

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

封皓 靳世久 曾周末 周琰 曲志刚

(天津大学精密测试技术与仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要 为了解决分布式光纤油气管道泄漏检测及预警系统中常出现粗大定位误差的问题, 需要提高定位精度, 在分析系统的检测定位原理的基础上, 基于单模光纤的双折射特性等效琼斯矩阵, 建立了油气管道光纤预警系统的光学偏振模型, 并对模型进行了仿真。指出信号关联的二义性即两传感器获得同一振动源的波形不相关的现象, 是造成粗大定位误差的原因。根据该理论模型, 提出了利用外加偏振控制器改变激光偏振方向的解决方法, 定位实验证明该方法较好地解决了上述问题, 提高了现场实验的定位精度。该模型的建立, 为预警系统光路的改进和调节提供了理论指导。

关键词 相干光学; 光纤振动传感器; 琼斯矩阵; 关联二义性; 双折射; 偏振

中图分类号 TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092903.0723

Locating Error Analysis in Pipeline Leakage Detection and Prewarning System Based on Modeling Using Jones Matrix

Feng Hao Jin Shijiu Zeng Zhoumo Zhou Yan Qu Zhigang

(*State Key Laboratory for Precision Measurement Technology and Instrument, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

Abstract To eliminate the gross error in the distributed optical fiber pipeline leakage detecting and prewarning system and to improve the locating accuracy, based on the analysis on the detecting and locating principle, the optical polarization model is established which is based on the equivalent Jones matrix of the single-mode optical fiber birefringence. Model simulation shows that the cause for the gross error is the discrepancy of two signals, which means that the signals acquired by the photodetectors from the same vibroseis are not correlative. According to the theoretical model, the solution of using external polarization controller to change the polarization direction is put forward. It is proved by the experiment that the solution can solve the problem preferably and improve locating accuracy. Furthermore, a theoretical guidance of the system improvement and the adjustment in optical structure is provided based on the theoretical model.

Key words coherence optics; fiber vibration sensors; Jones matrix; ambiguity of relevancy; birefringence; polarization

1 引 言

常用的油气管道泄漏检测装置主要通过管道输送压力和流量等参数的变化来判断是否发生泄漏, 该类方法受输送物质特性及输送工况等因素影响, 检测灵敏度不高。基于 Mach-Zehnder 光纤干涉仪

的分布式光纤油气管道泄漏检测及预警系统不依赖管道输送参数的测量, 除具有灵敏度高, 监测距离长, 定位准确的优点外, 还可对可能造成泄漏的非法施工等进行预报警和定位, 起到了防患于未然的作用^[1]。国际上基于 MZI 原理的微应变光纤传感器

收稿日期: 2008-06-27; 收到修改稿日期: 2008-08-28

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60534050)和天津市自然科学基金(06YFJMJC02000)资助课题。

作者简介: 封皓(1983-), 男, 博士研究生, 主要从事测试技术及仪器等方面的研究。E-mail: fhlele@msn.com

导师简介: 靳世久(1946-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事测试技术及仪器等方面的研究。E-mail: shjijin@tju.edu.cn

产品主要应用于安保领域,如澳大利亚的 FFT 公司和美国的 Optellios 公司的电子光纤围栏产品,定位精度最高可达 25 m,监控距离可达 40 km。但由于管道完整性领域的特殊要求,国内外文献中还发现类似系统在油气管道中的实际应用。

管道泄漏和非法入侵事件的模式识别和定位是油气管道光纤预警系统的两大关键技术,本文仅对定位计算中常出现粗大误差的问题进行分析与研究。系统通过对两传感器信号进行互相关函数计算时差的方法对侵入时间进行定位,在实验中常出现粗大误差,甚至无法定位。从系统检测定位原理入手,以单模光纤的等效双折射琼斯矩阵为基础,建立了系统光路的琼斯矩阵偏振模型,理论分析了粗大误差产生的原因,根据该模型提出了解决问题的方法。

2 系统检测和定位原理

系统检测和定位原理如图 1 所示。沿管道平行铺设一条光缆,利用其中的三条单模光纤构成基于 Mach-Zehnder 光纤干涉仪原理的分布式振动信号传感器,用于获取管道沿途的振动信号^[2]。

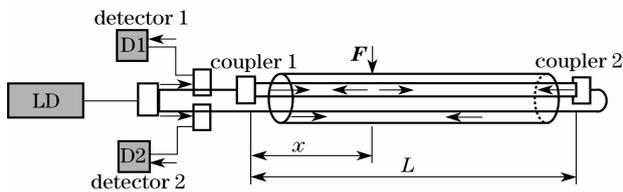


图 1 系统定位结构示意图

Fig. 1 Diagram of system locating structure

当传感光缆检测到管道沿线的振动信号后,两束传感光纤中的光波分别在耦合器 1 和耦合器 2 处发生干涉。耦合器 2 处的干涉信号通过传输光纤返回到首端耦合器处。两路干涉信号经光电转换,再通过 ADC 模数转换后,输入到计算机进行信号的分析与处理。定位公式如下:

$$x = \frac{L - v(\Delta t - L/v)}{2}, \quad (1)$$

式中, v 为光波在光纤中的传播速度, Δt 为两路干涉信号的时差,可由其互相关函数计算得到^[3]

$$R_{x_1 x_2}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x_1(t)x_2(t+\tau)dt. \quad (2)$$

采用互相关函数精确计算时差时要求 $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$ 为强相关信号,对于弱相关的信号采用互相关函数计算时差将产生较大误差。在多数情况下,两检测信号 $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$ 存在关联二义性现象,即同一振动源在两探测器处产生的波形不相关,给时差估

计带来较大困难,造成较大定位误差。

3 系统的建模分析与仿真

在非理想情况下,由于光纤的缺陷,例如纤芯的椭圆度、内部残余应力、外接应力干扰等,会使光纤两个相互垂直的偏振模态不能相互简并,发生双折射现象。将非理想单模光纤等效为一个偏振器件,其琼斯矩阵为^[4,5]

$$B = \begin{pmatrix} e^{i\xi} \sin^2 \theta + \cos^2 \theta & (e^{i\xi} - 1) \cos \theta \sin \theta \\ (e^{i\xi} - 1) \cos \theta \sin \theta & e^{i\xi} \cos^2 \theta + \sin^2 \theta \end{pmatrix}, \quad (3)$$

式中 ξ 是相位延迟角, θ 是快轴和 x 轴的夹角。造成单模光纤相位延迟的原因有:波导形状双折射 $\delta\beta_{GE}$ 、应力双折射 $\delta\beta_{SE}$ 、光纤弯曲双折射 $\delta\beta$ 、光纤扭曲双折射 $\delta\beta_i$ ^[6]。因此,式(3)中的 ξ 可表示为

$$\xi = (\delta\beta_{GE} + \delta\beta_{SE} + \delta\beta + \delta\beta_i) \times L, \quad (4)$$

式中 $\delta\beta_{GE}$ 与光纤的形状有关,在同一根光纤中,是一个常数。 $\delta\beta_{SE}$ 与光纤上受到应力 σ 成正比, $\delta\beta$ 、 $\delta\beta_i$ 分别是与光纤的弯曲半径和每米平均扭转数成正比的。当有一个应力作用传感光纤上时,会在光纤的两个正交方向上产生差应力 $\delta\beta$,从而改变单模光纤的相位延迟角 ξ 。

将传感光纤感受管道沿线振动的部分等效为一个双折射元件 B ,传感光纤的剩余部分等效为双折射元件 A ,信号传输光纤等效为双折射元件 C 。当光沿反方向传播时,等效双折射元件为原矩阵的转置。光路中的耦合器全部为 2×2 耦合器。正向传输和逆向传输的光路等效展开后,如图 2 所示。

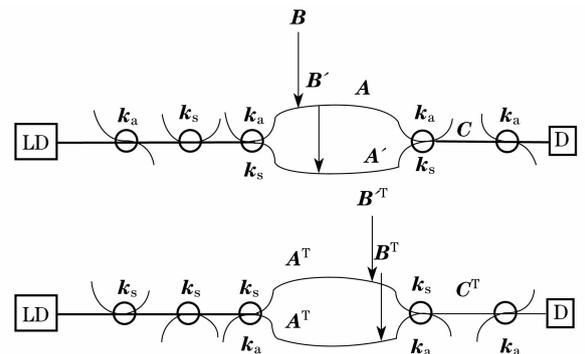


图 2 系统等效展开光路图

Fig. 2 Equivalent light path of system

因两根传感光纤在同一根光缆中缠绕的相对位置不同,同一个振动源作用在两根传感光纤上产生的两正交方向的应力差 σ 不同,从而造成两根光纤上的相位延迟 ξ 的不同。振动强度越大,作用在传感光纤上的距离 L 越长,产生的相位延迟 ξ 也越大。另外,由于两根传感光纤等效快慢轴的方向不同,会

造成两光纤的快轴与 x 轴角度的不同。设传感光纤感受振动段的相位延迟差为 δ ，快轴与 x 轴角度

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} e^{j\xi} \sin^2 \theta + \cos^2 \theta & (e^{j\xi} - 1) \cos \theta \sin \theta \\ (e^{j\xi} - 1) \cos \theta \sin \theta & e^{j\xi} \cos^2 \theta + \sin^2 \theta \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{B}' = \begin{pmatrix} e^{j(\xi+\delta)} \sin^2(\theta + \delta') + \cos^2(\theta + \delta') & (e^{j(\xi+\delta)} - 1) \cos(\theta + \delta') \sin(\theta + \delta') \\ (e^{j(\xi+\delta)} - 1) \cos(\theta + \delta') \sin(\theta + \delta') & e^{j(\xi+\delta)} \cos^2(\theta + \delta') + \sin^2(\theta + \delta') \end{pmatrix}. \quad (5)$$

传感光纤剩余部分没有振动对其作用，但由于两根传感光纤存在制作过程中就形成的波导形状差异，产生波导形状双折射 $\delta\beta_{GE}$ 的差异。另外由于两根传感光纤在光纤接续盒中，与耦合器尾纤熔接时的弯曲半径、弯曲圈数、扭转圈数都会不同，造成 $\delta\beta$ 和 $\delta\beta_i$ 的差异。这三种差造成的传感光纤剩余段相位总延迟差为 δ_1 。与 B 中的 δ 不同的是，在系统搭建完成后 δ_1 为一个常数，光学系统不变化， δ_1 也不会变化。根据(3)式，图 2 中的 \mathbf{A} 与 \mathbf{A}' 可表示为：

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} e^{j\xi_1} \sin^2 \theta_1 + \cos^2 \theta_1 & (e^{j\xi_1} - 1) \cos \theta_1 \sin \theta_1 \\ (e^{j\xi_1} - 1) \cos \theta_1 \sin \theta_1 & e^{j\xi_1} \cos^2 \theta_1 + \sin^2 \theta_1 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{A}' = \begin{pmatrix} e^{j(\xi_1+\delta_1)} \sin^2 \theta_1 + \cos^2 \theta_1 & (e^{j(\xi_1+\delta_1)} - 1) \cos \theta_1 \sin \theta_1 \\ (e^{j(\xi_1+\delta_1)} - 1) \cos \theta_1 \sin \theta_1 & e^{j(\xi_1+\delta_1)} \cos^2 \theta_1 + \sin^2 \theta_1 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

在不考虑插入损耗和附加损耗的情况下， 2×2 耦合器的分光比为 $1:1$ 时，其直接耦合(k_s)和跨接耦合(k_a)的琼斯矩阵^[7,8]为

$$\mathbf{k}_a = \begin{pmatrix} j\frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \\ 0 & j\frac{\sqrt{2}}{2} \end{pmatrix} \quad \mathbf{k}_s = \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \\ 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{pmatrix} \quad (7)$$

传输光纤的等效双折射琼斯矩阵 \mathbf{C} 为

$$\mathbf{C}' = \begin{pmatrix} e^{j\xi_2} \sin^2 \theta + \cos^2 \theta & (e^{j\xi_2} - 1) \cos \theta_2 \sin \theta_2 \\ (e^{j\xi_2} - 1) \cos \theta_2 \sin \theta_2 & e^{j\xi_2} \cos^2 \theta + \sin^2 \theta \end{pmatrix} \quad (8)$$

差为 δ' 。将上述参数代入(3)式中，则图 2 中的 \mathbf{B} 与 \mathbf{B}' 可表示为：

对于输入光 E_{in} ，两个光电探测器处光的琼斯矩阵为 \mathbf{E}_{o1} 、 \mathbf{E}_{o2} ：

$$\mathbf{E}_{o1} = (\mathbf{k}_a \times \mathbf{k}_a \times \mathbf{A} \times \mathbf{B} \times \mathbf{k}_s \times \mathbf{k}_s \times \mathbf{k}_a + \mathbf{k}_a \times \mathbf{k}_s \times \mathbf{A}' \times \mathbf{B}' \times \mathbf{k}_a \times \mathbf{k}_s \times \mathbf{k}_a) \times \mathbf{E}_{in}$$

$$\mathbf{E}_{o2} = (\mathbf{k}_a \times \mathbf{k}_s \times \mathbf{B}'^T \times \mathbf{A}'^T \times \mathbf{k}_s \times \mathbf{k}_s \times \mathbf{k}_s + \mathbf{k}_a \times \mathbf{k}_a \times \mathbf{B}^T \times \mathbf{A}^T \times \mathbf{k}_a \times \mathbf{k}_s \times \mathbf{k}_s) \times \mathbf{E}_{in} \quad (9)$$

光强为^[9]

$$I_1 = |E_{o1}(x)|^2 + |E_{o1}(y)|^2,$$

$$I_2 = |E_{o2}(x)|^2 + |E_{o2}(y)|^2. \quad (10)$$

将式(9)代入到式(10)中，可得 I_1 、 I_2 的函数：

$$I_1 = f(\xi, \theta, \delta', \xi_1, \theta_1, \delta_1, \delta, i),$$

$$I_2 = f'(\xi, \theta, \delta', \xi_1, \theta_1, \delta_1, \delta, i). \quad (11)$$

以式(11)中八个参数中的两个为变量，其余参数为常量，可对光强随变量的变化情况进行仿真。以振动产生的应力相位延迟差 δ 、输入光的偏振方向 i 为变量，设置不同的常量可得不同的仿真结果。

4 系统仿真

设输入光 E_{in} 为偏振角度为 i 的线偏振光， $\xi = 1.24\pi$ ， $\theta = \pi$ ， $\delta' = 0.8\pi$ ， $\xi_1 = 0.25\pi$ ， $\theta_1 = 1.28\pi$ ，以加在传感光缆的应力相位延迟差 δ 和输入光的偏振方向 i 为变量，两光电探测器光强 I_1 、 I_2 与 δ 和 i 关系如图 3 所示(图中 I_1 与 I_2 为探测器获得的光强与激光器输出光强之比。若无特别说明，本文图中涉及的所有光强均采用此定义)。

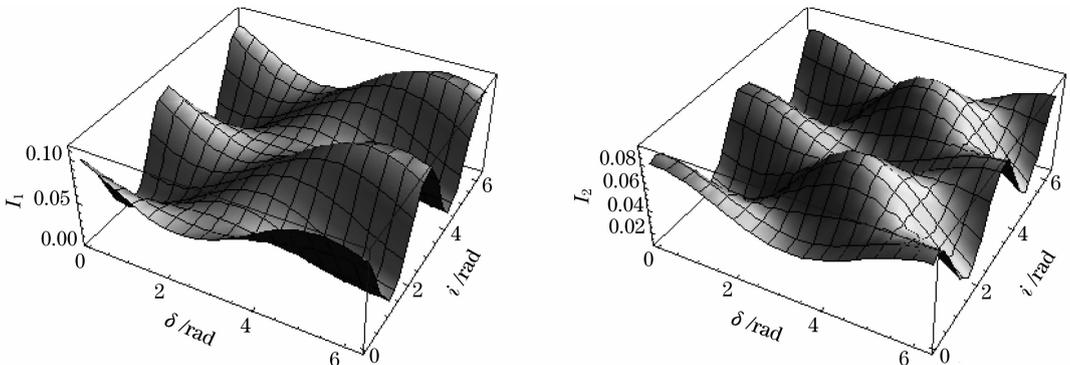


图 3 I_1 、 I_2 与应力延迟和入射光偏振方向的关系

Fig. 3 Relations of I_1 and I_2 versus the stress phase retardation and the polarization direction of incident light

改变输入光偏振方向 i , 得到光强 I 随 δ 变化的趋势, 对同一变化的应力获得的波形也不同。设交变的应力引起的交变相位延迟差 $\delta = 4 + \sin t$, 当入射光的偏振方向 $i = 0.25\pi$ 时, $I_1(t)$ 、 $I_2(t)$ 如图 4。

此时两个波形完全反向。调整 i 的角度, 对同一个交变应力可得不同波形。当 $i = 0.8\pi$ 时, 得到 $I_1(t)$ 、 $I_2(t)$ 如图 5:

此时两个波形相关性极差。由上可知, 对于不同入射光的偏振方向, 同一个振动源可在光电探测器上产生不同的振动信号。可通过调整入射光的偏振方向, 使相位延迟差变化范围内的光强变化趋势相同, 进而改善两个信号的一致性, 提高定位精度。

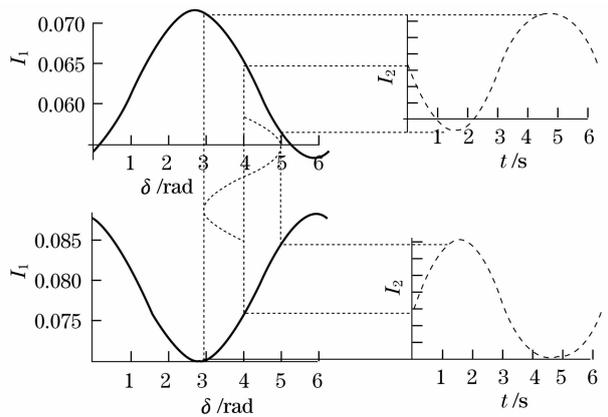


图 4 正交相位延迟下的仿真波形
Fig. 4 Simulation waveform under the orthogonal phase retardation conditions

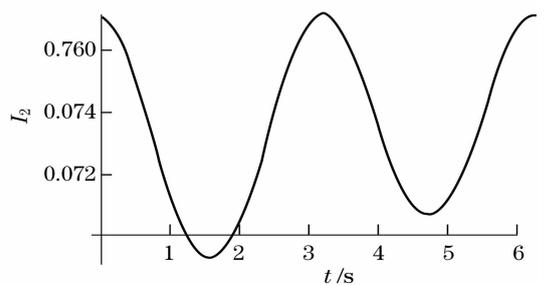
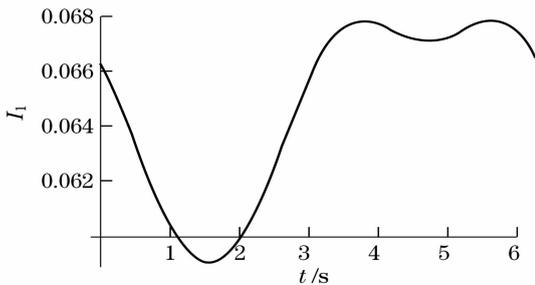


图 5 $i = 0.8\pi$ 时光电探测器的仿真波形
Fig. 5 Simulation waveform of optoelectronic detector when $i = 0.8\pi$

5 现场实验

该系统 2007 年在大港—枣庄成品油管道安装运行, 监测距离约 35 km。系统采用的传感光缆为 2006 年建设该成品油管道时与管道同沟敷设的 GYTA 六芯单模通讯光缆, 位于管道正上方约 30 cm, 与地面垂直距离约 1.5 m。实验地点为大港输油站(理论距离 0 m 处)和一号阀室(理论距离 23.8 km 处), 振动源为地表人工铁锹挖掘。系

统在安装调试中出现两传感器信号的二义性问题, 相关运算估计时差困难, 出现了很大的定位误差。系统数学模型分析可知, 改变输入光的偏振方向可对信号的相关性进行调节。按照该理论模型, 系统在光源尾纤处加装光纤偏振控制器, 通过改变偏振控制器波片的方向对激光的偏振态进行控制。经过调节, 两个光电探测器获得了相关性很好的波形, 如图 6。

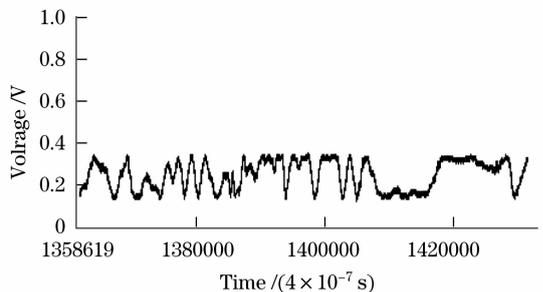
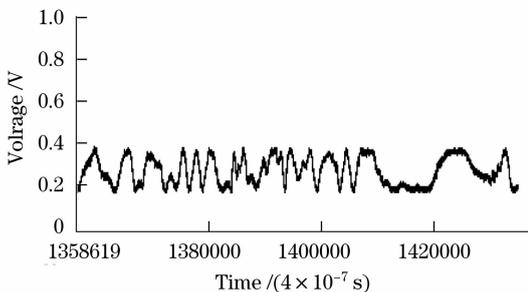


图 6 加偏振控制器后的波形
Fig. 6 Waveform with fiber polarization controller

经偏振控制器调节后, 在大港输油站和一号阀室处实验得到的人工铁锹挖掘定位结果如图 7 所示。对于铁锹挖掘等微小振动, 数据处理后的平均

定位误差为 100 m, 相对误差小于 0.3%, 最大定位误差不超过 500 m。对于直接触碰到光缆的振动, 系统的平均定位误差小于 30 m。

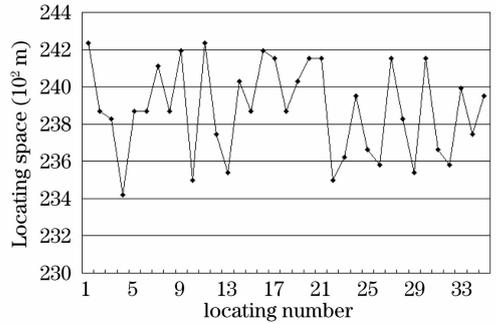
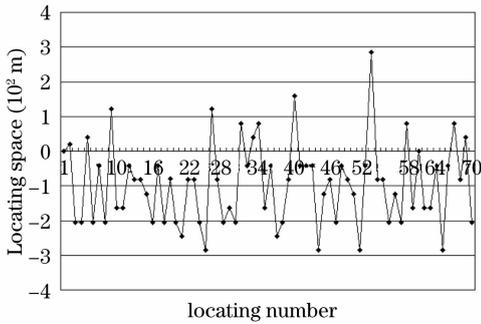


图 7 首端处和一号阀室间人工挖掘信号定位结果

Fig. 7 Locating results keteueen the head end and No. 1 valve chamber

6 结 论

基于 Mach-Zehnder 光纤干涉仪原理的分布式光纤油气管道泄漏检测及预警系统反应灵敏,可用于气体、液体等不同流体的输送管道的预警。从检测定位原理,利用琼斯矩阵对光路的双折射模型进行了研究,建立了该系统的系统模型,分析了两光电探测器获得信号的二义性问题产生原因,即两传感臂光纤的波导截面形状、接续盒中的弯曲半径和扭转圈数不同,引起了相位延迟差。同时,利用该数学模型分析得出的结果,提出了在光路结构不改变的情况下,通过偏振控制器改变入射激光偏振角度的调节方法,实验表明,该方法较好地解决了波形二义性问题,提高了系统的定位精度。此外,该模型的提出,也为进一步改进光路、解决系统的其他问题提供了理论基础。系统的定位精度低于光纤围栏的定位精度,主要原因是土壤对振动的滤波作用和所用光缆结构的差异。我们准备在深入研究土壤和光缆铠装对定位影响的基础上,改进系统的设计,进一步提高系统的定位精度。

参 考 文 献

1 Qu Zhigang, Jin Shijiu, Feng Hao *et al.*. Multi-scale chaotic characteristic analysis of detection signals in pipeline pre-warning system based on empirical mode decomposition[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, **29**(2): 313~316
曲志刚,靳世久,封皓等. 基于 EMD 的管道预警系统信号多尺

度混沌特性分析[J]. *石油学报*, 2008, **29**(2): 313~316
2 Zhou Yan, Jin Shijiu, Feng Hao *et al.*. Study on oil and gas pipeline leakage real-time inspection system based on distributed optical fiber: ISMTH 2007, Sendai, Japan, 2007 [C]. *Sendai, Japan; Trans Tech Publications Ltd*, 2007
3 Zhou Yan. Study on the Distributed Optical Fiber Pipeline Safe Detection Technology [D]. Tianjin: Tianjin University, 2006, 96~106
周琰. 分布式光纤管道安全检测技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2006, 96~106
4 Zheng Yuan, Liu Yumin, Yang Bojun *et al.*. Study of the statistical characteristics of second-order polarization mode dispersion by jones transfer matrix method[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(1): 45~48
郑远,刘玉敏,杨伯君等. 用琼斯传输矩阵法研究二阶偏振模色散的统计特性[J]. *中国激光*, 2003, **30**(1): 45~48
5 Zhang Jinghua. General expression of jones matrix in birefringent fibers and reflective transmission characteristics [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1997, **26**(6): 527~531
张靖华. 双折射光纤琼斯矩阵的一般表达式及反射传输特性[J]. *光子学报*, 1997, **26**(6): 527~531
6 Miao Yanbiao. *Polarization Optics* [M]. Beijing: Science Press, 2003: 156~162
廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 156~162
7 Tan Jing, Chen Weimin, Fu Yumei. Application of jones matrix in the research of polarization effects of the distributed optic fiber sensor[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(2): 120~125
谭静,陈伟民,符欲梅. 琼斯矩阵在分布式光纤传感器偏振态分析中的应用[J]. *光电工程*, 2007, **34**(2): 120~125
8 D. B. Mortimore. Fiber loop reflectors [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**: 1217~1224
9 Song Muping, Zhuang Baiyun. Polarization-induced fading elimination technique in Brillouin optical time-domain analysis sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 711~715
宋牟平,庄白云. 布里渊光时域分析传感器的消偏振衰落技术[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 711~715