

文章编号: 0253-2239(2005)11-1461-6

基于连通器原理的小探头光纤液位传感器研究*

裴 丽 宁 提 纲 李 艳 涛 简 水 生

(北京交通大学光波所, 北京 100044)

摘要: 介绍了以汞包层光波导为传感探头的光纤液位传感器的原理及信号处理,其工作原理是利用连通器将液位的变化转变为汞包层光波导包层长度的变化。理论分析和实验表明,当光波导直径和光波长一定时,光功率衰减随汞包层光波导长度增加作线性增加。通过对汞包层光波导引起光功率衰减的检测,探头结构的优化设计以及探测器件的选型,可以获得实时性很强的高精度液位测量。实验测得 10 m 液位的最大测量误差为 5.2 mm,理论分析的相对测量精度可达 0.02%。该液位传感器的研制对于油库等易燃、易爆环境中的液位测量具有重要意义。

关键词: 光纤传感器; 汞包层光波导; 光功率衰减; 液位测量

中图分类号: TP212.14 文献标识码: A

Study on a Small Probe Optical Liquid Level Sensor Based on the Connected Vessels

Pei Li Ning Tigang Li Yantao Jian Shuisheng

(Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract: Both of the theoretical analysis and experiments show that when the diameter of the waveguide and the light wavelength are fixed, the optical power loss increases linearly with the increase of the Hg cladding optical waveguide (HCOW) length. The theory and signal processing of the optical liquid level sensor with HCOW as its probe are analyzed, it works based on the theory of connected vessel, which converts the change of liquid level to the change of the length of the HCOW. By optimized design, the real time detection of the liquid level with high precision can be got. The experimental results show that the measurement accuracy is 5.2 mm within 10 m liquid level, its theory precision can up to 0.02%. The research of this liquid level sensor may offer significant metrological improvement by reason of its safety in corrosive or explosive environments, especially in the liquid level detection of oil depot.

Key words: optical fiber sensor; Hg cladding optical waveguide; optical power loss; liquid level measurement

1 引 言

传感器技术是现代测量技术和自动化技术的重要基础之一。从宇宙探索到海洋开发,从生产过程的控制,到现代人类的文明生活,几乎每一项现代科学技术,都离不开传感器。在各个领域中,传感器技术都得到了广泛的应用,并展现着极其广阔的发展前景^[1~4]。

液位传感器指检测液体高度信息的仪器,它在工业生产和日常生活中起着耳目的作用。目前,液位传感器按照探头的工作原理主要分为三大类:浮

筒类、电子类和液压类。浮筒类液位传感器,不足之处是积聚在传动机械臂上的污物会限制浮筒运动,从而产生故障。电子类液位传感器主要包括以下几种:一是利用空气和液体作电容器两极板间的电介质,利用电容检测获得液位信息的电容式液位计,其结构简单,但由于对电缆中的干扰和寄生电容很敏感,精度较差;二是利用液体容器底部与顶部之间的电阻测量探知液位的电阻式液位计,其测量精度受液体污染情况的影响很大,易产生错误,且响应速度慢;三是利用液位高度影响放射线检测器输出来获

* 国家自然科学基金(60337010)、国家 863 计划(2004AA31G200)、北京市自然科学基金(4052023)、霍英东基金(91062)和北京交通大学攀登基金(PD283)资助课题。

作者简介:裴 丽,(1970~),女,山西人,博士,副教授,主要从事光纤传感、高速光纤通信网以及光纤通信关键技术等研究。E-mail: lipei@center.njtu.edu.cn

收稿日期:2004-09-13;收到修改稿日期:2005-04-28

得液位的放射线液位计,由于射线易对人造成损伤,需加入保护措施,故使用不便。此外还有受温度影响很大的超声液位计,仅适用于导电性液体液位测量的电极式液位计,液体冷凝作用严重影响测量精度的光学法测量液位计等。液压类液位传感器主要包括气泡式液位计、差压式液位计、膜式液位计等,前二者存在一个共同的问题就是检测方式十分复杂。膜式液位计通过测量薄膜受力来检测液位信息,其安装简单,但是测量范围很小。

与传统传感器相比,光纤液位传感器具有抗化学腐蚀、精确度高、常规传感器无法比拟的优点,由于它是用光而不是用电作为敏感信息的载体,用光纤而不用金属导线来传递敏感信息,因此它还具有灵敏度高、频带宽、动态范围大、空间分辨率高,对被测对象不产生影响的特点,能被使用在易燃易爆、有毒、有害、强电磁干扰等恶劣环境中。此外由于光纤不仅是敏感元件,而且也是一种优良的低损耗传输线,因此可以实现对待测液位的远距离遥测。

本文提出一种全新的光纤液位传感器,它利用汞包层光波导做传感探头,其突出特点是直接把液位的变化转换成光功率的变化,从而避免了象其它光纤传感器采用的声光、磁光、热光等物理效应的中间变化而产生的测量误差。本传感器的研制成功将有效解决油库液面测量的安全问题。

2 汞包层光波导的特性

2.1 理论分析

汞是唯一在常温下呈液态的金属,沸点为 356.58 °C。汞包层与裸光纤之间没有空隙,汞包层光波导实际上是一个半径为 a 、以单一折射率玻璃为芯子,汞为包层的同轴波导。其最大特点是包层的长度可变,且它的光功率衰减与波导长度、芯径、对应光波长等因素有关,其损耗特性可用经典电磁场理论分析^[3~6]。

由于金属导体的电导率 σ 很大,而且由于电磁波在金属表面发生强烈的反射,进入导体的能量远小于入射波的能量,其结果是金属表面的电场切向分量很小,因此在求解汞包层光波导中的场分布时,如果把金属表面用完纯导体代替并不会引起显著的误差,而计算却得到简化。

首先假定波导的金属壁面是完纯的,进一步设 $E = E_m \exp[j(\omega t - \beta z)]$,由麦克斯韦方程出发,计算完纯波导壁情况下,同轴波导中 TM 波和 TE 波的

各场分量分布 H_r, H_ϕ, H_z 与 E_r, E_ϕ, E_z 。

由 \mathbf{H} 的分布可以获得 $r = a$ 处壁面表面电流密度 J_s 的大小:

$$J_s = \mathbf{n} \times \mathbf{H} = n_z H_\phi - n_\phi H_z, \quad (1)$$

根据计算获得 J_s 和壁面电阻 R_s ,可得 TM 波与 TE 波的损耗功率 P_{TM}, P_{TE} ,

$$P_l = \frac{1}{2} a \pi R_s J_s^2, \quad (2)$$

R_s 可以由良导体的本质阻抗 RR 满足的关系求得

$$RR = R_s + jX_s = j\omega\mu \frac{\alpha - j\beta}{\alpha + j\beta}, \quad (3)$$

其中 α 为衰减系数,利用实部和虚部对应相等可得

$$R_s = \omega\mu\beta / \sqrt{C_1^2 + C_2^2}, \quad (4)$$

其中 C_1 和 C_2 与 σ 有关。

金属包层波导中 TM 波与 TE 波的传输功率 P_{TM}, P_{TE} 满足如下关系:

$$P = \frac{1}{2\Omega} \int_0^{2\pi} \int_0^a (|E_r|^2 + |E_\phi|^2) r dr d\phi, \quad (5)$$

其中 Ω 为 TM 波和 TE 波对应的波阻抗。

金属包层光波导的衰减常数 = 单位长度的衰减功率 / 2 × 传输功率 = $P_l / 2P$, 设 A_i 为第 i 个 TE 模或 TM 模单独传输时的衰减常数,可得

$$A_{TMm} = \frac{P_{TMm}}{2 \times P_{TMm}} = \frac{\omega\epsilon R_s J_{m+1}^2 (K_{cTMm} a)}{K_z a J_m' (K_{cTMm} a)},$$

$$A_{TEm} = \frac{P_{TEm}}{2 \times P_{TEm}} = \frac{a R_s K_{cTEm}^4}{\omega\mu m^2 K_z} \left[1 + \frac{m^2 K_z^2}{K_{cTEm}^4 a^2} \right], \quad (6)$$

其中 J_{m+1} 为 $m+1$ 阶贝塞尔函数; J_m' 为阶贝塞尔函数的导数; K_z 为传输常数的 Z 向分量; 且

$$K_{cTMm} = P_{m}/a, \quad K_{cTEm}' = P_{m}'/a, \quad (7)$$

其中 P_m 表示 m 阶贝塞尔函数的第 n 个根, P_m' 表示 m 阶贝塞尔函数的导数的第 n 个根。

当不考虑汞包层光波导中的模式耦合所带来的影响时,总的衰减系数等于各个单独模式衰减系数的加权和,可得功率的衰减常数为

$$\alpha = \frac{10}{Z} \lg \frac{P_i}{P_0} = \frac{10}{Z} \lg \frac{P_i}{P_i \exp(-2AZ)} =$$

$$20 \lg e \sum L_i A_i, \quad (\text{dB/mm}) \quad (8)$$

其中 Z 为波导长度, P_i 为光纤的输入光功率, P_0 为光纤的输出光功率, L_i 为第 i 个 TE 模或 TM 模的功率占总功率的比重系数。

根据(8)式,通过数值解法,即可获得不同参量情况下,汞包层光波导的功率衰减常量。

2.2 实验结果与数值计算结果的比较和分析

选择不同芯径的光纤进行了理论分析和实验测

试,汞包层光波导的芯子半径一定,其衰减系数与入射光波长的关系见图 1(“*”表示实验结果)。入射光波长一定,汞包层光波导衰减系数与光纤芯子半径的关系见图 2(“*”表示实验结果)。

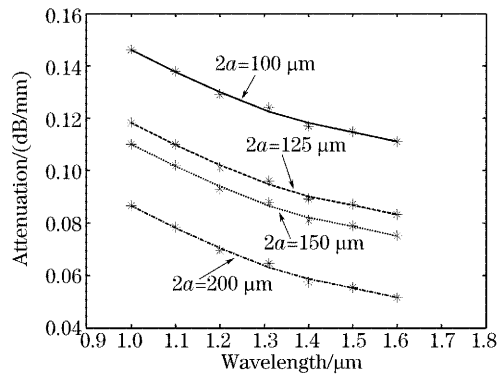


图 1 汞包层光波导衰减系数与入射光波长的关系
Fig. 1 The attenuation coefficient of HCOW versus different light wavelength

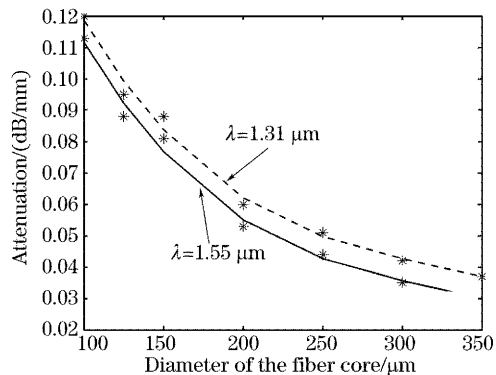


图 2 汞包层光波导衰减系数与波导芯子直径的关系
Fig. 2 The attenuation coefficient of HCOW versus different waveguide diameter

由图 1 和图 2 可见,实验结果与理论分析的结果相符合,汞包层光波导芯径一定的情况下,随着传输光波长的增加,衰减系数减小;波长一定的情况下,波导越细,则衰减系数越大。其衰减特性也可以从射线光学的角度来定性分析,光进入光波导后,光线通过在包层界面的反射向前传输,但每次到达界面时都将被包层吸收一部分。同样长度,波导越细,则反射次数越多,衰减越大。

汞包层光波导长度与光功率衰减的关系,如图 3 所示(“*”表示实验结果),光源波长为 $1.31 \mu\text{m}$ 。

由图 3 可见,当 $2a=125 \mu\text{m}$, $150 \mu\text{m}$, $200 \mu\text{m}$ 时,汞包层光波导的功率衰减常数分别为 0.095 dB/mm , 0.088 dB/mm 和 0.06 dB/mm 。即波导直径和光波长一定的情况下,汞包层光波导引起光功率的衰减随着波导的长度增加作线性增加,利

用这一特性,设计了基于汞包层光波导的光纤液位传感器。

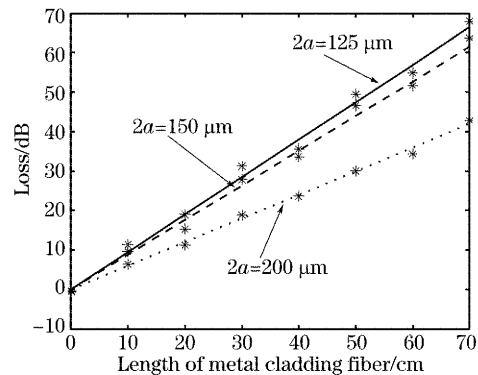


图 3 汞包层光波导长度与光功率衰减的关系
Fig. 3 HCOW length versus optical power loss

3 光纤液位传感器的工作原理

以汞为包层的光波导具有很好的衰减特性,且包层的液体汞长度灵活可变,因此将外界参量的变化通过汞包层光波导的长度变化来体现,测量光功率的改变,即可得出待测量。

基于汞包层光波导的光纤液位传感器的基本工作原理是利用连通器将液位的变化转变为光波导包层长度的变化,结构如图 4 所示。连通器的粗端用以施加由于液位所引起的压力,细端则为汞包层光波导组成的毛细管,其包层长度随着液位的变化而改变,通过检测对应光功率的变化则可得出待测液位。

汞的比重很大,常温下大约为 13.5 g/ml ,用图 4 所示装置测量液位时,探头体积较小。但汞蒸气有毒,在空气中,汞极易与空气发生反应而影响其性能,因而以汞作为包层的光波导对工艺有较高的要求。在此装置中,为了使传动装置能够灵敏地传递液位变化信息,并能抵抗很强的压力,选用金属铜作为汞的容器,实验表明虽然汞对于铜具有腐蚀性,但是很快会形成一层汞化铜,使得反应不再进行,从而保护了铜管不再受到腐蚀。经过多次试验摸索,以及相关单位的合作研究,在连通器的粗端设计了精密可移动活塞,其一方面实现被测液体与汞的分离,在材料的选择上要避免其与汞和待测液体发生反应。另一方面活塞的移动量由待测液体的液压来控制,可以实现对液位变化的实时反应。在连通器的细端上方进行了密封,这样一方面可以避免汞蒸气的挥发,另一方面还可根据预测液位高度来设计细管上方空气的容积,对减小探头体积非常有益。

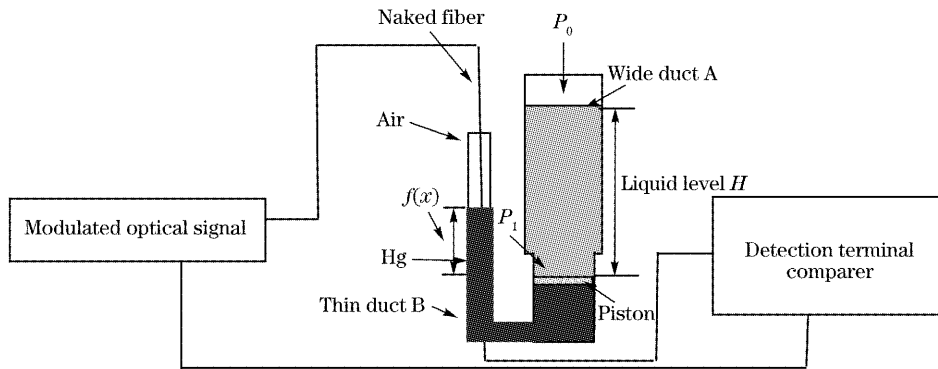


图 4 光纤液位传感器系统结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the liquid level sensor system

液位测试的初始状态为:温度 T_0 , 细管 B 上方所封闭的气体体积为 V_0 , 被测液体的液位 $H=0$, $P_1=P_0$, 其中 P_0 为大气压。此时汞液面高度的位置定义为零点液位。 K_0 为真空中的波数, 可得

$$V_0 P_0 = K_0 T_0, \quad (11)$$

不同液位的测试状态为:温度 $T_0 + t$, 细管 B 中的汞

液面高度为 $f(x)$, 则细管 B 上方的气体体积为 $V_0 - f(x) \times s$, s 为细管 B 的横截面积。被测液体的密度为 D_l , 则

$$P_1 = P_0 + H \times D_l, \quad (12)$$

进一步可得

$$[V_0 - f(x) \times s][P_0 + H \times D_l - f(x) D_g] = K_0(T_0 + t), \quad (13)$$

其中 D_g 为汞的密度。由(11)式和(13)式整理可得

$$[V_0 \times D_l - f(x) \times s \times D_l]H = K_0 t + V_0 \times f(x) \times D_g + P_0 \times f(x) \times s - f(x)^2 \times D_g \times s, \quad (14)$$

即:
$$H = \frac{K_0 t + V_0 \times f(x) \times D_g + P_0 \times f(x) \times s - f(x)^2 \times D_g \times s}{V_0 \times D_l - f(x) \times s \times D_l} = H[f(x), t], \quad (15)$$

利用(15)式, 由汞包层光波导的长度, 可以获得任意温度情况下的待测液位。

4 信号检测

信号检测系统的基本结构如图 5 所示。采用信号调制的方法, 并加入比较电路, 可有效消除测量起始点和外界杂散光的干扰, 具有优良的测量重复性。采用 10 位 A/D 转换, 相对分辨率 0.2%, 能消除外界杂散光的高斯噪声干扰, 并能实时地对采样数据

进行计算处理, 实现六位数码显示。该信号检测系统可以实现最小接收光功率为 -70 dBm 的微弱光信号检测, 分辨力为 0.02 dB, 准确性好, 可靠性高。

首先, 由单片机产生 10 kHz 定时方波, 通过其高速数据通道口(HSO)输出给发射电路, 对光源进行调制。光源采用北京半导体所海特光电子技术公司的 SLD 型激光器, 其指标为: $P_m = 21.8 \mu W$, $I_m = 100$ mA, $V_m = 2.09$ V, $R_d = 8.2 \Omega$, $N_l = 0.5\%$ 。它具有体积小、重量轻、结构简单、使用方便、效率高、工作寿命长等优点, 与光纤的特点相容。

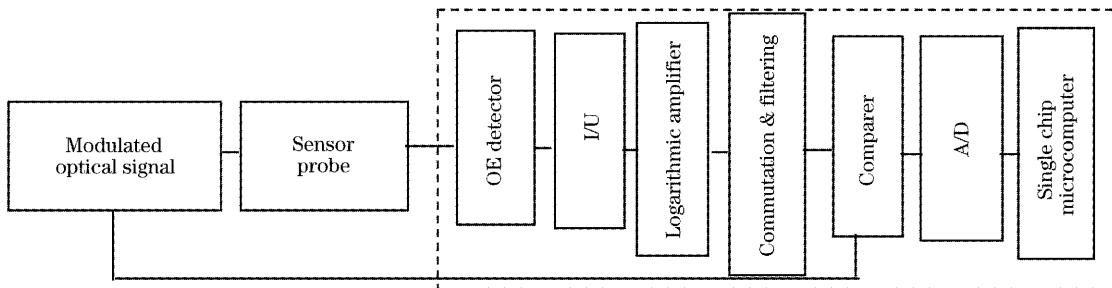


图 5 光纤液位传感器系统探测终端

Fig. 5 Detection terminal of the liquid level sensor system

10 kHz 脉冲序列光信号从光源发出后,经过单模光纤(光缆)、传感探头等送回到光电探测器。同时光源送出一路发光电平信号给接收端,对光源的不稳定性进行补偿与修正。综合经济、技术等因素后,此系统中选用 FC 型光电探测器,其内部电路耦合极好,有利于提高测量精度。具体性能指标为:光谱响应 $1.0 \sim 1.7 \mu\text{m}$; 工作电压 0 V; 线性范围 $2 \text{ mW} \sim 0.1 \text{ W}$ ($-70 \sim +3 \text{ dBm}$); 暗电流 $< 0.01 \text{ nA}$; 响应度 $\geq 0.85 \mu\text{A}/\mu\text{W}$ 。

光电探测器的输出信号为电流信号,为便于信号处理,经电流-电压(I/U)转换器将其转换为电压信号。各种电流-电压转换电路比较后,决定采用跨阻型前置放大电流-电压转换电路。它的转换特性优良,具有动态范围广、宽频带、低噪声的优点,且电路十分简单。

电压信号经放大后,用 10 kHz 带通滤波器滤波,以消除高斯杂散光的干扰。由于采用分级放大和测量放大器会造成硬件和软件的高度复杂性,在此选用改进型对数放大器作为前置放大电路,它具有易于实现、性能稳定、结构简单的优点,且动态范围大,分辨能力高。

信号整流成直流信号后再滤波,进行后续的对数放大,比较校零,将其变换为模-数转换器的输入信号 $0 \sim 5 \text{ V}$ 。交流电转换为直流电的工作可由二极管检波电路完成。整流后的电压信号经 π 型滤波电路滤去纹波,就可得到稳定的直流电压信号。

最后,实现数/模转换,以便于单片机数据处理,然后送入显示程序进行实时显示。

5 实 验

采用图 3 所示结构进行了相关实验。为了使该汞包层光波导易于同普通光纤连接以便构成测量系

统,实验中选择裸光纤芯子直径为 $2a = 125 \mu\text{m}$,光源波长为 $1.31 \mu\text{m}$,测试液体为水,其密度为 $D_l = 1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,汞的密度为 $D_g = 13.558 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。

改变液位高度,测得液位 H 与接收光功率的关系如图 6 所示。液位越高,接收到的光功率越小。图 6(a)中,液位与接收光功率非线性产生的主要原因如下:细管 B 上方所封闭的气体体积不合适,例如当初始封闭气体的体积为零时,汞柱几乎不随被测液位的变化而改变,当所封闭的气体体积过大时,相当于没有密闭;裸光纤表面存在缺陷,影响到功率衰减常数的稳定性和重复性;探测终端的拟合精度等。为了提高检测精度,首先选择合适的气体体积,一方面保证液位高度变化时,汞包层光波导长度变化引起光功率变化满足要求,另一方面保证将汞柱高度控制在 1 m 左右,可以满足现场的使用要求。对测量系统各个环节进行改进,主要是对整体放大、滤波、电流-电压转化等电路的最优化设计,以及各个电路中电容、电阻等的最佳选择,此外通过降低耦合损耗、不断改进拟合程序,检测精度也获得了很大提高。温度的改变也是一个重要的影响因素,对不同温度下的接收光功率进行了测试,并输入计算机进行编程,加入了温度的修正项,已基本上可以消除温度的影响。图 6(b)为系统优化设计后的一组测量结果。事实上,对温度的检测,同样可以利用汞包层光波导的特性实现,如图 7 所示,水银泡就是测量探头的探测点,在毛细管的中心垂直放置一根裸光纤,其两端从毛细管中穿出,并与普通单模光纤连接,这种测温探头的结构类似于一个水银温度计,不同之处在于其中心多了一根裸光纤,并且在封装等制作工艺上提出了更高的要求。这样通过检测温度变化后的光功率变化,即可获得待测温度。

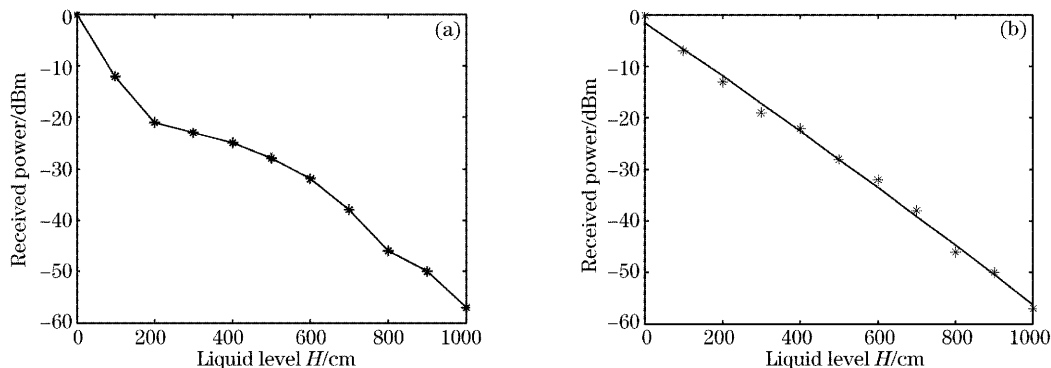


图 6 液位 H 与接收光功率的关系在优化设计前(a)和优化设计后(b)

Fig. 6 Received optical power versus liquid level H before optimization (a), after optimization (b)

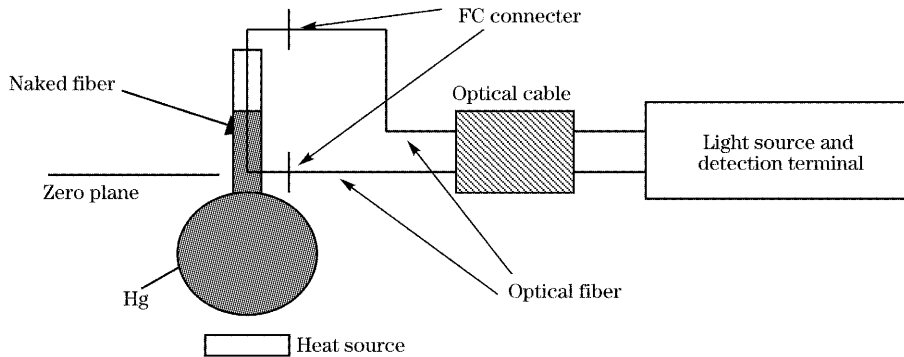


图 7 得用汞包层光波导测温结构示意图

Fig. 7 Schematic diagram of temperature detection by using the HCOW

测试获得的液位与实际液位的关系如图 8 所示。其测试误差见图 9。实验结果表明,测试获得的液位 10 m 之内的最大误差为 5.2 mm,引起误差的原因很多,例如测试仪表的精度、汞的纯度等,理论上的最大测试精度可达 0.02%。

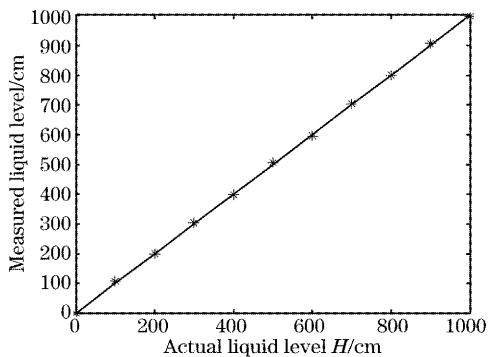


图 8 测试获得的液位与实际液位的关系

Fig. 8 Relationship between measured and actual liquid level

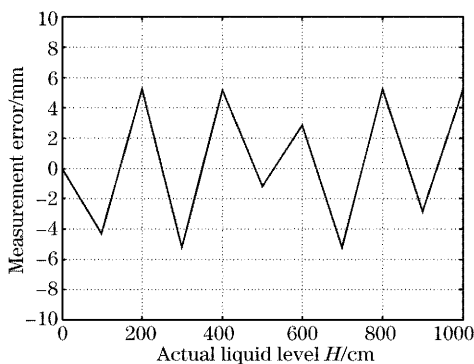


图 9 测试液位与实际液位的误差

Fig. 9 Measurement error of measured and actual liquid level

的衰减特性,使其在光纤传感中具有重要的作用。

在本信号检测系统中,如果选用最好的激光二极管作光源,高灵敏度的 PIN 作探测器,采用高精度的电子处理电路,高位数的模-数变换器等,可以达到其理论上的相对测量精度,即可以高达 0.02%。测量原理简单,精度高,实时检测,可靠性高等优点,使该探测系统在许多领域中都可获得广泛的应用。

本光纤液位传感器,具有绝对安全、测量精度高等优点,将计算机与该光纤传感器配合来检测油面高度将会为油库的监测管理现代化提供一条有效的途径。

参 考 文 献

- 1 Cao Zhenxin, Liang Dakai, Guo Mingjiang. Experimental study on the relationship between film thickness and resonant wavelength based on the optic fiber SPW sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1): 125~128 (in Chinese)
曹振新,梁大开,郭明江. 光纤表面等离子体波传感器中膜厚与共振波长关系的实验研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(1): 125~128
- 2 Zhou Shengjun, Zhang Hucheng, Li Yuquan. Research on high precision fiber magnetic field sensor[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(11): 1011~1014 (in Chinese)
周胜军,张虎城,李玉权. 高精度光纤磁场传感器的研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(11): 1011~1014
- 3 Guan Aihong, Yu Xiaoge, Wang Xiaoxu *et al.*. Construction and application of point level optical fiber liquid level sensors[J]. *Optical Technique*, 2002, **128**(12): 113~115 (in Chinese)
管爱红,余小戈,王晓旭等. 触点式光纤液位传感器传感头的制作及其应用[J]. *光学技术*, 2002, **128**(12): 113~115
- 4 Ye Peida, Wu Yizun. *The Basic Theory of Optical Waveguide Technology* [M]. Beijing: Post and Telecom Press, 1980. 199~220
- 5 Fang Junxin, Cao Zhuangqi, Yang Fuzi. *The Physical Base of Optical Guide Wave Technology* [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 1984. 203~220
- 6 Shiquan Tao, Winstead C B, Jindal R *et al.*. Optical-fiber sensor using tailored porous sol-gel fiber core[J]. *Sensors J., IEEE*, 2004, **4**(3): 322~328

6 结 论

理论分析和实验结果表明,汞包层光波导特有