

泄漏式光纤液位测量方法研究进展*

华 滨¹ 葛俊锋¹ 叶 林¹ 张红杰² 黄华辉² 薛双喜²

(1. 华中科技大学自动化学院 武汉 430074; 2. 四川泛华航空仪表电器有限公司 成都 610500)

摘 要: 泄漏式光纤液位测量方法利用一定的手段使得光在光纤传输时发生损耗, 当外部介质的折射率发生变化时, 光纤传输损耗的程度就会发生变化, 通过测量出射光光强变化便可获得液面高度。首先简要分析了泄漏式光纤液位测量方法的基本原理, 然后根据光纤在纵向与横向上产生泄漏实现方法的不同, 对其进行了分类。最后对不同种泄漏式光纤液位测量方法在加工难度、量程以及测量精度等重要参数上进行了分析与比较, 并对它们的应用前景做出了展望。

关键词: 泄漏式; 液位测量方法; 光纤; 传输损耗

中图分类号: TN29 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Review of optical fiber liquid-level measurement based on light leakage

Hua Bin¹ Ge Junfeng¹ Ye Lin¹ Zhang Hongjie² Huang Huahui² Xue Shuangxi²

(1. Department of Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
2. AVIC Sichuan Fanhua Aviation Instrument & Electric Co., Ltd, Chengdu 610500, China)

Abstract: The optical fiber liquid-level measurement proposed in this paper is based on the leakage of light transmitted in an optical fiber. Owing to the leakage, when the refractive index of external media changes, the transmission loss will change, and then the liquid-level can be obtained by measuring the change of the intensity of emergent light. First, a brief analysis of the basic operating principle of the optic fiber liquid-level sensor based on light leakage is presented. Second, a classification is provided according to the implementation methods of leakage in the horizontal and vertical directions. Third, some important measurement parameters are compared, such as processing difficulty, measuring range and accuracy. Finally the prospect of its application is made in this paper.

Keywords: light leakage; liquid-level measurement; optical fiber; transmission loss

1 引 言

利用光纤进行液位的测量一直是近年来测量领域研究的热门问题。研究高精度、高分辨率、安全性能较好且抗干扰能力强的光纤式液位传感器, 能够满足飞机、轮船、汽车等交通工具的燃油液位测量以及燃油存储罐中的液位测量等对传感器本质安全的需求, 对液位测量技术的发展具有较大推动作用^[1-2]。

目前, 光纤式液位测量方法主要有: 浮子遮光式、磁式、液面反射式、压力式以及泄漏式等。浮子遮光式测量方法借助于简单的浮子式测量原理, 但是液面剧烈晃动时将带来较大误差。磁式测量方法实验效果较好, 但是体积较庞大, 装置过于复杂。液面反射式测量方法测量结果受

光纤探头的形状及透镜的位置影响, 使用前需严格校准。压力式测量方法结构简单, 但是输出精度受重力加速度与被测介质影响。泄漏式测量方法则是在光纤中加入散射粒子并进行一定程度的弯曲, 通过测量光衰减量来间接测量液位。它没有可动部件, 能够在一定程度上抗击油面晃动, 试验效果较好。

2 测量原理

理想的光波导能够使满足传输条件的光无损耗的在光纤中传播, 而在实际情况中, 由于光纤材料对光波的吸收、散射, 光纤结构的缺陷、弯曲以及光纤间的耦合不完善等原因, 导致光功率随传输距离增大而逐渐衰减, 这种现象称作光的传输损耗。

收稿日期: 2015-12

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(61104202)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(2014QN170)资助

泄漏式光纤液位测量方法利用光的传输损耗这一特性,将光纤的包层或纤芯进行一定程度的处理,包括横切、侧刨、加入散射粒子等,来达到测量液位的目的。当光纤的外部介质折射率发生变化时,光的传输损耗发生变化,通过测量输出光强,即可得出光强损耗量,获得对应液面高度信息。

如图1所示,光源发出的光以功率 P_i 入射进光纤,以功率 P_R 出射到探测器。假设光纤在液体中的衰减系数为 α_l , 在空气中衰减系数为 α_a , 定义光纤在液体中与空气中衰减系数之差 $\alpha_d = \alpha_l - \alpha_a$, 则输出光功率 P_R 就可以表示为:

$$P_R = P_i * \exp(-\alpha_a(L-h)) * \exp(-\alpha_d h) \quad (1)$$

一般情况下 $\alpha_l > \alpha_a$, 这样就有 $\alpha_d > 0$, 此时出射光强 P_R 随着液位的增加而按指数规律衰减。

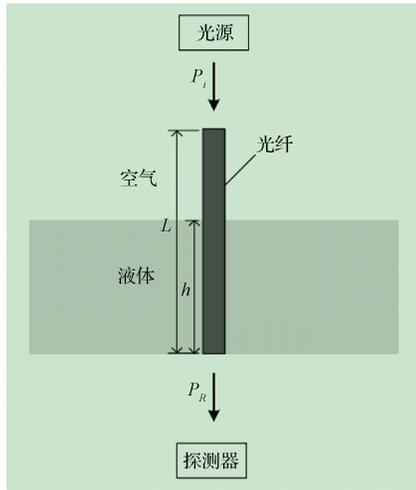


图1 泄漏式光纤液位测量方法原理

按照处理位置的不同,可将处理方法分为纵向处理法与横向处理法,其中横向处理法又包括包层处理法与纤芯处理法。包层处理法包括减小包层厚度法、去小段包层法以及光纤侧刨法,而纤芯处理法则包括荧光法与散射法。

3 光纤纵向处理液位测量方法

纵向处理是将塑料光纤均匀的切成若干小段,相邻段之间通过外部介质耦合来达到传光的目的。当光线穿过具有不同折射率的介质交汇面时,会发生折射现象,且折射角度与介质折射率相关。如图2所示。光线以 θ_{fi} 入射角穿过纤芯与外界介质交汇面时,折射角为 θ_{fs} , 且满足

$$\frac{\sin\theta_{fi}}{\sin\theta_{fs}} = \frac{n_g}{n_{fi}} \quad (2)$$

由对称性原理可知,另一侧折射角 $\theta_{fs} = \theta_{fi}$ 。这样当外界介质折射率发射变化时,相应的 θ_{fs} 也会发生变化。因此耦合进另一侧光纤中的光强就会发生变化。经过多次外界介质耦合,即可得出分段连续的光纤液位传感器。

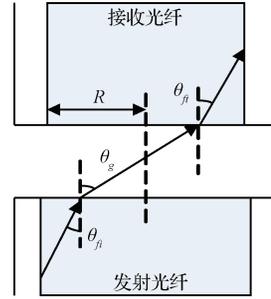


图2 纵向处理法测量原理图

由激光作光源发射一束平行光。通过扰频器形成模式较均衡的光源,以减小光源发射强度对输出结果的影响。由输入光纤传输光至多小段塑料光纤。其中分段塑料光纤均固定在一根金属棒上,然后再用环氧树脂材料将其覆盖以达到固定作用。光线在多小段光纤与外在介质间耦合从而到达接收光纤,由光功率计进行探测即可测得光强损耗。基于以上原理,LIN X 等人^[3]先利用射线跟踪的方法进行了建模仿真,然后进行相关实验,最终设计研制出了间隙长度1 mm,分辨率为25 cm,量程为2.5 m的光纤液位传感器。但是要提升其分辨率,必须减小每小段光纤长度,这样会增加相邻光纤间衔接难度,且易混入杂质。

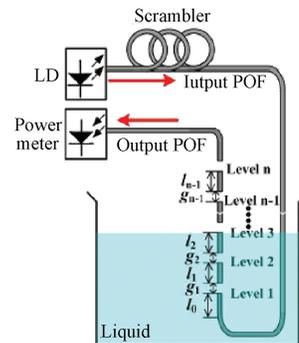


图3 纵向处理光纤液位测量方法示意

4 光纤横向处理液位测量方法

横向处理,就是以一定的方式破坏光纤传输过程中的包层模或者辐射模,使光线在不同介质交汇面不满足全反射定律,从而能够使部分光泄漏到外部介质中。

4.1 包层处理法

4.1.1 减小包层厚度法

通过改变包层厚度,就可以调节光纤中光的泄漏程度。BETTA G 等人^[4]在纤芯折射率 n_1 、包层折射率 n_2 以及外界液体折射率 n_3 满足 $n_3 > n_2$ 的条件下进行了理论分析,并分别使用 $12.5 \mu\text{m}$ 、 $5 \mu\text{m}$ 、 $0 \mu\text{m}$ 厚度的包层进行了试验,实验结果如图4所示。其中曲线 a 表示包层厚度为 $12.5 \mu\text{m}$,曲线 b 表示包层厚度为 $5 \mu\text{m}$,曲线 c 表示包层厚度为 $0 \mu\text{m}$ 。通过对比曲线,可以得出 $5 \mu\text{m}$ 包层厚度的光纤对液位变化最敏感。最终使用 $5 \mu\text{m}$ 包层厚度光纤进

行试验,测得传感器分辨率为0.0625 m,量程为1 m。但是该传感器在第一次干燥情况下输出信号比其在后续试验中要大,且响应时间较长,否则会出现响应滞后现象。

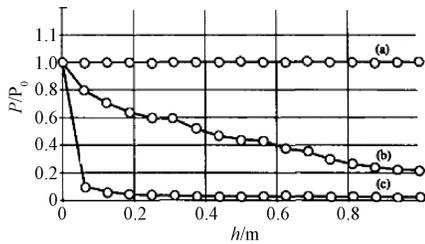


图4 不同厚度包层对应光功率衰减

4.1.2 去除小段包层法

去掉光纤外侧一小段包层后,暴露在外侧的纤芯就与液体介质直接接触。当液体介质折射率大于纤芯折射率时,光纤内部全反射条件会被破坏,就会有一部分光泄露出来,如图5所示。LUN C Y等人^[5]用这种测量方法进行试验,发现该测量方法响应较快,且受环境温度影响近似线性,可采取相应补偿策略。但是进行多点测量还需克服一些问题,比如多点间的损耗是积累的,如果测量点较多就会影响输出灵敏度^[4]。

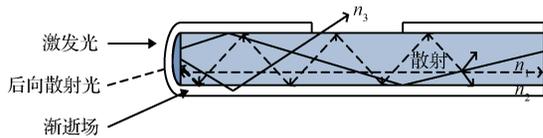


图5 去除小段包层法测量原理

欧启标等人^[8]设计研制出了U型结构光纤液位传感器(如图6所示),在光纤弯曲段去除了包层,使得纤芯与液体直接接触,利用纤芯折射率与外界液体折射率不同导致透射光强不同来进行液位检测。这种测量方法需要将弯曲段固定,否则影响测量精度。如果需要检测液面的高度,需要在不同高度安装液位传感器。

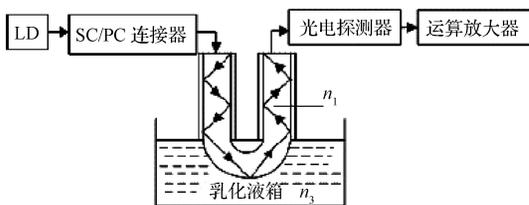


图6 U型光纤液位传感器示意

4.1.3 光纤侧刨法

通过切除包层以及部分纤芯的方法,也可以破坏包层模及传导模,来达到光泄露的目的。光纤侧刨法就是通过一定手段刨除一侧包层及部分纤芯,来实现液位的测量。如图7所示,将光纤侧面刨成V型,破坏了包层及部分纤芯。KIM K T等人^[9]已经从理论与试验两个方面,对外部液体介质折射率与V型槽深度对传感器输出结果的影

响进行了分析。当外部包围介质折射率明显小于包层折射率且V型沟较深时,该方法的光泄露较明显。通过进行多段侧刨的方法对光纤进行处理,可以实现多点液位测量。但是对光纤进行精确侧刨,需要的机械加工精度较高。

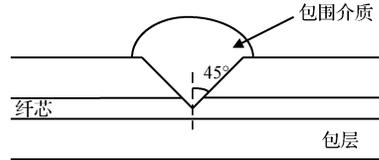


图7 V型光纤液位传感器测量原理

另一种光纤侧刨的方式,是先将塑料光纤螺旋形缠绕在一根固定杆上,再从切面统一侧刨。为提高塑料光纤传感器的灵敏度,采用多圈紧密缠绕方式。采用紧密缠绕,可以使得最终灵敏度的大小等于其直径的长度,这种结构的传感器称作准分布式液位测量传感器^[10]。郑荣利等人^[11]用侧刨深度为200 μm的塑料光纤进行试验,测得最终灵敏度为1 mm,量程25 mm。这种测量方法对机械加工精度要求较高,且一致性难以保证。

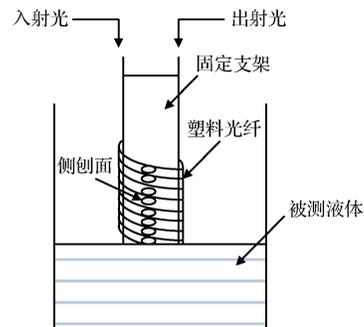


图8 加槽弯曲型光纤液位传感器示意

4.2 纤芯处理法

4.2.1 荧光法

当某种特定波长的光照射荧光材料时,会向外出射具有较长波长的可见光。基于荧光材料的这一特性可研制成连续测量液面高度的检测系统。该系统的测量原理示意如图9所示。掺杂有荧光介质的玻璃平板置于被测容器中,其上端是折射率与平板相近的透明光耦合器。工作时,从位于上端头的一组芯径很小的塑料光纤注入特定波长的平行光,该光束入射角度介于空气-玻璃平板的临界角与液体-玻璃平板的临界角之间。它确保当空气存在时,平行光束在空气-玻璃平板的界面上全反射;而当平板外面有液体存在时,平行光束在液体-玻璃平板的界面上发生部分折射,就会有光能量逃逸出平板。当液面高度变化时,由于折射而逃逸出的光能量也会发生变化,根据输出荧光强度就可以得出液面高度。WEISS J D等人^[12]基于以上原理设计研制了荧光光纤液位传感器,并详细分析了荧光光谱、传光效率、温度等因素对输出结果的影响。

但是它存在死区,且受温度影响,还需在接收探测器前加一个滤光片。

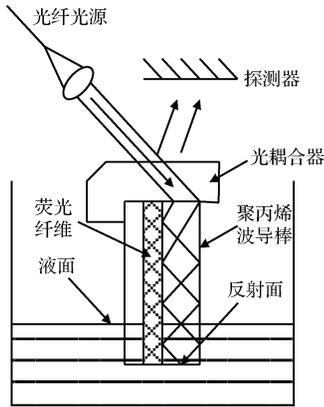


图9 荧光式光纤液位测量方法示意

4.2.2 散射法

理想的光波导能够使满足传输条件的光无损耗的在光纤中传播,而在实际情况下,在光纤中加入散射颗粒后可使传输光发生米氏散射,导致光功率随传输距离按指数规律衰减。为了进一步增强侧发光光纤损耗强度,提高泄漏式光纤液位测量方法灵敏度,赵呈锐等人^[13]提出了一种基于散射原理的螺旋形侧发光光纤液位测量法。

根据光纤光学理论可知,光纤在弯曲的时候会发生弯曲损耗,通过对光纤进行弯曲即可增大光纤的衰减系数。为了增强其损耗强度,提高泄漏模式光纤液位测量方法的灵敏度,引入了螺旋型结构,如图10所示。测量系统由两根平行排列的圆轴和一根侧发光光纤组成,光纤呈螺旋状缠绕在轴A上,然后沿着轴B回到传感器顶端。利用A段螺旋状弯曲来增大其损耗强度,B段用黑色不透光材料紧紧缠绕以免液体渗入。测量时光源发出的光经螺旋段传输到容器底部,再由直线段回到光电探测器,通过对光电探测器接收信号进行处理即可得到液面高度。这种测量方法结构简单,得到的结果一致性较好,且呈现“S”状,比较适合于液位的测量。

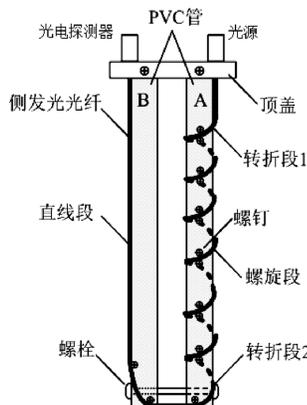


图10 螺旋形光纤液位测量方法示意

5 泄漏式光纤液位测量方法比较

现有文献中已经提出了许多光纤液位测量方法^[14],从国内外已公开的测量方法来看,所采用的具体方法各不相同,包括浮子式、磁式、压力式、泄漏式等。其中泄漏式光纤液位测量方法主要是改变原有光在光纤中的传播方式,使光能够泄漏到外部介质中。外部介质折射率的不同将会引起损耗的不同,从而出射光的光强也会不同,通过测量这种差异,就可以达到精确测量液位的目的。纵向处理法将光纤切成若干小段,液位变化时会改变相邻段光纤耦合系数,最终测量输出光强即可得出液位。横向处理法则是改变包层、纤芯的固有属性,包括厚度或者组成成分,使光强传输效率随外部介质折射率变化而变化,最终达到液位测量的目的。但是其中纵向处理法、减小包层厚度法、去小段包层法以及光纤侧刨法的深入研究受机械加工技术的制约,很难达到较高精度,而荧光法与散射法没有较复杂的机械加工要求,并且成本较低,能够真正实现液位的连续测量。不同种类泄漏式光纤液位测量方法性能对比如表1所示。

表1 不同种类泄漏式光纤液位测量方法性能对比

测量方法	加工难度	量程	测量精度
纵向处理法	较大	较小	较低
减小包层厚度法	较大	较大	一般
去小段包层法	较大	较小	一般
光纤侧刨法	较大	较小	一般
荧光法	较小	较大	较高
散射法	较小	较大	较高

6 结论

本文比较了纵向处理法、减小包层厚度法、去小段包层法、光纤侧刨法、荧光法以及散射法等多种泄漏式光纤液位测量方法,其中散射法易加工、结构简单、无可动部件,且测量精度较高、具有本质安全特性,是目前最具有发展潜力的泄漏式光纤液位测量方法。但泄漏式测量方法均使用塑料聚合物光纤作为传感材料,工作温度过高会导致光纤膨胀,其外形结构发生变化,从而影响光学性质。为了克服这一问题,必须额外设计补偿装置,比如外加光纤温度传感器,对其比较敏感的温度参数进行合理补偿。泄漏式光纤液位测量方法当前正处于实验室研制阶段,相信在应用需求的有效激励下,未来将取得较大突破。

参考文献

- [1] 刘铁根,王双,江俊峰,等. 航空航天光纤传感技术研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2014,35(8):1681-1692.
- [2] 温瑞珩,郑守铎,叶玮. 基于光纤传感器的火箭发动机工作状态监控方法研究[J]. 电子测量技术, 2013,

- 32(7):38-40.
- [3] LIN X, REN L, XU Y, et al. Low-cost multipoint liquid-level sensor with plastic optical fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(16): 1613-1616.
- [4] BETTA G, IPPOLITO L, PIETROSANTO A, et al. An optical fiber based technique for continuous level sensing[C]. In Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1994:402-405.
- [5] 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.
- [6] 兰羽.具有温度补偿功能超声波测距系统的设计[J]. 电子测量技术, 2013, 36(2):85-87.
- [7] 曹立军, 王戈, 孙忠周. 分布式光纤温度传感虚拟仪器设计[J]. 国外电子测量技术, 2008, 27(8):18-20.
- [8] 欧启标, 苏百顺, 梁维源, 等. 光纤液位传感器在乳化液箱中液位检测的应用[J]. 煤矿机械, 2012(5): 220-221.
- [9] KIM K T, KIM J M. Multipoint liquid detection sensor based on the V-grooved single-mode optical fiber [J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(8): 2567-2570.
- [10] 童峥嵘, 杨娇, 曹晔, 等. 基于腐蚀型多模光纤的干涉型传感器实现温度和液位同时测量[J]. 光电子: 激光, 2014(1): 118-122.
- [11] 郑荣利. 基于塑料光纤准分布液位传感器的研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2010.
- [12] WEISS J D. Fluorescent optical liquid-level sensor[J]. Optical Engineering, 2000, 39(8): 2198.
- [13] ZHAO C, YE L, Yu X, et al. Continuous fuel level sensor based on spiral side-emitting optical fiber[J]. Journal of Control Science and Engineering, 2012; 1-8.
- [14] 刘高平, 杨如祥, 秦一涛. 光纤温度传感器在水库水位监测中的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2008, 22(5):112-116.

作者简介

华滨, 2013年于武汉工程大学获得学士学位, 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: candyhb123@163.com

是德科技推出全面的发射机测试软件, 精准测试 USB 3.1 Type C TM 设计

2016年5月17日, 是德科技公司(NYSE:KEYS)推出U7243B USB 3.1 发射机性能验证与一致性测试软件, 该软件是业界最全面的、支持 USB 3.1 Type C 规范的发射机(TX)测试软件。授权测试中心可使用该测试软件测试 Type C 实施中的 USB 3.1 Gen2 SuperSpeed Plus 10 Gbps 器件, 内部测试和性能验证工程师可通过该软件保证器件符合 USB 3.1 Gen2 Type C 规范。Keysight USB 3.1 解决方案能为消费电子、电缆制造和半导体行业的测试工程师提供准确的测试结果, 帮助他们减少部署成本, 简化测量流程。

该测试软件运行于 16 GHz 及更高带宽的 Keysight Infiniium V 系列和 Z 系列实时示波器上。工程师可通过

N7015A Type C 测试夹具访问测试信号, 并通过 N7016A Type C 低速信号访问与控制夹具进行控制。

是德科技副总裁兼示波器事业部总经理 Dave Cipriani 表示:“是德科技通过提供适用于早期开发阶段的测量解决方案, 以及积极支持一致性测试研讨会, 为 USB-IF 和 USB 开发者提供鼎力支持。随着 Type C 的广泛使用, 并且为了满足 Gen2 链路合作伙伴的要求, 是德科技推出了基本的软件工具, 帮助 USB-IF 测试和认证项目确保为用户提供满意的互操作性体验。”

工程师可将此解决方案与 USB 开发者论坛(USB-IF)批准的夹具或 Keysight N7015A 和 N7016A Type C 测试夹具配合使用。