

温度对光纤法-珀液位传感器腔深度的影响与补偿*

黄伟荣¹ 高应俊^{1,2} 刘志麟³ 张范军³ 阮 驰¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所,瞬态光学技术国家重点实验室,西安 710068)

(2 暨南大学理工学院,广州 510632)

(3 广州市敏通光电科技有限公司,广州 510150)

摘 要 在深入研究温度对光纤法-珀液位传感器腔深度影响的基础上,提出一种特别的腔结构设计,可以几乎完全补偿温度对 F-P 腔深度影响,使得腔的温度稳定性很好. 这种压力式全光型光纤液位传感器的安装非常方便,特别适合于对已有的装载易燃易爆物质的大型油罐、储液罐等进行自动化监测与管理,也适合于一般工业生产与生活中液位的精密监控.

关键词 液位; 光纤传感器; 法-珀(Fabry-Perot)腔; 温度; 补偿

中图分类号 **文献标识码** A

0 引言

液位检测,特别是装载易燃易爆液体容器液位的检测,到目前为止有人工检测法、机械装置法、电气装置法等,但是这些方法在安全性、自动化、准确度等方面存在缺陷,而光纤传感器的特有物理性质正好可以克服这些缺陷^[1]. 光纤的材质是石英,可抗电磁干扰、避免电火花,是本质安全的. 光纤损耗低,可以实现现场与监控中心的远距离隔离,又易于形成网络化管理. 光纤液位传感器种类甚多,以光功率型为主^[2],主要有基于全内反射、遮光、泄漏模式的;有利用液体表面反射,利用荧光特性和光纤微小弯曲特性的,以及浮子式等众多方式. 但是这些光纤液位传感器也有明显的不足,有的受所测液体的光学性质、粘稠度等严重限制,有的量程很小,有的综合准确度不高,有的稳定性可靠性不理想,有的性价比太低. 大多结构复杂、安装调试不便.

根据液体内部的压强与深度有关的原理,研究设计了一种光纤法-珀腔压力法光纤液位传感器^[3]. 本文首先对该传感器作了深入的理论和实验研究,大大改进了其稳定度,给出了其较为满意的结果. 同时,为了进一步提高其实用性,在理论研究的基础上,提出了一种特殊的腔结构设计,使得可以从结构上实现温度补偿,从而可以满足更好、更实用的要求.

1 光纤 F-P 腔液位传感器的原理与结果

设计的光纤 F-P 腔液位传感器一般原理与结构是:激光器经由光纤将光垂直输入 F-P 腔,输入光经过 F-P 腔两平行面作用形成多光束干涉,输出光返回光纤,经耦合器进入光电探测器. F-P 腔的一个面是光纤端面,另一个面是可发生挠曲的应变恒弹性片,它的挠度由液压的大小确定. 这样,不同液位的液压产生不同的弹性片挠度,不同的挠度改变 F-P 腔的深度及干涉光的光程差,引起输出光强度的变化. 于是检测输出光强度的变化,就能够把液体深度对应起来,实现液位测量.

这种压力式液位传感器非常便于现场安装使用,不需要对储存容器做任何改动,只要安装在其已有的上、下连通管道阀门后即可,见图 1.

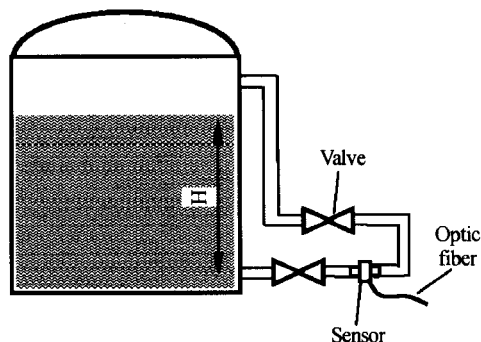


图 1 传感器在储罐安装
Fig. The sensor setting on tank

与此前初步实验结果^[3]的不够稳定相比,经过关键结构及工艺上的重大改进,光纤与恒弹性片的高准确度垂直、传感器的紧固封装得到解决,使得传感器系统具有很好的输出稳定性,在同样的试验条件下重复性很好.

图 2 是改进后实验传感系统得到的液位输出结

*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)、广东省科技计划项目“连续型光纤液位传感器中试研究”(2003C102012)和广州市科技攻关引导项目“新型光纤液位传感器”(2003Z3-D0111)资助
Tel: 029-88498712 Email: hwryt@sohu.com
收稿日期: 2003-12-11

果. 图中横轴对应压强变化(液位), 纵轴是电压, 对应光强度变化.

实验中由配套的精密气体压力系统均匀加载气压(液位). 图 2 中显示了一个多周期的电压-压强关系曲线, 曲线相当平滑、稳定. 进行重复性实验, 均可得出一致结果, 说明传感器的特性非常好. 图

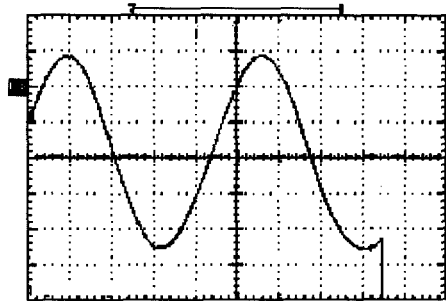


图 2 液位传感器在示波器上的实时测量曲线

Fig. 2 Experiment result of the improved optical fiber liquid level sensor shown on oscilloscope in real time

3 是用上述数据点绘图, 取图 2 中的一段线性区间, 并且把压力增加和减少的上下行线画于同一图中. 图中可见两线重合得很好, 说明重复性和实验数据跟踪性很好.

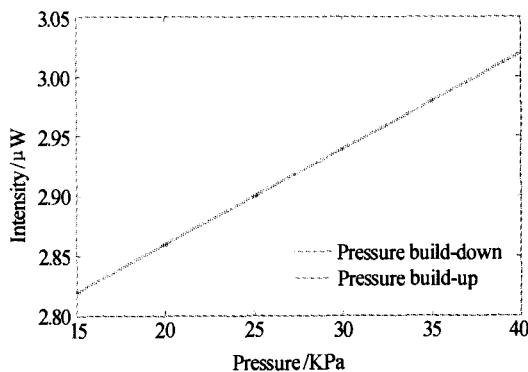


图 3 线性区段的测点图

Fig. 3 The experimental data in the linear range

这对于传感器非常重要, 有了良好的重复性就可以获得可信的传感结果.

2 温度对 F-P 腔深度影响的分析

以上结果是在温度基本不变的情况下测得的. 按照理论模型, 进入 F-P 腔的是恒定强度入射光, 在腔结构已确定的情况下, 出射光是腔深度(即恒弹性片挠度)的函数. 在实际使用中, 传感器会在不同的温度环境下运行. 由于传感器是利用 F-P 腔光干涉, 它对腔的深度变动异常灵敏, 在实际运行中除了液体压强(对应着液位)变化引起弹性片挠度变化从而改变腔的深度之外, 环境温度的变化也会对腔深度有微小的影响.

2.1 考察温度对 F-P 腔深度影响的必要性

这种液位传感器由于出射光能量是腔深度类似

于余弦的周期函数, 设计使用相邻峰谷之间变化率较快的线性区, 它的光程大约是四分之一的光波长, 对应着腔的深度变化是八分之一光波长. 若使用的是中心波长 1310 nm 的 LD 光源, 这意味着腔深度的有利变动范围是大约 164 nm, 也就是从液位为零到满量程的最高液位, 将产生腔深度改变 164 nm, 这是一个小尺度. 如果把这满量程分成一万等份, 就是说希望达到 0.01% 的目标分辨率, 那么每一份产生的腔深度改变是 0.0164 nm, 这是一个极其小的变化量. 要达到这样的准确度目标, 除了液位变化, 其他因素所导致的腔深度变化不应该大于这个上限 0.0164 nm.

2.2 温度对 F-P 腔深度构成量——支撑长度的影响

构成 F-P 腔深度的支撑材料是有一定的热膨胀系数的, 不能看成在腔的深度方向尺寸不受温度的影响, 只能把它的影响控制在设计目标准确度所能接受的范围内.

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 $\Delta l = \alpha \cdot \Delta T \cdot l$. 若设定腔深度 $5 \mu\text{m}$, 腔壁材料为热膨胀系数 α 数值为 $2.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 的硅^[4], 则温度每变化 1°C , 深度变化量是 0.012 nm. 这已经接近了上限 0.0164 nm, 而实际的温度变化范围一般要考虑以室温为起点上下变化 50°C , 深度变化量将是 0.6 nm, 说明对腔深度的影响还是不能忽略的. 即便是使用热膨胀系数 α 数值小到 $0.55 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 的石英^[4]作腔深度的支撑材料, 温度变化 50°C 所产生的腔深度变化量仍然有 0.137 nm. 所以温度对 F-P 腔深度构成量——支撑长度的影响是不可忽视的, 有必要采取措施加以补偿, 使其影响在液位设计目标准确度之内.

2.3 温度对 F-P 腔深度改变量——弹性元件挠度的影响

温度变化会引起弹性片的几何要素和物理参数变化, 相同的载荷下弹性片的挠度会有所不同. 下面估计这个误差.

根据弹性力学理论^[5,6], 在均匀载荷下, 周边固定的圆形弹性片在以圆心为极点的极坐标平面内, 弹性片中心的挠度为

$$w_0 = \frac{3PR_0^3(1-\nu^2)}{16Eh^3} \quad (1)$$

式中载荷 P 是弹性片所受压强, ν 是材料泊松比, E 是杨氏弹性模量, R_0 是圆片有效半径, h 是厚度. 其中一种实例参数如下: 由前面 0.01% 的准确度要求以及总量 20 m 水高度, 设置弹性片半径 $R_0 =$

284 μm, 则厚度 $h=20\ \mu\text{m}$.

设温度从制作时候的 t_0 变化到 t , 考虑弹性片半径 R_0 、厚度 h 以及杨氏弹性模量 E 由于温度变化引起的挠度相对变化量, 将式(1)作变分得

$$\frac{\delta w}{w} = 4 \frac{\delta R_0}{R_0} - 3 \frac{\delta h}{h} - \frac{\delta E}{E} \quad (2)$$

由热膨胀系数 α 及弹性模量温度系数 β 的定义^[7]

$$\beta = \frac{1}{E_0} \cdot \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{1}{E_0} \cdot \frac{E - E_0}{t - t_0} \quad (3)$$

式(2)化为

$$\frac{\delta w}{w} = \alpha \cdot \delta t - \beta \cdot \delta t \quad (4)$$

已知硅材料 $\alpha = 2.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $\beta = -63 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ^[4], 弹性模量温度系数起主要作用. 若具体考虑传感器的环境温度从制作时候的 $t_0 = 25^\circ\text{C}$ 上升到 $t = 75^\circ\text{C}$, 那么弹性片挠度的相对变化量是

$$\frac{\Delta w}{w} = 0.0033 \quad (5)$$

可见对于温度变化 50°C , 由于弹性模量温度系数造成的弹性片挠度相对误差已经是设计目标准确度的33倍, 当传感器满负荷时, 由此引起的 F-P 腔深度误差将达到 $0.54\ \text{nm}$, 远大于 $0.0164\ \text{nm}$. 因此不能忽视弹性模量 E 随温度的变化而取作常数.

一般情况下, 对于空间分布的温度场, 弹性元件测量点与它的周围存在温度梯度, 从而产生温度应力造成温度误差. 如果弹性片尺度较大, 温度梯度较大, 则热应力明显, 温度的空间不均匀应该考虑. 但是由于这里的光纤法布里-珀罗腔液位传感器的传感头总体积很小, 硅弹性片热导率很好, 外壳也具有良好的热导性, 因此传感头所在的区域温度分布可以认为是处处均匀的, 从而温度梯度产生的热应力可以忽略不计.

3 温度对 F-P 腔深度影响的补偿方法

由上节讨论可知, 温度对 F-P 腔深度构成量——支撑长度的影响以及对 F-P 腔深度改变量——弹性元件挠度的影响都不能忽视. 其中前者只跟温度有关, 后者还与负荷有关, 且中负荷以上影响大, 可以通过弹性模量温度修正来消除.

对于温度对 F-P 腔深度构成量——支撑长度的影响, 提出了一种特殊的结构, 从结构设计上设法补偿温度对腔深度的影响.

在硅材料的弹性片腔面这一侧的中心形成一相当于光纤端面大小(直径约 $100\ \mu\text{m}$)的凸起台阶, 台阶的高度参考硅与支撑底座材料的热膨胀系数确定, 并且使带台阶的部分要能够具有足够的刚度, 参见图 4.

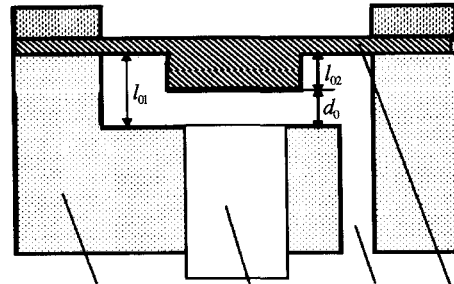


图 4 传感头温度补偿结构
Fig. 4 The structure of the sensing part for temperature compensation

这种传感头单元结构还充分地考虑到了性价比, 制作工艺实现上的可控性、重复性, 以及产品寿命与免维护性.

设温度 t_0 时, 支撑底座的凹腔深度为 l_{01} , 材料的热膨胀系数为 α_1 , 硅材料的弹性片的凸台高度为 l_{02} , 热膨胀系数为 α_2 , 于是 F-P 腔的深度为

$$d_0 = l_{01} - l_{02} \quad (6)$$

假设温度变化 ΔT 后为温度 t , 那么支撑底座的凹腔深度变为

$$l_{11} = l_{01} + \alpha_1 \Delta T l_{01} \quad (7)$$

凸台高变为

$$l_{12} = l_{02} + \alpha_2 \Delta T l_{02} \quad (8)$$

于是温度 t 时候的 F-P 腔深度为

$$d_t = l_{11} - l_{12} = d_0 + (\alpha_1 l_{01} - \alpha_2 l_{02}) \Delta T = d_0 + c \Delta T \quad (9)$$

如果选择合适的材料热膨胀系数以及初始长度, 使

$$c = \alpha_1 l_{01} - \alpha_2 l_{02} = 0 \quad (10)$$

那么

$$d_t = d_0 \quad (11)$$

这样就保持了腔深度的温度影响不变性. 这里要求温度变化范围 ΔT 不是非常大, 能够使得材料的热膨胀系数在基本不变的范围内.

这个做法的前提是支撑底座的热膨胀系数要小于硅弹性片的, 但又不能过小, 以避免二者封装之后的热失配过大. 使用与硅匹配的材料 Invar 合金做支撑底座, 根据 Invar 合金的热膨胀系数 $1.8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ^[4] 和硅的热膨胀系数 $2.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 数值以及上面的配置关系式(10), 可以把支撑座深度 l_{01} 设置为 $46\ \mu\text{m}$, 凸台高度 l_{02} 设置为 $36\ \mu\text{m}$, 这样就可以补偿腔深度的构成量——支撑长度的温度影响.

选择这样的长度关系具体数值, 还有下面的考虑: $36\ \mu\text{m}$ 的凸台高度与原定弹性片厚度 $20\ \mu\text{m}$ 相比, 可以确保凸台这部分有足够的刚性.

这时弹性片的挠度公式相应地调整为^[5,6]

$$w_0 = \frac{3PR_0^4(1-\nu^2)}{16Eh^3} \left[1 - \left(\frac{r_0}{R_0} \right)^4 - 4 \left(\frac{r_0}{R_0} \right)^2 \ln \frac{R_0}{r_0} \right] \quad (12)$$

式中 r_0 是凸台的半径. 这里在整个凸台面上具有一致的挠度, 但与原来平面弹性片的中心挠度相比

有所减小,其因子 $A(r_0)$ 是

$$A(r_0) = 1 - \left(\frac{r_0}{R_0}\right)^4 - 4\left(\frac{r_0}{R_0}\right)^2 \ln \frac{R_0}{r_0} \quad (13)$$

用 $r_0 = 50 \mu\text{m}$ 和 $R_0 = 284 \mu\text{m}$ 代入式(13)得 $A(r_0)$ 为 0.784. 从该数值可见损失了约 21% 的弹性片挠度变化范围,这是不利的,为此增加弹性片的半径来充分利用许可的挠度变化即有效区间. 把弹性片半径由 $284 \mu\text{m}$ 增大到 $300 \mu\text{m}$,则 $A(r_0)$ 为 0.8001,与此同时因半径增大引起的挠度变大比例是 $(300/284)^4 = 1.245$,二者共同作用的结果是 0.996,几乎没有损失.

这种补偿方法不仅可以补偿腔深度的构成量——支撑长度的温度影响,而且极为重要的是还有如下两个原因:1)化原先弹性片弯曲时的曲面为平面,一方面使得 F-P 腔的两个面是完全平面,更符合 F-P 腔要求,另一方面降低了光纤与弹性片同轴度的要求,使得工艺上更容易实现;2)有利于在凸台上镀光学膜,因为这种情况下的光学膜不会发生挠曲,而光学膜对于改善反射率、提高反差、降低探测电路指标要求等有着非常重要的作用.

4 结论

文章从应用角度出发,对工艺改进的光纤法布里-珀罗腔(Fabry-Perot)液位传感器结构进行了探讨. 在分析温度对 F-P 腔的影响基础上,从结构设计上解决了腔深度的温度影响的补偿问题,以期保证传感头工作的温度稳定性. 这个方法的实际效果及可行性如何,有待进一步实验验证,有关实验正在

进行中. 相信随着光纤法-珀腔液位传感器的进一步完善,会在液位尤其是易燃易爆液体液位的测量中得到广泛应用,有力地促进油品、化工原料等的精确、安全管理.

参考文献

- 1 王惠文. 光纤传感技术及应用. 北京:国防工业出版社, 2001
Wang H W. The technologies and applications of optical fiber sensing. Beijing: National Defence Industry Press, 2001
- 2 黄燕平,裴丽,简水生. 光纤液位传感器综述. 光通信技术, 1995, 19(2): 30~36
Huang YP, Pei L, Jian S S. *Optical Communication Technology*, 1995, 19(2): 30~36
- 3 阮驰,高应俊,刘志麟. 光纤法布里-珀罗 (Fabry-Perot) 腔液位传感器. 光子学报, 2003, 32(10): 1170~1173
Ruan C, Gao Y J, Liu Z L. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(10): 1170~1173
- 4 刘广玉,樊尚春,周浩敏. 微机械电子系统及其应用. 北京:北京航空航天大学出版社, 2003
Liu G Y, Fan S C, Zhou H M. MEMS and The Applications. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2003
- 5 刘人怀. 板壳力学. 北京:机械工业出版社, 1990
Liu R H. Mechanics on Plank and Shell. Beijing: China Mechanics Industry Press, 1990
- 6 王龙甫. 弹性理论. 北京:科学出版社, 1979
Wang L P. The Theory of Elasticity. Beijing: Science Press, 1979
- 7 李科杰. 新编传感器技术手册. 北京:国防工业出版社, 2002
Li K J. The New Handbook of Sensor Technology. Beijing: National Defence Industry Press, 2002

The Temperature Compensation Design of An Optical Fiber Liquid Level Sensor with Fabry-Perot Cavity

Huang Weirong¹, Gao Yingjun^{1,2}, Liu Zhilin³, Zhang Fanjun³, Ruan Chi¹

¹ State Key Laboratory of Transient Optics Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Academia Sinica, Xi'an 710068

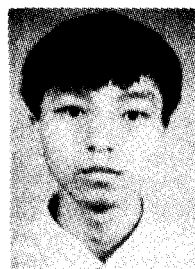
² Department of Physics, Jinan University, Guangzhou 510632

³ Guangzhou Mintong Optoelectronics Tech. CO., LTD. Guangzhou 510632

Received date: 2003-12-11

Abstract The impact of temperature to a fiber Fabry-Perot cavity depth is analyzed. A novel design of optical fiber liquid level sensor for compensating the temperature is introduced. The developed structure ensures that the cavity length keeps constant when the temperature changes. The sensor can be applied in the inflammable and explosive circumstance, for accurate automatic measurement.

Keywords Liquid level; Optical fiber sensor; Fabry-Perot cavity; Temperature; Compensation



Huang Weirong was born in Hu'nan Province, in 1977. He received his B. S. degree from Department of Physics in Jilin University. Now he studies in Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Academia Sinica for Master of Science. His current research field is in optical fiber sensor.