

文章编号: 0258-7025(2007)06-0820-05

# 一种新的直线型 Sagnac 光纤干涉仪管道泄漏检测系统及其定位技术

杭利军, 何存富, 吴 斌

(北京工业大学机械工程与应用电子技术学院, 北京 100022)

**摘要** 研制了一种基于 Sagnac 干涉仪的直线型分布式光纤传感器, 可实时进行管道泄漏检测与定位。利用法拉第旋转镜将传统 Sagnac 干涉仪的环形结构改为直线型结构, 使其适用于各种复杂管道的布放。推导了泄漏信号引起的光信号相位变化表达式; 分析了该干涉仪应用于泄漏检测的原理及其泄漏源定位方法, 并在泄漏点距法拉第旋转镜为 4.020 km 处进行了泄漏有无及定位的研究。实验结果表明, 该系统很好地检测到泄漏源的有无, 又较准确地确定了泄漏源位置且最大定位误差小于 118 m。

**关键词** 光纤光学; Sagnac 干涉仪; 泄漏检测; 管道

**中图分类号** TN 247 **文献标识码** A

## A New Pipeline Leakage Detection System Based on Linear Optical Fiber Sagnac Interferometer and Its Location Technology

HANG Li-jun, HE Cun-fu, WU Bin

(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology,  
Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

**Abstract** A linear distributed optical fiber sensor based on the principle of Sagnac interferometer is developed to detect pipeline leakage and locate leakage point in real-time. The traditional Sagnac interferometer is converted into in-line structure by using a Faraday rotator mirror, and the in-line structure is applied easily in perplexing pipelines. The representation of phase change caused by leakage is formulated for optic signal. The measuring principle and leaking source location method for the detection system are analyzed. An experiment is designed to detect leaking source and locate leaking source, and the leak is produced at 4.020 km from Faraday rotator mirror. The results verify that the system can realize leaking source detection and location accurately and the largest location error is less than 118 m.

**Key words** fiber optics; Sagnac interferometer; leakage detection; pipeline

## 1 引言

长输油气管线是一种经济、方便的油气运输方式, 但管道长年埋于地下, 容易发生腐蚀、疲劳破坏, 或使管道内部的潜在缺陷扩展为破损而引起泄漏事故。目前对长输油气管线的监测, 一般采取人工巡视、模型法和传感器法来实现。人工巡视是一种最

原始的方法, 劳动强度大、效率低; 而模型法和传感器法的定位准确度、准确性则依赖于模型的优劣, 以及传感器的准确度和安装密度<sup>[1]</sup>, 定位精度差。因此需要一种准确、高效的管线泄漏监测系统。

分布式光纤传感技术是近年来发展起来的新技术<sup>[2,3]</sup>, 具有灵敏度高、动态范围大<sup>[4,5]</sup>, 可长距离连

收稿日期: 2006-10-08; 收到修改稿日期: 2007-01-22

基金项目: 国家自然科学基金(10572009)资助项目。

**作者简介:** 杭利军(1979—), 男, 蒙古族, 内蒙古人, 博士研究生, 主要从事光纤传感技术、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: hlj@emails.bjut.edu.cn

**导师简介:** 何存富(1958—), 男, 山西人, 教授, 博士生导师, 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

续监测的特点。这类传感器只需一个光源和一条传感线路,集传感和传输于一体,可对沿光纤传输路径上长达数千米甚至数万米的信息进行测量。由于同时获得的信息量大,单位时间所需要的费用大大降低,从而可获得较优的性价比。

本文利用改进的直线型 Sagnac 干涉型分布式光纤传感器进行管道泄漏检测和定位研究,实验结果与理论分析较吻合。

## 2 Sagnac 光纤干涉仪传感原理和系统构成

基于 Sagnac 干涉仪原理的管道泄漏检测技术,较马赫曾德尔干涉仪传感器<sup>[5]</sup>的优点是,Sagnac 干涉仪为零光程差,因此不存在两传感臂长度不一致引起的噪声。且对光源相干性要求低,可使用高功率的宽带光源,更适合长距离管道检测。图 1 是传统的 Sagnac 干涉仪结构<sup>[6]</sup>,在应用于管道泄漏检测时,由于系统是环形对称结构,则传感系统会以对称形式感受到物理场,顺时针和逆时针传输的光受到相同的相位调制,导致信号相互抵消,产生互易效应,无干涉信号输出。因此需要将环状结构的一半光纤设计为非传感光纤与声场隔离(图 1 中的参考光纤与声场隔离),以避免干涉仪的互易效应。此种传感结构虽然可实现长距离管道泄漏检测,但在工程实际中,将传感器的一半光纤与声场隔离,施工难度和传感器成本都难以接受。鉴于这种情况,本文设计并实现了一种基于 Sagnac 干涉仪的新结构,如图 2 所示。这种结构利用法拉第旋转镜(FRM)将 Sagnac 干涉仪的环形结构改成直线型结构,适于复

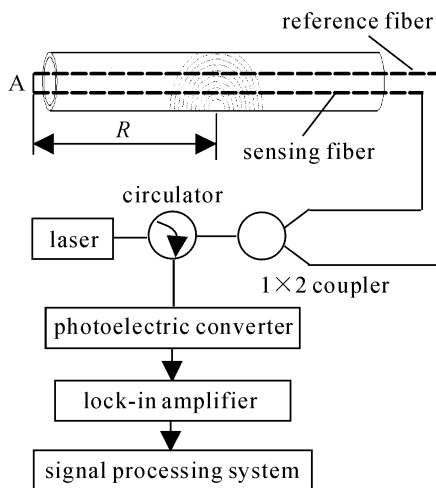


图 1 传统的 Sagnac 干涉型管道泄漏检测系统  
Fig. 1 Pipeline leak detection system based on Sagnac interferometer

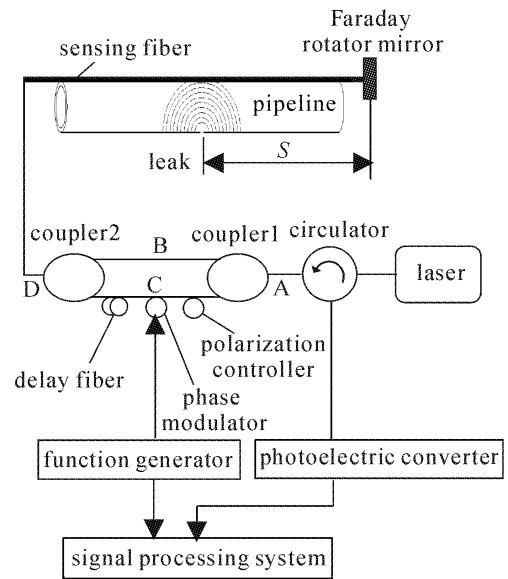


图 2 直线型 Sagnac 干涉型管道泄漏检测系统  
Fig. 2 Pipeline leak detection system based on in-line Sagnac interferometer

杂管道布放,且保持了传统 Sagnac 干涉仪的零光程差特点。传感光纤末端的法拉第旋转镜不但具有将光按原路反射形成 Sagnac 环的功能,而且可以补偿由于传感光纤双折射引起的“偏振诱导信号衰落<sup>[7]</sup>”。在光源与耦合器之间设置一光环行器,对反射光进行隔离,以消除对光源的影响。整个系统由光源、传感光纤、法拉第旋转镜、光电转换器、耦合器、环形器、相位调制器、偏振控制器、延迟线圈和信号处理几部分组成。

此干涉仪的两束干涉光传播路径分别是:

- 1) A—B—D—FRM—D—C—A
- 2) A—C—D—FRM—D—B—A

这两条路径传播的光经过泄漏点的时间不同,但在光路中传播经过的路径长度却是相同的,符合 Sagnac 干涉仪零光程差特点。

此结构中还包含另外两束光:

- 3) A—B—D—FRM—D—B—A
- 4) A—C—D—FRM—D—C—A

但这两束光与路径 1, 路径 2 以及这两束光间均不满足零光程差的特点,因此不会发生干涉。

利用此系统进行管道泄漏检测的原理是,当流体泄漏后,流体与漏孔壁会产生摩擦,从而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,导致光纤中传播的导光相位被调制,其表达式为

$$\Delta\phi = \beta\Delta L + L\Delta\beta, \tag{1}$$

式中  $\Delta\phi$  为光波的相位变化幅值,  $\beta$  为光波在光纤中的传播常数,  $L$  为受到管道泄漏噪声作用的光纤长度。

两束相干光都经过泄漏点, 因此均被泄漏声场调制, 两束光的输出表达式分别为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_1 &= E_{10} \exp\{j[\omega_c t + \theta_1(t) + \varphi_1]\}, \\ \mathbf{E}_2 &= E_{20} \exp\{j[\omega_c t + \theta_2(t) + \varphi_2]\}, \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $E_{10}$  和  $E_{20}$  分别为两束光的振幅(当耦合器的分光比为 1:1 时,  $E_{10} = E_{20}$ ),  $\omega_c$  为光波角频率,  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  分别为两束光的初始相位。

两束光输出的光强为

$$I = (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2) \cdot (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2)^*, \quad (3)$$

其中干涉项为

$$I_{12} = \text{Re}(\mathbf{E}_1 \mathbf{E}_2^*) = E_{10}^2 \cos[\theta_1(t) - \theta_2(t) + \varphi_1 - \varphi_2]. \quad (4)$$

泄漏信号是宽频信号<sup>[8]</sup>, 其作用到传感光纤上, 对光纤中传播的光相位调制, 光波经泄漏信号调制的相位变化为<sup>[6]</sup>  $\Delta\phi \sin\omega_s t$  ( $\omega_s$  为泄漏信号的频率)。

第一路径传播的光经调制的相位变化为

$$\theta_1(t) = \Delta\phi \sin\omega_s(t - \tau_1) + \Delta\phi \sin\omega_s(t - \tau_2), \quad (5)$$

式中  $\tau_1$  为光从 A 点经 B, D 第一次传播到泄漏点的时间,  $\tau_2$  为光从 A 点经 B, D 传播到法拉第旋转镜, 又经法拉第旋转镜反射后, 传播到泄漏点的时间。

第二路径传播的光经调制的相位变化为

$$\theta_2(t) = \Delta\phi \sin\omega_s(t - \tau_3) + \Delta\phi \sin\omega_s(t - \tau_4), \quad (6)$$

式中  $\tau_3$  为光从 A 点经 B, C 第一次传播到泄漏点的时间,  $\tau_4$  为光从 A 点经 B, C 传播到法拉第旋转镜, 又经法拉第旋转镜反射后, 传播到泄漏点的时间。

两束相干光调制后产生的相位差

$$\Delta\theta(t) = \theta_1(t) - \theta_2(t) = 4\Delta\phi \sin\omega_s \left( \frac{\tau_d}{2} \right) \cos(\omega_s \tau_s) \cos\omega_s \left( \tau - \frac{\tau_T}{2} \right), \quad (7)$$

此相位差包含了时间信息和泄漏声发射信号的频率信息, 其中  $\tau_d = [(\tau_3 + \tau_4) - (\tau_1 + \tau_2)]/2$ , 为光经过延迟线圈所需的时间,  $\tau_s = [(\tau_4 - \tau_3) + (\tau_2 - \tau_1)]/4 = ns/v$  ( $s$  为泄漏位置到法拉第旋转镜的距离,  $v$  为光在空气中的传播速度,  $n$  为光纤的折射率), 为光从泄漏位置到法拉第旋转镜所需时间,  $\tau_T = \tau_2 + \tau_3$ , 为光经路径 1 或路径 2 传播所用的总时间, 因此传感器确定后, 此值为定值。

式(7)中  $\sin\omega_s(\tau_d/2)$  项将影响传感器的信噪比, 如果  $\sin\omega_s(\tau_d/2)$  值较小, 相位差  $\Delta\theta(t)$  也较小, 即信号较弱, 容易淹没于噪声中。因此研制传感器时, 要选择合适的延迟光纤长度, 使  $\sin\omega_s(\tau_d/2)$  在

泄漏信号的宽频范围内保持较大值, 可提高系统的信噪比。

通过信号解调技术<sup>[9,10]</sup> 可将相位差  $\Delta\theta(t)$  从干涉信号中解调出来。

### 3 管道泄漏位置的确定方法

管道泄漏定位技术是管道泄漏检测的主要目的, 因此实现泄漏点定位是分布式光纤传感技术的关键所在。对泄漏信号进行频域分析, 当泄漏发生后, 在泄漏信号的宽频范围内会出现某些频率使  $\cos(\omega_s \tau_s) = 0$  (称为零点频率), 即

$$\omega_s \tau_s = N\pi/2, \quad (8)$$

式中  $N$  为奇数。

可以注意到, 对于确定的  $\tau_s$  将有一个或多个  $\omega_s$  使  $\omega_s \tau_s = N\pi/2$ , 取  $N = 1$ 。

由式(8)求得  $\tau_s$  后, 根据公式

$$s = \frac{v\tau_s}{n}, \quad (9)$$

计算出  $s$ , 即确定泄漏位置。

## 4 实验研究

### 4.1 管道泄漏检测实验

在实验室条件下进行了管道泄漏模拟实验, 实验装置如图 3 所示。管道长 700 mm, 外径 74 mm, 壁厚 6 mm, 距管道左端 A 为 150 mm 处开有一直径为 3.5 mm 的泄漏孔, 通过水泵给管道加入一定压力的水。使用康宁 (Corning) 单模光纤作为传感光纤, 纤芯折射率  $n = 1.5$ , 泄漏点距法拉第旋转镜的距离为 4.020 km, 延迟线圈长 4 km, 函数发生器施加于相位调制器的载波信号频率为 92 kHz, 幅值为 2 V。

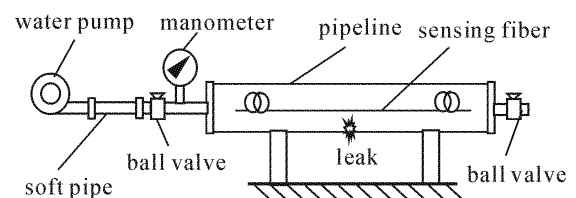


图 3 管道泄漏检测装置示意图

Fig. 3 Diagram of pipeline leak detection equipment

检测系统的宽带光源中心波长为 1550 nm, 带宽为 30 nm, 功率为 20 mW。光电转换器为美国 NEW FOCUS 公司的 1811 型光电转换器。利用 NI 的数据采集卡和 LabVIEW 软件对检测信号进

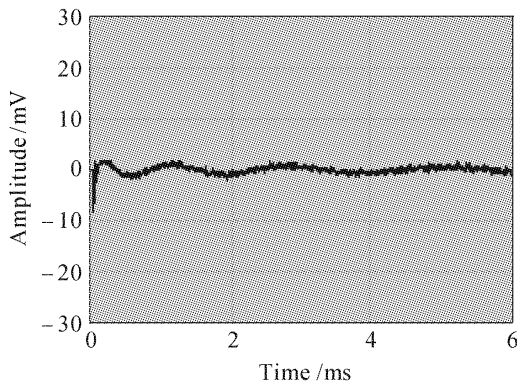


图4 背景噪声信号

Fig. 4 Background noise signal

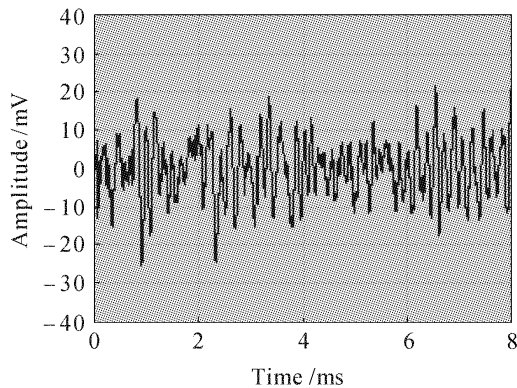


图5 泄漏信号

Fig. 5 Leakage signal

行采集和分析<sup>[9]</sup>。图4和图5分别是背景噪声信号和管道压力为0.4 MPa时的泄漏信号。从图中可以发现,0.4 MPa压力下的泄漏信号明显大于背景噪声信号,因此通过时域信号的幅值变化即可判断是否有泄漏发生。

## 4.2 泄漏点定位实验

检测管道有无发生泄漏并不是最终目的,能快速准确地定位泄漏点的位置是泄漏检测的最终目的。为了定位泄漏点,根据式(7)对图5的泄漏信号作快速傅里叶变换(FFT),得到如图6所示的结果,

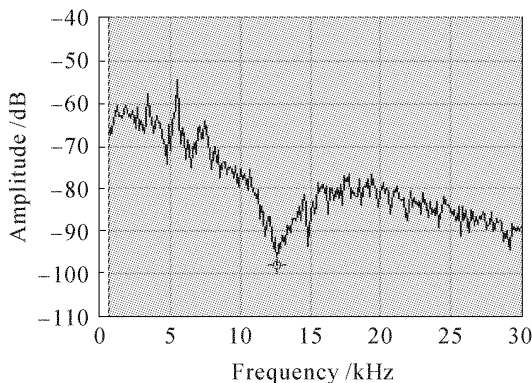


图6 零点频率图

Fig. 6 Diagram of null spectrum

在12.5 kHz附近有明显的波谷,此波谷对应的最低点即为所求的零点频率,光标显示的数值是12.573 kHz。根据式(9),可以获得泄漏点至法拉第旋转镜的距离为3.9768 km,绝对误差为-43.2 m,相对误差为1.07%。

为了验证此传感器的定位精度,在泄漏位置为4.020 km时,重复做了15次实验,实验数据如表1,从表1中可以发现,最小定位误差为4.3 m,最大定位误差为118.9 m,此结果与文献[11]利用基于压电传感器信号特征的管道泄漏检测方法给出的120 m的定位误差相当。

根据表1给出的测量数据计算可得,测量数据的均值为3978.0 m,与实际值(4020.0 m)的绝对误差为42.0 m,相对误差约为1%。这说明研制的传感器的系统误差较小,无需修正,可满足测试要求。而计算后得到的标准差为 $\sigma = 48.4$  m,如果按0.95的置信率计算<sup>[12]</sup>,则泄漏点定位误差的波动范围为 $\pm 94.4$  m,即测量数据落在 $3978.9 \pm 94.4$  m范围内的概率为95%,在长距离管道泄漏检测中,这个误差范围完全满足实际工程需要。

表1 实际泄漏位置为4.020 km的实验数据

Table 1 Experimental data with leak point at 4.020 km

	Leak point /m	Error /m		Leak point /m	Error /m
1	3986.6	-33.4	9	4015.7	-4.3
2	4015.7	-4.3	10	3901.1	-118.9
3	4055.5	35.5	11	4055.5	35.5
4	3901.1	-118.9	12	3938.6	-81.4
5	3976.8	-43.2	13	3976.8	-43.2
6	3938.6	-81.4	14	3976.8	-43.2
7	4015.7	-4.3	15	3938.6	-81.4
8	3976.8	-43.2			

传感器的检测能力也是十分重要的评价指标,分别对3.5 mm,3.0 mm,2.5 mm,2.0 mm和1.0 mm 5种泄漏孔径的管道进行了泄漏定位实验,当压力为0.3 MPa时,可实现对孔径为3.5 mm,3.0 mm,2.5 mm和2.0 mm的泄漏点进行较为准确的定位。但泄漏孔径为1.0 mm时,由于信号太弱,从零点频率图中已不能确定泄漏点的位置,因此,在0.3 MPa压力下,研制的传感器最小可实现孔径为2.0 mm的泄漏定位。

## 5 结论

基于 Sagnac 干涉仪原理的直线型分布式光纤

传感器通过法拉第旋转镜解决了传统 Sagnac 干涉仪结构上的不足,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。此传感技术的检测能力较传统的基于压电传感器的泄漏检测方法有了明显提高,在实验室情况下,最小可对孔径为2.0 mm 的泄漏点进行定位,这是非常重要的,解决了长期困扰人们的长距离管道小泄漏检测问题。实验中还发现,延迟线圈长度、光偏振态、光强等对传感器影响很大,优化传感器的影响因素能提高检测能力和定位精度。

### 参 考 文 献

- Zhang Buyue, Wang Guizeng, Liu Jidong *et al.*. A Survey on methods of leak detection and location for oil pipelines [J]. *Journal of Shanghai Maritime University*, 2001, **22**(3):13~17  
张布悦,王桂增,刘吉东等. 输油管线泄漏检测和定位技术综述[J]. 上海海运学院学报, 2001, **22**(3):13~17
- Song Muping, Zhao Bin, Zhang Xianmin. Brillouin optical time domain analysis distributed optic-fiber sensor based on microwave electrooptic modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8):1053~1056  
宋牟平,赵斌,章献民. 基于微波电光调制的布里渊光时域分析传感器[J]. 光学学报, 2005, **25**(8):1053~1056
- Jianzhong Gao, Zhuangde Jiang, Yulong Zhao *et al.*. Full distributed fiber optical sensor for intrusion detection in application to buried pipelines [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(11):633~635
- T. G. Giallorenzi, J. A. Bucaro, A. Dandridge *et al.*. Optical fiber sensor technology [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1982, **QE-18**(4):626~665
- Zhou Yan, Jin Shijiu, Zhang Yunchao *et al.*. Study on the distributed optical fiber sensing technology for pipeline leakage detection [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2005, **16**(8):935~938  
周琰,靳世久,张响超等. 管道泄漏检测分布式光纤传感技术研究[J]. 光电子·激光, 2005, **16**(8):935~938
- J. P. Kurmer, S. A. Kingsley, J. S. Laudo *et al.*. Distributed fiber optic acoustic sensor for leak detection [C]. *SPIE*, 1991, **1586**:117~128
- Li Zhineng, Shen Liang, Ye Xianfeng. Study of polarization-insensitive fiber optic michelson interferometric sensors [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2002, **36**(1):44~46  
李志能,沈梁,叶险峰. 偏振无关的 Michelson 光纤传感器的研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2002, **36**(1):44~46
- W. A. Wassef, M. N. Bassim, M. Houssny-Emam *et al.*. Acoustic emission spectra due to leaks from circular holes and rectangular slits [J]. *J. Acoustical Society of America*, 1985, **77**(3):916~923
- He Cunfu, Hang Lijun, Wu Bin. Application of homodyne demodulation system in fiber optic sensors using phase generated carrier based on LabVIEW in pipeline leakage detection [C]. *SPIE*, 2006, **6150**:61502G-1~61502G-6
- Kuang Wu, Zhang Min, Wang Liwei *et al.*. Data acquisition method for digital phase generated carrier demodulation system of optical fiber inerferometers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(8):1086~1090  
匡武,张敏,王利威等. 光纤干涉仪数字相位生成载波解调系统数据采集单元设计[J]. 中国激光, 2005, **32**(8):1086~1090
- Lin Weiguo, Zheng Zhishou. Research on pipeline leak detection based on dynamic pressure signal [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, **27**(8):907~910  
林伟国,郑志受. 基于动态压力信号的管道泄漏检测技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, **27**(8):907~910
- Shen Jiuheng. Mechanical Engineering Testing Technique [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1991. 244~245  
沈久珩. 机械工程测试技术[M]. 北京:冶金工业出版社, 1991. 244~245