

干涉分布式光纤水下长输气管道泄漏检测系统设计

胡正松 杨其华 乔波

(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-曾德尔和萨尼亚克混合干涉仪原理的分布式光纤干涉测量架构,可实时对管道进行泄漏检测和定位。阐述了该架构的检测原理和泄漏点的定位方法,并利用小波变换算法对采集的泄漏信号进行分析处理。对全长为 3.994 km 的感测光纤进行了管道泄漏检测实验并重复做了 10 次测试实验。实验结果表明,该系统运行稳定且泄漏检测的最大相对定位误差为 1.47%。

关键词 测量;干涉法;混合干涉仪;泄漏检测;长输气管道

中图分类号 TE973 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.070602

Design of Interference Distributed Fiber-Optic Underwater Long Gas Pipeline Leakage Detection System

Hu Zhengsong Yang Qihua Qiao Bo

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

Abstract A new measuring structure based on the principle of Sagnac and Mach-Zehnder mixed distributed fiber-optic interferometer is proposed. The structure can detect pipeline leakage and locate leakage point in real-time. The leakage measuring principle and leakage positioning method for the structure are described, and the wavelet transform algorithm is used to analyze the acquisition of the leakage signals. The pipeline leakage detection experiment is carried out for the length of 3.994 km of the fiber-optic sensor, and the test experiments are repeated 10 times. The experimental results show that the system is stable and the maximum relative positioning error is 1.47%.

Key words measurement; interferometry; mixed interferometer; leakage detection; long gas pipeline

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 120.3180; 120.5060

1 引言

近年来出现一种新的利用分布式光纤传感技术对长输气管道进行健康监测的检测方法,主要包括反射法和干涉法。基于光时域反射(OTDR)法的分布式光纤传感技术主要包括瑞利、拉曼和布里渊散射。就系统本身来说,基于 OTDR 技术的光纤传感系统的设计过于复杂,性价比较低,不适用于长距离输气管线的泄漏状况监测^[1]。基于马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪原理的检测系统,其缺点是感测臂与参考臂必须等长,参考臂光纤须作隔离,且光源须使用同调长度较长的光源。基于萨尼亚克干涉仪原理的检测系统,其缺点是定位距离短、需要屏蔽光纤、需求出绝对相位、无抗偏振衰落能力和后续处理复杂等。目前,一些经过改进的马赫-曾德尔干涉仪和萨尼亚克干涉仪以及混合型干涉仪在一定程度上提高了检测性能,在埋地管道的检测中也发挥了一定的作用^[2~4]。本文构造马赫-曾德尔和萨尼亚克混合型干涉分布式光纤测量架构,以共轴光路形式,结合相位生成载波(PGC)解调、数字信号处理(DSP)以及 3G 无线传输技术实现对海底管道整个运行期间安全状况的实时监测,管道泄漏检测实验表明,可以有效地检测到泄漏信号,并能准确实现泄漏点定位。

收稿日期: 2012-03-14; **收到修改稿日期**: 2012-04-16; **网络出版日期**: 2012-05-16

基金项目: 国家自然科学基金(60902095)、科技部质检行业公益性科研专项(201110058)和浙江省自然科学基金(Y1090672)资助课题。

作者简介: 胡正松(1987—),男,硕士研究生,主要从事检测技术方面的研究。E-mail: woxindong0203@163.com

导师简介: 杨其华(1962—),男,硕士,教授,主要从事检测技术方面的研究。E-mail: 000066@cjlu.edu.cn(通信联系人)

2 泄漏检测系统设计

2.1 光纤测量架构

如图 1 所示,系统采用马赫-曾德尔和萨尼亚克混合干涉型分布式光纤测量架构,包括光源、光环行器(CIR)、延迟光纤、感测光纤、光耦合器(OC)、法拉第旋转镜、光相位调制器和光电探测器(PD)组成。由光源产生激光经由光环行器进入 1×2 耦合器 OC_1 ,光信号被分成耦合比为 50:50 的两路信号,沿图 2 所示的光路径传播,最终在 OC_1 进行耦合后通过光环行器进入光电探测器被转换为电信号。与 Huang^[8] 提出的测量架构相比,本系统的测量架构做了如下改进:在光源与耦合器 OC_1 之间加入光环行器,其作用是避免返回的光进入激光器,对激光器造成损坏;耦合器 OC_1 采用 1×2 耦合器替代原结构的 2×2 耦合器,目的是减少一路光信号的损失并简化系统结构。

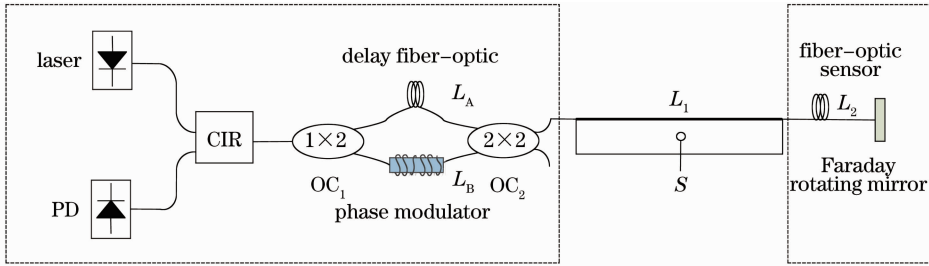


图 1 混合分布式光纤测量架构

Fig. 1 Mixed distributed fiber-optic measure structure

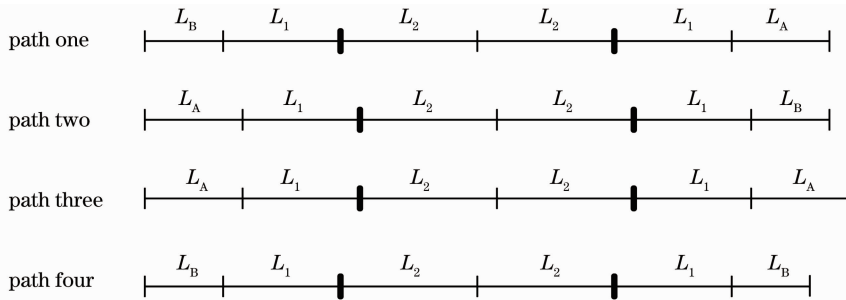


图 2 光传播路径

Fig. 2 Optical propagation paths

2.2 光纤测量原理

当管道沿线 S 处发生泄漏时,泄漏流体与泄漏孔壁的摩擦会在管壁上产生应力波,此应力波会对铺设在管壁上的感测光纤产生扰动,通过感测光纤的应力应变效应对光纤中传输的光信号的相位进行调制,延迟光纤的存在使沿两个光路径传输的光信号通过泄漏点 S 的时间不同,泄漏场对两个光路径的光信号的相位调制也不同。图 2 中只有路径 1、2 满足零光程差条件,在耦合时将发生干涉。

图 2 中, L_1 为耦合器 OC_2 到泄漏点 S 的光纤长度, L_2 为泄漏点距离法拉第旋转镜的光纤长度, L_A 为延迟光纤的长度, L_B 为相位调制器光纤的长度。 L_A 的选择对零点频率的辨识至关重要,为了达到零点频率良好辨识的效果,本文选择的延迟光纤长度为 2 km。为了使路径 3、4 的光不会对路径 1、2 的两束干涉光产生干扰,必须使 L_A 和 L_B 的长度存在明显的差异,即 $L_A \gg L_B$ ^[5]。

由于管道的泄漏会对光纤产生扰动,影响光纤的直径、长度、折射率等参数,从而会对光纤内的光信号相位产生影响^[6,7],其表达式为

$$\Delta\phi = \Delta\phi_L + \Delta\phi_n + \Delta\phi_D, \quad (1)$$

式中 $\Delta\phi$ 为光波的相位变化, $\Delta\phi_L$ 表示光纤长度变化引起的相位延迟, $\Delta\phi_n$ 表示光纤折射率变化引起的相位延迟, $\Delta\phi_D$ 表示光纤芯径变化引起的相位延迟。

如图 1 中一臂上装有相位调制器,将高频载波信号调制到光路中,则可以得到光路径 1、2 的干涉项表达式^[8]

$$I_0 = \cos[4\phi_s \cos \omega_s \left(t - \frac{\tau_T}{2}\right) \sin \omega_s \left(\frac{\tau_A}{2}\right) \cos \omega_s \tau_s + \phi'_m \cos \omega_m t'], \quad (2)$$

式中 ϕ_s 为泄漏点相位信号的振幅, ω_s 为泄漏点的角频率, τ_T 为光通过整个光路所需的时间, τ_A 为光通过延迟光纤所需的时间, τ_s 为光从泄漏点传播到法拉第旋转镜所需的时间, ϕ'_m 为调制信号幅度, $t' = t - \frac{\tau_T}{2}$ 。

利用 PGC 解调电路进行解调, 得到输出干涉信号的表达式为

$$\phi_x(t) = 4\phi_s \cos \omega_s \left(t - \frac{\tau_T}{2}\right) \sin \omega_s \left(\frac{\tau_A}{2}\right) \cos \omega_s \tau_s. \quad (3)$$

(3)式 3 个函数项中, $\cos \omega_s \left(t - \frac{\tau_T}{2}\right)$ 为时域信号, 其他两项与时间无关。对(3)式做快速傅里叶变换, 得到该相位信号频谱。在 0~50 kHz 的泄漏信号带宽范围内^[9], 信号频谱会出现一些含有泄漏点位置信息的零点频率。在零点频率处有

$$\cos \omega_s \tau_s = 0, \quad (4)$$

则可知

$$\omega_s \tau_s = \frac{(2k+1)\pi}{2} (k = 0, 1, 2, \dots). \quad (5)$$

取 $k=1$, 即取第一个零点频率值, 可得

$$L_s = \frac{c}{4nf_s}, \quad (6)$$

式中 c 为光速, n 为光纤纤芯的折射率, f_s 为零点频率值, L_s 为泄漏点与法拉第旋转镜之间的距离。由频谱图的第一个零点频率值可得到泄漏点位置, 从而实现对泄漏点的定位。

2.3 信号处理模块

目前, 管道检测技术通常采用模拟信号处理电路, 该电路设计复杂, 接线困难, 不易调试; 在信号处理和传输过程中, 可能引入新的噪声, 这些噪声与有用信号相混叠被传输、放大, 形成噪声积累且难以分离, 不利于检测^[10]。同时, 现有分布式光纤管道泄漏检测系统通常是将现场采集的数据有线传输给远端控制中心进行信号分析处理, 此种系统结构复杂, 成本大, 有效信号在长距离传输中有所损耗并会引入外界噪声, 影响检测系统的定位精度。

针对以上情况, 结合数字信号抗干扰能力强、在信号处理和传输过程中无噪声积累的特点, 利用支持高速数据传输的 3G 技术, 本系统采用数字信号处理电路, 通过 3G 模块将处理后的数据传送给监控远端。该设计可以有效抑制噪声对检测信号的影响, 增大信号的信噪比, 从而提高检测系统的定位精度, 且降低海量数据传输的系统功耗。

本系统信号处理模块包括电源管理、电平转换模块、核心模块、接口通信模块和 DDS 波形产生模块; 核心模块包括主控制器 DSP28335、复位电路、JTAG 接口、外扩 FLASH 和 SRAM; 接口通信模块包括 3G 通信模块、USB 接口和串口。DDS 波形产生模块生成两路频率可调的正弦波形用于相位调制器的调制和 PGC 电路的信号混频, 简化了系统结构并降低了成本。

3 实验研究

3.1 实验装置和条件

在实验室条件下进行模拟管道泄漏检测实验, 管道泄漏检测装置如图 3 所示。管道长 1.2 m, 外径 44 mm, 壁厚 3 mm, 管道中部开设有一直径为 2.5 mm 的小孔用于模拟泄漏孔, 通过空压机产生高压气体输送给管道, 利用设置在管道两端的减压阀使管内气压保持在 0.8 MPa。检测系统光源采用中心波长为 1550 nm, 功率 20 mW 的分布式反馈(DFB)激光器, 感测光纤为纤芯

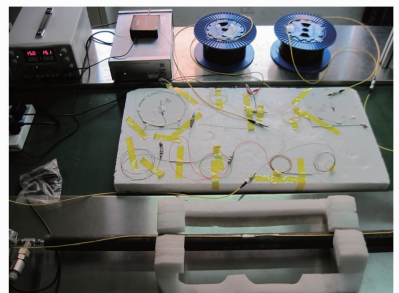


图 3 管道泄漏检测装置实物图

Fig. 3 Physical diagram of pipeline leakage detection setup

折射率为 1.458 的康宁单模光纤,光电探测器为 PIN 型光电探测器。实验时利用相位调制器将 195.51 kHz 的正弦波调制到干涉光路中,泄漏点距离法拉第旋转镜 3994 m,延迟光纤长度为 2 km。

3.2 实验结果分析

管道泄漏信号是非线性、微小的宽频信号且检测环境中存在大量背景噪声。图 4 是经过 PGC 解调后的泄漏信号频谱,频谱中含有较多的高频噪声,无法进行零点频率的辨识,须对采集信号进行降噪处理,以提高零点频率的辨识性。由于小波变换具有时域和频域上局部性、多分辨分析、低熵性等特性,非常适用于管道泄漏信号的分析 and 处理。

由小波变换原理^[11]可知,对任意信号 $x(t) \in L^2(R)$,其小波变换定义为

$$W_x(a,b) = \langle x(t), \psi_{a,b}(t) \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{\mathbb{R}} x(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt, \quad (7)$$

式中 a 为伸缩因子, b 为平移因子, $\psi_{a,b}(t)$ 被称为依赖于参数 a,b 的小波基函数, $\psi_{a,b}^*(t)$ 为 $\psi_{a,b}(t)$ 的共轭;符号 $\langle \cdot \rangle$ 表示内积。

在实际应用中^[12],小波变换须加以离散化,连续小波变换中伸缩因子 a 和平移因子 b 的离散化公式分别取作 $a = a_0^j$; $b = ka_0^j b_0$; a_0, b_0 为大于 0 的实常数; j, k 为整数。

通常进一步取常数为 $a_0 = 2, b_0 = 1$; 则离散后的二进制小波变换为

$$W_x(j,k) = \langle x(t), \psi_{j,k}(t) \rangle = 2^{-j/2} \int_{\mathbb{R}} x(t) \psi^*(2^{-j}t - k) dt. \quad (8)$$

为了消除干扰噪声,对泄漏声场采集到的信号在快速傅里叶变换基础上采用小波变换进行消噪处理。选用 sym5 小波,对信号分解到第 5 层,并选择极大极小阈值进行处理,重构近似系数得到图 5。将图 4 与图 5 进行对比,可以看出,经过小波消噪后,大部分噪声信号被去除,因而有效地提高了零点频率的辨识性。

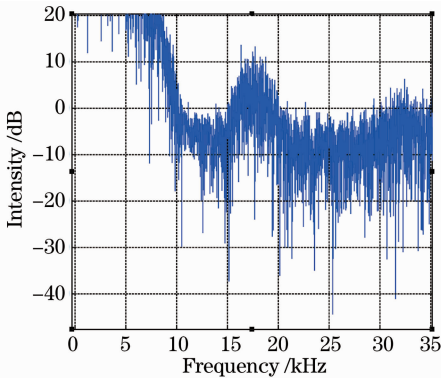


图 4 小波消噪前的零点频率谱

Fig. 4 Null spectrum before wavelet denoising

图 6 为曲线拟合后的频谱图,零点频率为拟合曲线最小点 A 的频率,值为 12.935 kHz,根据(6)式可获得泄漏点距离法拉第旋转镜为 3976.8 m,绝对误差为 17.2 m,相对误差为 0.43%。从以上实验结果可以看出,本文所设计的干涉分布式水下长输气管道泄漏检测系统具有较高的定位精度。

为了验证测量系统架构的稳定性,在泄漏点距离法拉第旋转镜为 3.994 km 处重复做了 10 次实验,实验数据如表 1 所示。从表中可以发现,10 次实验当中测得的泄漏都在 3.994 km 附近,最大相对误差为 1.47%,与实际值比较贴近。

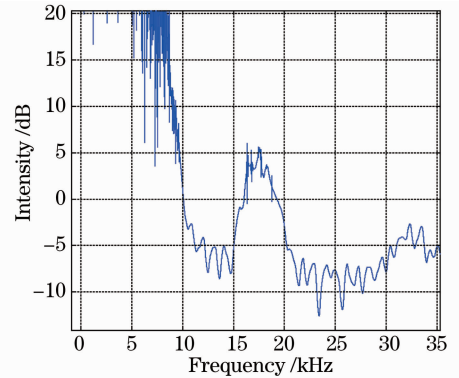


图 5 小波消噪后的零点频率谱

Fig. 5 Null spectrum after wavelet denoising

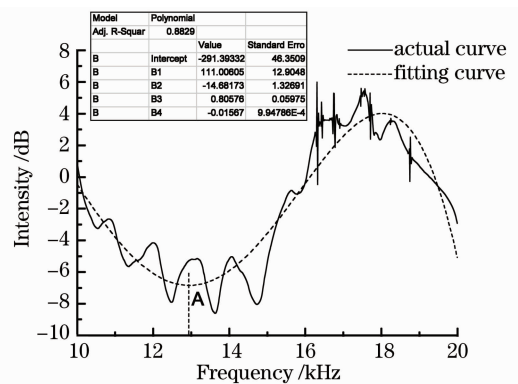


图 6 曲线拟合后的零点频率谱

Fig. 6 Null spectrum after curve fitting

表1 实际泄漏位置为 3.994 km 的实验数据

Table 1 Experimental data with actual leakage location at 3.994 km

Test number	Leakage point location /m	Error /m	Relative error /%
1	4018.8	24.8	0.62
2	4052.7	58.7	1.47
3	3974.7	-19.3	0.48
4	4016.6	22.6	0.57
5	3944.8	-49.2	1.23
6	3943.3	-50.7	1.27
7	3967.6	-36.4	0.91
8	3976.5	-17.5	0.44
9	3974.7	-19.3	0.48
10	4019.7	25.7	0.64

4 结 论

基于干涉分布式光纤的水下长输气管道泄漏检测系统,能够快速、有效地实现管道泄漏检测,通过小波变换消噪可以有效改善零点频率的辨识度,提高检测系统的定位精度。理论分析与实验结果表明,本文采用的干涉分布式水下长输气管道泄漏检测系统结构简单、易于布放,系统运行稳定且具有较高的定位精度,这为实现水下长输气管道泄漏健康监测提供了较好的研究基础。

参 考 文 献

- 1 Qizhen Sun, Deming Liu, Jian Wang *et al.*. Distributed fiber-optic vibration sensor using a ring Mach-Zehnder interferometer[J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(6): 1538~1544
- 2 Lin Wu-wen. Novel distributed fiber optic leak detection system[J]. *Opt. Engng.*, 2004, **43**(2): 278~279
- 3 Zhou Yan, Jin Shijiu, Zhang Yunchao *et al.*. Distributed optical fiber sensing technology for pipeline leakage detection and location[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2006, **27**(2): 121~124
周 琰, 靳世久, 张昀超 等. 分布式光纤管道泄漏检测和定位技术[J]. *石油学报*, 2006, **27**(2): 121~124
- 4 A. A. Chtcherbakov, P. L. Swart, S. J. Spammer *et al.*. Modified Sagnac/Mach-Zehnder interferometer for distributed disturbance sensing[J]. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, 1999, **20**(1): 34~36
- 5 Qiao Bo, Yang Qihua, Wang Qiang. Simulation analysis of improved interference distributed fiber-optic underwater gas pipeline leak detection[J]. *Journal of China Jiliang University*, 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
- 6 Tan Jing, Chen Weimin, Wu Jun *et al.*. Study on long distance pipeline destruction alarm technology based on Sagnac/Mach-Zehnder interferometers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(1): 67~72
谭 靖, 陈伟民, 吴 俊 等. 基于萨格奈克/马赫-曾德尔干涉原理的长途管道破坏预警技术研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(1): 67~72
- 7 Meng Ke. Optical Fiber Interference Measuring Technology[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2006. 44~45
孟 克. 光纤干涉测量技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006. 44~45
- 8 Huang Shih-chu, Lin Wu-wen, Tsai Meng-tsan. Fiber optic in-line distributed sensor for detection and localization of the pipeline leaks[J]. *Sensors and Actuators A*, 2007, **135**(2): 570~579
- 9 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. Acoust. Soc. Am.*, 1985, **77**(3): 916~923
- 10 Chen Kun. The Study and Application of DSP Technology for Pipeline Inspection[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009. 5~8
陈 琨. DSP 信号处理技术在管道检测中的研究与应用[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009. 5~8
- 11 Liu Shouxian, Li Zeren, Wu Jianron *et al.*. Signal processing of displacement interferometer based on the continuous wavelet transform[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1235~1239
刘寿先, 李泽仁, 吴建荣 等. 基于连续小波变换的瞬态位移干涉仪信号处理[J]. *中国激光*, 2008, **35**(8): 1235~1239
- 12 Hua Weiling, Ma Dongtang, Wei Jibo. APD signal detecting method based on wavelet transform[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(4): 465~468
华卫令, 马东堂, 魏急波. 基于小波变换的雪崩光电二极管信号检测方法[J]. *中国激光*, 2004, **31**(4): 465~468