

高精度调频连续波光纤压力传感器温度特性分析及补偿方法

白浪, 郑刚*, 郭媛, 聂梦笛, 张雄星, 孙彬

西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021

摘要 针对高精度调频连续波光纤压力传感器对温度和压力交叉敏感的问题, 从理论和实验分析该压力传感器的温度特性, 并通过优化设计压力传感器的结构, 以及采用最小二乘法对温度进行实时补偿。经过理论计算可知, 当温度从 25 °C 到 65 °C 变化时, 温度对 Fabry-Perot (F-P) 腔腔长的形变量为 1000 μm 。通过优化设计 F-P 腔, 可以使温度对 F-P 腔的影响降至 50 μm 。通过实验测试结构优化后的 F-P 腔腔长的形变量与温度的关系, 并采用最小二乘法对温度进行实时补偿。温度补偿后, F-P 腔腔长的形变量从 50 μm 降至 4.5 μm , 有效降低对温度敏感, 提高调频连续波光纤压力传感测量的可靠性和实用性。

关键词 传感器; 调频连续波激光干涉; F-P 腔干涉仪; 膜片压力测量; 温度补偿; 结构优化设计; 最小二乘法
中图分类号 TN247 文献标志码 A doi: 10.3788/LOP202158.0928002

Analysis and Compensation Method of Temperature Characteristics of High-Precision Frequency-Modulated Continuous Wave Fiber Optic Pressure Sensor

Bai Lang, Zheng Gang*, Guo Yuan, Nie Mengdi, Zhang Xiongxing, Sun Bin

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

Abstract In view of cross sensitivity of the high-precision frequency-modulated continuous-wave fiber optic pressure sensor to temperature and pressure, the temperature characteristics of the pressure sensor are analyzed theoretically and experimentally. The structure of the pressure sensor is optimized, the effect of temperature on Fabry-Perot (F-P) cavity can be reduced to 50 μm . After theoretical calculations, it can be known when the temperature changes from 25 °C to 65 °C, the deformation of the F-P cavity by the temperature is 1000 μm . By optimizing the F-P cavity design, the influence of temperature on the length of the F-P cavity can be effectively reduced. The relationship between the deformation of the cavity length of the optimized F-P cavity and the temperature is tested through experiments. The least-squares method is used for temperature compensation in real-time. After the temperature compensation, the deformation of the F-P cavity length is directly reduced from 50 to 4.5 μm , which reduces temperature cross-sensitivity, improves the reliability and practicability of high-precision frequency-modulated continuous-wave fiber optic pressure sensing measurement.

Key words sensors; frequency-modulated continuous wave laser interference; Fabry-Perot cavity interferometer; diaphragm pressure measurement; temperature compensation; structural optimization design; least square method

OCIS codes 280.5475; 120.2230

收稿日期: 2020-09-18; 修回日期: 2020-09-23; 录用日期: 2020-09-29

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

1 引言

调频连续波光纤压力传感器是一种高精度的压力测量装置。首先,其具备无接触测量、防爆防腐和抗电磁干扰等优点;其次,其测量精度高,稳定性好,特别适合在石油化工和桥梁大坝等领域中应用。调频连续波压力传感器采用膜片式 F-P (Fabry-Perot) 腔结构制作完成,所以存在对温度和压力交叉敏感的缺点,该压力传感器采用了过零点算法实现高精度的压力测量,而测量环境温度的微小变化会对压力测量结果带来很大的影响。为了提高调频连续波压力传感器的实用性,必须对其进行温度特性分析及补偿。

为了解决膜片光纤压力传感器对温度敏感的问题,研究人员对其温度特性及补偿进行了大量的研究探索。从温度特性分析方面来说,Eaton 等^[1]分析了压阻式传感器中圆形膜片内热应力对压力传感器性能的影响;吴振海等^[2]探索了热应力和残余气压对光纤 F-P 腔结构压力传感器温度性能的影响;黄伟荣等^[3]研究了温度对光纤 F-P 腔液位传感器腔深度的影响,并设计制作了一种凸台结构的传感器来消除温度对腔长变化的影响;刘加萍等^[4]分析了非本征光纤 F-P 腔干涉传感器的温度特性。从补偿方法方面来说,倪茜等^[5]采用了二元回归分析方法对光纤位移传感器进行温度补偿;南开大学郭振武等^[6]通过改进制作工艺可以有效控制温度对传感器的影响;王俊杰等^[7]采用了温度去敏方法对压力传感器进行实时修正和补偿;王彦等^[8]使用了镀钯金膜光纤实现温度的自补偿。上述温度特性分析和补偿方法不仅使光纤压力传感器的温度特性理论更完善,而且通过结构的改进设计或者软硬件方法都能够实现一定的温度补偿。但是这些温度分析和补偿方法只适用于相应测试的传感器,不同结构和不同解调方式的压力传感器所采用的温度补偿方式并不完全一样。对于高精度的调频连续波干涉压力传感器来说,因其测量原理以及制作材质和方法等其他传感器不同,所以上述温度特性分析与补偿方法并不适用。此外,上述提到的这些补偿方式一方面使测量装置结构复杂,另一方面增加的结构也会给测量结果带来新的误差^[9-10]。

本文对调频连续波光纤压力传感器进行温度特性理论分析,并对补偿方法进行细致的研究。理论分析腔体形变量、膜片形变量和环氧树脂胶形变

量与 F-P 腔腔长的变化关系。通过结构的优化设计和最小二乘法,可以有效降低温度对 F-P 腔腔长的影响,提高高精度调频连续波光纤压力传感器测量的可靠性,使调频连续波干涉压力传感器可以在实际生产生活中更好地发挥作用。

2 调频连续波压力传感器的温度特性理论分析

图 1 为调频连续波光纤压力传感器的压力传感头,其主要由光纤准直器、316L 不锈钢管、SUS631 不锈钢膜片和充气腔组成。其中光纤准直器是使用环氧树脂胶固定在 316L 不锈钢管的左端口, SUS631 不锈钢膜片采用激光焊接术固定在不锈钢管的右端口(为了清晰地展示 F-P 腔的弹性膜片,充气腔结构向右进行一定的平移)。

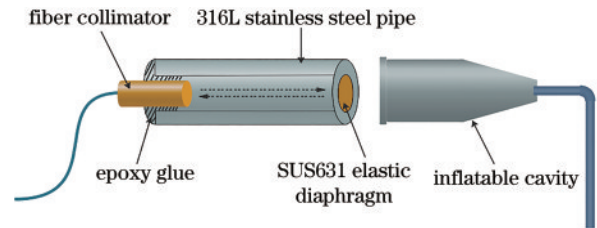


图 1 调频连续波光纤压力传感器的压力传感头

Fig. 1 Pressure sensing head of frequency modulated continuous wave fiber optic pressure sensor

当充气腔内的压力发生变化时,这会引发弹性膜片的中心发生形变。根据膜片压力原理,充气腔内的压力变化量 ΔP 与膜片中心的形变量 Δl 之间的关系为

$$\Delta l = \frac{3}{16} \frac{(1-\mu^2)r^4}{E_1 h^3} \Delta P, \quad (1)$$

式中: h 为膜片的厚度; r 为弹性膜片的有效感压半径; μ 为膜片材料的泊松比; E_1 为膜片的杨氏模量。由(1)式可知,只要测得膜片中心的形变量(F-P 腔腔长的变化量)就可以得到压力变化量。对于高精度的调频连续波压力传感器,通过调频连续波干涉拍频信号的初相位^[11-14]可以测量 Δl , 则拍频信号的初相位 Φ_{b0} 可表示为

$$\Phi_{b0} = 2\pi D_{OPD} / \lambda_0, \quad (2)$$

式中: D_{OPD} 为光程差, $D_{OPD} = 2\Delta l$; λ_0 为自由空间中的中心光波长。只要计算出拍频信号的初相位,就可以得到膜片的形变量。实验中,拍频信号的初相位测量法采用过零点相位测量方法,即先对拍频信号进行滤波和幅值矫正,然后通过冒泡法寻找拍频信

号的极值点。在相邻极大值与极小值之间选取过零段,对其进行线性拟合后得到零位所对应的初相位。为了进一步提高初相位的测量精度,可以对多个过零点进行计算并求平均值,这种鉴相算法最终获得的相位计算精度为半导体激光器波长的 $1/1000$ 。由于传感器对温度和压力交叉敏感,所以微小的温度变化会对测量结果造成很大的干扰,因此必须对调频连续波干涉压力传感器进行温度特性分析及补偿方法的设计。

实验使用的光纤压力传感器采用不锈钢材质加工完成。在压力测量过程中,不仅压力会影响 F-P 腔腔长的变化量,测试的环境温度也会影响 F-P 腔腔长的变化量。结合图 1 中的 F-P 腔,温度对 F-P 腔腔长变化量的影响主要有两个方面。一是由温度变化引起 F-P 腔腔体内的残余气压发生变化,从而导致弹性膜片的中心发生形变;二是由温度变化引起 SUS631 不锈钢膜片、316L 不锈钢管以及环氧树脂胶发生热胀冷缩,从而导致弹性膜片的中心发生形变,因此将从这两个方面对 F-P 腔的腔体进行温度影响分析。

2.1 温度对弹性膜片中心形变的影响

当使用激光束焊接膜片时,膜片与 316L 不锈钢管的连接处因相互约束而在膜片的表面上产生热应力,膜片上的热应力^[15]满足

$$\sigma = \frac{E_1 E_2 (\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T}{E_1 (1 + \mu_2) + E_2 (1 + \mu_1)}, \quad (3)$$

式中: E_2 为 316L 不锈钢管的杨氏模量; μ_1 和 μ_2 分别为膜片与 316L 不锈钢管的泊松比; α_1 和 α_2 分别为膜片与 316L 不锈钢管的热膨胀系数,膜片与腔体都采用不锈钢材质制作而成,因此可以认为 $\alpha_1 = \alpha_2$,即膜片与 316L 不锈钢管之间的热应力近似为 0 N; ΔT 为温度的变化量。

对于周边固定的圆弹性膜片,在充气腔压力 P 的作用下,膜片会产生形变,从而导致 F-P 腔的体积发生变化,即 F-P 腔腔体内残余气体的体积满足

$$\Delta V = \int_0^r \Delta l(r) \cdot 2\pi r \cdot dr, \quad (4)$$

式中: ΔV 为 F-P 密封腔的体积。膜片中心的形变量可以修正为

$$\Delta l_1 = \frac{\Delta l}{1 + \xi}, \quad (5)$$

式中: $\xi = \sigma r^2 / 14.68D$,其中 $D = E h^3 / [12(1 - \mu^2)]$ 。因为膜片的热应力近似为 0 N,则 Δl_1 可表示为

$$\Delta l_1(r) = \Delta l(r). \quad (6)$$

由于 F-P 腔是密闭空间,则 F-P 腔体积变化前后的腔内气压 p_0 、工作温度 T_0 和腔体积 V_0 以及变化后的腔内气压 p_1 、工作温度 T_1 和腔体积 V_1 满足玻意耳定律,可表示为

$$\frac{P_0 V_0}{T_0} = \frac{P_1 V_1}{T_1}. \quad (7)$$

联立(4)式和(6)式,可以得到在外界压力 P 和工作温度 T 下的腔内残余气压为

$$P_1 = \frac{\alpha P - V_0 + \sqrt{(\alpha P - V_0)^2 + 4\alpha P_0 V_0 T / T_0}}{2\alpha}, \quad (8)$$

式中: $\alpha = \pi r^6 / 192D$ 。在测得 F-P 腔内的初始残余气压后,便可由(7)式计算得到任意充气腔的压力和工作温度下腔内的残余气压 P_1 。忽略热应力后,在残余气压的影响下,腔长的改变量满足

$$\Delta l_1 = \frac{3(1 - \mu^2)r^4}{16 E_1 h^3} P_1. \quad (9)$$

2.2 温度对不锈钢管腔体长度的影响

如果将压力传感头置于温度场中,压力传感头的不锈钢管腔体就会因热胀冷缩效应而发生形变,其长度形变量满足

$$\Delta l_2 = l_a \alpha_2 \Delta T = l_a \frac{\Delta l_a}{l_a \Delta T} \Delta T, \quad (10)$$

式中: l_a 为 F-P 腔的初始长度。

2.3 温度对环氧树脂胶固定点的影响

对于在传感头的粘接点处使用的环氧树脂胶,环境温度对胶体的形变量满足

$$\Delta l_3 = l_b \alpha_3 \Delta T = l_b \frac{\Delta l_b}{l_b \Delta T} \Delta T, \quad (11)$$

式中: l_b 为环氧树脂胶的初始长度; α_3 为环氧树脂胶的热膨胀系数。当环氧树脂胶随温度变化时,其左右两侧都会发生形变,因此对 F-P 腔腔长的影响只是环氧树脂胶体形变量的一半。温度对整个 F-P 腔腔长的影响满足

$$\Delta l = \Delta l_1 + \Delta l_2 - \Delta l_3 / 2. \quad (12)$$

3 调频连续波压力传感器的温度特性理论计算

3.1 腔体残余气压对膜片中心形变的影响

实验所用的压力传感头膜片采用 SUS631 不锈钢材质加工制成,其杨氏模量 $E_2 = 200$ MPa,泊松比 $\mu = 0.3$,膜片厚度 $h = 0.8$ mm,有效半径 $r = 41$ mm。在残余气压的影响下,当温度从 25 °C 变化到 65 °C 时,膜片的形变量与温度的关系如图 2 所示。

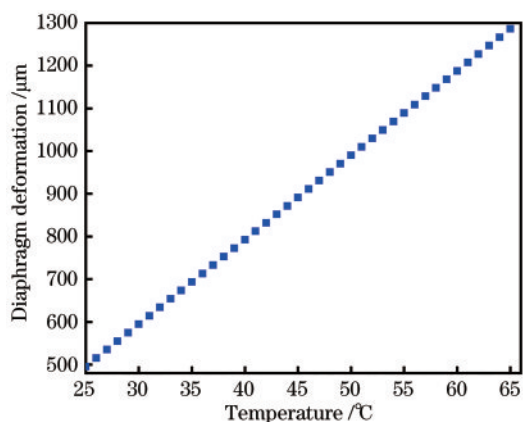


图 2 膜片中心的形变量与温度的关系

Fig. 2 Relationship between shape variable of diaphragm center and temperature

从图 2 可以看到,温度会影响密封腔体内的残余气压,由残余气压引起膜片中心的形变量约为 800 μm 。为了进一步分析压力和温度的交叉敏感特性,当温度分别维持在 25, 35, 45, 55 $^{\circ}\text{C}$ 时,外界气压从 0 kPa 到 600 kPa 的变化过程中,腔体内的残余气压对膜片中心形变量的影响如图 3 所示。当外界气压分别维持在 0, 200, 400, 600 kPa 时,温度从 25 $^{\circ}\text{C}$ 变化到 65 $^{\circ}\text{C}$ 的过程中,腔体内残余气压对膜片中心形变量的影响如图 4 所示。

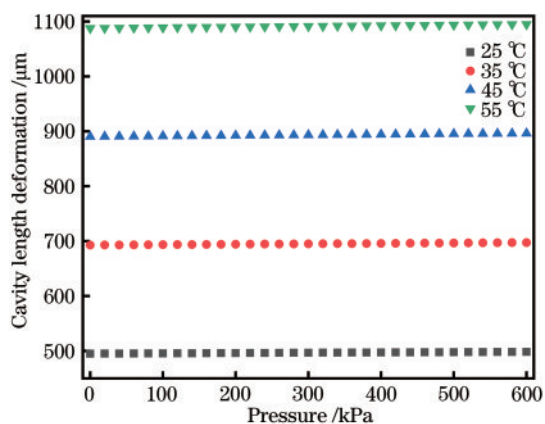


图 3 不同的腔体残余气压对膜片中心形变量的影响

Fig. 3 Influence of different cavity residual air pressure on central shape variable of diaphragm

从图 3 可以看到,在温度恒定的情况下,当充气腔的气压从 0 kPa 到 600 kPa 变化时,膜片中心的形变量均小于 1 μm ,因此恒温下进行压力测量实验只需要减掉对应温度所影响的改变量就可以消除温度对压力测量值的影响。从图 4 可以看到,在温度从 25 $^{\circ}\text{C}$ 变化到 65 $^{\circ}\text{C}$ 的过程中,当充气腔的气压分别为 0, 200, 400, 600 kPa 时,膜片中心的形变量分别

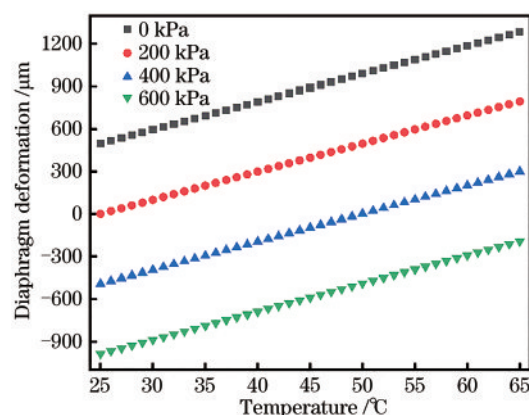


图 4 不同温度对膜片中心形变量的影响

Fig. 4 Influence of different temperature on central shape variable of diaphragm

为 800, 600, 600, 800 μm , 由此可以看到在温度变化的情况下,腔体内的残余气压对膜片中心形变量的影响非常大,因此在进行压力测试前,必须先消除温度对膜片中心形变量带来的影响。

对于厚度为 0.8 mm 的 SUS631 不锈钢膜片来说,膜片材质的热膨胀系数约为 $10.6 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$, 计算得到膜片发生热胀冷缩后的形变量小于 1 μm , 相比于腔体内残余气压对膜片中心形变量的影响,膜片发生热胀冷缩后的形变量可以忽略不计。

3.2 温度对腔体与胶体形变量的影响

316L 不锈钢腔体的管长 $l_a = 15 \text{ cm}$, 热膨胀系数 $\alpha_2 = 1.5 \times 10^{-5} / ^{\circ}\text{C}$, 环氧树脂胶的腔长 $l_b = 0.5 \text{ cm}$, 热膨胀系数 $\alpha_3 = 6.71 \times 10^{-5} / ^{\circ}\text{C}$ 。将上述参数分别代入 (9) 式和 (10) 式, 可以得到在温度变化过程中, 316L 不锈钢腔体和环氧树脂胶体随温度变化发生热胀冷缩效应而产生的形变量。

图 5 为 316L 不锈钢腔体随温度变化的特性曲线。图 6 为环氧树脂胶随温度变化的特性曲线。从图 5 可以看到, 在温度从 25 $^{\circ}\text{C}$ 变化到 65 $^{\circ}\text{C}$ 的过程中, 316L 不锈钢腔体的形变量约为 100 μm 。从图 6 可以看到, 在温度从 25 $^{\circ}\text{C}$ 变化到 65 $^{\circ}\text{C}$ 的过程中, 环氧树脂胶的形变量为 20 μm 。相比于腔体内的残余气压, 温度对 316L 不锈钢腔体以及环氧树脂胶的影响均很小, 但是因为其都处于同一个数量级, 而且调频连续波光纤压力传感器为高精度的压力测量设备, 因此以上影响都不可以忽略。根据 (11) 式计算得到, 由温度影响 F-P 腔腔长的形变量约为 1000 μm 。为了降低温度对压力测量的交叉影响, 首先从结构上对压力传感器进行优化设计。

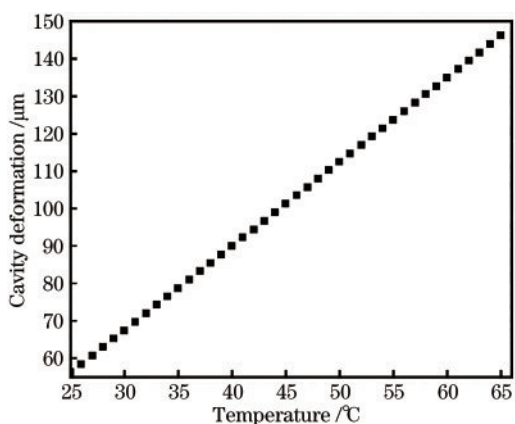


图5 316L不锈钢腔体结构随温度变化的特性曲线

Fig. 5 Characteristic curve of 316L stainless steel cavity structure with temperature change

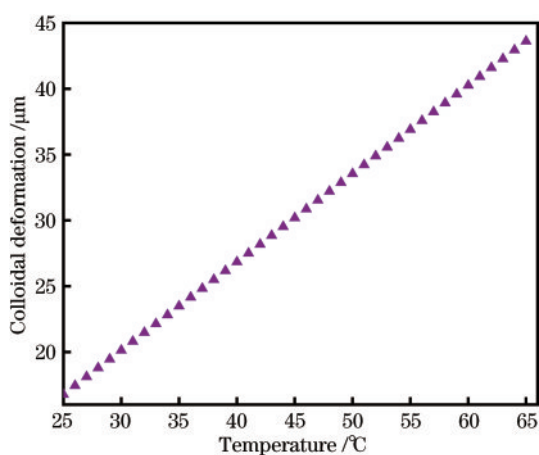


图6 环氧树脂胶随温度变化的特性曲线

Fig. 6 Characteristic curve of epoxy resin adhesive with temperature change

4 减小温度影响的压力传感头设计

4.1 材质选择

查阅文献可知,目前已有的压力探头(F-P腔)包括全光纤结构和光纤组合式结构,其次制作膜片传感头常用的材料有金属、不锈钢、陶瓷和硅等。光纤存在的问题:在测量过程中因具有受压易碎等特性而需要封装保护,这就不可避免地影响了压力测量的精度。金属材料具有较强的抗压抗拉能力、弹性好、熔点高、热膨胀系数小、耐酸腐蚀和价格低等优点,其中不锈钢材质是一种弥散硬化不锈钢材料,具有高强度、高硬度、抗疲劳的优点,以及良好的耐腐蚀性和可模锻性,而且遇高温很少发生变形,因此实验选用316L不锈钢材质制作F-P腔腔体结构和充气腔

结构,使用具有高弹性性能的SUS631不锈钢材质制作膜片结构。

4.2 结构设计

考虑到膜片中心的形变是影响压力测量的关键因素之一,因此压力传感器的膜片可以在保证压力正常测量的前提下,尽可能使其不直接暴露在测试环境中,膜片的一侧为进气腔结构,另一侧为F-P腔结构,因此进气腔结构和F-P腔结构都采用对温度不敏感的316L不锈钢材质。由于调频连续波压力传感器对两个腔体的内径没有要求,两个腔体的厚度控制在6 mm。对于F-P腔腔体结构而言,选择6 mm厚度的优势在于腔体的形变量受到温度热胀冷缩效应的影响更小,而且也能够将SUS631膜片与测试环境隔绝,这样就可以进一步降低温度对弹性膜片形变量的影响。其次,对于温度对环氧树脂胶的影响,实验在保证环氧树脂胶对准直器粘接牢固的前提下,尽量减小环氧树脂胶的粘接面积。为了进一步减少温度对膜片形变量的影响,F-P腔结构与充气腔直接选择316L不锈钢材质卡箍进行密封固定安装。

4.3 加工技术

压力传感头的加工技术也会直接影响温度对压力的测量,因此在压力传感头的制作过程中提出了如下要求。

1)膜片焊接技术要保证焊接牢固密封,焊点要匀称以保证膜片在形变过程中受力均匀,膜片形变中心在圆膜片的中心位置,焊接过程中不能影响膜片表面的平整度,焊接技术和方法均要减少膜片边缘效应对测量结果的影响。

2)膜片表面的平整度直接影响F-P腔两反射面光路的对准,以及膜片表面对光的散射程度,因此膜片选择整体冲压成型且在冲压成型和焊接过程中时刻监测膜片表面的平整度,目前膜片的平整度达到 $0.016\ \mu\text{m}$ 。

3)SUS631不锈钢金属膜片的表面反射率较低,在光路调整过程中很难找到反射光斑,而且对准后所能达到的反射光功率很难满足测量要求,因此在膜片的制备过程中选择研磨技术,可以使SUS631不锈钢金属膜片的表面反射率提升到60%,满足实验对膜片反射率的要求。最终得到的压力传感器实物如图7所示。



图 7 调频连续波光纤维压力传感器的传感头结构实物
Fig. 7 Structure of sensing head of frequency modulated continuous wave fiber optic pressure sensor

5 温度特性测试实验的搭建

为了进一步分析温度对调频连续波压力传感器带来的影响,实验搭建一套温度测试系统,如图 8 所示,其中DFB为半导体激光器。

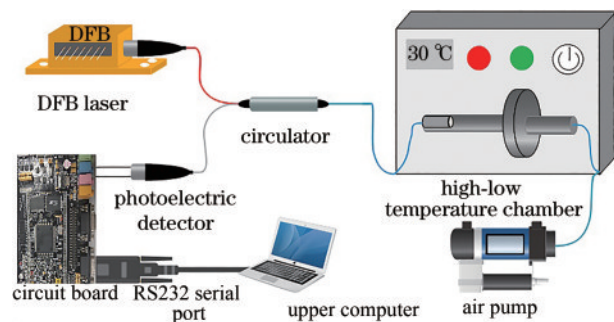


图 8 调频连续波光纤维压力传感器的温度测量系统
Fig. 8 Temperature measurement system of frequency modulated continuous wave fiber optic pressure sensor

半导体线性调频激光器所发出的激光束通过单模三端口光纤环形器的入射端和光纤准直器后,进入不锈钢所制作的压力传感头中。压力传感头的充气腔通过塑料软管与气泵相连,整个压力传感头放置在功率为 2 kW 和控温精度为 $\pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$ 的高低温箱中,压力传感头中的 F-P 腔结构所产生的干涉拍频信号通过光纤准直器后进入三端口的光纤环形器中,信号从环形器的出射端口出射被光电探测器探测并转换为电信号,经过以 STM32F4 微处理器为核心的信号处理系统后,将处理结果通过上位机显示输出。

当充气腔的气压保持 0 kPa 时,调节高低温箱的温度,使其从 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 变化到 $65\text{ }^\circ\text{C}$,测试腔体结构随温度的变化特性。当高低温箱的温度稳定在 $25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60\text{ }^\circ\text{C}$ 时,测试压力从 0 kPa 到 600 kPa 的变化过程中 F-P 腔结构的形变量。实验过程中,为了避免突变气压对膜片造成损伤,应尽可能地控制充气腔腔体内气压的流速。

5.1 实验温度特性分析

当外界气压保持在 0 kPa 时,调节高低温箱的温度,使其从 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 变化到 $65\text{ }^\circ\text{C}$,F-P 腔结构随气温的形变量如图 9 所示。从图 9 可以看到,F-P 腔结构的形变量仅为 $50\text{ }\mu\text{m}$,说明压力传感器的整体结构设计会大幅度降低温度对 F-P 腔结构的影响,有效避免测试环境温度对传感头测量的干扰,但是对于高精度的调频连续波压力测量来说, $50\text{ }\mu\text{m}$ 的形变量也足以对压力测量造成严重的影响,因此实验将使用最小二乘法降低压力的影响。

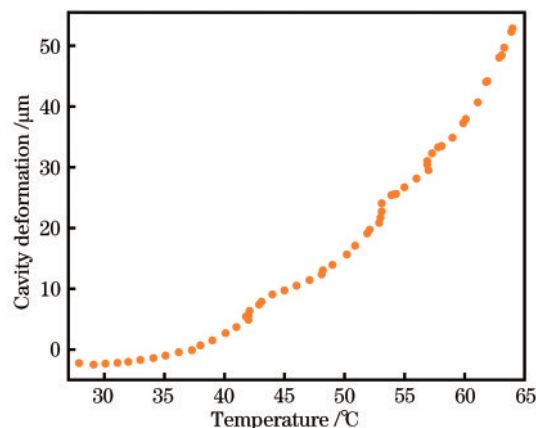


图 9 F-P 腔结构随温度变化的形变量
Fig. 9 Shape variation of F-P cavity structure with temperature change

5.2 最小二乘法实时补偿方法

当温度稳定在 $25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60\text{ }^\circ\text{C}$ 时,压力从 0 kPa 到 600 kPa 的变化过程中,F-P 腔腔长的形变量如图 10 所示。

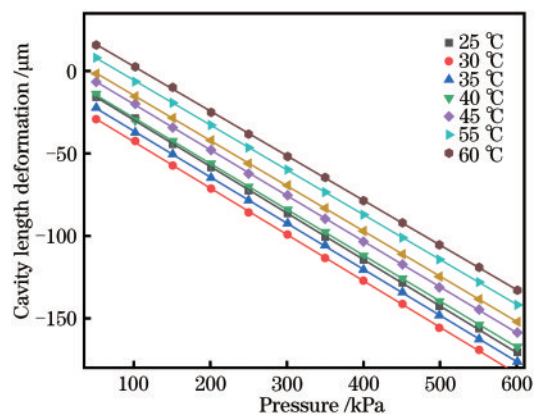


图 10 不同温度下 F-P 腔腔长形变量随充气腔气压变化的关系
Fig. 10 Relationship between length variable of F-P cavity and air pressure of inflatable cavity at different temperatures

从图 10 可以看到,当温度稳定在某一值时,F-P 腔腔长的形变量与充气腔压力有很高的线性度,但是在不同温度的条件下,压力测量值并不相等,且随着温度的增加,F-P 腔腔长的形变量随压力的变化曲线几乎是等间距增加。因此将相邻温度条件下的压力形变曲线依次作差后再求平均,通过最小二乘法拟合出温度与 F-P 腔腔长形变量的变化规律,结果如图 11 所示。

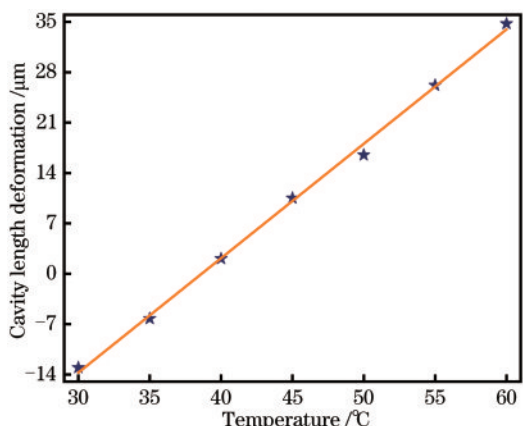


图 11 温度与 F-P 腔腔长形变量的关系

Fig. 11 Relationship between temperature and length variable of F-P cavity

从图 11 可以看到,F-P 腔腔长的形变量随温度变化的线性度为 0.99734;当温度为 29 °C 时,F-P 腔腔长的形变量为 $-61.44251 \mu\text{m}$,温度每变化 5 °C,F-P 腔腔长的形变量增加约为 $7.5 \mu\text{m}$ 。在不同温度的条件下,对实验压力值进行温度补偿后,得到温度补偿后的压力值,将温度补偿后得到的压力值与实验压力值进行比较,结果如图 12 所示。

从图 12 可以看到,在 30, 35, 40, 45, 50, 55,

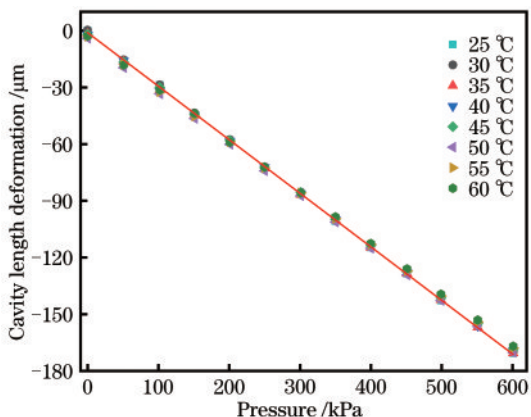


图 12 温度补偿后得到的压力值与实验压力值的关系

Fig. 12 Relationship between pressure value obtained after temperature compensation and experimental pressure value

60 °C 的温度下,温度补偿后得到的压力曲线与实验压力曲线重合。为了进一步验证最小二乘法补偿后的有效性,将补偿后的压力曲线与实验压力曲线作差,结果如图 13 所示。

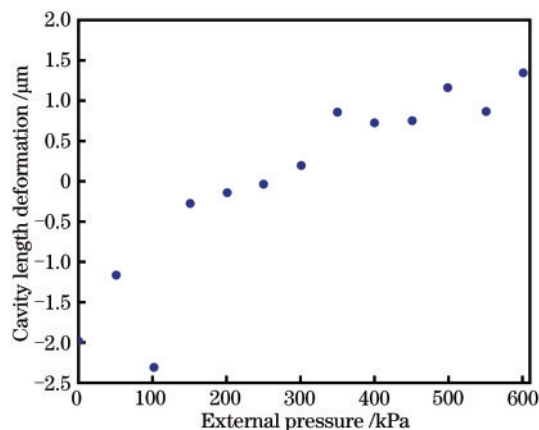


图 13 温度补偿后得到的压力值与实验压力值的差值

Fig. 13 Difference between pressure value obtained after temperature compensation and experimental pressure value

从图 13 可以看到,随着充气腔内气压的增大,腔长形变差值逐渐增大,在整个过程中,腔长形变量的差值小于 $4 \mu\text{m}$,说明采用最小二乘法可以对温度影响进行进一步消除。

5.3 温度补偿后的压力测量分析

为了分析温度补偿后的压力特性,将实验所用的压力传感头放置在功率为 2 kW 和控温精度为 $\pm 0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$ 的高低温箱中,温度恒控制在 25 °C,压力控制在 0 kPa(因为其他压力值很难在长时间控制到固定值),每隔 3 s 通过上位机采集一次 F-P 腔腔长的变化值,测试时间为 2.5 h。根据 5.2 节得到的规律,当温度为 29 °C 时,腔长的漂移值为 $-61.44251 \mu\text{m}$,将实验测得的值减去 $-61.44251 \mu\text{m}$ 后再进行分析,得到的标准正态分布规律如图 14 所示。

从图 14 可以看到,当外界气压为 0 kPa 时,消除温度的影响因素后,腔长变化量服从随机误差正态分布的规律,其中正态分布概率为 0.95601,标准差为 53.08101 nm ;在 $-240 \sim -200 \text{ nm}$ 、 $-90 \sim -80 \text{ nm}$ 以及 $-60 \sim -40 \text{ nm}$ 之间的测量值超出正态分布区间。虽然实验是在气浮光学平台上完成,而且压力传感头放置在密闭的高低温箱中,但是实验时间为白天,周围环境的扰动难免会对高精度的测量实验结果造成影响。从理论分析来说,当外界气压为 0 kPa 时,消除温度影响后的 F-P 腔腔长形变量为 0 nm,但是实际测量的腔长形变量还会受到其他因

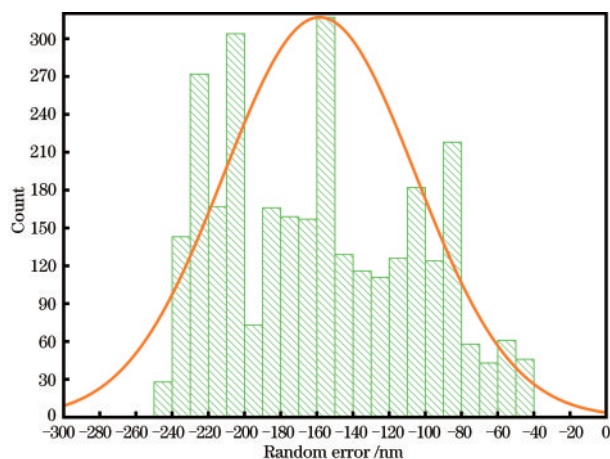


图 14 温度补偿后在 0 kPa 压力下的腔长随机误差正态分布
Fig. 14 Normal distribution of cavity length random error at 0 kPa pressure after temperature compensation

素的影响,导致腔长产生微小的漂移。在正态分布范围内,随着时间的累积,腔长的漂移量约增大了 200 nm。在 0~600 kPa 气压下的腔长变化量(约为 170 μm)已经非常微小,可以忽略不计。最终实验结果表明,压力传感头的结构优化设计和最小二乘法可以实现高精度调频连续波光纤压力传感器的温度补偿。

6 结 论

通过理论和实验分析了 F-P 腔腔体内的残余气压以及温度对 F-P 腔结构中膜片结构、不锈钢腔体以及环氧树脂胶形变的影响。通过优化设计 F-P 腔结构可以降低温度对 F-P 腔腔长的影响,并利用最小二乘法进行温度实时补偿以进一步降低温度对压力测量的影响,实现温度变化对压力测量值偏差的影响小于 4 μm ,提高调频连续波光纤压力传感器的实用性。

参 考 文 献

- [1] Eaton W, Bitsie F, Smith J, et al. A new analytical solution for diaphragm deflection and its application to a surface-micromachined pressure sensor [EB/OL]. [2020-09-17]. <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc677764/>.
- [2] Wu Z H, Liu T G, Jiang J F, et al. Effect of thermal stress and residual gas pressure on the thermal response of optical fiber Fabry-Perot pressure sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0328005.
吴振海, 刘铁根, 江俊峰, 等. 热应力和残余气压对光纤法布里-珀罗压力传感器温度性能的影响[J]. *光学学报*, 2015, 35(3): 0328005.
- [3] Huang W R, Gao Y J, Liu Z L, et al. The temperature compensation design of an optical fiber liquid level sensor with fabry-perot cavity [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(12): 1810-1813.
黄伟荣, 高应俊, 刘志麟, 等. 温度对光纤法-珀罗液位传感器腔深度的影响与补偿[J]. *光子学报*, 2005, 34(12): 1810-1813.
- [4] Liu J P, Wang Y, Liu J H. Temperature characterization of extrinsic fiber Fabry-Perot interferometric sensor [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(11): 110601.
刘加萍, 王彦, 刘吉虹. 非本征光纤法布里-珀罗干涉传感器的温度特性[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(11): 110601.
- [5] Ni Q, Zuo F, Lu W K. Research on the temperature compensation for optical fiber displacement sensor [J]. *Process Automation Instrumentation*, 2015, 36(2): 95-98.
倪茜, 左锋, 卢文科. 光纤位移传感器的温度补偿研究[J]. *自动化仪表*, 2015, 36(2): 95-98.
- [6] Guo Z W, Sun G L, Li W X. Temperature characteristics of optical fiber pressure sensor based on F-P interferometry [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2008, 29(3): 418-421.
郭振武, 孙桂玲, 李维祥. F-P 光纤压力传感器的温度特性研究[J]. *半导体光电*, 2008, 29(3): 418-421.
- [7] Wang J J, Liu B, Zhang F T, et al. New-style optical fiber Bragg grating pressure sensor with temperature compensation [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(11): 2342-2346.
王俊杰, 刘波, 张丰涛, 等. 基于温度补偿方法去敏的新型光纤光栅压力传感器[J]. *仪器仪表学报*, 2009, 30(11): 2342-2346.
- [8] Wang Y, Liu J P, Liu J H, et al. Transverse load sensor based on optical fiber extrinsic Fabry-Perot interferometer with high sensitivity and temperature self-compensation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(6): 1433-1440.
王彦, 刘加萍, 刘吉虹, 等. 温度自补偿高灵敏度非本征光纤法布里-珀罗横向负载传感器[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(6): 1433-1440.
- [9] Shi F F, Zhao C L, Xu B, et al. Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on optical fiber cavity sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(3): 0306003.
时菲菲, 赵春柳, 徐贲, 等. 基于光纤微腔的温度及折射率同时测量型传感器[J]. *光子学报*, 2016, 45

- (3): 0306003.
- [10] Qi Y F, Jia C, Xu L Y, et al. Temperature and refractive index sensing properties based on combined sensor for few mode fiber [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(3): 855.
齐跃峰, 贾翠, 许丽媛, 等. 基于少模光纤组合传感器的温度及折射率传感特性研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2020, 40(3): 855.
- [11] Zheng J. Analysis of optical frequency-modulated continuous-wave interference [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(21): 4189-4198.
- [12] Zheng J. All-fiber single-mode fiber frequency-modulated continuous-wave Sagnac gyroscope [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(1): 17-19.
- [13] Tsuchida H. Frequency-modulated continuous-wave light detection and ranging with sinusoidal frequency modulation and beat phase detection [J]. *Electronics Letters*, 2019, 55(24): 1297-1299.
- [14] Onunka C, Nnadozie R C. Modelling the performance of USV manoeuvring and target tracking: an approach using frequency modulated continuous wave radar rotary system [J]. *SpringerPlus*, 2013, 2(1): 184.
- [15] Xu J Q. The mechanics of interface [M]. Beijing: Science Press, 2006: 187-188.
许金泉. 界面力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2006: 187-188.