

对射式螺旋形光纤液位传感器的设计与实现

龚 英 葛俊锋 叶 林 舒 俊

(华中科技大学自动化学院 武汉 430074)

摘 要:介绍了一种将对射和螺旋两种结构结合在一起的光纤液位传感器。该传感器以两根侧发光光纤为基础,其中一根作为发射光纤,另一根作为接收光纤,当液面变化引起外部介质折射率发生变化时,发射光纤中光功率的损耗量会发生变化,耦合进入接收光纤的光功率会随之变化,通过检测此变化量即可获知液面高度信息。相对于直接使用两根直侧发光光纤对射的结构而言,螺旋结构的引入会提高光功率相对变化量,从而使其获得更好的性能。实验结果表明,该传感器能够实现液位的连续测量,并具有较好的重复性能。

关键词:泄露式;对射式;光纤传感器;液位传感器

中图分类号: TN2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

Design and realization of an opposite-type spiral optical-fiber liquid-level sensor

Gong Ying Ge Junfeng Ye Lin Shu Jun

(Department of Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: An optical-fiber liquid-level sensor which combines two structures, opposite-type and spiral-type is present. The sensor is based on two side-glowing optical fibers, one as a launching fiber and the other as a receiving fiber. When refractive index of external media varies with liquid-level, light leakage of the launching fiber changes and then light intensity coupled into the receiving fiber will change. So the liquid-level can be obtained by this change. Compared with a sensor using two side-glowing optical fibers directly, spiral structure introduction can increase relative variation and then improve its performance. The experimental results indicated feasibility and excellent repeatability of the sensor.

Keywords: light leakage; opposite-type; optical fiber sensor; liquid level sensor

1 引 言

光纤传感器具有体积小、重量轻、灵敏度高、测温范围宽、抗电磁干扰能力强等优点,广泛应用于工业生产、医疗卫生、国防工程等重要领域。而根据目前国内外的研究方向来看,主流的研究方向有以下几种,反射式^[1-3]、压力式^[4-8]、泄露式^[9-14]等。反射式液位传感器大多基于受抑全内反射原理,在检测一个液位点的基础上,利用光纤传感头外加步进电机的方式来实现液位的连续测量。这种测量方式对传感头的材料和工艺有较高的要求,如形状、材质、抗污染能力等,且由步进电机等组成的位移装置也会引入相应的系统误差。压力式液位传感器通过测量液体的压力来获取液体的位置信息,主要研究类型有两种,光纤法布里-珀罗(Fabry-Perot)腔^[4-6]以及光纤布拉格光栅(FBG)^[7-8]。这两种类型的光纤液位传感器都有不错的性

能,尤其在抗光源波动干扰方面,理论上能达到不错的效果,但由于它们都是基于液体的静压强来进行液位的测量,当液体运动时将产生加速度和额外压强,因此并不适合液位的动态测量。且若利用输出光波长的变化来指示液位,光波长解调技术也将是其面临的一大问题。泄露式液位传感器则是利用光纤的传输损耗进行液位的测量。当液面发生变化时,液-空比会发生变化,外部介质的折射率也会发生变化,而光纤的传输损耗程度与折射率有关,因此通过检测出射光强便可得知液面高度^[15]。这种测量方式结构简单、容易实现,非常适合液位的测量。

泄露式液位测量方法有多种,这里介绍比较常见的几种。1)对包层进行处理,使更多的光从纤芯中泄露出来^[9-11]。这种方法灵敏度高、响应速度快,但会受环境温度影响,需采取相应补偿策略,且液滴黏附会比较严重,影响测量精度。2)利用光纤的弯曲损耗^[13-14],通过改变光在

光纤中原本的传输路径,使更多的光从包层中泄露出来。这种方法结构简单,可操作性强,稳定性和一致性相对于前者来说都比较好,但对于单根光纤来说,当液位变化引起外部介质折射率发生变化时,输出端光功率的变化量相对于输入端的光功率来说比较小,容易受光源的影响。还有一种是采用两侧发光光纤对射的方法^[14],用一根光纤去接收另一根光纤的泄露光量来指示液位的变化,这种方法由于光纤的衰减系数较小,输出变化不明显而导致灵敏度较低。

本文设计了一种对射式螺旋形光纤液位传感器,该传感器将螺旋及两根侧发光光纤对射两种结构结合在一起,使其能兼顾两者的优点,在有较高灵敏度的同时,也能有较好的稳定性能。

2 传感器工作原理

如图1所示,将两根光纤缠绕在一螺旋杆上,一根用作发射,一根用作接收,两根光纤仅通过外部介质进行耦合。文中介绍的传感器所使用的光纤均为侧发光光纤,主要是通过向纤芯中添加散射粒子,使得光能够发生散射并从侧面泄露出来。整个测量系统的工作流程如下:光源发出的光在发射光纤中传输时发生散射,部分散射光会泄露出去,泄露的散射光会穿过两根光纤之间的介质到达接收光纤并在其表面发生菲涅耳反射。其中,折射光部分会进入光纤,在接收光纤中进行传播,直至到达光纤端面后被探测器接收。而当液位为1时,发射光纤的出射光功率 P_o 可近似为^[14]式(1)。

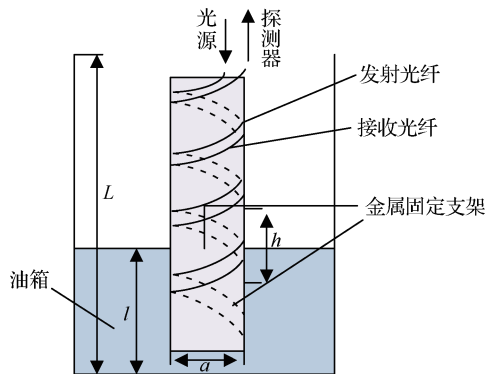


图1 对射式螺旋形光纤液位传感器原理

$$P_o = TP_i(1 - \alpha_d Kl) \quad (1)$$

式中: T 为常数项,表示零液位时定长单根光纤输入与输出之比; P_i 为入射光功率; α_d 为光纤在液体和空气中的衰减系数之差; K 为螺旋线的弧长与高度之比。不考虑光的吸收及其他能量形式的转化,发射光纤中光功率相对于零液位点时功率的变化即光的相对泄露量,可表示为:

$$P_i = TP_i \alpha_d Kl \quad (2)$$

两光纤对射耦合原理可简化为图2所示,泄露光穿过外部介质到达接收光纤表面时会发生菲涅耳反射。假设光纤的折射率为 n_1 ,空气折射率为 n_2 ,液体折射率为 n_3 ,

发射光纤中光的入射角为 α ,出射角 β 则为:

$$\beta = \arcsin\left(\frac{n_1}{n} \sin \alpha\right) \quad (3)$$

式中: n 为光纤外部介质折射率。

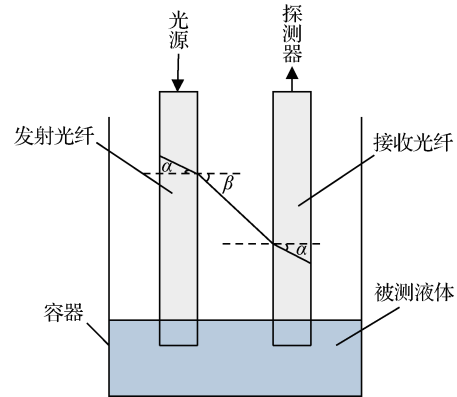


图2 两光纤对射耦合原理

而反射率 R (反射光强与入射光强之比)公式为:

$$R = C_1 R_s + C_2 R_p, (C_1 + C_2 = 1) \quad (4)$$

式中: C_1, C_2 为入射光中垂直振动分量与平行振动分量的比例系数, R_s 为入射光垂直振动方向的反射率, R_p 为平行振动方向的反射率,两者与菲涅耳系数 r_s, r_p 直接相关,其公式为:

$$R_s = |r_s|^2, R_p = |r_p|^2 \quad (5)$$

而由菲涅耳公式可知:

$$\begin{cases} r_s = -\frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin(\alpha + \beta)} \\ r_p = \frac{\tan(\alpha - \beta)}{\tan(\alpha + \beta)} \end{cases} \quad (6)$$

由能量守恒原理可知,折射光的功率 P_r 与入射光功率 P 的关系为:

$$P_r = (1 - R)P \quad (7)$$

若泄露光穿过介质到达接收光纤表面的比例为 C_a ,由于两光纤之间的距离非常近,介质无论是液体还是空气时光的衰减量都很小,可近似相等,因此该系数近似恒定。此时,到达接收光纤的相对光功率 P 可表示为 $C_a P_i$,进入光纤折射光的相对功率 P_{or} 为:

$$P_{or} = (1 - R) C_a T P_i \alpha_d Kl \quad (8)$$

发射光纤中的泄露光被耦合进入接收光纤后,通过光纤中粒子的散射,有一部分光会被探测器接收到,而另一部分则会被泄露出去,设被探测器探测到的光功率比例为 C_s ,此系数受液位变化影响较小,更多的与光纤中散射颗粒有关,因此可近似恒定,则该探测器输出的相对变化量可近似为:

$$P_{or} = (1 - R) C_a C_s T P_i \alpha_d Kl \quad (9)$$

当给定整个系统时, $C_a C_s T P_i \alpha_d K$ 皆恒定,则式(9)可写为:

$$P_{or} = C \left(1 - C_1 \frac{\sin^2(\alpha - \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)} - C_2 \frac{\tan^2(\alpha - \beta)}{\tan^2(\alpha + \beta)} \right) l \quad (10)$$

由式(10)可知,当 $\alpha - \beta > 0$ 时,即光纤折射率与外部介质折射率较接近时,输出与液位的关系近似线性。

3 传感器的设计及制作

对射式螺旋形光纤液位传感器的总体结构主要由3部分构成:缠绕了两根侧发光光纤的螺旋杆,上侧空腔,下侧盖板。其中,作为传感器的油位探测部位,为增强其抗震性能,螺旋杆选用铝合金材质的空心圆杆制成,用来固定两侧发光光纤。由式(9)可知,光功率的变化量与 α_d 和 K 有关,而 α_d 会随着弯曲半径的减少而增大,因此螺旋线半径和螺距的选择会影响到整个传感器有效输出变化量的大小。理论上来说弯曲半径越小,有效变化量越大,但过度弯曲会损坏光纤,螺距过小则可能影响传感器的重复性^[1]。经过计算与试验发现,14 mm的弯曲半径,15 mm的螺距效果良好。上侧空腔用来放置电路板,下侧盖板则用来隔绝两根光纤端面与液体,整个实物如图3所示。其中,发射光纤的一端接光源,接收光纤则接光敏元件,两者底部一端均用平滑反射材料包裹,避免光线过多地从底部泄露。为了使发射光纤中的光尽可能多的泄漏耦合到接收光纤中,两根光纤应尽可能的靠近,且平行分布。

传感器制作过程中,有两个问题需要注意:光纤端面的处理和光纤长度的选择。光纤端面是光泄露比较严重的部位,且对液体变化非常敏感,极少量的液滴黏附都可能使输出变得极大甚至饱和。因此,在光纤端面的问题上,需采用密封方式进行处理。首先,将底盖所对应的螺旋槽深度加深,使光纤能够完全嵌入,再用下侧盖板无缝配合金属支架,以尽可能的减少液体渗入。当两者完全配合后,再使用专用密封胶进一步加固,最终使得两者能够紧密配合且不让液体渗入。光纤长度的选择,关系到材料的利用率,光纤长度过长会导致材料利用率过低,过短则无法完成传感器的组装,因此在截取光纤之前,需要按照螺旋线公式进行长度的计算。

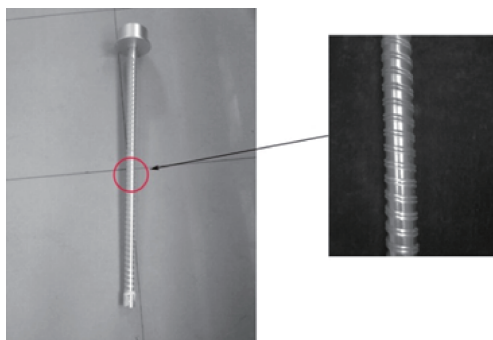


图3 对射式螺旋形光纤传感器实物图

在传感器中采用的光源为一高功率、高稳定性的白光LED,为了配合之后的微弱信号处理电路,该光源的驱动电路由某一预选频率的调制信号控制,使其产生调制的光信号。而由于光纤自身的波长范围为420~680 nm,因此

光敏器件选择峰值波长为580 nm,响应范围为350~1100 nm的硅光敏三极管。该三极管灵敏度较高,工作温度范围宽,可提供较宽接收角度,便于将微弱的光信号转换成与之相对应的暗电流信号。

由于光信号本身就比较微弱,因此在后期的信号处理方面,系统采用了同步积分与锁定放大相配合的检测方式。该技术能够很好的从强噪声中提取出弱信号,把不同于预选频率的噪声信号去除。信号处理电路基本结构如图4所示。其中,有用信号是指探测器直接接收到的信号,基准信号是指零液位点时探测器的输出信号,两者通过差分放大后即可得到夹杂了高频噪声的有效信号。同步积分器按照指定的开关频率对该信号进行平均,提取出与开关信号同频率的信号,之后,锁定放大部分再将该信号与基准信号进行互相关运算,使噪声得到进一步的抑制,最后经过低通滤波电路后,便可得到稳定的直流信号。

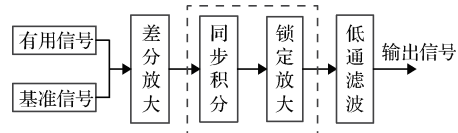


图4 信号处理电路基本结构

4 试验及分析

试验装置主要由对射式螺旋形液位传感器、水泵、盛水容器、米尺、数据显示平台等组成。打开电源之后,需等待一段时间,待输出电压稳定之后再行多次加水。试验中水的温度与侧发光光纤的温度都为17℃,二者之间不存在热传递过程,这样排出了其他条件的干扰,保证了试验结果的正确性。初始结果为电压—时间曲线,假定加水放水过程液位变化均为匀速,电压—液位曲线就等效于电压—时间曲线。试验结果如图5、6所示,最终输出曲线近似线性,与式(10)相符,由此也可证明该方案的可行性。

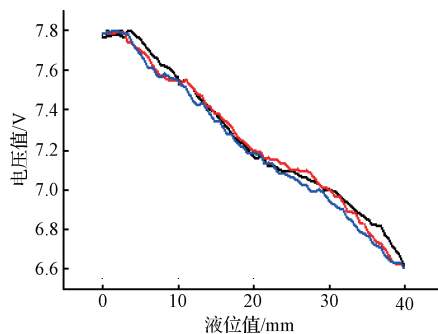


图5 液位上升时电压输出曲线

但是,图5和6种输出曲线的线性度及斜率有所不同,这是因为上述曲线是在假定液位上升下降时速度均为匀速时,而实际上,上升是由于水泵的动力所致,而下降则是靠液体自身重力,两者的速度并不总是匀速且一致的。3次试验中液面上升及液面下降时电压—液位曲线的重

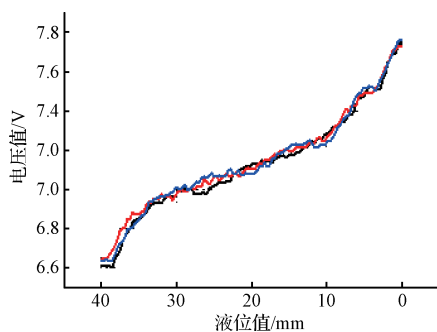


图6 液位下降时电压输出曲线

复性均较好,经计算分别为 1.46% 和 1.38%。

实验过程中还发现,当液位下降至零液位点后,传感器的输出电压能比较快地达到稳定状态,表明液滴粘附效应对其影响比较小。而液滴粘附问题一直是接触式光纤液位传感器中一个不可避免的难题,严重的液滴粘附,会影响到传感器的响应速度甚至测量精度。而要想更好的解决此类问题,后续可以尝试寻找一种涂层,能够有效的防止液滴粘附但不影响光纤的透光量。

5 结论

本文从原理论证出发,详细介绍了一种对射式螺旋形光纤液位传感器的工作原理及设计研制过程。该传感器充分利用了螺旋弯曲结构及两侧发光光纤对射结构的特点,尽可能的提高了光功率的相对变化量。从试验结果可知,该传感器能够实现对液体的检测,且具有较好的重复性能(1.4%左右)。但是,由于光纤材质等原因,温度对其的影响还未能完全克服,性能优良的温度补偿系统有待研究,且此传感器其他方面的性能也有待进一步测试,相信随着不断的研究深入,此传感器在液位测量领域能有不错的表现。

参考文献

- [1] 王大鹏. 光纤成品油液位自动测量装置[D]. 黑龙江:黑龙江大学, 2008.
- [2] 张玉, 孙旋, 刘电霆. 光纤传感器在液位检测中的应用[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(6):123-125.
- [3] BOTTACINI M, BURANI N, FORONI M, et al. All-plastic optical-fiber level sensor[J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2010, 46(46):520-522.
- [4] 骆宇锋, 高应俊, 刘志麟, 等. 新型光纤液位传感器及其系统研究[J]. 传感器与微系统, 2005, 24(5):19-21.

- [5] 吕涛, 刘德森, 何开华. 非本征敏感法布里-珀罗腔高精度光纤液位传感器输出特性[J]. 光学学报, 2006, 26(11):1614-1618.
- [6] SENGUPTA D, KISHORE P. Continuous liquid level monitoring sensor system using fiber Bragg grating[J]. Optical Engineering, 2014, 53(1):259-269.
- [7] LAI C W, LO Y L, YUR J P, et al. Application of fiber bragg grating level sensor and fabry-pérot pressure sensor to simultaneous measurement of liquid level and specific gravity[J]. Sensors Journal IEEE, 2012, 12(4):827-831.
- [8] 赵二刚. 光纤光栅液位传感器研究[D]. 上海:复旦大学, 2009.
- [9] YUN C Y, DHITAL D, LEE J R, et al. Design of multiplexed fiber optic chemical sensing system using clad-removable optical fibers[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(1):269-280.
- [10] MONTERO D S, Vázquez C, MÖLLERS I, et al. A self-referencing intensity based polymer optical fiber sensor for liquid detection[J]. Sensors, 2009, 9(8):6446-6455.
- [11] ANTUNES P, DIAS J, PAIXÃO T, et al. Liquid level gauge based in plastic optical fiber[J]. Measurement, 2015, 66:238-243.
- [12] HOU Y L, LIU W Y, SU S, et al. Polymer optical fiber twisted macro-bend coupling system for liquid level detection[J]. Optics Express, 2014, 22(19):23231-41.
- [13] 赵呈锐. 基于光泄漏原理的光纤式飞机燃油液位测量方法研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2013.
- [14] 赵呈锐, 叶林, 葛俊锋. 基于侧发光光纤对射耦合的光纤式液位测量[J]. 仪表技术与传感器, 2012(8):74-77.
- [15] 华滨, 葛俊锋, 叶林, 等. 泄漏式光纤液位测量方法研究进展[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(5):39-43.

作者简介

龚英, 2014年于武汉科技大学获得学士学位, 现为华中科技大学硕士研究生, 主要研究方向为检测技术与自动化装置。

E-mail: carlygy@126.com