grating pressure sensor with temperature compensation[J]. Chinese J Scientific Instrument, 2009, 30(11): 2342-2346.
王俊杰, 刘 波, 张丰涛, 等. 基于温度补偿方法去敏的新型光纤光栅压力传感器[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(11): 2342-2346.
- 5 Wang Libing, Wang Dianfu. Research on temperature compensation of fiber Bragg grating strain sensor based on reference grating[J]. J Optoelectronics·Laser, 2006, 17(1): 50-53.
万里冰, 王殿富. 基于参考光栅的光纤光栅应变传感器温度补偿[J]. 光电子·激光, 2006, 17(1): 50-53.
- 6 Li Dongming, Chen Jun, Ge Huiliang, *et al.*. Water sound sensor using the optical fiber grating sensitivity enhanced through side pressure and end surface pulling[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0506001.
李东明, 陈 军, 葛辉良, 等. 侧面压迫式及端面拉伸式增敏光纤光栅水声传感器[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0506001.
- 7 Ye Zhenxing, Su Yang, Zhu Yong, *et al.*. Study on the pressure sensing measurement based on Stokes parameters of fiber gratings[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(6): 0605003.
叶振兴, 苏 洋, 朱 勇, 等. 基于光纤光栅斯托克斯参量的压力传感测量研究[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0605003.
- 8 Feng Sha. The Application of Long Distance FBG-Based Sensing System and Its Applications[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2010. 4-11.
封 莎. 基于FBG的长距离传感系统及应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2010. 4-11.
- 9 Cai An, Yin Xinda, Chang Xiaodong. Optical fiber grating temperature and pressure sensor based on diaphragm with temperature compensation[J]. Transducer and Micro System Technologies, 2013, 32(4): 98-100.
蔡 安, 印新达, 常晓东. 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.
- 10 Fan Xiaoyu. Study of FBG strain sensor temperature compensation system[J]. Optical Device, 2012, (6): 7-9.
樊晓宇. 光纤光栅应变传感器温度补偿系统研究[J]. 光器件, 2012, 6: 7-9.
- 11 Li Jun, Wu Jin, Gao Junqi. Study of an optical fiber grating sensor for monitoring corrosion of reinforcing steel[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(1): 283-286.
李 俊, 吴 瑾, 高俊启. 一种监测钢筋腐蚀的光纤光栅传感器的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(1): 283-286.
- 12 Luo Binbin, Zhao Mingfu, Zhou Xiaojun, *et al.*. Research on the refractive-index gradient sensor based on the structured fiber Bragg grating[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0306004.
罗彬彬, 赵明富, 周晓军, 等. 基于结构化光纤Bragg光栅的折射率梯度传感器研究[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0306004.