

新型高精度光纤油罐计量系统及其应用

金晓丹* 林钧岫 丁建华 江涛
(大连理工大学应用物理所, 大连 116024)

摘要 研制成功一种新型高精度光纤油罐计量系统, 实现了现场无电全光一次检测。系统采用一种新型光桥补偿技术, 从而克服各种不利因素的影响, 保证系统具有较高的测量精度。根据现场需要, 确定系统的测量范围为 $0 \sim 147.10$ kPa, 测量精度为 0.2% 。详细分析了系统误差并提出了减小误差的相应措施。

关键词 光桥补偿光路, 光纤压力传感器

1 引言

由于光纤传感器具有体积小、重量轻、灵敏度高、抗电磁干扰能力强、可在高温、高压、腐蚀性、易燃易爆等恶劣环境下工作等优点而得到广泛的应用^[1]。

根据石油化工企业迫切需要一种对储油罐计量安全可靠高精度的测量方法, 研制成功一种新型高精度光纤传感器油罐计量系统。它的突出优点是实现了现场无电检测, 从原理上消除了产生火灾和爆炸的隐患, 精度高, 使用寿命长, 功能齐全, 运行稳定可靠, 采用计算机数据采集, 屏幕直观显示和定时打印结果, 便于现代化管理, 整套系统体积很小, 在我国现有的油罐群中不需多加改动便可安装使用。

2 系统工作原理

如图1所示, 传感器系统主要由光发射-接收及信号处理系统与光纤压力传感头等部分组成。为克服光源强度变化, 光纤传输损耗以及光电转换效率的漂移等因素对测量的影响, 光发射-接收部分采用双光源交替发光, 双探测器同时探测的工作方式, 压力传感头采用光桥式补偿光路及计算机进行信号的控制与处理。

光纤压力传感头是系统的中枢, 它由四个自聚焦透镜 G_1, G_2, G_3 和 G_4 与偏振分光棱镜 $P.S.$ 构成一个桥式光路, 棱镜即是检偏器又是分光元件。光源 S_1 发光, 经 G_1 准直为平行光, 通过起偏器 P , 光弹材料 $P.E.M$ 和四分之一波片 $W.P.$ 后, 载有被测压力的信息, 再经棱镜分为两束光, 两探测器 D_1 和 D_2 同时接收得到两个光电流信号 i_{11} 和 i_{21} ; 光源 S_2 发光, 经 G_2 准直为平行光, 直接由棱镜分为两束光, 两探测器 D_1 和 D_2 同时接收得到两个光电流信号 i_{12} 和 i_{22} , 它不载有

* 现在清华大学电子工程系。

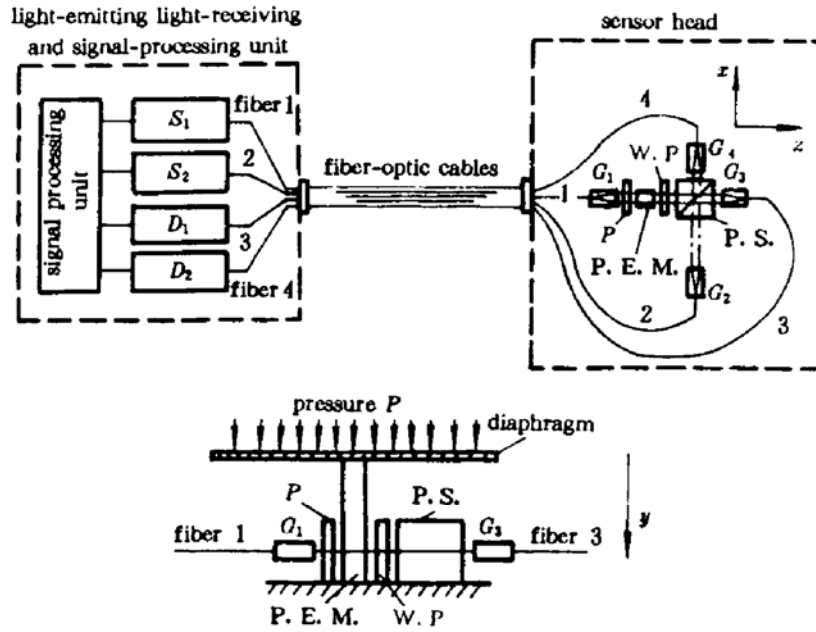


Fig. 1 Schematic configuration of the fiber-optic pressure sensor

被测压力的信息,作为参考光源来补偿光纤传输损耗和光电转换效率漂移等不利因素的影响。

令 I_{01} 和 I_{02} 分别为光源 S_1 与光源 S_2 发出光的光功率, L_1 , L_2 , L_3 和 L_4 分别为四根光纤的传输损耗, R_1 和 R_2 分别为两个探测器 D_1 和 D_2 光电转换的响应度^[2], 则

$$i_{11} = \frac{1}{2} I_{01} (1 - L_1) (1 - L_3) R_1 (1 + \sin\phi) \quad (1)$$

$$i_{21} = \frac{1}{2} I_{01} (1 - L_1) (1 - L_4) R_2 (1 - \sin\phi) \quad (2)$$

$$i_{12} = \frac{1}{2} I_{02} (1 - L_2) (1 - L_3) R_1 \quad (3)$$

$$i_{22} = \frac{1}{2} I_{02} (1 - L_2) (1 - L_4) R_2 \quad (4)$$

式中 $\phi = (2\pi ClS_0)/(\lambda S_0) \cdot P$ 为光通过光弹材料后在 x 和 y 方向引入的位相差, P 为被测压力, C 为应力 - 光学常数, l 为光弹材料通光长度, λ 为光在真空中波长, S_0 为膜片有效面积, S_c 为光弹材料承压面积。

信号处理系统对(1) ~ (4) 式所表示的四个信号进行如下运算得到

$$Q = \frac{i_{11}/i_{12} - i_{21}/i_{22}}{i_{11}/i_{12} + i_{21}/i_{22}} = \sin\left(\frac{2\pi ClS_0}{\lambda S_0} \cdot P\right) \quad (5)$$

显然 Q 值仅与被测压力 P 有关, 与光源发光功率、光纤传输损耗、光电转换的响应度(包括放大器增益)无关, 在 $0^\circ < \phi < 90^\circ$ 范围内 Q 值与 P 有一一对应关系, 从原理上消除了各种不利因素的影响, 达到了补偿目的。

3 系统误差分析

在(5) 式中, 将偏振分光棱镜看作理想偏振分光元件, 四分之一波片和光弹材料也看作理想光学元件, 没有考虑它们的色散特性和温度特性, 是在理想情况下推出的理论结果。在实际

应用中,由于光源中心波长的漂移和传感头环境温度的变化,给系统带来一定的误差。

3.1 光源中心波长变化带来的误差

设偏振分光棱镜透射光消光比为 K_1 ,反射光消光比为 K_2 ,则由(1)~(4)式表示的光电流信号应改写为

$$i_{11} = \frac{1}{2}I_{01}(1 - L_1)(1 - L_3)R_1[(1 - K_2)(1 + \sin\phi) + K_1(1 - \sin\phi)] \quad (6)$$

$$i_{21} = \frac{1}{2}I_{01}(1 - L_1)(1 - L_4)R_2[(1 - K_1)(1 - \sin\phi) + K_2(1 + \sin\phi)] \quad (7)$$

$$i_{12} = \frac{1}{2}I_{02}(1 - L_2)(1 - L_3)R_1(1 - K_1 + K_2) \quad (8)$$

$$i_{22} = \frac{1}{2}I_{02}(1 - L_2)(1 - L_4)R_2(1 - K_2 + K_1) \quad (9)$$

将(6)~(9)式代入(5)式中,忽略 K_1, K_2 的二级小量,整理得

$$Q = 2(K_1 - K_2) + (1 - K_1 - K_2)\sin\phi - (K_1 - K_2)\sin^2\phi \quad (10)$$

微分得

$$\Delta Q = [(2 - \sin^2\phi)(\Delta K_1 - \Delta K_2) - (\Delta K_1 + \Delta K_2)\sin\phi] + [(1 - K_1 - K_2) - 2(K_1 - K_2)\sin\phi]\cos\phi \cdot \Delta\phi \quad (11)$$

由上式可看出,第一项是由偏振分光棱镜引入的误差,第二项是由光弹材料引入的误差。

由式(5)微分得

$$\Delta P = \frac{P}{\phi \cdot \cos\phi} \Delta Q \quad (12)$$

由偏振分光棱镜实测得特性数据: $K_1 = 2 \times 10^{-3}$, $K_2 = 1 \times 10^{-2}$, $\Delta K_1 = 5 \times 10^{-5}/\text{nm}$, $\Delta K_2 = 2 \times 10^{-4}/\text{nm}$,考虑压力最大的情况, $\phi = \pi/4$,由(11)和(12)式可得,波长改变时,偏振分光棱镜引入的误差为

$$\Delta P_1 = -12.8 \text{ Pa/nm}$$

在(11)式中

$$\Delta\phi = \phi \cdot \left(\frac{\Delta C}{C} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta S_e}{S_e} - \frac{\Delta\lambda}{\lambda} - \frac{\Delta S_o}{S_o} \right) \quad (13)$$

因选作光弹材料的石英玻璃热膨胀系数很小,为 $5.5 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$,故上式中 $\Delta l/l$ 和 $\Delta S_o/S_o$ 二项忽略不计;应力-光学常数相对色散极小,为 $-7.3 \times 10^{-8}/\text{nm}$,可忽略;膜盒的弹性模量温度系数为 $-5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,故忽略 $\Delta S_e/S_e$ 项,则

$$\Delta\phi = -(\Delta\lambda/\lambda)\phi \quad (14)$$

将上式代入(11)式,并考虑压力最大的情况,得波长改变时,光弹材料引入的误差为

$$\Delta P_2 = -164 \text{ Pa/nm}$$

四分之一波片在传感器系统中起着提供光学偏置的作用,通过适当的设置,可消除波片位相延迟小量偏差一次项的影响,其二次项引入的误差计算为

$$\Delta P_3 = 6.9 \text{ Pa/nm}$$

因此,光源中心波长变化带来的最大误差为

$$\Delta P_\lambda = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 = -170 \text{ Pa/nm}$$

3.2 环境温度变化带来的误差

对于介质膜偏振分光棱镜, ZnS 色散系数为 $-1.4 \times 10^{-4}/\text{nm}$, MgF_2 色散系数为 $-1.2 \times 10^{-5}/\text{nm}$,折射率温度系数为 $-1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$,则

$$\frac{d\lambda}{dT} = \frac{d\lambda}{dn} \cdot \frac{dn}{dT} = 7 \text{ nm}/^\circ\text{C}$$

$$\Delta P_1' = \Delta P_1 \cdot \frac{d\lambda}{dT} = -0.9 \text{ Pa}/^\circ\text{C}$$

石英玻璃光弹常数的温度系数为 $1.34 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$, 则由(13)式得到

$$\Delta\phi = (\Delta C/C)\phi \quad (15)$$

同理, 代入(11)式得温度变化时, 光弹材料引入的误差为

$$\Delta P_2' = 19.7 \text{ Pa}/^\circ\text{C}$$

考虑四分之一波片温度特性, 对于结晶石英, 垂直于光轴的线膨胀系数 $\alpha = 13.37 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $\Delta n_e = -0.651 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$, $\Delta n_o = -0.547 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$, $n_e - n_o = 0.0089^{[3]}$, 计算得其温度变化时引入的误差为

$$\Delta P_3' = 0.75 \text{ Pa}/^\circ\text{C}$$

因此, 传感头环境温度改变时引入的最大误差为

$$\Delta P_T = \Delta P_1' + \Delta P_2' + \Delta P_3' = 19.55 \text{ Pa}/^\circ\text{C}$$

在油田现场原油交接过程中, 进行罐内储油变化量的计量通常是在一天内完成的, 其实际温度变化一般在 5°C 以内, 经筛选使用的光源中心波长随温度变化的移动量小于 $0.2 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, 那么在光源温度变化 5°C 时, 给测量带来的误差为

$$|\Delta P_\lambda| = 170 \text{ Pa}$$

传感头环境温度变化 5°C 时, 给测量带来的误差为

$$|\Delta P_T| = 97.8 \text{ Pa}$$

综合这两项误差, 其相对误差为

$$\Delta = \frac{\Delta P}{P_{\max}} = \frac{\pm \sqrt{\Delta P_\lambda^2 + \Delta P_T^2}}{P_{\max}} = 0.13\%$$

3.3 小 结

光纤压力传感头是系统的关键, 光源中心波长的变化和环境温度的改变是影响压力传感器稳定性的两大主要因素, 综合这两项误差, 计算得相对误差为 0.13% 。光源中心波长的变化是最主要的误差源, 因此, 对光源采取半导体恒温措施或通过测其温度进行计算机软件补偿, 将是进一步提高传感器系统测量精度和稳定性的有效途径。另外, 在冬天恶劣气候下应对传感头采取适当的保温措施, 如盖阀室、包装保温材料等, 使传感头环境温度变化在一定范围内, 以保证系统的测量精度和长期稳定性。

4 系统应用

图 2 所示为系统安装在使用现场的方框图。光纤压力传感头通过连接法兰安装于油罐外底部与油罐相连通的管道上, 被测液体通过法兰的进口管作用在膜片上, 传感头由一根四芯光缆与检测室内的光发射-接收系统相连。光纤为 $100/140 \mu\text{m}$, N. A. 为 0.2 的多模光纤, 两个光源的中心波长为 $0.85 \mu\text{m}$ 的半导体发光二极管 LED, 选择硅 PIN 光电二极管作为光电探测器。两个光源交替发光, 经过光缆传输到传感头, 经压力调制后, 载有压力的信息再传回检测室, 接收、放大和处理后, 计算机给出传感器补偿信号 Q 值, 被测压力 P 与 Q 值一一对应。系统采用标准压力源进行定标, 得到定标数据, 由 Q 值可得出相应的被测压力 P , 即可得到相应的储油量和液位。图 3 所示为定标曲线。

该系统于 1987 年 7 月研制成功并在实验室获得满意的测试结果, 于 11 月安装在辽河油

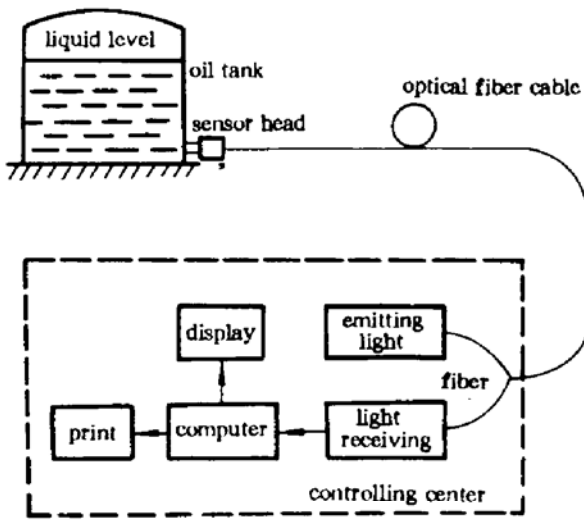


Fig. 2 Experimental schematic configuration of the pressure sensor system

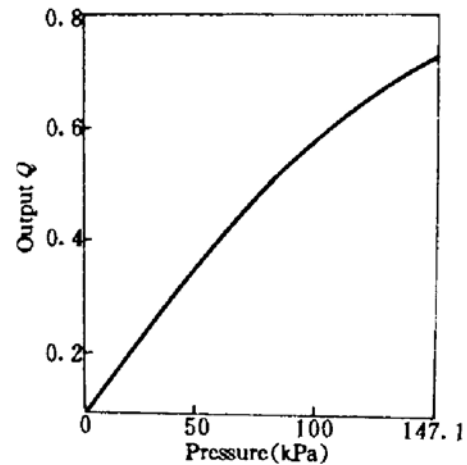


Fig. 3 Calibration curve of the pressure sensor

田使用。根据现场实际调查,目前石油、化工等部门使用的各种储油罐液位高度通常低于 15 m,则确定该传感器系统的量程为 0~150 kPa,测量精度可达 0.2%,实际检测灵敏度为 9.81 Pa。在现场工程技术人员的大力配合下,经过 4 年的运行和调试,一切正常,基本满足现场要求,已有小批量生产。该系统能完成四项功能:油罐在计算机屏幕上直观显示;随时跟踪多个油罐的储量和液位的变化;定时打印油罐内的液位和储量;上下限定点报警。

参 考 文 献

- 1 T. G. Giallorenzi. Optical fiber sensor technology. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1982, QE-18(4): 626~665
- 2 X. D. Jin, J. X. Lin. A fiber-optic pressure sensor with an optical bridge compensation technique. *Laser und Optoelektronik*. Oktober, 1991. 70~73
- 3 X. J. Fang, X. D. Jin. Studies of a photoelastic fiber optic pressure sensor. *International J. of Optoelectronics*, 1992, 7(6): 765~772

A Novel Type Fiber Optic Measuring System of High Accuracy and Its Application

Jin Xiaodan Lin Junxiu Ding Jianhua Jiang Tao

(Institute of Applied Physics, Dalian University of Technology, Dalian 116023)

Abstract A novel type fiber optic measuring system of high accuracy was successfully manufactured and the in situ one-time measurement was realized with an electronics-free sensor head. A new balanced bridge referencing compensation technique was introduced so that the sensor was immune to various adverse effects and had higher measurement accuracy. According to practical needs, the measurement range of pressure from 0 up to 147.10 kPa was determined. The measurement accuracy is 0.2%. Error was analyzed in detail and corresponding methods to reduce the measurement error were given.

Key words fiber optic pressure sensor, balanced bridge referencing technique