

引用格式: CHEN Zhenwei, CHEN Huanquan, SHI Wenhui, et al. Design, Fabrication and Performance Research of a High Precision FBG Micro-displacement Sensor with Temperature Compensation[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(9):0906006
陈振威,陈焕权,史雯慧,等.具有温度补偿的高精度FBG微位移传感器的设计、制作及性能研究[J].光子学报,2021,50(9):0906006

具有温度补偿的高精度FBG微位移传感器的设计、制作及性能研究

陈振威¹,陈焕权¹,史雯慧¹,李建宇¹,郑加金^{1,2},韦玮^{1,2}

(1 南京邮电大学 电子与光学工程学院,微电子学院,南京 210023)

(2 江苏省特种光纤材料与器件制备及应用工程研究中心,南京 210023)

摘 要:为克服现有光纤布拉格光栅传感器设计结构复杂、温补误差大等缺陷,设计并制作了一种基于弹簧与滑块相结合的结构简单且高精度光纤布拉格光栅位移传感器,在一根光纤上获得温度补偿的同时,实现了高精度微位移测量,极大的减小了空间占用。实验结果表明:该传感器具有优良的微位移测量能力,灵敏度为 145.08 pm/mm,精度为 1.43%,量程为 10 mm;静态综合相对误差为 2.88%,整体的线性度、重复性和迟滞性误差较小。比较铝合金衬底、石英衬底和无衬底的温补效果,发现石英衬底的传感器温度补偿效果更佳,其延迟时间从 6.8 min 下降到 4.3 min,最大温度补偿误差从 44 pm 减少至 40 pm。最终采用石英玻璃作为衬底制成的传感器温度灵敏度为 6.34 pm/°C,温补误差为 0.26%。本文研制的传感器有望用于机械装备和土木工程等高精度结构位移的在线监测。

关键词:光纤布拉格光栅;光纤传感器;位移传感器;高精度;温度补偿

中图分类号:TN253

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215009.0906006

Design, Fabrication and Performance Research of a High Precision FBG Micro-displacement Sensor with Temperature Compensation

CHEN Zhenwei¹, CHEN Huanquan¹, SHI Wenhui¹, LI Jianyu¹, ZHENG Jiajin^{1,2}, WEI Wei^{1,2}

(1 College of Electronic and Optical Engineering, College of Microelectronics, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

(2 Jiangsu Province Engineering Research Center for Fabrication and Application of Special Optical Fiber Materials and Devices, Nanjing 210023, China)

Abstract: A high-precision Fiber Bragg Grating (FBG) displacement sensor was proposed based on the combination of a spring and a slider. It can realize the displacement measurement and temperature compensation on a single fiber, which greatly reduces space occupation. Experimental results show that the sensor has excellent micro-displacement measurement capability, its sensitivity, accuracy and the range are 145.08 pm/mm, 1.43%, 1.55% and 10 mm, respectively. The relative error of static synthesis is 2.88%, and the overall error of linearity, repeatability and hysteresis are small. By comparing the temperature compensation effect of aluminum alloy substrate, non-substrate and quartz substrate, it is found that the sensor temperature compensation effect of quartz substrate is better which the delay time is reduced from 6.8 min to 4.3 min, and the maximum temperature compensation error is reduced from 44 pm to 40 pm.

基金项目:国家自然科学基金(No.62075100)

第一作者:陈振威(1997-),男,硕士研究生,主要研究方向为光纤光栅传感器的设计制备。Email:1219023222@njupt.edu.cn

导师(通讯作者):韦玮(1960-),女,教授,博士,主要研究方向为光电信息功能材料与器件。Email:weiwei@njupt.edu.cn

通讯作者:郑加金(1976-),男,副教授,博士,主要研究方向为光纤光子学及光电子材料与器件。Email:zhengjj@njupt.edu.cn

收稿日期:2021-03-25;录用日期:2021-05-19

<http://www.photon.ac.cn>

Finally, the temperature sensitivity of the sensor made of quartz glass substrate is 6.34 PM/°C and the temperature compensation error is 0.26%. All of those implies the sensor is suitable for online monitoring of high-precision structural displacements such as mechanical equipment and civil engineering.

Key words: Fiber Bragg grating; Optical fiber sensor; Displacement sensor; High precision; Temperature compensation

OCIS Codes: 060.2370; 060.3735; 280.6780; 280.4788

0 引言

光纤布拉格光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)位移传感器具有成本低、响应快、抗电磁干扰能力强等优点而受到人们的关注。然而,由于FBG对温度和应力都敏感,光纤材料和固定的结构限制了FBG位移测量的最大量程、位移灵敏度以及可适用环境,因此,研究传感器的封装结构和温补性能对量程、位移灵敏度和适用环境,具有针对性的指导意义^[1-3]。

近年来,FBG位移传感器主要应用于结构位移监测以评估结构的变形、开裂及损伤情况^[4-7]。2013年,蒋善超等利用FBG和弹簧组合实现位移测量,该传感器的位移灵敏度为267 pm/mm,线性度为0.99^[8]。2017年,郭永兴等利用FBG、悬臂梁和楔形结构结合方式来测量位移,该传感器的位移灵敏度为20.11 pm/mm,范围为0~100 mm^[9]。同年,LI Tianliang等利用FBG和三点应力测试原理实现了亚微米位移测量,该传感器的位移灵敏度为2 086.27 pm/mm,范围为1~2 mm,分辨率为0.48 μm^[10]。利用FBG位移传感器虽然可以进行高精度的位移测量,但是一些封装方法仍不适用于温度变化速率大的环境,因此研究实时温度补偿的方法和技术具有重要的价值^[11-14]。

目前常用的温度补偿方法有参考光栅法和双光栅差分输出法。使用参考光栅法补偿温度的传感器封装结构简单,但是存在着中心波长差、响应滞后,以及在温度变化环境下的最大温补误差大的问题。双光栅差分输出法可以解决响应滞后及最大温补误差大的问题,但是要求弹性基板同时具备正负形变,封装结构比较复杂。考虑到传感器的封装结构,本文提出一种基于参考光栅温度补偿法的高精度FBG位移传感器。为了解决FBG传感器中心波长差响应滞后和最大温补误差大的问题,根据材料热力学原理对引起FBG中心波长变化的各种因素,包括石英光纤与衬底材料的热膨胀性质进行了深入细致的研究。

因为采用参考光栅法在一根光纤上串联两个FBG的位移传感器中配备的温度补偿FBG一般都是粘贴于传感器铝合金管的内壁,所以本文简化了封装结构,将其粘贴于内壁的高封装要求简化为以粘贴于铝合金管中,分析了传感器的位移灵敏度,线性度,重复性误差,迟滞性误差。考虑到封装结构的温度补偿效果,本文研究了FBG的衬底材料(如石英玻璃衬底,铝合金衬底,不使用衬底)对石英光纤热膨胀性质和温度补偿的影响,探讨了当温度变化时FBG中心波长值的最大变化量以及中心波长稳定所需要的时间。这些研究对FBG传感器的封装及数据处理提供参考。

1 位移与温度检测原理及实验

1.1 基本原理

图1是本文设计的温度补偿光纤光栅位移传感器示意图。首先,将串联的FBG1和FBG2中的一个悬空拉直,另一个粘贴于石英玻璃管中。当滑块移动时,弹簧会变形产生弹力作用在石英玻璃管上。其中,

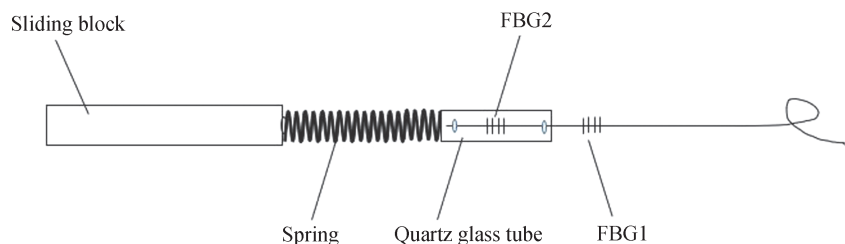


图1 本文设计的FBG位移和温度补偿传感器示意图(FBG1:位移;FBG2:温度)

Fig.1 Schematic diagram of FBG displacement and temperature compensation sensor designed in this paper (FBG1: displacement; FBG2: temperature)

FBG2采用两点方式粘贴于石英管中,当弹簧力作用在石英管上时几乎无形变产生。而FBG1受到轴向力作用时将产生较大的形变。由于FBG2采用刚性连接,其形变量与基底的热膨胀系数、弹性系数和光纤的热光系数,热膨胀系数与弹光系数有关。本文将封装FBG2的管状结构统称为衬底。

当忽略弹簧和石英衬底自重时,根据材料力学原理其作用在FBG1上的应变表达式为^[15-16]

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{k \times \Delta x}{\pi \times r^2 \times E} \quad (1)$$

式中, k 为弹簧的弹性系数, Δx 是相对位移, σ 为轴向应力, r 为包层半径, E 为纤芯的杨氏模量。可以得到理论位移灵敏度为

$$k_x = \varepsilon \times k_\varepsilon = \frac{k}{\pi \times r^2 \times E} \times k_\varepsilon \quad (2)$$

式中, k_ε 为FBG1的应变系数。

FBG1和FBG2中心波长的变化关系式分别由式(3)和(4)表示为

$$\Delta\lambda_1 = k_{T1} \times \Delta T + k_\varepsilon \varepsilon \quad (3)$$

$$\Delta\lambda_2 = k_{T2} \times \Delta T \quad (4)$$

式中, k_{T1} 为FBG1的温度灵敏度, k_{T2} 为FBG2的温度灵敏度。

当无位移产生时,可得到 k_{T1} 和 k_{T2} ;当温度保持不变时,可获得 k_ε 。根据 k_{T1} 和 k_{T2} 可以得到温度比值 k 为

$$k = \frac{k_{T1}}{k_{T2}} \quad (5)$$

经过性能校准,可以得到 k 和 k_ε 。由式(3)、(4)、(5)可以得到位移与中心波长的变化表达式为

$$\frac{\Delta\lambda_1}{\Delta x} = Ax + b \quad (6)$$

式中, A 和 b 为常量,可知中心波长和位移量成正比。

1.2 测试系统

本文的FBG2采用401胶固定于石英衬底中,FBG1采用PVC套管固定,FBG1与FBG2距离约3 cm,最后将封装完的传感器通过支座固定在位移台上。图2为光纤光栅位移传感系统测试示意图,主要包括光纤光栅便携式解调仪、位移测试平台、电阻炉温控制器(OVEN LCO 102, Ecom)和PC终端。其中,解调仪为4通道,每个通道支持16个传感数据,监测的波长范围为1 528~1 568 nm,解调精度为 ± 2 pm,分辨率为1 pm;采样频率可以设置为3 Hz、100 Hz、1 kHz,工作温度为 -25°C ~ 60°C ;位移测试平台采用两个光学位移平台,螺旋测微仪测量精度为0.01 mm;电阻炉温控制器的视在功率为45 VA,精度为 0.1°C ,升温速度为 $6^\circ\text{C}/\text{min}$,温度设定范围为室温~ 99°C 。

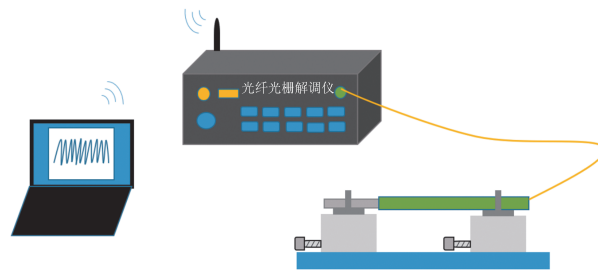


图2 FBG位移和温度补偿传感系统测试示意图

Fig.2 Test diagram of FBG displacement and temperature compensation sensor system

位移测量采用旋转螺旋测微仪模拟微位移的场景,测量精度0.01 mm。设置步长为1 mm,逐步增加到10 mm后,以相同步长返回并重复3次。解调仪选用20 Hz频率记录中心波长的数值。评估传感器的性能指标包括线性度、迟滞性和可重复性。线性度定义为测试结果与拟合结果的最大差除以输出范围,迟滞性定义为正行程和负行程的测试结果的最大差除以输出范围,重复性定义为同一位移量处中心波长偏移的最大偏差除以输出范围,最大偏差可以由标准差表示为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \quad (7)$$

式中, y_i 为实际位移, \bar{y} 为平均实际位移。最终的静态误差可以由非线性误差、迟滞误差和重复性误差来表示为

$$e_s = \sqrt{e_l^2 + e_h^2 + e_r^2} \quad (8)$$

温度测试采用电阻炉温控制器模拟变温环境。初始位移设置为 5 mm, 初始温度为 18.3°C, 随后依次将该电阻炉温控制器的温度设定在 25、35、45 及 55°C, 每一个温度测试点处停留半小时, 解调仪选用 20 Hz 频率记录中心波长的数值。

2 结果与讨论

图 3 是传感器实体的封装图。根据图 1 封装光纤, 石英衬底的位置会随着弹簧的拉力变化而发生水平位置上的移动。光纤的尾纤部分先用胶水将光纤粘贴在 PVC 套管中, PVC 套管和不锈钢管之间再用胶水粘贴, 最外层用胶带再次绑定固定。在实际测量中, 将两个支座固定在被测物体上, 左边的滑块和左边的支座固定, 且支座的移动拉伸滑块, 进一步的会拉伸弹簧并将弹簧的拉力作用在石英衬底上, 在光纤上会产生轴向上的应变。



图 3 光纤光栅位移传感器实物图
Fig. 3 Physical image of FBG displacement sensor

图 4 是光纤光栅传感器位移循环测试图。从图 4(a) 可以看到, 随着测试时间的增加, FBG2 波长没有变化, 漂移为零, 而 FBG1 的波长漂移呈现等腰三角形。由于 FBG2 对应力不敏感, 因此可用于温度的检测, 而 FBG1 对应力敏感, 且波长值在每个位移点都比较稳定, 根据 FBG2 测得的温度和 FBG1 的波长值可计算得到位移值。图 4(b) 为根据位移点对应的 FBG1 中心波长值拟合的位移特性曲线。基于 6 条拟合曲线可获得方程为 $y=0.145\ 08x+0.020\ 59$, 均值位移灵敏度 $k=145.08\ \text{pm/mm}$ 。由于解调仪的精度是 4 pm, 会对传感器的位移测量精度造成 0.28% 的误差, 假设不考虑温度的情况下, 弹簧的弹性模量 0.113 N/mm, 理论上的应力灵敏度系数 $k_s=1.2\ \mu\epsilon/\text{mm}$, 根据式(2)得到理论位移灵敏度为 147.33 pm/mm, 实验和理论值误差为 1.55%。

根据图 4 得到的拟合位移值与测定波长值的最大偏差为 0.021 nm, 输出范围为 1.472 nm, 正负行程测定值的最大偏差为 0.025 nm, 输出范围为 1.472 nm。因此, 可以推出该传感器的非线性误差 e_l 为 1.43%, 迟滞

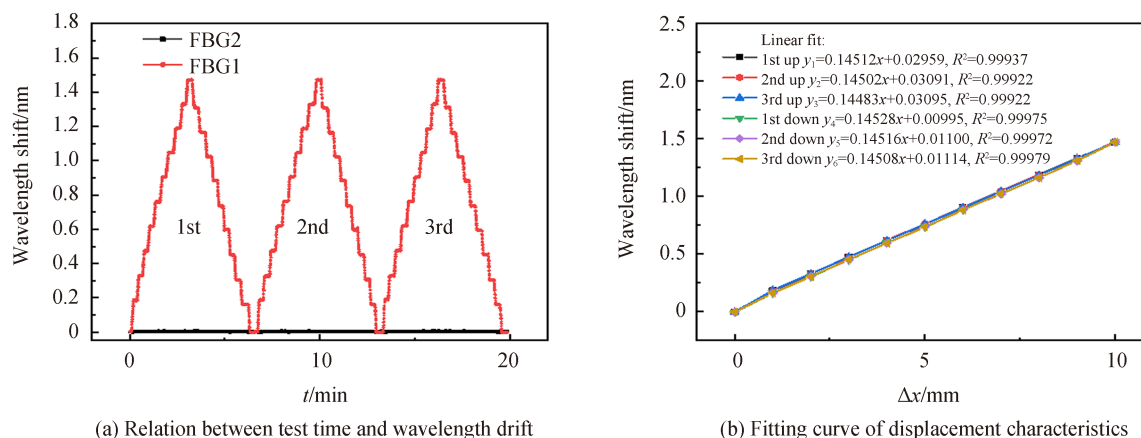


图 4 光纤光栅传感器位移循环测试
Fig. 4 Displacement cycle test diagram of fiber grating sensor

误差 e_H 为 1.70%。根据非线性误差可以得出该传感器的精度为 1.43%。根据传感器的位移灵敏度 $k=145.08$ pm/mm,可以得到测定位移值的最大偏差为 0.145 mm 和 0.172 mm。由于该传感器的波长分辨率为 1 pm,所以可以得出该传感器的位移分辨率高达 6.9 μ m。

表 1 给出了 FBG 位移传感器各个位移点的标准差计算结果。从表 1 可以看出,当位移为 8 mm 时,对应标准偏差最大,达 2.646×10^{-3} 。根据位移值,实际测试值和均值拟合曲线可以得到最大的波长差为 0.027 nm,输出范围为 1.472 nm。由此得到该传感器的重复性误差 e_R 为 1.83%。最终得到该传感器的静态误差为 2.88%,与 LI Chuang 报导的位移传感器^[15]相比,误差减小了 0.72%。

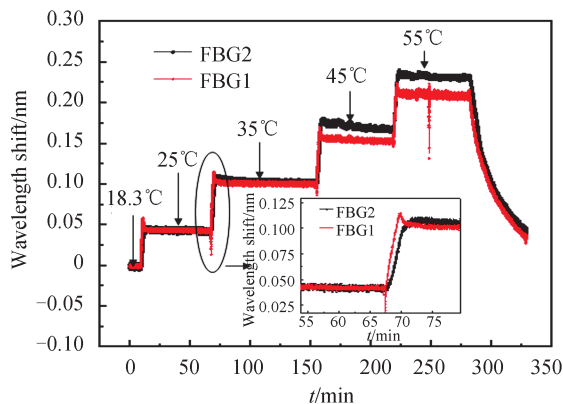
表 1 各位移点标准差计算分析表

Table 1 Table for calculation and analysis of standard deviation of each shift point

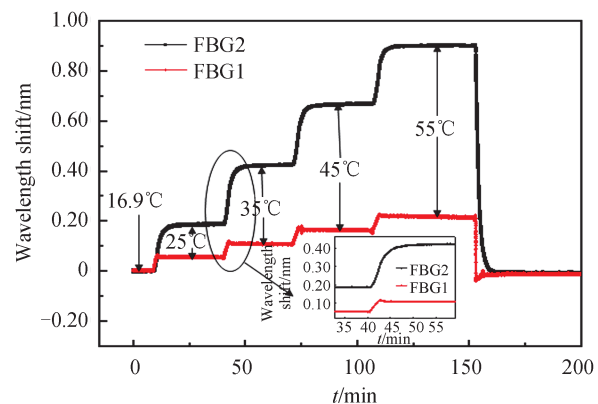
Displacement x /mm	Positive stroke deviation	
	$\Delta x / (\times 10^{-3} \text{ nm})$	
0	1.155	1.528
1	1.732	1.000
2	1.000	1.732
3	1.000	2.082
4	1.732	1.732
5	2.309	1.155
6	1.000	1.732
7	0.577	1.155
8	2.646	1.155
9	1.528	1.528
10	1.528	1.528

注:位移量程为 0~10mm。利用标准差找出最大位移值对应的位移点,通过位移点来确定最大位移值。

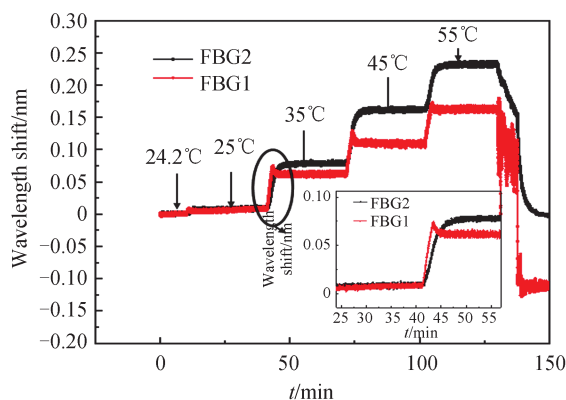
图 5 是不同衬底光纤光栅位移传感器的温度测试图。图 5(a) 是石英衬底在不同温度下的测试时间与波长漂移关系,插图表示温度 25~35 $^{\circ}$ C,范围 55~80 min 中心波长漂移量的情况。从图 5(a) 可以看到,FBG1 和 FBG2 对温度的敏感度相差不大,但在温度 25 $^{\circ}$ C~35 $^{\circ}$ C 范围内,随着温度的提高,FBG1 的中心波长漂移速度较 FBG2 更快。假设周围环境温度均匀的情况下,根据傅里叶热扩散定律得知受热物体的升温速度和受热物体的体积和接触空气的表面积有关^[14],两者的差异导致升温速率不同。另外,观察到 FBG1 的波长值有一段上升和下降的过程,这是因为电阻炉温控制器温度上升超过设定值。图 5(b) 是铝合金管衬底在不同温度下的测试时间与波长漂移关系,插图表示温度 25~35 $^{\circ}$ C,时间 35~60 min 中心波长漂移量的情况。从图 5(b) 可知,FBG2 比 FBG1 的温度灵敏度大,导致这种现象的原因是铝合金衬底的热膨胀系数远高于二氧化硅,当温度上升速率相同时,铝合金的膨胀速率更快,以至于 FBG2 的中心波长漂移速度更快。当温度从 25 $^{\circ}$ C 升至 35 $^{\circ}$ C 时,FBG1 的波长值仍然存在下降和上升的现象。图 5(c) 是不使用衬底在不同温度下的测试



(a) Test time and wavelength drift diagram of quartz substrate (inset: temperature 25~35 $^{\circ}$ C, range 55~80 min)



(b) Test time and wavelength drift of aluminum alloy tube substrate (inset: temperature 25~35 $^{\circ}$ C, range 35~60 min)



(c) Test time and wavelength drift diagram without substrate (inset: temperature 25~35°C, range 25~55 min)

图 5 不同封装材料的光纤光栅位移传感器温度补偿测试

Fig. 5 Test diagram of temperature compensation of FBG displacement sensor with different substrates

时间与波长漂移关系,插图表示温度 25~35°C,时间 25~55 min 中心波长漂移量的情况。从图 5(c)可以看出,FBG2 比 FBG1 的温度灵敏度大,导致这种现象的原因可能是自由悬挂的 FBG 会接触传感器表面,而传感器是铝合金材质的,会导致 FBG2 升温速度比 FBG1 升温速度快。在温度从 25°C 升至 35°C 时,FBG1 的波长值也存在下降和上升的现象。

图 6 是根据图 5 中温度点对应的波长漂移量得到的温度特性拟合曲线。由图 6 可知,石英衬底的 FBG 传感器温度灵敏度 k_{FBG2} 为 6.34 pm/°C, k_{FBG1} 为 5.72 pm/°C, FBG1/FBG2 的温度灵敏度比值 k_1 为 0.902 21。用铝合金管封装的 FBG 传感器温度灵敏度 k_{FBG2} 为 23.83 pm/°C, k_{FBG1} 为 5.68 pm/°C, 可知两个 FBG 的温度灵

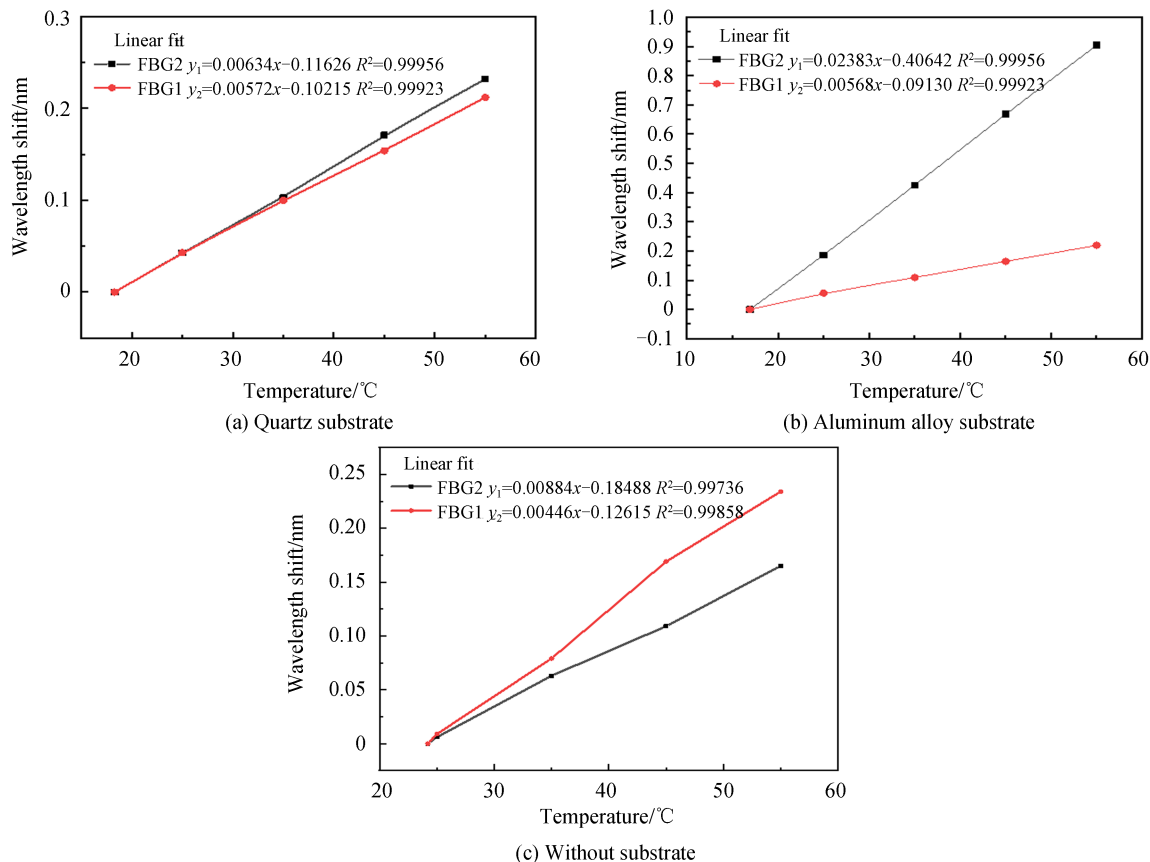


图 6 光纤光栅位移传感器温度与波长漂移拟合曲线

Fig. 6 Fitting curve of temperature and wavelength drift of FBG displacement sensor

灵敏度比值 k_2 为 0.238 36。没有衬底的 FBG 传感器温度灵敏度 $k_{\text{FBG}2}$ 为 8.84 pm/°C, $k_{\text{FBG}1}$ 为 4.46 pm/°C, 可知两个 FBG 的温度灵敏度比值 k_3 为 0.504 52。由此分别得出对于石英衬底、铝合金衬底和不使用衬底的三种位移传感器的波长漂移方程分别为

$$\Delta\lambda_{\text{displacement1}} = \Delta\lambda_1 - 0.90221\Delta\lambda_2 \quad (9)$$

$$\Delta\lambda_{\text{displacement2}} = \Delta\lambda_1 - 0.23836\Delta\lambda_2 \quad (10)$$

$$\Delta\lambda_{\text{displacement2}} = \Delta\lambda_1 - 0.50452\Delta\lambda_2 \quad (11)$$

根据式(9)、(10)、(11)分别得到石英衬底、铝合金衬底和无衬底的光纤光栅位移传感器的温度补偿误差分析,如图7和表2所示。根据表2可以得出,当温度开始上升时,FBG1与FBG2之间的波长差迅速增大,

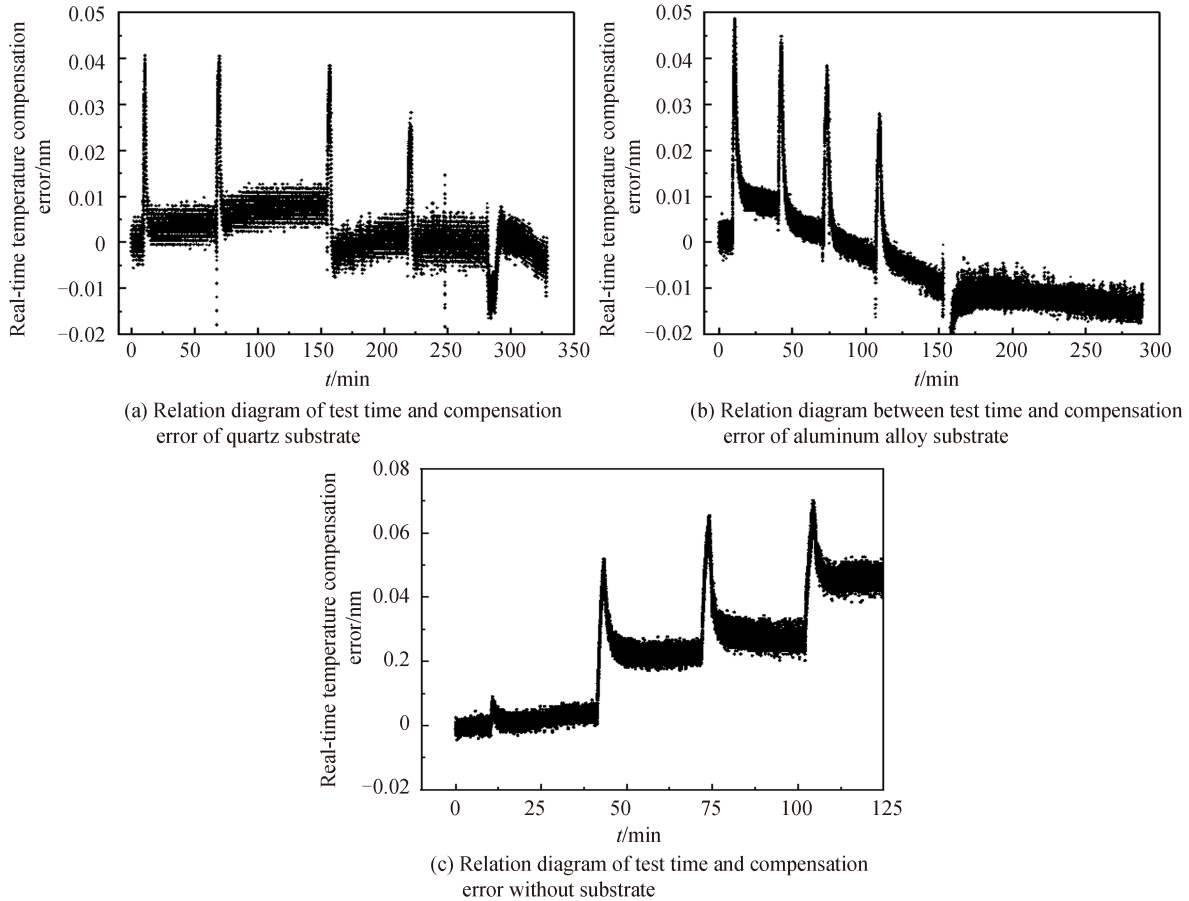


图7 光纤光栅位移传感器温度补偿误差

Fig. 7 Temperature compensation error diagram of FBG displacement sensor

表2 石英、铝合金作为衬底的位移传感器的温度补偿性能

Table 2 Temperature compensation performance of displacement sensors with quartz and aluminum alloy as substrates

Substrate	Heating period $T/^\circ\text{C}$	Maximum wavelength difference $\Delta\lambda/\text{pm}$	wavelength difference stabilization time t/min
Quartz tube	25~35	40	4.3
	35~45	38	3.9
	45~55	26	4.1
Aluminum alloy tube	25~35	44	5.8
	35~45	38	6.6
	45~55	27	6.8
Without substrate	25~35	47	5.3
	35~45	42	4.5
	45~55	39	4.8

石英衬底传感器的两个FBG的最大波长为40 pm,最高波长差的稳定时间为4.3 min;铝合金管衬底传感器的两个FBG的最大偏差为44 pm,最高波长差的稳定时间为6.8 min;无衬底传感器的两个FBG的最大偏差为47 pm,最高波长差的稳定时间为5.3 min。图7显示,当测试温度稳定后,补偿误差逐渐稳定,以石英管为衬底的传感器的两个FBG波长差值小于0.02 nm,以铝合金管为衬底的传感器的两个FBG波长差值小于0.03 nm,不使用衬底的传感器两个FBG波长差值小于0.06 nm。研究比较发现,利用石英衬底和不使用基底减小了温度变化过程中最大的波长偏差、波长差的稳定时间以及稳定后的补偿误差,但是用石英衬底的效果最好。

表3给出了不同温度条件下(25~55℃)光纤光栅位移传感器的绝对误差值。将传感器置于位移传感测量平台后,使传感器产生5 mm的位移并保持,但是在不同的温度环境下,传感器测得的位移值是不同的。可见在保持位移为5 mm的情况下改变环境温度,FBG传感器的实际测得的最大位移为5.013 mm,理论位移5 mm,偏差为0.013 mm,得到温度补偿后的误差为0.26%。从图7(a)中可以得出本文设计的传感器在温度稳定后,补偿计算后的中心波长误差值为±1.92 pm,即中心波长振荡的范围,说明传感器结构合理,与谭跃刚报道的传感器温度补偿误差值±2 pm^[3]比较,可以有效控制由温度带来的交叉敏感问题。

表3 石英衬底光纤光栅位移传感器的温补误差分析表
Table 3 Quartz substrate fiber grating displacement sensor temperature error analysis table

Temperature $T/^\circ\text{C}$	The theory of displacement	The actual displacement	Absolute deviation of hysteresis
	x_1/mm	x_2/mm	$\Delta x/\text{mm}$
25	5	5.008	0.008
35	5	5.013	0.013
45	5	4.994	0.006
55	5	5.007	0.007

注:保持位移为5 mm

3 结论

本文设计并制作了一种结构简单、精度高,且具有温度补偿的位移和温度双参量光纤光栅传感器,获得了整体的线性度、重复性和迟滞性误差较小的微位移测量能力,相应的灵敏度为145.08 pm/mm,精度为1.43%,误差为1.55%,静态综合相对误差为2.88%,量程为10 mm;进一步实验发现,利用石英玻璃做衬底的传感器温度补偿后的误差仅为0.26%,其温度补偿时延方面以及最大补偿误差方面明显优于铝合金衬底和不使用衬底。本文设计并制作的传感器具有体积小,制作简单,精度高,位移分辨率高等特点,有望在结构健康监测微位移精确测量中发挥重要的作用。

参考文献

- [1] YAZDIZADEH Z, MARZOUK H, HADIANFARD M A. Monitoring of concrete shrinkage and creep using fiber Bragg grating sensors[J]. Construction and Building Materials, 2017, 137:505-512.
- [2] LV Guohui, ZHOU Boning, WANG Chaozheng, et al. Fiber grating displacement sensor based on elliptical mechanical amplification structure [J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(11):1106002.
吕国辉,周泊宁,王朝钲,等. 基于椭圆位移放大结构的光纤光栅位移传感器[J]. 光子学报, 2018, 47(11): 1106002.
- [3] TAN Yuegang, CHEN Yujia, LI Ruiya, et al. High-precision bow-shaped fiber Bragg grating micro-displacement sensors [J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(3):556-564.
谭跃刚,陈宇佳,李瑞亚,等. 高精度弓型光纤光栅微位移传感器[J]. 光学精密工程, 2018, 26(3):556-564.
- [4] FU Jianjun, GUO Yongxing, LI Peng. A fiber Bragg grating anchor rod force sensor for accurate anchoring force measuring [J]. IEEE Access, 2020, 8:12796-12801.
- [5] HU Dongtao, GUO Yongxing, CHEN Xianfeng, et al. Cable force health monitoring of tongwamen bridge based on fiber Bragg grating[J]. Applied Sciences, 2017, 7(4):384-384.
- [6] XIONG Li, JIANG Guozhang, GUO Yongxing, et al. A three-dimensional fiber Bragg grating force sensor for robot[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(9):3632-3639.
- [7] ZHU Wanxu, SHEN Wanxi, TAN Heying. Research and application of FBG monitoring technology in internal prestressed steel strand [J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(2): 0206002.
朱万旭,沈全喜,覃荷瑛. 体内预应力钢绞线光纤光栅监测技术及其应用[J]. 光子学报, 2019, 48(2): 0206002.
- [8] JIANG Shanchao, WANG Jing, DUO Qingmei, et al. Developing of micro FBG displacement sensor and its application to

- model experiment [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2013, 33(3): 348-353.
- 蒋善超,王静,隋青美,等. 微型FBG位移传感器研制及其在模型试验中的应用[J]. *防灾减灾工程学报*, 2013, 33(3): 348-353.
- [9] GUO Yongxing, LIU Wenlong, XIONG Li, et al. Fiber Bragg grating displacement sensor with high abrasion resistance for a steel spring floating slab damping track[J]. *Sensors*, 2018, 18(6): 1899-1899.
- [10] LI Tiangliang, SHI Chaoyang, REN Hongliang. A novel fiber Bragg grating displacement sensor with a sub-micrometer resolution[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(14): 1199-1202.
- [11] CUI Liuzhu, JIANG Yi, LIU Youhai. A fiber optic displacement sensor with temperature compensation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(11): 1667-1670.
崔留住,江毅,刘有海. 具有温度补偿的光纤位移传感器[J]. *光子学报*, 2011, 40(11): 1667-1670.
- [12] ZHANG Jinlong, YU Chongxiu, WANG Kuiru, et al. Displacement sensor with temperature compensation based on chirp fiber grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(4): 779-782.
张锦龙,余重秀,王葵如,等. 基于啁啾光纤光栅的温度自补偿位移传感器[J]. *光学学报*, 2008, 28(4): 779-782.
- [13] GUO Yongxing, KUANG Yi, XIONG Li, et al. Sensing and temperature-compensation characteristics of fiber Bragg gratings under different packaging ways [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(11): 99-106.
郭永兴,匡毅,熊丽,等. 不同封装方式的光纤光栅传感与温补特性[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(11): 99-106.
- [14] XIONG Li, JIANG Guozhang, GUO Yongxing, et al. Investigation of the temperature compensation of FBGs encapsulated with different methods and subjected to different temperature change rates [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(3): 917-926.
- [15] LI Chuang, SUN Li, XU Ziqiang, et al. Experimental investigation and error analysis of high precision FBG displacement sensor for structural health monitoring [J]. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2020, 20(6): 2040011.
- [16] HER S C, LIN W. Simultaneous measurement of temperature and mechanical strain using a fiber Bragg grating sensor[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2020, 20(15): 4223-4233.