

调频连续波光纤压力传感器及其测量特性分析

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 为了满足压力测量中的高灵敏度、高分辨率、高可靠性等要求, 本文提出了一种基于调频连续波激光干涉解调原理的高精度膜片式珐珀腔光纤压力传感器。首先推导了基于该原理的压力测量模型, 然后搭建了一套测量装置, 通过气泵向 SUS631 不锈钢膜片组成的密封腔连续给压, 得出气压在 0~600 kPa 范围内变化时膜片中心(即珐珀腔腔长变化量)随气压变化的特性曲线; 之后, 测试 25 °C 环境条件下不同压力测量值的稳定性, 讨论引起腔长变化量漂移的原因; 最后, 在消除系统误差后得出了压力测量的分辨率。结果表明: 该传感器的灵敏度为 286.55 nm/kPa, 分辨率为 0.287 nm/Pa, 压力传感器的测量随机误差呈正态分布。该调频连续波光纤压力传感器可以进行高灵敏度、高分辨率和高稳定性测量。

关键词 测量; 调频连续波激光干涉; 珐珀腔干涉仪; 膜片压力原理; 压力传感头

中图分类号 TN247

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0328002

Optical Fiber Pressure Sensor Based on Frequency-Modulated Continuous-Wave and Analysis of Its Measurement Characteristic

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

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

Abstract To meet the requirements of high sensitivity, resolution, and reliability in pressure measurements, in this paper, we proposed a high-precision optical fiber pressure sensor with a diaphragm-type Fabry-Perot (F-P) cavity based on the demodulation principle of frequency-modulated continuous wave (FMCW) laser interference. Firstly, a pressure measurement model based on this principle was deduced. Secondly, a pressure measuring device was developed and subsequently the sealed cavity formed by the SUS631 stainless steel diaphragm was continuously inflated through an air pump to collect the characteristic curve of the central deformation of the SUS631 stainless steel diaphragm (which is the amount of change in the F-P cavity length) with the air pressure when the air pressure changed in the range of 0–600 kPa. Furthermore, the cavity change of F-P cavity was measured at 25 °C and different pressures and the causes inducing the drift of the cavity change were discussed. Finally, the resolution of pressure measurements without the system error was acquired. The results show that the FMCW pressure sensor has a sensitivity of 286.55 nm/kPa and a resolution of 0.287 nm/Pa and its random measurement error displays a normal distribution. The above analyses verify that the proposed FMCW optical fiber pressure sensor can perform measurements with high sensitivity, resolution, and stability.

Key words measurement; frequency-modulated continuous-wave laser interference; Fabry-Perot cavity interferometer; diaphragm pressure measurement; pressure sensor head

OCIS codes 280.0280; 140.0140; 120.0120

1 引言

压力作为基本物理参量之一, 在工程测量中具

有非常重要的意义。压力传感器是将测量介质的压力形变量转化为电学或光学参量来对介质压力进行测量的装置。目前, 压力传感器^[1]已被广泛应用于

收稿日期: 2020-06-15; 修回日期: 2020-08-04; 录用日期: 2020-09-15

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

科学技术、军事工程、航空航天、医疗卫生等^[2-4]领域。在航空航天领域,压力传感器被用于对内燃机、发动机、涡轮机、火箭推进器、高速武器弹筒等的内部压力进行健康监测,对飞机机翼表面、战斗机机身进行气压疲劳测试。在无创或微手术治疗过程中,压力传感器常被用于对局部小空间内的压力进行实时监测等。这些应用领域要求压力传感器不仅能够实现无接触测量,而且可以抗电磁干扰、防燃防爆等,同时还要具备测量精度高、灵敏度好、稳定可靠等特性。但是,目前市面上的压力传感器很难达到上述测量标准。因此,研究一种能够实现高标准测量的新型压力传感器具有重要的意义。

现有的压力传感器主要包括机械式压力传感器^[5]、电测式压力传感器^[6]、微机电系统(MEMS)式压力传感器^[7]、光纤式压力传感器^[8-9]。机械式压力传感器,如膜盒式气压表,只能目视读数,不能自动测量和读数,目前主要被应用于对压力测量要求不高的领域。电测式和 MEMS 式压力传感器根据压电效应或压阻效应将压力信号转换为电信号进行测量,如荷兰代尔夫特理工大学的 Duc 等^[10]制作的微压力传感器和丹麦技术大学 Calleja 等^[11]制作的 SU-8 胶 MEMS 压力传感器。相对于机械式压力传感器,电测式和 MEMS 式压力传感器在测量精度和灵敏度上有较大提升,但电测式压力传感器仍无法满足测量无接触、抗电磁干扰和防燃防爆的要求,同时它们还普遍存在压力测量灵敏度和精度随测量量程增大而降低的现象。光纤式压力传感器将压力形变量转化为光波参量进行测量,可以满足无接触测量、抗电磁干扰和防燃防爆的要求。目前,光纤压力传感器主要包括依据波长调制的光纤布拉格光栅

压力传感器^[12-13]和依据相位调制的光纤珐珀腔压力传感器^[14-15]。其中,光纤布拉格光栅压力传感器具有测量精度和灵敏度高的特点,如 Ferreira 等^[16]设计的半聚合物光栅压力传感器的灵敏度可达 $2.2 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$ 。但是,光纤布拉格光栅压力传感器在测量过程中容易受到环境温度的干扰,导致测量结果出现偏差,而且高温环境下无法实现有效测量。光纤珐珀腔压力传感器的信号臂与参考臂同光路,具有极强的抗电磁干扰能力,并且传感器结构简单,探头小,在传输距离方面具有明显优势^[17],如 Zhu 等^[18]设计的压力传感器。但是,现有光纤珐珀腔压力传感器的加工工艺比较复杂,制作成本高,很难获得大规模推广应用。因此,研究基于新解调技术,并适用于高精度、高灵敏度和稳定压力测量的压力传感器尤为重要。

为了满足应用领域对压力传感器提出的高灵敏度、高分辨率、高稳定性的测量要求,本研究团队搭建了一个基于调频连续波干涉解调技术的 SUS631 膜片式珐珀腔结构光纤压力传感器测量系统,然后深入分析了此压力传感器在测量灵敏度、稳定性及分辨率等方面的特性,之后结合实验现象和结果讨论了引起测量误差(系统误差与随机误差)的原因,验证了基于调频连续波干涉解调技术的膜片式珐珀腔光纤压力传感器高精度稳定性压力测量的适用性。

2 调频连续波干涉测压原理

调频连续波激光干涉压力传感器是以调频连续波干涉解调技术^[19-21]为原理,以珐珀腔结构为蓝本制作的一种新型膜片式珐珀腔结构压力传感器。其测量原理如图 1 所示。

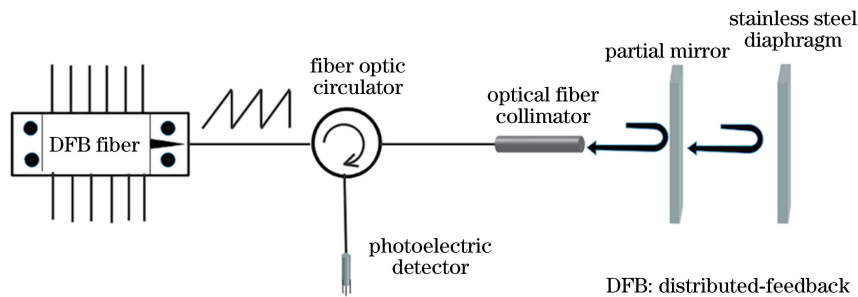


图 1 调频连续波激光干涉压力传感器的原理图

Fig. 1 Schematic of frequency-modulated continuous wave laser interference pressure sensor

半导体激光器受到一个锯齿波电流调制后,产生一种角频率随电流线性变化的激光束,激光束经三端口光纤环行器进入光纤准直器,被光纤准直器耦合为空间光束后进入到珐珀腔结构。其中珐珀腔

的前表面为一个反射率为 20% 的反射镜,后表面为 SUS631 不锈钢弹性膜片。激光束进入珐珀腔后,在反射镜表面发生反射的光波作为参考波,在 SUS631 不锈钢弹性膜片表面发生反射并原路返回

的光波作为信号波,参考波与信号波最终在珐珀腔第一个反射镜左侧相遇叠加形成干涉拍频信号。参考光的角频率 $\omega_1(t)$ 的表达式为

$$\omega_1(t) = \alpha t + \omega_0, \quad (1)$$

其中,

$$\alpha = \frac{\Delta\omega}{T_m}, \quad (2)$$

式中: ω_0 表示调制周期中心位置的角频率; α 表示角频率的调制率; t 为时间; $\Delta\omega$ 为角频率调制范围; T_m 为调制信号的周期。

参考波对应的波函数的相位 $\phi_1(t)$ 为

$$\phi_1(t) = \frac{1}{2}\alpha t^2 + \omega_0 t + \phi_0, \quad (3)$$

式中: ϕ_0 表示光源的初始相位。参考波的波动函数 $E_1(t)$ 可以表示为

$$E_1(t) = E_{01} \exp\left[j\left(\frac{1}{2}\alpha t^2 + \omega_0 t + \phi_0\right)\right], \quad (4)$$

式中: E_{01} 表示参考光的电场强度。

同理,信号波的角频率 $\omega_2(t)$ 、相位 $\phi_2(t)$ 和波动函数 $E_2(\tau, t)$ 可以分别表示为

$$\omega_2(\tau, t) = \alpha(t - \tau) + \omega_0, \quad (5)$$

$$\phi_2(\tau, t) = \frac{1}{2}\alpha(t - \tau)^2 + \omega_0(t - \tau) + \phi_0, \quad (6)$$

$$E_2(\tau, t) =$$

$$E_{02} \exp\left\{j\left[\frac{1}{2}\alpha(t - \tau)^2 + \omega_0(t - \tau) + \phi_0\right]\right\}, \quad (7)$$

式中: E_{02} 表示信号波的电场强度; τ 表示信号波相对于参考波的延迟时间。参考波与信号波角频率随时间的变化规律如图 2 所示。

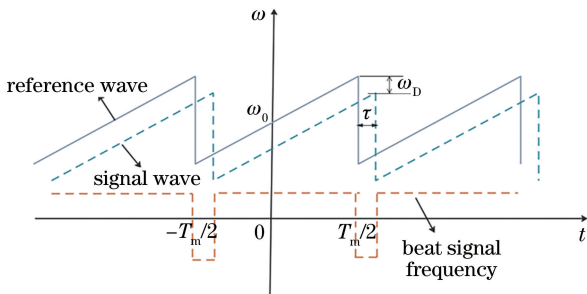


图 2 参考波与信号波角频率随时间的变化

Fig. 2 Variation of angular frequency of reference and signal waves with time

图 2 中,锯齿形实线为参考波角频率随时间的变化规律,锯齿形虚线为信号波角频率随时间的变化规律,水平虚线为参考波与信号波叠加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

终在珐珀腔第一个反射镜左侧相遇叠加形成了干涉拍频信号,波形图如图 3 所示。

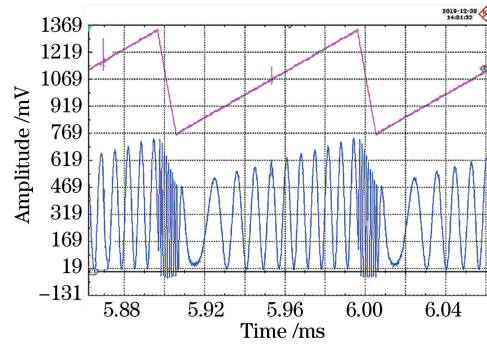


图 3 锯齿波频率调制波形(上)和调频连续波拍频信号的波形图(下)

Fig. 3 Sawtooth wave frequency modulation (up) and frequency-modulated continuous wave beat frequency signal (below) waveforms

图 3 所示上半部分为锯齿波频率调制波形,下半部分为对应的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图。拍频信号的光强表达式为

$$I(d_{\text{OPD}}, t) = I_0 \left[1 + V \cos\left(\frac{2\pi\Delta\nu\nu_m d_{\text{OPD}}}{c} t + \frac{2\pi}{\lambda_0} d_{\text{OPD}}\right) \right] = I_0 [1 + V \cos(2\pi\nu_b t + \phi_{b0})], \quad (8)$$

式中: d_{OPD} 表示光程差 ($d_{\text{OPD}} = c\tau$); I_0 表示拍频信号的平均光强; V 表示拍频信号的对比度; $\Delta\nu$ 表示光学频率调制范围, $\Delta\nu = \Delta\omega / (2\pi)$, 其中 $\Delta\omega$ 表示角频率调制范围; ν_m 表示调制信号的频率, 即调制频率, $\nu_m = 1/T_m$, 其中 T_m 为调制信号的周期; c 表示自由空间中的光速; $\lambda_0 = 2\pi c / \omega_0$; ν_b 和 ϕ_{b0} 分别表示拍频信号的频率和初相位。可以发现,初相位满足

$$\phi_{b0} = \frac{\omega_0 d_{\text{OPD}}}{c} = k_0 d_{\text{OPD}} = \frac{2\pi d_{\text{OPD}}}{\lambda_0}, \quad (9)$$

式中: k_0 为角频率与光速的比值。

反射镜表面和 SUS631 不锈钢反射面上的两束反射光之间的光程差与珐珀腔腔长 l 之间满足

$$d_{\text{OPD}} = 2n_c l, \quad (10)$$

式中: n_c 为珐珀腔的折射率。由膜片压力原理^[22]可知,腔长变化量 Δl 与压力变化量 Δp 之间的关系为

$$\Delta l = \frac{3}{16} \frac{(1 - \mu^2)\gamma^4}{Eh^3} \Delta p, \quad (11)$$

式中: h 为膜片的厚度; γ 为珐珀腔的半径(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。结合(9)、(10)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

珐珀腔腔长的变化量,即 SUS631 不锈钢膜片中心的形变量,然后结合(11)式就可以计算出压力的变化量。

3 调频连续波压力传感器拍频信号的解调过程

为了实现压力变化量的高精度测量,需要对图 3 所示的拍频信号的初相位进行解调。本文采用的是数字鉴相算法中的过零点相位解调方式,具体的解调流程如图 4 所示。

由于受到电路放大、光路多次干涉等的影响,实际得到的干涉拍频信号会存在噪声,而且当调制电流线性变化时,干涉信号的幅值也会随着调制电流

发生线性变化。因此,为了提高鉴相精度,在初相位计算之前对拍频信号进行信号滤波和幅值校正处理,然后使用冒泡法寻找拍频信号波峰与波谷的位置,即峰值定位。寻找到波峰和波谷位置后,本文在相邻波峰波谷之间的零点幅值位置附近取一定长度的线性段作为过零段,然后采用线性拟合的方法得到信号的过零点,这样就可以计算得到零点位置对应的初相位值。采用过零点数字鉴相算法分别得出珐珀腔腔长变化前后干涉拍频信号的初相位值,然后将两初相位值作差得到初相位的变化量,再结合(9)、(11)式就可以实现压力的测量。这种数字鉴相算法的优点是消除了零位误差导致的过零点位置误差,因此具有极高的鉴相精度。

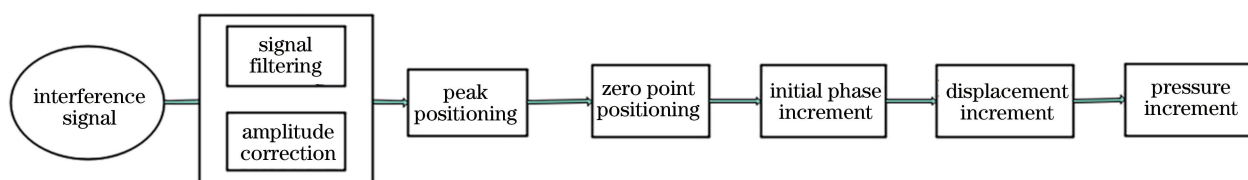


图 4 调频连续波光纤压力传感器拍频信号初相位解调流程图

Fig. 4 Flow chart of demodulation of initial phase of beat signal of frequency-modulated continuous wave optical fiber pressure sensor

4 调频连续波光纤压力传感器系统的搭建与测量特性分析

膜片式调频连续波光纤压力传感器测试实验系统如图 5 所示,主要包括以珐珀腔结构为主的光学系统、以 STM32F4 微处理器为核心的信号处理系统、中心波长为 1550.15 nm 的半导体激光光源,以及由一个高精度气压表和气泵组合而成的给压系统。其中,半导体激光器的带宽为 10 Mb,对应的干涉长度为 30 m,输出功率最大为 20 mW,边模抑制比为 43.4 dB。激光器的调制中心电流为 60 mA,调制斜率为 3 mA/ms,调制周期为 20 ms。为了防

止激光光源对光纤珐珀腔干涉结构产生影响,激光器尾纤长度为 1 m。图中半导体激光器通过三端口单模环形器与珐珀腔结构相连,珐珀腔结构由一个反射率为 20% 的半反半透镜与 SUS631 膜片组合制作而成。SUS631 不锈钢膜片组成的密封腔的进气端与 MDR 21-EA/11 型气泵相连,而且在进气端与气泵之间安装一个精度为 0.001% 的数字气压表,用来检测压力测量的正确性与稳定性。最后在三端口环形器的第三个端口连接光电探测器,光电探测器将采集到的光信号转化为电信号,电信号进入以 STM32F4 微处理器为核心的信号处理系统进

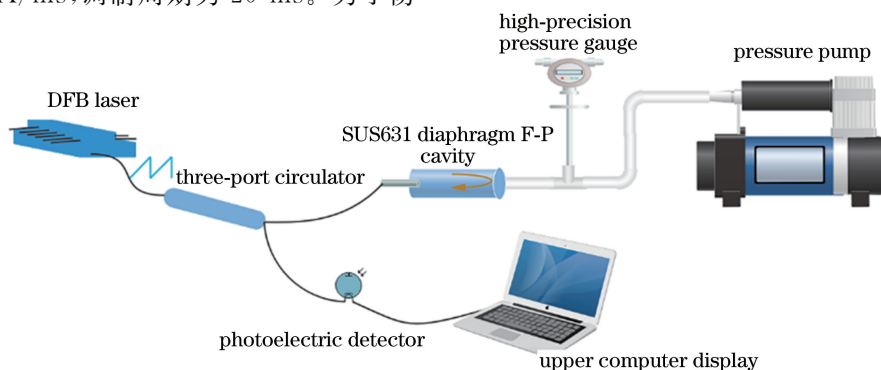


图 5 调频连续波光纤压力传感器的实验系统图

Fig. 5 Experimental system diagram of diaphragm frequency-modulated continuous wave optical fiber pressure sensor

行处理,最后由上位机显示信号的处理结果,即珐珀腔腔长的变化量(膜片形变量)。

由膜片形变理论可知,膜片形变量小于膜片厚度的 30% 时^[23],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 的 SUS631 不锈钢金属膜片来说,其最大形变量应为 240 μm ,对应的压力测量最大量程为 870 kPa。为了保证测量实验的安全性,实验过程中测量压强的上限控制在 600 kPa。需要特别指明的是,对于腔体结构来说,珐珀腔结构使用壁厚为 6 mm 的 316L 不锈钢制作而成,且由腔体结构受力分析可知,在 MPa 级以上的压力作用力下,腔体的形变量小于 1 nm。因此,对于 600 kPa 范围以内的气压,其对腔体的影响可以忽略不计。

实验开始后,打开气泵电源开关,通过控制气泵的进气阀使气体进入密封腔内。需要注意的是,如果瞬间给压太大,极易造成弹性膜片损坏,因此在气泵给压过程中需要通过排气阀和进气阀同时控制气压的流速。在实验测试过程中,保持气压密封腔体内的压力在 0~600 kPa 范围内缓慢往复变化,每间隔 30 kPa 记录一次数据,至少连续测量三次;然后在尽量控制室温不变的情况下,将压力分别控制在 0,200,402,602 kPa 下,每隔 2 s 测量一次珐珀腔的腔长(同一气压条件下的测量时间为 2 h)。最后分析相同室温下不同压力下腔长的稳定性。

4.1 灵敏度

灵敏度是压力传感器最重要的参数之一。由 (11) 式可知压力传感器的灵敏度为

$$K = \frac{\Delta l}{\Delta p} = \frac{3}{16} \frac{(1 - \mu^2) \gamma^4}{Eh^3} \quad (12)$$

选取一组 0~600 kPa 范围内的数据进行分析,结果如图 6 所示。

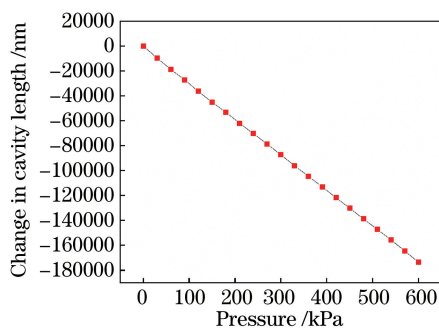


图 6 调频连续波光纤维压力传感器的灵敏度测量图

Fig. 6 Sensitivity measurement of frequency-modulated continuous wave optical fiber pressure sensor

由图 6 可以看出:调频连续波光纤维压力传感器的线性度达到了 0.99994,平均压力测量灵敏度为 286.55 nm/kPa;随着压力逐步增大,调频连续波光纤维压力传感器进行压力测量的灵敏度和线性度没有受到量程的影响。

4.2 稳定性

压强稳定性也是衡量压力传感器性能的重要指标之一。为了测试压力传感器的稳定性,首先需要将调频连续波光纤维压力传感器的压力传感头置于功率为 2 kW、控温精度为 ± 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 的高低温箱中,然后将压力分别控制在 0,200,402,602 kPa(气压取 402 kPa 和 602 kPa 是因为实验条件所限,气压只能良好地稳定于 402 kPa 和 602 kPa)下,考察珐珀腔腔长在 2 h 内的变化量。结果如图 7 所示。

由图 7 可以看出,在 4 种压力情况下,腔长的变化量都会有一定的漂移。这是因为在进行稳定性测量时,温箱的温度虽然维持在 25 $^{\circ}\text{C}$,但实际温度会在 25 $^{\circ}\text{C}$ 左右波动,温箱内的温度并没有得到严格控制,温度上升时腔长变短,温度下降时腔长变长。此外,在气压为 0 kPa 和 602 kPa 时,腔长的变化量出现了一定的波动。这是因为虽然整个实验是在气浮光学平台上完成的,但测量过程中还是会受到外界微小扰动的影响,从而对测量结果造成了一定影响。

由图 7 可知,在进行压力稳定性测量时,因为压力无法精确控制到一个非常稳定的值,加之激光器噪声与半导体激光器频率调制的非线性以及周围环境温度、湿度和空气扰动等的影响,压力示数会有微小变化,这些变化会导致压力测量出现误差(包括系统误差和随机误差)。因此,为了提高压力测量的准确性,有必要消除压力测量过程中系统误差带来的影响。

4.3 误差分析

现有的压力传感器通常是对引起压力测量系统误差的温度进行误差分析及补偿的,但事实上,引起压力传感器测量系统误差的还有其它因素,因此,常规实验手段无法实现系统误差的消除。理论上,系统误差存在一定的规律性,因此本实验运用软件对实验过程中存在的系统误差进行消除。气压选取 0 kPa(为了避免气压在测量过程中出现漂移),连续测量 2 h,然后对采集的数据进行高阶线性拟合,得出系统误差的规律性,最后在采样数据中减去系统误差,即可实现压力测量系统误差的消除。系统误差消除的具体流程如图 8 所示。

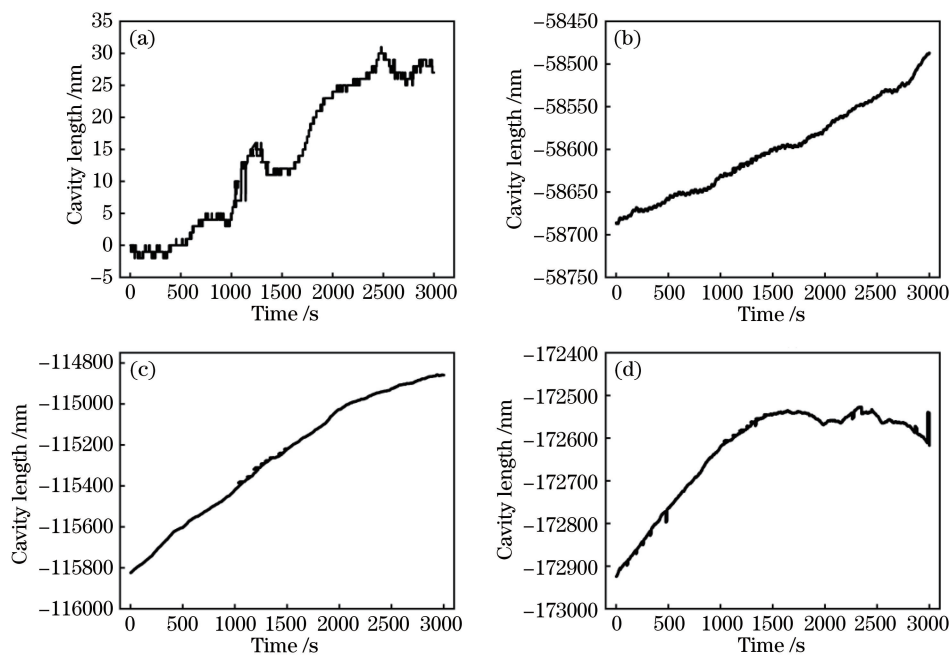


图 7 温箱温度为 25 °C 时,传感器在不同压力下的稳定性测量结果。(a) 0 kPa;(b) 200 kPa;(c) 402 kPa;(d) 602 kPa

Fig. 7 Stability measurement of sensor at different pressures and the same temperature (25 °C) of the thermostat.

(a) 0 kPa; (b) 200 kPa; (c) 402 kPa; (d) 602 kPa

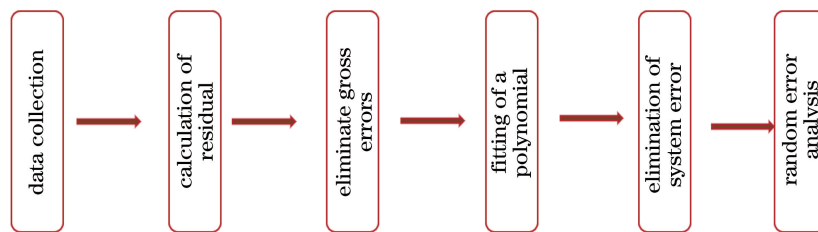


图 8 消除系统误差的流程图

Fig. 8 Flow chart of system error elimination

随后对消除系统误差后的随机误差进行分析,其中图 9 所示为随机误差分布图,图 10 所示为随机误差的正态分布图。可以看出,随机误差满足正态分布规律。

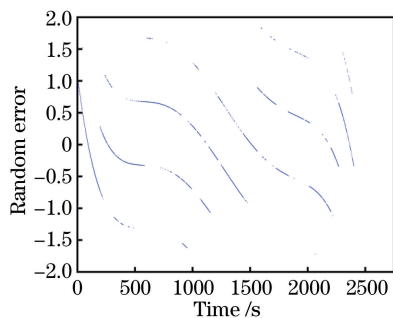


图 9 随机误差分布

Fig. 9 Random error distribution

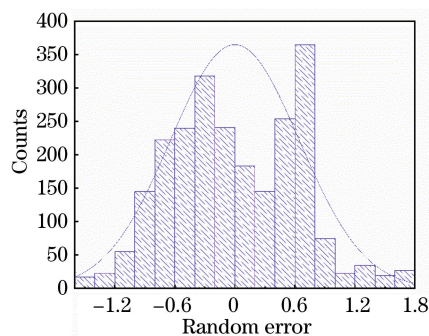


图 10 随机误差的正态分布

Fig. 10 Normal distribution of random error

4.4 分辨率

压力传感器分辨率也是压力测量中的一项重要

特性参数。以已经得到随机误差的标准差 0.25 nm 的二倍来计算系统的分辨率,可得压力传感器的分辨率约为 0.287 nm/Pa。而现有压力传感器的分辨率一般为 kPa 级,因此,调频连续波光纤压力传感器的分辨率比现有压力传感器提高了至少三个数量

级。调频连续波光纤压力传感器是基于调频连续波解调技术为核心实施压力测量的,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,相位移动方向可辨,因而可以实现压力的高精度测量。

4.5 温度特性

将压力传感头放入高低温箱中,控制箱内温度从 27.9 °C 上升到 64 °C,在此过程中,通过上位机记录法珀腔腔长的变化量。法珀腔腔长的变化量随温度的变化规律如图 11 所示。

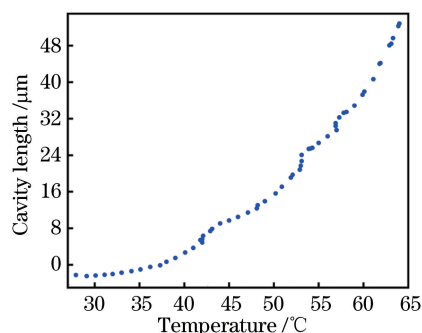


图 11 法珀腔腔长随温度的变化规律

Fig. 11 Variation of F-P cavity length of Fabry-Perot cavity with temperature

由图 11 可见,随着温度升高,法珀腔腔长一开始增加得比较缓慢,之后随温度升高增加得越来越快。法珀腔是由壁厚为 6 mm 的 316L 不锈钢制成的,压力传感器刚放入高低温箱时,法珀腔内部受温度的影响比较小,因此腔长一开始增加得比较缓慢。但从整个变化过程来看,调频连续波光纤压力传感器受温度的影响还是很明显的,这也是法珀腔压力传感器普遍存在的温度交叉敏感问题。

5 结 论

本文从灵敏度、测量稳定性以及分辨率等方面,对基于调频连续波干涉解调技术的膜片式法珀腔压力传感器进行分析,结果表明,调频连续波光纤压力传感器的灵敏度为 286.55 nm/kPa,测量分辨率达到 0.287 nm/Pa,灵敏度和分辨率不受压力测量量程的影响,可以实现稳定的压力测量。同时,调频连续波光纤压力传感器是将气压变化量转化为光波参量进行测量的,整个测量过程满足无接触、抗电磁干扰、防燃防爆的特点。因此,在解决了调频连续波光纤压力传感器温度交叉敏感的前提下,且在压力传感器生成工艺成熟的条件下,本文所提压力传感器

完全可以满足现代高尖端领域(如航空航天、军事领域、医学领域等)对压力测量的高灵敏度、高分辨率、大量程稳定性测量等要求。此外,相对于光纤材料的压力传感探头,膜片式压力传感探头更加稳定且易于实现工业化生产。

参 考 文 献

- [1] Sun Y C, Liu Y L. Design, manufacture and application of pressure sensor [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000: 26-30.
孙以材, 刘玉岭. 压力传感器的设计、制造与应用 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000: 26-30.
- [2] Bhatia V, Murphy K A, Claus R O, et al. Recent developments in optical-fiber-based extrinsic Fabry-Perot interferometric strain sensing technology [J]. Smart Materials and Structures, 1995, 4(4): 246-251.
- [3] Bhatia V, Murphy K A, Claus R O, et al. Optical fibre based absolute extrinsic Fabry - Pérot interferometric sensing system [J]. Measurement Science and Technology, 1996, 7(1): 58-61.
- [4] Rao Y J, Jackson D A. Recent progress in fibre optic low-coherence interferometry [J]. Measurement Science and Technology, 1996, 7(7): 981-999.
- [5] Dunne L E, Brady S, Smyth B, et al. Initial development and testing of a novel foam-based pressure sensor for wearable sensing [J]. Journal of Neuroengineering & Rehabilitation, 2005, 2(1): 4.
- [6] Qu G F. On-line comprehensive compensation of piezoresistive pressure sensor [J]. Journal of Transducer Technology, 2003, 22(8): 45-46.
曲国福. 压阻式压力传感器的在线综合补偿 [J]. 传感器技术, 2003, 22(8): 45-46.
- [7] Culshaw B. Optical fiber sensor technologies: opportunities and-perhaps-pitfalls [J]. Journal of Lightwave Technology, 2004, 22(1): 39-50.
- [8] Born M, Wolf E, Hecht E. Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light [J]. Physics Today, 2000, 53(10): 77-78.
- [9] Wang J J, Liu J, Fu Z Y, et al. Miniature underwater shock wave pressure sensor based on all-silica optical fiber fiZeau cavity [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(2): 0212010.
王俊杰, 刘劲, 傅正义, 等. 超微型全石英光纤 Fizeau 腔水下激波压力传感器 [J]. 光学学报, 2019, 39(2): 0212010.
- [10] Duc T C, Creemer J F, Sarro P M. Piezoresistive cantilever beam for force sensing in two dimensions [J]. IEEE Sensors Journal, 2007, 7(1): 96-104.

- [11] Calleja M, Rasmussen P A, Johansson A, et al. Polymeric mechanical sensors with integrated readout in a microfluidic system [J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5116: 314-321.
- [12] Liu B, Lin J, Liu H, et al. Diaphragm based long cavity Fabry-Perot fiber acoustic sensor using phase generated carrier [J]. *Optics Communications*, 2017, 382: 514-518.
- [13] Rodriguez-Cobo L, Cobo A, Lopez-Higuera J M. Embedded compaction pressure sensor based on Fiber Bragg Gratings [J]. *Measurement*, 2015, 68: 257-261.
- [14] Tsigaridas G, Polyzos D, Ioannou A, et al. Theoretical and experimental study of refractive index sensors based on etched fiber Bragg gratings [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2014, 209: 9-15.
- [15] Zhang T J, Jiang Y, Ma W Y. A high fineness optical fiber F-P pressure sensor based on MEMS [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(17): 170625.
张韬杰, 江毅, 马维一. 一种高精细度 MEMS 光纤 F-P 压力传感器 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(17): 170625.
- [16] Ferreira M F S, Statkiewicz-Barabach G, Kowal D, et al. Fabry-Perot cavity based on polymer FBG as refractive index sensor [J]. *Optics Communications*, 2017, 394: 37-40.
- [17] Liang M F, Fang X Q, Ning Y S. Temperature compensation fiber Bragg grating pressure sensor based on plane diaphragm [J]. *Photonic Sensors*, 2018, 8(2): 157-167.
- [18] Zhu C, Chen Y Z, Zhuang Y Y, et al. Optical interferometric pressure sensor based on a buckled beam with low-temperature cross-sensitivity [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2018, 67(4): 950-955.
- [19] Zheng J. Analysis of optical frequency-modulated continuous-wave interference [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(21): 4189-4198.
- [20] Zheng J. Continued-analysis of optical frequency-modulated continuous-wave interference [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(5): 765-769.
- [21] Zheng J. Coherence analysis of optical frequency-modulated continuous-wave interference [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(16): 3681-3687.
- [22] Neilson D T. Tolerance of optical interconnections to misalignment [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(11): 2282-2290.
- [23] Giovanni D. Flat and corrugated diaphragm design handbook [M]. New York: Taylor & Francis Group, 2017: 238-242.