

·测试、试验与仿真·

基于OTDR分布式光纤的海底管道安全检测

姜楠, 衣文索

(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130000)

摘要:提出了一种基于OTDR的分布式光纤传感系统的海底管道安全检测技术,分析了检测系统的组成工作原理,阐述了检测系统定位结构和方法,通过注入脉冲与接收到的信号之间的时间延迟得到扰动的位置。理论分析和测试结果表明,该测试系统具有较高的稳定性和定位精度。

关键词:OTDR; 分布式光纤; 海底管道; 安全检测

中图分类号: TP212.4⁴

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2014)-06-0073-04

Submarine Pipeline Safety Inspection Based on OTDR Distributed Optical Fiber

JIANG Nan, YI Wen-suo

(College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130000, China)

Abstract: A kind of submarine pipeline safety inspection technology based on optical time domain reflection (OTDR) distributed optical fiber sensing system is proposed. The composition and operation principle of the system are analyzed. The positioning structure and the methods of the inspection system are described. The disturbance position is obtained through the time delay between injection pulse and received signals. Theoretical analysis and inspection results show that the inspection system has better stability and positioning precision.

Key words: optical time domain reflection (OTDR); distributed optical fiber; submarine pipeline; safety inspection

海底油气管道相对于陆地普通管道相比,其工作条件更恶劣,管内油气腐蚀,管外波流作用,海床运动,外物撞击等都增加了其运行的风险。现有的油气管道安全检测方法较多应用 Sagnac 光纤干涉仪原理检测法。这种检测法须将一固定光纤回路置于管道内作为检测泄漏信号的传感组件,在使用环境上不利于测试系统的维护,同时也有碍管内检测器的检测,不适用于海底油气长输管道的安全检测。而且由于 Sagnac 光纤干涉仪原理检测法容易受到信号干扰,所以稳定性不够,容易出现漏报,误报的情况^[1]。为了解决这些问题,文中提出了一种基于 OTDR(optical time domain reflectometer, 光时域

反射)的分布式光纤传感系统的海底管道安全检测技术。

OTDR 分布式光纤传感系统是将光纤敷设于管道外层,利用光纤激光器发射脉冲信号,采用对注入脉冲与接收到的信号之间的时间延迟分析得到扰动的位置^[2]。该检测系统敷设方便,易于检测和维护,能准确检测出海底油气输送管道沿线发生的管道泄漏、屈服力失效造成的管道变形等危害管道安全的事件,由于激光脉冲信号不受电磁波等因素的干扰,所以该系统可以对所发生的长距离的危害管道安全的事件进行精确定位,稳定性强。

收稿日期: 2014-11-17

作者简介: 姜楠(1988-),男,黑龙江佳木斯人,主要研究方向为智能结构系统与测量自动化。

1 系统组成及测量原理

1.1 系统的组成

实验系统结构框图如图1所示。光纤激光器发出的连续光经过调制器后产生光脉冲,光脉冲被EDFA(Er:fiber amplifier,掺铒光纤放大器)放大,由带通滤波器(包含光纤布拉格光栅的结构)滤除自发辐射光后通过一个3 dB的耦合器进入传感光纤,用带有前置运算放大和滤波功能的光电探测器探测后向瑞利散射光^[3],采用200 kHz的低通滤波器滤波,用采样率为40 MS/s的数据采集卡采集数据,并用Matlab进行数据处理,在人机界面上显示发生故障的具体位置,以及可能的故障原因。

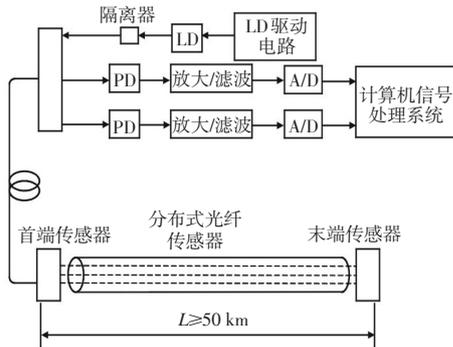
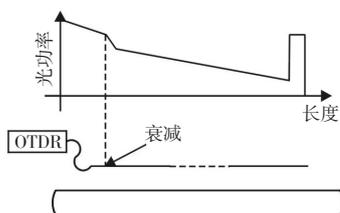


图1 系统结构图

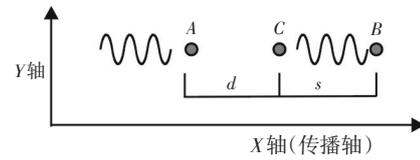
1.2 测量原理

首先要在海底管道的外层沿管道同沟铺设一条传感光纤,不断地向光纤中发射具有一定时间和功率的光脉冲波。当管道沿线存在泄漏等问题时,会引发振动信号,信号对光纤施加应力时,使传感光纤弯曲或断裂,散射光将在该处发生散射或端面反射,OTDR系统测得这些突变^[4]。利用这一特性,可通过对光纤输出光功率频谱以及相位变化的分析,判定油气管道是否有泄漏等事件的发生。用该方法获得光纤上各点的损耗特征、障碍点位置和光纤长度,即可确定管道泄漏的位置,如图2a所示。



(a)原理描述

假设光纤激光器发出的是连续的正弦波,如图2b所示。



(b)正弦波传播图

图2 测量原理图

A处和B处分别表示已调信号末端和前端两个正弦信号的位置。激光器产生B处的正弦信号,接着产生A处的正弦信号,假设时间间隔为 τ ,即 $\tau = (d + s) \times n / c$,其中, n 为光纤纤芯的折射率; c 为光速。如果A处和B处振动方程分别为

$$\begin{cases} f_A = \cos(\omega_A t) \\ f_B = \cos(\omega_B t) \end{cases} \quad (1)$$

A处的瑞利后向散射比在B处的瑞利后向散射先到达探测器,这样该处两点产生的瑞利后向散射不会产生相干干涉。而真正的干涉是由于A处的正弦波达到C处时产生的瑞利散射与B处的瑞利散射将会一起被探测器探测,即产生相干干涉^[5]。在满足条件 $d = s$ 的情况下,瑞利后向散射光振动方程分别为

$$\begin{cases} f'_A = K \cos(\omega_A t + \phi) \\ f'_B = K \cos(\omega_B t + \phi) \end{cases} \quad (2)$$

其中, K 和 ϕ 分别为后向散射光强系数和后向散射的附加相位。这样,返回到探测器时产生的干涉方程可以表示如下

$$\begin{aligned} f(t) &= f'_A(t) + f'_B(t) = \\ &= K \cos(\omega_A t + \phi) + K \cos(\omega_B t + \phi) = \\ &= 2K \cos\left(\frac{\omega_A t + \omega_B t}{2} + \phi\right) \cos\left(\frac{\omega_A t - \omega_B t}{2}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

上式在理想的情况下,可以认为任意 $\omega_A = \omega_B$,则有下式

$$\begin{aligned} f(t) &= 2K \cos(\omega_A t + \phi) = 2K \cos(\omega_B t + \phi) = \\ &= 2K \cos\left(\frac{\omega_A t + \omega_B t}{2} + \phi\right) \end{aligned} \quad (4)$$

即检测到的功率可以表示如下

$$W = \int f^2 dt = 2K^2 \quad (5)$$

在实际的应用中,激光器的频移是不能忽视的^[6]。如果激光器频率为线性漂移,漂移速率由 α 表示,则有下式

$$\begin{cases} f_A = f_B + \alpha\tau \\ \omega_A = 2\pi f_A \\ \omega_B = 2\pi f_B \end{cases} \quad (6)$$

代入式(4),在满足 $\alpha\tau \ll f_B$ 的情况下,可以得到

$$f(t) = 2K \cos[\pi(2f_B + \alpha\tau)t + \phi] \cos(\pi\alpha\tau \times t) \approx 2K \cos[2\pi f_B t + \phi] \cos(\pi\alpha\tau \times t) \quad (7)$$

如果 $\alpha\tau$ 尽可能的小,式(7)和式(4)相同。然而当激光器频移速率相对较快的情况下,可以看出,当激光器的频移速率 $\alpha = 1 \text{ MHz}$, $\tau = 1 \mu\text{s}$,则

$$f(t) \approx 2K \cos[2\pi f_B t + \phi] \cos(\pi t) \quad (8)$$

从上式可以看出,光功率将发生较快的变化,为了避免这一不利因素,实验中要尽量采用频率漂移速率较低的激光器。所以,采用窄线宽、大功率的光纤激光器在 OTDR 技术中是必须的^[7]。

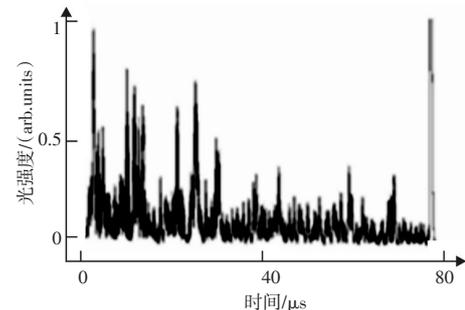
2 实验过程及结果

光纤激光器的工作波长为 1550 nm (EDFA 信号增益波长范围可覆盖 C 波段,增益系数很高且该波长光源在光纤中的损耗小,适合于长距离传输^[8],调制器的调制输入端是周期为 1 ms 的脉冲信号,光脉冲重复周期需满足大于光脉冲在光纤中传播的往返时间(1 ms 重复周期的脉冲信号对于待测光纤长度小于 100 km 都能满足该条件),以避免光脉冲在光纤中发生混叠,影响系统工作。光脉冲的宽度为 500 ns (占空比为 $1/2000$),对应于 40 m 的定位精度。

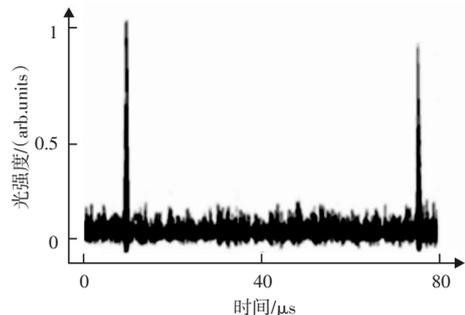
室内模拟实验中光纤的总长度为 16 km ,因 OTDR 系统极其敏感,故需采用一定的措施对光纤进行保护,以尽可能降低外界环境(如微扰和声波)对系统的影响^[9]。模拟实验中,将光纤放入厚度为 20 cm 的泡沫箱中,并在 2 km 和 14 km 位置处抽出大约 30 m 长的两段,放置于箱外作为传感部分,如图 3a 所示,当有微扰发生时(甚至于空气的流动)作用于传感光纤时,系统便能做出响应。

当受到强烈干扰时如图 3b 所示为在上述方案中,连续 80 条后向瑞利散射曲线的叠加图(末端的强反射是非涅耳散射)。假设 $x(i)$ 是 80 条散射曲线中的第 i 条,那么图 3b 就是对图 3a 中 80 条散射曲线做 $[x(i) - x(i-2)]/x(i)$ 处理后的叠加效果图。而除以 $x(i)$ 转换成相对坐标后,可以避免因后向瑞利散射曲线前后端功率相差过大带来的负面影响。从图 3b 可以明显看出,在 10 Ls 和 75 Ls 分别等价于

2 km 和 14 km 的位置有明显的峰值出现,信噪比约为 12 dB ^[10]。



(a)微弱干扰



(b)强烈干扰

图3 散射噪声图

3 结论

实验表明,基于 OTDR 的分布式光纤传感系统海底管道安全检测技术性能稳定,定位精度较高。该技术不仅适用流体输送管道的泄漏监测,而且可以对管道沿线所发生的危害管道事件进行预报警。另外,分布式光纤管道安全检测技术具有电绝缘性好、本质安全可靠、耐腐蚀等特点,这使它在油气输送管道等易燃、易爆环境中具有更广泛的应用前景。

参考文献

- [1] 王延年. 油气管道泄漏监测分布式光纤传感器的研究[J]. 西安交通大学学报, 2011(9).
- [2] 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.
- [3] 李建中. 分布式光纤传感及其在安防监测中的应用[J]. 光子学报, 2012, 38(11): 2789-2794.
- [4] 李志能, 沈梁, 叶险峰. 干涉型光纤传感器的分集消偏振衰落技术的信号处理[J]. 光电工程, 2002, 29(1): 55-58.

- [5] 周琰,靳世久.干涉型分布式光纤管道泄漏实时监测方法及装置[P]. 中国专利,200410020046.6,2007-3-7.
- [6] 周琰,靳世久.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.
- [7] 陈志刚,张来斌,王朝晖.基于分布式光纤传感器的输气管道泄漏检测方法[J]. 传感器与微系统,2007,26(7):108-110.
- [8] Thomas G Giallorenzi, Joseph Abucaro, Anthony Dan-
dridge. Optical fiber sensor technology[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1982,18(4):626-664.
- [9] Nye J F. Physical properties of crystals[M]. Oxford, England: Oxford Univ. Press, 1976.
- [10] Ferrier G A, Bao X. A new fitting method for spectral characterization of Brillouin-based distributed sensors[J]. Proc. SPIE,2003,5260:512-514.

(上接第6页)

- [14] 李林,安连生.计算机辅助光学设计的理论与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2002:214-228.
- [15] 李玉瑶.航空相机物镜的设计研究[D]. 长春:长春理工大学,2010.
- [16] 王效才.星体测量相机光学总体分析与系统设计[J]. 光学工程,1979(5):1-17.
- [17] 谢尔巴科夫.航空照相机的设计与计算[M]. 孙振洲,译. 长春:吉林省科技翻译协会,1985.
- [18] 李兴,安志勇.航空相机分辨率检测系统的总体方案[J]. 长春理工大学光电工程学院,2009(9).
- [19] 赵梅,周脉鱼,王芳荣,等.航空相机焦距CCD精密测量系统[J]. 吉林大学学报(信息科学版),2004,22(6):541-544.
- [20] 刘明,匡海鹏,吴宏圣,等.像移补偿技术综述[J]. 电光与控制,2004,11(4):46-49.
- [21] 李兴华.高分辨率空间摄影相机像移补偿控制技术研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2000.
- [22] 梁宜勇.基准离焦偏差控制技术[J]. 光电工程,2004,31(1):43-45.
- [23] 刘志明,戴明,陈黎,等.基于自动检焦信号梯度信息的自适应平滑算法研究[J]. 计算机测量与控制,2009,17(5):977-979.
- [24] Duplov R. Apochromatic telescope without anomalous dispersion glasses[J]. Appl Opt, 2006,45(21):5167-6164.
- [25] 杨守旺,龙科慧,周磊,等.航空相机调焦单元仿真系统的实时显示方法研究[J]. 液晶与显示,2009,24(5):740-745.
- [26] 王家骅,于平,颜昌翔,等.航天光学遥感器像移速度失计算数学模型[J]. 光学学报,2004,24(12):1585-1589.
- [27] 史光辉.卫星对地观测高分辨率光学系统和设计问题[J]. 光学精密工程,1999,7(1):16-20.
- [28] 李兴,安志勇.航空相机分辨率检测系统的总体方案[J]. 长春理工大学光电工程学院,2009(9).
- [29] 刘明,匡海鹏,吴宏圣,等.像移补偿技术综述[J]. 电光与控制,2004,11(4):46-49.

版权声明

本刊已成为《中国核心期刊(遴选)数据库》收录期刊、《中文科技期刊数据库》收录期刊、《中国期刊全文数据库》全文收录期刊、《中国学术期刊综合评价数据库》统计源期刊、美国《乌利希期刊指南》收录期刊,并加入中国光学期刊网,建立了《光电技术应用》期刊网站,所刊载的文章在国内外数据库检索机构及网站(包括纸板、光盘版、网络版)报道时,不再征求作者意见。稿件刊登后用作者著作权使用费与本刊稿酬一次性付给,并赠送当期样刊两份。