

•光电探测•

光纤传感技术在管道检测中的应用与发展

杨洋¹, 封皓², 王宗和¹, 沙洲², 王冠群¹, 贾志宁¹

(1. 承德石油高等专科学校 河北省仪器仪表工程技术研究中心, 河北 承德 067000; 2. 天津大学 测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300350)

摘要: 论述了国内利用 Sagnac 干涉仪系统、Mach-Zehnder 干涉仪系统、 Φ -OTDR 系统等分布式光纤振动传感系统在输运流体管道检测中的发展历程与应用现状。分析了不同测试系统在输油气、输水管道等应用领域的监测原理、应用特点, 阐述了分布式光纤传感技术在管道泄漏检测中的发展趋势。通过对当今国外该技术领域发展状况的分析, 得出了在 Sagnac 干涉仪系统、Mach-Zehnder 干涉仪系统技术领域国内具有一定的技术优势, 而在最前沿的 Φ -OTDR 系统的研究上国内外不相伯仲的现状。

关键词: Sagnac 干涉仪; Mach-Zehnder 干涉仪; Φ -OTDR; 管道流体泄漏检测

中图分类号: TP212.4

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2016)-06-0001-09

Application and Development of Distributed Optical Fiber Sensing Technology in Pipeline Detection

YANG Yang¹, FENG Hao², WANG Zong-he¹, SHA Zhou², WANG Guan-qun¹, JIA Zhi-ning¹

(1. Hebei Instrument & Meter Engineering Technology Research Center, Chengde Petroleum College, Chengde 067000, China;

2. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: The development and application of the distributed fiber-optic vibration sensing system such as Sagnac interferometer system, Mach-Zehnder interferometer system and phase-sensitive optical time-domain reflectometer (Φ -OTDR) system in transport fluid pipeline detection are introduced. The monitoring principle and application characteristics of different test systems in oil gas, water pipeline and other application areas are analyzed, and the development trend of the distributed fiber-optic sensing technology in pipeline leak detection is also described. Through the abroad development status analysis of the technology field, it is concluded that the domestic technology has certain advantages in the field of Sagnac interferometer system and Mach-Zehnder interferometer system. However, for the forefront of Φ -OTDR system the domestic and the abroad are at the same level.

Key words: Sagnac interferometer; Mach-Zehnder interferometer; Φ -OTDR; pipeline liquid leak detection

伴随光纤传感技术在不同应用领域的拓展, 分布式光纤传感技术在国内外获得快速的发展。先后在石油测井^[1]、煤矿冻结表土段温度监控^[2]、输油管道安全预警与管道泄漏检测^[3]、高压电缆在线监控等多个技术领域得到应用^[4]。由于这一技术集传感与传输于一体, 可以获得沿光纤分布被测量的连续信息, 因此对输油气、输水管道的监测具有特殊

的应用价值, 从而导致分布式光纤传感技术成为管道流体泄漏检测中领域的研究热点。在各类分布式光纤传感技术中, 先后出现了以迈克耳逊干涉仪为基础的测试系统^[5]、基于布里渊时域反射型(BOC-DA)测试系统^[6]、基于时域反射仪(OTDR)技术的测试系统^[7], 以及基于萨革奈克(Sagnac)干涉仪测试系统、基于马赫—曾德(Mach-Zehnder)干涉仪测试系

收稿日期: 2016-10-21

基金项目: 承德高新技术产业开发区创新基金支持项目(201421); 河北省科技计划资助项目(159676100D)

作者简介: 杨洋(1958-), 男, 博士, 教授, 长期从事光纤传感技术的研究工作。

统和基于相位敏感光时域反射仪(Φ -OTDR)测试系统等多种形态。但就应用广泛性和应用效果来看,后三类测试系统近年来已经逐渐成为国内外利用分布式光纤传感技术开展管道流体泄漏检测应用领域的主体,并依托各自的技术特点得到快速发展。

1 国内分布式光纤传感技术在管道流体泄漏检测中的应用状况

1.1 基于Sagnac光纤干涉仪传感系统

分布式光纤传感技术在管道泄漏检测中的应用最早是在20世纪90年代。1991年美国科学家Kurmer等人基于Sagnac光纤干涉仪原理在国际上率先搭建了管道流体泄漏检测定位系统^[8-9]。

基于Sagnac光纤干涉仪测试原理如下:系统中光源发出的光在途径1×2耦合器后被分成两束光,并分别沿Sagnac干涉仪光纤环的逆时针和顺时针两个方向传播,并经过图1所示的泄漏点。

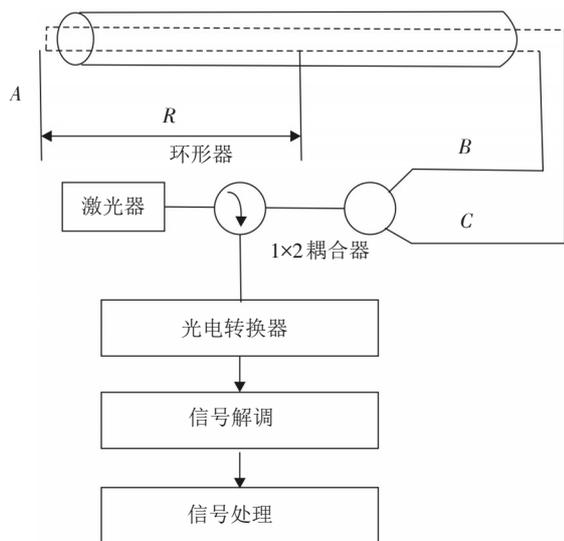


图1 基于Sagnac光纤干涉仪测试原理图

按照相关理论^[10],设泄漏点距光纤某一端的距离为 R ,光纤总长度为 L 。当 R 处出现泄漏时,光纤环内部两束顺、逆相向传播的光波从泄漏点传播到端点所产生的延迟时间差 τ_d 为

$$\tau_d = \frac{2nR}{c} \quad (1)$$

式中, n 为传输介质折射率; c 为光速。

管道出现泄漏时,光纤内部沿顺、逆时针传播的两束光因受到外界的扰动作用,被调制,并产生干涉。两束干涉光输出的基频分量 V_0 变为

$$V_0 = kJ_1(\xi)\sin\Delta\Phi \quad (2)$$

式中, k 为常数; $\Delta\Phi$ 为相位差; $J_1(\xi)$ 为一类一阶贝塞耳函数。

$$\xi = 2\Phi \sin \pi f_m \tau_d \quad (3)$$

式中, Φ 为调制幅度; f_m 为调制频率。

从式(3)看出,当 $\pi f_m \tau_d = \frac{\pi}{2}$ 时,基频分量为最大值,且此时调制频率 f_m 为零点频率,将这一结果代入式(1)式,可以得到

$$R = \frac{c}{4nf_m} \quad (4)$$

由式(4)可以看出,实验中只需测出零点频率 f_m 就可以确定泄露点的位置,从而实现定位的功能。

国内有关利用这一测试系统应用到天然气管道泄漏检测系统的最早报道是在本世纪初期。重庆大学、清华大学、北京工业大学、西安交通大学、复旦大学等先后围绕这一领域开展了多项研究工作,并取得多项研究成果。

按照所要解决的重点问题类型来区分,该技术领域发展经历了从新技术引进、实验测试系统结构优化、系统的测试精度提升与应用领域拓展等几个发展阶段。

第一发展阶段是新技术引进跟踪阶段。

西安交通大学胡志新等人于2003年,在国内率先报道了利用分布式光纤传感技术检测天然气管道泄漏的方案^[11],介绍Kurmer等人开发的Sagnac分布式光纤管道流体泄漏检测定位系统入手,对他们所开发的实验系统组成及系统的性能进行了分析和实验研究;2005年,清华大学孟庆尧等围绕国际上得到应用的干涉型光纤应变传感技术的发展状况,重点对基于Sagnac光纤干涉仪应用到管道流体泄漏检测定位的原理和特点做了深入的分析与探究^[12];2006年北京工业大学何存富等也开展了基于Sagnac干涉仪原理的管道泄漏检测分布式光纤振动传感器的理论与实验研究工作^[13]。

这一阶段,国内科技工作者主要是把国外这一技术引进国内,并向国内介绍这一新技术的原理、特点,同时结合这一技术在国内实验室做一些基础性研究工作。

第二发展阶段,是实验测试系统结构优化阶段。

人们发现这种原始单一 Sagnac 光纤干涉仪结构存在的最大问题在于应用于管道泄漏检测时,由于系统所采用结构为环形对称,在实际应用中会产生互易效应,从而导致所获取的信号相互抵消,无干涉信号输出,因此在技术层面上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。在实际工程中,如果将传感器的一半光纤与声场真正实施隔离,造成施工难和传感器成本大幅提升,导致实际很难做到。国内学者围绕这一结构问题提出了两种改进方案,对实验测试系统进行了结构优化。

第一种方式是将原来环型结构通过增加法拉第旋镜将其变成直线型结构。

2006年重庆大学谭婧等人提出一项新的系统结构,他们为了克服 Sagnac 光纤环中未用作传感的那一半光纤所带来的屏蔽困难等问题,采用了一种全新的方法,也就是单轴分布式光纤传感器的方法^[13]。新系统的框架图如图2所示。

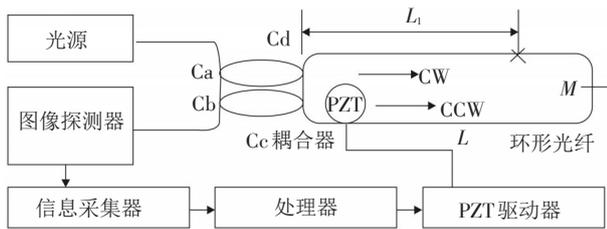


图2 Sagnac 分布式光纤传感原理图

新方法的核心技术是利用一条光纤代替原来的光纤环,并在这条光纤尾端设置法拉第旋镜。但是谭婧等人在文献[5]中只是对这种探测方法做了定位理论分析,并没有开展实际的测试工作。

2007~2012年,北京工业大学杭利军及复旦大学卞庞等多人先后将增加法拉第旋镜的 Sagnac 光纤干涉仪用于实际管道泄漏检测及其定位技术用于实践中^[14-15]。实验表明,前者在实验室环境下,最小可对孔径为 2.0 mm 的泄漏点进行定位,且最大定位误差小于 118 m,而后者通过采用频分复用技术实现了多路实时在线监控与检测,将定位精度提升到 ± 50 m。

第二种方式是采用双 Sagnac 干涉光路将原来环型结构变成直线型结构。

2006年,复旦大学张天照等采用了双 Sagnac 干

涉光路结构,用于管道安全维护的全光纤监测定位系统^[16]。图3为这一测试系统结构图。

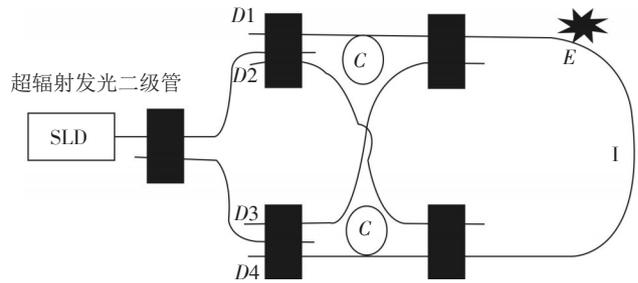


图3 双 Sagnac 干涉系统结构图

这一系统利用光纤耦合器构造的双 Sagnac 干涉光路系统获取监测扰动信号。测试系统通过将两组信号同时进行差分放大、快速傅里叶变换、小波去噪等手段解决扰动源特性限制问题。在 47.401 km 的环路复用段上进行模拟测试,让油气管道受到人为侵扰,测试结果显示,平均误差小于 100 m。在此之后北京工业大学的杭利军等也尝试了双 Sagnac 干涉系统^[17],这一测试系统通过使用两个传感光纤使系统的监测距离提高一倍,同时实验结果表明,测量的泄漏点最大定位误差在 100 m 左右。

在 Sagnac 干涉测试系统结构优化阶段,除了上述两种典型方式外,近些年还有其他方式,包括:北京航空航天大学的张春熹提出的包括三个 Sagnac 干涉仪组合到一起的光纤分布式扰动传感系统^[18];北京工业大学何存富提出的基于 3×3 耦合器的环型 Sagnac 干涉仪管道监测系统^[19],以及 Sagnac 干涉测试系统与 Mach-Zehnder 干涉系统的整合方式^[20]。前两种结构并不典型,在系统定位精确度的提升上并不明显,后一种方式有关内容将在后面做详细介绍。

第三发展阶段,是系统的测试精度提升与应用领域拓展阶段。

在系统的优化阶段后,系统的结构基本稳定,国内科技工作者将工作重点放在了通过信号处理等方法提升系统的测试精度与应用领域拓展方面。

2009年北京工业大学的赵红等人围绕信号处理方面开展了基于光纤传感和小波变换的管道泄漏定位技术的相关工作,通过对泄漏信号的频谱进行小波消噪处理,大大提升了零点频率的辨识

性,实现了泄漏点的精确定位^[21]。2014年上海工程技术大学王文龙等提出基于Sagnac振动传感器的扫频定位的构想^[22]。采用信号发生器驱动PZT(压电陶瓷)产生宽频振动信号,通过扫频获得零点频率,从而实现对Sagnac振动传感系统进行模拟定位。实验证明,该方法能够很好地确定系统的定位精度。2015年北京工业大学裴福俊等人将这一测试系统的应用领域由原来的油气输运管道拓展至更为复杂的船舶管道^[23]。他们针对船舶管网弯曲多、噪音强、流体波动性大复杂环境要求,通过合理选取消盲光纤的长度的方式寻找光纤传感器最优区段。同时,通过各种有效手段实现了监测系统的仪器化设计,从而有效了解决船舶复杂管网监测问题。

1.2 基于Mach-Zehnder干涉仪传感系统

1998年,南非人A A Chtcherbakov率先提出一种基于Mach-Zehnder和改进的Sagnac干涉系统^[24]。将Mach-Zehnder干涉原理和Sagnac干涉原理结合在一起,提出一种新的分布式光纤传感器架构。

基于Mach-Zehnder光纤干涉仪测试原理如下:在管道附近,沿管道并排敷设3条光纤,并以这3条单膜光纤构成分布式微振动测试传感器,用于测试管道沿途的泄漏噪声。其中的2条光纤是测试光纤,并构成光纤干涉仪的2个光臂,第3条光纤用于信号传输。图4给出了测试系统原理图。

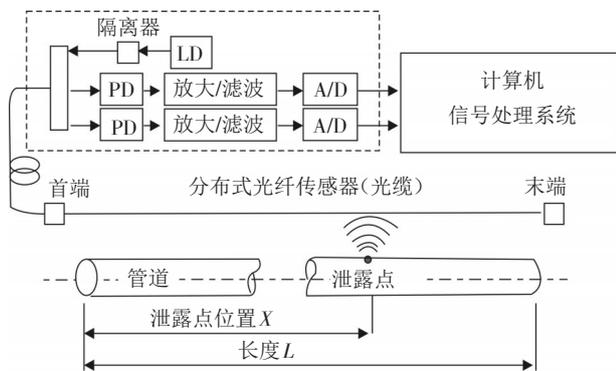


图4 基于Mach-Zehnder光纤干涉仪测试系统原理图

当测试光缆受到泄露噪声作用时,两条测试光纤中的两束相干光会分别产生相位变化。这两束相干光的光场为简谐振动,可分别表示为

$$\Psi_1 = A_1 \cos[\omega t + s_1(t) + \phi_1] \quad (5)$$

$$\Psi_2 = A_2 \cos[\omega t + s_2(t) + \phi_2] \quad (6)$$

式中, A_1 和 A_2 分别为光场振幅; ω 为光波角频率, Ψ_1 和 Ψ_2 分别为两束相干光波的场强; ϕ_1 和 ϕ_2 分别为两束光波的初始相位; $s_1(t)$ 和 $s_2(t)$ 分别为两束光波的光相位调制量。

设两束相干光波的强度分别为 I_1 和 I_2 , 且 $\Delta s(t) = s_1(t) - s_2(t)$, $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$

则两束相干光波干涉后的光强为

$$I = I_1 + I_2 + 2I_1I_2 \cos[\Delta s(t) - \Delta\phi] \quad (7)$$

设 I_0 为两条测试光纤中叠加后的总光强度; α 为两束相干光波的混合效率, 此时如果仅考虑交变得光强度, 式(7)可简化为

$$I(t) = I_0 \alpha \cos[\Delta s(t) + \Delta\phi] \quad (8)$$

在式(8)中括号内 $\Delta\phi$ 通常为常数, 因此测试信号是两束相干光相位调制差 $\Delta s(t)$ 的函数。基于这一原理, 通过实时检测干涉光信号的变化, 则可以利用铺设在管道上的分布式光纤传感器检测出沿途管道内流体因泄漏产生的微振动信号, 从而实现了管道泄漏的实时监测。

在国内, 采用独立的Mach-Zehnder干涉仪系统开展管道泄露安全检测的工作是2005年由我国天津大学周琰、靳世久等人率先提出并在实际中得到应用的^[25]。周琰等人采用的单一的Mach-Zehnder型光纤振动传感器的优点在于灵敏度高, 反应速度快, 缺点是结构中需要一个参考光纤, 环境对其影响较大, 导致测量的不稳定, 限制了这种传感器的应用。

从2000~2010年的十年间, 为了解决单一的Mach-Zehnder干涉仪系统存在的问题, 国内也像国际上一样出现了多种系统的优化组合方式。其中双Mach-Zehnder干涉仪系统和混合Mach-Zehnder&Sagnac干涉仪两种优化组合系统成为这一时期的主体, 并形成了这一测试系统的第一个发展阶段。在此, 海峡两岸的科技工作者共同参与了这一领域的研究工作。

研究表明, 组合式测试系统可以最大限度发挥这两种测试系统各自的优势。利用从Sagnac干涉仪进行高分辨率的信号识别, 利用双Mach-Zehnder干涉仪实现对泄露点的准确定位, 从而为长途管道的破坏预警提供了一种较为理想的方法。

第二个发展阶段, 是系统实施数字化与微型化

阶段。2010年以后,实验测试系统的体系结构基本定型,国内尽管仍有科技工作者利用已经得到优化组合的测试系统向不同应用领域延伸,但大部分人员已经把工作的重点转向系统数字化、微型化,从而形成这一测试系统第二个发展阶段。在这一阶段需要解决的核心问题是通过新软件开发、数字化相位解调、空芯光纤等新技术的实现,来实现测试系统向数字化和微型化的转变。

1.3 基于 Φ -OTDR传感系统

1993年H F Taylor首先提出了 Φ -OTDR技术^[33],但直到2010年前后,基于 Φ -OTDR技术的分布式振动传感器因具有比较高的定位精度和多点同时探测能力才引起人们的高度关注,被用于管道、光缆等预警等内容^[34-37]。

Φ -OTDR测试系统的工作原理如下:当物体振动产生的压力施加于传感光纤时,由于弹光效应等因素导致传感光纤的长度和折射率发生变化,从而引起传感光纤中传输光的相位改变。此时在光纤内部传播的光信号在振动处沿光纤背向传输的瑞利散射光的相位随之发生变化,这些携带外界振动信息的信号光经光学系统处理后,将微弱的相位变化转换为容易测量的光强变化,从而实现信号的解调。因此 Φ -OTDR是利用光纤中的后向瑞利散射光对光纤沿线振动信号进行传感的一种技术。 Φ -OTDR与分布式光纤振动传感系统的结合,并通过测量发出脉冲光与反射光的时间差对信号源的位置实现定位。

与普通的时域反射仪(OTDR)测试系统相比, Φ -OTDR测试系统被成功应用在管道流体泄露检测中的最核心要素就是基于超窄线宽激光器的发展与完善^[38-39],由于超窄线宽激光器发出的光的相干长度很长,散射光之间具有极强的相干性,因此在相干长度内的若干条后向散射脉冲光都是相干的,从而利用干涉将脉冲光中的微小的相位变化可以转换为较强相干光的强度变化,最终通过光电探测器对光功率的探测,实现分布式振动传感。

这种系统的定位精度 P 与注入光纤的光脉冲宽度 ΔT 有关,且有下式

$$P = \frac{c\Delta T}{2n} \quad (9)$$

显然,式(9)中真空中的光速 c 及传输介质折射

率 n 一般都是定值,因此定位精度 P 的大小主要由光脉冲宽度 ΔT 决定。同时式(9)还表明,如果试验中系统采用的光脉冲宽度 ΔT 为50 ns,对应理论定位精度5 m。

由于国内基于 Φ -OTDR技术的分布式振动传感技术被应用到管道泄漏检测的过程时间比较短,目前还处于结构和技术不断的改进之中,因此这一技术的发展过程还基本位于第一个发展阶段。在这一阶段需要解决的核心问题是通过外有技术的消化吸收,实现优化 Φ -OTDR测试系统的体系结构。在这一阶段系统的结构大体一致,体系的构成大多包括窄线宽激光器、声光调制器、掺铒光纤放大器、数据采集卡、光电探测器等部分。在这一阶段重点还只是验证方案实施的有效性。但随着相关技术的发展, Φ -OTDR技术的分布式振动传感技术的第二个发展阶段已经初见端倪。也就是通过信号处理等方法提升测试系统的测试精度可靠性及拓展应用领域阶段。因此可以认为目前国内 Φ -OTDR技术的发展正在从第一阶段开始步入第二阶段。

2009年,电子科技大学罗俊等人开发了基于 Φ -OTDR技术的新型高灵敏分布式光纤入侵监测系统^[40]。系统结构框图如图5所示。

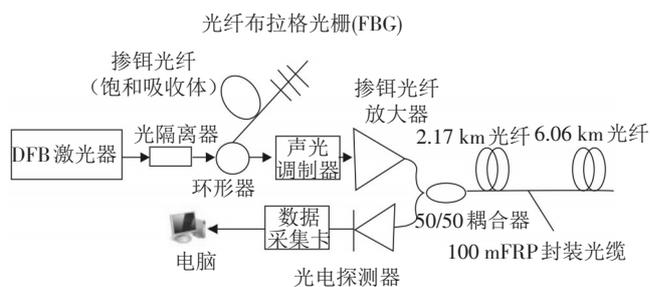


图5 新型高灵敏分布式光纤入侵监测系统结构框图

在这一系统中设计了一个基于高灵敏传感光缆和DFB(分布式反馈激光器,也是一种窄线宽激光器)的新型 Φ -OTDR光纤分布式入侵检测与定位系统。实验测试表明,该系统的监测范围达到了8 km,定位精度达到100 m。这一系统由于采用了DFB,因此在一定程度上保障了测试系统的定位精度。

2015年太原理工大学王宇等人提出用于燃气管道破坏预警的 Φ -OTDR技术方案^[41],图6给出了

Φ -OTDR 振动检测实验方案图。

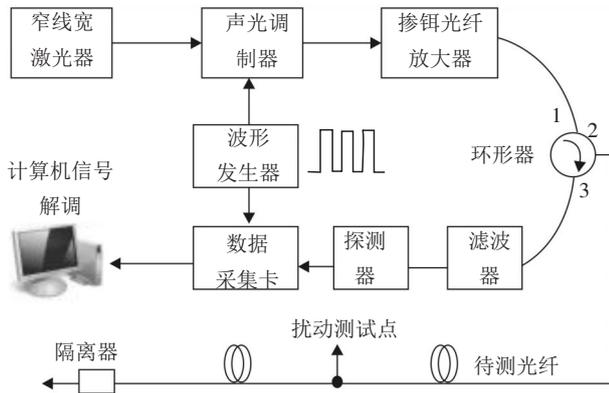


图6 Φ -OTDR 振动检测实验方案图

研究结果显示,这一测试系统对于燃气管道的周界振动信号具备多点的定位能力强、响应时间快和定位精度高等诸多优势。在当前的振动信号动态响应范围处于100~700 Hz状态下,实验室内已实现在总长11 km的传感光纤上,约5 km的检测范围,小于10 m的定位精度和高于10 dB的信噪比。

同年,为了提高测试系统的检测效果,中科院上光学所的Wang Z等人则成功实现使用变频的时域探测序列作为探测光,通过光频差将各个探测子序列区分开,从而避免混叠效应,成功在9.6 km的检测范围内实现了0.5 MHz的频率检测上限。在之后,他们进一步简化硬件,提出在光路中加入零差检测以及90°的相移器,实现光路层面的I/O(输入/输出)正交解调,从而快速实现瑞利散射光的相位解调,实现单点定量检测。

同年,北京交通大学张颜等人为了有效提升 Φ -OTDR测试系统对扰动事件识别的准确性,开展了多特征参量的 Φ -OTDR分布式光纤扰动传感系统模式识别研究^[44],可以有效识别出应力破坏、攀爬、浇水、轻度碾压四种扰动模式,该方法克服了现有单一特征参量识别模式受限的问题。

2016年河北省仪器仪表工程技术研究中心与天津大学等单位合作开展了有关基于 Φ -OTDR技术的城市地下供水管网主干线泄漏检测与定位的研究工作,将 Φ -OTDR技术的应用领域拓展至城市地下供水管网主干线泄漏检测,并取得初步研究成果^[45]。图7是测试系统框图。

课题组利用水泄漏信号在频域上的能量分布特点,选取特征频段的分量进行分析,以特征频率

分量沿光纤的分布为判别依据,对泄漏孔的位置进行了精确的定位,获得了很好的信噪比,实现了基于 Φ -OTDR技术的水管道泄漏事件的识别与定位。理论分析和实验研究表明,基于 Φ -OTDR技术的分布式光纤振动传感器可用于城市地下供水管网的泄漏监测与定位。

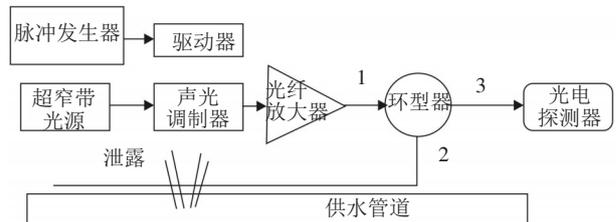


图7 Φ -OTDR 系统结构框图

图8是以100~150 Hz频率分量为特征量进行空间能量分布的分析,可以明显的得到泄漏点的位置,并且具有较高的信噪比。

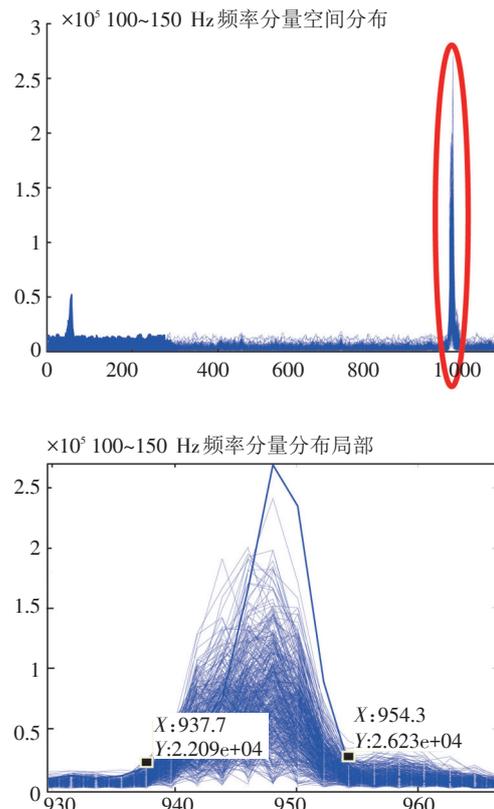


图8 Φ -OTDR 系统定位测试结果及局部细节图

初步研究表明,水泄露信号为水射出管壁时与管壁摩擦以及水管内部流体湍流形成的振动信号,该信号的能量以及频域特征应该与水的流速、管壁

材质、管壁厚度、水管整体质量、水管直径、漏孔形状、漏孔尺寸、漏孔表面粗糙度等有复杂的函数关系。需要大量的仿真和不同实验条件下的大量实验。只有了解了水管道喷水振动信号的特征和性质,才能更好的将 Φ -OTDR技术用于该研究领域,以及如何更好的调整 Φ -OTDR的参数获得更佳的实验成果。

1.4 三项技术的比较

上述研究表明,各种分布式光纤传感检测系统用于管道流体泄漏检测工作中都有不同的优势和测试特点,但同时也都有一定的局限性。

Sagnac干涉仪传感系统技术成熟、结构相对简单、模式识别能力强,但这种测试系统在原理上存在难于判断频谱零点性质问题,在某些情况下定位困难,与此同时穆立波等人从理论分析表明,单Sagnac干涉仪系统无法实现多点震动的精确定位^[46],且定位精度相对较低;Mach-Zehnder干涉仪传感系统技术也较为成熟,且已在实际管道上实现了成品化,优点是反应灵敏、响应速度快、响应带宽宽,且可以检测出压力较低、泄漏孔径较小的管道泄漏点,且定位精度较高,但该系统只有在震动信号满足正交关系时,才能准确实现多点定位,而一旦出现震动信号相似的状况时,很容易发生定位错误; Φ -OTDR传感系统可以从根本上解决多点定位问题,相对其他两种技术不存在原理上的困难,是一种很有前景的技术。但同时 Φ -OTDR传感系统由于设备复杂,且成本高,目前处于实验研究阶段,也是该领域的研究热点,一些技术还有待进一步完善和提升,同时研究也表明 Φ -OTDR传感系统在模式识别方面不如Sagnac干涉仪传感系统。

2 当前国外相关技术领域发展状况概述

利用分布式光纤传感技术开展管道流体泄漏检测的工作在国际上已经有二十多年的历史了,多年来国内外这一技术领域得到快速发展,技术水平不断提高,应用领域不断拓宽。

近5年,国外利用Sagnac干涉仪系统开展管道流体泄漏检测工作的相关报道已渐稀少,关注度大幅下降,意味着这一技术领域在国外已进入平台区,查阅外文期刊会发现相关研究的报道几乎都是

由国内学者完成的;利用Mach-Zehnder干涉仪系统开展管道流体泄漏检测的工作的状况与上述的情况相似,在对国外期刊中所刊载的有关利用Mach-Zehnder干涉仪系统开展管道流体泄漏检测工作的检索中发现,有90%以上完成者都是中国人。从澳大利亚Mahmoud S S及Seedahmed等少数国内外学者在该领域的研究情况来看^[47-48],他们的关注的重点大多放在利用新的抗干扰算法提升系统抗干扰能力,有效降低警报误报率,从而提升预警系统的可靠性。此外与国内相类似在测试系统上其共同点是使用双Mach-Zehnder系统,或与Sagnac干涉仪系统等其他联合使用,也就是系统集成化成为在这一领域国内外的大趋势。

与Sagnac干涉仪系统、Mach-Zehnder干涉仪系统相比,国内外在最前沿、最活跃的研究上主要体现在 Φ -OTDR系统的研究上。

目前国外使用相位型光时域反射仪进行振动相关检测的研究,主要集中在两个方面:一是扩大检测范围;二是提高检测效果。

扩大检测范围主要指传感光纤的有效探测长度。由于光纤末端的瑞利散射光强较低,当散射光信号完全淹没于噪声中时,即可认为达到最大探测范围。因此,为了增加有效探测距离,国内外研究主要从增加末端光纤内的探测光强以及提高检测信号的信噪比两个方面进行探索。

在提高末端光强方面,2014年,葡萄牙研究人员Martins H F等在相位型光时域反射仪中引入1阶拉曼光放大技术,也成功实现了100 km的有效探测距离^[49]。而在信噪比增强方面,2016年,Soto M A等人提出利用探测迹线之间的冗余性,在时空图上使用2D或3D图像复原技术,并成功实现了近100倍的信噪比提升⁰。

提高检测效果主要提高单点的频率检测范围以及实现单点的定量检测。

由于一个脉冲周期需要满足大于探测光在探测光纤内部传输的最小时间,因此时域反射式的探测结构本身的单点频率检测范围相对于干涉式的检测结构来说,都较低,通常在数千赫兹以下。为了提高单点频率检测范围。2013年,A Masoudi等人使用3×3耦合器,实现了瑞利散射光的相位解调⁰,但该结构需要额外搭建干涉仪结构,同时需保证干涉仪恒温的工作条件较为复杂;A E Alekseev

等人则分别在2014年以及2015年提出使用时域调制双脉冲以及频域调制双脉冲,实现瑞利散射光的相位解调,并成功实现单点振动强度以及振动波形的定量检测^[52]。2015年捷克 Sifta R 等设计了一种基于 Φ -OTDR的传感系统^[54],该系统使用一个非常狭窄的激光器(0.1 kHz)和掺铒光纤放大器。这个系统可以检测的光纤长度达4 km,空间分辨率为50 m。这个系统也可以用于监测管道破坏、地震活动区等。

3 分布式光纤传感技术应用在管道流体泄漏检测的发展趋势

3.1 应用领域向城市供水主干线泄漏转化

城市供水管网泄漏是全球普遍存在的一个问题,但在我国尤为严重。根据中国水协城市供水年鉴统计结果,我国城市供水管网平均漏失率为15.14%,是发达国家的几倍^[55]。伴随着智慧城市的建设,城市输水主管道的智能化将被越来越重视,因此应用领域由原有输油气管道泄露检测向城市供水管网泄漏转化,同时基于分布式光纤传感技术的城市地下管廊也必将成为智慧城市的建设的一项核心技术^[56-57]。

3.2 多种方法的集成将成为这一技术发展的必然

在前面分析中已经得知,由于每一种单一的方法都有一定局限性,因此为了提高系统的稳定性和准确性,实验测试系统将向集成化、系统化方向发展。集成化、系统化的发展将能最大限度的发挥每一种测试系统的优势。2015年北京交通大学林文台等为了有效降低系统的误报率,提出一种Mach-Zehnder干涉仪与 Φ -OTDR相结合的光纤分布式振动传感新系统^[58]。实验结果表明,在复杂环境下,与单一的 Φ -OTDR方案相比,基于 Φ -OTDR和Mach-Zehnder干涉仪复合结构的方案可以有效降低系统的误报率,使系统的误报率由单一 Φ -OTDR的25%降至2%。

3.3 振动信号的采集处理与分析将成为技术关键

基于城市地下输水主管道大多分布在人群聚集区,相对于输油气管道比较单一的应用环境,这一应用领域人为及环境干扰将变得更为复杂,同时相

关研究还表明,输水管道的泄漏振动信号相对比较弱、信号特征不明确等特点。因此,将分布式光纤传感器技术用于城市地下供水管网主干线安全预警与泄漏定位系统中,通过改变检测光纤与输水管道的耦合方式实现震动增敏,并在此基础上实现对振动信号的有效获取、处理与分析将成为制约这一技术发展的技术关键。

4 结论

1991年揭开了分布式光纤传感技术在管道流体泄漏检测中的应用的序幕,20多年后这一技术对输油气管道的健康监测发挥了重要作用,赢得了人们的重视,检测技术也日趋成熟。国内在利用Sagnac干涉仪系统及Mach-Zehnder干涉仪系统开展管道流体泄漏检测方面经历了从技术引进到技术集成再到技术创新的发展过程,目前已经走在国际的前端,特别是在一些应用领域显示出一定的技术优势;而在最前沿的 Φ -OTDR系统的研究上国内外不相伯仲。伴随着工业化和城市化建设的推进,这一技术的应用领域开始从工业拓展至民用。其中基于分布式光纤传感技术在城市地下供水管网主干线安全预警与泄漏定位系统的开发与应用将成为今后一段时间内的发展趋势。与此同时,与之相对应的测试方法与手段将得到进一步更新,振动信号的采集处理与分析将成为拓展应用领域的技术关键。

参考文献

- [1] 鄂书林. 用于石油测井和管道运输的分布式光纤传感系统[J]. 光机电信息, 2011, 28(12): 62-66.
- [2] 马宾, 隋青美, 徐健. 分布式光纤传感系统监测煤矿冻结表土段温度[J]. 计量学报, 2007, 28(z1): 174-177.
- [3] 何存富, 杭利军, 吴斌. 分布式光纤传感技术在管道泄漏检测中的应用[J]. 传感器与微系统, 2006, 25(9): 8-11.
- [4] 李荣伟, 李永倩. 高压电缆用分布式光纤传感检测系统[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2010(1): 38-41.
- [5] 周小群, 饭山宏一. 干涉型长距离分布式光纤传感系统[J]. 光学学报, 1998(2): 253-255.
- [6] 郑亚娟, 王忠东, 衣实贤. 基于OTDR技术的光纤式输油管道安全预警系统[J]. 化工自动化及仪表, 2008, 35(2): 45-49.

- [7] 金重九, 邹卫文, 李颖, 等. 基于布里渊增益和损耗级联的高性能布里渊相干域分布式光纤传感系统[J]. 激光与光电子学进展, 2013(5):80-86.
- [8] Kurmer JP, Kingsley SA, Laud J S. Distributed fiber optic acoustic sensor for leak detection[J]. SPIE 1991, 1586: 117-127.
- [9] Kurmer JP, Kingsley SA, Laudo J S, et al. Applicability of a novel distributed fiber optic acoustic sensor for leak detection[J]. Proceedings of SPIE the International Society for Optical Engineering, 1993, 1797: 63-71.
- [10] 杭利军, 何存富, 吴斌. 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[J]. 光学技术, 2007, 33(5):651-653.
- [11] 胡志新, 张桂莲, 何巨, 等. 利用分布式光纤传感技术检测天然气管道泄漏[J]. 传感器技术, 2003, 22(10): 48-49.
- [12] 孟庆尧, 赵勇, 郑明. 干涉型光纤应变传感技术的发展与应用[J]. 光电子技术, 2005, 25(3): 170-174.
- [13] 谭靖, 陈伟民, 朱永, 等. 单轴分布式光纤传感器管线泄漏探测方法及定位理论分析[J]. 光子学报, 2006, 35(2):228-231.
- [14] 杭利军, 何存富, 吴斌. 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[J]. 中国激光, 2007, 34(6): 820-824.
- [15] 卞庞, 吴媛, 贾波, 等. 基于改进型 Sagnac 干涉仪的扰动定位系统[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(12): 2870-2874.
- [16] 张天照, 贾波. 管道安全监测定位系统[J]. 光电工程, 2006, 33(4):72-74.
- [17] 杭利军, 何存富, 吴斌, 等. 新型分布式光纤管道泄漏检测技术及定位方法研究[J]. 光学学报, 2008, 22(1): 123-127.
- [18] 张春熹, 李勤, 李立京, 等. 基于 Sagnac 组合型干涉仪的光纤分布式扰动传感器[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(10):3378-3382.
- [19] 何存富, 阮力, 冯欢, 等. 基于 3×3 耦合器的环型 Sagnac 干涉仪管道监测系统实验研究[J]. 光电子·激光, 2015, 26(6), 1125-1131.
- [20] 黄悦, 王强, 杨其华, 等. 水下天然气管道分布式光纤泄漏检测系统实验分析[J]. 激光与光电子学进展, 2014(11): 100-105.
- [21] 赵红, 杭利军, 李港. 基于光纤传感和小波变换的管道泄漏定位技术[J]. 传感器与微系统, 2009, 28(9): 47-49.
- [22] 王文龙, 孔勇, 刁利, 等. 基于 Sagnac 振动传感器的扫频定位[J]. 上海工程技术大学学报, 2014, 28(12): 355-358.
- [23] 裴福俊, 杨东, 刘红云. 船舶管道泄漏的干涉式光纤监测仪的设计与实现[J]. 北京工业大学学报, 2015, 41(7):984-990.
- [24] Chitchebakov A A, Swart P L, Spammer S J. Mach-Zehnder and modified Sagnac-distributed fiber-optic impact sensor[J]. Applied Optics, 1998, 37(16): 3432-3437.
- [25] 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.
- [26] Hsieh B, Li Y. The modification scheme for a hybrid Mach-Zehnder & Sagnac interferometric fiber optical leak detection system[J]. Electrical Engineering, 2000.
- [27] 孙琪真, 刘德明, 王健. 基于环结构的新型分布式光纤振动传感系统[J]. 物理学报, 2007, 56(10): 5903-5908.
- [28] 谭靖, 陈伟民, 吴俊, 等. 基于萨格奈克/双马赫-曾德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):67-71.
- [29] 陶沛琳, 延凤平, 刘鹏, 等. 基于 Mach-Zehnder 干涉仪的光纤入侵行为识别系统[J]. 量子电子学报, 2011, 28(2):183-190.
- [30] 曾周末, 张溪默, 封皓, 等. 双 Mach-Zehnder 光纤干涉传感系统中的偏振衰落控制[J]. 光学精密工程, 2012, 3: 468-476.
- [31] 曾周末, 刘芳, 封皓, 等. 基于 3×3 耦合器的双马赫-曾德干涉仪数字化相位解调[J]. 光学精密工程, 2014, 22(6): 1401-1417.
- [32] 闫小军, 刘艳, 李卫东. 一种基于空芯光纤的微型 Mach-Zehnder 干涉仪[J]. 光电技术应用, 2016, 31(1):21-23.
- [33] Taylor H F, Lee C E. Apparatus and method for fiber optic intrusion sensing: US, US 5194847 A[P]. 1993.
- [34] 杨斌, 皋魏, 席刚. Φ -OTDR 分布式光纤传感系统的关键技术研究[J]. 光通讯研究, 2012(4): 19-21.
- [35] 陈继宣, 龚华平, 金尚忠. 基于 Φ -OTDR 的光纤入侵传感器系统的原理及研究进展[J]. 激光杂志, 2009, 30(6):4-6.
- [36] 王培国, 杨斌, 李泽, 等. 基于 Φ -OTDR 通信光缆险情定位与预警系统设计与实现[J]. 光学仪器, 2012, 34(2): 61-6.
- [37] 杨斌, 孙玉国. 新型光纤电缆故障定位系统[J]. 光电技术应用, 2013, 28(6): 63-66.
- [38] Li Xiao-yu, WU Hui-juan, Peng ZP, et al. A novel time sequence singular spectrum analysis method for Φ -OTDR disturbance detection system[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(4):428001-0428001.
- [39] 宋志强, 祁海峰, 王晨, 等. 窄线宽光纤激光器及其在光纤传感中的应用[J]. 光学学报, 2015(A02): 109-114.
- [40] 罗俊, 饶云江, 岳剑锋, 等. 新型高灵敏分布式光纤入侵监测系统[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(6): 1123-1128.
- [41] 王宇, 吴瑞东, 董齐, 等. 用于燃气管道破坏预警的 Φ -OT-

- band signal transmission[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2002, 50(6):1458-1468.
- [5] 徐刚, 郑小平, 张汉一. 基于四倍频技术的单边带光载毫米波上变频[J]. 光学学报, 2010(12):3386-3390.
- [6] 贾照娜, 宁提纲, 李晶. ROF系统中毫米波光学生成方法的研究[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2011(5):35-38.
- [7] 曹东亚, 宁提纲, 李晶. ROF系统中毫米波生成技术的研究[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2010(4):4-7.
- [8] 许丽丽, 宁提纲, 李晶, 等. 一种改进的基于前向调制技术生成60 GHz毫米波方案[J]. 光学学报, 2013(2):26-31.
- [9] 贾照娜, 宁提纲, 李晶. ROF系统中毫米波光学生成方法的研究[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2011(5):35-38.
- [10] 李晶. 微波光子发生器与可调OCSR光单边带调制技术研究[D]. 北京:北京交通大学, 2013.
- [11] 李晶, 宁提纲, 裴丽, 等. 基于二次外差法的八倍频毫米波光子发生器特性[J]. 红外与毫米波学报, 2015, 34(3):352-359.
- [12] 修明磊. 毫米波Radio-over-Fiber传输系统的相关技术研究[M]. 上海:上海大学出版社, 2011.

(上接第9页)

- DR技术[J]. 煤炭技术, 2016, 35(2):225-226
- [42] WANG Z, PAN Z, FANG Z, et al. Ultra-broadband phase-sensitive optical time-domain reflectometry with a temporally sequenced multi-frequency source[J]. Optics Letters, 2015, 40(22): 5192-5195.
- [43] Wang Z. Coherent Φ -OTDR based on I/Q demodulation and homodyne detection[J]. Optics Express, 2016, 24(2): 853-858.
- [44] 张颜, 娄淑琴, 梁生, 等. 基于多特征参量的 Φ -OTDR分布式光纤扰动传感系统模式识别研究[J]. 激光, 2015(11):134-142.
- [45] 沙洲, 杨洋, 封皓, 等. 基于 Φ -OTDR技术的城市地下供水管网主干线泄漏检测与定位[J]. 中国仪器仪表, 2016(11):72-76.
- [46] 穆立波, 吴悦峰, 姚剑. 分布式光纤震动传感系统的多点定位问题研究[J]. 传感器与位系统, 2010, 29(6):42-45.
- [47] Mahmoud S S, Visagathilagar Y, Katsifolis J. Nuisance alarm suppression techniques for fibre-optic intrusion detection systems[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2012:8351.
- [48] Seedahmed, MAHMOUD, Yuvaraja, et al. Real-time distributed fiber optic sensor for security systems: performance, event classification and nuisance mitigation[J]. Photonic Sensors, 2012, 2(3):225-236.
- [49] Martins H F, Martín-López S, Corredera P, et al. Phase-sensitive optical time domain reflectometer assisted by first-order Raman amplification for distributed vibration sensing over > 100 km[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(8): 1510-1518.
- [50] Soto M A, Ramírez J A, Thévenaz L. Intensifying the response of distributed optical fibre sensors using 2D and 3D image restoration[J]. Nature Communications, 2016, 7.
- [51] Masoudi A, Belal M, Newson T P. A distributed optical fibre dynamic strain sensor based on phase-OTDR[J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(8): 085204.
- [52] Alekseev A E, Vdovenko V S, Gorshkov B G, et al. A phase-sensitive optical time-domain reflectometer with dual-pulse phase modulated probe signal[J]. Laser Physics, 2014, 24(11): 115106.
- [53] Alekseev A E, Vdovenko V S, Gorshkov B G, et al. A phase-sensitive optical time-domain reflectometer with dual-pulse diverse frequency probe signal[J]. Laser Physics, 2015, 25(6): 065101.
- [54] Sifta R, Munster P, Sysel P, et al. Distributed fiber-optic sensor for detection and localization of acoustic vibrations [J]. Metrology & Measurement Systems, 2015, 22(1):111-118.
- [55] 袁志彬. 我国城市供水管网漏失率状况及其管理措施[J]. 城市管理与科技, 2004, 2:82-84.
- [56] 周刚基. 基于光纤传感技术的城市地下管廊综合监控系统的应用与发展[J]. 中国安防, 2015, 12:26-30.
- [57] 俞国锋. 分布式传感技术在城市综合管廊的应用[J]. 建筑电气, 2015, 12:46-49.
- [58] 林文台, 梁生, 娄淑琴, 等. 一种低误报率的新型光纤分布式振动传感系统[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(6): 1845-1848.