

水下天然气管道分布式光纤泄漏检测系统实验分析

黄悦 王强 杨其华 章仁杰

中国计量学院质量与安全工程学院, 浙江 杭州 310018

摘要 介绍了一种基于马赫-曾德尔(M-Z)和萨格纳克(Sagnac)混合干涉仪原理的分布式光纤泄漏检测系统,阐述了系统的工作原理及对泄漏点的定位方法。分别在空气和水下环境中进行实验,并分别在泄漏点距离法拉第旋转镜4025、7043、9050 m处进行实验,检测不同环境以及不同泄漏点位置对检测系统的影响。在泄漏点距离法拉第旋转镜为7043 m处重复做了20次实验,测试检测系统的精确度。实验结果表明:在水下环境中实验所得的干涉信号频谱强度较大,频带较宽;泄漏点距法拉第旋转镜越远,实验结果所得的绝对误差越大;系统能够检测出管道内气体压力为0.5 MPa,泄漏孔径为2.5 mm的微小泄漏信号并对泄漏点定位,平均相对定位误差为1.44%。

关键词 光纤光学;分布式光纤;混合干涉仪;泄漏检测;水下管道;实验分析

中图分类号 TE973 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.110602

Experimental Analysis of Distributed Fiber Optic Underwater Natural Gas Pipeline Leakage Detection System

Huang Yue Wang Qiang Yang Qihua Zhang Renjie

College of Quality and Safety Engineering, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

Abstract An interferometric distributed fiber optic leakage detection system based on the mixed interferometer principle of Mach-Zehnder (M-Z) and Sagnac is introduced. The working principle of the system and method for locating leaks are described. Experiments are performed in air and underwater environments. Experiments are carried out at 4025 m, 7043 m and 9050 m from the leakage position to the Faraday rotator mirror. The experiments test the impact of different environments and different leakage positions to the detection system. The experiments are carried out at 7043 m from the leakage position to Faraday rotator mirror and repeated 20 times to test the accuracy of detection system. The results show that in the underwater experiment, the interference signal spectrum strength is greater and band is wider. The farther of leakage points from the Faraday rotator mirror, the greater absolute error of the experimental results. The system can detect and locate the slight leakage signal of the gas pressure within the pipeline at 0.5 MPa, with leakage aperture of 2.5 mm, and average relative positioning error is 1.44%.

Key words fiber optics; distributed fiber; mixed interferometer; leakage detection; underwater pipeline; experimental analysis

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 120.3180

1 引言

海底管道泄漏事故随着各国对能源需求量的不断增大而增加,1998年至2012年,国内报道过海底管道泄漏事故共19起^[1],其中天然气泄漏事故4起,占21.1%,石油泄漏事故15起,占78.9%。海底环境复杂,泄漏事故往往由多种因素共同作用导致,海水的长期腐蚀、波浪的冲刷、暗流的涌动、海底生物的附着和碰撞、船只的撞击、海上坠落物的撞击、渔业作业中渔网的拖拽、海上作业的误操作以及管道内气体在传输过程中对

收稿日期: 2014-05-15; 收到修改稿日期: 2014-06-16; 网络出版日期: 2014-10-10

基金项目: 国家自然科学基金(51374188)、浙江省自然科学基金(LR13E040001)、质检行业公益性项目(201310152)

作者简介: 黄悦(1988—),女,硕士研究生,主要从事检测技术方面的研究。E-mail: huangyue19880830@163.com

导师简介: 王强(1976—),男,博士,教授,主要从事结构健康监测方面的研究。E-mail: qiangwang@cjlu.edu.cn

(通信联系人)

管道壁的压力等,都增加了水下管道泄漏的风险。

在长输油气管道泄漏检测的研究中,主要方法有基于光时域反射法和干涉法的分布式光纤传感技术。其中,Vogel等^[2]研究了基于拉曼散射原理的分布式光纤传感器在石油及天然气管道泄漏检测中的应用;袁朝庆等^[3]研究了基于拉曼散射的光纤光栅温度传感器,通过检测管道周围的温度场异常变化,发现泄漏点并进行定位;Parker等^[4]研究了基于布里渊散射原理的一种能够同时测量温度和应变的新型分布式光纤传感器;杨志等^[5]提出了一种基于布里渊光时域反射计法的分布式光纤布里渊散射温度传感系统;Spammer等^[6]提出了基于萨格纳克(Sagnac)和迈克耳孙干涉仪组合的分布式光纤传感器,以检测及定位外界物理场对传感光纤的扰动;Huang等^[7]提出了一种基于Sagnac和马赫-曾德尔(M-Z)混合分布式光纤传感器的测量架构,对于管道泄漏检测有较高的定位精度;胡正松等^[8]在Huang等提出的测量架构基础上进行改进,在空气环境中,用长度为3994 m的感测光纤模拟管道长度进行了管道泄漏检测实验。

本文在基于Sagnac和M-Z混合干涉仪的分布式光纤管道泄漏检测系统的基础上,加入了偏振控制器,改进了光路。在水下实验平台上用不同长度感测光纤对水下天然气管道进行泄漏检测实验,并进行定位误差分析。

2 改进型混合干涉型分布式光纤感测系统

2.1 测量架构

考虑到干涉信号不稳定,易产生偏振态衰落的缺陷,在课题组提出的混合分布式光纤传感器测量架构基础上,增加了偏振控制器,提出了如图1所示的测量架构。

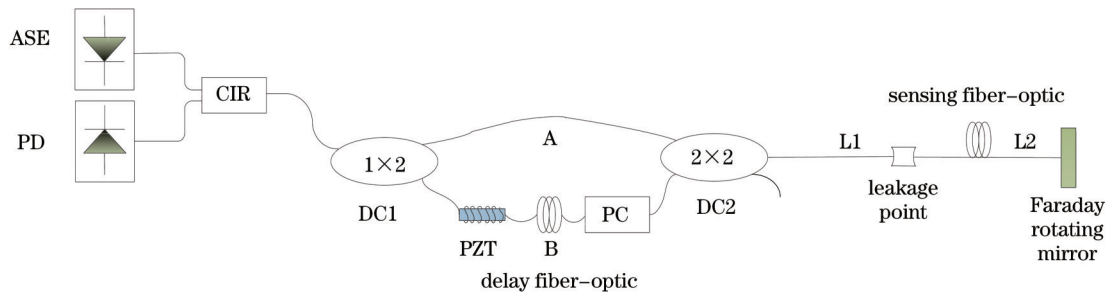


图1 改进型混合干涉型分布式光纤感测系统

Fig.1 Improved mixed distributed fiber-optic measure structure

整个测量系统由光源(ASE)、光电探测器(PD)、光环行器(CIR)、光耦合器(DC1、DC2)、相位调制器(PZT)、延迟光纤(A)、偏振控制器(PC)、感测光纤(L1、L2)和法拉第旋转镜组成。其中,在光源与DC1之间的光环行器,可以避免法拉第旋转镜反射回的光返回光源,减小对光源造成的损坏;采用的铌酸锂电光相位调制器,提高了调制器的信噪比,增大了调制器所调制的信号范围与强度。

本系统测量架构做了如下改进:在两个耦合器之间的延迟光纤一侧加入偏振控制器。由于双折射效应^[9]会引起光纤干涉仪中光波的偏振态变化,使干涉信号的强度减弱,从而导致干涉信号不稳定,甚至出现完全观测不到干涉信号的极端情况。加入偏振控制器后,可以通过调节偏振控制器,使两束发生干涉的光具有相同的振动方向,即同偏振态,减小了测量架构中光路部分的偏振态衰落现象,使零点频率波谷更加明显。

2.2 泄漏点定位方法

光传播路径如图2所示。由光源发出的光经过光环行器,再通过DC1被分为两路等光强的光信号,沿路径一传播的光经过相位调制器,再经过泄漏点,由法拉第旋转镜的反射作用,再次通过泄漏点,因此会被泄漏场调制两次;沿路径二传播的光经过泄漏点,被泄漏场调制两次后,再经过相位调制器。

因此,只有沿路径一和路径二传播的光满足零光程差条件,由干涉原理可知,最终只有路径一和路径二这两条光路的光在DC1处发生干涉。干涉项的表达式为^[10]

$$I = \cos \left[4\phi_s \cos \omega_s \left(t - \frac{\tau_l}{2} \right) \sin \omega_s \left(\frac{\tau_A}{2} \right) \cos \omega_s \tau_x + 2\phi_m \cos \omega_m \left(t - \frac{\tau_l}{2} \right) \sin \omega_m \left(\frac{\tau_l}{2} \right) \right], \quad (1)$$

式中 ω_s 为泄漏信号频率, ϕ_s 为泄漏信号幅度, ω_m 为调制信号频率, ϕ_m 为调制信号幅值。 τ_l 为光通过整个

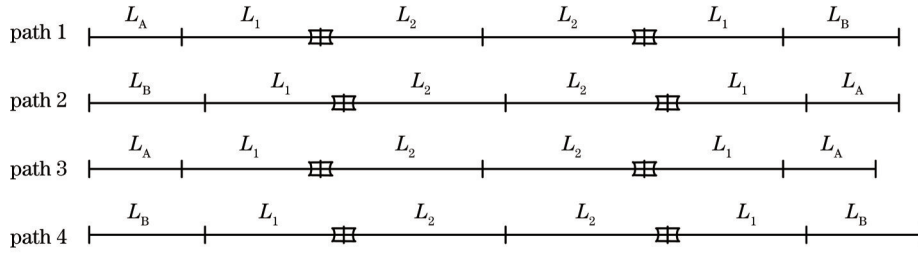


图 2 光传播路径

Fig.2 Optical propagation paths

测量架构所需的时间, τ_A 为光通过延迟光纤的时间, τ_x 为光从泄漏点传播到法拉第旋转镜的时间, 且式中仅有 τ_x 为未知项, 并包含了法拉第旋转镜距泄漏点的位置信息。

对(1)式进行变换处理得:

$$I = \cos[\phi_x(t)] \left[J_0(2\phi_m) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(2\phi_m) \cos 2n \left(\frac{\pi}{2} - \omega_m t' \right) \right] - \sin[\phi_x(t)] \left[2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(2\phi_m) \sin(2n-1) \left(\frac{\pi}{2} - \omega_m t' \right) \right] = \quad (2)$$

$$2J_0(\phi_m) \cos[\phi_x(t)] - 4J_1(\phi_m) \sin[\phi_x(t)] \cos \omega_m t' - 4J_2(\phi_m) \cos[\phi_x(t)] \cos 2\omega_m t' + \dots,$$

将(2)式与一倍频信号 $G \cos \omega_s t'$ 和二倍频信号 $H \cos 2\omega_s t'$ 做相位产生载波 (PGC) 解调运算, 最后得到解调后的信号, 如下:

$$\int Y dt = \int 4GHJ_1 J_2(\phi_s)^2 \phi'_x(t) dt = 4GHJ_1 J_2(\phi_s)^2 \phi_x(t), \quad (3)$$

式中 G, H, J_1, J_2 为常数, 且仅有 $\phi_x(t)$ 为未知数。

$$\phi_x(t) = 4\phi_s \cos \omega_s \left(t - \frac{\tau_t}{2} \right) \sin \omega_s \left(\frac{\tau_A}{2} \right) \cos \omega_s(\tau_x), \quad (4)$$

式中 $\sin \omega_s(\tau_A/2)$ 、 $\cos \omega_s(\tau_x)$ 中不包含 τ_t , 都为与时间无关的项, 因此这两项相当于余弦项 $\cos \omega_s(t - \tau_t/2)$ 的幅值, 且只有 $\cos \omega_s(t - \tau_t/2)$ 为时域项。对(4)式做快速傅里叶变化, 得到该点相位信号频谱。由于泄漏声场信号的频率 ω_s 是一个宽频信号, 其信号频谱为各频率分量信号的组合, 宽频信号各分量在动态范围内均可被解调出来。所以, 在 0~50 kHz 的泄漏信号带宽范围内, 信号频谱会出现一些含有泄漏点位置信息的零点频率。选择合适的延迟光纤, 延迟光纤长度确定, 因此 $\phi_x(t)$ 中的正弦项 $\sin \omega_s(\tau_A/2)$ 在频宽范围内不为零。因此, 在零点频率有

$$\cos \omega_s(\tau_x) = 0, \quad (5)$$

即零点频率

$$\omega_s(\tau_x) = \frac{(2k+1)\pi}{2}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (6)$$

当 $k=1$, 即取第一个零点值, 可得

$$L_s = \frac{c}{4 \cdot n \cdot f_s}, \quad (7)$$

式中 L_s 为法拉第旋转镜与泄漏点之间的距离, f_s 为零点频率值, c 为光速, n 为光纤纤芯折射率。最终通过频谱图中的第一个零点频率值, 计算出泄漏点位置, 实现对泄漏点的定位。

3 实验与分析

3.1 实验装置与条件

在实验室条件下, 模拟了天然气管道泄漏检测实验, 管道长为 1.3 m, 壁厚为 3 mm, 外径为 40 mm, 管道上模拟泄漏孔的直径为 2.5 mm。管道压力为 0.5 MPa。载波信号为频率 300 kHz、幅度 4 V 的正弦波。感测系统采用的光源为可调 ASE 光源, 最大输出光功率为 15.8 dB, 光谱范围为 1528~1564 nm。传感光纤为康宁单模光纤, 光纤折射率为 1.458。感测光纤布置在泄漏孔附近, 延迟光纤长度为 2 km。模拟实验用的水箱尺寸为 2 m(长)×1 m(宽)×1 m(高), 水深为 0.5 m。

3.2 不同实验环境对检测系统的影响

管道压力为 0.5 MPa, 光源光强为 13 dB, 当泄漏点位置为 8046 m 时, 分别在水箱和空气中进行管道泄漏检测实验, 泄漏信号的频谱如图 3 所示。

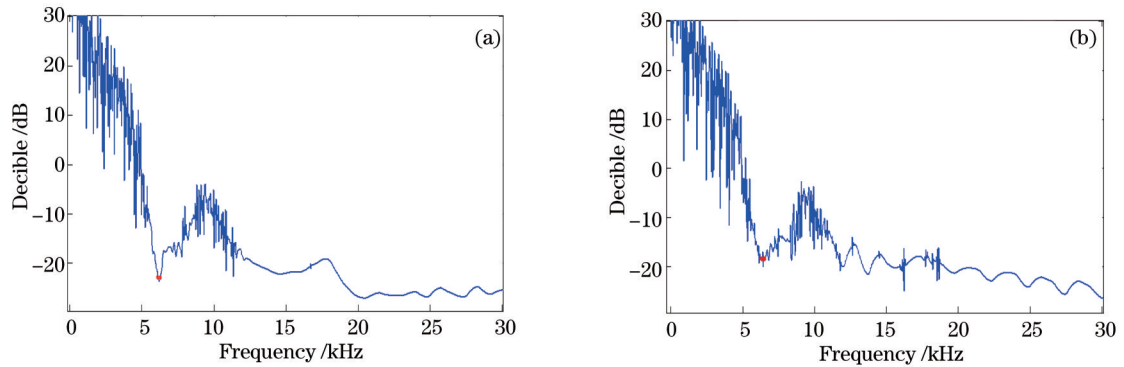


图3 不同实验环境信号频谱图。(a) 空气环境中; (b) 水下环境中

Fig.3 Null spectra of different experimental environments. (a) In air; (b) underwater

由图 3(a)、(b) 比较可知, 在空气中实验时, 泄漏点零点频率 f_{s1} 为 6.216 kHz, 理论计算泄漏点位置为 8275.418 m; 在水下实验时, 泄漏点零点频率 f_{s2} 为 6.318 kHz, 理论计算泄漏点位置为 8141.817 m。

根据图 3(a)、(b) 知, 在不同实验环境下, 频谱的强度不同, 信噪比也不同。在水下环境中, 由于水中波浪等因素的作用, 实验所得干涉信号的频谱图噪声较大, 频谱图上噪声毛刺较多。同时, 感测光纤受到水压作用时, 其泄漏频谱强度相比空气环境中泄漏信号频谱强度要大, 频带也更宽, 因此对检测系统的 PGC 信号解调提出了更高的要求。

3.3 不同泄漏点位置对检测系统的影响

为了测试不同泄漏点位置对系统检测性能的影响, 分别在泄漏点距法拉第旋转镜 4025、7043、9050 m 处进行管道泄漏检测实验, 得到的信号频谱图如图 4 所示。

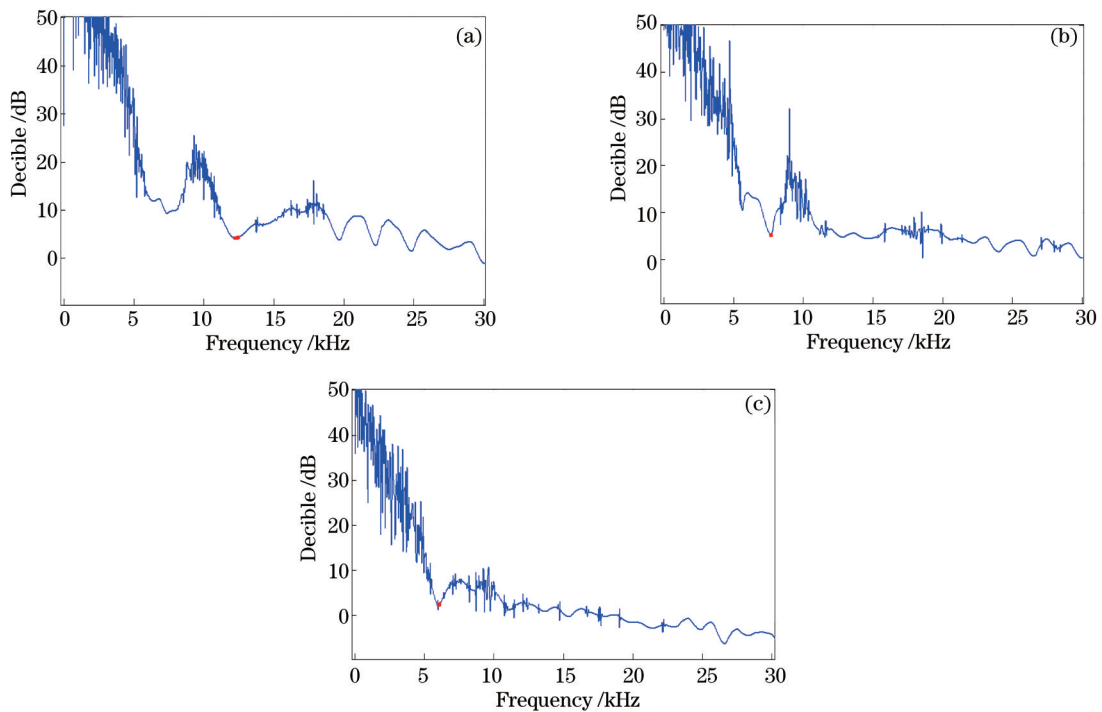


图4 不同泄漏点位置信号频谱图。(a) 泄漏点位置为 4025 m; (b) 泄漏点位置为 7043 m; (c) 泄漏点位置为 9050 m

Fig.4 Null spectra of different leakage point positions. (a) A leakage point at 4025 m; (b) a leakage point at 7043 m; (c) a leakage point at 9050 m

由图 4(a)、(b)、(c) 可知, 实际泄漏点位置为 4025 m 处, 泄漏点零点频率为 12.407 kHz, 经计算得理论泄

漏点位置为 4146.046 m, 定位误差为 121.046 m; 实际泄漏点位置为 7043 m 处, 泄漏点零点频率为 7.161 kHz, 计算得理论泄漏点位置为 7183.354 m, 定位误差为 140.354 m; 实际泄漏点位置为 9050 m 处, 泄漏点零点频率为 5.783 kHz, 计算得理论泄漏点位置为 8895.037 m, 定位误差为 154.962 m。

根据图 4 中 (a)、(b)、(c) 知, 在不同泄漏点位置实验时均有噪声信号, 泄漏点位置不同, 零点频率不同, 定位误差也不同。从结构上来看, 路径一、二的泄漏信号都是由法拉第旋转镜反射回去的, 所以离法拉第旋转镜越近, 即 L_2 越小, L_1 越大, 信号强度越大, 噪声就相对较小。反之 L_2 越大, L_1 越小, 则信号强度越弱, 噪声相对较大。即泄漏点与法拉第旋转镜距离越远, 噪声越强, 频谱图上噪声信号的毛刺尖峰越多。实验结果所得的误差越大, 泄漏点定位难度增加。

3.4 检测系统稳定性与精确度分析

为了验证检测系统的稳定性, 在不同泄漏点进行了实验, 用实验所得零点频率值绘制一条实验值曲线, 计算出上述泄漏点位置处的相应理论零点频率值, 绘制一条理论零点频率值曲线, 两曲线进行比较, 如图 5 所示。

根据图 5 知, 实验所得的零点频率值经连接后所得的曲线与理论零点频率值连接后所得曲线均为反比例函数曲线, 由 (7) 式可知, 泄漏点距法拉第旋转镜距离与零点频率为反比例函数, 实验中得到的零点频率和用理论值计算所得零点频率数据差异很小, 可知检测系统能有效检测泄漏点位置。

为了研究检测系统的定位精度及稳定性, 在泄漏点距离法拉第旋转镜为 7043 m 处重复做了 20 次实验, 将实验所得零点频率值与理论零点频率值作图比较, 如图 6 所示。

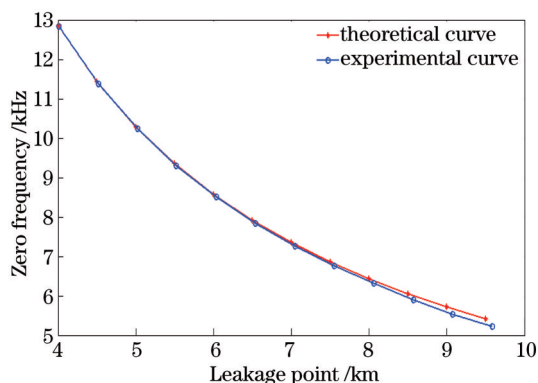


图5 泄漏点实验零点频率与理论零点频率对比图

Fig.5 Leakage point experimental zero frequency compare with theory zero frequency chart

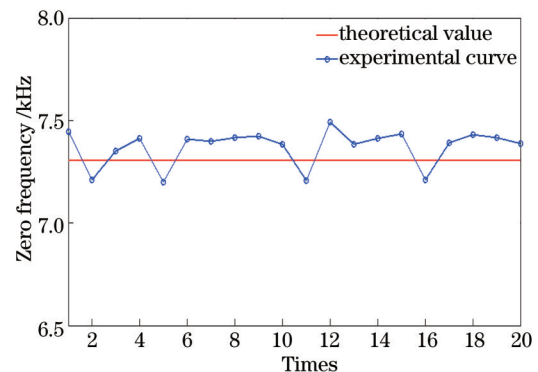


图6 20次实验零点频率值与理论零点频率值比较图

Fig.6 Comparison chart of 20 times experimental zero frequency and theoretical zero frequency

由 20 次实验数据计算可得, 实验所得泄漏点位置的均值为 6979.2 m, 与实际值 7043 m 的绝对误差为 101.9 m, 相对误差为 1.44%。观察图 6 可见, 20 次实验所得零点频率值稳定, 围绕理论值波动, 即系统稳定性较好。

4 结 论

在基于 Sagnac 和 M-Z 混合分布式光纤传感器测量架构中加入了偏振控制器, 有效减少了光路信号的衰减, 使零点频率波谷更加明显, 有效地检测了管道的泄漏情况。实验结果表明, 在水下环境中, 实验所得干涉信号的频谱图的信噪比较小, 在光纤受到水压压力的作用时, 频谱强度与空气环境中实验得到的频谱强度相比较, 频带较宽, 对检测系统的 PGC 信号解调提出了更高的要求; 泄漏点位置不同时, 泄漏点距离法拉第旋转镜的距离越远, 实验结果所得的绝对误差越大, 噪声信号越大, 泄漏定位难度增加。综上所述, 系统能够对泄漏点进行定位, 并具有较高的定位精度, 且稳定性较好, 为实际应用于水下的输气管道泄漏检测提供了良好依据。

参 考 文 献

- 1 Zhang Xiulin, Xie Liwan, Chen Guoming. Management technology of Subsea pipeline integrity [J]. Oil Field Equipment,

- 2011, 40(12): 10-15.
张秀林, 谢丽婉, 陈国明. 海底管道完整性管理技术[J]. 石油矿场机械, 2011, 40(12): 10-15.
- 2 B Vogel, C Cassens, A Graupner, *et al.*. Leakage detection systems by using distributed fiber optical temperature measurement [C]. SPIE, 2001, 4328: 23-34.
- 3 Yuan Zhaoqing, Liu Yan, Cai Yingjun, *et al.*. Using fiber temperature sensing system in gas pipeline leak detection [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(8): 117-119.
袁朝庆, 刘燕, 才英俊, 等. 利用光纤温度传感系统检测天然气管道泄漏[J]. 天然气工业, 2006, 26(8): 117-119.
- 4 T R Parker, M Farhadiroushan, V A Handerek, *et al.*. A fully distributed simultaneous strain and temperature sensor using spontaneous Brillouin backscatter [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1997, 9(7): 979-981.
- 5 Yang Zhi, Li Yongqian, He Yujun, *et al.*. Brillouin scattering distributed fiber temperature sensing experimental study [J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(1): 14-17.
杨志, 李永倩, 何玉钧, 等. 分布式光纤布里渊散射温度传感实验研究[J]. 光子学报, 2003, 32(1): 14-17.
- 6 S J Spammer, P L Swart, A A Chitchebakov. Merged Sagnac-Michelson interferometer for distributed disturbance detection [J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(6): 972-976.
- 7 Huang Shih-chu, Lin Wuu-wen, Tsai Meng-tsan. Fiber optic in-line distributed sensor for detection and localization of the pipeline leaks [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2007, 135(2): 570-579.
- 8 Hu Zhengsong, Yang Qihua, Qiao Bo. Design of interference distributed fiber-optic underwater long gas pipeline leakage detection system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(7): 070602.
胡正松, 杨其华, 乔波. 干涉型分布式光纤水下长输气管道泄漏检测系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(7): 070602.
- 9 Zhang Lingfen. The polarization characteristics test of single-mode fiber [J]. Journal of Applied Optics, 2002, 23(6): 29-31.
张玲芬. 单模光纤偏振特性的测试[J]. 应用光学, 2002, 23(6): 29-31.
- 10 Qiao Bo, Yang Qihua, Wang Qiang. Simulation analysis of improved interference distributed fiber-optic underwater gas pipeline leak detection [J]. Journal of China University of Metrology, 2011, 22(2): 114-119.
乔波, 杨其华, 王强. 改进型分布式光纤水下输气管道泄漏检测仿真分析[J]. 中国计量学院学报, 2011, 22(2): 114-119.