

文章编号 : 0258-7025(2002)10-0955-04

激光光纤压力检测技术在海洋石油 勘探中的应用研究

赵 勇, 廖延彪

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

提要 介绍了一种用于海洋石油勘探的反射式强度调制型光纤压力传感器。依据新颖的网络补偿技术,提高了强度调制型光纤传感器的长期稳定性和检测精度。从理论上描述了测量误差补偿机理。初步的位移测试实验验证了所设计研制的传感器的正确性和实用性,压力的测量精度可达到 0.1 MPa。将这种传感器应用于海洋井下压力的检测,可具有良好的稳定性和极大的实用价值,测量稳定性可以达到 0.15%。

关键词 光纤压力传感器,激光测量,石油勘探,补偿技术

中图分类号 TN 253; TN 247 文献标识码 A

Research on the Laser Fiber-optic Pressure Measurement Technique for Offshore Oil Exploration

ZHAO Yong, LIAO Yan-biao

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract A novel reflex fiber-optic pressure sensor used in the offshore oil exploration was proposed. Based on the original network compensation technique, the long-term stability and the measurement accuracy of the intensity-modulated fiber-optic sensors were tremendously improved. The error compensation principle of the sensor was theoretically described. Preliminary experimental results indicated the feasibility and practicability, and the estimated pressure measurement accuracy will reach 0.1 MPa. The measurement stability can reach 0.15% when it was applied on the underground crude oil exploration.

Key words fiber-optic pressure sensor, laser measurement, offshore oil exploration, compensation technique

1 引 言

海洋石油勘探工业中,井下原油成分复杂,油藏可分成多个层面,每层产油的速度、气油水比、压力和温度都不一样。油藏工程师的目标就是最大限度地采出油田中的油气储量。事实上,目前的采收率平均仅为 35%。为了提高采收率,石油工业正趋向于提高油井产量和油藏管理技术,如“智能井”或“智能完井”。这一趋势的发展本身需要在井筒里放置永久性传感器。压力和温度是基本的油藏工程参数,对井下压力和温度广泛使用永久性监测手段。实践证明,常规压力和温度传感器还有一些严重的

缺陷。首先是所需的井下电子仪器不能在高温下工作,另外,多路传输的不足限制了常规传感器的空间分辨力。光纤本身的优越性促使了光纤技术的发展,特别是在井下应用中,这些优越性表现为:1) 无需井下电子仪器;2) 本身的安全性(防燃、防爆);3) 不受电磁干扰;4) 可在高温下工作(175℃以上);5) 可进行多路传输,或以分布模式工作,从而获得空间剖面;6) 传感器横截面小,从而大大减少在井筒中所占的空间;7) 耐腐蚀;8) 可以柔性弯曲,并可实现远距离信号传输,信号损耗低。

本文介绍了一种用于海上石油勘探的反射式强度调制型光纤压力传感器。依据新颖的网络补偿技

收稿日期 2001-07-06;收到修改稿日期 2001-10-15

作者简介 赵勇(1973—)男,清华大学电子工程系博士后,博士,毕业于哈尔滨工业大学,主要从事激光光纤传感技术及其在工业中的应用研究。E-mail: zhaoy@ee.tsinghua.edu.cn

术,可以大大提高强度调制型光纤传感器的长期稳定性和检测精度,提高了这种传感器的性能价格比,从而为强度调制型光纤传感器的实用化发展提供技术保证。

2 传感器结构及补偿机理

由于这种传感器探头需要工作在上千米以下的油井中,所以对光纤的选择有较高的要求:从传输特性上,要求对信号的衰减小,传输损耗低;从材质上,要求光纤本体及保护层等外围、加强结构具有较好的长期防油腐蚀特性。光纤传感器探头结构如图 1 所示。如图 1(a),金属应变膜片 1 装在压力腔 3 内,压力腔内的压力与输入的待测压力相同,探头上端带有标准螺纹可直接与各种标准连接器相连,膜片选用与探头材料线胀系数相近的金属膜片,以降低温度变化的影响。光纤束 4 固化在套管中,并通过紧固装置和底盖 5 将其定位在工作点处,以保证光纤传感器工作在灵敏度最大、线性度最好的特性区

间上。测量时,外界压力的变化导致金属膜片的微小变形,并引起与膜片固定在一起的反射镜 2 的微小位移,光纤传感器将感受这一位移的变动量,从而可以换算出被测压力的大小。如图 1(b),发射光纤选用数值孔径比较小的标准单模光纤,目的是为了测量的空间分辨力,接收光纤选用数值孔径较大的多模光纤以同心圆的形式排列在发射光纤的周围,目的是为了测量的信噪比。整个光纤探头外径为 $\phi 2\text{ mm}$ 。

传感器特性的长期稳定性一直是影响强度调制型光纤传感器进一步实用化和商品化的关键问题,其影响因素主要包括激光器光源强度的波动、探测器的温度漂移、光纤传输过程中的损耗以及反射光对激光器发光强度的影响等。迄今为止,国内外研究者对光纤传感器的补偿技术做出了大量的理论研究和试验工作^[1,2],本文在前人工作^[3]的基础上利用一种新颖、简单的光纤补偿网络结构,有效地实现了上述误差源对测量结果的影响。

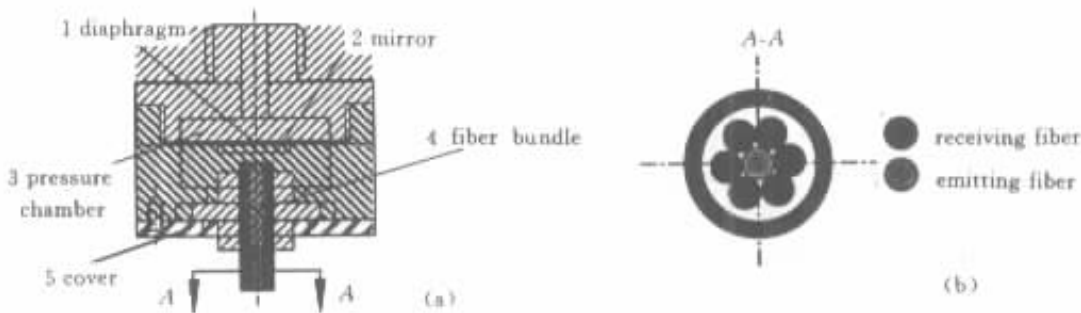


图 1 光纤压力传感器探头结构

(a) 探头机械结构 (b) 探头光纤排列结构

Fig.1 Structure of the fiber-optic pressure sensor probe

(a) mechanical structure ;(b) fiber arrangement

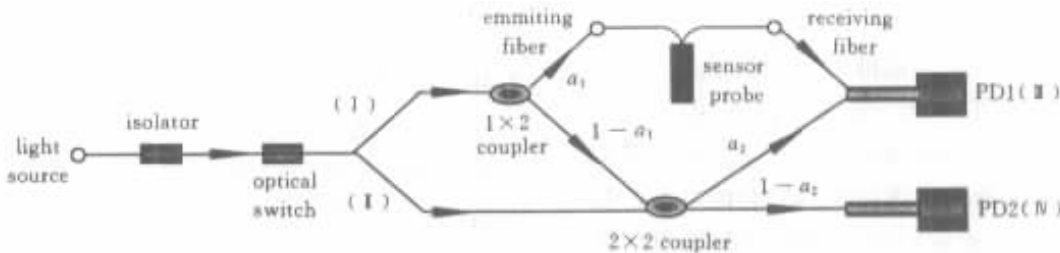


图 2 光纤压力传感器补偿网络结构

Fig.2 Compensation network structure of the fiber-optic pressure sensor

光纤补偿网络结构如图 2 所示。整个系统由全光纤结构组成,包括光源,光隔离器,光开关,1×2 和 2×2 分光耦合器,发射和接收光纤,光电探测器。

工作原理分析如下:隔离器保证传感器在感受镜面反射光时,没有光返回进入激光器以影响光功率的稳定,光开关的作用是将激光器发出的光在不同的

时刻耦合进 (I) 和 (II) 两路光通道 ; 光的传输通道可分为四条 , 并分别由两只光电探测器接收 , 如图 3

所示 , 其传输系数分别设为 δ_{13} , δ_{14} , δ_{23} , δ_{24} 。
由图 3 可以得出 , 传输系数可分别写成

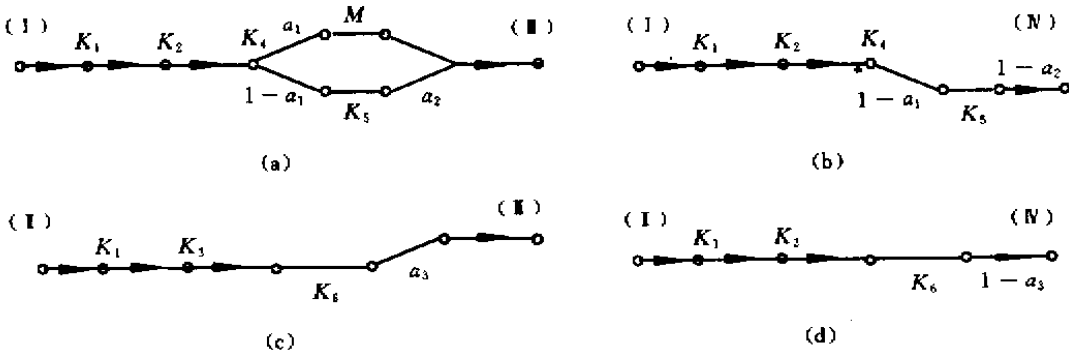


图 3 四条传输光路 (δ_{13} , δ_{14} , δ_{23} , δ_{24})

Fig. 3 Four light transmission paths (δ_{13} , δ_{14} , δ_{23} , δ_{24})

$$\delta_{13} = K_1 K_2 K_4 a_1 M + K_1 K_2 K_4 (1 - a_1) K_5 a_2 \quad (1)$$

$$\delta_{14} = K_1 K_2 K_4 (1 - a_1) K_5 (1 - a_2) \quad (2)$$

$$\delta_{23} = K_1 K_3 K_6 a_3 \quad (3)$$

$$\delta_{24} = K_1 K_3 K_6 (1 - a_3) \quad (4)$$

其中 , K_i ($i = 1, 2, \dots, 6$) 为隔离器、光开关及分光耦合器的传光损耗系数 , a_i ($i = 1, 2, 3$) 分别为耦合器的分光系数 , M 为传感器调制函数。

这样 , 在不同的时间段内 , 每只探测器将探测到两组信号 Q_{13} , Q_{23} 和 Q_{14} , Q_{24} , 分别可表示为

$$Q_{13} = P \cdot \epsilon_{13} \cdot \delta_{13} \cdot H_1 \cdot A_1 \quad (5)$$

$$Q_{23} = P \cdot \epsilon_{23} \cdot \delta_{23} \cdot H_1 \cdot A_1 \quad (6)$$

$$Q_{14} = P \cdot \epsilon_{14} \cdot \delta_{14} \cdot H_2 \cdot A_2 \quad (7)$$

$$Q_{24} = P \cdot \epsilon_{24} \cdot \delta_{24} \cdot H_2 \cdot A_2 \quad (8)$$

其中 , P 为激光器出光功率 , ϵ_{13} , ϵ_{23} , ϵ_{14} , ϵ_{24} 分别为四条光通道中的光纤传输损耗系数 , H_1 , H_2 及 A_1 , A_2 分别为两组光电器件的响应度和放大电路的放大倍数。对这些信号进行归一化处理 , 令 $V =$

$$\frac{Q_{13} Q_{24}}{Q_{23} Q_{14}} = \frac{\epsilon_{13} \epsilon_{24} \delta_{13} \delta_{24}}{\epsilon_{23} \epsilon_{14} \delta_{23} \delta_{14}}$$

$$V = \frac{\epsilon_{13} \epsilon_{24} a_1 (1 - a_3)}{\epsilon_{23} \epsilon_{14} a_3 (1 - a_1) (1 - a_2) K_5} M + \frac{\epsilon_{13} \epsilon_{24} a_2 (1 - a_3)}{\epsilon_{23} \epsilon_{14} a_3 (1 - a_2)} = \mathcal{R} M + \mathcal{Z} \quad (9)$$

其中 , $\mathcal{R} = \frac{\epsilon_{13} \epsilon_{24} a_1 (1 - a_3)}{\epsilon_{23} \epsilon_{14} a_3 (1 - a_1) (1 - a_2) K_5}$, $\mathcal{Z} = \frac{\epsilon_{13} \epsilon_{24} a_2 (1 - a_3)}{\epsilon_{23} \epsilon_{14} a_3 (1 - a_2)}$ 可见 , 在传感器网络参数不变的

情况下 , 系统的输出与传感信号 M 为线性的函数关系 , 与光源功率大小、光电器件响应度、放大电路的放大倍数等无关 , 从而可以改善光纤传感系统的长期稳定性和测量精度。

3 初步实验结果

本文所设计传感器的压力测量原理是通过感测由于压力作用于金属弹性膜片而产生的位移形变量 , 然后再通过膜片的压力 - 形变特性计算出待测压力值。关键之处在于提高光纤传感器性能的长期稳定性 , 即降低传感器特性受光源强度波动、环境温度变化以及传输光纤中的扰动损耗等的影响。所以在初期的试验中 , 首先对传感器的位移特性进行了试验。试验在常温常压条件下进行 , 光源选择中心波长为 1310 nm 的激光光源 , 尾纤输出的额定光功率为 2 mW ; 由于采取了网络补偿技术 , 所以可以不考虑光源输出光强的稳定性随温度及注入电流变化而漂移的影响。图 4 (a) (b) 分别为实验测得的传感器在添置补偿网络前后的位移特性电压输出信号。微位移由步进电机及精密丝杆驱动的微动导轨平台提供 , 最小步距为 0.8 μ m , 同时用 HP5528A 双频激光干涉仪监测位移的读数。从图中可以看出 , 在没有补偿网络的情况下 , 传感器特性受光源波动、温度变化以及传输光纤中的扰动等影响非常严重 , 而有了补偿网络后 , 传感器的特性变化不大 , 只是在传输光纤存在扰动的情况下 , 特性变化稍大些。研究发现 , 这主要是由于补偿网络中四条传输通道光纤长度不同造成的 , 只要将四条通道的光纤长度选得接近一致并尽量同时发生弯曲和扰动 (如通过

一起成缆的办法),这项误差会明显降低。从图 4 (b)中可以看到,传感器特性在 300 ~ 1000 μm 的测量区间线性度最好,灵敏度最高。所以传感器初始的工作点可根据实际情况选择在这个区间里。为了

估计传感器的测量灵敏度,在 600 ~ 700 μm 范围内,进行了传感器位移灵敏度测量实验,测量结果如表 1 所示。

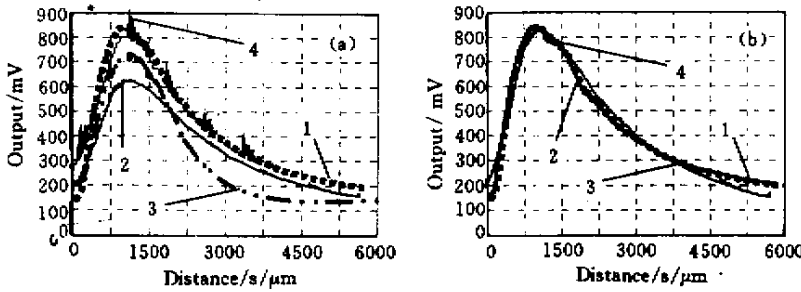


图 4 没有补偿网络(a)和有补偿网络(b)时传感器特性随光源功率降低(曲线 2)温度变化(曲线 3)及光纤扰动(曲线 4)等因素的变化(曲线 1 为常温下 $P = 1 \text{ mW}$ 时没有光纤扰动时的特性)

Fig.4 Sensor characteristics changed with light power flucturation (curve 2), temperature drift (curve 3) and fiber disturbance (curve 4) without (a) and with (b) the compensation network (curve 1 is the regular characteristics)

表 1 传感器位移灵敏度测量数据

Table 1 Sensitivity measurement data of the fiber-optic sensor

Input shift/ μm	600	610	620	630	640	650	660	670	680	690	700
Output voltage/mV	602.7	621.9	641.3	662.8	684.5	705.3	726.8	745.4	763.1	781.0	798.4
Error/mV		19.2	19.4	21.5	21.7	20.8	21.5	18.6	17.7	17.9	17.4
Sensitivity/ $\mu\text{m}/\text{mV}$		0.52	0.51	0.47	0.46	0.48	0.47	0.54	0.56	0.56	0.57

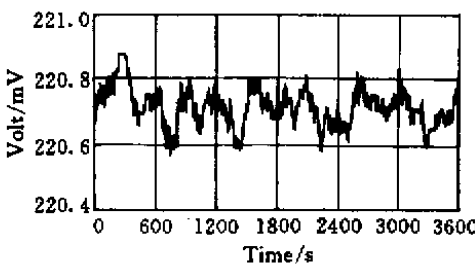


图 5 系统稳定性实验测试曲线
Fig.5 Stability measurement curve

表中数据表明,系统的位移灵敏度最好可以达到 0.46 $\mu\text{m}/\text{mV}$,而系统的数据采集精度可以保证在 0.2 mV,这样,测量的分辨力可达 0.1 μm 。根据膜片压力位移特性,估计测量精度可达 0.1 MPa。对系统的稳定性进行了长时间大量的监测,如图 5 给出一组在 60 min 内稳定性的监测结果,表明系统的稳定性可达 0.15%。

4 结 论

本文提出了一种用于海洋石油勘探中压力检测

的强度调制型光纤传感器。从理论上描述了光纤传感器的误差补偿机理。由于采用了补偿网络和特殊的传感器结构设计,测量结果具有不受光源波动、探测器灵敏度温度漂移、光纤损耗等因素影响的特点。初步的位移测试实验验证了所设计研制的传感器的正确性和实用性。将这种传感器应用于海洋油田井下压力的检测,可具有良好的稳定性和极大的实用价值,测量稳定性可以达到 0.15%。这种传感器还可以进一步推广到军事潜艇、海洋运输等领域。

参 考 文 献

- 1 L. B. Yuan. Automatic-compensated two-dimensional fiber-optic sensor [J]. *Optical Fiber Technology*, 1998, 4(4):490 ~ 498
- 2 Zhao Yong, Li Pengsheng, Wang Chenshuang et al.. A novel fiber-optic sensor used for small internal curved surface measurement [J]. *Sensors & Actuators A*, 2000, 86(3):211 ~ 215
- 3 Wang Jing, Li Rong, Zheng Weimin. Research on compensation network technology of an optical fiber sensor of measuring oil film thickness for thrust bearing [J]. *Large Electric Machine and Hydraulic Turbine* (大电机技术), 2000, (3):8 ~ 11 (in Chinese)