

文章编号:1007-1180(2011)12-0062-05

用于石油测井和管道运输的 分布式光纤传感系统

鄂书林

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 分布式光纤传感系统是一种能够实时获取传感光纤区域内随时间和空间变化的被测量分布信息的技术, 具有抗电磁干扰并且能够承受极端环境的优点, 非常适合应用在石油测井和管道运输过程中的实时监测。本文通过对分布式光纤传感技术原理的分析, 阐述了其在石油工业的应用现状和技术水平, 针对我国的分布式光纤传感应用情况, 进行了展望。

关键词: 分布式光纤传感; 石油测井; 管道运输

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A

DOI: 10.3788/OMEI20112812.0062

Distributed Optical Fiber Sensing System Used in Well Logging and Pipeline Leak Detection

E Shu-lin

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Distributed optical fiber sensing technique can acquire information of physical parameters which change with time and space. It has very prominent advantage of anti-electromagnetic interference and still in good working condition under extreme environment, these characters make it suitable for using in oil well logging and pipeline leak detection. This paper describes the principle of distributed optical fiber sensing technique, it's application in oil industry, and the prospect of the technique is shown.

Keywords: distributed optical fiber sensing; oil well logging; pipeline transportation

1 引言

在油田开发与石油输运过程中,经常需要对井内状态和特性、输运过程中输运管道的状况和外部环境条件等进行有效的监测。光纤传感技术是随着光纤通信的发展而形成的一门崭新的技术。光纤传感器具有耐高温高压、耐腐蚀、对电磁干扰不敏感及具有分布式在线监测能力等优点,被越来越多地运用到石油开发和输运领域^[1]。

针对提高油井采出率关键技术的研究,越来越得到国内外石油科技和工业界的重视,光纤传感器可以高精度地测量井内和输油管道环境参数,在智能油井系统中得到了充分的应用,国际上很多大石油公司以及相关研发机构都进行了研究与开发^[2]。

智能油井系统是指具有井内传感器系统,可以对井内的状态进行在线监测,利用计算机系统进行当地或远程生产控制功能的先进油井系统。油井状态信息包括油、气、水的流量及所处油层,采油技术人员可以建立储油层的动态数值模拟模型,进而优化生产参数,达到提高产量和延长油井寿命的目的。在石油勘探、开采和生产过程中,油井井温是一个极为重要的参数,它对确定油层位置、厚度、含水层的深度等具有决定性的意义。井内的温度分布信息可以用于提供油藏沿井筒出油分布模型的关键数据,透气、透水信息以及对完井的过程监测。由于井内高温、高压、腐蚀环境的限制,传统的热电偶、热敏电阻等电子传感器难以胜任长期检测的需要,光纤传感器易于安装、体积小、抗干扰能力强,对井下监测具有极大的技术优势和应用潜力。

本文在详细论述分布式光纤传感系统基本原理的基础上,通过对该领域国内外发展现状充分的调研,说明其在测井、石油输运领域的应用,对分布式光纤传感系统的前景进行分析,指出在我国石油测井和管道输运中发展这项技术的重要意义和关键技术,以进一步提高石油开发的水平。

2 分布式光纤传感技术的原理与分类

从测量信息的空间连续性分析,分布式光纤传感器可以分为准分布式和全分布式两类。准分布式光纤传感器由 N 个具有空间确定位置的分离光学传感器组成,共用一个或多个信息传输通道,可以同时或者分时测量确定位置的参数分布。

2.1 光纤布喇格光栅 (FBG)

典型的准分布式光纤传感器是光纤布喇格光栅 (FBG),其所获取的被测量信息在空间上并不是连续的。布喇格光栅是一种在光纤中制成的折射率周期变化的光栅,当这种带有布喇格光栅的光纤受到拉伸、压缩或者所处温度发生变化时,其反射光的波长发生变化,通过测量反射光波长,即可得到环境中应力或温度的变化量。

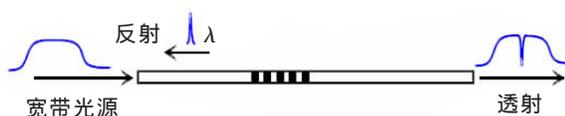


图1 光纤Bragg光栅测量原理

满足 Bragg 相位匹配条件的 FBG 反射波长 λ_B 可以表示为:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

式中, n_{eff} 为光纤的有效折射率, Λ 为 FBG 的栅格周期。

从 (1) 式可以进一步得到 Bragg 反射波长的变化量为:

$$\Delta\lambda_B = 2\Lambda\Delta n_{\text{eff}} + 2n_{\text{eff}}\Delta\Lambda \quad (2)$$

由(2)式可见,FBG的反射波长 λ_B 与光纤的有效折射率 n_{eff} 、栅格周期 Λ 有关,所以当外界被测量(如温度和应变等)发生改变时,用来测量的FBG反射波长 λ_B 会发生漂移。因此,FBG反射波长的变化量可反映出外界被测量的变化情况。

2.2 分布式光纤传感器

分布式光纤传感技术中,光纤既是传输通道又是传感单元,分布式光纤传感是随着光时域反射技术(Optical time-domain reflectometry, OTDR)的出

现而发展起来的, 分布式光纤传感系统不仅具有一般传感器的优点, 其最明显的优势在于可以沿光纤路径上同时得到被测量在时间和空间上的分布信息, 具有极为广泛的应用前景。基于 OTDR 的全分布式光纤传感器的原理为: 利用光纤中背向散射光的检测和分析, 得到光纤链路上任何位置的事件信息, 实时地监测和定位。

光在光纤中传输时, 产生的散射光与入射光成相反方向 (即背向), 称为背向散射光, 如图 2 所示。

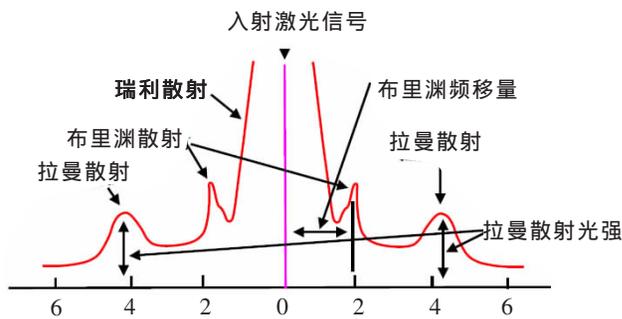


图2 光纤中背向散射光分布

背向散射光包括瑞利散射 (Rayleigh scattering), 喇曼散射 (Raman scattering) 和布里渊散射 (Brillouin scattering) 3 种机制。瑞利散射是光与物质发生的弹性散射, 光的波长不发生变化。喇曼散射和布里渊散射是光与物质发生的非弹性散射, 散射光的波长发生变化。

喇曼散射与光纤分子振动能级有关, 当光纤中传播的激光的能量转换成热振动, 产生比入射光波长长的散射光, 称为斯托克斯光 (Stokes), 相反则产生比入射光波长短的散射光, 称为反斯托克斯光 (Anti-Stokes), 如图 3 所示。

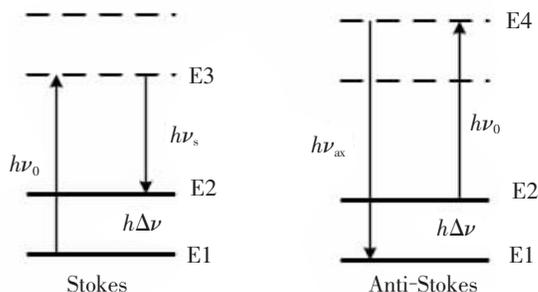


图3 喇曼散射原理图

由于喇曼散射是光纤的组成和热振动作用所决定的, 所以其散射光强度与温度有关, 斯托克斯光与反斯托克斯光强度比只与温度有关, 与光纤几何条件、光纤成分和光强、光入射条件无关, 所以喇曼散射可用来实现光纤沿线温度的分布式传感测量^[3]。

布里渊散射产生于光纤中的光子与光纤中声子发生的非弹性碰撞, 布里渊频移与入射光频率、光纤介质的折射等有关。布里渊频移的大小与散射角和光纤的特性有关, 当光纤环境如温度变化和产生应变时, 布里渊频移会发生变化, 检测布里渊背向散射光, 可以实现分布式温度和应变的测量, 这就是基于布里渊散射的分布式光纤传感基本原理^[4]。

3 分布式光纤传感系统对石油测井和石油管道运输的应用

3.1 石油测井

光纤传感技术用于石油测井, 可以准确测量井内的环境参数, 如压力、温度的变化, 由于光纤耐高温、高压、腐蚀等优越性, 光纤石油测井技术可以降低成本, 提高石油探测水平, 具有广阔的应用前景。

从上述光纤传感技术的原理可以看出, 光纤布喇格光栅和基于光纤中的散射光与光时域反射技术 (OTDR) 的分布式光纤传感都可以应用在石油测井中, 而分布式光纤传感具有可以实时测量等特点, 更具优越性。

分布式光纤传感器可以沿整个光纤连续测量、监测油井温度, 井内温度变化与其他地面采集的资料 (如流量、含水、压力等) 测井曲线对比, 可定性和定量地提供井下变化情况,

3.1.1 压力监测

传统的井下压力监测采用的传感器主要有应变压力计和石英晶体压力计。应变式压力计受温度影响滞后; 石英压力计会受到温度和压力急剧变化的影响, 在实际应用时, 还存在安装困难、长期稳定性差等问题。分布式光纤传感器没有井下电子线路、

易于安装、体积小，非常适合井下压力监测。

美国 CiDRA 公司在光纤压力传感监测技术上处于前沿，其布喇格光纤光栅压力传感器指标为：测程 0~103 MPa，过压极限 129 MPa，准确度 ± 41.3 kPa，分辨率 2.06 kPa，长期稳定性 ± 34.5 kPa/yr（连续保持 150 °C），工作温度范围 25~175 °C。该系统具有非常高的精度和足够的可靠性，目前已是成熟的商品。

3.1.2 温度监测

分布式光纤温度传感器可以沿整个完井长度连续地采集温度资料，从而对油井进行温度监测，提供井下温度参数变化的定性和定量信息。传统的测温工具只能在任何给定时间内测量某个点的温度，要测试全范围的温度，点式传感器只能在井中来回移动才能实现，不可避免地对井内环境平衡造成影响。光纤分布式温度传感器的优势在于光纤无须在检测区域内来回移动，能保证井内的温度平衡状态不受影响。而且由于光纤被置于毛细钢管内，因此凡毛细钢管能通达的地方都可进行光纤分布式温度传感器测试。

最广泛地应用于井下监测应用的光纤传感器之一就是喇曼背向散射分布式温度探测器，这种传感器已经在测量井筒温度剖面（特别是在蒸汽驱井）中得到了广泛的应用。对于光纤分布式温度传感器系统，英国 Sensa 公司一直处于技术领先地位，有一系列产品问世，而且与各大石油公司合作，积极探索光纤分布式温度传感器在石油井下的应用。CiDRA 公司也一直在研究光纤温度传感器，目前该公司的温度传感器技术指标为：测量范围 0~175 °C，准确度 ± 1 °C，分辨率 0.1 °C，长期稳定性 ± 1 °C/yr（150 °C下连续使用）。

分析和处理由分布式光纤传感器得到的油井中的温度分布数据，可以获得沿油井深度的相关信息，从而分析得到测井所需要的相关参数，为石油测井服务。

基于喇曼散射的分布式光纤传感技术是目前比较成熟的技术。安捷伦公司的分布式温度传感系统

(DTS)，温度测量范围为-10~60 °C，空间分辨率为 1 m，可实时测量光纤链路上的温度分布曲线和各点温度随时间的变化曲线。目前，大部分的 DTS 产品测量距离在 50 km 左右，温度精度为 ± 1 °C，空间分辨率为 1 m。

哈尔滨理工大学的艾红等人构建了一套基于喇曼散射原理的油井温度在线监测方案，试验证明其空间定位精度和温度分辨率都达到了比较高的水平^[5]。

3.2 油气管道安全监测

油气管道运输原油时，存在各种内在或外在的原因致使输运管道发生损坏，如温度的变化使管道周围的土壤发生变化，从而使管道产生形变致损坏，原油中的泥沙对管道内壁产生不可避免的磨损，原油中的其他化学成分则加速了管道壁的腐蚀，从而造成管道的损坏等等。分布式光纤传感系统可以检测出腐蚀面积很小（几十平方厘米）、腐蚀深度为 50%左右的缺陷。在测量范围上也突破了以前的局限，达到数百公里。分布式光纤传感技术在该领域的应用，实现了长距离管道完整性的实时监测。

中国海洋石油公司和浙江大学合作开发了长距离海底管道分布式光纤传感技术^[6]，为解决单个分布式光纤传感器传感距离不足、难以实现长距离的海底管道检测任务的问题，提出利用多个分布式光纤传感器串联的方法，其具体形式如图 4。

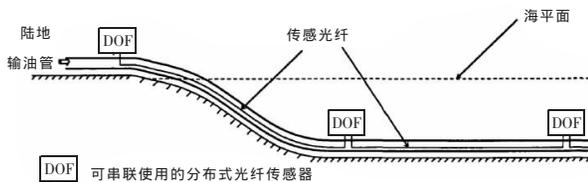


图4 串联分布式光纤传感器

采用波分复用技术解决数据采集和传输问题，波长 1.5 μm 和 1.3 μm 的光被耦合进同一根光纤，其中 1.5 μm 的光被用作传感测量海底管道的应变信息，波长 1.3 μm 的光被用于传送传递检测到的应变信息，实现利用一根光纤完成海底管道应变信息的采集和传输。

辽宁工程技术大学的赵乃卓等人将光纤传感技术与小波变换方法应用到北方石油管道冰堵监测中,实现了冰堵定位。其他研究者也对石油运输管道的安全检测开展了研究工作,进一步提高了测量精度^[7-9]。哈尔滨工业大学的何俊在其博士论文中,比较深入地研究了分布式光纤传感的关键技术,设计了石油工业井下应用的传感器结构,并提出一种实际应用的温度补偿办法^[10]。

4 结论与展望

综上所述,分布式光纤传感系统因其传感与光

传输都产生于光纤本身,能够实时连续地获得沿光纤分布的物理信息,在石油测井和管道运输等领域有着极其可观的发展前景。目前,全世界各大石油生产公司都投入了巨资来研究和开发光纤传感器在石油工业领域中的应用,分布式光纤传感系统经过不断改进之后,也将大面积推广使用。目前,我国的此类产品在测量距离和测量精度上与国外存在着一定的差距。石油的储量和开发对经济发展起着关键的作用,石油物理探测技术的提高是开采和应用的必要条件,因此,应该在实践中进一步发展光纤传感探测技术,跟上国际水平。

参考文献

- [1] 刘敏敏,周峰,杜志顺. 光纤传感器在石油测井中的应用[J]. 光学与光电技术, 2008, 6(3): 18-21.
- [2] 武磊. 国外生产测井新技术[J]. 内蒙古石油化工, 2010(21): 116-118.
- [3] 刘文. 基于喇曼散射的分布式光纤传感系统的研究[D]. 武汉: 华中科技大学硕士学位论文, 2005.
- [4] 倪玉婷. 基于布里渊散射的分布式光纤传感器的实用模型和模拟仿真[D]. 天津: 天津大学硕士学位论文, 2006.
- [5] 艾红,陈闻新. 基于光纤传感器的油井温度场监测研究[J]. 光通信技术, 2010(3): 15-17.
- [6] 张恩勇. 海底管道分布式光纤传感技术的基础研究[D]. 杭州: 浙江大学博士学位论文, 2004.
- [7] 赵乃卓,郭光朝. 检测石油管道冰堵与定位的光纤传感器的研究[J]. 传感器与微系统, 2010, 29(9): 30-32.
- [8] 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): 8-14.
- [9] 张义强,杜永欣,吴国伟,等. 油井分布式光纤测温系统研究与应用[J]. 石油机械, 2003, 31(6): 6-9.
- [10] 何俊. 分布式光纤传感系统关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学博士学位论文, 2010.

作者简介: 鄂书林 (1963-), 女, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事光电子器件、光纤传感器方面的研究。

E-mail: eshulin@sohu.com