

干涉条纹计数法光纤 Fabry-Perot 腔液位传感器*

赵中华, 高应俊[†], 骆宇锋, 周密, 丁涛, 张志律

(暨南大学 光电工程研究所重大工程灾害与控制教育部重点实验室, 广州 510632)

摘 要:提出一种抗光源波动和外界干扰的条纹计数法光纤 Fabry-Perot 腔干涉型液位传感器. 为适应这种条纹计数法对应变大挠度的要求, 采用波纹管作应力弹性元件; 对干涉条纹走向(或液位升降判向), 分别提出实用的硬件设计方案和计算机软件处理办法; 给出一种腔长温度补偿设计; 实际制作了双光路光纤 Fabry-Perot 腔液位传感器, 进行了实际气压模拟试验和实际水位测量试验, 取得了良好结果.

关键词:光纤液位传感器; 法布里-珀罗腔; 条纹计数法; 波纹管

中图分类号: TN25

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2008)07-1369-4

0 引言

液位传感器是指检测液面高度信息的仪器, 它在工业和日常生活中有着重要而广泛的用途. 光纤液位传感器由于本质安全和精度高的特点特别适用于易燃易爆危险环境, 获得越来越广泛的研究和应用^[1-3]. 将光纤 Fabry-Perot(F-P)腔传感器应用于温度、压力、液位检测, 研究人员提出了各种结构形式, 并对其信号处理有很多讨论^[4-8]. 干涉条纹计数一直是干涉场信息处理的基本方法^[9-10].

文献[7-8]提出的光纤 F-P 腔液位传感器, 利用液体内部压强的原理测量液位, 是一种本质安全、安装简单方便、易于推广使用的一种液位传感器. 但这种液位传感器将应变片的变化限制在光波长 $\lambda/8$ 内, 导致动态范围小不易扩大; 同时它利用光强输出给出检测结果, 对整个传感器系统的抗干扰要求特别高, 对干涉系统的稳定性, 对光源及驱动电路的稳定性, 对数据处理电路的稳定性等, 都要求特别苛刻.

为了有效地解决上述问题, 本文将干涉条纹计数办法用于光纤 F-P 腔液位传感系统. 这样就从干涉信号处理原理上克服了各种光强漂移及外界干扰对输出的影响, 可以减化系统机械结构, 简化复杂的光电信号补偿和处理系统, 从而可以大大降低系统成本, 增强法布里-珀罗腔光纤液位传感器的实用性. 本方法另外一个好处是在理论上可以不受限制地增大液位测量的范围. 干涉条纹计数法的引入, 使得应变结构的应变量大大幅度增加, 经过调研和比较, 采用大挠度弹性元件—波纹管作 F-P 腔的腔面. 文中给出相应的光纤 F-P 腔结构设计. 对干涉光强输

出信息的条纹计数和液位升降判向, 分别提出实用的硬件设计方案和计算机软件处理办法. 提出了一种温度补偿设计方案; 实际制作了双光路光纤 F-P 腔液位传感器, 进行了实际气压模拟试验和实际水位测量试验, 取得有益结果.

1 干涉条纹计数法光纤液位传感器原理和结构

液体的内部压强与深度的关系为

$$P = \rho g h \tag{1}$$

式中 ρ 为液体密度, g 为重力加速度, P 为液体内部深为 h 处的压强. 测量出液体底部的压强 P , 即可得液位 h .

图 1 为一种条纹计数法光纤 F-P 腔液位传感器的设计结构图. 图中波纹管表面和自聚焦透镜准直器表面构成 F-P 腔. 干涉光经光纤传入, 经自聚焦透镜准直器输出为准平行光束, 部分光在自聚焦透镜表面反射, 部分光前行平行照射在波纹管表面后反射, 自聚焦透镜表面反射的光和波纹管表面反射的光会合时发生干涉, 其干涉输出光强与腔间距有关.

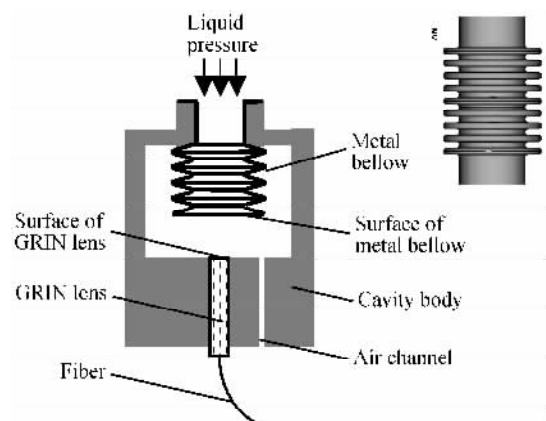


图 1 条纹计数法光纤 F-P 腔液位传感器结构
Fig. 1 Schematic diagram of the liquid level sensor with optical fiber F-P cavity

*教育部科学技术研究重点项目“新型连续型光纤液位传感器研究”(104182)资助

[†] Tel: 020-85226887 Email: tyigao@jnu.edu.cn

收稿日期: 2006-12-21

波纹管另一端与 F-P 腔体固定并与所测液体连通,液体内部的压强使波纹管伸长即 F-P 腔的腔间距减小,该腔间距改变使 F-P 腔干涉光强输出发生周期性的变化,测量输出光强的周期性变化,即对干涉条纹计数就可得到相应压强变化的大小,从而可计算得到液位深度.

干涉条纹数 N 与 F-P 腔间距变化 ΔL 的关系为

$$N = 2n\Delta L / \lambda \quad (2)$$

式中 λ 为光源的波长, n 为空气的折射率.

通常意义的 F-P 干涉仪,两反射面的反射率接近等于 1,其光强输出不是连续变化的,是一些很锐细的干涉条纹,这对本文提出的条纹计数和判向是不利的.恰当选择自聚焦透镜表面反射率和波纹管表面反射率的大小, F-P 腔输出光强是腔长 L 的周期变化的近似余弦函数,其变化周期为 $\lambda/2$,即腔长 L 每变化 $\lambda/2$,则光强输出大小经历变化一个周期,即变动一个条纹.通过对所有移动条纹计数,可以得到液位变化大小.

图 1 中 F-P 腔开有一个导气孔 7,使 F-P 腔体内部与被测液面上方或大气连通,便于在测量过程中,减少内部温升导致气体膨胀影响测量结果.

采用条纹计数法要求腔间距变化 ΔL 很大.如,若液位测量高度为 20 m,按目前工业液位测量精度 ± 2 mm 计算,要计数 5 000 个条纹;若光波长为 1 310 nm,则 ΔL 须变化约 3.275 mm.这是一个很大的应变变化量,使用弹性应变片是不可能材料弹性限度内给出线性响应的.

本文提出的 F-P 腔结构选择金属波纹管来提供大应变量.波纹管是一种压力弹性元件,其形状是一个具有波纹的金属薄管.使用时一般将开口端固定,内壁在受压力作用时,封闭的自由端将产生轴向伸长.波纹管的特殊结构,能够提供较大的线性挠度变化范围.具有可靠的密封性、耐压性、耐高低温性、耐腐蚀性、很高的灵敏度以及抗疲劳性.波纹管的轴向挠度与很多因素有关,在相当大的挠度变化范围,波纹管的轴向挠度与载荷大小成简单的线性关系.波纹管材料和技术参量的选择取决于工作环境和测量范围.

为使本文要求 F-P 腔间距有很大的变化量时能正常工作,使光强输出起伏在较小的范围,本文采用光纤自聚焦准直器使腔内光束成为准平行光束.

2 干涉条纹电子计数方法

干涉光强输出经光电转换,前置放大,整形后,需要对条纹计数.本文给出两种条纹计数方法.

2.1 电子线路硬件处理法条纹计数

利用施密特电路把与液位有关的周期性的输入信号转换成矩形脉冲波,就可以得到反映液位变化的脉冲数.如图 2,选择一个恰当阈值电平,当输入信号电压高于该阈值,触发电路就输出一个高电平脉冲信号,这个高电平一直维持到光强变化低于阈值下限.这样的处理,就使连续变化的信号电压转换为只输出高或低电平,即只输出“1”或“0”态,这正是数字电路所要求的.这样,在一个波长的信号周期里,该电路触发输出一个脉冲信号,计数电路就对这种“1”或“0”的脉冲信号进行计数.这种干涉光强输出处理办法所用电路简单,几乎不受光源、温度和环境随机波动对系统的影响,可以大大提升系统稳定性,大大减小系统成本.

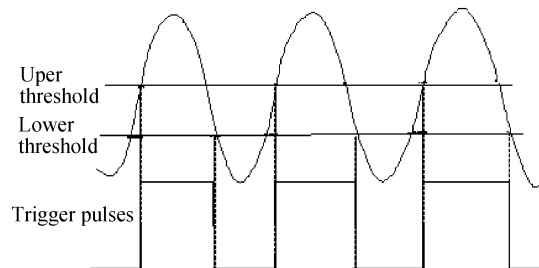


图 2 施密特触发电路矩形脉冲输出
Fig. 2 Pulse output of Schmitt trigger circuit

2.2 计算机软件法条纹计数

放大整形后的电信号,经 A/D 模数转换送往计算机编程处理,利用软件将周期性变化的数字信号通过设置阈值进行计数,这种方法更加简单可靠.

上述取阈可采用动态定阈值法,即根据每周期的最大和最小输出,自动计算设定新的阈值.

3 干涉条纹电子计数判向

为了正确进行条纹计数,必须正确判断条纹变动方向.为此本文给出一种双光路判向设计,它由两个相同参量的光纤自聚焦透镜准直器 A 和 B 构成,如图 3,它们均面对同一个应变反射面, A、B 两探头轴向错开 $\lambda/8$,则它们之间的光程差为 $\lambda/4$ (或位相差 $\pi/2$).为说明 A、B 两光路的输出光强和条纹移动方向之间的关系,将 A、B 两光路沿正向每隔 $\pi/4$ 位相差的输出相应位置分别用 A_1 、 B_1 、 A_2 、 B_2 ... 标

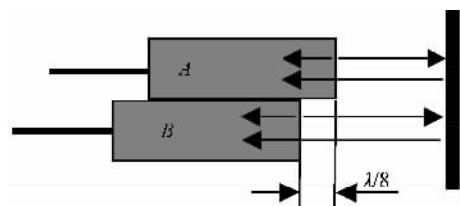


图 3 双光路判向光路设计
Fig. 3 Direction distinguishing design with double optical channels

出.即 $A_1、B_1$ 为一组对应输出位置, $A_2、B_2$ 为一组对应输出位置,依次类推,如图 4.

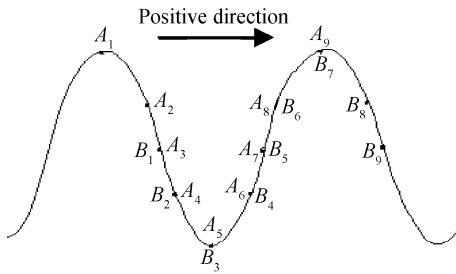


图 4 双光路判向光路原理分析
Fig. 4 Principle analysis of Direction distinguishing design by using double optical channels

这种双光路判向装置,如果在干涉条纹周期里的每一点都进行判向,是不能够正确判断方向的.但结合阈值计数,只在计数时判向,则判向结果是唯一确定的.

分析可知:如果设定 A 光路为计数光路,B 光路为判向光路,每当 A 路的输出上升到阈值(左取阈或右取阈)作条纹计数的同时,把 A 路的计数信号脉冲用作判向信号的触发开关,读取 B 路的光强变化信息(从大到小还是从小到大),它们信息变化的组合与液位上升或下降有唯一确定的逻辑对应关系,于是就可把 B 路的这个输出信息作为判断液位变化方向的依据.

表 1 A、B 路光路信息输出变化组合情形

条纹正向移动		条纹反向移动	
A 光路输出变化计数	B 光路输出变化判向	A 光路输出变化计数	B 光路输出变化判向
$A_2 \downarrow$	$B_2 \downarrow$	$A_2 \uparrow$	$B_2 \uparrow$
$A_8 \uparrow$	$B_8 \downarrow$	$A_8 \downarrow$	$B_8 \uparrow$

计数阈值选在相当于 $A_2、A_8$ 处电平

4 补偿温度变化对腔长的影响

选择适当的腔体材料及相关参量可以补偿温度变化对腔长的影响.根据材料的热性质,对于长度为 l 、热膨胀系数为 α 的材料,当温度变化 ΔT 时材料线度变化为

$$\Delta l = \alpha \cdot \Delta T \cdot l \tag{3}$$

设制作时的温度为 t_0 ,腔体的有效深度为 l_{01} ,腔体材料的热膨胀系数为 α_1 ;设波纹管有效长度为 l_{02} ,波纹管的轴向热膨胀系数为 α_2 ,于是 F-P 腔的实际长度为

$$d_0 = l_{01} - l_{02} \tag{4}$$

假设温度变化 ΔT 后为温度 t ,那么腔体的有效深度变为

$$l_{t1} = l_{01} + \alpha_1 \Delta T l_{01} \tag{5}$$

波纹管的轴向变化为

$$l_{t2} = l_{02} + \alpha_2 \Delta T l_{02} \tag{6}$$

于是温度 t 时候的 F-P 腔间距为

$$d_t = l_{t1} - l_{t2} = d_0 + (\alpha_1 l_{01} - \alpha_2 l_{02}) \Delta T = d_0 + c \Delta T \tag{7}$$

选择合适的腔体材料热膨胀系数以及初始长度,以及波纹管的轴向热膨胀系数以及初始长度,使

$$c = \alpha_1 l_{01} - \alpha_2 l_{02} = 0 \tag{8}$$

那么,在一定范围内对于任何温度变化,都有

$$d_t = d_0 \tag{9}$$

这样 F-P 腔长就不会随温度变化.这里要求温度变化范围 ΔT 不非常大(一般能满足).

5 压力模拟及水位试验测量

本文的初步实验是采用精密气压给定装置给传感器系统加压模拟液压来进行的.该加压装置满量程为 $0 \sim 100$ KPa(相当于约 10 m 水深),给压准确度为 0.05% .通过 Labview 脉冲计数软件或万用表观察输出结果.在实际测试中,传感器每输出 10 个脉冲(即 10 个条纹)记录一次压力源提供的压力数据.图 5 是模拟实验中所加气压值与干涉条纹变化数的测量结果.图中的实线是拟合结果.可以看出,总体线性和重复性非常良好.本文还比较了上升行程和下降行程中压力值与脉冲数输出,一致性很好.由实验数据可以看出,本系统在很大的量程范围内(气压模拟液位量约为 10 m)具有很好的线性和精确度(最小分辨率为 2 mm).

本文还进行了水位变化情况下直接测量水位的

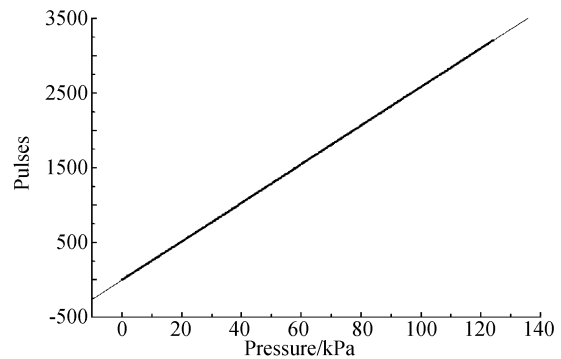


图 5 压力模拟测量结果
Fig. 5 Measurement results with air pressure

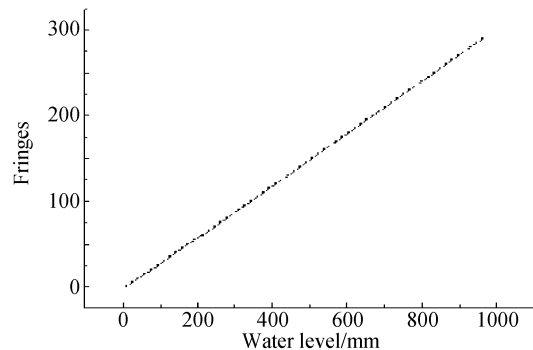


图 6 实际液位测量结果
Fig. 6 Measurement results with water

实验. 在实验室有限条件下, 每变化 5 个条纹(即 5 个脉冲数)测一次水位, 所进行的最大实验测量范围为 1 m 左右. 测量结果见图 6, 具有非常好的线性和稳定度. 同时可以看出, 气压模拟测量能相当真实的反映实际水位测量.

6 结论

本文针对光强输出式干涉液位传感器存在的问题, 提出用干涉条纹计数办法来检测干涉输出. 提出将大挠度弹性元件—波纹管用来作应变器件来解决大应变量 F-P 腔结构问题. 文中对干涉光强输出信息的条纹计数和液位升降判向, 分别提出了实用的硬件设计方案和计算机软件处理办法; 提出了一种 F-P 腔温度补偿设计方案; 通过实际制作的光纤 F-P 腔液位传感器, 进行了气压模拟试验和实际水位测量试验, 取得有益结果. 本文工作是初步的, 有待进一步深入进行研究和改进以便实际应用.

本文提出的办法从干涉信号处理原理上克服了光强漂移及外界干扰对输出的影响, 可以简化系统机械结构、简化复杂的光电信号补偿和处理系统, 从而可以大大降低系统成本, 增强 F-P 腔光纤液位传感器的实用性.

参考文献

- [1] PEREZ O F, RUBINO A, ABRIL J M, *et al.* Fiber-optic liquid-level continuous gauge[J]. *Sensors And Actuators A Physical*, 2006, **125**(2): 124-132.
- [2] TSENG F G, LIN C J. Polymer mems-based fabry-perot shear stress sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2003, **3**(6): 812-817.
- [3] JIN Wei, RUAN Shuang-chen. New progress in optical fiber sensing technology[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2005: 290.
- 靳伟, 阮双琛. 光纤传感技术新进展[M]. 3 版. 北京: 科学出版社, 2005: 290.
- [4] SARAN A, ABEYSINGHE D C, BOYD J T. Microelectromechanical system pressure sensor integrated onto optical fiber by anodic bonding[J]. *Appl Opt*, 2006, **45**(8): 1737-1742.
- [5] WANG A, XIAO H, WANG J, *et al.* Self-calibrated interferometric-intensity-based optical fiber sensors [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2001, **19**(10): 1495-1501.
- [6] LIU H Y, MILLER D W, TALNAGI J W. Performance evaluation of fabry-perot temperature sensors in nuclear power plant measurements[J]. *Nuclear Technology*, 2003, **143**(2): 208-216.
- [7] RUAN Chi, GAO Ying-jun, LIU Zhi-lin, *et al.* Fiber optics fabry—perot level meter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(10): 1-4.
- 阮驰, 高应俊, 刘志麟, 等. 光纤法布里-珀罗 (Fabry-Perot) 腔液位传感器[J]. 光子学报, 2003, **32**(10): 1-4.
- [8] HUANG Wei-rong, GAO Ying-jun, LIU Zhi-lin, *et al.* The temperature compensation design of an optical fiber liquid level sensor with fabry-perot cavity [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12): 1810-1813.
- 黄伟荣, 高应俊, 刘志麟, 等. 温度对光纤法-珀液位传感器腔深度的影响与补偿, 光子学报, 2005, **34**(12): 1810-1813.
- [9] STIEBIG H, MANDRYKA V, BUNTE E, *et al.* Novel micro interferometer for length measurements[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2004, **338-340**(15): 793-796.
- [10] QI Yong-yue, ZHAO Mei-rong, LI IN Yu-chi. High accuracy system of laser interferometer fringe division[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2006, **25**(8): 43-48.
- 齐永岳, 赵美蓉, 林玉池. 高精度激光干涉条纹细分系统[J]. 传感器与微系统, 2006, **25**(8): 43-48.

An Optical Fiber Fabry-Perot Cavity Liquid Level Sensor Using Interference Fringe Counting Technique

ZHAO Zhong-hua, GAO Ying-jun, LUO Yu-feng, ZHOU Mi, DING Tao, ZHANG Zhi-lü
(Key Laboratory of Disaster Forecast and Control in Engineering, Ministry of Education of the People's
People's Republic of China, Optoelectronic Engineering Institute,
Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Received date: 2006-12-21

Abstract: An optical fiber Fabry-Perot cavity liquid level sensor with anti light source fluctuations and disturbances using interference fringe counting technique is developed. Flexible metal bellows, which can afford a large strain displacement, is suggested to be one surface of the F-P cavity. Both the hardware electronics design scheme and the software treatment methods are developed to count the fringes and determine the up or down of the liquid level. A design for compensating the temperature affection is suggested. The liquid level sensor is fabricated; the practical measurements is carried out both for the air pressure and the water level.

Key words: Optical fiber, liquid level sensor; Fabry-Perot cavity; Interference fringe; Flexible metal bellow

ZHAO Zhong-hua was born in 1974, and received his Master's in science from Jinan University in 2006. His research interest focuses on optical fiber sensing and communications.