

激光与光电子学进展

一种光纤调频连续波激光干涉液位传感器

白浪, 郑刚*, 张雄星, 孙彬

西安工业大学光电工程学院 陕西 西安 710021

摘要 提出一种基于调频连续波干涉测量技术的膜片式法布里-珀罗(F-P)腔液位传感器。根据调频连续波干涉技术液位测量体系理论制作液位传感器,搭建液位测量系统,并对其进行线性度、灵敏度和分辨率等测试。实验结果表明,调频连续波液位传感器液位测量的线性度为 0.99998,液位测量的灵敏度为 465 nm/mm,分辨率约为 33.998 nm,对应的液位值为 0.0731 mm,而且具有很好的稳定性、重复性和迟滞性。因此,所设计的调频连续波光纤液位传感器可以实现高精度且稳定的液位测量。

关键词 激光光学; 调频连续波激光干涉; 法布里-珀罗(F-P)腔干涉仪; 膜片压力原理; 光纤液位传感头; 液位测量

中图分类号 TN247

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0714009

Optical Fiber Frequency-Modulation Continuous-Wave Laser Interference Liquid Level Sensor

Bai Lang, Zheng Gang*, Zhang Xiongxing, Sun Bin

School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China

Abstract This study proposes a diaphragm type Fabry-Perot (F-P) cavity liquid level sensor based on frequency-modulation continuous-wave laser interferometry. According to the frequency modulated continuous wave interferometry technology liquid level measurement system theory, the liquid level sensor is made, the liquid level measurement system is built, and its linearity, sensitivity, resolution and other tests are carried out. The experimental results show that the linearity of the liquid level measurement is 0.99998, the sensitivity of the liquid level measurement is 465 nm/mm, and the measurement resolution is 33.998 nm, the corresponding level value is 0.0731 mm, and has good stability, repeatability and hysteresis. Therefore, the designed frequency-modulated continuous wave optical fiber liquid level sensor can achieve high precision and stable liquid level measurement.

Key words laser optics; frequency-modulated continuous-wave laser interference; Fabry-Perot cavity (F-P) interferometer; diaphragm pressure principle; optical fiber liquid level sensor head; liquid level measurement

OCIS codes 140.3410; 140.3425; 060.2370

1 引言

液位测量是仓库储存、加工制造和交通运输过程中必不可少的测量技术之一。液位测量包括

液-气界面、液-液界面和液-固界面^[1]的测量,通常情况下液位测量主要是指液-气界面的测量。目前液位测量主要^[2-5]涵盖对飞机和汽车燃油系统的测量、化工厂对化工原料液位的实时监测,以及交通运输

收稿日期: 2020-09-07; 修回日期: 2020-09-13; 录用日期: 2020-09-15

基金项目: 陕西省自然科学基金面上项目(2020JM-560)、陕西省教育厅重点科学研究计划(20JY028)

*E-mail: zhengg@xatu.edu.cn

过程中对油品储罐液位的测量等。随着当今人工智能和物联网等技术的快速发展,液位测量不仅要实现数字化和自动化的测量,而且要在特殊恶劣环境下进行稳定且可靠的测量,同时需要实现无接触、防燃防爆和抗电磁干扰测量等。甚至在远程操控下,液位传感器依然可以实现高精度、实时且稳定的测量。但是,现有的液位测量传感器远远无法满足这些要求,因此亟须研究一种新型液位测量传感器来满足市场需求。

根据测量方式,液位传感器主要分为三种。

1) 浮子式液位传感器,即将浮子与传动装置相连,通过浮子所处位置的高度来测量液位,如 2016 年王凡等^[6]制作的碟形浮子式液位传感器。浮子式液位传感器的测量误差普遍较大,并且容易出现测量故障。2) 电测式液位传感器,即将液位值转化为电阻或电容值进行测量,如 AMETEK-DREXELBROOK 公司和 Honeywe 公司设计的射频导纳电容式液位传感器^[7]。电测式液位传感器的特点是响应速度慢,容易受到外界电磁的干扰,不能起到防燃防爆的作用,测量结果也不稳定。3) 超声波液位传感器和雷达液位传感器,这两个传感器分别利用超声波和雷达电磁波的回波脉冲信号实现液位非接触测量,如 2018 年李泽等^[8]设计的高精度超声波液位测量系统,2017 年李强等^[9]设计的调频连续波(FMCW)雷达液位测量系统,液位测量精度可达 ± 20 mm。但超声波液位传感器容易受到环境的影响,可靠性较差;而雷达液位传感器的电路复杂,造价较高。4) 光纤式液位传感器,其主要是通过将液位高度转化为光学参量,如光强和相位等来实现液位测量,尤其是以波长测量技术为核心的光纤布拉格光栅(TFBG)液位传感器受到广泛关注,如 2019 年孙宇丹等^[10]研究了一种基于倾斜光纤光栅的液位传感器。光纤液位传感器可以满足非接触、防燃防爆、抗电磁干扰以及高精度测量的要求,但是容易受到外界温度的影响,尤其在高温环境下,仪器容易损坏,导致测量失败^[11-13]。因此,现有的液位传感器还无法满足新的应用领域对液位测量的高精度、稳定性和可靠性要求。

本文基于调频连续波干涉技术推导液位测量理论,搭建膜片式法布里-珀罗(F-P)腔液位测量系统,并通过液位测量实验进行验证分析。实验从线性度、灵敏度和敏感率等方面着重考察液位测量传感器的各项性能及指标,进一步验证调频连续波干

涉液位测量传感器对现代化高精度和稳定性测量的适用性和适应性。

2 调频连续波干涉液位测量原理

调频连续波干涉液位测量理论主要包括三个部分内容:液体内部压强与液体深度的关系、传感头压强与弹性膜片中心位置形变量的关系,以及调频连续波干涉初相位变化量与弹性膜片中心位置形变量的关系,从而推导出液位深度与调频连续波干涉初相位变化量之间的关系。

根据液体内部压强与距液面深度的关系,可知

$$P = \rho g H, \quad (1)$$

式中: ρ 为液体的密度; g 为地球重力加速度; P 为距液面深度 H 处液体的压强。若将传感器置于容器底部,液体的密度 ρ 为定值,那么就可以通过传感器的弹性膜片表面压强变化量得到液体的深度。

根据膜片压力原理^[14],膜片中心形变量 Δl (F-P腔的腔长变化量)与弹性膜片表面压强变化量 ΔP 的对应关系为

$$\Delta l = \frac{3(1-\mu^2)\gamma^4}{16 E h^3} \Delta P, \quad (2)$$

式中: h 为膜的厚度; γ 为 F-P 腔的半径,即膜片的有效感压半径; μ 为膜片材料的泊松比; E 为膜片材料的弹性模量。由(2)式可知,弹性膜片中心形变量与膜片表面压强变化量呈线性关系,只要测出膜片中心的形变量,就可以得到膜片表面的压强变化量。

对于膜片中心形变量的测量,本实验选用调频连续波干涉测量技术。图 1 为调频连续波干涉测量原理,其中 DFB 为分布式反馈。

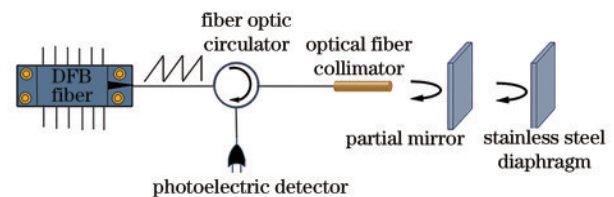


图 1 调频连续波干涉原理图

Fig. 1 Schematic of FMCW interference

从图 1 可以看到,干涉系统主要由蝶形封装结构的半导体激光器、三端口光纤单模环行器、单模激光准直器和 F-P 腔组成。首先,半导体激光器发出一个经锯齿波电流调制后角频率呈线性变化的激光束,激光束从三端口光纤环行器的第一个端口进入,从第二个端口出射并进入单模光纤准

直器中,激光束经光纤准直器耦合为空间光束后进入 F-P 腔中, F-P 腔由两个平行的反射面组成, 第一个反射面为反射率为 20% 的反射镜, 第二个反射面为 SUS631 不锈钢材质所制作的高弹性膜片。激光束进入 F-P 腔后, 以第一个反射面(反射镜)反射的激光作为参考波, 以在第二个反射面(SUS631 不锈钢弹性膜片)上发生反射并原路返回的激光作为信号波, 参考波与信号波相遇叠加后形成干涉拍频信号。参考波与信号波的角频率随时间的变化规律如图 2 所示, 其中锯齿型实线为

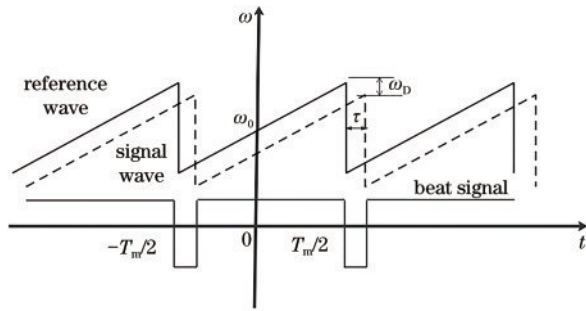


图 2 参考波与信号波的角频率随锯齿波调制电流的变化曲线
Fig. 2 Curves of angular frequency of reference wave and signal wave with modulation current of sawtooth wave

参考波角频率随时间的变化规律, 锯齿型虚线为信号波角频率随时间的变化规律, 水平实线为参考波与信号波叠加后所得合成波的角频率随时间的变化规律。参考波与信号波最终在 F-P 腔的第一个反射镜左侧相遇, 叠加后形成的干涉拍频信号波形如图 3 所示。

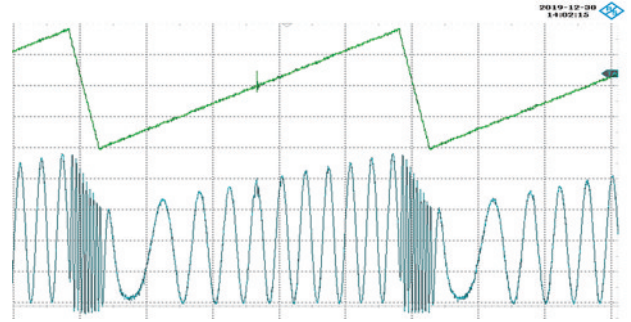


图 3 调频连续波拍频信号随锯齿波电流调制变化的波形
Fig. 3 Waveform of FMCW beat frequency signal with sawtooth current modulation

图 3 的上半部分为锯齿波频率调制波形, 下半部分为经锯齿波电流调制后得到的调频连续波干涉拍频信号波形。干涉拍频信号光强可表示为

$$I(D_{\text{OPD}}, t) = I_0 \left[1 + V \cos \left(\frac{2\pi\Delta\nu\nu_m D_{\text{OPD}}}{c} t + \frac{2\pi}{\lambda_0} D_{\text{OPD}} \right) \right] = I_0 [1 + V \cos(2\pi\nu_b t + \varphi_{b0})], \quad (3)$$

式中: $\Delta\nu$ 为光学频率调制范围 ($\Delta\nu = \Delta\omega/2\pi$); ν_m 为调制信号的频率 (即调制频率) ($\nu_m = 1/T_m$); D_{OPD} 为光程差, $D_{\text{OPD}} = c\tau$, 其中 c 为自由空间中的光速, τ 为信号波相对参考波延迟时间; λ_0 为自由空间中的中心光波长 ($\lambda_0 = 2\pi c/\omega_0$); ν_b 和 φ_{b0} 分别为拍频信号的频率和初相位; I_0 为初始强度值; V 为电压。

$$\varphi_{b0} = \frac{\omega_0 D_{\text{OPD}}}{c} = k_0 D_{\text{OPD}} = \frac{2\pi D_{\text{OPD}}}{\lambda_0}, \quad (4)$$

式中: k_0 为斜率。反射镜表面和 SUS631 不锈钢反射面的两束反射光之间的光程差 D_{OPD} 与 F-P 腔的腔长 l 之间满足

$$D_{\text{OPD}} = 2n_e l, \quad (5)$$

式中: n_e 为 F-P 腔的折射率; l 为 F-P 腔的长度。当 SUS631 不锈钢膜片中心受到外界压强的作用时, 膜片发生形变, 其形变量 Δl 与初相位形变量 $\Delta\varphi_0$ 满足

$$\Delta\varphi_0 = \frac{4\pi\Delta l}{\lambda_0}. \quad (6)$$

那么结合(1)、(2)和(6)式可以得到液位深度 H 与调频连续波干涉初相位变化量之间的关系, 表达式为

$$\Delta\varphi_0 = \frac{3(1-\mu^2)\gamma^4}{4\lambda_0 E h^3} \rho g H. \quad (7)$$

由(7)式可知, 只要解调出调频连续波干涉初相位的变化量, 就可以得到液体的深度。

3 调频连续波液位传感器制作

为了进行液位测量实验, 本课题组制作了一种液位传感器, 其主要由三部分结构组成: 316L 不锈钢材质所制作的厚度为 6 mm 和长度为 150 cm 的 F-P 腔、厚度为 0.8 mm 和有效半径为 41 mm 的 SUS631 不锈钢金属弹性膜片, 以及 316L 材质的液体接触结构。其中不锈钢金属弹性膜片通过激光一体化焊接术粘贴于液体接触结构的左侧部分, 然后通过卡箍将带有弹性膜片的液体接触结构固定于 F-P 腔的右端位置, 液位传感器的实物结构如图 4 所示。



图 4 液位传感器实物图

Fig. 4 Physical image of liquid level sensor

4 调频连续波液位传感器的系统搭建与测量特性分析

膜片式调频连续波光纤液位传感器的测试实验系统如图 5 所示,包括中心波长为 1550.15 nm 的分布式半导体激光光源、以膜片式 F-P 腔为主的光学系统、以 STM32F4 微处理器为核心的信号采集与处理系统、带有普通液位测试仪的水箱,以及上位机

数据分析与 LCD(Liquid Crystal Display)显示系统。其中分布式半导体激光器通过三端口单模环形器与光纤准直器连接,光纤准直器又与 F-P 腔连接,其中 F-P 腔由高度平行的半反半透镜(反射率为 20%)与 SUS613 高弹性膜片组合制作而成。SUS613 不锈钢膜片的右侧与 PMMA(Polymethyl Methacrylate)材质的水箱通过螺纹连接。为了检测液位测量的正确性与稳定性,并与现有液位仪的测量数据进行对比,在水箱前侧壁安装一个普通液位测量仪。

实验开始时,半导体激光器产生角频率以锯齿波变化的激光束,激光束经光纤环形器后进入光纤准直器中,然后在 F-P 腔内发生干涉,干涉信号返回到光纤环形器后从环行器的第三个端口出射到光电探测器,通过光电探测器将采集到的光信号转化为电信号,经过以 STM32F4 微处理器为核心的信号采集与处理系统后,将 F-P 腔的腔长变化量(膜片形变量)转为液位深度量,最终将液位深度量发送到上位机中并进行数据分析或从上位机显示输出。具体液位测量算法如图 6 所示。

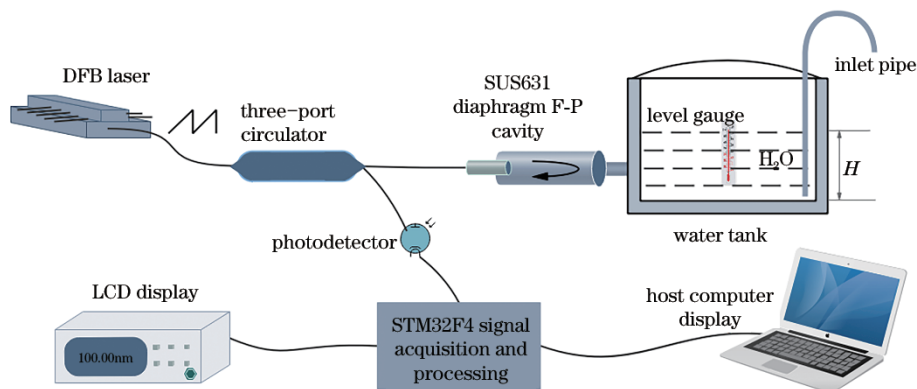


图 5 膜片式调频连续波光纤液位传感器的实验系统

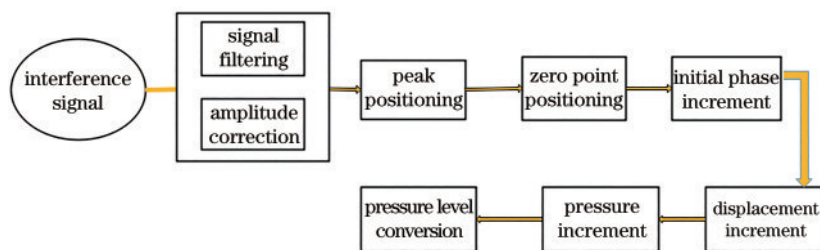


图 6 拍频信号的初相位解调流程图

Fig. 6 Flow chart of initial phase demodulation of beat signal

当获得干涉拍频信号时,由于受到电路和光路等的影响,在相位检测之前需要对拍频信号进行噪

声滤波。又因为在电流调制过程中,拍频信号的幅值会发生变化,因此需要对拍频信号的幅值进行归

一化校正。之后,通过冒泡法对拍频信号的峰值进行定位。在相邻波峰和波谷之间靠近零点幅值附近取 1/4 长度的线性段为过零段,采用线性拟合的方法得到信号的过零点,即可计算得到零点位置对应的初相位值。当 F-P 腔的腔长发生变化时,零点位置所对应的初相位值也会发生变化,将腔长变化前后的两初相位值相减,得到初相位的变化量,然后结合(6)式和(7)式就可以实现液位测量。对应的液位测量系统实物如图 7 所示。

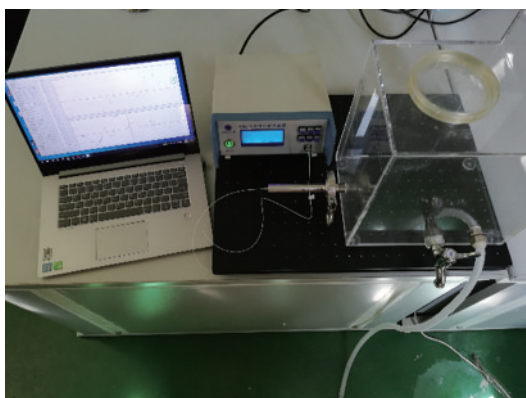


图 7 液位测量系统实物图

Fig. 7 Physical image of liquid level measurement system

根据膜片形变理论,当膜片的形变量小于厚度的 30% 时,膜片的形变量与外界压强成正比。那么对于实验中所使用的厚度为 0.8 mm 和有效半径为 41 mm 的 SUS631 不锈钢金属弹性膜片,其最大形变量应为 240 μm ,对应的压力测量最大量程为 870 kPa。因为本实验中选用的液体为水,因此根据(1)式可知本实验所使用的液位传感器的最大水位测量深度为 84.378 m,液位测量的最大深度可以根据实际需求对传感器头进行重新加工。

本实验是原理验证性实验,因此实验室制备的水箱深度为 300 mm,为了保证实验安全,实验水箱的水深最大加到 200 mm;同时为了防止加水过程中液面波动对测量结果造成影响,通过外接水管将水缓慢加到水箱中。

当实验开始时打开水阀开关,通过进水管将水缓慢注入到 PMMA 水箱中,测试过程中使水深从 0 mm 缓慢增加到 200 mm,随后再缓慢通过排水阀排水,将水深从 200 mm 下降到 0 mm,每隔 10 mm 记录一次数据,至少连续测量三次;然后在尽量控制室内温度不变的情况下,将水深分别控制在 50, 100, 150, 200 mm 的高度,每隔 2 s 测量一次 F-P 腔的腔长变化量,同一液位深度条件下测量时间为

2 h;最后分析总结相同温度下不同液位深度对应的腔长稳定性。

4.1 线性度与灵敏度

灵敏度是衡量液位传感器的最重要参数之一,由(6)式和(7)式可知,液位传感器灵敏度满足

$$\frac{\Delta l}{\Delta H} = \frac{3}{16} \frac{(1-\mu^2)\gamma^4}{\pi E h^3} \rho g. \quad (8)$$

随机选取一组液位深度变化范围为 0~200 mm 的数据进行分析,得到的变化规律如图 8 所示,其中点是液位每隔 10 mm 测量得到的腔长形变量,将测量点进行线性拟合分析,得到如线条所示的线性度,对应的拟合度为 0.99998。然后利用(8)式进行计算,发现传感器液位测量的灵敏度较高,平均液位测量的灵敏度为 465 nm/mm,而且调频连续波液位传感器的灵敏度和线性度基本保持不变。

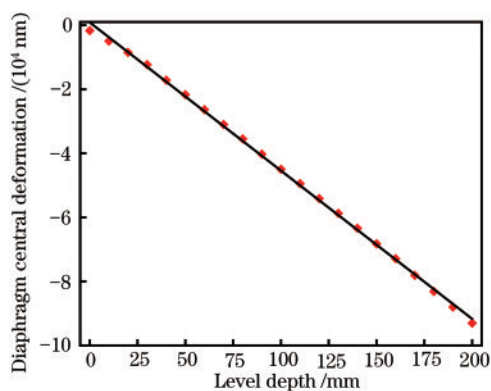


图 8 液位传感器的线性度与灵敏度特性

Fig. 8 Linearity and sensitivity characteristics of liquid level sensor

4.2 重复性与迟滞性

选取一组液位使其从 0 mm 上升到 200 mm,然后控制液位从 200 mm 缓慢下降到 0 mm,将液位上升过程和下降过程获得的膜片中心形变量数据进行分析,结果如图 9 所示。

从图 9 可以看到,当液位上升段和下降段在同一个液位深度时,腔长形变量几乎相同,液位上升段和下降段的线性度拟合曲线也近似重合。但是,当液位接近 0 mm 时上升段和下降段数据差距较大,线性度也存在一定偏差。这主要是因为当液位降到 0 mm 时,无论水箱是进水还是排水,起初阶段液位波动都较大,再加上设备操作等原因,受到的测量干扰因素也较多。但是从整体数据分析可知,液位上升和下降段不仅规律基本保持一致,而且并未出现测量滞后。

选取三次液位在 0~200 mm 之间上升和下降

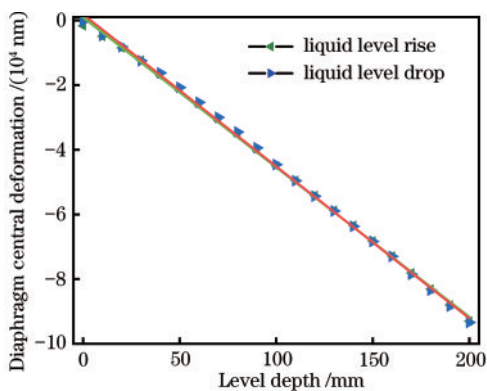


图 9 液位传感器的迟滞性分析

Fig. 9 Analysis of hysteresis of liquid level sensor

过程的数据进行分析,得到液位在三次往复测量过程中的变化规律,如图 10 所示。

从图 10 可以看到,三次往复过程中膜片中心形变量随着液位的变化,形变量都具有较高的线性度和灵敏度,但存在腔长变化量随着测量时间的增加出现向上漂移的趋势。根据膜片压力原理,腔长形变量不仅对实验液位测量非常敏感,而且对周围测试环境尤其是温度参数非常敏感,实验时间接近中午时分,实验室温度处于上升阶段,而每次液位测量的时间不同,因此对于高精度动态相位测量的调频连续波干涉技术来说,温度变化会导致弹性膜片发生形变。此外,实验液位传感器采用的是 SUS631 材质的弹性膜片,其是一种弹性系数极高的金属材料,对外界因素的变化极其敏感。因此,随着实验环境温度的上升,膜片中心形变量会向上漂移。

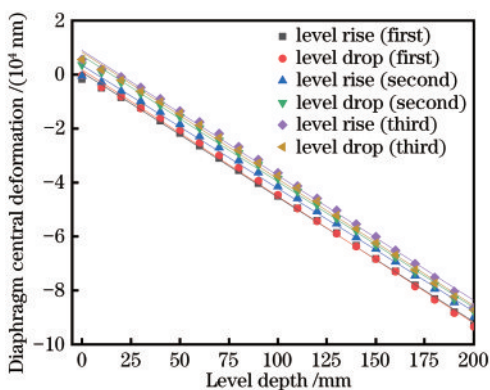


图 10 液位传感器的重复性分析

Fig. 10 Repeatability analysis of liquid level sensor

4.3 稳定性

为了验证调频连续波干涉液位传感器的稳定性,在环境温度不变的情况下,将水深分别控制在 0, 50, 100, 150, 200 mm 的高度,每隔 2 s 测定一次

F-P 腔的腔长形变量,同一水深条件下测量持续时间 2 h。为了降低人为因素对测量结果造成的干扰,只对 200 mm 到 0 mm 之间的液位进行测量,整个测量过程中严格控制液位高度,整个液位稳定性测量结果通过上位机显示,如图 11 所示,其中水平坐标为稳定性测量过程种随时间变化的采样点数,纵坐标为 SUS631 膜片中心形变量。

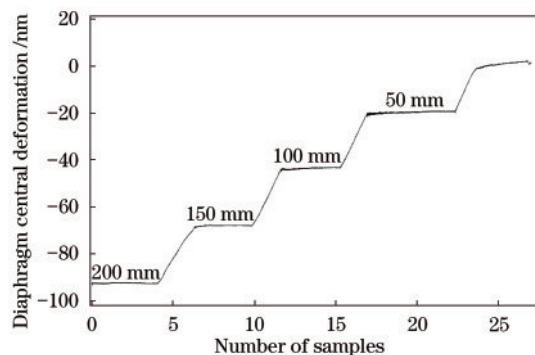


图 11 液位传感器的稳定性数据图

Fig. 11 Stability data graph of liquid level sensor

将在 0, 50, 100, 150, 200 mm 液位高度的采样点数提取出来进行分析。同时,因为每个液位高度对应的数据采集时间为 2 h,间隔 2 s 采集一次测量数据,每个液位高度采样点数是 3600 个,得到每个液位高度的稳定性情况如图 12 所示。

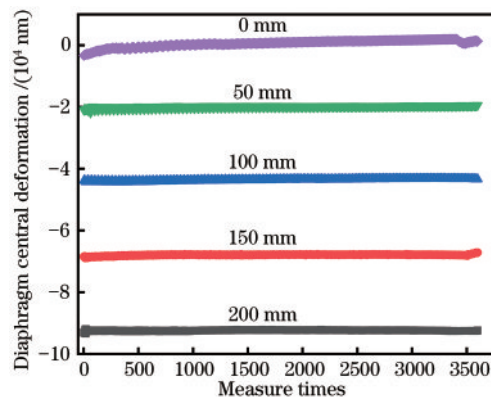


图 12 液位传感器的稳定性分析

Fig. 12 Stability analysis of liquid level sensor

从图 12 可以看到,每个液位在测试时间 2 h 以内都具有良好的数据稳定性,且对应的高度差几乎不变。但是,当每次采样开始和结束时,测定数据存在一定的波动,这可能是因为在液位下降过程中要通过上电或断电来控制抽水泵,使得液位保持在要求的高度,这无疑给高灵敏度液位传感器的测量结果带来影响。

为了进一步测试液位测量的稳定性,实验选取

100 mm 的液位高度进行分析。在 100 mm 的液位高度下, 2 h 内的测试数据变化规律如图 13 所示。

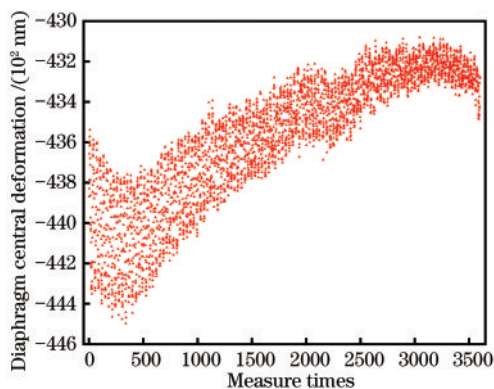


图 13 同一温度下液面深度为 100 mm 的稳定性测量结果
Fig. 13 Stability measurement results of liquid depth of 100 mm at the same temperature

从图 13 可以看到, 2 h 内膜片中心形变漂移量接近 1000 nm, 起初阶段的漂移是因为实验操作等影响较大, 后期漂移则处于线性上升趋势。这是因为液位传感器是根据压力参数间接测量液位, 而压力传感器对压力和温度交叉敏感, 导致液位传感器在测量过程中也存在液位温度交叉敏感的问题, 但是这个测量过程中影响测量结果的因素还包括振动、湿度、空气扰动和噪声等, 因此本实验将图 13 的采样点值通过 MATLAB 软件的高阶线性拟合来消除系统误差, 最后消除系统误差后得到的采样点测量结果随机误差点如图 14 所示。

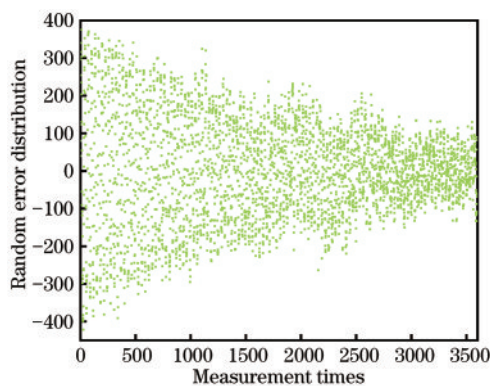


图 14 同一温度下液面深度为 100 mm 时膜片中心形变量的随机误差点

Fig. 14 Random error points of shape variable at diaphragm center when liquid depth is 100 mm at the same temperature

从图 14 可以看到, 在稳定性测量的初始阶段, 外界操作对整个实验结果的影响非常明显。对测量结果进行正态分布统计分析, 发现随机误差服从正态分布统计的规律, 如图 15 所示。随后对正态分

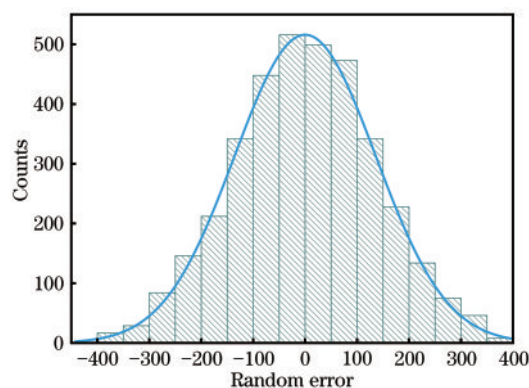


图 15 同一温度下液面深度为 100 mm 时膜片中心形变量随机误差的正态分布

Fig. 15 Normal distribution of random error of diaphragm central deformation at the same temperature with liquid level depth of 100 mm

布结果进行统计分析, 可以得到随机误差的标准偏差为 135.99403 nm, 说明空气扰动、噪声和外界振动等对测量结果的影响非常大。

4.4 分辨率

使用随机误差的标准差的 25% 来计算系统的分辨率, 液位传感器的分辨率约为 33.998 nm, 对应的液位值为 0.0731 mm。而现有液位传感器的分辨率一般为毫米量级以上, 而调频连续波液位传感器的分辨率比现有液位传感器至少提高了 3 个数量级, 其原因是调频连续波光纤压力传感器是以调频连续波解调技术为核心进行液位测量, 而调频连续波解调技术的优点是其信号为动态信号, 可以进行相位细分, 且相位移动方向可辨, 最终可以实现液位高精度测量。

4.5 温度特性

为了提高调频连续波液位传感器的实用性, 本实验对此液位传感器的温度特性进行了测试。将温度计放入水箱中, 通过上位机对液位传感器的示数进行清零, 然后使用加热器对水箱中的水进行缓慢加热, 记录水温变化以及对应的液位传感器示数变化, 得到温度在 27.5 °C (室温) 到 63.5 °C 变化过程中液位传感器示数的变化规律, 如图 16 所示。从图 16 可以看到, 当温度从 27.5 °C 变化到 63.5 °C 时, 液位传感器的示数从 0 μm 变化到 53.5 μm, 可见温度对液位传感器的影响非常大, 说明调频连续波干涉液位传感器也存在温度液位交叉敏感的问题, 因此后期需要对此液位温度传感器进行温度补偿。

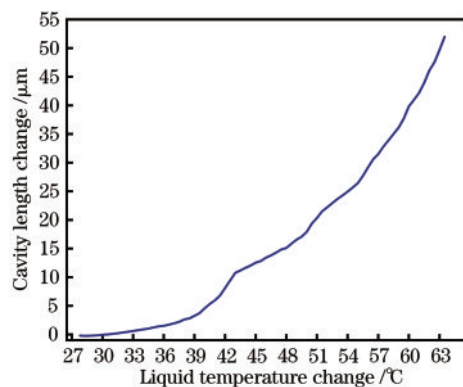


图 16 液位传感器的温度特性

Fig. 16 Temperature characteristics of liquid level sensor

5 结 论

对基于调频连续波干涉解调技术的膜片式 F-P 腔液位传感器进行应用性能考察,着重从线性度、灵敏度、测量稳定性、迟滞性以及分辨率等方面进行评估分析。测试结果表明,调频连续波压力传感器的线性度为 0.99998,液位测量灵敏度为 465 nm/mm,分辨率约为 33.998 nm,对应的液位值为 0.0731 mm;传感器测量过程中,灵敏度和分辨率不受液位测量量程的影响。采用调频连续波测相技术间接测量液位,相位测量的优点是可以实现相位细分,相位移动方向可辨,而且采用过零点法进行相位检测,因此相位测量技术的测量精度远远高于频率测量。调频连续波液位传感器是将液位变化量转化为光波参量进行测量,具有无接触测量、抗电磁干扰和防燃防爆的特点,满足了现代飞机汽车油箱、工业工程、交通运输和海洋水位测试等领域对液位测量的高灵敏度、高分辨率和稳定性的要求,而且相对于光纤材料类液位传感探头,膜片式压力传感探头制作工艺简单,成本低,适合在工业生产等领域推广使用。

参 考 文 献

- [1] Gao C, Wang J X. Principle and application of new palisade capacitance level sensor [J]. Instrument Technique and Sensor, 2011(3): 9-10, 21.
高超, 王俊雄. 新型栅状电容式液位传感器原理及应用[J]. 仪表技术与传感器, 2011(3): 9-10, 21.
- [2] Niu H X, Hou T. Experiment study of liquid level control based on ultrasonic sensor [J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2016(4): 71-74.
牛宏侠, 侯涛. 基于超声波传感器的液位控制实验研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2016(4): 71-74.
- [3] Yun B F, Chen N, Cui Y P. Highly sensitive liquid-level sensor based on etched fiber Bragg grating [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(21): 1747-1749.
- [4] Shao M, Qiao X G, Zhao X, et al. Liquid level sensor using fiber Bragg grating assisted by multimode fiber core [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(8): 2374-2379.
- [5] Sun M M, Jin Y X, Dong X Y. All-fiber Mach-Zehnder interferometer for liquid level measurement [J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(7): 3984-3988.
- [6] Wang F, Pi G Y. Float-type differential pressure level sensor [J]. Environmental Technology, 2016, 34(4): 42-45.
王凡, 皮桂英. “碟形”浮子式压差液位传感器的研究 [J]. 环境技术, 2016, 34(4): 42-45.
- [7] Chen P, Sha X, Luo J. Radio frequency admittance capacitive level measurement [J]. Instrument Technique and Sensor, 2006(7): 19-20.
陈平, 沙训, 罗晶. 射频导纳电容式物位测量仪的研究 [J]. 仪表技术与传感器, 2006(7): 19-20.
- [8] Li Z, Jiang M S, Lü S S, et al. Design of high precision ultrasonic level measurement system [J]. Process Automation Instrumentation, 2018, 39(11): 56-59.
李泽, 姜明顺, 吕珊珊, 等. 高精度超声波液位测量系统设计 [J]. 自动化仪表, 2018, 39(11): 56-59.
- [9] Li Q, Xue W. Design of FMCW radar liquid level measurement system [J]. Technology Innovation and Application, 2017(3): 54-55.
李强, 薛伟. FMCW 雷达液位测量系统设计 [J]. 科技创新与应用, 2017(3): 54-55.
- [10] Sun Y D, Zhang X Y, Liu Q, et al. Characterization of liquid level sensor based on tilted fiber Bragg grating [J]. Instrument Technique and Sensor, 2019 (5): 18-21.
孙宇丹, 张晓雨, 刘强, 等. 基于倾斜光纤光栅的液位传感特性研究 [J]. 仪表技术与传感器, 2019(5): 18-21.
- [11] Zheng J. Reflectometric fiber optic frequency-modulated continuous-wave interferometric displacement sensor [J]. Optical Engineering, 2005, 44(12): 124404.
- [12] Zheng J. Triple-sensor multiplexed frequency-modulated continuous-wave interferometric fiber-optic displacement sensor [J]. Applied Optics, 2007, 46(12): 2189-2196.
- [13] Zheng J. Optical frequency-modulated continuous-wave interferometers [J]. Applied Optics, 2006, 45 (12): 2723-2730.
- [14] Neilson D T. Tolerance of optical interconnections to misalignment [J]. Applied Optics, 1999, 38(11): 2282.