

激光与光电子学进展

调频连续波干涉光纤压力传感器的温度漂移补偿

聂梦笛¹, 郑刚^{1*}, 张雄星¹, 盛启明², 郭媛¹, 白浪¹, 韩园²¹西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021;²西安工业大学电子信息工程学院, 陕西 西安 710021

摘要 针对调频连续波(FMCW)干涉光纤压力传感器存在的温度-压力交叉敏感问题,提出了一种实时温度漂移补偿方法。将参考传感器和压力传感器粘接放置在同一温度场中,根据两个传感器的腔长变化量与温度间的关系,分析温度漂移补偿原理,并利用温度漂移补偿方法实时校正压力传感器的温度漂移。实验结果表明,该方法在升温过程中的压力测量误差从9.21%减小到0.32%,降温过程中的压力测量误差从3.33%减小到-0.24%,降温60 min内压力传感器的压力漂移小于0.1 kPa,有效提高了FMCW干涉光纤压力传感器的测量精度。

关键词 传感器; 参考传感器; 压力传感器; 实时补偿; 温度; 压力

中图分类号 TN247

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0728002

Compensation for Temperature Drift in Frequency-Modulated Continuous-Wave Interference Fiber Optic Pressure Sensor

Nie Mengdi¹, Zheng Gang^{1*}, Zhang Xiongxing¹, Sheng Qiming², Guo Yuan¹, Bai Lang¹, Han Yuan²

¹School of Opto-Electronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China;

²School of Electronic Information Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China

Abstract The temperature-pressure cross-sensitivity problem in a frequency-modulated continuous-wave (FMCW) interference fiber pressure sensor is addressed in this study using a real-time temperature drift compensation method. The reference and pressure sensors are bonded and placed in the same temperature field. The temperature drift correction principle is evaluated using the relationship between the cavity length changes of the two sensors and the temperature. Further, the temperature drift of the pressure sensor is corrected in real-time using the temperature drift compensation method. The experimental results show that the pressure measurement error of the method decreases from 9.21% to 0.32% in the heating process, the pressure measurement error decreases from 3.33% to -0.24% in the cooling process, and the pressure drift of the pressure sensor is less than 0.1 kPa within 60 min of cooling. The temperature compensation method significantly improves the measurement accuracy of the FMCW interference fiber pressure sensor.

Key words sensors; reference sensors; pressure sensor; real-time compensation; temperature; pressure

1 引言

压力传感器在石油、化工和航空航天等领域有

着举足轻重的地位^[1-4]。相比现有的应变片式、电感电容式和谐振腔式压力传感器,调频连续波(FMCW)干涉光纤压力传感器将FMCW干涉技

收稿日期: 2021-05-21; 修回日期: 2021-06-26; 录用日期: 2021-06-29

通信作者: *zhengg@xatu.edu.cn

术^[5-8]和压力传感器相结合,大幅度提高了压力测量精度。温度等其他环境因素会导致 FMCW 干涉光纤压力传感器的压力测量误差,为了提高 FMCW 干涉光纤压力传感器的测量精度,必须消除温度对压力测量的影响。

针对温度对压力传感器测量精度的影响,Dinh 等^[9]对压力传感器的制作材料进行改进,以减小温度灵敏度,使温度对压力传感器的影响从 16% 降低到 1%,温度在 20~50 °C 范围内的最大压力测量误差为 1.5 MPa;Hu 等^[10]通过冷凝器维持压力传感器工作的温度环境;Ali 等^[11]针对压阻式压力传感器提出了一种基于多项式的自适应数字温度补偿方法,通过结合压力传感器温度函数的相反特性对测量误差进行精确补偿;Huang 等^[12]研究了膜片式光纤布拉格光栅(FBG)压力传感器,用光栅分别测量正负应变的波长偏移差并将其作为传感信号,经过温度补偿后压力传感器的灵敏度高达 1.57 $\mu\text{m}/\text{kPa}$;赵子文等^[13]针对非本征法布里-珀罗(F-P)干涉型光纤传感器,在反射光纤上沉积金属膜进行温度补偿;郭志君等^[14]针对用 40CrNiMo 合金钢作为弹性材料的应变片式压力传感器,用 LM35 型温度传感器进行温度采集,并结合遗传算法与反向传播(BP)神经网络算法对传感器进行温度补偿(25~69 °C),使传感器的温度灵敏度系数由 $2.17 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 提升至 $1.03 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,有效提高了传感器的温度稳定性。上述

补偿方法均降低了温度对压力传感器的影响,但压力传感器结构的差异导致其补偿方法并不适用于 FMCW 干涉光纤压力传感器。

为了解决温度对 FMCW 干涉光纤压力传感器测量结果的影响,本文提出了一种实时温度漂移补偿方法。首先,根据 FMCW 干涉光纤压力传感器的测压原理分析影响其腔长变化的主要因素;然后,利用参考传感器仅对温度响应的特性,建立了参考传感器和压力传感器腔长随温度的变化关系;最后,用参考传感器采集温度信息,通过温度补偿方法对压力传感器的腔长变化量进行实时补偿。搭建了 FMCW 干涉光纤压力传感器温度补偿系统,以验证温度补偿方法的有效性。实验结果表明,该方法可对压力传感器进行实时温度补偿,提高压力传感器的测量精度。

2 测压与温度补偿原理

2.1 测压原理

本系统采用的压力传感器结构如图 1 所示,其中,压力传感探头主要包括压力腔和充气腔。压力腔为由半反半透镜和弹性膜片组成的 F-P(Fabry-Perot)腔干涉结构,充气腔与气泵相连,通过气泵充压对充气腔内的弹性膜片产生挤压形变,进一步改变 F-P 腔的腔长,通过建立充气压力和 F-P 腔的腔长变化量关系进行压力测量。

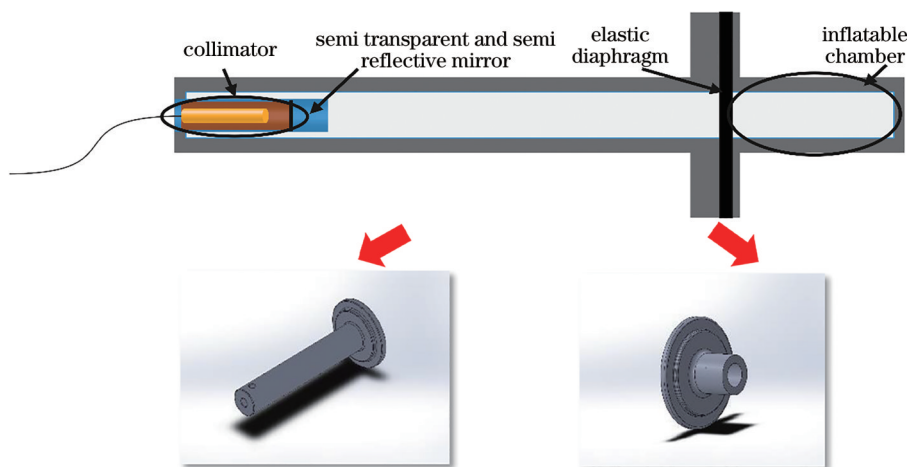


图 1 压力传感探头的结构

Fig. 1 Structure of the pressure sensing probe

压力传感器的光学结构如图 2 所示,其中,DFB 激光器为分布式反馈激光器。激光器产生频率连续调制的激光从环形器的端口 1 进入,从环形器的端口 2 出射至准直器;准直器将激光准直出射至 F-P 腔,一部分光反射后作为参考信号,其余光透射

后到达弹性膜片,将弹性膜片反射的信号作为测量信号。参考信号与测量信号在参考目标前端面发生叠加干涉,形成拍频信号,拍频信号再次耦合进入光纤准直器后由光电探测器(PD)接收^[15]。F-P 腔的形变导致干涉产生的拍频信号发生变化,通过

对拍频信号进行解调,可实现测量压力的目的。

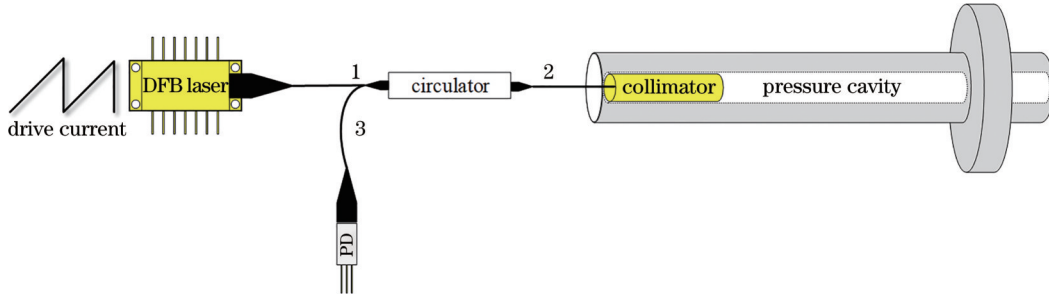


图 2 压力传感器的光学结构

Fig. 2 Optical structure of the pressure sensor

当压力腔内的两束光发生干涉时,产生的拍频信号可表示为

$$I(X_{\text{OPD}}, t) = I_0 \left[1 + V \cos \left(\frac{2\pi \Delta v v_m X_{\text{OPD}}}{c} t + \frac{2\pi}{\lambda_0} X_{\text{OPD}} \right) \right] = I_0 [1 + V \cos(2\pi v_b t + \phi_{b0})], \quad (1)$$

$$\phi_{b0} = \frac{2\pi}{\lambda_0} X_{\text{OPD}}, \quad (2)$$

式中, I_0 为拍频信号的平均光强, V 为拍频信号的对比如, t 为时间, v_b 为拍频信号的频率, ϕ_{b0} 为拍频信号的初相位, λ_0 为激光的中心波长, Δv 为光学频率的调制范围, v_m 为调制信号的频率, c 为光速。 X_{OPD} 为压力腔内两个相干光束之间的光程差, 可表示为

$$X_{\text{OPD}} = 2nd, \quad (3)$$

$$\Delta X_{\text{OPD}} = 2n\Delta d, \quad (4)$$

式中, n 为压力腔内的折射率, d 为压力腔腔长, Δd 为压力腔的腔长变化量。该压力传感器采用膜片式结构, 弹性膜片中心位置的形变^[16]即压力传感器的腔长变化量, 可表示为

$$\Delta d = \frac{3(1-\nu^2)\gamma^4}{16Eh^3} \Delta P, \quad (5)$$

式中, E 为膜片的杨氏模量, h 为膜片厚度, ν 为膜片的泊松比, γ 为膜片的有效半径, ΔP 为压力的变化量。压力灵敏度可表示为

$$\frac{\Delta d}{\Delta P} = \frac{3(1-\nu^2)\gamma^4}{16Eh^3}. \quad (6)$$

通过压力腔内干涉信号的初相位变化解算得到的压力变化量可表示为

$$\Delta P = \frac{4Eh^3\lambda_0\phi_{b0}}{3\pi(1-\nu^2)\gamma^4}. \quad (7)$$

2.2 温度补偿原理

采用的温度补偿技术通过参考传感器获取实时温度参数, 并建立参考传感器和压力传感器温度的特性关系, 减小压力传感器因温度变化造成的腔

长变化。参考传感器结构没有充气腔, 因此, 只对温度产生响应, 其腔长变化量可表示为

$$\Delta L_1 = K_{1,T} \Delta T, \quad (8)$$

式中, $K_{1,T}$ 为参考传感器的温度灵敏度, ΔT 为温度变化量。压力传感器的腔长变化量由温度和压力共同作用引起, 可表示为

$$\Delta L_2 = K_{2,T} \Delta T + K_{2,P} \Delta P, \quad (9)$$

式中, $K_{2,P}$ 为压力传感器的压力灵敏度, $K_{2,T}$ 为压力传感器的温度灵敏度。将温度传感器和压力传感器放置于同一温度场中, 两个传感器温度灵敏度的数学关系式可表示为

$$\Delta L_T = \frac{K_{2,T}}{K_{1,T}} \Delta L_1, \quad (10)$$

式中, ΔL_T 为压力传感器因温度变化引起的腔长变化量。压力传感器进行压力实验时, 借助参考传感器可求解出压力传感器随温度变化引起的腔长变化量, 从而进行温度补偿, 补偿后压力传感器的腔长变化量可表示为

$$\Delta L_P = \Delta L_2 - \frac{K_{2,T}}{K_{1,T}} \Delta L_1, \quad (11)$$

$$\Delta P = \frac{16Eh^3}{3(1-\nu^2)\gamma^4} \left(\Delta L_2 - \frac{K_{2,T}}{K_{1,T}} \Delta L_1 \right). \quad (12)$$

综上所述, 根据测压原理就能求解出消除温度影响的压力测量值, 实现压力传感器的实时温度补偿。

3 温度补偿结构与方法

FMCW 干涉光纤压力传感器的温度补偿结构如图 3 所示。用结构简单、温度灵敏高的传感器作

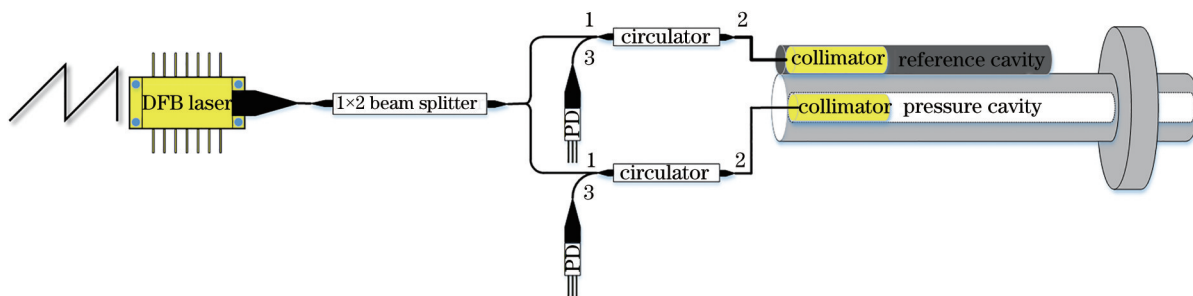


图 3 温度补偿的光路结构

Fig. 3 Optical structure of the temperature compensation

为参考传感器,将参考传感器粘接在压力传感器上方,用参考传感器获取温度信息,用压力传感器获取温度和压力信息。首先,通过信号调制技术对DFB激光器的光频进行调制,使其产生连续调制的激光;然后,通过光纤分束器将激光分成2路,2路激光分别从各自光路的环形器端口1入射,从端口2出射至参考传感器和压力传感器,在端口3利用光电探测器对参考传感器和压力传感器进行探测,获取携带参考传感器和压力传感器腔长变化信息的干涉拍频信号,基于STM32芯片进行拍频信号的处理与解调,实现腔长变化量的测量。

温度补偿方法的流程如图4所示。首先,将干

涉拍频信号通过极值点检测进行归一化处理,得到一个近似于余弦的干涉信号;然后,通过反余弦表得到拍频信号的相位;最后,对检测到的相位变化进行累积。结合(2)式和(4)式得到相位变化量与位移之间的关系,进而实现位移测量。用仅对温度产生响应且灵敏度较高的参考传感器检测温度变化,实现温度信息的采集。将采集的温度信息反馈到压力传感器中,利用参考传感器和压力传感器对温度响应的差异修正压力传感器的腔长变化量,减小温度对压力传感器腔长变化量的影响,实现温度补偿。

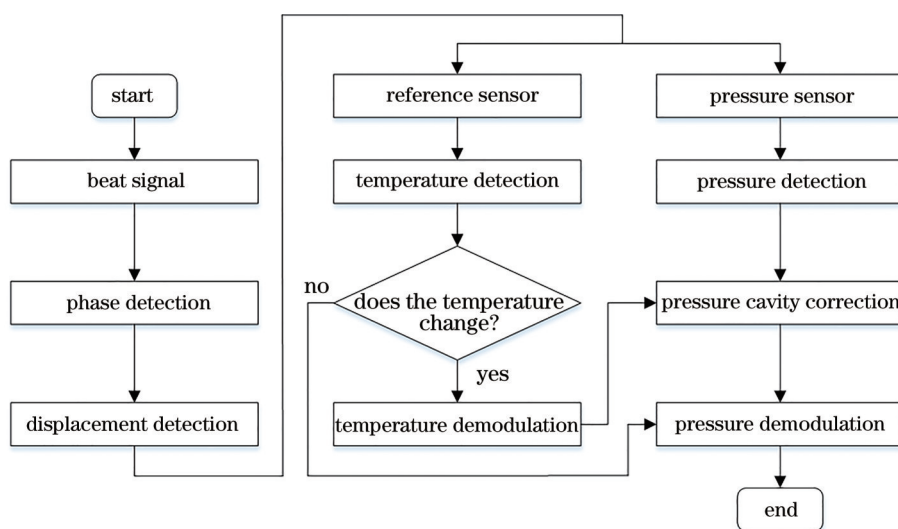


图 4 温度补偿方法的流程图

Fig. 4 Flow chart of the temperature compensation method

4 实验结果与分析

为了验证FMCW干涉光纤压力传感器实时温度补偿的可行性,搭建了基于FMCW干涉光纤压力传感器的温度补偿测试系统,如图5所示。该系统由DFB激光器(中心波长为1550 nm)、1×2光纤分

束器、光纤环形器、光纤准直器、光电探测器、信号处理系统、恒温恒湿试验箱、充气气泵和压力传感器温度补偿结构组成。实验测试时,将压力传感器的温度补偿结构置于恒温试验箱中,用索雷博公司生产的压力泵对压力传感器充气腔进行充压。恒温恒湿试验箱的温度精度为0.01℃,索雷博公司压力泵的

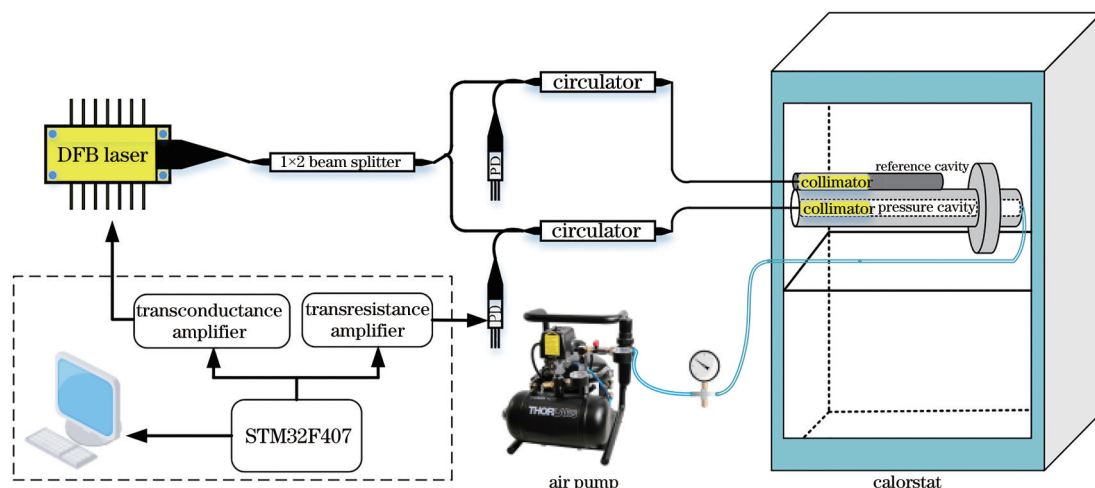


图 5 实验方案的原理

Fig. 5 Principle of the experimental scheme

压力范围为 0~800 kPa, 数字压力表的精度为 1 kPa, 由于压力传感探头使用 AB 胶和紫外胶粘接而成, 温度过高会导致胶体软化, 影响测量结果, 因此, 实验设置的温度范围为 25~45 °C, 根据膜片形变理论设置压力传感器的充压范围为 0~500 kPa。

4.1 压力测试

将压力传感器放置在恒温恒湿试验箱中, 在温度稳定(室温 25 °C)的环境中开始压力实验。压力传感器的充气腔和气泵相连, 通过气泵使压力从 0 kPa 匀速上升至 500 kPa, 压力每升高 10 kPa, 记录一次压力传感器 F-P 腔的腔长变化量, 得到腔长变化量随压力的变化曲线如图 6 所示, 具体数据如表 1 所示。重复进行三次实验, 得到腔长变化量随压力的变化曲线如图 7 所示, 具体数据如表 2 所示。

从图 6 可以发现, 压力从 0 kPa 升至 500 kPa 的

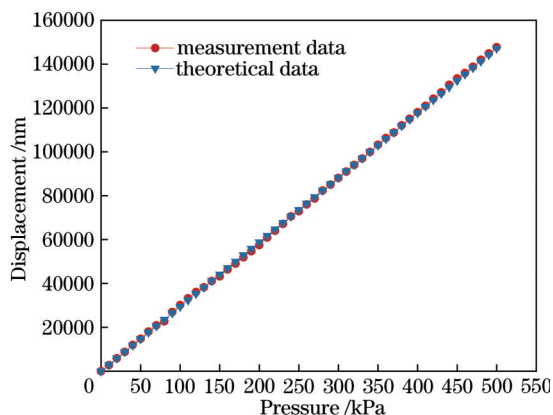


图 6 单次测量时压力传感器的压力-腔长变化曲线

Fig. 6 Pressure-cavity length variation curve of the pressure sensor during single measurement

表 1 单次测量时的测量数据与理论数据

Table 1 Measurement data and theoretical data during single measurement

Pressure /kPa	Measurement data /nm	Theoretical data /nm
0	0	0
100	30119	29428
200	57485	58856
300	88100	88283
400	118090	117711
500	147730	147139

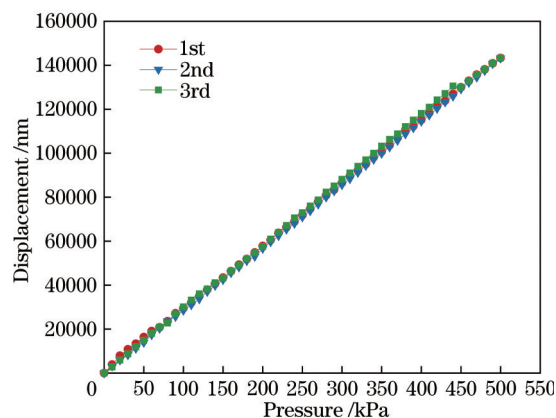


图 7 重复测量时压力传感器的压力-腔长变化曲线

Fig. 7 Pressure-cavity length variation curve of pressure sensor during repeated measurement

过程中, 压力传感器测量的压力和腔长变化量关系与压力传感器测压模型基本一致。其中, $E = 200 \text{ MPa}$ 、 $h = 0.8 \text{ mm}$ 、 $\nu = 0.3$ 、 $\gamma = 20.5 \text{ mm}$, 根据(6)式计算得到理论压力灵敏度为 294.278 nm/kPa, 对实验数据进行线性拟合, 得到压力传感器的实际

表 2 重复测量时压力传感器的测试数据

Table 2 Measurement data of pressure sensor during repeated measurement

Pressure /kPa	Cavity length /nm		
	1st time	2nd time	3rd time
0	0	0	0
100	29469	28460	30119
200	57833	56619	57485
300	86548	85626	88100
400	115169	114475	118090
500	143299	143195	143330

压力灵敏度为 295.767 nm/kPa。从图 7 可以发现,压力从 0 kPa 升至 500 kPa 的过程中,三次测压的数据曲线重合度较高,三次测量结果的线性回归系数 R^2 分别为 0.99985、0.99993、0.99946,这表明压力与腔长变化量呈良好的线性关系。

4.2 温度测试

将参考传感器置于恒温恒湿试验箱中,使温度从室温 25.4 °C 匀速上升至 49.4 °C,温度每升高 3 °C 记录一次参考传感器的腔长变化量,结果如图 8 所示。压力传感器温度实验是在压力传感器不施加压力的条件下,将压力传感探头置于温箱内,使温度从 26.17 °C 室温匀速升至 45 °C,温度每升高 3 °C 记录一次压力传感器的腔长变化量,结果如图 9 所示。参考传感器和压力传感器的温度测试数据结果如表 3 所示。根据参考传感器的温度特性,对实验数据进行线性拟合,得到参考传感器的温度灵敏度为 2125 nm/°C。可以发现,压力传感器的腔长变化量随温度的升高逐渐增加,当压力传感器不施加压力时,压力传感器的温度灵敏度为 1757 nm/°C。

4.3 温度补偿测试

将压力传感器温度补偿结构置于密闭式恒温恒湿试验箱中,同时改变温度和压力对补偿方法进行验证。设定温箱温度匀速变化,将压力传感器和温度补偿结构在 0~500 kPa 范围内分别进行升温 and 降温实验,压力每变化 20 kPa 记录一次数据,升温

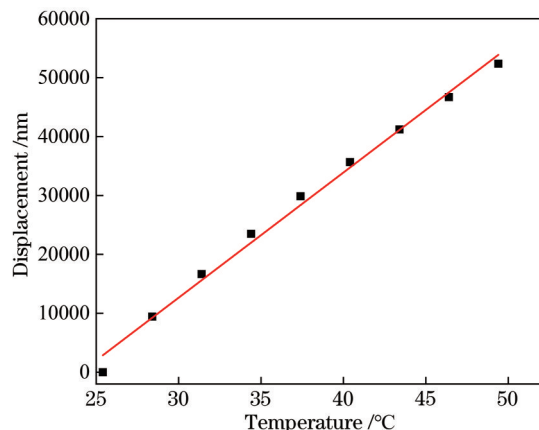


图 8 参考传感器的温度-腔长变化曲线

Fig. 8 Temperature-cavity length variation curve of the reference sensor

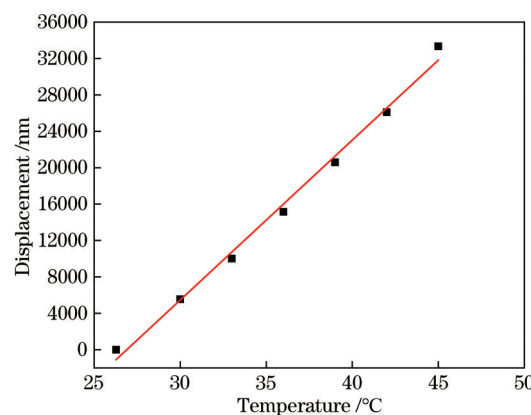


图 9 压力传感器的温度-腔长变化曲线

Fig. 9 Temperature-cavity length variation curve of the pressure sensor

和降温过程中压力传感器温度补偿前后的腔长变化量如图 10(a)和图 10(c)所示,具体数据如表 4 和表 5 所示。图 10(b)和图 10(d)分别为升温 and 降温过程中的温度漂移补偿精度。可以发现,升温 and 降温过程中压力传感器温度补偿结构的实时压力测量值与理论值基本一致,验证了该补偿方法的可行性与准确性。

表 3 参考传感器和压力传感器的温度测试数据

Table 3 Temperature measurement data of reference sensor and pressure sensor

Temperature /°C	Reference sensor displacement /nm	Temperature /°C	Pressure sensor displacement /nm
25.4	0	26.27	0
28.4	9445	30	5551
31.4	16651	33	10013
34.4	23493	36	15155
37.4	29863	39	20594
40.4	35662	42	26106
43.4	41211	45	33346
46.4	46704	/	/
49.4	52366	/	/

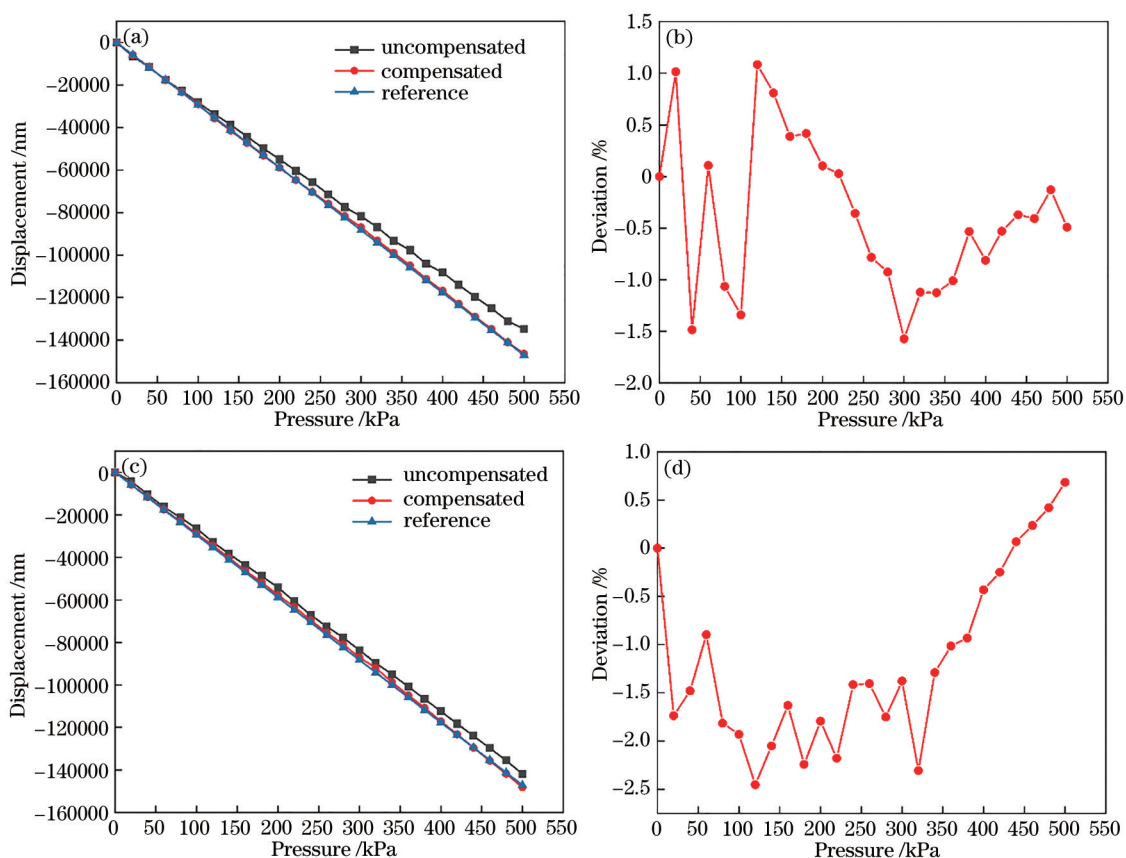


图 10 温度补偿前后的测量结果。(a)升温过程中的腔长变化;(b)升温过程中的温度补偿精度;(c)降温过程中的腔长变化;(d)降温过程中的温度补偿精度

Fig. 10 Measurement results before and after temperature compensation. (a) Cavity length variation in heating process; (b) temperature compensation accuracy in heating process; (c) cavity length variation in cooling process; (d) temperature compensation accuracy in cooling process

表 4 升温过程中的温度补偿数据对比

Table 4 Comparison of temperature compensation data in heating process

Pressure /kPa	Uncompensated displacement /nm	Compensated displacement /nm	Reference displacement /nm
0	0	0	0
100	-28197	-29033	-29428
200	-55010	-58916	-58856
300	-81722	-86895	-88283
400	-108201	-116754	-117711
500	-134788	-146417	-147139

表 5 降温过程中的温度补偿数据对比

Table 5 Comparison of temperature compensation data in cooling process

Pressure /kPa	Uncompensated displacement /nm	Compensated displacement /nm	Reference displacement /nm
0	0	0	0
100	-26351	-28859	-29428
200	-54206	-57800	-58856
300	-83728	-87067	-88283
400	-112478	-117203	-117711
500	-141903	-148146	-147139

测量误差可表示为

$$\sigma = \frac{m - f}{f}, \quad (13)$$

式中, σ 为相对误差, m 为补偿后的压力测量值, f 为参考压力测量值。升温过程中, 拟合得到压力传感器补偿前的压力灵敏度为 269.454 nm/kPa, 补偿后

的压力灵敏度为 293.311 nm/kPa, 参考压力灵敏度为 294.278 nm/kPa; 实际测量过程中, 当压力传感器的腔长变化量为 1 nm 时, 补偿前的压力测量值约为 3.711×10^{-3} kPa, 补偿后的压力测量值约为 3.409×10^{-3} kPa, 参考压力测量值约为 3.398×10^{-3} kPa。由(13)式可知, 补偿前的压力测量误差为 9.21%, 补偿后的压力测量误差约为 0.32%。降温过程中, 拟合得到压力传感器补偿前的压力灵敏度为 284.839 nm/kPa, 补偿后的压力灵敏度为 294.993 nm/kPa, 参考压力灵敏度为 294.278 nm/kPa; 实际测量过程中, 当压力传感器的腔长变化量为 1 nm 时, 补偿前的压力测量值约为 3.511×10^{-3} kPa, 补偿后的压力测量值约为 3.390×10^{-3} kPa, 参考压力测量值约为 3.398×10^{-3} kPa。由(13)式可知, 补偿前的压力测量误差为 3.33%, 补偿后的压力测量误差约为 -0.24%。从图 10(b)和图 10(d)中可以发现, 在升温 and 降温过程中, 补偿后的压力传感器腔长变化量与参考值存在一定差异, 升温过程中的温度补偿精度为 98.42%, 降温过程中的温度补偿精度为 97.54%, 这表明该温度补偿方法能有效减小温度对压力测量的影响, 提高压力传感器在实际测量中的精度。

为了进一步验证该温度补偿方法的稳定性与准确性, 将压力传感器温度补偿结构先进行升温处理, 后使其静置冷却, 此时压力传感器未施加压力, 实时采集补偿前压力传感器和补偿后压力传感器的腔长变化量, 测量时间共计 60 min, 测量结果如图 11 所示, 插图为一小段补偿后压力传感器的腔长变化量。可以发现, 在不施加压力的情况下, 补偿后的压力传感器在长时间内的补偿效果比较稳定。

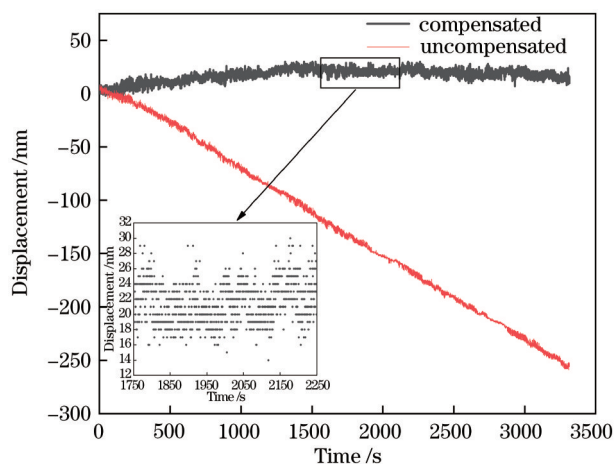


图 11 温度补偿结构的稳定性测试

Fig. 11 Stability test of temperature compensation structure

计算结果表明, 该压力传感器的腔长变化量小于 30 nm, 补偿后的压力漂移量小于 0.1 kPa, 有效降低了温度对压力传感器测量精度的影响。

5 结 论

针对 FMCW 干涉光纤压力传感器, 提出了一种实时温度漂移补偿方法。采用温度灵敏度较高的参考传感器进行实时温度测量, 并分析了参考传感器和压力传感器腔长变化量随温度变化的关系; 利用参考传感器采集的温度信息, 通过温度补偿方法实时校正压力传感器腔长随温度的漂移。测压实验结果表明, 在升温过程中, 补偿后的压力测量误差从 9.21% 减小到 0.32%; 降温过程中, 补偿后的压力测量误差从 3.33% 减小到 -0.24%, 不加压降温 60 min 内压力传感器的压力漂移小于 0.1 kPa。该方法简单有效, 能实现压力传感器的实时温度补偿, 提高了压力传感器的测量精度, 在 FMCW 干涉压力传感器中具有较高的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Zhang W H, Jiang J F, Wang S, et al. Fiber-optic Fabry-Perot high-pressure sensor for marine applications [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 0206001.
张伟航, 江俊峰, 王双, 等. 面向海洋应用的光纤法布里-珀罗高压传感器[J]. 光学学报, 2017, 37(2): 0206001.
- [2] Yu Q X, Wang X N, Song S D, et al. Fiber optic pressure sensor system based on extrinsic Fabry-Perot interferometer for high temperature oil well measurement[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2007, 18(3): 299-302.
于清旭, 王晓娜, 宋世德, 等. 光纤 F-P 腔压力传感器在高温油井下的应用研究[J]. 光电子·激光, 2007, 18(3): 299-302.
- [3] Liu Q H, Zhong H X, Tao F, et al. Kalman filter fusion algorithm and its application in highly precise measurement of liquid level in ship tank[J]. Shipbuilding of China, 2016, 57(2): 192-200.
刘庆华, 仲海嘯, 陶峰, 等. 卡尔曼滤波融合新算法及其船舶高精度液位测量的应用[J]. 中国造船, 2016, 57(2): 192-200.
- [4] Liao B, Lin H Y, Wang Y. Latest progress of field-emission pressure sensors[J]. Vacuum Science and Technology, 2000, 20(6): 413-418.
廖波, 林鸿溢, 王越. 场发射压力传感器的研究进展

- [J]. 真空科学与技术, 2000, 20(6): 413-418.
- [5] Zheng J. Continued analysis of optical frequency-modulated continuous-wave interference[J]. Applied Optics, 2005, 44(5): 765-769.
- [6] Zheng J. Coherence analysis of optical frequency-modulated continuous-wave interference[J]. Applied Optics, 2006, 45(16): 3681-3687.
- [7] Zheng J. Single-mode birefringent fiber frequency-modulated continuous-wave interferometric strain sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2010, 10(2): 281-285.
- [8] Zheng J. Reflectometric singlemode elliptical-core fibre strain sensor with remote interrogation[J]. Electronics Letters, 2007, 43(24): 1345-1346.
- [9] Dinh N, Kanoun O. Temperature-compensated force/pressure sensor based on multi-walled carbon nanotube epoxy composites[J]. Sensors, 2015, 15(5): 11133-11150.
- [10] Hu P, Tong X L, Zhao M L, et al. Study on high temperature Fabry-Perot fiber acoustic sensor with temperature self-compensation[J]. Optical Engineering, 2015, 54(9): 097104.
- [11] Ali I, Asif M, Shehzad K, et al. A highly accurate, polynomial-based digital temperature compensation for piezoresistive pressure sensor in 180 nm CMOS technology[J]. Sensors, 2020, 20(18): 5256.
- [12] Huang J, Zhou Z D, Wen X Y, et al. A diaphragm-type fiber Bragg grating pressure sensor with temperature compensation[J]. Measurement, 2013, 46(3): 1041-1046.
- [13] Zhao Z W, Wang W Y, Zhang M, et al. A new temperature compensation method by optimizing the structure of extrinsic Fabry-Perot interferometric optical fiber sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(9): 090605.
赵子文, 王为宇, 张敏, 等. 通过改进非本征法布里-珀罗干涉型光纤传感器结构实现温度补偿的新方法[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(9): 090605.
- [14] Guo Z J, Lu W K, Zuo F, et al. Temperature compensation of strain gauge pressure sensor based on NSGA-II & BP[J]. China Measurement & Test, 2020, 46(6): 72-77.
郭志君, 卢文科, 左锋, 等. 基于 NSGA-II & BP 的应变片式压力传感器温度补偿研究[J]. 中国测试, 2020, 46(6): 72-77.
- [15] Jing L Q, Zheng G, Sun B, et al. Measurement of distance to moving target using frequency-modulated continuous-wave interference technique[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12): 1204001.
井李强, 郑刚, 孙彬, 等. 基于调频连续波干涉技术的运动目标距离测量[J]. 中国激光, 2019, 46(12): 1204001.
- [16] Peng X L, Zhang H, Li Y L. Thermal stress and the associated photoelastic effect of the metal coated fiber loop[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1106004.
彭星玲, 张华, 李玉龙. 金属镀层光纤环的热应力及其引起的弹光效应[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1106004.