

用于高温高压井下的光纤传感器

黄正宇 曹砚锋¹ 靳 勇¹

(北京蔚蓝仕科技有限公司,北京 100083;中海石油研究总院,北京 100027)

摘 要 介绍了光纤传感器在恶劣环境井下的应用。传感头部分是基于干涉原理的光纤传感器,它的腔体长度会随着压力和温度发生变化。为了提高测量速度,一种以自校正(SCIB)原理为基础的干涉方法被应用到压力(或温度)信号的解调,这种方式能够针对白光漂移以及光纤损失的变化实现补偿。这种系统应用到传感器的制作当中,解调系统可以提供非常高的分辨率。实验结果显示:当压力传感器在(0—8 000) PSI 范围内工作,温度传感器在(0—600)℃范围工作时,这种SCIB系统能够达到0.1%的准确度。白光系统的分辨率大约在 ± 0.5 nm,动态变化范围在10 μ m,并提及井下长期的测试结果。

关键词 光纤传感器 温度传感器 压力传感器 井下

中图法分类号 TM253; **文献标志码** A

石油开发中如何提高低产井的采收率是一个非常棘手的问题。利用现有的技术,开发之后的油田仍然有三分之一的原油还在地下。为了了解井下状况,温度和压力参数对油田的开发和油藏管理是非常重要的^[1]。

一般情况下,电子传感设备的应用较广,其优势在于分辨率高,造价低等等。可是,能够在油井中如此苛刻的条件下(通常压力高达10 000 PSI,温度高达200℃)工作的电子传感器很少。在石油工业中,一些传感器通常被用于井下几千米,如何提供动力,怎样为将信号传输回控制系统都是传感器要解决的关键问题。

1 光纤传感器

1.1 光纤传感器的介绍

在国家重大科技专项资金支持下,进行了《智能完井关键技术研究》项目,笔者主要做了光纤井下温度压力监测的研究。

光纤传感器基于干涉测量法原理,传感器探头部分由两个磨光的光纤组成,它们被CO₂激光粘合在了一个玻璃管内部形成一个空腔对温度压力进行感应。为了增强传感器的机械稳定性并保护它不受水侵,还采用了一种使用软金属薄片的特殊的传感器装配技术。带有保护套的传感器探头尺寸大约是25 mm×1 mm。为了满足使用需求,开发出了信号解调结构是白光干涉计系统,它的分辨率高并且稳定性好。多模态的白光压力系统已经由蔚蓝仕公司测试完毕。

1.2 传感器探头的结构和组成

在各种各样的光纤传感器中,基于干涉法的传感器引起了许多研究者的注意^[2]。它的优点包括灵敏度高,对由不稳定光源和光纤损失引起的亮度波动不敏感。

通常,如果 $F-P$ 腔随着某一物理参数存在单调的增加和递减关系,那么这个物理参数就能够被测量。为了改进传感器探头对被测物理参数的敏感性,尽量减小中间过程中其他因素的干扰,对光纤和玻璃管来说,传感器的几何尺寸和材料都需要仔细筛选。

对压力测量来说,当一个流体静力学的压力作

用到传感器的探头,玻璃管会产生变形。结果, $F-P$ 的空气隙会发生改变。假设玻璃管的外径和内径分别是 r_0 和 r_1 ,那么压力 P 和空气隙变化量之间的关系可以表示为

$$\Delta G = \frac{L_0(p-p_0)r_0^2}{E(r_0^2-r_1^2)}(1-2\nu) \quad (1)$$

式(1)中, L_0 是有效的传感器长度,取决于两个焊接点之间的距离, p_0 是管内部的压力,通常情况下为常数。 E 是玻璃管的杨氏模量, ν 是玻璃管的泊松比。

公式 1 描述了压力传感器的空气隙随着压力的变化而改变。很明显,传感器的灵敏度与传感器几何尺寸如长度 L_0 和玻璃管的外径以及内径有关。同时,这些几何尺寸的选择也受其他因素的限制的,如传感器的尺寸和稳定性的要求。

对于复杂环境的压力测量(比如油井环境)来说,难点之一是怎样降低温度对传感器的影响。温度与传感器的关系可以表示成

$$\Delta G = (\alpha_0 L_0 - \alpha_1 L_1 - \alpha_2 L_2) \Delta T \quad (2)$$

式(2)中,是由温度变化引起的空气隙变化, L_0 是传感器的长度。 L_1 是输入光纤的长度,由输入焊接点和输入末端面决定, L_2 是反射光纤的长度,为另外一个焊接点到反射光纤的末端面之间距离,分别是玻璃管、入射光纤和反射光纤的热膨胀系数(CTE)。

从式(2)可以看出,通过选择合适的材料和优化几何参数,降低温度对传感器探头的依赖是可行的。用于引导光信号的输入光纤是由标准光纤制成的,所以其 CTE 不容易改变。为了满足高分辨率的要求, L_0 不能太小。所以压力传感器的设计关键在选择合适的玻璃套管的材料和反射光纤与优化 L_1/L_2 的值。

温度传感器的操作原理也可以由式(2)描述。与压力传感器相反,温度传感器的设计对玻璃套管和反射光纤材料的选择是为了增加温度的灵敏度。为了降低压力对温度传感器的依赖,一个大直径的玻璃管被粘合在温度传感器的外部,起到隔离外部的压力的作用。

压力和温度传感器都是使用高分辨率的传感器制作系统在 CPT 上面开发的。传感器的制作系统包括 5 个部分:一个 25 W 的 CO_2 激光,一个高分辨的 3D 平台,一个高分辨率的白光干涉仪,一个显微镜系统,计算机和电子控制系统。

图 2 显示的是制作完成的传感器细节照片。

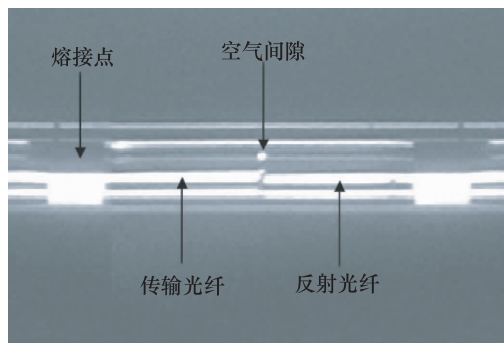


图 2 传感器细节照片

对于井下应用来说,带有连接光纤的传感器探头会被应用带入地下数千米。传感器和光纤通过进入液压油泵下面很小的管子直接下放至油井中。因此,要求传感器的探头要结实、灵活并且体积小。

为了使传感器探头更加耐用,传感器探头包装在一个金属薄片。这个保护盒既能起到金属防护的作用同时也是一个防水处理。带有保护装置的传感器的直径大约在 25 mm。

2 信号解调高性能白光干涉计

白光干涉光纤传感系统继承了传统相干计的优点,如抗光源漂移和传输损耗,高分辨率和大的动态范围等等。另一方面使用寿命长,低价格的宽带光源(如 LED)使整个系统的稳定性显著增强^[3-6]。

该白光干涉系统的结构如图 3 所示。

该白光系统结构较为精巧。一个 850 nm 的 LED(带宽为 60 nm)被作为光源使用。从传感器的信号头返回到光纤耦合光纤电脑插件光谱仪(PC2000 由海洋光学公司制造)。测量的频谱传送

到数据处理的电脑。

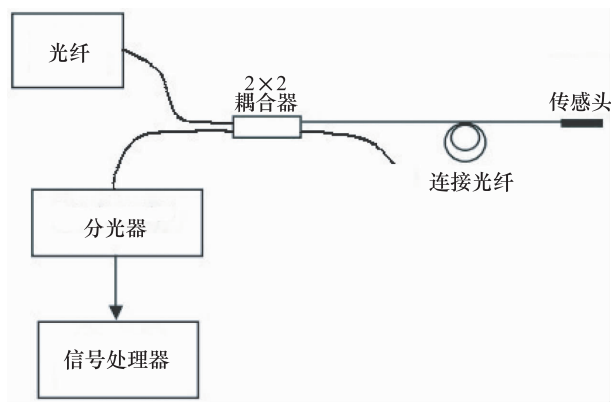


图3 白光干涉系统结构

干扰频谱分光计测量的公式为

$$I(\lambda) = 2I_s(\lambda) \left(1 + \cos\left(\frac{4\pi G}{\lambda} + \varphi_0\right) \right) \tag{3}$$

式(3)中, I_s 是该光源的光谱功率分布, φ_0 是任意初始阶段偏差。将源频谱归一化,干扰输出可以表示为

$$I_n(\lambda) = 2 \left(1 + \cos\left(\frac{4\pi G}{\lambda} + \varphi_0\right) \right) \tag{4}$$

空气隙值 G 通过方程式(4) 计算,然后用于物理参数的解调。

从归一化的频谱中解调 G 有各种方法。他们中的大多数可以被归为两类。第一类是基于跟踪的干扰频谱(如峰值点或谷点特殊点)。这种方法的优点是测量结果分辨率高,但只有相对测量才可以达到。第二种方法是根据使用干扰频谱的两个或更多的点来恢复一个较低分辨率的 G 的绝对值。有 CPT 研发的一种新的数据处理方法则同时实现高分辨率和绝对测量。

在白色的灯光系统,只要相干条件得到满足,传感器头可以在任何范围工作。在多模态白光温度传感器系统,动态范围为 10 μm 已经实现,而对多模白光压力传感器系统,动态范围为 5 μm 。通过采用上述新的数据处理方法,对白光系统的稳定性为 $\pm 0.5 \text{ nm}$ 。

白光系统还可以在传感器制造系统中监测空气间隙。

3 实验结果与结论

3.1 实验结果

单一模式的 SCIB 压力传感器系统的测试结果在图 4 和图 5 中显示。

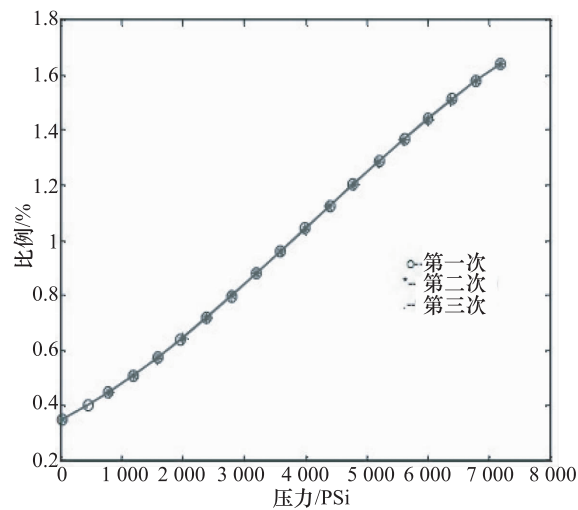


图4 SCIB系统校准曲线(重复3次)

图 4 显示了 SCIB 系统的输出和实用压力之间的关系。在这些曲线显示出了某种非线性。这是由于比值 R 具有正弦曲线的特征。这些曲线作为传感器的刻度数据被储存在计算机中。通过刻度曲线,压力值能够根据 SCIB 系统的输出计算出来。

图 5 显示压力测量曲线的结果。最大误差约为满量程的 0.12%。

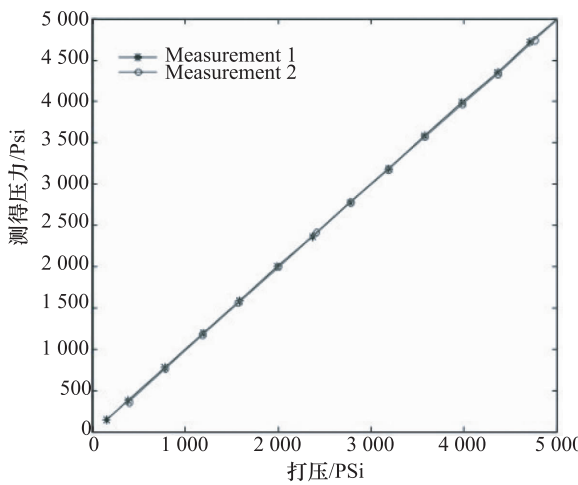


图5 SCIB系统测量结果(重复2次)

多模式的白光系统也使用相似的方法进行测试。图 6 和图 7 显示压力和温度传感器的刻度曲线。

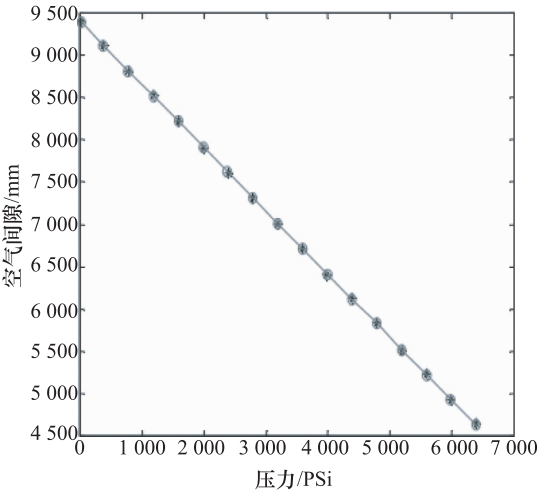


图 6 白光压力传感器校准曲线

图 6 显示压力传感器的空气隙随着压力增加线性减小。对于这个传感器来说,当相对压力从 0 增加到 6 000 Psi 时,整个空气隙改变大约 4 500 nm。图 7 显示了温度传感器的空气隙随着温度的增加线性增加。

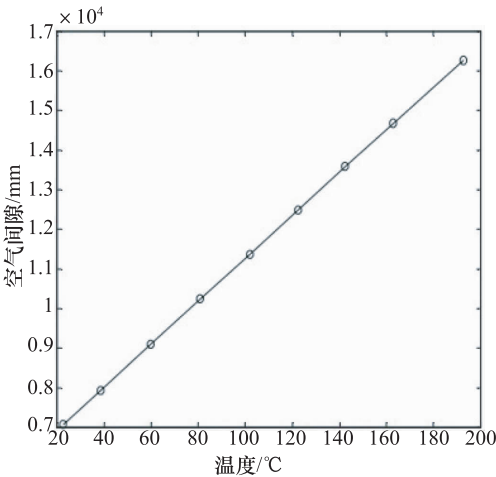


图 7 白光温度传感器校准曲线

3.2 结论

压力和温度传感器在井下环境应用的要求非常高。有着高分辨率、抗干扰和体积小优势的光纤传感器是应用于井下的最好选择。温度和压力传感器从结构设计到传感器制作再到传感器保护的一系列研究已经完成。各种实验,特别是在井下长期监测的结果,都显示了此类系统在井下应用具有光明前景。

参 考 文 献

- 1 Clowes J, Edwards J, Grudinin I, *et al.* Low drift fibre optic pressure sensor for oil field downhole monitoring. *Electron Lett*, 1999; 35 (11): 926—927
- 2 Grattan K T V, Meggitt B T. *Optical fiber sensor technology* Published by Kluwer Academic Publishers, the Netherlands, 1999; 4;
- 3 Wang Q, Ning Y N, Palmer A W, *et al.* Central fringe identification in a white-light interferometer using a multi-stage-squaring signal-processing scheme. *Optics Communications*, 1995 ; 117 (3-4): 241—244
- 4 Yuan L B, Ansari F. White-light interferometric fiber-optic distributed strain-sensing system. *Sensors and Actuators A-Physical*, 1997; 63 (3): 177—181
- 5 Yuan L B, Zhou L M, Jin W. Recent progress of white light interferometric fiberoptic strain sensing techniques. *Review of Scientific Instruments* 2000; 71 (12): 4648—4654
- 6 Tapai-Mercado J, Khomenko A V, Garcia-Weidner A. Precision and sensitivity optimization for white light interferometric fiber-optic sensors. *Journal of Lightwave Technology*, 2001; 19(1): 70—74

Fiber Optic Pressure and Temperature Sensors for Oil Down Hole Application

HUANG Zheng-yu, CAO Yan-feng¹, JIN Yong¹

(CNOOC Research Institute, Beijing 1000272, P. R. China;

CNOOC Research Center¹, Beijing 100600, P. R. China)

[Abstract] Detailed studies on fiber optic pressure and temperature sensors for oil down-hole applications are described. The sensor head is an interferometric based fiber optic sensor in which the air-gap will change with the pressure or temperature. For high-speed applications, a novel self-calibrating interferometric/intensity-based (SCI-IB) scheme, which realizes compensations for both the light source drift and the fiber loss variation, was used to demodulate the pressure (or temperature) signals. An improved white light system is developed for sensor fabrication. This system is also used as the signal demodulation system providing very high resolution. Experiment results show that the SCIIB system achieves 0.1% accuracy with a (0-8 000) psi working range for the pressure sensor and a (0—600) °C working range for the temperature sensor. The resolution of the white light system is about ± 0.5 nm with a dynamic range up to 10 micrometers. The long-term testing results in the oil site are also presented.

[Key words] fiber optic sensor temperature sensor pressure sensor oil down hole

(上接第 7730 页)

Study on Niobium-Tantalum Resources in Waste from the Process of Refining Titanium Tetrachloride by Copper Wires

WANG Ning¹, GU Han-nian^{1,2}, JIANG Yan³, FU Yu-hong^{1,2}, TIAN Yuan-jiang¹

(Laboratory for Study of the Earth's Interior and Geofluids, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences¹, Guiyang 550002, P. R. China;

Graduate University of Chinese Academy of Sciences², Beijing 100049, P. R. China;

Zunyi Titanium Industry Limited Company³, Zunyi 563004, P. R. China)

[Abstract] The waste generated from the process of removing vanadium by copper wires to refine titanium tetrachloride is rich in vanadium, copper, titanium. A further study shows that this waste contains 2.66% niobium as well as 0.29% tantalum. They can be considered as a new type of resource because the contents of Nb and Ta in the waste are much higher than their industrial grades. Niobium and tantalum that may be associated ilmenite enriched in the processing of titanium tetrachloride by the processing of dressing, chlorination and refining.

[Key Words] niobium tantalum titanium tetrachloride industrial waste