

消偏型 Sagnac 光纤管道泄漏检测系统及其稳定性研究

何存富¹ 郑兴强^{1*} 骆建伟² 杭利军¹ 吴 斌¹

(¹北京工业大学测控实验室, 北京 100124)

(²武警学院基础部, 河北 廊坊 065000)

摘要 管道作为石油、天然气、自来水等的主要运输工具,其运行安全性已受到广泛关注。管道腐蚀穿孔引起的持续性小规模泄漏的及早发现与准确定位是管道运行安全的主要问题和难题。利用 Sagnac 光纤干涉仪对管道小泄漏进行监测和定位时,光波偏振态的随机变化直接影响到 Sagnac 环中两束相干光的干涉效果,从而影响直线型 Sagnac 光纤干涉仪的性能。提出了采用光学消偏的方法抑制偏振态对 Sagnac 干涉仪性能的影响。通过改进干涉仪的结构,在 Sagnac 环中加入光纤延时环消偏器,从而提高系统运行稳定性。实验结果表明,该方法能够较好地解决偏振态变化引起的检测灵敏度降低的问题。

关键词 测量;光纤传感器;Sagnac 效应;偏振态;消偏器

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0208002

Research on a Pipeline Leakage Detection System and Its Stability Based on Depolarized Sagnac Fiber Interferometer

He Cunfu¹ Zheng Xingqiang^{1*} Luo Jianwei² Hang Lijun¹ Wu Bin¹

(¹Measurement and Control Laboratory, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

(²Basic Courses Teaching Department, The Armed Police Academy, Langfang, Hebei 065000, China)

Abstract As the main transportation facilities, such as petroleum, natural gas, city water, and among others, the pipeline has been concerned extensively for its safety in operation. Meanwhile, to find and locate the positions of the persistent small-scale leakage of the pipeline is one of the major issues and difficulties faced by the safe operation of the pipeline. When Sagnac fiber interferometer is in the use of monitoring and positioning of a small leak on pipeline, the interference result of the two coherent laser beams in Sagnac ring will be affected by the random change of light polarization, thereby affecting the interferometer performance of linear Sagnac fiber optic interferometer. A new method is proposed to suppress the influence of random change of polarization on Sagnac interferometer. By modifying the structure of interferometer, an optical depolarizer is introduced into the Sagnac ring to improve the operational stability. Experimental results show that this method is a good solution to solve the deterioration of sensitivity caused by polarization fading.

Key words measurement; optical fiber sensor; Sagnac effect; polarization; depolarizer

OCIS codes 120.3620; 120.4290; 060.2370; 060.2420; 230.5440

1 引 言

管网作为长输运送的重要形式,在输送气体、液体、浆体等散装物品方面具有独特的优势,目前在天

然气、石油、自来水等行业广泛应用。由于腐蚀、人为损坏等原因,管道泄漏事故频频发生。其中因管道老化或工作环境导致管道腐蚀穿孔引起的持续性

收稿日期: 2011-08-04; **收到修改稿日期**: 2011-10-27

基金项目: 国家自然科学基金(10572009)资助课题。

作者简介: 何存富(1958—),男,博士,教授,主要从事现代测控技术与方法、无损检测与健康评价、智能仪器与虚拟仪器技术等方面的研究。E-mail: hecunfu@bjut.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: yykfxzg@126.com

小规模泄漏是长输管线运行安全的主要问题之一。目前这种小泄漏的及早发现与准确定位是国际上长输管线泄漏检测技术的难题。传统的负压波法、流量平衡法、统计决策法等检测方法在此都各有不足。于是,在 Sagnac 干涉仪^[1,2]的基础上,发展了一种分布式光纤管道泄漏监测系统^[3,4]。利用沿管线铺设的光纤作为传感元件。传感光纤上的任一点都具有传感能力,且监测距离远,定位准确度高。

在此监测系统中,光纤线圈中的偏振交扰使最终通过偏振滤波器输入到光电检波器的光强幅度发生随机变化,从而限制了 Sagnac 干涉仪的稳定性。因此光波在传播过程中光波偏振态的稳定性对 Sagnac 光纤干涉仪的精度有很大的影响。通常情况下,减小偏振态随机变化对 Sagnac 干涉仪精度影响的方法有两种^[5]:一种是采用全保偏光纤,通过保持光纤中光偏振态的稳定性来抑制偏振态变化引起的输出漂移^[6],但是全保偏方案会使系统成本大大提高;另一种是通过偏振控制器实时调节,保持两束相干光偏振态的一致性,但是在实际使用过程中需要多次手动调节偏振控制器,极为不方便,限制了系统的实用性。本文提出了采用光学消偏的方法抑制偏振态随机变化对直线型 Sagnac 光纤管道泄漏检测系统性能的影响,并通过实验验证了该方法的可行性。

2 光纤延时环消偏器的消偏原理

2.1 光纤延时环消偏器的结构及琼斯矩阵

光纤延时环消偏器和 Lopt 消偏器是比较常用的消偏器,它们都属于无源消偏器。与 Lopt 消偏器相比光纤延时环消偏器具有如下优点:全光纤、成本低、可靠性高、插入损耗小、无需保偏光纤、无需偏振对准、对光路补偿不敏感,因而输出光更接近自然非偏振光^[7]。

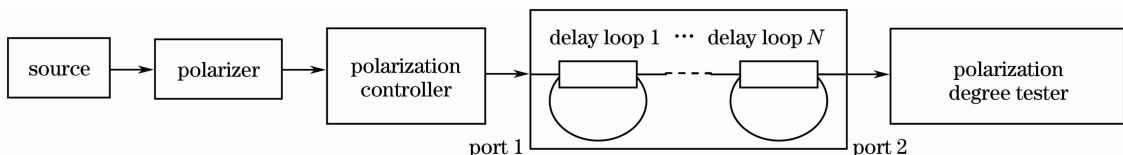


图 2 测量装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of measuring device

设端口 1 的输入电场为 E_i , 端口 2 的输出电场 E_{out} 是所有再循环光束的矢量和。因此,输出场强可写为

$$E_{out} = E_0 + E_1 + E_2 + \dots + E_n, \quad (4)$$

式中下标代表光束循环的次数,例如 E_0 是直接穿

光纤延时环消偏器的基本结构单元如图 1 所示,它由一个 2×2 定向耦合器和一段长度远大于光源相干长度的光纤延时线组成。可以将光纤延时环视为一个离散的线性延时器和一个离散的圆形延时器的串联模型,该模型的琼斯矩阵为^[7]

$$J(\delta_1, \theta, \delta_c) = R_c(\delta_c)R_1(\delta_1, \theta) = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中

$$J_{11} = \cos\left(\frac{\delta_1}{2}\right)\cos\left(\frac{\delta_c}{2}\right) + j\sin\left(\frac{\delta_1}{2}\right)\cos\left(2\theta - \frac{\delta_c}{2}\right), \quad (2)$$

$$J_{21} = -\cos\left(\frac{\delta_1}{2}\right)\sin\left(\frac{\delta_c}{2}\right) + j\sin\left(\frac{\delta_1}{2}\right)\sin\left(2\theta - \frac{\delta_c}{2}\right), \quad (3)$$

$J_{12} = -J_{21}^*$, $J_{22} = J_{11}^*$ 。 $R_1(\delta_1, \theta)$ 和 $R_c(\delta_c)$ 分别是线性延迟器和环形延迟器的琼斯矩阵, δ_1 是线性延迟器的延迟, θ 是线性延迟器快轴的取向, δ_c 是圆形延迟器的延迟。

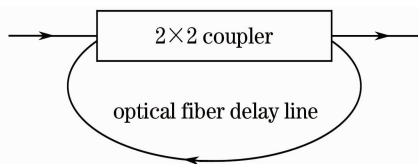


图 1 2×2 单模光纤耦合器延迟环

Fig. 1 2×2 single-mode fiber coupler delay loop

2.2 光纤延时环消偏器的消偏作用

光纤延时环消偏器消偏示意图如图 2 所示。光源的输出经过起偏器产生一束线偏振光,偏振控制器用来改变消偏器输入光的偏振态,偏振度测试仪用来测量输出光的剩余偏振度。光纤延时环消偏器采用光消偏振原理,光消偏振作用^[8,9]是由两主模间的双折射感应群延迟引起的,群延迟时间比光源的相干时间要长。

过耦合器的电场; E_1 是绕光纤环一周的电场; E_2 是绕光纤环两周的电场等。为了计算光纤环的输出电场,假设系统中没有任何过损耗,输入电场 E_i 的光强是 $I_i = |E_i|^2$ 。输入电场 E_i 用矩阵形式表示为

$$\mathbf{E}_i = [E_x \ E_y]^T, \quad (5)$$

式中 E_x 和 E_y 是沿选定的 x, y 方向单位琼斯矢量场。设 \mathbf{K}_c 代表图 2 中从端口 1 到端口 2 的交叉耦合, \mathbf{K}_d 代表从端口 1 到端口 2 的直接耦合, 用矩阵形式表示为

$$\mathbf{K}_c = \begin{bmatrix} k & 0 \\ 0 & k \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}_d = \begin{bmatrix} \sqrt{1-k} & 0 \\ 0 & \sqrt{1-k} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中 k 是耦合参数(值在 $0 \sim 1$ 之间)。所以, 每一个再循环光束值可表示为

$$\mathbf{E}_n = \mathbf{K}_c (\mathbf{J} \mathbf{K}_d)^{n-1} \mathbf{J} \mathbf{K}_c \mathbf{E}_1, \quad (7)$$

式中 n 是经过光纤环光束的循环次数。利用(4)~(7)式, 可得出光纤环的输出光强为

$$I_{\text{out}} = \langle \mathbf{E}_{\text{out}} \mathbf{E}_{\text{out}} \rangle = |\mathbf{E}_{\text{out}}|^2 = |\mathbf{E}_0|^2 + |\mathbf{E}_1|^2 + |\mathbf{E}_2|^2 + \dots + |\mathbf{E}_n|^2 \cong I_i. \quad (8)$$

当 $n \rightarrow \infty$ 时, $J_{11} J_{22} - J_{21} J_{12} = 1$, 由于光纤环的回路长度比光源的相干长度大得多, 即要求 $l_d \gg l_{\text{coh}}$, 这里 l_d 是光纤环回路的长度, l_{coh} 是光源的相干长度。谐振(或干涉)条件不满足, 所以(8)式中没有光场的交叉项。当 $n \rightarrow \infty$ 时, $I_{\text{out}} = |\mathbf{E}_i|^2 = I_i$, 这意味着: 在没有损耗的光纤环中, 如果没有谐振或干涉效应, 则输出功率等于输入功率。光纤环耦合器的实际损耗是耦合区过损耗和光纤环的衰减, 在实际的耦合器中这种损耗非常小(大约为 0.1 dB)。

从(7)式可以看出, 每一个再循环光束都附加一个矩阵项 $\mathbf{J} \mathbf{K}_c$, 只有双折射矩阵 \mathbf{J} 对偏振态变化有影响, \mathbf{K}_c 项仅使每一再循环光束的光强降低。所以, 每一个再循环光束的电场在端口 2 处所表现的偏振态(SOP)是不同的, 并将取决于矩阵 \mathbf{J} 中的参数 $\delta_1, \theta, \delta_c$, 使得输出光束的结果为不同偏振态的叠加。通过对再循环光束的不同偏振态求平均值, 可产生偏振消偏作用。偏振消偏取决于光纤环的双折射参数(线性或圆形的)和光纤环的连接级数。

3 消偏型 Sagnac 光纤管道泄漏检测系统

3.1 消偏型 Sagnac 干涉仪的结构分析

如图 3 所示, 整个系统由光源、传感光纤、法拉第旋转镜(FRM)、光电转换器、耦合器、相位调制器、消偏器、延迟线圈和信号处理几部分组成。光波从宽带光源出发, 经过 Sagnac 干涉仪, 导光相位被物理场调制, 共返回四束光, 其中光程相同的两束相干光发生干涉。

当管道泄漏后, 流体与漏孔壁会产生摩擦, 从而

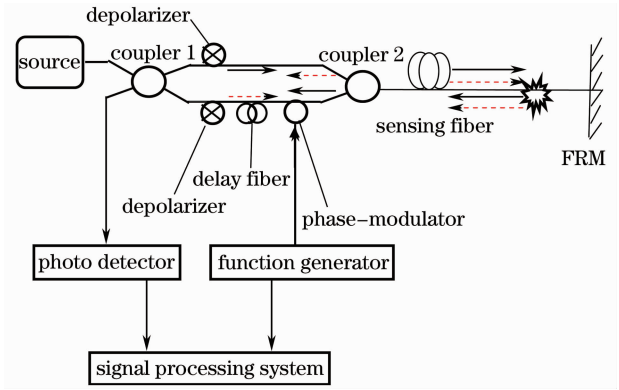


图 3 基于消偏器的直线型 Sagnac 光纤管道泄漏检测系统

Fig. 3 Linear Sagnac fiber pipeline leakage detection system based on depolarizer

在管壁激发出应力波(即泄漏声发射信号), 使管道振动, 同时会有部分声波在空气中传播, 这两部分信号作用到光纤上, 使光纤的长度和折射率都发生变化。从而使光纤中传播的导光相位被调制, 即光相位产生延迟, 而光相位的变化量即反应外界物理场的信息。因此通过解调此相位变化量即可得到物理场的信息。

通过在 Sagnac 环两臂上加入光纤消偏器, 使返回到耦合器 1 发生干涉的光波(常为部分偏振光)经过消偏器后, 成为完全非偏振光, 相当于光强均匀地分布在所有方向的偏振态上。虽然光纤线圈中的偏振交扰可以引起某两个偏振态间功率的转移, 但是由于消偏器的作用, 使输出光强各方向均匀化, 最终通过偏振滤波器到光电检波器的光强幅度是恒定的, 由此消除了由偏振变化所导致的测试误差。

3.2 管道泄漏的判定方法

通过信号解调得到两束相干光调制后产生的相位差为^[10]

$$\Delta\theta(t) = 4\phi_s \sin \omega_s (\tau_d/2) \cos \omega_s \tau_s \cos \omega_s t'. \quad (9)$$

管道泄漏监测技术的关键是准确判断出管道是否泄漏, 并准确定位泄漏点。当泄漏发生后, 对泄漏信号进行频域分析, 在泄漏信号的宽带范围内会出现某些频率点使 $\cos \omega_s \tau_s = 0$ (称为零点频率), 即

$$2\pi f_s \tau_s = \frac{N\pi}{2}, \quad (10)$$

式中 N 为整数。可以注意到, 对于确定的 τ_s 将有一个或多个 ω_s 使 $2\pi f_s \tau_s = \frac{N\pi}{2}$, 一般取 $N = 1$ 。因此当出现零点频率时管道即发生了泄漏。

由(10)式求得 τ_s 后, 根据公式

$$S = \frac{c\tau_s}{n} = \frac{c}{4nf_s}, \quad (11)$$

计算出泄漏位置到法拉第旋转镜的距离 S , 即确定泄漏位置。

4 测试结果

在实验室条件下进行了管道泄漏模拟实验。管道长 700 mm, 外径 74 mm, 壁厚 6 mm, 使用康宁 (Coring) 单模光纤作为传感光纤, 纤芯折射率 $n = 1.5$, 泄漏孔直径为 3.5 mm, 泄漏点距法拉第旋转镜的距离 4.020 km。

实验中, 检测系统采用的宽带光源的中心波长为 1550 nm、带宽为 36 nm、功率为 20 mW。利用 NI 公司研制的数据采集卡和基于 LabView 的光纤传感管网泄漏监测软件对检测信号进行采集和分析。

直线型 Sagnac 光纤管道泄漏检测系统测试结果如图 4 所示, 由于光波偏振态的随机变化直接影响到 Sagnac 环中两束相干光的干涉效果, 从而影响到直线型 Sagnac 光纤干涉仪的性能。由于该系统既没有加入偏振控制器也没有加入消偏器, 因而无法消除偏振态变化所导致的测试误差。由图可见, 当

管道泄漏时, 该系统无法获得泄漏波形。

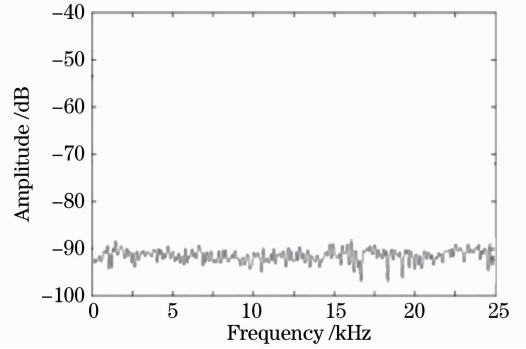


图 4 直线型 Sagnac 干涉仪测试结果

Fig. 4 Test results of linear Sagnac interferometer

偏振控制型 Sagnac 光纤管道泄漏检测系统^[10]

测试结果如图 5(a) 所示, 采用偏振控制器实时调节, 保持两束相干光偏振态的一致性, 系统灵敏度较高, 可以得到较好的检测结果。保持偏振控制器的状态不变, 3 h 后所得波形如图 5(b) 所示。由于光纤中干涉光的偏振态会随温度、应力等因素变化, 引起信号光与参考光之间的偏振失配, 导致干涉仪中两束光以不同偏振态干涉, 产生信号衰退现象。因此系统的稳定性不好, 需要实时的调节偏振控制器, 保持两束相干光偏振态的一致性。

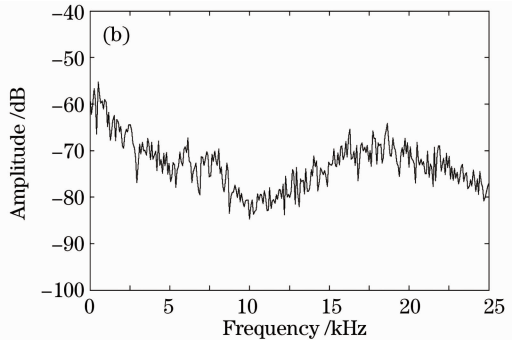
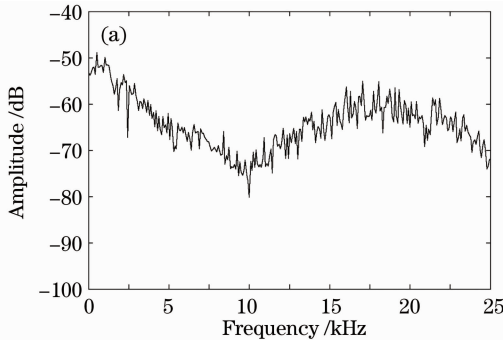


图 5 偏振控制型 Sagnac 干涉仪测试结果。(a) 初始测试结果; (b) 3 小时后测试结果

Fig. 5 Test results of polarization controlled Sagnac interferometer. (a) Initial results; (b) results after 3 hours

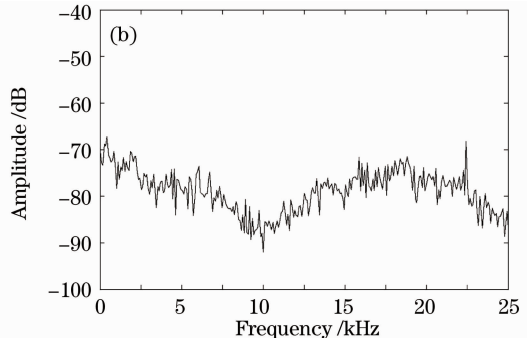
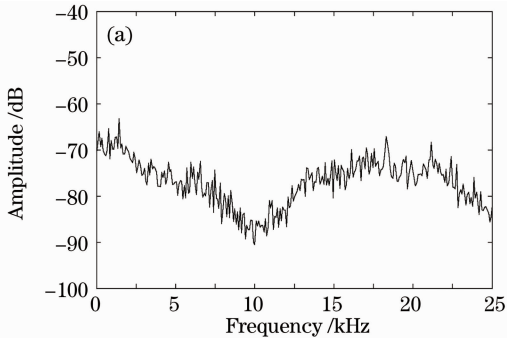


图 6 消偏型 Sagnac 干涉仪测试结果。(a) 初始测试结果; (b) 3 小时后测试结果

Fig. 6 Test results of depolarized Sagnac interferometer. (a) Initial results; (b) results after 3 hours

消偏型 Sagnac 光纤管道泄漏检测系统,测试结果如图 6(a)所示,采用两支消偏器替代传统的偏振控制器,将偏振光转换为完全非偏振光,从而消除了由偏振交扰所导致的测试误差。图 6(b)是 3 h 后得到的波形。由图可见系统灵敏度没有降低,而且系统的稳定性更好,同样可以得到较好的检测结果。

5 结 论

基于消偏技术的直线型 Sagnac 分布式光纤管道泄漏检测系统通过在 Sagnac 环中加入光纤延时环消偏器,有效解决了由偏振交扰所导致的测试误差,并能快速、有效地实现管道泄漏检测,且定位精度高、运行稳定。与偏振控制型 Sagnac 干涉仪相比,基于消偏技术的直线型 Sagnac 分布式光纤管道泄漏检测系统成本更低、稳定性更好,而且避免了反复调节偏振控制器的不足,在大范围长距离管道监测领域具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Liu Deming, Sun Qizhen. Distributed optical fiber sensing technology and its applications [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(11): 29~33
刘德明, 孙琪真. 分布式光纤传感技术及其应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(11): 29~33
- 2 Sun Guoxin, Zhou Kejiang. Virtual optical fiber Sagnac interferometer and analog-digital mixed demodulation system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 213~218
孙国鑫, 周柯江. 虚拟光纤 Sagnac 干涉仪及其数模混合解调系统[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 213~218
- 3 Hang Lijun, He Cunfu, Wu Bin. Pipeline leakage detection and location technology based on Sagnac interferometer[J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(5): 651~653

- 杭利军, 何存富, 吴 斌. 基于 Sagnac 光纤干涉仪的管道泄漏检测和定位技术[J]. *光学技术*, 2007, **33**(5): 651~653
- 4 Feng Hao, Jin Shijiu, Zeng Zhoumo *et al.*. Locating error analysis in pipeline leakage detection and prewarning system based on modeling using Jones matrix[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 723~727
封 皓, 靳世久, 曾周末 等. 基于琼斯矩阵建模的管道泄漏检测及预警系统的定位误差分析[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 723~727
 - 5 Liu Jianchun, Gao Limin, Li Kang *et al.*. Research on the relationship between depolarized structure of fiber optic gyros and degree of polarity [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(6): 948~951
柳建春, 高立民, 李 康 等. 光纤陀螺消偏结构与偏振度关系的研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(6): 948~951
 - 6 Chen Xinwei, Zhang Hongxia, Jia Dagong *et al.*. Implementation of distributed polarization maintaining fiber polarization coupling pressure sensing system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1467~1472
陈信伟, 张红霞, 贾大功 等. 分布式保偏光纤偏振耦合应力传感系统的实现[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1467~1472
 - 7 Shi Chao, Ding Wei, Li Juhao *et al.*. Theoretical analysis and experimental measurements for fiber delay loop depolarizer[C]. OFCIO' 2003; Proceedings of the Eleventh National Fiber-Optic Communications and the Twelfth Conference on Integrated Optics, Nanjing, 2003. 715~718
史 超, 丁 伟, 李巨浩 等. 光纤延时环消偏器的理论分析与实验测量[C]. 全国第十一次光纤通信暨第十二届集成光学学术会议论文集, 南京, 2003. 715~718
 - 8 Paisheng Shen, Joseph C. Palais. New single-mode fiber polarization scrambler[J]. *Opt. Fiber Technol.*, 1997, **3**(2): 184~188
 - 9 Paisheng Shen, Joseph C. Palais. Passive single-mode fiber depolarizer[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(9): 1686~1691
 - 10 He Cunfu, Zheng Xingqiang, Luo Jianwei *et al.*. Research on leak detection system for pipeline network based on distributed optical fiber sensing array technology [J]. *Optical Technique*, 2011, **37**(1): 76~79
何存富, 郑兴强, 骆建伟 等. 基于分布式光纤传感阵列的管网泄漏监测系统研究[J]. *光学技术*, 2011, **37**(1): 76~79