

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210090

基于光纤光栅法珀腔传感器的结构表面温度测量方法*

王颖¹, 徐毅^{2,3}, 章鹏¹, 刘显明¹, 雷小华¹

(1. 重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室 重庆 400044; 2. 北京航空航天大学航空发动机研究院 北京 100191; 3. 中国航发四川燃气涡轮研究院 成都 610500)

摘要:针对结构表面温度测量需求,提出了一种基于光纤光栅法珀腔传感器的表面温度测量方法,通过光纤光栅和光纤法珀腔同时获取被测结构的温度、应变信息,从而补偿应变对温度的交叉敏感。本文分析了光纤光栅法珀腔的表面温度测量原理,通过仿真对传感器的主要参数进行了设计;并提出了一种基于双参数的最小均方差估计算法用于光纤光栅法珀腔传感器的信号解调;最后,对光纤光栅传感器和光纤光栅法珀腔传感器进行了温度测量对比实验。试验结果表明,光纤光栅法珀腔温度传感器在常温到400℃范围内,温度测量值的直线拟合相关系数为0.998 4,最大误差百分比为1.46%,均优于单光纤光栅温度传感器。

关键词:结构表面温度测量;光纤光栅法珀腔传感器;最小均方差估计算法

中图分类号: TH253 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

Structural surface temperature measurement method based on fiber grating-Farber cavity sensor

Wang Ying¹, Xu Yi^{2,3}, Zhang Peng¹, Liu Xianming¹, Lei Xiaohua¹

(1. Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Research Institute of Aero-Engine, Beihang University, Beijing 100191, China; 3. AECC Sichuan Gas Turbine Research Establishment, Chengdu 610500, China)

Abstract: A surface temperature measurement method based on FBG-FP sensor is proposed to meet the demand of structural surface temperature measurement. This method can compensate the cross-sensitivity of strain to temperature by acquiring the temperature and strain information of the measured structure through FBG and FP sensing simultaneously. This article analyzes the surface temperature measurement principle of FBG-FP and designs the main parameters of the sensor through simulation. The two-parameter minimum mean square estimation algorithm for signal demodulation of FBG-FP sensor is proposed. Then, a comparison experiment between FBG sensor and FBG-FP sensor is conducted. Experimental results show that the linear fitting correlation coefficient of temperature measurement of FBG-FP temperature sensor is 0.998 4, and the maximum error percentage is 1.46% in the range of room temperature to 400℃, both of which are better than the single fiber grating temperature sensor.

Keywords: structure surface temperature measurement; FBG-FP sensor; minimum mean square error estimation algorithm

0 引言

光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)温度传感器具有结构简单、体积小、灵敏度高、抗电磁场干扰、复用

能力强、可安装于狭小空间等优点^[1-3]而逐步在温度、应变等场合中得到了大量应用^[4]。由于FBG的反射波长同时受到温度与应变的双重影响,在温度测量时需要让传感器处于自由状态。在绝大多数情况下,都可以将传感器穿入钢管中消除应力的影响,从而实现温度测量。

收稿日期:2022-07-07 Received Date: 2022-07-07

* 基金项目:国家自然科学基金(51975077, 52175530, 61875023)、重庆市自然科学基金(cstc2020jcyj-msxmX0948)、中央高校基金基本科研业务费(2020CDJ-LHZZ-071)项目资助

然而,在某些精度要求高的结构表面温度测量场合,穿管的 FBG 传感器结构会因为非接触测量导致较大的误差,而需要直接将传感器粘贴在结构表面。当 FBG 直接表贴时,必然会受到结构热膨胀带来的应变影响。因此,限制其直接表贴使用的最大问题在于温度应变交叉敏感性^[5]。近年来,为消除接触过程中的应力影响,克服温度应变交叉敏感的研究受到了持续广泛关注,并提出了不同解决方案^[6]。

2017 年张雯等^[7]报道了采用飞秒刻写光纤法珀 (fabry-perot, F-P) 腔级联 FBG 传感结构用于温度应变双参数测量,在 50℃ ~ 200℃ 温度范围内,FBG 特征峰温度灵敏度为 10.09 pm/℃,线性度高于 0.95;F-P 腔特征谷波长温度灵敏度为 0.98 pm/℃,线性度高于 0.98。所提出的传感器结构可以解决单 FBG 温度应变交叉敏感性,但是这样的传感器难以复用,对于结构体表面温度的多点测试场合,存在应用局限性。2017 年 Markowski 等^[8]在锥形光纤上刻写了基于啁啾光栅的 F-P 传感器,并通过计算反射光谱的偏移以及干涉峰的一阶导数标准差,实现了应变温度双参数测量,在 30℃ ~ 130℃ 温度范围内,温度灵敏度为 11.3 pm/℃。所提出的传感器结构既可复用也可以进行温度应变双参数测量,但当温度或应变变化过大时,两个光栅波长偏移差异太大,将会导致光谱变形。因此,该方法存在测量范围局限性。2020 年 Quoc 等^[9]提出在保偏光纤上刻写光纤光栅法珀腔传感器,可以通过检测快轴和慢轴偏振光的偏移量差异实现温度与应变双参数的解调,复用能力更强,但保偏光纤快慢轴折射率差值受温度影响较大,且结构复杂不利于大规模推广应用。随着技术的进步,利用两个完全相同的 FBG 形成法珀腔成为可能。徐永华^[10]通过光纤光栅法珀 (fiber bragg grating-fabry perot, FBG-FP) 腔结构实现温度与浓度的同时测量,汪波^[11]通过 FBG-FP 腔实现温度应变双参数测量,但应变测量范围较小。当温度范围较大时无法补偿传感器表贴时热膨胀产生的应变影响。

由于 FBG-FP 腔的反射信号为包含干涉条纹的包络,因此可以考虑温度应变同时测量,利用应变值消除表贴测量时应变对温度的影响,实现结构表面的温度测量。本文首先给出了 FBG-FP 腔测温的原理,讨论了各个参数对其光谱特性以及解调精度的影响,确定了传感器的参数,并提出了一种新的解调算法对传感器信号进行解调。其次,通过搭建温度和应变标定实验获取传感器的温度和应变标定系数。最后,通过与单光纤光栅温度传感器的对比测量实验,验证了测量方法的可行性。

1 测量原理

1.1 FBG-FP 腔传感器的传输特性分析

光纤光栅法珀腔结构本质上是两个光栅串联的结构,其传输特性可以根据光纤光栅的理论进行分析。光纤光栅法珀腔由 2 个光纤光栅间隔一定距离 d 构成,其结构示意图如图 1 所示。其中,2 只光纤光栅长度均为 L ,它们的周期均为 Λ 。

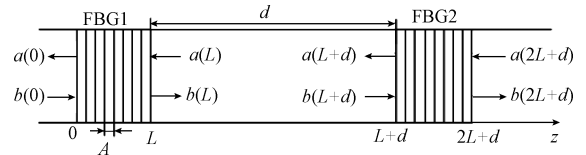


图 1 光纤光栅法珀腔示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fiber grating Fabry-perot cavity

通过耦合模理论可以推导出 FBG-FP 腔的反射率表达式如下^[12-14]:

$$R_{FBG-FP} = \frac{2R_g [1 - \cos(2\phi_r - \phi)]}{1 + R_g^2 - 2R_g \cos(2\phi_r - \phi)} = \frac{F \sin^2\left(\phi_r - \frac{\phi}{2}\right)}{1 + F \sin^2\left(\phi_r - \frac{\phi}{2}\right)} \quad (1)$$

从式(1)中可知,与普通的法珀腔干涉仪相比,FBG-FP 腔的反射率表达式中多了一项光波在腔内干涉的传输因子 ϕ_r 。并且,由于 FBG 的反射系数 r_g 是关于波长 λ 的函数,导致 FBG-FP 腔只在 FBG 的中心波长周围的很窄的带宽范围内有较强的耦合反射作用。即 FBG-FP 腔的反射谱只在 FBG 的反射带宽内有干涉峰,因此多个不同特征波长的 FBG-FP 腔结构同样可以复用。

当组成 FBG-FP 腔的 2 个 FBG 的中心波长 λ_B 均为 1 543 nm,光栅长度 $L=1$ mm,最大反射率 $R_{\max}=20\%$,光栅间距 $d=3$ mm 时,其仿真反射光谱如图 2 所示。

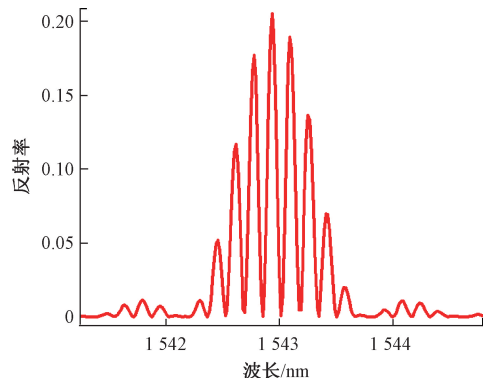


图 2 FBG-FP 腔反射光谱

Fig. 2 FBG-FP cavity reflection spectrum

由图2可知,FBG-FP除了条纹波长范围较窄外,和普通F-P腔反射光谱信号完全一致。

1.2 FBG-FP腔传感器测量原理及解调技术

1) FBG-FP腔传感器测量原理

当FBG-FP中FBG的反射率 $r_g \ll 1$ 时,存在下面的近似关系^[15]:

$$\phi - 2\phi_r \approx \frac{4\pi n_{\text{eff}} L_{\text{FP}}}{\lambda} \quad (2)$$

此时,式(1)中的第一行可以改写为:

$$R_{\text{FBG-FP}}(\lambda) = 2|r_g|^2 \left[1 - \cos\left(\frac{4\pi n_{\text{eff}} L_{\text{FP}}}{\lambda}\right) \right] = R_{\text{FBG}}(\lambda) R_{\text{FP}}(\lambda) \quad (3)$$

可以看出,FBG-FP腔的反射光谱为两项的乘积。其中,前项 $R_{\text{FBG}}(\lambda) = 2|r_g(\lambda)|^2$ 是FBG的反射信号即光谱的包络,后项 $R_{\text{FP}}(\lambda)$ 是F-P反射信号即光谱的干涉信号。FBG的布拉格波长就是反射光谱包络最大值对应的波长位置。对普通的FBG而言,温度或应变影响的是其 Λ 以及 n_{eff} 。因此,根据布拉格条件 $\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$,FBG-FP腔的反射光谱的包络 $R_{\text{FBG}}(\lambda)$ 最大值对应的波长(简称FBG-FP的中心波长 λ_B)变化量由FBG的布拉格波长的变化量决定:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{\Delta n_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}}} + \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} \quad (4)$$

根据光栅的温度应变交叉敏感性,当光纤受到轴向应变时,应力造成的影响主要为2个方面^[16-19]:(1)弹性变形对 L 的影响,进而改变 Λ ;(2)弹光效应对 n 的影响。同样,温度改变对光纤的影响也主要分为2个方面:(1)热膨胀效应对 L 的影响,进而改变 Λ ;(2)热光效应对 n 的改变。因此,当温度和应变同时作用与FBG-FP腔时,可得:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\zeta + \alpha)\Delta T + (1 - P)\varepsilon \quad (5)$$

式中: ζ 为热光系数, α 为热膨胀系数, P 为弹光系数, ΔT 为温度改变量, ε 为轴向应变。在该表达式中, α 、 ζ 、 P 在一定范围内均可视为常数,故可以简化该表达式为:

$$\Delta\lambda_B = K_1\Delta T + K_2\varepsilon \quad (6)$$

其中, K_1 为FBG-FP中心波长的温度灵敏度系数, K_2 为FBG-FP中心波长的应变灵敏度系数,通过温度和应变标定实验可得。FBG-FP腔的反射光谱的另一部分 $R_{\text{FP}}(\lambda) = [1 - \cos(4\pi n_{\text{eff}} L_{\text{FP}}/\lambda)]$ 是由于F-P腔干涉而形成的余弦调制。由于双光栅级联形成本征型法珀腔,因此,当FBG-FP腔同时受温度和应变影响时,可得腔长的变化量:

$$\Delta L_{\text{FP}} = K_3\Delta T + K_4\varepsilon \quad (7)$$

式中: K_3 为FBG-FP腔长的温度灵敏度系数, K_4 为FBG-FP腔长的应变灵敏度系数,通过温度和应变标定实验可

得。联立式(6)和(7)可以得到温度变化量:

$$\Delta T = \frac{K_4\Delta\lambda_B - K_2\Delta L_{\text{FP}}}{K_1K_4 - K_2K_3} \quad (8)$$

由式(8)可知,通过对FBG-FP腔的反射谱进行解调得到FBG-FP腔包络的中心波长变化量 $\Delta\lambda_B$ 和FBG-FP腔的腔长变化量 ΔL_{FP} ,就可以得到温度变化量 $\Delta T = T - T_0$,再根据初始温度 T_0 ,就可以得到当前温度值 T 。

2) FBG-FP腔传感器解调技术

由上述分析可知,FBG-FP腔的反射谱信号主要是由F-P干涉信号与FBG光栅信号调制所得。对于F-P干涉信号而言,当入射光源确定时,反射输出的光强信号 $R_{\text{FP}}(L_{\text{FP}}, \lambda)$ 只与等效法珀腔长 L_{FP} 有关。腔长越大,形成的光谱干涉峰个数越多。此时,如果有一参考函数 $R'_{\text{FP}}(L'_{\text{FP}}, \lambda)$:它是构造腔长 L'_{FP} 的函数,并且其变化范围包含了腔长 L_{FP} 的所有可能值,当变量构造腔长 L'_{FP} 变化时,函数 $R'_{\text{FBG}}(L'_{\text{FP}}, \lambda)$ 的波形也会随之变化,但当 $L'_{\text{FP}} = L_{\text{FP}}$ 时,两信号的最小均方差(minimum mean squared error, MMSE)期望值最小,构造信号是实测信号的最优估计。从而可实现等效法珀腔长的解调。同理,对于FBG的反射谱信号而言,当入射光源一定时,反射输出的光强信号 $R_{\text{FBG}}(\lambda_B, \lambda)$ 只与中心波长 λ_B 有关, λ_B 越大,形成的反射光谱信号整体向右移动。此时,如果存在着参考函数 $R'_{\text{FBG}}(\lambda'_B, \lambda)$,它是构造中心波长 λ'_B 的函数,变化范围包括中心波长 λ_B 的所有可能值,当变量构造中心波长 λ'_B 改变,函数的波形也会随之改变。但当 $\lambda'_B = \lambda_B$ 时,两信号的MMSE期望值最小,构造信号是实测信号的最优估计。从而可实现中心波长的解调。

因此,当入射光源一定时,针对FBG-FP腔传感器的反射光谱信号,我们可以构造一个等效法珀腔长 L'_{FP} 与中心波长 λ'_B 的函数 $R'_{\text{FBG-FP}}$ 如下:

$$R'_{\text{FBG-FP}}(\lambda'_B, L'_{\text{FP}}, \lambda) = R'_{\text{FBG}}(\lambda'_B, \lambda) R'_{\text{FP}}(L'_{\text{FP}}, \lambda) = R'_{\text{FBG}}(\lambda'_B, \lambda) \left[1 - \cos\left(\frac{4\pi n_{\text{eff}} L'_{\text{FP}}}{\lambda}\right) \right] \quad (9)$$

根据参数估计理论^[20],利用MMSE准则,求解构造函数 $R'_{\text{FBG-FP}}$ 与实测信号 $R_{\text{FBG-FP}}$ 的MMSE期望值:

$$M^2(R'_{\text{FBG-FP}}) = \int_{L_{\text{FPmin}}}^{L_{\text{FPmax}}} \int_{\lambda_{\text{Bmin}}}^{\lambda_{\text{Bmax}}} (R'_{\text{FBG-FP}} - R_{\text{FBG-FP}})^2 dL_{\text{FP}} d\lambda_B \quad (10)$$

当采集到的FBG-FP腔的反射谱信号为离散数据时,式(10)的积分运算可改为求和运算,即:

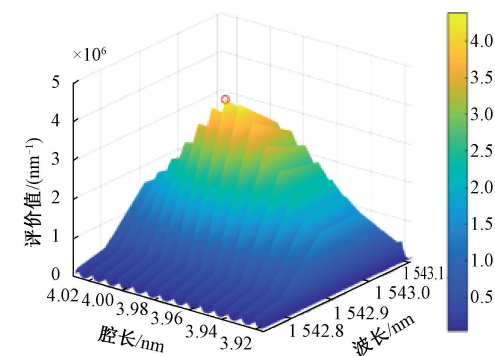
$$M^2(R'_{\text{FBG-FP}}) = \sum_{L_{\text{FPmin}}}^{L_{\text{FPmax}}} \sum_{\lambda_{\text{Bmin}}}^{\lambda_{\text{Bmax}}} (R'_{\text{FBG-FP}} - R_{\text{FBG-FP}})^2 \quad (11)$$

在实际应用时,为了便于观察引入评价函数value(X, Y):

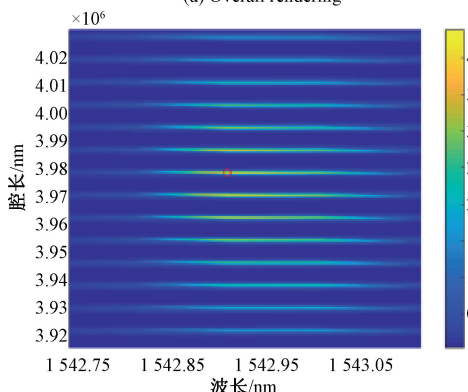
$$\text{value}(X, Y) = \frac{1}{M^2(R'_{\text{FBG-FP}})} \quad (12)$$

其中, $X=L'_{FP}$ 为构造腔长值, $Y=\lambda'_B$ 为构造波长值, 当 X 等于实际等效法珀腔长 L_{FP} , Y 等于实际中心波长 λ_B 时, 评价函数取得最大值, 从而可实现 FBG-FP 腔传感器的解调。

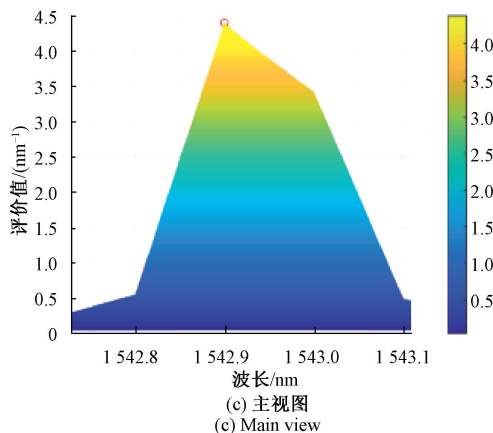
对图 2 仿真光谱(中心波长 $\lambda_B=1\,543\,\text{nm}$, 等效法珀腔长 $L_{FP}=4\,\text{mm}$) 进行均方差估计, 构造波长 $\lambda'_B=1\,542.75\sim 1\,543.1\,\text{nm}$, 间隔 $\delta\lambda'_B=0.1\,\text{nm}$; 构造等效法珀腔长 $L'_{FP}=3.9\sim 4.0\,\text{mm}$, 间隔 $\delta L'_{FP}=1\,\mu\text{m}$, 得到的评价函数是一个三维立体图, 如图 3 所示。



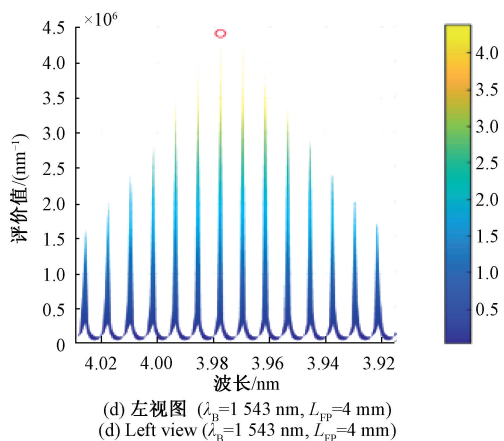
(a) 整体效果图
(a) Overall rendering



(b) 俯视图
(b) Top view



(c) 主视图
(c) Main view



(d) 左视图 ($\lambda_B=1\,543\,\text{nm}$, $L_{FP}=4\,\text{mm}$)
(d) Left view ($\lambda_B=1\,543\,\text{nm}$, $L_{FP}=4\,\text{mm}$)

图 3 仿真光谱的均方差评价函数结果

Fig. 3 MMSE evaluation function results of simulation spectrum

图 3(a) 为评价函数结果的整体效果图(图中红圈为评价函数最大值); 图 3(b) 为评价函数结果的俯视图; 图 3(c) 为评价函数结果的主视图, 可以通过搜索最大值所对应的构造中心波长值 λ'_B 来得到 FBG-FP 腔传感器包络的中心波长值 λ_B (即图中圆圈位置); 图 3(d) 为评价函数结果的左视图, 可以通过搜索最大值所对应的腔长值 L'_{FP} 来得到 FBG-FP 腔传感器的腔长值 L_{FP} (即图中圆圈位置)。从式(12)可以看出, 随着构造腔长 L'_{FP} 的增加, 构造函数的相位 $\phi = 4\pi n_{eff} L'_{FP} / \lambda$ 也会增加, 当相位的增加量是 2π 的整数倍时(即腔长 L'_{FP} 变化 $\lambda/2n_{eff}$), 构造函数在固定的波长 λ 范围内整体左移, 因此求取均方差时出现周期性, 仿真结果与理论一致。

2 FBG-FP 腔传感器的主要参数仿真分析

传感器的栅长和间距影响反射光谱的强度、带宽和条纹数量, 进而影响系统解调精度, 为此, 针对 FBG-FP 的栅长和间距进行了仿真分析。

根据式(1), 当 $L=1\,\text{mm}$, $n=1.447$, $\Lambda=533.2\,\text{nm}$, $\Delta n=1.2\times 10^{-4}$, 改变 L_{FP} 的值为 2、3、4 和 5 mm, 可以得到图 4 的 FBG-FP 仿真反射谱。观察 FBG-FP 反射谱可知, FBG-FP 只在 FBG 反射带宽内存在谐振, 即 FBG-FP 的谐振受 FBG 的反射谱包络调制, 这和典型 F-P 干涉仪存在较大差异。随着等效法珀腔长的增加, 主峰内干涉条纹的数目增加, 并出现一定的非对称性。

当 $L_{FP}=6\,\text{mm}$, $n=1.447$, $\Lambda=533.2\,\text{nm}$, $\Delta n=1.2\times 10^{-4}$, 改变 L 为 1、2、3 和 4 mm 时可以得到图 5 的 FBG-FP 仿真反射谱。观察 FBG-FP 反射谱可知, 随着 L 的增大, FBG-FP 腔的最大反射率增大, 带宽减小; 中央干涉峰内干涉条纹的个数减少。

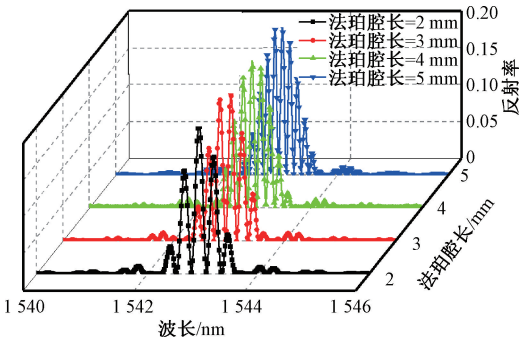


图4 不同等效法珀腔长下的反射光谱图

Fig. 4 Reflectance spectrograms under different isometric perot cavity lengths

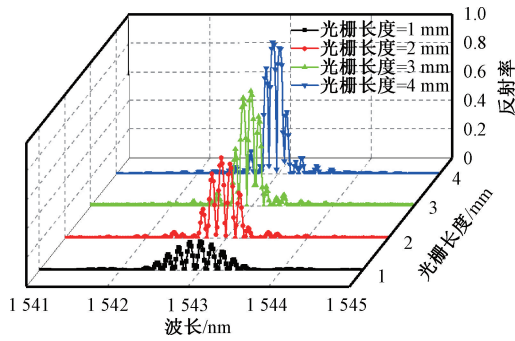


图5 不同光栅长度的反射光谱图

Fig. 5 Reflection spectra of different grating lengths

由图4、5可知,在 n_{eff} 与 Λ 不变的情况下,FBG-FP腔的反射光谱干涉条纹的个数随着F-P等效腔长 L_{FP} 的增加或者光栅长度 L 的减小而增大。因此在选择FBG-FP腔的FBG时,应选择 L 较小的光栅,这样在光栅反射谱内有更多的干涉条纹,从而有利于提高解调精度。但 L 不能太小,以免干涉条纹间隔过密,带宽太大,影响复用能力。同理,在选择FBG-FP腔的 L_{FP} 时, L 确定后应选择较大的光栅间隔 d ,这样在光栅反射谱内有更多的干涉条纹,但 L_{FP} 不能太大,以免反射光谱的非对称性严重。

为了验证不同光栅长度和腔长对双参数解调精度的影响进行了如下仿真分析。当 $L=1\text{ mm}$, $n=1.447$, $\Lambda=533.2\text{ nm}$, $\Delta n=1.2\times 10^{-4}$,改变 L_{FP} ($3.5998\sim 4.5998\text{ mm}$,间隔 100 pm),同时叠加白噪声($\text{SNR}=5\sim 35\text{ dB}$,间隔 5 dB)时可以得到的FBG-FP仿真反射谱,取 $L_{FP}=4.5998\text{ mm}$,不同噪声的反射光谱如下图所示6所示。

仿真解调结果如图7所示,从结果中可以看出不同腔长对腔长和波长的解调精度没有影响,但是不同信噪比影响波长的解调结果,当白噪声的信噪比大于 25 dB 时,波长解调误差在 $\pm 1\text{ pm}$ 以内。

当 $L_{FP}=4\text{ mm}$, $n=1.447$, $\Lambda=533.2\text{ nm}$, $\Delta n=1.2\times 10^{-4}$,改

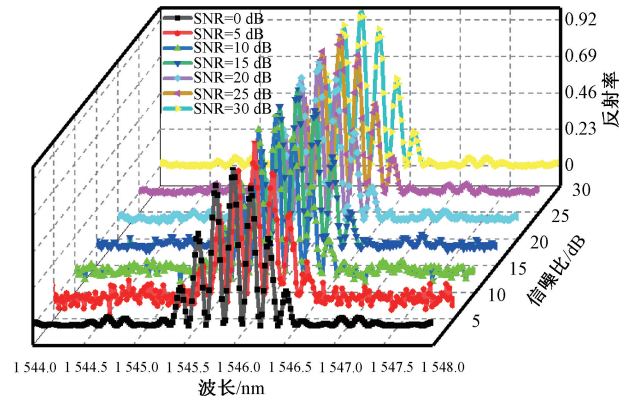
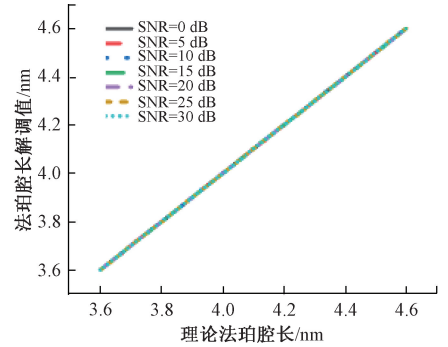
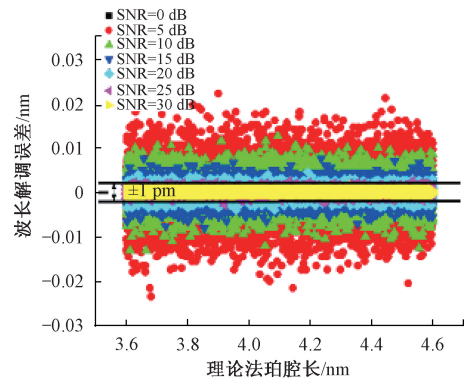


图6 不同信噪比白噪声下的反射光谱图
($L=1\text{ mm}$, $L_{FP}=4.5998\text{ mm}$)

Fig. 6 Reflection spectra of white noise with different SNR
($L=1\text{ mm}$, $L_{FP}=4.5998\text{ mm}$)



(a) 腔长解调
(a) L_{FP} demodulation



(b) 波长解调
(b) λ_B demodulation

图7 不同信噪比白噪声和不同腔长下的解调结果
Fig. 7 Demodulation results under different SNR white noise and different cavity length

变 L ($0.95\sim 1.05\text{ mm}$,间隔 10 pm),同时叠加白噪声($\text{SNR}=5\sim 35\text{ dB}$,间隔 5 dB)时可以得到的FBG-FP仿真反射谱,取 $L=1.05\text{ mm}$,不同噪声的反射光谱如下图所示8所示。

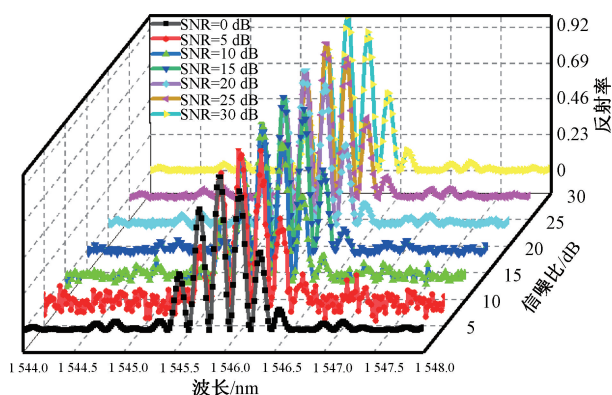


图 8 不同信噪比白噪声下的反射光谱图

(L = 1.05 mm, L_{FP} = 4 mm)

Fig. 8 Reflection spectra of white noise with different SNR

(L = 1.05 mm, L_{FP} = 4 mm)

其仿真解调结果如图 9 所示,从解调结果中可以看出不同栅长对解调精度没有影响,但不同信噪比影响波长的解调,当白噪声的信噪比大于 25 dB 时,波长解调误差在 ± 1 pm 以内。

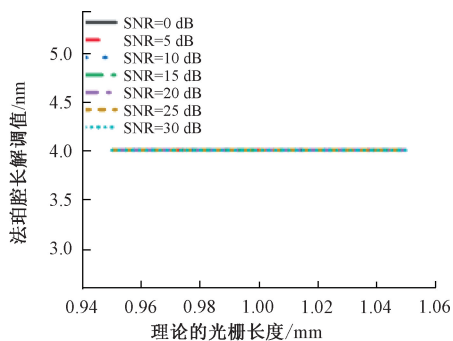
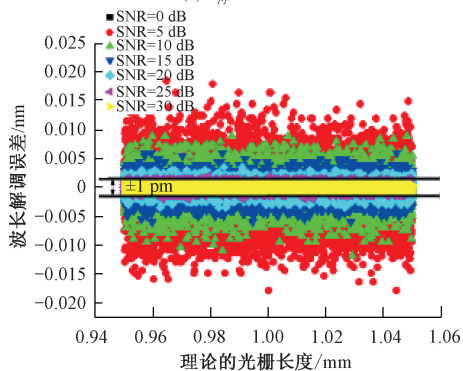
(a) 腔长解调
(a) L_{FP} demodulation(b) 波长解调
(b) λ_B demodulation

图 9 不同信噪比白噪声和不同栅长下的解调结果

Fig. 9 Demodulation results under different SNR white noise and different gate length

综合解调精度、复用能力以及光栅刻写工艺,最终选择光栅长度 $L = 1$ mm,等效法珀腔长 $L_{FP} = 4$ mm。同时,为了保证双参数解调精度,系统的信噪比需要大于 25 dB。

3 解调系统及实验

3.1 解调系统

由解调原理可知,要完成光纤光栅法珀信号的解调,必须对整个光源光谱范围的反射光谱进行采集和数据处理。搭建的解调系统框图如图 10 所示,扫频激光器(珠海光辰 GC-76001C)经光纤环形器输入到光纤光栅法珀腔传感器中,返回后经过光电探测器(北京敏光 LSIPD-A75-B-SMFA)接收,通过激光光源的扫频、获得频带内各个波长的干涉输出信号,从而获得整周期的反射光谱信号。然后采用台式电脑(处理器:AMD Ryzen5 3600 6-core Processor 3.9 GHz;显示器:NVIDIA Geforce GTX 1650;RAM:16 GB)对光谱进行处理。

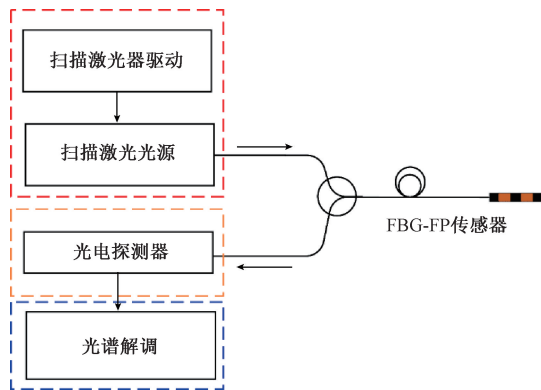


图 10 光纤光栅法珀腔传感器的光谱探测器测量系统

Fig. 10 FBG-FP sensor spectrum detector measurement system

3.2 系统信噪比验证实验

为了验证解调系统的信噪比是否满足需求,将 FBG-FP 腔传感器(光栅长度 $L = 1$ mm,等效法珀腔长 $L_{FP} = 4$ mm)接入解调系统中。首先,在常温下进行连续测量,保存 200 组光谱数据;然后,不连接传感器的情况下进行连续测量,保存 200 组噪声的光谱数据;最后,根据表达式 $SNR = 20\log(A^2/2\sigma^2)$,计算系统每个通道的信噪比。

传感器接入时的光谱信号如图 11 所示。

不接传感器时的噪声如图 12(a)所示。最后计算得到系统的信噪比如图 12(b)所示。由图 12(b)可知,在 FBG-FP 腔传感器的光栅长度 $L = 1$ mm,等效法珀腔长 $L_{FP} = 4$ mm 的条件下,得到解调系统的信噪比约为 27.55 dB,满足信噪比需求。

3.3 系数标定实验

根据温度测量原理式(8),要想消除温度测量过程中的应力影响,需要进行温度和应变标定实验,获取 FBG-FP 腔的标定系数 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 。

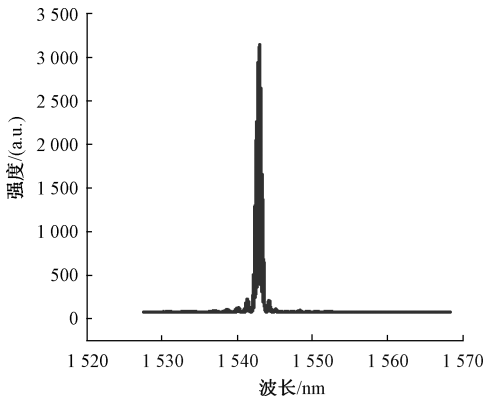


图 11 系统实测光谱信号图

Fig. 11 System measured spectrum signal diagram

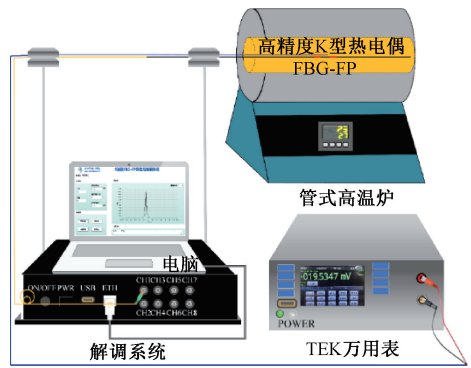
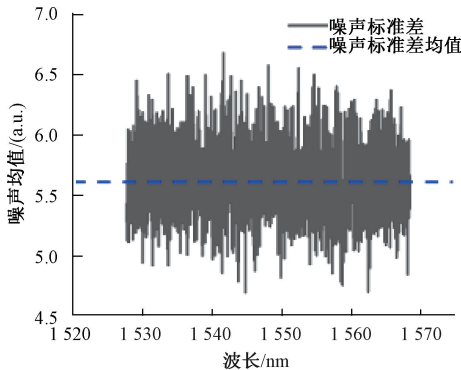
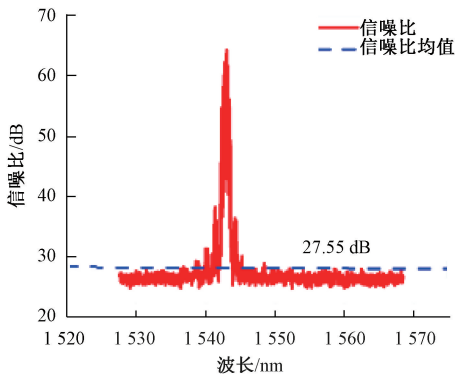


图 13 温度标定实验系统

Fig. 13 Temperature calibration experimental system



(a) 系统噪声
(a) Noise of system



(b) 系统信噪比
(b) SNR of system

图 12 系统噪声及信噪比

Fig. 12 Noise and SNR of system

1) 温度系数标定实验

温度标定实验系统如图 13 所示。系统包括管式高温炉、FBG-FP 解调系统、精密热电偶以及热电偶测量仪和计算机。具体实验步骤如下。

将高精度热电偶和 FBG-FP 传感器传感部分固定在一起放进管式高温炉内;管式高温炉温度设定为 $100^{\circ}\text{C} \sim 400^{\circ}\text{C}$,以 20°C 为步进温度,在每个温度下,保温 1 h,以保

证高温炉腔内温度稳定,待温度稳定后,利用解调系统连续测量 200 组中心波长和腔长值,并保存当前温度下精密热电偶测得温度值作为温度标准,重复进行 3 次;待整个温度范围内标定温度完成后,将每个温度下的 200 组解调值求平均并利用最小二乘法建立热电偶温度与中心波长和腔长平均值的线性回归方程,线性拟合方程的斜率即温度灵敏度系数。

当光栅长度 $L = 1 \text{ mm}$,等效法珀腔长 $L_{\text{FP}} = 4 \text{ mm}$ 时,实测随温度变化的部分光谱如下图 14 所示,其中温度数据采用设定温度下的精密热电偶温度值。

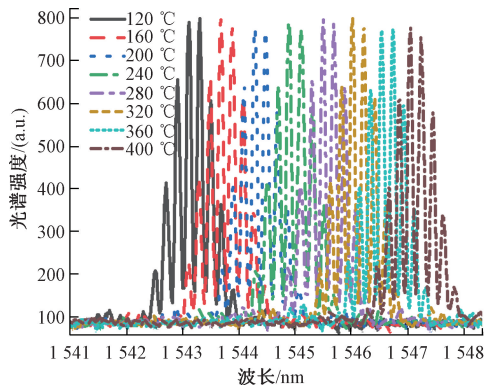


图 14 不同温度时的 FBG-FP 腔反射谱

Fig. 14 Reflection spectra of FBG-FP cavities at different temperatures

从光谱中可以明显看出温度变化时中心波长的移动,通过解调系统得到每个温度下光谱的中心波长值以及腔长值,通过最小二乘法拟合得温度与中心波长、腔长变化量的线性回归方程如图 15 所示。为了消除由于光纤材料在高温下非线性效应的影响,对传感器采用分段线性标定的方案进行标定。由于温度测量范围为 $100^{\circ}\text{C} \sim 400^{\circ}\text{C}$,由此将标定范围划分为 $100^{\circ}\text{C} \sim 240^{\circ}\text{C}$ 、 $260^{\circ}\text{C} \sim 400^{\circ}\text{C}$ 两个温度范围。

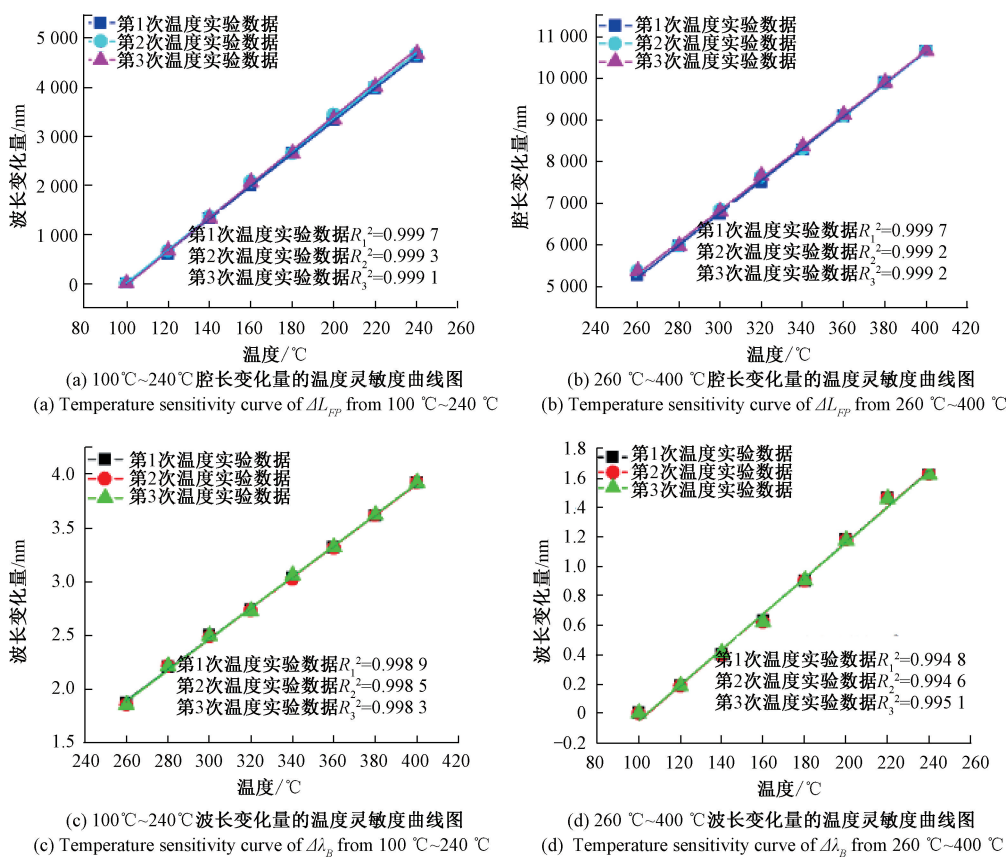


图 15 温度标定实验结果

Fig. 15 Experimental results of temperature calibration

从图 15 中可以看出,3 次实验中,腔长变化量和波长变化量在不同温度范围下拟合直线的线性度 R^2 都大于 0.99,表明 FBG-FP 传感器的温度传递线性度好。从表 1 可以看出,中心波长变化量的灵敏度系数的标准差均小于 0.000 4,表明每次温度实验时传感器的温度传递非常一致、重复性好,取平均值得到

100 °C ~ 240 °C 的 $K_1 = 0.0121 \text{ nm/}^\circ\text{C}$ 、260 °C ~ 400 °C 的 $K_1 = 0.0145 \text{ nm/}^\circ\text{C}$ 。腔长变化量的灵敏度系数的标准差都小于 0.26,表明每次温度实验时传感器的温度传递也很一致、重复性较好,取平均值得 100 °C ~ 240 °C 的 $K_3 = -33.41 \text{ nm/}^\circ\text{C}$ 、260 °C ~ 400 °C 的 $K_3 = -38.26 \text{ nm/}^\circ\text{C}$ 。

表 1 温度灵敏度

Table 1 Temperature sensitivity

参数	温度范围 /°C	第 1 次温度实验 /(nm/°C)	第 2 次温度实验 /(nm/°C)	第 3 次温度实验 /(nm/°C)	平均值 /(nm/°C)	标准差
ΔL_{FP}	100~240	-33.291 7	-33.535 7	-33.392 9	-33.41	0.1
$\Delta \lambda_B$		0.012 1	0.012 1	0.012 1	0.012 1	0
ΔL_{FP}	260~400	-38.619 1	-38.026 8	-38.127 9	-38.26	0.25
$\Delta \lambda_B$		0.014 4	0.014 5	0.014 5	0.014 5	4×10^{-4}

2) 应变系数标定实验

FBG-FP 腔传感器的应变标定实验,与温度应变标定实验相同,此过程仅改变应变,而温度保持不变。标定实验可在常温条件下进行,利用高精度拉力试验系统对传

感器进行应变标定。搭建的应变标定系统如图 16 所示。此系统包括了传感器、拉力机、解调系统以及电脑。其中,拉力机采用了杠杆原理,拉力机的右端是阻力臂,其臂长为 l ,拉力机的左端是动力臂,其臂长 $10l$,通过在动

力臂的砝码盘上施加不同质量的砝码来精确控制给阻力臂施加的应变。

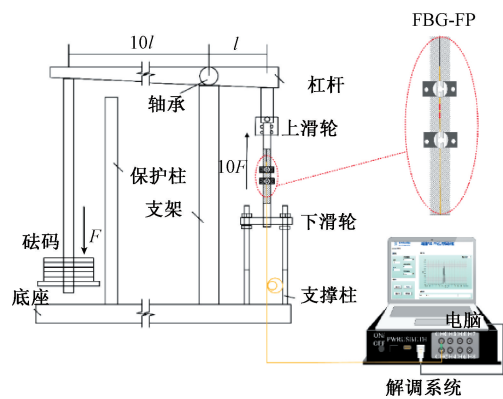


图 16 应变标定实验系统

Fig. 16 Strain calibration experimental system

具体的实验步骤如下:利用夹具将传感器固定在钢筋上,再利用拉力机的专用夹具将钢筋固定在阻力臂上;加载应变值范围为 $0\sim 242.2\ \mu\varepsilon$,应变增量为 $242.2\ \mu\varepsilon$,在每个应变值下保存 200 组解调值;待一次加载过程完毕后,将每个应变下的 200 组解调值求平均并利用最小二乘法建立应变值与中心波长和腔长平均值的线性回归方程,根据线性回归方程的斜率确定应变灵敏度系数。不同应变条件下的部分光谱变化如图 17 所示。

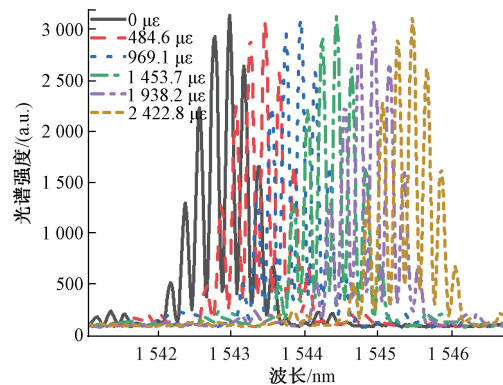
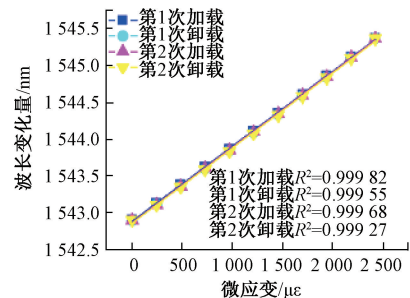


图 17 不同应变时的 FBG-FP 反射谱

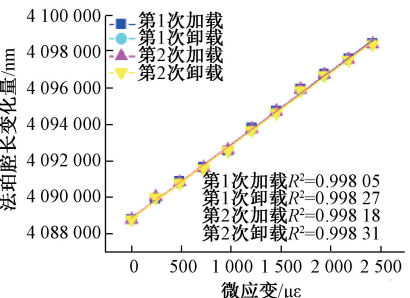
Fig. 17 FBG-FP reflectance spectra at different strains

从光谱图中可以很明显的看出中心波长随着应变的增加向右移动。利用系统解调得到 200 组中心波长值和腔长值,再利用最小二乘法将每次加载过程的应变和中心波长变化量、腔长变化量进行线性拟合,得到结果如图 18 所示。从图 18 (a)和(b)中可以看出,两次加载过程中,腔长变化量和波长变化量拟合直线的线性度 R^2 都大于 0.999,表明 FBG-FP 传感器的应变传递线性度非常好。



(a) 波长变化量的应变灵敏度曲线图

(a) Strain sensitivity curve of wavelength change



(b) 腔长变化量的应变灵敏度曲线图

(b) Strain sensitivity curve of cavity length change

图 18 应变标定实验结果

Fig. 18 Experimental results of strain calibration

从表 2 可以看出,中心波长变化量的灵敏度系数的标准差都小于 0.000 2,表明砝码加载时传感器的应变传递重复性好,因此,以平均值作为中心波长变化量的应变灵敏度系数 $K_2 = 0.001\ 1\ \text{nm}/\mu\varepsilon$ 。腔长变化量的灵敏度系数的标准差都小于 0.008,每次砝码加载时传感器的应变传递重复性好,因此,以平均值作为腔长变化量的应变灵敏度系数 $K_4 = 4.036\ \text{nm}/\mu\varepsilon$ 。

表 2 应变灵敏度

Table 2 Strain sensitivity

参数	第 1 次 加载	第 1 次 卸载	第 2 次 加载	第 2 次 卸载	平均值	标准差
	$/(nm/\mu\varepsilon)$	$/(nm/\mu\varepsilon)$	$/(nm/\mu\varepsilon)$	$/(nm/\mu\varepsilon)$	$/(nm/\mu\varepsilon)$	$/(nm/\mu\varepsilon)$
ΔL_{FP}	0.409 1	0.4032 9	0.4035 9	0.4028 10	0.4036 6	0.008 0
$\Delta \lambda_B$	0.001 10	0.001 03	0.001 02	0.001 03	0.001 10	0.000 10

3.4 温度测量实验

通过温度和应变标定实验后,得到了 $K_1 = 0.013\ 2\ \text{nm}/^\circ\text{C}$ 、 $K_2 = 0.001\ 1\ \text{nm}/\mu\varepsilon$ 、 $K_3 = -35.300\ 5\ \text{nm}/^\circ\text{C}$ 、 $K_4 = 4.036\ 6\ \text{nm}/\mu\varepsilon$ 。代入 (8) 可得:

$$\Delta T = \frac{K_4 \Delta \lambda_B - K_2 \Delta L_{FP}}{K_1 K_4 - K_2 K_3} = \frac{4.036\ 6 \Delta \lambda_B - 0.001\ 1 \Delta L_{FP}}{0.089\ 520\ 670\ 65}$$

(13)

由温度变化量可以推导出温度测量的公式:

$$T_{100^{\circ}\text{C} \sim 240^{\circ}\text{C}} = T_0 + \Delta T = T_0 + \frac{4.036\ 6\Delta\lambda_B - 0.001\ 1\Delta L_{FP}}{0.085\ 956\ 86}$$
$$T_{260^{\circ}\text{C} \sim 400^{\circ}\text{C}} = T_0 + \Delta T = T_0 + \frac{4.036\ 6\Delta\lambda_B - 0.001\ 1\Delta L_{FP}}{0.100\ 493\ 29}$$

(14)

为了验证温度测量系统的性能,设计了 FBG-FP 传感器与单 FBG 传感器的温度测量对比实验。将单 FBG 传感器穿入 0.5 mm 钢管消除应变的影响,然后按照上一节的温度系数标定方法,标定得到中心波长的温度灵敏度结果如图 19 所示。

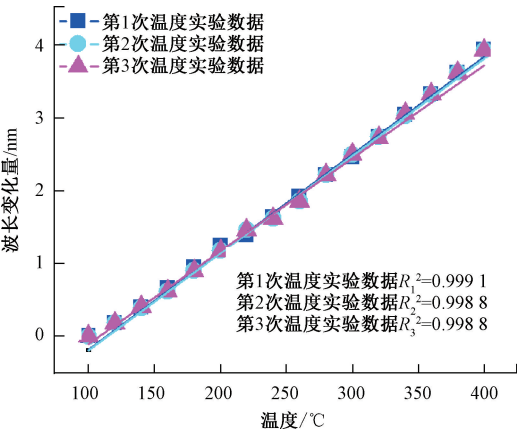


图 19 单 FBG 温度标定结果

Fig. 19 Single FBG temperature calibration results

从图 19 可以看出 3 次实验线性度都大于 0.99,表明单 FBG 的温度传递线性度好,线性拟合方程的斜率分别为:0.013 29、0.012 96、0.012 77;截距分别为:1 531.437 56、1 531.485 76、1 531.567 20。温度标定函数取 3 次实验拟合方程的均值为:

$$T = 0.013\ 07\lambda + 1\ 531.496\ 84$$

(15)

单 FBG 温度传感器标定完成后,使用金属薄片将 FBG 传感器与 FBG-FP 传感器固定在陶瓷管上。其中,FBG-FP 直接与被测结构表面接触,而单 FBG 传感器则通过钢管与被测结构接触。固定后效果如图 20 所示。

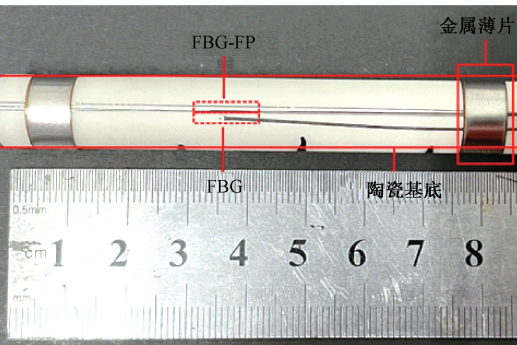


图 20 传感器固定实物图

Fig. 20 Physical drawing of sensor fixation

接下来通过图 13 所示的系统进行温度测量对比实验,实验步骤如下:将钢筋与精密热电偶固定在一起放进管式高温炉内;将标定后的光纤光栅法珀腔传感器以及套管后的单栅传感器的温度标定函数输入到上位机中,并且测量得到光纤光栅法珀腔的初始参考值(初始腔长值、初始温度值、初始温度值)并保存;将管式高温炉温度设定为 100℃~400℃,以 20℃为步进温度,在每个温度下,保温 1 h,以保证高温炉腔内温度稳定且管内传感器温度与结构表面温度达到热平衡状态。待温度稳定后,利用解调系统连续测量光纤光栅法珀腔传感器和单栅传感器的温度值并保存。3 次测量的结果如图 21 所示。

对应数据误差及直线拟合结果如表 3 所示。

表 3 FBG-FP 与 FBG 测温结果分析

Table 3 Analysis of temperature measurement results

样品	次数	拟合相关系数(R^2)	拟合残差(σ^2)	最大误差/℃	最大误差百分比/%
FBG-FP	1	0.999 34	87.329 9	5.59	1.39
	2	0.999 31	87.252 9	-4.41	1.10
	3	0.998 39	205.939 4	-5.83	1.46
FBG	1	0.998 27	226.117 4	10.21	2.55
	2	0.998 75	160.000 2	5.58	1.40
	3	0.998 15	230.806 9	10.20	2.55

由于标定和测量过程中不可避免存在导热误差、系统测量误差等,三次测温结果均叠加有不同程度的误差。从表 3 可以看出,三次温度测量实验中,双栅传感器的温度测量结果的拟合相关系数均优于单栅传感器,更接近于 1。并且,三次温度测量实验中,双栅传感器的温度测量结果的最大误差值为-5.83℃,优于单栅传感器的温度测量结果的最大误差值 10.21℃。本次试验所使用的双栅法珀腔以及单光栅的标定和测量,均在相同的环境条件下完成。因此,通过表 3 的对比实验可以认为光栅法珀腔温度传感技术在大范围测温方面优于单光栅。

光纤法珀腔温度传感器的性能提升在于应变补偿。然而,在实际温度测量系统中,光源频率扫描间隔为 2 GHz,实验所用的光栅法珀腔(光栅长度为 1 mm,等效法珀腔长为 4 mm)的干涉峰范围为 2 nm 左右,导致每次测量光谱中用于解调的有效光谱点数仅有 120 多个。在实际温度测量时,在 100℃~240℃的温度范围内,应变测量精度为 8.35 $\mu\epsilon/^\circ\text{C}$,在 260℃~400℃的温度范围内,

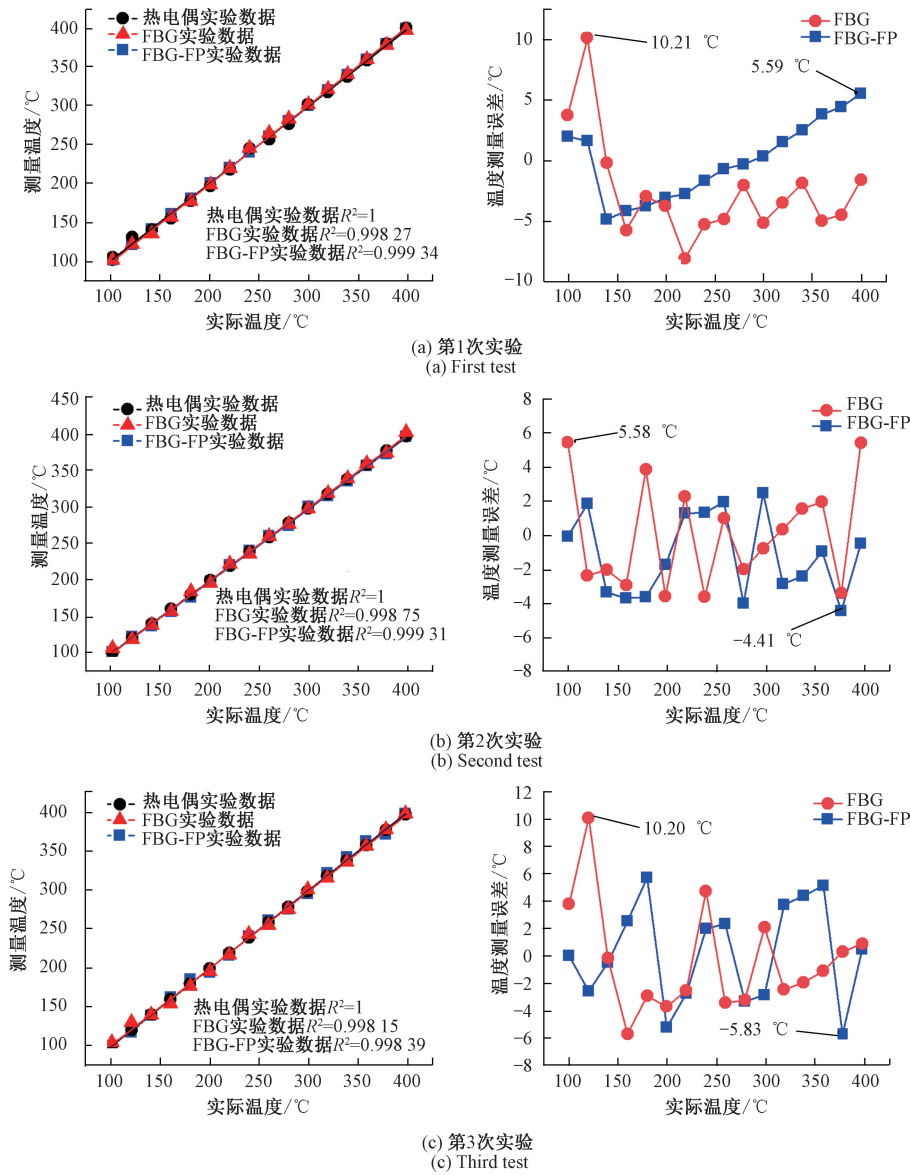


图 21 FBG、FBG-FP 温度测量结果及误差

Fig. 21 FBG, FBG-FP temperature measurement results and errors

应变测量精度为 $9.57\ \mu\epsilon/^\circ\text{C}$ 。而理想情况下, $100^\circ\text{C} \sim 400^\circ\text{C}$ 的温度范围, 被测物体因热膨胀平均每 1°C 温升将会增加 $9\ \mu\epsilon$ 。显然应变测量精度不是很高。尽管如此, 在结构表面温度测量中通过对光栅法珀腔进行应变补偿, 依然展现了比单栅更好的温度测量精度。

4 结 论

本文针对结构表面温度测量需求, 提出了一种基于光纤光栅法珀腔传感器的接触式温度测试方法。分析了光纤光栅法珀腔传感器的光传输特性, 提出了一种应变补偿方法, 并且对传感器主要参数进行了仿真分析; 针对

FBG-FP 结构提出了一种解调算法, 最后完成了实时温度测量系统的搭建以及系数标定和温度对比测量实验。实验表明 FBG-FP 腔传感器的温度测量线性度和精度都优于套管的单 FBG 传感器。显然, 在接触时表面温度测量时, FBG-FP 传感器是一种好的选择。

参考文献

[1] 王彦, 秦楠, 刘吉虹, 等. 基于光纤光栅的温度与压力柔性传感性能测试[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(3): 93-98.

WANG Y, QIN N, LIU J H, et al. Performance measurement of flexible temperature and pressure sensor based on fiber Bragg grating [J]. Chinese Journal of

- Scientific Instrument, 2019, 40(3):93-98.
- [2] 夏晓鹏, 张钰民, 初大平, 等. 基于啁啾光栅的温度与应变测量解耦方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(6):131-137.
- XIA X P, ZHANG Y M, CHU D P, et al. Decoupling method of temperature and strain measurement based on chirped grating [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(6):131-137.
- [3] 孟凡勇, 卢建中, 闫光, 等. 长啁啾光纤光栅分布式双参量传感特性研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(9):2210-2216.
- MENG F Y, LU J ZH, YAN G, et al. Study on distributed dual-parameter sensing characteristics of long-chirped fiber grating [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(9):2210-2216.
- [4] 刘明尧, 刘亮, 宋涵, 等. 基于 FBG 的结构表面温度测量方法研究[J]. 武汉理工大学学报, 2020, 42(1):80-84.
- LIU M Y, LIU L, SONG H, et al. Research on measurement method of structure surface temperature based on FBG [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2020, 42(1):80-84.
- [5] 丁朋, 董小鹏, 叶肖伟. 考虑温度和应变交叉敏感的光纤布拉格光栅测量研究[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(2):142-146.
- DING P, DONG X P, YE X W. Research on measurement of fiber Bragg grating considering the cross-Sensitivity of temperature and strain [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(2):142-146.
- [6] 孙诗晴, 初凤红, 卢家焱. 光纤布拉格光栅传感器交叉敏感问题的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(4):82-91.
- SUN SH Q, CHU F H, LU J Y. Advances in cross sensitivity of fiber Bragg grating sensors [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(4):82-91.
- [7] 张雯, 孟凡勇, 宋言明, 等. 飞秒刻写光纤 F-P 腔级联 FBG 传感特性研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(9):2193-2199.
- ZHANG W, MENG F Y, SONG Y M, et al. Study on the characteristics of femtosecond scribing fiber F-P cavity cascade FBG sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(9):2193-2199.
- [8] MARKOWSKI K, JEDRZEJEWSKI K, MARZECKI M, et al. Linearly chirped tapered fiber-Bragg-grating-based Fabry-Perot cavity and its application in simultaneous strain and temperature measurement[J]. Optics Letters, 2017, 42(7):1464-1467.
- [9] QUOC H B, WADA A, FUKUSHIMA K, et al. Simultaneous multi-point measurement of strain and temperature utilizing Fabry-Perot interferometric sensors composed of low reflective fiber Bragg gratings in a polarization-maintaining fiber[J]. Optics Express, 2020, 28(9):13104-13115.
- [10] 徐永华. 基于 FBG-FP 腔的温度与液体浓度测量方法研究[D]. 沈阳:东北大学, 2012.
- XU Y H. Research on temperature and liquid concentration measurement method based on FBG-FP cavity [D]. Shenyang:Northeastern University, 2012.
- [11] 汪波. 基于光栅 F-P 腔的双参数传感技术的研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2013.
- WANG B. Research on dual-parameter sensing technology based on grating F-P cavity [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2013.
- [12] 张自嘉. 光纤光栅理论基础与传感技术[M]. 北京:科学出版社, 2009.
- ZHANG Z J. Theoretical basis and sensing technology of fiber Bragg grating [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [13] 沈震强, 赵建林, 张晓娟. 光纤光栅法布里-珀罗传感器频分复用技术[J]. 光学学报, 2007 (7): 1173-1177.
- SHEN ZH Q, ZHAO J L, ZHANG X J. Frequency division multiplexing of fiber grating Fabry-Perot sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2007 (7):1173-1177.
- [14] 李家方, 吕可诚, 韩群, 等. 基于光纤光栅 F-P 腔的一种新颖传感系统的理论研究[J]. 光电子技术, 2004, 24(1):21-26.
- LI J F, LYU K CH, HAN Q, et al. Theoretical study of a novel sensor system based on FIBER Bragg grating F-P cavity [J]. Journal of Optoelectronics, 2004, 24(1): 21-26.
- [15] 赵嘉荣. 光纤折射率传感技术及双参数同时测量技术的研究[D]. 广州:华南师范大学, 2010.
- ZHAO J R. Research on fiber refractive index sensing

technology and dual-parameter simultaneous measurement technology [D]. Guangzhou: South China Normal University, 2010.

- [16] 孟展, 陈瑞霞, 金何, 等. 基于双材料悬臂梁的光纤光栅应力与温度传感器[J]. 光电子·激光, 2011, 22(3):343-346.
- MENG ZH, CHEN R X, JIN H, et al. Fiber Bragg grating stress and temperature sensor based on dual-material cantilever beam [J]. Journal of Optoelectronics, 2011, 22(3):343-346.
- [17] 李丰丽, 钟金钢, 张永林. 双 FBG 位移测量系统[J]. 传感器技术, 2003(10):60-64.
- LI F L, ZHONG J G, ZHANG Y L. Displacement measuring system with dual FBG [J]. Sensor Technology, 2003(10):60-64.
- [18] B AKMENKOV Y O, DOBRYNA Z, SALVADOR T P, et al. Effective length of short fabry-perot cavity formed by uniform fiber Bragg gratings [J]. Optics express, 2006, 14(14):6394-6403.
- [19] HUANG Y, LI Y, ZHU H, et al. Theoretical investigation into spectral characteristics of a semiconductor laser with dual-FBG external cavity[J]. Optics Communications, 2011, 284(12):2960-2965.
- [20] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京:清华大学出版社, 1995.
- ZHANG X D. Modern signal processing [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1995.

作者简介



王颖, 2019 年于大连交通大学获得学士学位, 现为重庆大学硕士研究生, 主要研究方向为测试技术。

E-mail: 201908131083@cqu.edu.cn

Wang Ying received his B.Sc. degree from Dalian Jiaotong University in 2019. He is currently a master student at Chongqing University. His main research interest is testing technology.



徐毅, 2013 年于哈尔滨工程大学获得硕士学位, 现为北京航空航天大学航空发动机研究院博士研究生, 主要研究方向为航空发动机特种测试技术。

E-mail: xuyi950@163.com

Xu Yi received his M.Sc. degree from Harbin Engineering University in 2013. He is currently a Ph.D. candidate at the Aero Engine Research Institute, Beijing University of Aeronautics and Astronautics. His research interest is special aero engine test technology.



章鹏(通信作者), 1991 年于江汉石油学院获学士学位, 2002 年, 2005 年于重庆大学获硕士和博士学位, 现为重庆大学副教授, 主要研究方向为光纤传感与测试技术。

E-mail: zhangpeng@cqu.edu.cn

Zhang Peng (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Jiangnan Petroleum Institute in 1991, and received his M.Sc. degree and Ph.D. degree both from Chongqing University in 2002 and 2005, respectively. He is currently an associate professor at Chongqing University. His main research interest is fiber optic sensing and testing technology.