

# 分布式光纤传感水下天然气管道泄漏的 SPE 诊断法

韩玲娟<sup>1</sup> 王强<sup>1</sup> 范昕炜<sup>1</sup> 谷小红<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国计量学院质量与安全工程学院, 浙江 杭州 310018

<sup>2</sup>中国计量学院机电工程学院, 浙江 杭州 310018

**摘要** 提出基于 Sagnac/Mach-Zehnder 混合干涉原理的水下天然气管道泄漏检测系统, 采用基于时域统计特征的信号提取方法, 通过光纤干涉信号时域分析, 提取信号幅值在均值上下特定范围内波动的概率特征, 建立天然气管道泄漏工况下的主成分模型。根据平方预测误差(SPE)统计量判别管道泄漏状况, 并与传统零点频率法的分布式光纤管道泄漏检测进行对比分析, 统计了系统漏警率(MAR)。结果表明, 提出的时域统计特征向量能够描述管道泄漏特征, 采用 SPE 统计量泄漏诊断法能够准确判别天然气管道是否泄漏, 漏警率降低至传统零点频率法的 1/10 左右。

**关键词** 传感器; 平方预测误差; 概率特征; 泄漏诊断; 漏警率

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.052801

## Underwater Gas Pipeline Leakage Diagnostic Method by Distributed Optical Fiber Sensor Based on SPE

Han Lingjuan<sup>1</sup> Wang Qiang<sup>1</sup> Fan Xinwei<sup>1</sup> Gu Xiaohong<sup>2</sup>

<sup>1</sup> College of Quality and Safety Engineering, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

<sup>2</sup> College of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

**Abstract** To detect the natural gas leakage of the pipeline underwater, a distributed optical fiber sensor system is introduced based on hybrid configuration of Sagnac/Mach-Zehnder interferometers. Based on time domain statistic features, the probability features of amplitude values distributed near the average can be extracted with time domain analysis of optical fiber interferometric signals. A principal components analysis model based on statistic features is established to monitor gas pipeline leakage condition. The squared prediction errors (SPE) statistics is used to discriminate pipeline condition, and compared to the traditional method of distributed optical fiber pipeline leakage detection which just depends on whether null frequency existing or not. The missing alarm rate (MAR) is calculated. The results show that the proposed time-domain statistical feature vector can describe the characteristics of pipeline condition, the SPE statistics in leakage condition can discriminate pipeline leakage accurately, and MAR decreases to about 1/10 of that with the traditional method based on null frequency.

**Key words** sensors; squared prediction errors; probabilistic characteristics; leakage diagnosis; missing alarm rate

**OCIS codes** 280.4788; 000.5490; 070.7425

## 1 引言

由于海底天然气管道所处环境恶劣, 不可避免地受到海底滑坡、海浪、船只撞击以及其他自然和人为损坏的影响, 天然气管道泄漏频频发生。随着光纤传感技术的不断发展, 分布式光纤传感器在天然气管道泄漏检测中的应用成为了研究的热点<sup>[1-2]</sup>。

基于干涉法的分布式光纤检测技术由于具有灵敏度高、系统结构简单及光路部分后处理容易等独特优

收稿日期: 2015-12-01; 收到修改稿日期: 2015-12-15; 网络出版日期: 2016-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(51374188)、浙江省自然科学基金(LR13E040001)

作者简介: 韩玲娟(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事检测技术及自动化装置等方面的研究。

E-mail: 1026187092@qq.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)

点而备受关注<sup>[3]</sup>。杭利军等<sup>[4]</sup>提出了基于萨尼亚克(Sagnac)光纤干涉仪的管道泄漏实时检测的分布式光纤传感技术,分析了该系统的泄漏检测及定位原理,泄漏定位误差小于1.05%;裴福俊等<sup>[5]</sup>将 Sagnac 型光纤干涉仪应用在船舶管道泄漏检测系统中,通过合理选择消盲光纤长度可消除零点频率盲区;蒋立辉等<sup>[6]</sup>基于马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)干涉原理,利用4条单模光纤实时监测周界入侵事件,采用总体平均经验模态分解的方法,建立双重支持向量机(SVM)对入侵事件进行识别,提高了系统的报警识别率,降低了误报率;胡正松等<sup>[7]</sup>基于改进的 Sagnac/Mach-Zehnder 混合干涉架构,将传统零点频率的分布式光纤管道泄漏检测定位法进行小波去噪和最小二乘曲线拟合处理,提高了零点频率辨识度;黄悦等<sup>[8]</sup>基于 Sagnac/Mach-Zehnder 混合干涉的分布式光纤检测系统,依据 SVM 建立样本回归模型,将 SVM 应用于水下天然气管道泄漏检测系统中,提高了泄漏定位精度。对于水下天然气管道,泄漏信号容易被噪声信号湮没,导致基于传统零点频率法的分布式光纤管道泄漏检测系统仅依靠零点频率难以进行泄漏检测,容易产生漏警现象;主成分分析(PCA)<sup>[9]</sup>是一种在高维数据中提取特征的常用统计技术,戚元华等<sup>[10]</sup>提出了一种时域统计特征的信号提取方法,采用 PCA 法提取目标类特征,实现了对天然气管道的泄漏检测。

本文使用基于 Sagnac/Mach-Zehnder 混合干涉原理的分布式光纤检测系统进行水下天然气管道泄漏检测实验,利用时域统计幅值法提取泄漏信号特征向量,用 PCA 对特征向量进行降维处理并建立泄漏工况下的主成分模型,根据主成分模型中平方预测误差(SPE)统计量诊断水下天然气管道泄漏与否,并与传统零点频率法检测天然气管道泄漏进行对比分析,统计了系统漏警率(MAR)。

## 2 天然气管道泄漏检测原理

### 2.1 分布式光纤泄漏检测系统

分布式光纤水下天然气管道泄漏检测系统包括光路和电路两部分,其中光路部分改进了 Huang 等提出的光路测量结构,加入了光环行器、偏振控制器(PC)、相位调制器(PZT)等光学器件,改进后的光路部分<sup>[11]</sup>如图1所示。

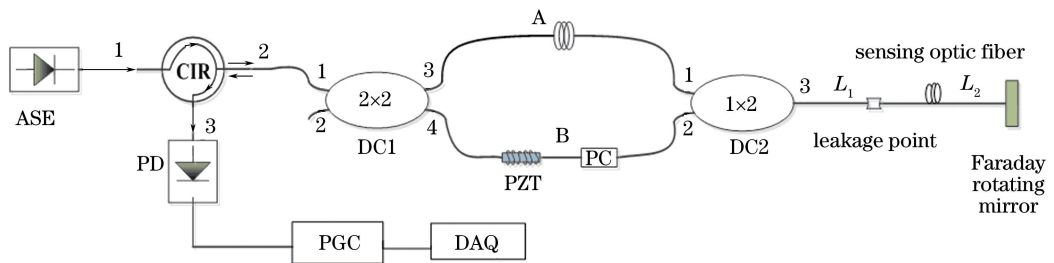


图1 分布式光纤泄漏检测系统

Fig. 1 Leakage detection system based on distributed optical fiber

光源(ASE)发出的光经光环行器(CIR)和 $2 \times 2$ 光耦合器(DC1)后,分为两路经A、B两臂通过,经 $1 \times 2$ 光耦合器(DC2)和传感光纤至法拉第旋转镜后原路返回,最后在DC1处耦合干涉;光电探测器(PD)将干涉信号转换为电信号,经相位载波(PGC)解调后,利用数据采集卡(DAQ)进行数据采集。经频谱分析处理,其泄漏点定位公式<sup>[12]</sup>为

$$L_2 = \frac{c}{4nf_s}, \quad (1)$$

式中 $L_2$ 为泄漏点至法拉第旋转镜的距离, $c$ 为光速, $n$ 为光纤纤芯折射率, $f_s$ 为首个零点频率值。该系统通过频谱图中首个零点频率诊断管道泄漏,再利用(1)式计算泄漏点位置。由于海底天然气管道工作环境复杂,零点频率极易湮没在噪声信号中,仅通过频谱图中零点频率检测天然气管道泄漏会使漏警率极高。

### 2.2 基于SPE的管道泄漏诊断

主成分分析技术旨在找出数据中最主要的元素和结构,去除噪声和冗余,将原有的复杂数据降维。首先收集管道泄漏历史数据,建立一个天然气管道泄漏的主成分模型。确定主成分个数 $k$ 常用特征值方差累计贡献率法, $k$ 个主成分的累计贡献率( $R_c$ )超过一定阈值时(在实验室环境下,经多组实验验证,当取阈值为

95% 时实验效果最佳), 对应  $k$  为保留的主成分个数<sup>[13]</sup>,  $R_c$  的计算公式为

$$R_c(k) = \sum_{i=1}^k \lambda_i / \sum_{i=1}^m \lambda_i \times 100\% . \quad (2)$$

检测数据中是否包含天然气管道泄漏信息, 可利用 PCA 模型中的 SPE 统计量进行检测。SPE 统计量是在残差子空间内分析新数据偏离泄漏主成分模型的程度, 检测数据在残差子空间内的投影大小从而判断管道泄漏状况。无泄漏时, 采集的数据严重偏离主成分模型, SPE 统计量值较大; 有泄漏时, 采集的数据较接近主成分模型, 此时 SPE 统计量值很小。SPE 统计量表达式为

$$E_{SP} = \|\tilde{x}\|^2, \quad (3)$$

当  $E_{SP} < Q_a$  时, 管道有泄漏; 当  $E_{SP} > Q_a$  时, 管道无泄漏。其中  $Q_a$  为 SPE 的置信限, 其计算公式为<sup>[13]</sup>

$$Q_a = \theta_1 \left[ \frac{C_a h_0 \sqrt{2\theta_2}}{\theta_1} + 1 + \frac{\theta_2 h_0 (h_0 - 1)}{\theta_1} \right]^{\frac{1}{h_0}}, \quad (4)$$

式中  $\theta_i = \sum_{j=l+1}^m \lambda_j^i$ ,  $i=1, 2, 3$ ,  $h_0 = 1 - 2\theta_1\theta_3/3\theta_2$ ,  $C_a$  为正态分布在检验水平  $\alpha$  下的临界值,  $\lambda_j$  为数据  $\mathbf{X}_{m \times n}$  协方差矩阵的第  $j$  个特征值。

### 2.3 系统漏警率

由于水下各种杂波干扰及环境噪声的影响, 天然气管道发生泄漏时, 泄漏信号会导致光干涉信号变得较弱, 这很容易被误判为是管道外部噪声引起的变化, 进而导致零点频率湮没在噪声中, 难以检测出泄漏波形, 出现漏警现象<sup>[14]</sup>。天然气管道泄漏检测系统在一定时间内发生的漏警数  $N_{ma}$  与同一时间内管道泄漏总数  $N$  之比称为漏警率, 其数学表达式为

$$R_{ma} = \frac{N_{ma}}{N} \times 100\% . \quad (5)$$

## 3 实验与分析

### 3.1 实验装置

在实验室环境下, 为模拟水下天然气管道泄漏, 选取长为 1.3 m, 壁厚为 3 mm, 外径为 40 mm 的钢管, 钢管上模拟泄漏孔的直径为 2.5 mm, 采用空压机模拟天然气输送, 传感光纤选折射率为 1.458 的单模光纤 (Corning Incorporated 公司), 传感光纤布置在泄漏孔附近, 延迟光纤长度为 2 km。实验装置如图 2 所示。

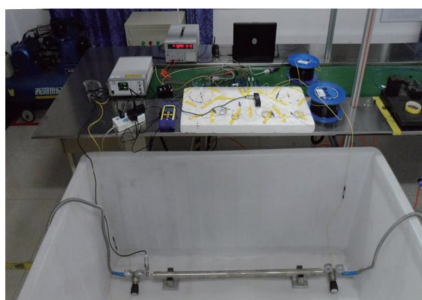


图 2 实验装置图

Fig. 2 Experimental setup

### 3.2 实验数据分析

在实验室环境下, 进行水下天然气管道泄漏与无泄漏分析。空压机输送管道气体压强为 1 MPa, 泄漏点距法拉第旋转镜距离为  $L_2$ , 取  $L_2$  为 3~8 km, 在此范围内分别进行 100 组管道泄漏实验和 50 组无泄漏实验, 利用 PGC 解调电路对干涉信号进行解调, 其中两组解调后的典型信号如图 3(a)、(b) 所示, 图 3(c)、(d) 分别为图 3(a)、(b) 信号的频谱图。

由图 3(a)、(b) 可知, 无法从泄漏信号时域图判别管道泄漏与否; 由图 3(c) 可知, 泄漏导致光干涉信号变小, 且叠加了管道外部噪声干扰信号, 这使零点频率被噪声湮没, 未出现标志泄漏的零点频率, 与图 3(d) 无泄漏信号频谱图相似, 此时出现漏警现象。

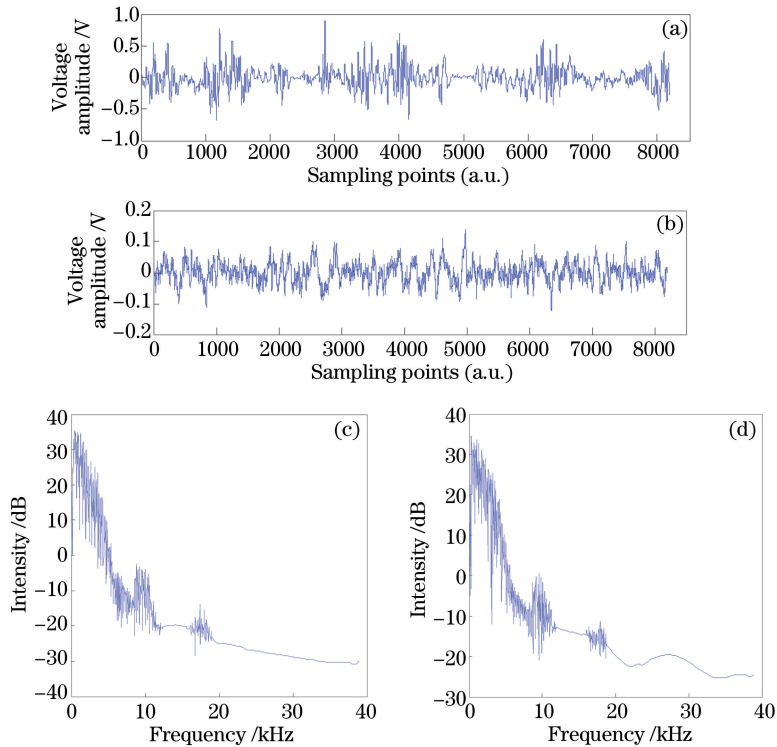


图 3 泄漏信号时域图及其对应频谱图。(a) 泄漏信号时域图( $L_2 = 7000$  m); (b) 无泄漏信号时域图;  
(c) 泄漏信号频谱图( $L_2 = 7000$  m); (d) 无泄漏信号频谱图

Fig. 3 Time domain waveforms and corresponding spectra of leakage signal. (a) Time domain waveform with leakage ( $L_2 = 7000$  m); (b) time domain waveform without leakage; (c) signal spectrum with leakage ( $L_2 = 7000$  m); (d) signal spectrum without leakage

为了准确检测水下天然气管道泄漏,降低系统漏警率,采用时域统计法提取解调后信号幅值在均值上下特定范围内波动的概率值作为特征向量,建立泄漏工况下的 PCA 模型。

为分析泄漏信号时域特征,将采集的天然气管道无泄漏信号和泄漏信号进行时域幅值统计。将时域信号的幅值在 $(-0.6, +0.6)$ 范围内分成 13 个区段,中间区段的幅值范围为 $(-0.05, +0.05)$ ,相邻区段依次增加 0.1,分别统计信号幅值在各个区段内出现的概率,其概率直方图如图 4 所示。

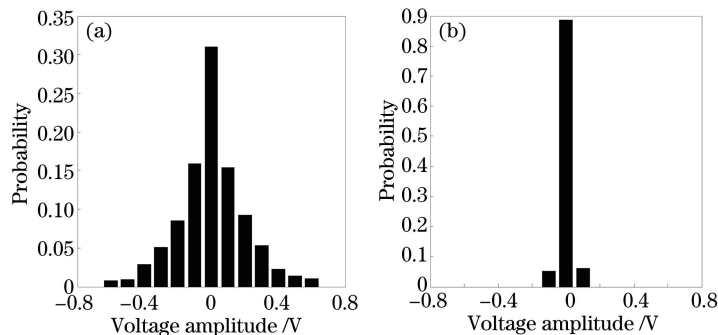


图 4 (a) 有泄漏信号概率分布直方图;(b) 无泄漏信号概率分布直方图

Fig. 4 (a) Signal probability distribution with leakage; (b) signal probability distribution without leakage

由图 4(a)、(b)可知,泄漏信号幅值均近似服从正态分布,无泄漏信号概率分布直方图中信号的幅值 90%以上分布在 $(-0.05, +0.05)$ 区间,而有泄漏信号概率分布直方图幅值范围分布较广。发生泄漏时,泄漏信号与各种噪声干扰信号相叠加,使检测到的信号幅值波动加剧,幅值范围分布较广,在 $(-0.6, +0.6)$ 区段内,相同时间段内统计到大幅值信号的概率增加;而无泄漏时,检测到的信号主要是环境噪声和检测电路中的噪声,信号幅值大部分分布在 $(-0.05, +0.05)$ 区间内。

### 3.3 SPE 统计量泄漏诊断

选取管道发生泄漏的 50 组数据作为目标样本,建立管道泄漏工况下的主成分模型。提取样本概率直方图中的 13 个区段构造 13 维时域特征向量,利用 PCA 对提取的 13 维特征向量进行降维处理,得到主成分累计贡献率如图 5 所示,前 5 个主成分累计贡献率达到了 95%,确定主成分个数为 5。

利用重构的主成分模型对系统进行监测,选取  $L_2$  为 3~8 km 的 50 组泄漏信号和 50 组无泄漏信号进行实验分析,建立基于 SPE 统计量的判别。该系统建立的是泄漏工况下的主成分模型,经大量实验验证当统计量置信度取 0.05 时,效果最佳,实验结果如图 6 所示。

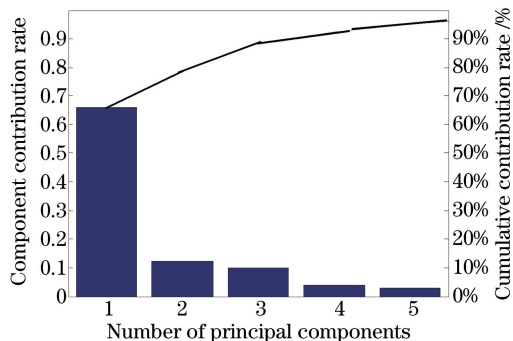


图 5 前 5 个各主成分贡献率及其累计贡献率

Fig. 5 Contribution rate of the top five principal components and their cumulative contribution rate

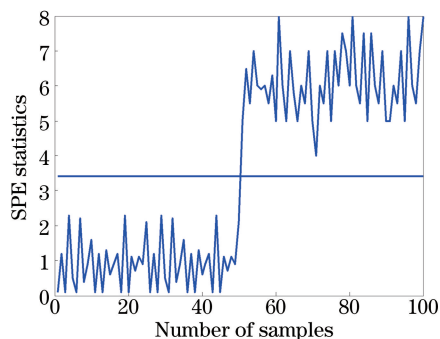


图 6 基于 SPE 的管道泄漏监测图

Fig. 6 Statistics of pipeline leakage monitoring based on SPE

由图 6 可知,前 50 组数据的 SPE 统计量值位于置信限下,此时数据为微泄漏组,后 50 组数据的 SPE 统计量值发生明显跳跃并超过置信限,此时数据为无泄漏组,利用 SPE 统计量可准确检测到管道泄漏与否。

### 3.4 漏警率分析

取  $L_2$  为 3~8 km 的 50 组泄漏信号数据进行漏警率分析。图 7 为传统零点频率法与基于 SPE 统计量的管道泄漏检测法的漏警率对比,从图中可见,传统零点频率法的漏警率高达 20%,而基于 SPE 统计量的管道泄漏诊断法的漏警率在 2%左右,较传统方法漏警率大幅度降低,大大提高了水下天然气管道泄漏检测系统的可靠性。

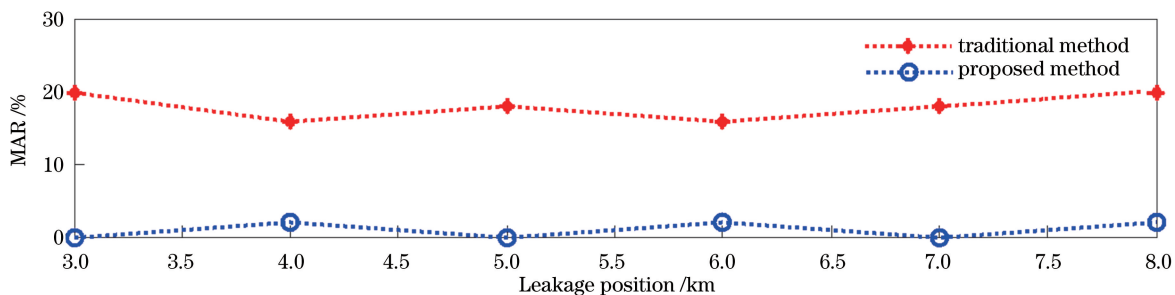


图 7 漏警率对比分析

Fig. 7 Comparison of missing alarm rates

## 4 结 论

基于 Sagnac/Mach-Zehnder 混合干涉仪的分布式光纤水下天然气管道泄漏检测系统,进行了泄漏与无泄漏实验分析。选取  $L_2$  为 3~8 km 范围内的 50 组泄漏数据作为目标样本。以信号时域特征为对象,提取信号幅值在均值上下特定范围内波动的概率为特征向量,建立泄漏工况下的主成分模型;选取 50 组有泄漏数据和 50 组无泄漏数据,建立 SPE 统计量,判别管道是否泄漏,并与传统零点频率法的分布式光纤管道泄漏检测进行对比分析,统计系统漏警率。结果表明基于 SPE 统计量的管道泄漏检测方法能准确诊断管道泄漏,且漏警率降低至传统零点频率法的 1/10,提高了天然气管道泄漏诊断的可靠性。

## 参 考 文 献

- 1 Chelliah P, Murgesan K, Samvel S, *et al.*. Looped back fiber mode for reduction of false alarm in leak detection using distributed optical fiber sensor[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(20): 3869-3874.
- 2 Tanimola F, Hill D. Distributed fiber optic sensors for pipeline protection[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2009, 1(4): 134-143.
- 3 Huang S, Lin W, Mengtsan T. 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.
- 4 Hang Lijun, He Cunfu, Wu Bin, *et al.*. Research on novel distributed optical fiber pipeline leakage detection technology and location method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(1): 123-127.  
杭利军, 何存富, 吴斌, 等. 新型分布式光纤管道泄漏检测技术及定位方法研究[J]. *光学学报*, 2008, 28(1): 123-127.
- 5 Pei Fujun, Yang Dong, Liu Hongyun. Design and implementation of ship pipeline leakage monitor based on optical fiber interferometer[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2015, 41(7): 984-990.  
裴福俊, 杨东, 刘红云. 船舶管道泄漏的干涉式光纤监测仪的设计与实现[J]. *北京工业大学学报*, 2015, 41(7): 984-990.
- 6 Jiang Lihui, Gai Jingyan, Wang Weibo, *et al.*. Ensemble empirical mode decomposition based event classification method for the fiber-optic intrusion monitoring system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(10): 1006002.  
蒋立辉, 盖井艳, 王维波, 等. 基于总体平均经验模态分解的光纤周界预警系统模式识别方法[J]. *光学学报*, 2015, 35(10): 1006002.
- 7 Hu Zhengsong, Yang Qihua, Qiao Bo. Design of interference distributed fiber-optic underwater long gas pipeline leakage detection system[J]. *Laser and 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.
- 8 Huang Yue, Wang Qiang, Han Lingjuan, *et al.*. Support vector machine based distributed optical fiber leakage detection system and experimental analysis[J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, 36(3): 424-429.  
黄悦, 王强, 韩玲娟, 等. 基于支持向量机的分布式光纤泄漏检测定位系统及实验分析[J]. *应用光学*, 2015, 36(3): 424-429.
- 9 Liu Pan, Liu Zhen, Zhu Ming, *et al.*. Aspectral gamut mapping model in visual features weighted PCA space[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(6): 0633001.  
刘攀, 刘真, 朱明, 等. 加权视觉特性的PCA空间内光谱域映射模型[J]. *光学学报*, 2015, 35(6): 0633001.
- 10 Qi Yuanhua, Lin Weiguang, Wu Haiyan. A leak detection method for natural gas pipelines based on time-domain statistical features[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(6): 1195-1199.  
戚元华, 林伟国, 吴海燕. 基于时域统计特征的天然气管道泄漏检测方法[J]. *石油学报*, 2013, 34(6): 1195-1199.
- 11 Han Lingjuan, Wang Qiang, Yang Qihua, *et al.*. Leak detection and localization analysis of underwater gas pipeline based on distributed fiber optic sensing[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2015, 28(7): 1097-1102.  
韩玲娟, 王强, 杨其华, 等. 基于分布式光纤传感的水下输气管道泄漏检测与定位分析[J]. *传感技术学报*, 2015, 28(7): 1097-1102.
- 12 Huang Yue, Wang Qiang, Yang Qihua, *et al.*. Experimental analysis of distributed fiber optic underwater natural gas pipeline leakage detection system[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2014, 51(11): 110602.  
黄悦, 王强, 杨其华, 等. 水下天然气管道分布式光纤泄漏检测系统实验分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(11): 110602.
- 13 Gong X B, Wang R X, Xu M Q. Early sensor fault detection based on PCA and clustering analysis[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2014, 21(6): 113-120.
- 14 Wu Long, Zhao Yuan, Jin Chenfei, *et al.*. Effects of changing threshold on detection probability of scanner less rang-gated lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(11): 3117-3123.  
吴龙, 赵远, 靳辰飞, 等. 变阈值检测对无扫描距离选通激光雷达探测概率的影响[J]. *光学学报*, 2010, 30(11): 3117-3123.