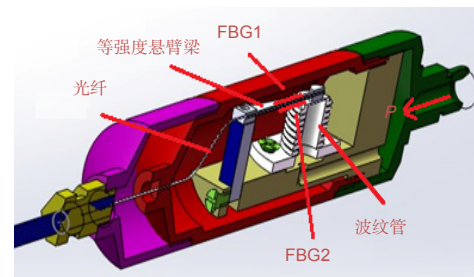




光纤与电子传感器负压波信号对比实验

赵林*, 王纪强, 李振

山东省光纤传感技术重点实验室, 山东省科学院激光研究所,
济南 250103



摘要: 负压波技术是管道泄漏监测的有效手段。为获取更精确的负压波拐点信息,提高信噪比,采用 102.8 m 管道实验平台,根据不同环境下传感器监测负压波信号,对光纤传感器与传统电子压力传感器在响应时间、静态稳定性、抗电磁干扰等方面进行了对比实验分析。实验结果表明,在同等的管道工况下,光纤传感器从泄漏负压波信号的获取到压力信号的重新恢复稳定约需 30 ms,远优于电子传感器 500 ms 的响应时间。在静态稳定性实验中,光纤传感器压力信号输出稳定,压力波动范围 ± 0.001 MPa,远小于电子传感器压力输出变化 ± 0.006 MPa。综合评价分析表明,光纤传感器具有良好的稳定性及抗电磁干扰性能,在管道泄漏监测及能源、化工等领域有着广阔的应用前景。

关键词: 负压波; 光纤传感器; 响应时间; 稳定性

中图分类号: TN253; TP212

文献标志码: A

Experimental research on negative pressure wave signal of optical fiber and electronic sensor

Lin Zhao*, Jiqiang Wang and Zhen Li

The Key Laboratory of Optical Fiber Sensing Technology of Shandong Province, Laser Research Institute of Shandong Academy of Sciences, Jinan 250103, China

Abstract: Negative pressure wave technique is an effective method for pipeline leak detection. In order to obtain more accurate inflection point information of negative pressure wave and improve signal to noise ratio, experiments using 102.8 meters pipeline experimental platform, according to the negative pressure wave signal captured by the sensors, the response time, static stability and anti-electromagnetic interference of the optical fiber sensor and the traditional electronic pressure sensor are analyzed. Experimental results show that from the leakage of negative pressure wave signal acquisition to the pressure signal restore stability, optical fiber sensor takes about 30 ms, which is far better than the electronic sensor 500 ms. In the static stability experiment, the pressure signal output of optical fiber sensor is stable, and the pressure fluctuation range is ± 0.001 MPa, which is far less than the electronic sensor ± 0.006 MPa. Comprehensive evaluation analysis shows that the optical fiber sensor has good stability and anti-electromagnetic interference performance, and has wide application prospect in the fields of pipeline leakage monitoring, energy and chemical industry.

Keywords: negative pressure wave; optical fiber sensor; response time; stability

DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.06.006

Citation: *Opto-Elec Eng*, 2017, 44(6): 610–615

收稿日期: 2017-03-04; 收到修改稿日期: 2017-03-24

*E-mail: linzhao1225@126.com

1 引言

管道运输是石油、天然气运输的最有效方式,具有运输量大、安全可靠无污染、能耗小及成本低等优点,但由于老化腐蚀、地质灾害及人为第三方破坏等原因,不可避免存在着泄漏事故的风险^[1]。油气泄漏不仅造成经济损失和环境污染,而且由于油气产品易燃、易爆的特点,可能直接威胁人民生命财产安全,甚至是造成严重的恶性事故^[2,3]。而负压波泄漏检测技术一直以来是长输油气管道泄漏检测的主要技术手段之一。但实际应用过程中由于外部环境因素干扰及传感器本身性能的限制,检测灵敏度低、定位精度差成为目前制约负压波泄漏检测技术发展的瓶颈^[4]。

目前,对压力传感器的研究主要有电容式、压阻式、光纤光栅式及扩散硅式等^[5,6]。文献[7]以氧化石墨烯为原料设计了一种高性能电容式压力传感器,可检测最小压力 0.24 Pa,响应时间 100 ms;文献[8]提出一种基于波纹膜片和角抛光光纤的 Fabry-Perot 压力传感器,压力测量范围 0~0.1 MPa,灵敏度 705.64 $\mu\text{m}/\text{MPa}$;文献[9]采用弹性膜片结构,研发了一种温度实时补偿的光纤压力传感器,25 MPa 压力范围内检测精度为 0.19% FS。

本文在前期光纤负压波管道泄漏监测系统的基础上,对光纤传感器与目前广泛应用的电容式压力传感器在负压波信号监测、响应时间、可靠性及抗电磁干扰等方面进行深入研究,这对提高负压波泄漏监测系统整体性能具有重要意义。

2 主要设备及基本原理

2.1 光纤传感器

光纤传感部分主要由光纤解调仪与光纤压力传感

器两部分组成^[10]。光纤解调仪采样频率 1 kHz,最小分辨率 1 μm 。光纤压力传感器由山东微感光电子有限公司研制开发,传感器采用波纹管与悬臂梁相结合的组合机械结构^[11]。量程 1.5 MPa,测量精度 0.1% FS,其基本测压原理如图 1 所示。

根据已有技术资料,光纤光栅(fiber Bragg grating, FBG)受温度和应变共同作用产生的波长变化为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \alpha\Delta T + \zeta\Delta T + \delta - P_e\delta, \quad (1)$$

其中: α 为光纤的热膨胀系数, ζ 为光纤的热光系数, δ 为应变引起的光栅条纹间距变化, P_e 为有效光弹系数^[12]。

当气体或者液体通过传感器接头内部通道、过滤网过滤后,经底座通道到达波纹管内部,压力变化会使波纹管在轴向发生形变,波纹管形变推动紧贴于波纹管上部的应变梁发生挠曲形变 δ_M ,应变梁发生挠曲形变的同时,粘接在应变梁上下两侧的 FBG 也会发生形变,从而导致 FBG 中心波长发生偏移,对两 FBG 应用式(1)并做差得:

$$\delta_M = \delta_1 - \delta_2 = \frac{1}{1 - P_e} \left(\frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_{B1}} - \frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B2}} \right), \quad (2)$$

根据 δ_M 与 FBG 中心波长变化 $\left(\frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_{B1}} - \frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B2}}\right)$ 的线性关系,可以得出当前传感器内部压力值^[13]。

2.2 电子传感器

电子传感部分主要由数据采集卡与电子压力传感器两部分组成。数据采集卡采用 NI 9203,最大采样频率 200 kHz, ± 20 mA、16 位模拟电流输入。电子传感器为北京远东仪表有限公司生产的罗斯蒙特 3051G 系列压力变送器,量程 1.0 MPa,测量精度 0.065% FS,4 mA~20 mA 电流输出,其基本原理如图 2 所示。

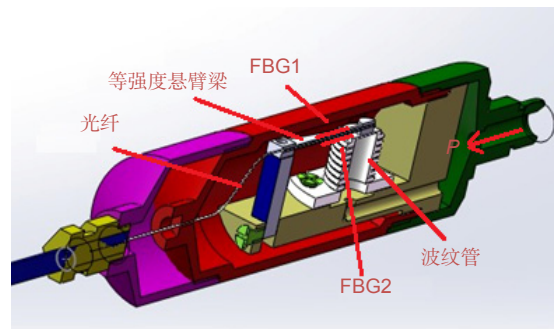
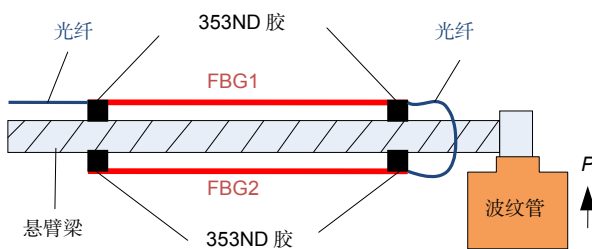


图 1 光纤传感器结构模型。

Fig. 1 Structure model of optical fiber sensor.

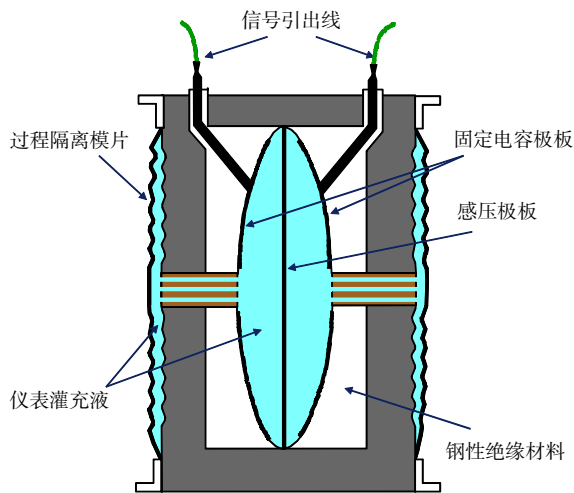


图2 电子传感器测压模型.

Fig. 2 Electronic sensor pressure measurement model.

固定电容极板和位于中间的感压极板组成两个电容室,其电容值与板面积 A 成正比,与板间距 d 成反比,其关系如式(3)所示:

$$C = \frac{\epsilon A}{d}, \quad (3)$$

其中: ϵ 是电容器极板之间介质的介电常数。外界压力通过导压灌充液/硅油传导至感压极板,感压极板产生与压力成正比的位移 Δd , 该位移使两电容室两侧的差分电容值发生改变,如式(4)所示:

$$\begin{cases} C_L = \frac{\epsilon A}{d + \Delta d} \\ C_R = \frac{\epsilon A}{d - \Delta d} \end{cases} \quad (4)$$

差分电容通过信号引出线由电子电路转换为与电容介电常数无关的毫伏信号,通过之后的放大及信号处理模块实现压力测量^[14]。

3 系统结构

根据实验目的,建立相应测试环境如图3、图4所示。系统由高压水泵提供动力,通过调节管道末端蝶阀控制管道内部压力和流量,压力调节范围 0~0.4 MPa。光纤传感器与电子传感器成对分布,并分别与相应的光纤解调仪及数据采集卡连接,两者数据采集保持同步,每个传感器位置对应一个相应编号的光纤传感器与电子传感器,两者间距 10 cm。

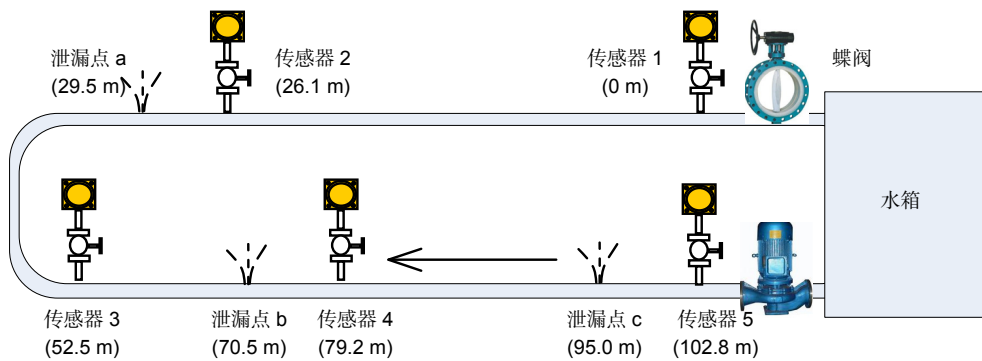


图3 管道实验结构图.

Fig. 3 Pipeline experimental structure diagram.



图4 管道实验平台.

Fig. 4 Pipeline experimental platform.

4 传感器响应测试

传感器响应时间是负压波管道泄漏监测关键，响应时间的快慢直接影响系统定位精度的高低。具体步骤如下：设置光纤解调仪与数据采集卡采样频率同为 1 kHz，每个采样点时间 1 ms，开启加压泵，调整尾端阀门开度，保持管道内部压力稳定 0.35 MPa，稳定 2 s 后打开 3 号泄漏阀，稳定 2 s 关闭，监测光纤传感器与电子传感器监测负压波信号并进行对比分析^[15]。实验结果如图 5、图 6 所示。

经过对两者监测负压波信号及对负压波下降沿拐点区间段压力数据进行放大分析，光纤传感器响应时间较快，约 30 ms 内即完成负压波信号的获取及压力信号的重新恢复稳定；电子传感器响应时间则较慢，从感知负压波信号到压力恢复稳定约需要 500 ms。光纤传感器采用纯机械结构压力感应方式，相比电子传感器通过硅油介质的二次传导，具有更小的响应时间。

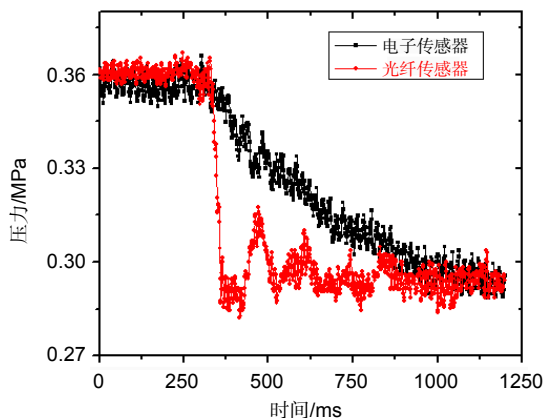


图 5 传感器捕获负压波信号。

Fig. 5 Sensor capture negative pressure wave signal.

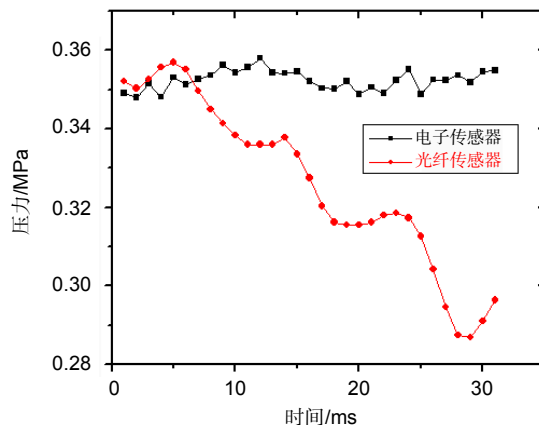


图 6 局部放大后负压波信号。

Fig. 6 Local amplified negative pressure wave signal.

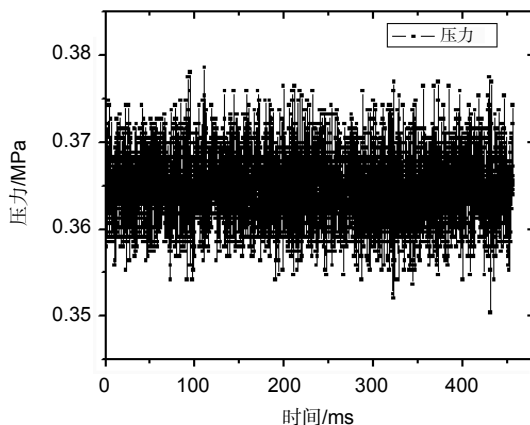


图 7 光纤传感器抗电磁干扰测试图。

Fig. 7 Anti-electromagnetic interference test of optical fiber sensor.

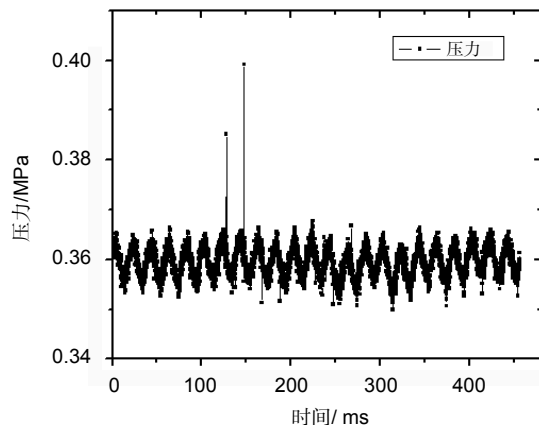


图 8 电子传感器抗电磁干扰测试图。

Fig. 8 Anti-electromagnetic interference test of electronic sensor.

另一方面，由负压波泄漏监测原理，传感器响应时间越快，压力拐点的获取越精确，定位精度越高^[16]。

5 传感器抗电磁干扰测试

设置光纤解调仪与数据采集卡采样频率同为 10 kHz，每个采样点时间为 0.1 ms。开启加压泵，调整尾端阀门开度，保持管道内部压力稳定 0.35 MPa，监测光纤传感器与电子传感器监测压力信号如图 7、图 8 所示。

实际实验过程中，电磁干扰源主要来自于加压泵（额定功率 3.8 kW，额定电压 380 V）引起的 50 Hz 工频干扰，由于光纤传感器本质绝缘、不带电，因此基本不受电磁干扰的影响；而受管道内部水流冲击及管道振动等因素的影响，光纤传感器监测压力值存在小范围波动，波动范围约 ± 0.01 MPa；电子传感器由于对电气特征的敏感性，监测信号存在明显的电磁干扰，

压力波动范围 ± 0.005 MPa, 且伴随有压力突变点; 同时由于硅油及电容的缓冲作用, 电子传感器对管道振动的影响较小, 压力相对较稳定。

6 传感器稳定性测试

把传感器置于恒压状态下(一个标准大气压), 待采集压力信号稳定后, 实时保存两传感器监测压力变化, 实验结果如图 9、图 10 所示。

由实验结果可以看出, 由于光纤传感器的纯机械

感压模式, 外界压力不变, 传感器内部波纹管及悬臂梁不会发生形变, 因此在稳定压力状态下, 压力信号输出稳定, 压力波动范围约 ± 0.001 MPa; 而电子传感器由于本身电流输出稳定性及电磁干扰等因素的影响, 传感器压力输出信号变化较大, 压力波动约 ± 0.006 MPa。

为进一步验证电子传感器输出信号的稳定性, 在恒压(一个标准大气压)状态下, 采用示波器搭建实验环境及实验结果如图 11、图 12 所示。

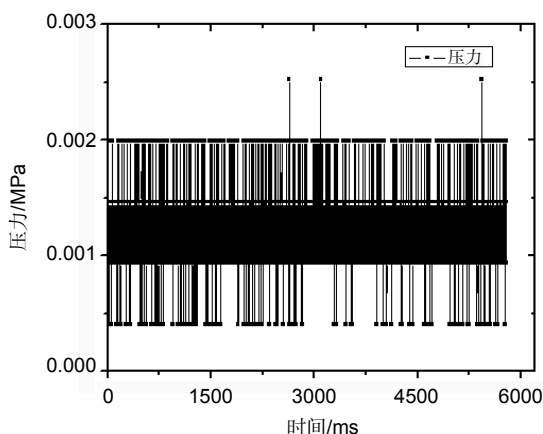


图 9 光纤传感器稳定性测试。
Fig. 9 Optical fiber sensor stability test.

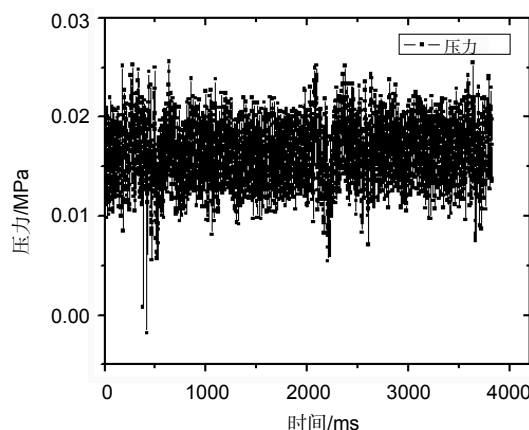


图 10 电子传感器稳定性测试。
Fig. 10 Electronic sensor stability test.

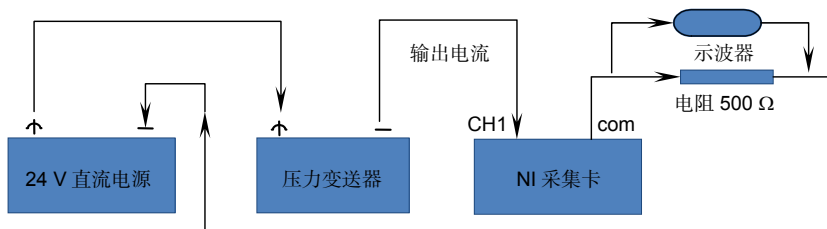


图 11 稳定性实验系统结构图。
Fig. 11 Stability experiment system structure.

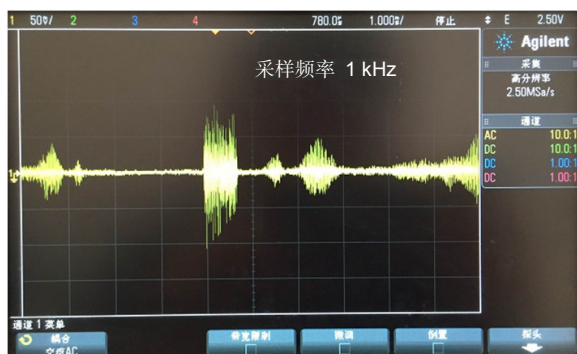


图 12 示波器输出电压信号。
Fig. 12 Oscilloscope output voltage signal.

稳定压力情况下, 压力传感器输出电流理论值为 4 mA, 串接 500 Ω 电阻后, 示波器显示的理论输出电压为 2 A。由监测结果可以看出, 电阻两端电压波动范围为 ± 50 mV, 电子传感器输出回路电流波动范围为 ± 0.1 mA, 等效压力波动范围约 ± 0.006 MPa, 与图 10 所示一致。

7 结束语

针对负压管道泄漏监测技术在长输油气管道的应用需求, 本文对光纤传感器及传统电子传感器在负压波信号获取等方面进行了对比实验研究。实验结果表明, 光纤传感器具有响应时间短、静态稳定性好、抗电磁干扰能力强等特点。结合负压波泄漏监测原理, 在同等的管道工况下, 光纤传感器能获得更高的信噪比、更精确的压力拐点信号, 定位精度更高; 另一方面, 实验过程中, 光纤传感器由于检测灵敏度较高导致对管道的振动及内部水流冲击等干扰表现出一定的波动性, 稳定性不强。因此针对长输油气管道的具体应用, 大量程、高精度、稳定性更强的光纤压力传感器是下一步研究的目标。

基金项目

山东省自然科学基金 (ZR2016QZ006); 中央引导地方科技发展专项。

参考文献

- 1 Wang Likun, Wang Hongchao, Xiong Min, et al. Analysis and proposal on leak detection of long-distance oil pipeline[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2014, **33**(11): 1198–1201.
王立坤, 王洪超, 熊敏, 等. 长距离输油管道泄漏监测技术分析和建议[J]. *油气储运*, 2014, **33**(11): 1198–1201.
- 2 Girgin S, Krausmann E. Historical analysis of U.S. onshore hazardous liquid pipeline accidents triggered by natural hazards[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2016, **40**: 578–590.
- 3 Bariha N, Mishra I M, Srivastava V C. Hazard analysis of failure of natural gas and petroleum gas pipelines[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2016, **40**: 217–226.
- 4 Li Yibo, Sun Liying. Leakage detection and location for long range oil pipeline using negative pressure wave technique[C]// Proceedings of the 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2009: 3220–3224.
- 5 San Haisheng, Song Zijun, Wangxiang. Piezoresistive pressure

- sensors for harsh environments[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(3): 550–554.
伞海生, 宋子军, 王翔. 适用于恶劣环境的 MEMS 压阻式压力传感器[J]. *光学精密工程*, 2012, **20**(3): 550–554.
- 6 Zheng Zhixia, Feng Yongjian. Temperature effect of MEMS high temperature touch-mode capacitive pressure sensor[J]. *Journal Of Electronic Measurement and Instrument*, 2013, **27**(12): 1141–1147.
郑志霞, 冯勇建. MEMS 接触电容式高温压力传感器的温度效应[J]. *电子测量与仪器学报*, 2013, **27**(12): 1141–1147.
- 7 Wan Shu, Bi Hengchang, Zhou Yilong, et al. Graphene oxide as high-performance dielectric materials for capacitive pressure sensors[J]. *Carbon*, 2017, **114**: 209–216.
- 8 Zhu Jiali, Wang Ming, Chen Lu, et al. An optical fiber Fabry–Perot pressure sensor using corrugated diaphragm and angle polished fiber[J]. *Optical Fiber Technology*, 2017, **34**: 42–46.
- 9 He Shaoling, Hao Fenghuan, Liu Pengfei. High precision fiber Bragg grating pressure sensor with real-time temperature compensation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, **42**(6): 0605003.
何少灵, 郝凤欢, 刘鹏飞. 温度实时补偿的高精度光纤光栅压力传感器[J]. *中国激光*, 2015, **42**(6): 0605003.
- 10 Wang Hui, Yang Yang, Liu Bing. Dense Wavelength Division Multiplexing-Based Demodulation of Fiber Bragg Grating Pressure Sensor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, **53**: 042803.
王辉, 杨洋, 刘兵. 基于密集波分复用器的光纤光栅压力传感器解调方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, **53**: 042803.
- 11 Zhang Liming, Zhang Xiaodong, Niu Hang. Design on optical fiber dynamic testing system of gear bending stress[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, **43**(3): 36–40.
张黎明, 张小栋, 牛杭. 齿轮弯曲应力的光纤动态测试系统设计[J]. *光电工程*, 2016, **43**(3): 36–40.
- 12 Huang Jun. Development and application of fiber Bragg grating pressure sensors[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.
黄俊. 光纤光栅压力传感器的研制与应用[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- 13 姜龙, 李连庆, 孙剑锋, 等. 可实现正负压监测的光纤光栅压力传感器及测试方法: CN103900756[P]. 2014-07-02.
- 14 Gu Li. Design of capacitive differential pressure & pressure transmitter based on HART protocol[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2010.
顾丽. 基于 HART 协议的电容式差压/压力变送器设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2010.
- 15 Qu Renchao. Accurate measurement of photoelectric sensor response time[J]. *Electronics Quality*, 2014(4): 64–66.
屈仁超. 光电传感器响应时间的准确测量方法[J]. *电子质量*, 2014(4): 64–66.
- 16 Sun Liang, Wang Jianlin, Zhao Liqiang. Analysis on detectable leakage ratio of liquid pipeline by negative pressure wave method[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, **31**(4): 654–658.
孙良, 王建林, 赵利强. 负压波法在液体管道上的可检测泄漏率分析[J]. *石油学报*, 2010, **31**(4): 654–658.