

文章编号:1673-5005(2007)01-0173-04

综述

数字油田中的光纤技术

陶果¹, 张向林¹, 王兵¹, 邹辉²

(1. 中国石油大学 资源与信息学院, 北京 102249; 2. 中国石油天然气集团公司 工程技术与市场部, 北京 100724)

摘要:从数字油田的组成和光纤传感器的工作原理出发,探讨了光纤传感器在油田勘探、开发、油藏监测、油气储运、管线监测等及其辅助设施中的应用优势,并讨论了光纤传感器在数字油田建设中的地位,对比分析了国内外光纤传感器在油田的应用情况和前景。

关键词:数字油田; 光纤; 油田监测; 传感器

中图分类号: TN 253 **文献标识码:** A

Optical fiber technology in digital oil field

TAO Guo¹, ZHANG Xiang-lin¹, WANG Bing¹, ZOU Hui²

(1. Faculty of Geo-Resource and Information in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Engineering Technology and Marketing Department, China National Petroleum Company, Beijing 100724, China)

Abstract: The important role of optical fiber technology in digital oil field and the potential of the new sensor technology for oil field prospecting exploitation, reservoir monitoring, oil & gas transportation and storage and pipe line monitoring were discussed on the basis of the composition of digital oil field and operating principle of optical fiber sensor technology. The development and applications of optical fiber sensors in oversea oil fields were also analyzed as a comparison.

Key words: digital oil field; optical fiber; reservoir monitoring; sensor technology

数字油田由信息的采集、专业数据库及管理平台组成。信息的采集是数字油田最重要的部分,包括油田勘探、油藏评价、开发开采、输油管线、油气储运、油田建设等方面的数据采集,涉及地震、测井、录井、试油试采、采油、油藏监测、油气集输、消防(火灾、有毒物资泄漏等)、化工等行业。油田数据的采集大多是在防静电、易燃、易爆、有毒等恶劣环境下,所以要求采集系统具有防静电、绝缘等特点,光纤传感器及光纤传输具有抗电磁干扰、电绝缘、耐腐蚀、本质安全、可工作于恶劣环境、传输距离远、信息量大、使用寿命长、灵敏度高、重量轻、体积小、可挠曲、便于复用、便于成网测量及对被测介质影响小等优点^[1],非常适合在石油及化工行业中应用。

1 工作原理

传感器的基本作用是将某种形式的输入能量

(被测对象)的变化转换为同种或其他形式的能量(信号)的单值变化。

光纤不仅可以作为光波的传输媒质,而且光波在光纤中传播时表征光波的特征参量(振幅、相位、偏振态、频率、波长等)因外界因素(如温度、压力、磁场、电场、位移、化学变化等)的作用间接或直接地发生变化,从而可将光纤用作传感器元件来探测各种待测量(物理量、化学量和生物量),这就是光纤传感器的基本原理^[1-2]。

一般的光纤传感系统由光源、光缆、光纤传感器件、光电转换及信号处理组成,光波作为载波经入射光纤传输到传感头,光波的某些特征参量在传感头内被外界物理参量所调制,含有被调制信息的光波经出射光纤传输到光电转换部分,解调后就能得到被测量信息的大小和状态。

收稿日期:2006-04-05

基金项目:国家“863”计划项目(2006AA06Z207)

作者简介:陶果(1952-),男(汉族),新疆河子人,教授,博士,博士生导师,从事石油勘探开发测井信息处理工作。

2 传感器的应用

2.1 石油勘探

石油勘探以地震勘探为主,通过人工激发地震,用地震检波器单元在地面或井中采集来自地下目标体的信号,经大线传输到记录仪,通过技术处理和地质解释,推断地质差异体的结构、构造,预测油气储层。当前地震勘探仪器的动态范围已达 130 dB,而检波器的动态范围在 50 dB 以下,成为地震勘探的瓶颈^[3],由于光纤 Bragg 光栅具有动态宽、抗电磁干扰、复用能力强、精度高、重量轻、体积小、灵敏度高等优点,因此,光纤 Bragg 光栅地震检波器突破了传统检波器的瓶颈,使检波器的性能得到了极大的改善,光纤 Bragg 光栅地震检波器将引起地震勘探装备的革命。

2.2 石油开采开发

在油田的开发生产中,须对井下多相流、温度、压力、流体持率等参数进行测试,以了解油井的产液及注水井的注水情况。

光纤流量传感器^[4-10]有井下多相流光纤流量计、光纤涡轮流量计、光纤涡街流量计、光纤小流量传感器等,具有线性、重复性好、抗电磁干扰等优点,测量的最小流量为 0.02 m³/d。

光纤传感器与混合流体电阻率、介电常数无关,基于 U 型弯曲光纤的传输功率随外界介质折射率变化而变化^[11-12],油、水、气三相的折射率分别为 1.48~1.50, 1.33, 1,各相差别较大,对水中含油、油中含水、水中含气及油中含气的测定非常灵敏,可达到全量程 0~100%,克服了传统持率准确性差、分辨率低及不能同时分辨油和气的缺点,同时可以测量流体的密度,因与流型无关而消除了流型交叉的影响,精度较高,没有放射性污染及人体伤害。

随着开采深度的增加,井下的温度、压力不断升高,目前广泛使用的电子式压力、温度传感器在高温环境中的工作漂移、可靠性、使用条件问题突出,光纤传感器由于没有井下电子线路,具有耐高温等优点,非常适合温度、压力测量,特别是稠油的开采采用的是注蒸汽或火烧的方法,温度高达 300℃,目前的温度压力仪器无能为力,只有光纤传感器及光缆可以满足,国内外油田已经有现场应用的报道。在众多光纤传感器中,可用于油气井下温度、压力测量的光纤传感器主要有^[13-15]光纤拉曼散射型、EFPI 型(非本征型 F-P 干涉)、FBG 型(布拉格光栅)3 大类,每类又有许多种。分布式光纤测量系统(DTS)

利用光纤后向拉曼散射的温度效应,可以对光纤所在的温度场进行实时测量,分布式结构使得该系统能够实现实时快速多点测温,测量过程不会影响原始温度场的分布。拉曼散射型光纤传感器为强度调制型传感器,仅适用于温度监测,无法提供压力、流量等参量,而 EFPI 型和 FBG 型光纤传感器为波长编码型传感器,具有灵敏度高、可同时测量压力、温度、应力等多个参量的特点。

自然伽马射线测量是利用了光纤光致损耗和光致发光等物理效应^[16-17],比常规核探测器具有更多的优越性,因光电倍增管不在井下,延长了使用寿命,具有高速率、大容量传输能力,可搭载其他井下仪器信号。

2.3 油藏动态监测

对油藏进行动态监测得到油、气、水的动态分布,为优化油、气开采方案及提高原油采收率,预防生产过程中的油管套管损坏提供科学依据。

永久井下光纤流量计、光纤温度计、光纤压力计、光纤持率/密度计及光纤地震检波器适合永久井下监测,国外的多项工程实践证明,在油井内通过光纤温度、压力等传感器能及时对油井进行必要的控制,结果可以使原油产量提高 10% 以上^[2],经济效益非常显著。永久井下地震测量可提供时延流体运动、漏失的油气层、油田低渗透储层压裂的裂缝动态和其他油藏参数的图像,井下永久地震测量获取的数据具有连续性和可比性^[18]。利用埋置于地面或地下的光纤光栅地震检波器采集数据可进行注水地震监测、气前缘移动监测和热强化采油过程监测等^[19]。

2.4 油气传输管线监测

在油气传输中,原油由于低温等原因结蜡堵塞、油气传输管道由于腐蚀或质量问题以及外界自然和人为破坏作用等发生油气泄漏,不仅会造成资源损失和环境污染,而且会产生火灾爆炸,因此对管道进行实时监测,及时发现泄漏和预报隐患十分重要。由于光纤传感器绝缘,不带电,是油气传输监测的理想选择,分布式光纤温度计和光纤压力计、光纤流量计及光纤光栅地震检波器一种或几种组合通过光纤与控制监测系统相连,可实现监测或控制。

2.5 油气存储监测

油田联合站担负原油脱水、原油稳定、污水处理等任务,是油田原油外输的咽喉要道,油罐车、加油站储油罐内要知道原油含水情况和油水界面,炼油厂原油要严格控制含水率,这些地方均属易燃、易爆区,严禁烟火。电传传感器很容易产生火花,引起火

灾,所以光纤传感器因其绝缘,不带电及易于分辨油水界面而将广泛应用。光纤压力计^[14-15]、光纤折射率计^[11-12]测量油水界面及油水含量非常精确,既安全可靠、便于远距离遥测,又避免了电传感器在测量中所引入的不安全因素。

加工和储备汽、柴油的工厂和仓库,由于各种原因可能发生油料泄漏,分布式光纤压力传感器或分布式光纤振动传感器^[14]既可以直接对汽油、柴油进行接触测量,又避免了电传感器在测量中所引入的不安全因素。

2.6 有毒气体检测及监测

油田油气开采中油气或地层中常含有毒 H_2S 、 CO_2 ,如四川开县的天然气井喷事故造成上百人的死亡,家庭及使用天然气或液化气作燃料的地方常因泄漏而发生爆炸或人员中毒,这些地方有毒气体的检测和监测是非常必要的。放射性泄漏危害健康,前苏联切尔诺贝利核电站核泄漏已有5.5万人丧生,7万人成为残疾,30多万人受放射伤害死去^[20],油田存在和使用大量放射性物品,有可能丢失或被盗发生放射性泄漏,造成人员的伤害和环境污染,所以放射性检测和监测也是非常必要的。光纤 H_2S 和 CO_2 检测仪、光纤伽马检测仪等既灵敏又安全。

2.7 电力高压线的测量

油田采油井分布广,高压线分布错综复杂,分布式光纤温度计、压力计及振动传感器因其抗电磁干扰、电绝缘、耐腐蚀、使用寿命长、重量轻、可挠曲、便于复用成网等优点被广泛应用于高压线路的测量。

2.8 抽油井的监测

油田采油井分布广,且大部分采用外加助力采油,采油设备主要由电机、驴头及抽油杆组成,有时由于不产液,抽油机干抽,白白消耗能源,有时由于井中有杂物抽油杆被挤弯或烧毁电机,有时由于犯罪分子的破坏造成原油的泄漏等,靠采油工巡视很难及时发现,一般的传感器很容易被犯罪分子破坏或偷窃,光纤传感器因其使用寿命长、重量轻、体积小、复用,易于镶嵌在各种材料中,是非常理想的选择。光纤温度计、光纤应力计镶嵌在抽油杆中,如不产液抽油机干抽时,抽油杆温度升高,当抽油杆被挤时,应力突然增大。光纤温度计镶嵌在电机中,当电机工作不正常时,温度升高。光纤传感器通过光缆或无线通讯与控制室相联,实现实时监测和自动控制。

油水井由于各种原因造成油、套管的脱落或错断、破损,镶嵌在油、套管中的光纤应力传感器可以实时监测油、套管应力和地层应力。

2.9 其他方面的应用

光纤传感器在钻井、油建、基础设施建设、交通、大桥、医院、学校等领域均有广泛的应用前景。

3 国内外油田应用情况

我国的光纤传感器研究大多数集中于大专院校和科研单位,仍然未完成由实验室向工业生产产品化的过渡,总体水平落后于国外。部分油田如大庆、辽河、南阳等油田有温度、压力光纤传感器应用的报道。

1995年美国加利福尼亚州油田安装了分布式光纤温度传感器,在500℃以上的高温条件下光纤仍能正常工作,用于监测蒸汽驱油井的参数^[2]。2002年8月,北海挪威海域 Oseberg Est (东) 油田 E-11C 井中安装了工业用多光纤压力温度计,与此同时还安装了一条分布式温度传感(DTS)光纤和一个地面操纵的智能完井流量控制仪^[21]。2002年12月,在法国西南部的 Izaute 贮气井中完成多分量井下光纤光栅地震检波器组的安装,其中5个3C地震测点用于变井源距垂直地震剖面测量,并为规划的时延成像提供重复性 VSP 测量,安装在储层层面的第6个3C测点用来记录潜在的微地震事件^[22],获取的资料与先前常规电缆测井资料具有很好的一致性,而且比地面地震测量资料的分辨率高,提高了识别气水界面和解释近井眼油藏构造的能力。

传输管道光纤传感监测安全防御系统目前正在全世界逐步得到广泛应用,美国2003年4月进行了管线监测系统的安装和调试,系统的报警率在75%~100%。

4 结束语

光纤传感器以其独特的抗电磁干扰、抗环境噪声优势,以及电气绝缘性及自身安全性等特点,广泛应用于油田的各个方面,特别是易燃、易爆、有毒环境。光纤传感器是数字油田建设的最重要组成部分,将会为油田建设和发展带来巨大的经济和社会效益。

参考文献:

- [1] 郭冈珍. 光纤传感技术与应用[M]. 杭州:浙江大学出版社,1992.
- [2] 童茂松,彭会忠,杜国同. 油田测试中的光纤传感技术[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2004(1):14-18.
TONG Mao-song, PENG Hui-zhong, DU Guo-tong. Fiber optic sensors in oil field measurement[J]. Optical Fiber & Electric Cable and their Applications, 2004(1): 14-18.
- [3] 付小宁. 模态对滑动——地震检波器面临的问题[J].

- 石油仪器,2001,15(2):11-12.
FU Xiao-ning. Mode-pair sliding—the problem to be solved in geophones[J]. Petroleum Instruments, 2001, 15(2):11-12.
- [4] 姚骏,付敬奇,张承燕,等. 光纤流量传感器的进展[J]. 传感器技术,2002,21(3):1-4.
YAO Jun, FU Jing-qi, ZHANG Cheng-yan, et al. Development of the optic fiber flowmeter [J]. Journal of Transducer Technology, 2002, 21(3):1-4.
- [5] 王学伟,王琳. 光纤流量传感器[J]. 电测与仪表,1996(11):45-48.
WANG Xue-wei, WANG Lin. Flow transducer of optical fiber[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 1996(11):45-48.
- [6] Tor K Krag. Permanent fiber-optic monitoring at Northstar [J]. Journal of Petroleum Technology, 2002, 54(9):12-14.
- [7] 曾良才,陈新元,陈文霞. 光栅传感器及在流量测试中的应用[J]. 传感器技术,2002,21(7):44-46.
ZENG Liang-cai, CHEN Xin-yuan, CHEN Wen-xia. Raster sensor and its application in the flow test [J]. Journal of Transducer Technology, 2002,21(7):44-46.
- [8] 田新启. 光纤速度式涡轮流量传感器[J]. 自动化仪表,2000,21(3):14-16.
TIAN Xin-qi. The velocity type turbine flow transducer with optical fiber[J]. Process Automation Instrumentation, 2000, 21(3): 14-16.
- [9] 向永江. 全光纤激光多普勒测速技术的研究[J]. 光学学报,1998,12(11):1053-1056.
XIANG Yong-jiang. Investigation of all fiber laser Doppler velocimetry [J]. Acta Optica Sinica, 1998, 12(11):1053-1056.
- [10] CARVALHO R T de, BLAKE J. Slow-flow measurements and fluid dynamics analysis using the Fresnel drag effect [J]. Applied Optics, 1994, 33(25):6073-6077.
- [11] 阮航,陈尧生,陈少武,等. 基于折射率调制的持水率测定方法研究[J]. 测井技术, 1995, 19(5):329-333.
RUAN Hang, CHEN Yao-sheng, CHEN Shao-wu, et al. On water holdup meter based on refractive index modulation [J]. Well Logging Technology, 1995, 19(5):329-333.
- [12] 徐荣,叶培大,龚倩,等. 光纤传感技术测量气液两相流持气率研究[J]. 仪表技术与传感器,1999(9):36-38.
XU Rong, YE Pei-da, GONG Qian, et al. Research on the measurement of the gas holdup in gas/liquid dual-phase flow using optical fiber sensing technology [J]. Instrument Technique and Sensor, 1999(9):36-38.
- [13] 杨三青. 井下光纤式压力温度复合传感器设计[J]. 仪表技术与传感器,2000(3):6-7.
YANG San-qing. Design of optical fiber pressure temperature complex sensor below well [J]. Instrument Technique and Sensor, 2000(3):6-7.
- [14] 曾祥楷,饶云江,余般梅,等. 光纤应变、温度、振动同时测量新技术的研究[J]. 光子学报,2001,31(10):1254-1257.
ZENG Xiang-kai, RAO Yun-jiang, YU Ban-mei, et al. Simultaneous static-strain, temperature and vibration measurement using a single fiber-optic sensor[J]. Acta Photonica Sinica, 2001,31(10):1254-1257.
- [15] 关铁梁. 同时测量应力和温度的光纤传感技术述评[J]. 传感技术学报,1997(2):53-57.
GUAN Tie-liang. Fiber-optical sensor technology for simultaneous measurements of strain and temperature[J]. Journal of Transduction Technology, 1997(2):53-57.
- [16] 夏克文,宋建平. 激光光纤核测井技术[J]. 石油仪器,2001(2):8-10.
XIA Ke-wen, SONG Jian-ping. Nuclear logging technology with laser-optical fiber[J]. Petroleum Instruments, 2001(2):8-10.
- [17] 刘方新,张辰华,李宗民,等. 光纤 γ 辐照感生损耗的研究[J]. 中国科学技术大学学报,1994,24(3):390-393.
LIU fang-xin, ZHANG Chen-hua, LI Zong-min, et al. Research on γ -ray radiolytic loss [J]. Journal of China University of Science and Technology, 1994, 24(3):390-393.
- [18] 陈小宏,牟永光. 四维地震油藏监测技术及其应用[J]. 石油地球物理勘探,1998,33(6):707-715.
CHEN Xiao-hong, MOU Yong-guang. Four-dimensional seismic reservoir monitoring technique and its application [J]. Oil Geophysical Prospecting, 1998,33(6):707-715.
- [19] DEFLANDRE J P, LAURENT J, MICHON D, BLONDIN E. Microseismic surveying and repeated VSPs for monitoring an underground gas storage reservoir using permanent geophones[J]. First Break, 1995, 13(44):129-138.
- [20] 自然之友·20世纪环境警示录[M]. 北京:华夏出版社,2001.
- [21] BJORNSTAD B, TVISTEROY, ERIKSRUD M. Fiber optic well monitoring system [R]. SPE 23147, 1991.
- [22] ERLANDSEN S, VOLD G, MAKIN G D. World's first multiple fiber-optic intelligent well [J]. World Oil, 2003,224(3):29-32.

(编辑 修荣荣)