

# 一种基于弯曲损耗的光纤油位信号器的设计与实现\*

舒俊<sup>1</sup> 葛俊锋<sup>1</sup> 叶林<sup>1</sup> 张红杰<sup>2</sup> 黄华辉<sup>2</sup> 薛双喜<sup>2</sup>

(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:**利用光纤弯曲部位在空气和液体中的损耗不同的原理,提出了一种基于侧发光光纤弯曲损耗的油位信号器,并以验证此原理的可行性。通过分析侧发光光纤的特性及光纤液位信号器的检测原理,设计出信号器的测量电路和机械机构,最后模拟加放油情况进行原理试验,并分别改变试验环境中的光强和温度以及改变液体属性和温度进行环境及液体适应性试验,对此信号器的性能进行测试,试验结果显示其测量精度和迟滞区间均小于1 mm,且稳定性良好,证明了此信号器的可行性。

**关键词:**侧发光光纤;油位信号器;弯曲损耗;液位检测

**中图分类号:** TN29 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

## Design and implementation of the oil annunciator based on the bending loss

Shu Jun<sup>1</sup> Ge Junfeng<sup>1</sup> Ye Lin<sup>1</sup> Zhang Hongjie<sup>2</sup> Huang Huahui<sup>2</sup> Xue Shuangxi<sup>2</sup>

(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:** According to the difference between bending loss when in air and liquid, the oil annunciator which is used to detect the state of oil level is proposed. By analyzing the characteristics of the side-emitting optical fiber and the detection principle of the optical fiber oil annunciator, the circuitry and mechanical mechanism are designed. Finally, the experiment of principle is tested. And by changing light intensity and temperature in the environment, attributes and temperature in the liquid to test performance of the annunciator, the results show that the annunciator's accuracy and hysteresis range are less than 1 mm and the annunciator is stable. The results also prove that the annunciator is feasible.

**Keywords:** side-emitting optical fiber; oil annunciator; bending loss; liquid level detect

### 1 引言

在飞机燃油测量系统中,测量部分由测量连续液位高度的传感器和检测固定液位高度的信号器组成。油位信号器是对一个或多个液位高度进行检测的传感器,因其结构简单、准确度高、响应速度快等优点,仍在燃油测量中起着不可替代的作用。

目前,实际应用中油位信号器主要包括基于全内反射原理制作的尖端反射式液位信号器<sup>[1]</sup>和电容式信号器<sup>[2]</sup>,前者利用光纤头暴露在空气中发生全反射和浸没在液体中时不发生全反射的特点,根据反射回去的光量不同来进行液位检测,其缺点主要是加工难度相对较大,加工工艺

要求较高,价格昂贵;而后者是根据电容变化引起的电压变化来进行液位高度的检测,但在测量过程中如果出现“水污染”<sup>[3]</sup>,会对传感器测量结果造成严重影响,甚至造成电极短路,影响测量系统的安全。

而光纤良好的绝缘特性、防爆、耐腐蚀、抗干扰能力强以及易小型化等优点<sup>[4-5]</sup>,使其在燃油测量方面得到了飞速发展,研究人员提出了多种利用光纤进行油位检测的方法,如 ANTUNES P 等人<sup>[6]</sup>提出了一种将包层去除,增大损耗的方法来制作光纤液位开关,但其去除包层的处理方式对工艺要求较高;ZHANG W 等人<sup>[7]</sup>提出的“一发两收”的楔形光纤面结构也可作为信号器进行检测,但制作流程复杂。

收稿日期:2016-04

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

本文提出了一种基于弯曲损耗原理<sup>[8]</sup>的光纤液位检测方案,利用侧发光光纤弯曲部分在空气和液体中损耗差值大的特性进行液位检测,其结构简单,研制成本低,且易于实现。本文结合理论分析与试验结果,证明此信号器的可行性,并给出相关测量参数。

## 2 原理与实现

### 2.1 信号器检测原理

信号器主要由图1中所示的发光管、“U”型侧发光光纤和接收管组成。发光管的光经“U”型光纤传播后被接收管接收,由于“U”型光纤的底端曲率相对较大,使得光纤损耗增大,而曲率增大不仅增大损耗的绝对值,还能增大光在空气和液体中的损耗差值,使得接收管接收的光量会发生更为明显的变化,基于此原理对液位进行检测。

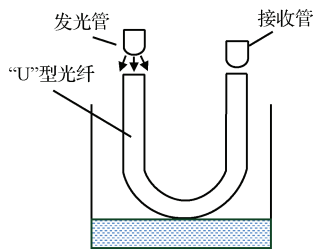


图1 弯曲侧发光光纤液位检测原理示意图

#### 2.1.1 侧发光光纤传播原理

为了更好的阐述侧发光光纤弯曲损耗检测液位的原理,首先介绍光在侧发光光纤中的传播特点,先作如下简单分析。根据折射定律<sup>[9]</sup>:

$$n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2$$

可知,光由光疏介质传播至光密介质时,折射角小于入射角;由光密介质传输至光疏介质中时,折射角大于入射角。其中光纤包层折射率  $n_d = 1.37$ ,纤芯折射率  $n_{co} = 1.49$ ,光纤纤芯和包层的折射率不同,使得光纤中的所有光路传播满足全反射原理,表明光在普通光纤中的传播损耗几乎为零。

侧发光光纤通过在光纤纤芯中均匀地混入散射剂,形成米氏散射<sup>[10]</sup>,如图2所示,增加了各个方向的光的分量,使得光能够在纤芯中、包层中传播,部分光甚至能辐射到外部介质中。根据光在光纤中的传播情况分为3种模式:传导模,包层模和辐射模。其中传导模在纤芯-包层界面发生全反射,只能在纤芯中传播;而包层模可以在纤芯-包层界面发生折射和反射,在包层-外部介质界面发生全反射,限制在纤芯和包层中间传播;辐射模在纤芯-包层界面和包层-外部介质界面均发生折射和散射,可以在纤芯、包层和外部介质中传播。辐射模造成光纤在传播过程中产生衰减系数  $\alpha$ ,从侧发光光纤中侧面出来的光便属于辐射模<sup>[3]</sup>。

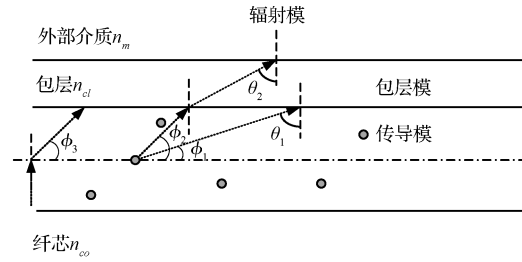


图2 侧发光光纤直线段部分光路传播示意图

#### 2.1.2 侧发光光纤检测液位的原理

当外部介质由空气变为液体时,外部介质折射率由小变大,导致包层-外部介质全反射角的变大,一部分包层模会转化为辐射模,此部分便称为“临界模”,临界模使得传感器在空气和液体中的衰减不同,这是侧发光光纤进行燃油液位检测的本质原理。

若将侧发光光纤直接进行液位检测,其在空气中的衰减系数  $\alpha_a$ ,和在液位中的衰减系数  $\alpha_l$  的差值  $\alpha_d (\alpha_d = \alpha_l - \alpha_a)$  很小,测量值变化很微弱,不能准确的进行液位检测。为增大衰减系数之差  $\alpha_d$ ,可将侧发光光纤弯曲一定的角度。此时,虽然弯曲会使得侧发光光纤在空气中的衰减系数  $\alpha_a$  和在液体中的衰减系数  $\alpha_l$  均会增加,但其差值  $\alpha_d$  也会相应增加,便于信号测量。

衰减系数之差  $\alpha_d$  增大理论分析如下,当侧发光光纤为如图2所示的直线段时,仅当大于  $\phi_1$  角时,纤芯中的光才会传播到包层中;而弯曲光纤在图3点A处(纤芯-包层界面光路汇集处)及以下部分时,纤芯中的光均会进入包层模中,进入包层模的总光量会增加,临界模也会呈相应的比例增长,即相应的衰减系数之差  $\alpha_d$  增大。

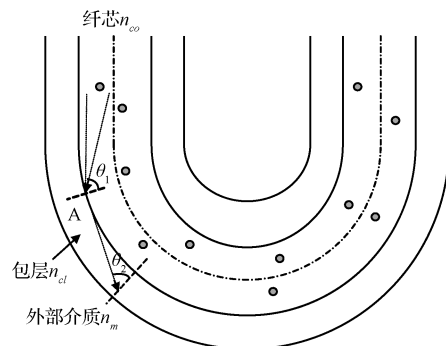


图3 侧发光光纤弯曲部分光路传播示意图

### 2.2 信号器实现

为了检测出侧发光光纤在空气和液体中的衰减系数不同造成的光损耗之差,通过设计如图4所示的电路结构来进行检测。驱动电路点亮发光管,接收管接收的光量会由于光纤弯曲部分是否被液体浸没而产生较大变化;由于检测的信号变化量混在很大的直流信号上,为消除直流信号的影响,进行多倍放大,电路设计部分需采用差分电路来消除直流信号的影响,提高放大倍数;再经后续电路进行多倍放大后,对电压值进行采集,根据电压值不同来判

断液位是否到达所测信号点;通过 CAN 模块与上位机进行通信。

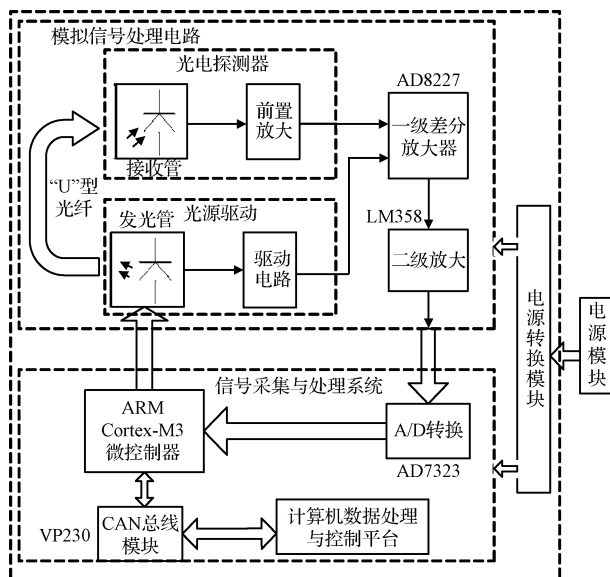


图4 电路结构

为保证系统抗震性能,采用一体化结构设计,结构示意图如图5(a)所示,由上部空腔和下部具有凹槽的扁平“U”型面构成,空腔用于固定电路板,空腔侧面的圆孔用于安装连接器,与上位机进行通信。如图5(b)所示即为信号器的实物,(c)图为侧发光光纤嵌入在“U”型凹槽中。

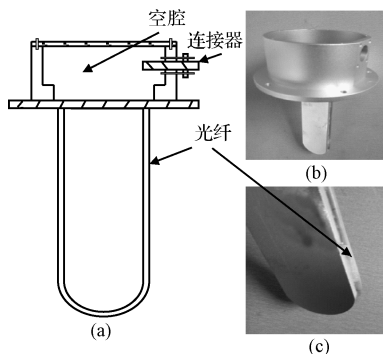


图5 信号器结构

### 3 试验与分析

#### 3.1 信号器的可行性

安装电路板,调整电路参数后进行原理性测试试验。固定信号器,模拟加放油过程,即向容器中缓慢加入液体,从液面距检测点-8 mm(“-”代表液面位于传感器检测点下端)处到液面浸没传感器检测点8 mm,然后再缓慢减少液体至-8 mm,每隔1 mm或2 mm记录传感器状态。在实际液位检测点的选取中,考虑到液体粘附特性,并未选择传感器最前端作为检测点,而是选择最底端上方8 mm的弯曲部分作为检测点。

从图6可以看出在液面上升和下降过程中,在-3~-2 mm处信号量会发生变化,上行曲线和下行曲线基本重合,说明迟滞区间小于1 mm;且多组试验结果与图6曲线相同,说明误差小于1 mm,则此信号器原理得以验证。

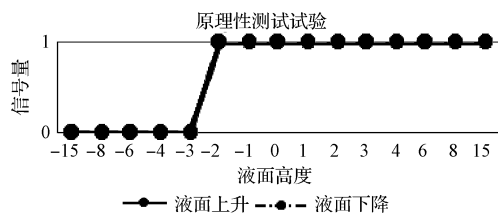


图6 信号器原理性试验结果

考虑到信号器在实际工程中的用途,需要良好的环境适应能力,和良好的燃油适应性。现对信号的环境稳定性和燃油适应性进行简单的试验测量。

#### 3.2 信号器的环境稳定性

对信号器造成影响的环境因素可能有环境光、温度等,为测试环境对信号器的影响,通过分别改变外界光强和环境温度来进行试验,其中外界光强和环境温度分别用光功率计和PT100进行测量。

在环境温度为17℃的情况下,通过人工改变光强来测试不同光强对信号器的影响,测量光强分别为550 μw和150 μw下时信号器的工作情况,其结果如图7所示,两条曲线重合,说明光强对信号器的影响小。

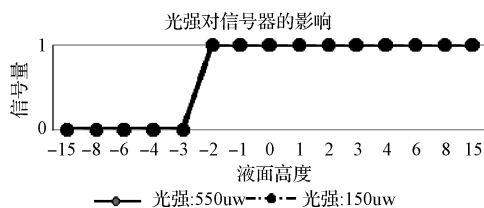


图7 光强对信号器的影响

在外界光强(150 uw)和油温(17℃)一定时,信号器在环境温度为5℃和17℃的响应曲线基本重合,如图8所示。

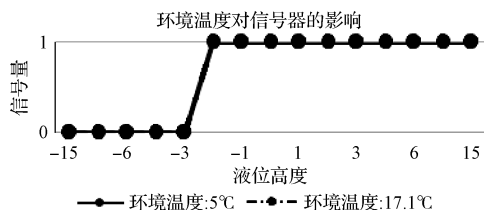


图8 环境温度对信号器的影响

通过以上试验结果可以看出信号器对环境适应能力良好。

#### 3.3 信号器的燃油适应性

燃油的适应性测试主要针对燃油属性和燃油温度的不同来进行分析。通过改变油温试验和油和水对比试验,

测试信号器的燃油适应性。在此试验中用水来替代另一种燃油,其属性(折射率)会有更大的区别,更方便分析,其结果分别如图9、图10所示。

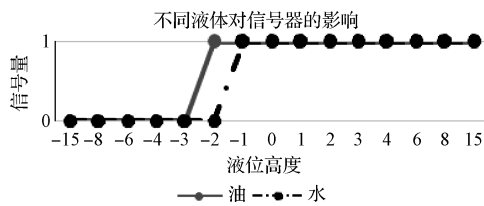


图9 不同液体对信号器的影响

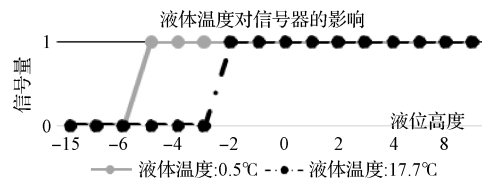


图10 液体温度对信号的影响

如图9所示,液体属性不同时,由于水的折射率小于油的折射率,所以此信号器的信号变化点位置有所上升。在图10中,当液体温度不同时,信号变化点位置由-3 mm处附近下降至-6 mm处附近。与图8、图9试验中结果进行比较,其原因可能有如下两点:1)温度降低,油的折射率变大<sup>[11]</sup>;2)由于液体温度降低使得光纤温度也随着降低,光纤性质发生变化,导致信号变化点下移。而上述温度适应性试验图8中两条曲线重合的原因是液体温度保持不变,光纤温度变化不够明显。

通过上述实验可知此信号器参数,如精度、重复性和迟滞特性,与其他同类产品参数大致相当,其环境适应能力强,燃油适应能力较差,但可以通过改变安装高度和温度补偿<sup>[12-13]</sup>进行校正。

#### 4 结 论

本文提出一种新的光纤油位信号器,利用侧发光光纤弯曲部分在空气和液体中的损耗差值较大来进行燃油液位检测,并设计相应的电路和机械结构来实现此信号器,通过多组测试试验可知:传感器误差和迟滞区间均小于1 mm,且几乎不受光强和环境温度的影响,具有良好的环境适应能力。

但此信号器在燃油适应性方面仍有欠缺,主要是受燃油种类和燃油温度的影响,可通过改变安装高度和温度补偿来改善燃油适应性,可提供一种新的燃油液位检测方案。

#### 参 考 文 献

- [1] PETRAZZUOLI L, PERSICHETTI G, ONORATO G, et al. A fuel level sensor for aeronautical applications[C]. SPIE OPTO. International Society for Optics and Photonics, 2015: 93690D-93690D-6.
- [2] 屈威. 刍议沿海原油储罐液位开关应用[J]. 化工技术与开发, 2013(11): 66-67.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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]. 国外电子测量技术, 2013, 32(7): 38-40.
- [6] ANTUNES P, DIAS J, PAIXÃO T, et al. Liquid level gauge based in plastic optical fiber[J]. Measurement, 2015, 66: 238-243.
- [7] ZHANG W, GONG Y, GE J, et al. An optical fiber point liquid level sensor[C]. International Society for Optics and Photonics, 2015: 96791A-96791A-6.
- [8] ZHAO C, YE L, GE J, et al. Novel light-leaking optical fiber liquid-level sensor for aircraft fuel gauging[J]. Optical Engineering, 2013, 52(1): 014402-014402.
- [9] BORN M, WOLF E. Principles of Optics, 7-th ed. Cambridge, UK: Cambridge U. Press, 1999.
- [10] MÄTZLER C. MATLAB functions for Mie scattering and absorption, version 2 [M]. IAP Res. Rep, 2002: 8.
- [11] 杨荣国, 武少文, 杜磊, 等. 干涉法测量透明液体折射率随温度的变化关系[J]. 物理测试, 2007, 25(5): 45-46.
- [12] 兰羽. 具有温度补偿功能的超声波测距系统设计[J]. 电子测量技术, 2013, 36(2): 85-87.
- [13] 杜洁, 徐本连, 朱培逸. 多路无线超声波测距系统研发[J]. 中国测试, 2015(1): 89-92.

#### 作 者 简 介

舒俊, 2015年于安徽大学获得学士学位, 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: Sun\_Junior@163.com