

# 光纤光学相干膜盒压力传感器设计

赵文建<sup>1</sup>, 袁海骏<sup>2</sup>, 袁嫣红<sup>1</sup>

(1. 浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018; 2. 上海舜宇海逸光电技术有限公司, 上海 200120)

**摘要:** 设计了一种新型光纤膜盒压力传感器,应用频率扫描光纤相干测距法感知波纹膜片位移量,从而得到压力测量值。设计的压力传感器应用单模光纤空间滤波特性进行测距,实现了对非光滑金属膜片表面的直接测距;压力膜盒通过退火工艺消除焊接产生的残余应力,改善了迟滞特性。实验结果表明,设计的压力传感器不仅比指针式膜盒压力表拥有更高的精度和灵敏度,同时又拥有光纤传感器远距离测量和抗电磁干扰的特点。对其中一种尺寸的压力传感器进行了标定,给出了压力与距离的特性曲线以及零点温度漂移曲线,其迟滞仅为0.2%,非线性度为0.7%。

**关键词:** 光纤相干测距; 单模光纤; 波纹膜片; 迟滞; 压力传感器

**中图分类号:** TN2 **文献标志码:** A

## 0 引言

膜盒因具有压力一位移的特性而被广泛用于各类压力仪表制造。传统的膜盒压力表借助一定的机构将膜片受压产生的微小形变位移量放大,并通过指针在刻度盘上进行指示,其缺点是精度低且需要人工读取压力值。光纤传感器因具有抗电磁干扰、耐腐蚀、体积小、远程测量等特点而受到了广泛的关注和研究<sup>[1]</sup>。已有许多压力传感器应用光纤光学技术感知膜片位移变化量制成,但均存在各种缺点而未能得到推广。如光强调制的光纤微弯式压力传感器<sup>[2]</sup>和反射式压力传感器<sup>[3]</sup>,由于通过绝对光强进行测量,精度易受到光源光强变化和光纤微弯损耗的影响;相位调制型的 Fabry-Perot 干涉压力传感器<sup>[4-5]</sup>多采用玻璃或硅片作为表面,制作难度较大、可靠性较低;波长调制的光纤光栅压力传感器<sup>[6]</sup>由于光栅特性的限制,灵敏度和精度较低。

基于频率扫描干涉(frequency-sweeping interferometry, FSI)原理的光纤相干测距法可以实现绝对距离的高精度测量<sup>[7-8]</sup>。但实际应用中往

往要求被测物表面为光滑镜面,且对光路的对准要求极高,对于具有因形变而造成光路偏移的非光学表面的膜片,并不适合直接测量。本文设计了专用的集成光纤探头,应用光纤相干测距法实现了对膜片的直接测量,制成了新型的光纤相干膜盒压力传感器;通过去应力退火处理改善了膜盒的迟滞特性,使其可实现高精度的压力测量。该压力传感器不仅结构简单、制作方便、分辨率高、可数字显示,同时具有光纤传感器抗电磁干扰、远距离测量等优点,适用于易燃易爆和强电场环境下对压力的高精度、远距离和长时间的测量。

## 1 光纤相干测距系统

### 1.1 频率扫描干涉测距基本原理

基于频率扫描干涉原理的激光干涉测距系统,能够实现绝对距离的高精度测量<sup>[7-8]</sup>。激光器发出频率在一定范围内调谐的激光,在光路中由光程差不同的参考面和测量面反射形成参考光和测量光。参考光和测量光在光路中发生干涉,由光电探测器测得干涉信号,通过干涉信号可以计算得到距离。

收稿日期: 2014-06-23

基金项目: 浙江省重点科技创新团队(2009R50018)

作者简介: 赵文建(1989-),男,浙江杭州人,硕士研究生,主要从事机电控制及其自动化方面的研究。

通信作者: 袁嫣红, E-mail: yyh@zstu.edu.cn

假设测量光和参考光的光强分别为  $I_1$  和  $I_2$ , 则干涉光的光强可由式(1)表示:

$$I = I_1 + I_2 + 2(\sqrt{I_1 I_2}) \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (1)$$

其中  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  分别为参考光和测量光的相位。则两光束的相位差可由式(2)表示:

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = 2\pi L\nu/c \quad (2)$$

其中:  $L$  为参考光和测量光的光程差, 即 2 倍的待测距离  $d$ ;  $\nu$  为光频率;  $c$  为光速。

由式(1)和式(2)可知, 当激光频率  $\nu$  实现无跳模的线性扫描时, 光电探测器所测得的干涉光光强信号  $I$  为频率固定的周期信号, 其频率可由式(3)表示:

$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt} = \frac{L}{c} \frac{\Delta\nu}{\Delta t} \quad (3)$$

其中:  $\Delta\nu$  为频率扫描范围,  $\Delta t$  为频率扫描时间。

由式(3)可知, 求得干涉信号的频率  $f$  后即可得到待测距离  $d$ :

$$d = \frac{fc}{2\Delta\nu} \Delta t \quad (4)$$

## 1.2 光纤相干测距系统的设计

基于频率扫描干涉的干涉测距系统虽然能够实现绝对距离测量, 但实际应用中, 高精度的干涉测距通常需要严苛的准直光学系统以及与光轴严格垂直的光滑光学反射表面, 而传统的压力膜盒无法提供所需的光学条件。当光源照射到膜片这类非镜面的有一定粗糙度的表面时, 会在较大空间角范围内发生散射, 而不同方向的散射光相干性较低, 难以用于干涉测量。

本文所设计的光纤干涉测距系统组成如图1所示, 主要包括控制和信号处理单元、可调谐激光器、光纤分路器、集成光纤探头、单模光纤和光电探测器。其中集成光纤探头结构如图2所示, 其直径仅为 1.8 mm, 长仅为 10 mm, 由单模光纤、透镜系统和机械结构(仅用于固定光纤和透镜系统的位置, 未在图中画出)。单模光纤的端面固定在透镜系统的焦点平面附近, 从光纤纤芯发散出的光经过透镜系统后变为准直光; 透镜系统的其中一个面被制成有一定反射率的参考面, 当准直光经过该参考面后会有部分光反射, 该部分反射光耦合回光纤纤芯中作为参考光; 其余准直光照射到膜片表面后发生反射或散射, 部分反射或散射光经过透镜系统将被重新聚焦, 并耦合回光纤纤芯中作为测量光; 参考光和测量光在光纤纤芯中发生干涉, 并经由光纤传导至光电探测器。

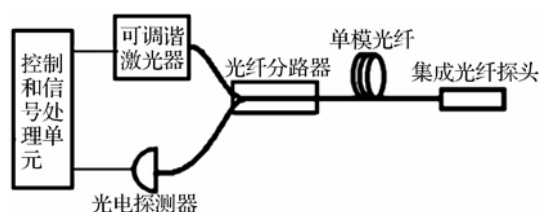


图1 光纤相干测距系统组成

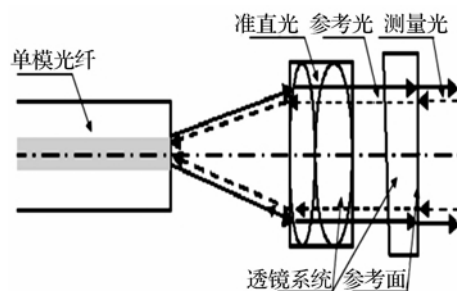


图2 集成光纤探头的结构

准直光照射到膜片表面后产生的散射光, 其空间范围远大于反射光, 因此即使由于膜片形变而造成准直的光轴与膜片表面的垂直度发生一定的偏差, 集成光纤探头的透镜系统仍然能够接收到部分散射光。单模光纤的纤芯直径仅为  $8 \sim 10 \mu\text{m}$ , 具有很好地空间滤波特性。当散射光被耦合回光纤纤芯中时, 它们的相干性将得到恢复, 使得从光纤纤芯传输到光电探测器的干涉光仍然携带有精确的位置信息。

## 2 光纤膜盒传感器的设计

### 2.1 光纤膜盒传感器的结构

光纤膜盒传感器由集成光纤探头和膜盒组成, 其机械结构如图3所示。波纹膜片焊接在带有通气孔的底座上, 集成光纤探头固定于底座上与膜片中心位置垂直的通孔中。通过光纤相干测距系统, 可以测得膜片表面与集成光纤探头的参考反射面之间的距离, 该距离值与传感器负载压力值之间存在线性关系, 根据所测的距离值就可以得到待测的压力值。对于周边固接、承载均匀的波纹膜片, 其位移量  $\Delta L$  可由式(5)所示:

$$\Delta L = \frac{3M(1-\mu^2)r^4}{16Eh^3} \cdot \Delta P \quad (5)$$

其中:  $\Delta P$  为膜片两面的压力差;  $r$  为膜片半径;  $E$  为膜片的杨氏模量;  $\mu$  为膜片的泊松比;  $h$  为膜片厚度;  $H$  为膜片波纹间距;  $M$  为依赖于比值  $H/h$  的一个常数。

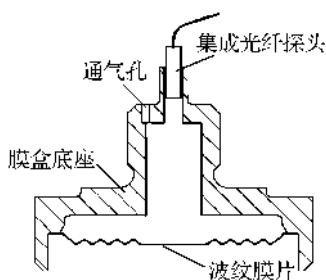


图3 光纤膜盒传感器的机械结构

由式(5)可知,膜片形变的位移量取决于膜片两面的压力差  $\Delta P$ 。假设膜盒腔体内的空气为理想气体,则有:

$$PV=nRT \quad (6)$$

其中: $P$  为压强, $V$  为腔体体积, $n$  为气体物质的量, $R$  为常数, $T$  为温度。由式(6)可知,若没有通气孔,则腔体内密封气体压强  $P$  会随腔体体积和环境的温度的改变而改变。通气孔的存在,则能够保证在测量过程中传感器始终以大气压为参考,距离与压力的拟合曲线将获得比密封状态下更好的线性度;传感器的零点温度漂移将只受膜盒本身的热膨胀效应的影响,而不受腔体内气体热膨胀效应的影响。

## 2.2 膜盒的迟滞特性

传感器迟滞,是指传感器在相同的工作条件下,传感器的正行程特性与反行程特性的不一致程度。传统的指针式膜盒压力表由于其读数的精度并不高,膜盒的迟滞特性和非线性对压力表测量精度的影响并不大。当应用光纤干涉测距时,对膜片形变位移量分辨率得到很大地提高,膜盒的迟滞和非线性的曲线能够清楚测得。考虑到非线性容易校正,而迟滞难以通过算法实现校正,因此本文设计的光纤光学相干膜盒压力传感器的精度,主要取决于膜盒迟滞特性的改善程度。

在分析了膜盒的生产工艺后,发现当波纹膜片和膜盒底座进行激光熔焊时,焊缝处金属膜片首先会受热熔化膨胀,在随后的冷却过程中则受到周边材料约束不能自由收缩,呈现拉伸残余应力,而周边区域呈现压缩残余应力<sup>[9]</sup>,最终导致膜盒内部结构之间存在着较大的焊接残余应力。而焊接残余应力正是造成膜盒正反行程不一致的主要原因。去应力退火可有效去除由于机械加工、变形加工、铸造、锻造、热处理以及焊接后等产生的残余应力,经退火后的光纤膜盒压力传感器的迟滞特性将会得到极大的改善。

## 3 实验结果

在本文设计的光纤干涉测距系统中,可调谐激光

器的频率扫描范围为 191 316~195 316 GHz,可实现 0~30 mm 量程下 0.2  $\mu\text{m}$  精度的绝对距离测量,测量结果只与干涉信号相位相关,与干涉信号的强度无关。集成光纤探头的直径为 1.8 mm,而膜盒上固定孔的直径为 2 mm。在固定集成光纤探头时,可能与波纹膜片的垂直度上存在一定的偏差。10 mm 左右的距离下,集成光纤探头与膜片在垂直、偏移 2° 和偏移 5° 三种位置关系下所得干涉信号如图 4 所示。可见即使存在 5° 的偏差,由集成光纤探头得到的干涉信号依然完整清晰,可以计算得到距离。因此,该光纤光学相干膜盒压力传感器的制作过程中,对集成光纤探头与膜盒的位置要求不高,易于大规模生产。

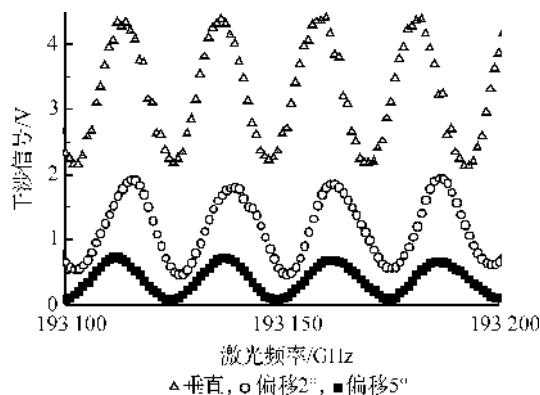


图4 不同垂直度下的干涉信号

制作了膜片直径为 65 mm、厚度为 0.15 mm 的压力膜盒,经去应力退火后在 0~50 kPa 压力范围内经加载和卸载的标定实验,结果由图 5 所示,测量的距离值与标准压力值之间呈线性关系,经拟合后可知传感器的压力敏感度达到 0.067 43 kPa/ $\mu\text{m}$ ,压力分辨率达到 14 Pa,线性相关度达到 99.996%。在常压下进行温度测试,结果如图 6 所示。从图 6 中可以看出,传感器的温度漂移为 0.31  $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ ,即 10 $^\circ\text{C}$  温度变化引入的测量误差为量程的 0.45%。膜盒的灵敏度和量程主要取决于式(5)所示膜片的直径、厚度和材料等参数,因此只需选用不同尺寸的膜盒就可以制作出满足不同测量要求的压力传感器。

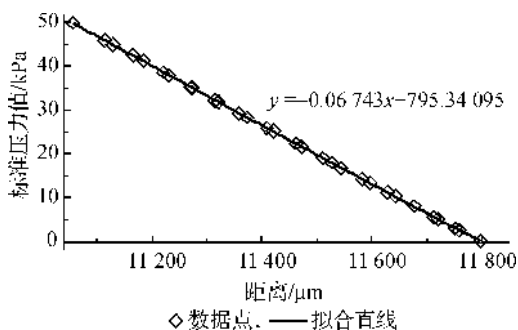


图5 通气状态下退火膜盒压力传感器标定

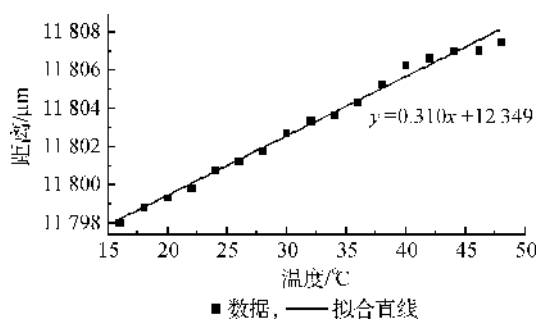


图6 温度漂移曲线

通过拟合后的压力值与标准压力值的差值,可看出膜盒压力表的非线性和迟滞特性。图7为不同状态下膜盒压力值与标准压力值的偏差曲线,其中图7(a)为通气且经退火处理状态的偏差曲线,图7(b)为通气且未经退火处理状态的偏差曲线,图7

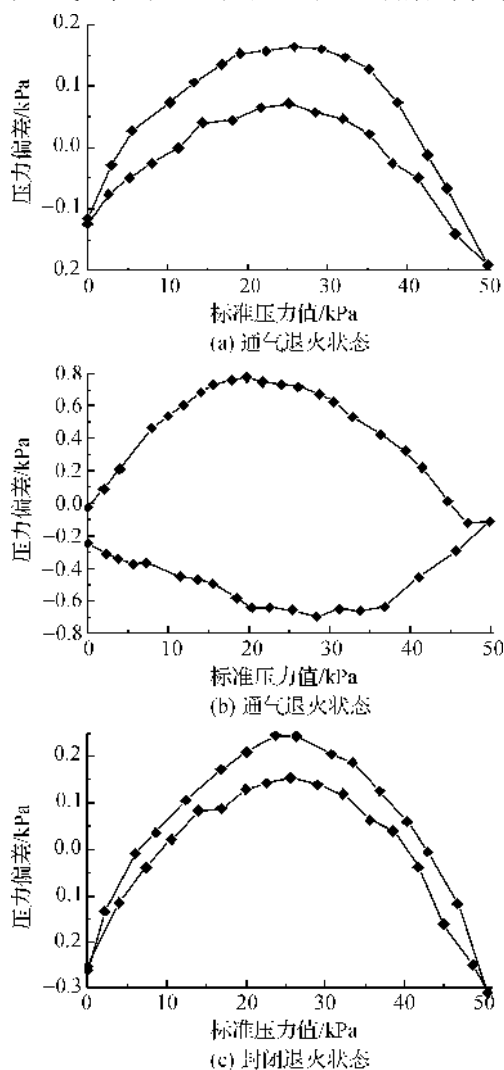


图7 不同状态下膜盒的偏差曲线

(c)为封闭但经退火处理状态的偏差曲线。比较图7(a)与图7(b)可知,去应力退火处理后膜盒的迟滞已经只有0.2%,非线性度仅为0.7%,即使不经非线性修正,该传感器的精度也已远高于传统的指针式膜盒压力表2.5的精度等级。比较图7(a)与图7(c)可看出在将膜盒密封后,其非线性由0.7%变大到1.2%,这种现象符合2.1节中的理论分析。

## 4 结论

本文提出一种新型光纤膜盒压力传感器的设计方法。采用光纤相干测距方法可直接对膜片进行测量,测量精度与干涉信号的光强无关,因此不受膜片发射率、测量环境变化、光纤损耗等因素的影响;经退火处理后,膜盒的迟滞特性将得到极大改善,为其他类型的膜盒压力传感器实现高精度的测量提供了借鉴。该传感器具有较好的线性度,且只需选用不同尺寸的膜盒就可应用于不同量程和灵敏度要求的压力测量,具有相当广泛的应用范围。

## 参考文献:

- [1] 李学金, 张百钢, 姚建铨, 等. 一种光纤压力传感器的设计理论分析[J]. 传感技术学报, 2004(1): 133-135.
- [2] 杨淑连. 一种新型光纤压力传感器的设计[J]. 光子学报, 2007, 36(5): 838-841.
- [3] 佟成国, 马树坤, 林 沛, 等. 双膜盒式光纤压力传感器设计[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2004, 25(2): 192-195.
- [4] 李 成. 光纤法珀压力传感器的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013: 9-12.
- [5] 于清旭, 贾春艳. 膜片式微型 F-P 腔光纤压力传感器[J]. 光学精密工程, 2009, 17(12): 2887-2892.
- [6] 谭 波. 一种高灵敏度光纤光栅压力传感器[J]. 光电电子·激光, 2012, 23(11): 2102-2105.
- [7] Cabral A, Rebordão J. Accuracy of frequency-sweeping interferometry for absolute distance metrology [J]. Optical Engineering, 2007, 46(7): 073602.
- [8] 吕 涛, 刘志刚, 邓忠文, 等. 一种光纤组量程扩增的激光频率扫描干涉绝对测距系统[J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(9): 77-82.
- [9] 宋天民. 焊接残余应力的产生与消除[M]. 北京: 中国石化出版社, 2010: 20-53.

## Design of Optical Coherent Diaphragm Pressure Sensor

ZHAO Wen-jian<sup>1</sup>, YUAN Hai-jun<sup>2</sup>, YUAN Yan-hong<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;

2. Shanghai Shunyu Haiyi Photoelectric Technology Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

**Abstract:** A new optical diaphragm pressure sensor is designed which uses the frequency-scanning interferometry to measure the displacement of corrugated diaphragm so as to get the pressure value. The pressure sensor applies spatial filtering characteristic of single mode fiber for distance measurement, and direct distance measurement is achieved for non-smooth metal diaphragm. The pressure diaphragm eliminates residual stress generated from welding through annealing process, which improves hysteresis characteristics. The results show that the pressure sensor not just owns higher accuracy and sensitivity than pointer-type diaphragm pressure gauge, but also owns features of remote measurement and anti-electromagnetic interference of fiber optic sensor. Through calibrating the pressure sensor, characteristic curve of pressure, distance and zero temperature drift curve are given. The hysteresis is only 0.2%, and the degree of nonlinearity is 0.7%.

**Key words:** optical coherent distance measurement; single-mode fiber; convoluted diaphragm; hysteresis; pressure sensor

(责任编辑: 康 锋)