

文章编号 1004-924X(2018)06-1330-08

温度解耦增敏式光纤光栅应变传感器

张开宇^{1,2}, 闫光^{1,2}, 孟凡勇^{1,2}, 祝连庆^{1,2*}

(1. 北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100192;

2. 光电信息与仪器北京市工程研究中心, 北京 100016)

摘要: 飞机载荷参数测试对保障飞行安全至关重要, 光纤光栅传感器凭借诸多优势在不断尝试应用在其中。为了实现结构应变的精确测量, 同时排除温度带来的影响, 通过对基底及光栅刻写工艺的特殊设计, 实现了温度解耦增敏式光纤光栅应变传感器, 并对基底进行有限元分析。在 10~60 °C 的温度范围内, 该新型传感器温度灵敏度为 45 pm/°C, 较裸光纤光栅增敏 4.5 倍, 线性度良好。在 MTS 拉伸试验机上测试拉伸试验件在 0~700 $\mu\epsilon$ 条件下传感器特性, 灵敏度为 1.46 pm/ $\mu\epsilon$, 较裸贴方式增敏 1.4 倍, 线性度良好。传感器温度误差小于 0.1 °C, 应变误差小于 3 $\mu\epsilon$ 。实验结果表明, 传感器解耦性能良好, 与理论分析相符, 满足飞机载荷谱测试的应用背景。

关键词: 应变传感器; 光纤光栅; 温度解耦; 线性度; 灵敏度; 重复性

中图分类号: TN253; TP212.12 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182606.1330

Temperature decoupling and high strain sensitivity fiber Bragg grating sensor

ZHANG Kai-yu^{1,2}, YAN Guang^{1,2}, MENG Fan-yong^{1,2}, ZHU Lian-qing^{1,2*}

(1. *Instrument Science and Optoelectronic Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China;*

2. *Beijing Engineering Research Center of Optoelectronic Information and Instruments, Beijing 100016, China)*

* *Corresponding author, E-mail: zhulianqing@sina.com*

Abstract: Aircraft load parameter testing is essential to ensure flight safety. Fiber grating sensors with several advantages are continuously being developed in the constant attempt to apply them in aircraft load parameter testing. To achieve accurate measurement of structural strain and exclude the effects of temperature, we developed high strain sensitivity and temperature decoupling in a fiber Bragg grating sensor via the fiber grating engraving process. Furthermore, we employed finite element analysis to develop special designs for the substrates. In the temperature range of 10–60 °C, a temperature sensitivity of 45 pm/°C was achieved for the new sensor that is 4.5 times higher than that of bare fiber gratings. In addition, good linearity was obtained. The sensor characteristics of the test systems were investigated using an MTS tensile testing machine under microstrains ranging between 0–700 $\mu\epsilon$. Good linearity and sensitivity of 1.46 pm/ $\mu\epsilon$ were obtained, the latter being 1.4 times high-

收稿日期: 2017-10-17; **修订日期:** 2017-11-03.

基金项目: 教育部创新团队发展计划资助项目 (No. IRT_16R07); 国家自然科学基金面上项目 (No. 51675053); 北京市教育委员会科技计划一般项目 (No. KM201611232005); 北京市教育委员会科技计划面上项目 (No. KM201511232021)

er than that obtained using surface adhesion method. The temperature and strain error of the sensor are observed to be less than 0.1°C and $3\mu\epsilon$, respectively. The experimental results confirmed the satisfactory temperature decoupling performance of the sensor that is consistent with theoretical analysis. Thus, the sensor can be used in aircraft load spectrum tests.

Key words: strain sensor; Fiber Bragg Grating (FBG); temperature decoupling; linearity; sensitivity; repeatability

1 引言

随着航空工业的发展和飞行器任务难度的增加,飞机的使用条件和承受环境越来越复杂,因此基于历史经验的“确定性门槛值”覆盖各种随机性因素影响的方法是不全面的^[1]。全面、合理的飞机载荷参数测试对保障飞行安全至关重要,在确定结构设计、定寿延寿等方面有着重要的意义。

在材料性能与结构力学性能领域,应变测量是最主要的测试指标^[2]。飞机机翼结构的受力检测普遍使用电测法,但大量的测试点导致线缆数量多、重量大、不易后期维护,另外线缆不能抗电磁干扰且寿命较短。因此,需要研制新的飞机载荷参数测试方法。光纤光栅传感器具有结构简单、易于组网、抗电磁干扰、高测量精度、波长编码等优点,能够满足飞机载荷参数测试的最终要求^[3]。在实际工程中,光纤光栅的封装方式以及测试手段是飞机载荷参数测试的研究重点。Lee Jr以波音737C商业客机1:25缩减机翼模型为测试对象,两个重新涂覆的FBG嵌入机翼蒙皮来测量在实时风洞试验下机翼的动态应变,试验中三种类型的传感器(FBG、电应变仪和PZT传感器)之间一致性很好,FBG应变传感器的分辨率优异($<5\mu\epsilon$),可以检测高达100 Hz的频率响应^[4]。Ryu等人研究了飞机机翼盒段复合材料内置的结构诊断系统,4路共24个FBG传感器嵌入单翼的结构部件中,3个FBG阵列传感器线嵌入到蒙皮顶部,1个FBG阵列传感器线嵌入翼盒的前翼梁,在弯曲载荷下进行测试,模拟飞机机翼升力产生的弯曲效果,实现智能复合机翼盒的原位诊断^[4]。Kim等人在轻型飞机主翼上安装了24个光纤光栅传感器,进行地面载荷标定后,飞行测试中机翼结构的应变和温度响应成功地转换成飞行历史载荷^[5]。陈勇等人在四边筒支薄板结构中布置了两组光纤光栅 45° 应变花,对载荷冲

击点进行定位和测量^[6]。美国NASA与其他机构合作研究使用780支光纤光栅传感器测量5.5 m超轻大尺寸碳复合材料飞行器的机翼偏转、机翼形状和面外载荷^[7]。目前,飞机载荷测试取得了一定实质性进展,但对于飞行器结构上部分非敏感关键结构的应变测量却鲜有有效方法。

本文设计了一种能够在一定范围内精确测量结构件应变的基片式光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感器,改进了传统的应变传感器工艺,使传感器能够同时精确测量环境温度,达到解耦的目的,并在实验室环境对传感器进行标定,测试传感器的拉伸压缩性能。该温度解耦增敏式应变传感器能够为机翼机构的拉伸和压缩提供精确有效的测试手段。

2 理论基础

拉压和弹光效应产生的应变也可以引起光栅周期和有效折射率发生变化。当反射波长变化时,应变量和中心波长的相对变化量关系如下^[8-10]:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} + \frac{\Delta n}{n}, \quad (1)$$

式中: Δn 为折射率变化; $\Delta\Lambda$ 为栅距变化。其中,光纤产生应变时折射率的变化可表示为:

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{1}{2} n^2 [(1-\mu)P_{12} - \mu P_{11}] \epsilon = -P\epsilon, \quad (2)$$

其中: $1/P = n^2((1-\mu)P_{11} - \mu P_{12})$, ϵ 为光栅的轴向应变, P 为泊松比。假设:

$$\frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} = \frac{\Delta L}{L} = \epsilon, \quad (3)$$

因此,式(1)可写为:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = (1-P)\epsilon. \quad (4)$$

对于典型的石英光纤: $n=1.46$, $\mu=0.16$, $P_{11}=0.12$, $P_{12}=0.27$,则 $P=0.22$, $\Delta\lambda/\lambda=0.78\epsilon$, 1550 nm的FBG应变灵敏度为 $1.2\text{ pm}/\mu\epsilon$ 。

在该设计中,为了提高解耦精度,使用增敏式温度测量原理,通过温度标定测定温度增敏系数为 K_a ,通过对基底结构的特殊设计可以实现:(1)FBG1 为参考光栅对温度的增敏测量;(2)FBG2 同时对温度和应变敏感,完成对温度增敏系数 K_a 和应变灵敏系数 K_b 两个参量的增敏测量。两个光纤光栅的相对中心波长的波长差随应变的增加而增加,因此既可以实现对光纤光栅的温度补偿,又可以实现温度和应力的同时测量。其原理可表示为:

$$\begin{cases} \Delta T = \frac{\Delta \lambda_{B1}}{K_T \cdot K_a} \\ \Delta X = \frac{K_a \cdot \Delta \lambda_{B2} - \Delta \lambda_{B1}}{K_X \cdot K_a \cdot K_b} \end{cases}, \quad (5)$$

其中:常数 K_X 是光纤光栅的应变灵敏系数,与光纤泊松比、弹光系数和纤芯的有效折射率有关;常数 K_T 为光纤光栅的温度灵敏系数,与热膨胀系数和热光系数有关。

3 传感器设计及其有限元分析

3.1 传感器设计

该传感器设计的目的在于:(1)实现对应变的高精度测量,提高应变增敏倍数;(2)实现对温度的高精度测量,提高传感器对温度的解耦精度。结合设计目的、理论分析和参考力学建模,本文设计的传感器结构如图 1 所示。

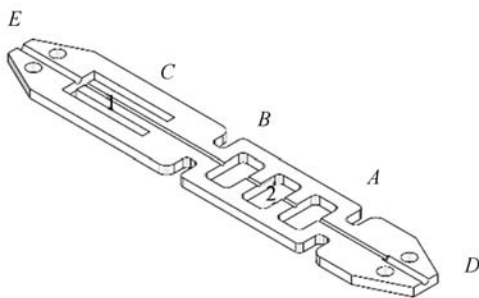


图 1 光纤光栅传感器结构设计

Fig. 1 Structure design of FBG sensor

由于传感器设计目的的特殊性,根据结构尺寸,在实验室采用准分子激光器在同一根光纤上刻写两处栅区长度为 5 mm、中心间距为 20 mm 的光纤光栅,并保证两处光纤光栅的中心波长差不小于 2 nm。在传感器受到拉伸形变后,光纤光栅的中心波长增大,为了防止传感器在拉伸状况下发生啾啾

现象,将实现应变测量,即中心波长较大的光纤光栅封装在图示 2 位置;将实现温度测量,即中心波长较小的光纤光栅封装在图示 1 位置。

选取热胀冷缩系数较大、拉伸压缩性能较好的航空铝合金 7075-T6 为基底材料。将基片棱角处妥善打磨,在超声波清洗槽中充分清洁。为减少传感器后期的蠕变以及提高传感器的传递效率,选用常温下固化的 DP420 环氧树脂低温胶,其主要特征参数如表 1 所示^[11]。

表 1 环氧树脂胶 DP420 的主要参数

Tab. 1 Main parameters of epoxy glue DP420

名称	详细参数
“A”组分与“B”组分	2 : 1
在 150 rpm/24 °C	45 000c/s
重叠剪切强度	24,4500psi

准分子激光器刻写光栅,在使用同一块掩模板的情况下,在 30 mm 光纤开窗内,通过调节光纤夹持平台给予光纤不同的预紧力,刻写两段长度为 10 mm,中心间距为 15 mm,不同中心波长的光纤光栅,常温下本实验刻写光栅的中心波长分别为 1 534.760 nm 和 1 537.652 nm。

在封装过程中,通过可调夹具,施加预紧力使两光栅中心波长均增大 1 nm,在图示 A、B 位置处点适量 DP420,在 C 处采用全覆盖式封装。在点胶完成后,室温状态下静置 24 h,随后在两侧套光纤保护套管并固定,完整封装的高温解耦精度增敏式应变光纤光栅传感器如图 2 所示。



图 2 裸封光纤光栅与封装完成的传感器

Fig. 2 Photo of bare fiber grating and encapsulated sensor

根据理论分析及设计目的,传感器粘贴在被测物体表面,粘贴点为 D、E 两处。通过基底的特殊形状设计,材料拉伸 DE 段产生的形变承载到基底 AB 段,实现应变增敏。

3.2 传感器的有限元分析

有限元分析法被广泛应用于力学结构测试范畴,主要用来求解线性结构问题^[12-13]。对传感器进行模拟拉伸测试时,首先进行网格化划分,如图 3 所示。



图 3 有限元分析网格化划分示意图

Fig. 3 Elementary analysis of FBG sensor in finite element analysis

采用 SolidWorks 中的 simulation 插件进行分析^[14],模拟加载过程中固定传感器一端,另一端施加拉力,以此模拟当黏附传感器的被测物表面发生拉伸时传感器的受力状态。对基片施加载荷并进行有限元分析,结果如图 4 所示。

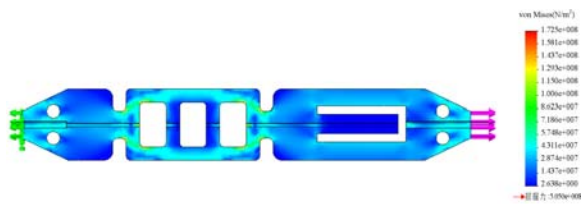


图 4 传感器有限元分析受力云图

Fig. 4 Force nephogram of FBG sensor in finite element analysis

根据受力云图可以得出,传感器发生拉伸应力变化时,基底变形集中在 A、B 两点之间,形成应力集中;C 处不会受到传感器拉伸带来的任何影响,即不发生形变。从受力分析的角度,认为该传感器基底的设计能够达到预期的目的。

4 传感器标定试验系统及分析

4.1 温度增敏效果测试及分析

为了对制备完成的传感器进行性能测试,首先采用如图 5 所示的实验系统标定传感器的温度模块^[15]。

为了判断传感器温度模块的增敏效果,串接同材质中心波长为 1 544 nm 的光纤光栅,在同样

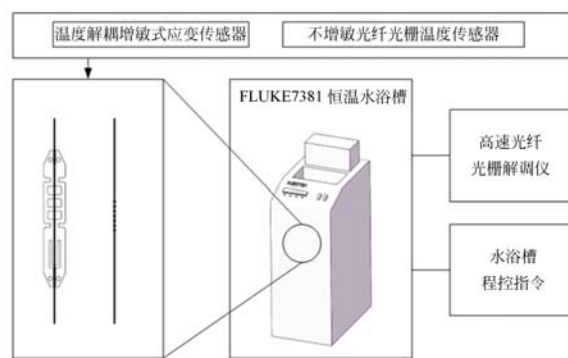


图 5 传感器温度模块标定实验

Fig. 5 Calibration experiment of sensor temperature module

的温度环境下进行标定。实验器材主要有宽带光源 (Amplified Spontaneous Emission, ASE),带宽 1 525 nm~1 570 nm,平坦度为 2 dB,Ibsen 解调仪系统对光纤光栅中心波长的解调精度为 0.5 pm,能够自动温度补偿;FLUKE7381 高精度恒温水浴槽,提供稳定的温度环境,该型水浴槽热平衡时间短、温度波动性小、均匀性好,温度测量模块采用 Pt1000 热电偶,精度为 0.01 ℃。

宽谱光从光源发出后,经 3 dB 耦合器(插入损耗)入射到光纤光栅,光纤光栅受外界温度影响产生线性热光效应和热胀冷缩,采用 Ibsen 解调仪采集传感器反射光谱,通过上位机软件进行寻峰解调,得出反射光的中心波长。

温度标定实验选取水浴槽程控温度循环方式,在 10~60 ℃,间隔 10 ℃取一个温度稳定点,稳定 30 min,循环模式为持续循环。对稳定点的中心波长进行拟合以及偏差处理,测试传感器温度测量模块的线性度和重复性,解调仪采集频率设置为 10 Hz,循环次数为 3。图 6 为温度模块在循环中的相对采集次数和中心波长的拟合关系曲线,图 7 为参考光纤光栅在循环中的相对采集次数和中心波长的拟合关系曲线。

通过拟合得出传感器温度与中心波长的函数关系为:

$$\lambda = 0.045 T + 1\ 533.635; R^2 = 0.999. \quad (6)$$

在考察温度解耦增敏式应变传感器的温度增敏效果、线性度及重复性的过程中,以 10 ℃时采集的光纤光栅中心波长为零点,通过算法依次求得每个温度稳定点传感器反射中心波长与零点的偏移量,使用 Origin 9.0 数据处理软件对采集到的中心波长与温度进行线性拟合,图 8 为两支传

感器各温度点偏移量与温度的拟合曲线,式(7)为两条曲线的拟合函数, $\Delta\lambda$ 单位为 pm。

$$\begin{cases} \Delta\lambda_1 = 44.959T - 417.058; R^2 = 0.999 \\ \Delta\lambda_2 = 10.081T - 101.156; R^2 = 0.998 \end{cases} \quad (7)$$

由此可知,温度模块增敏效果明显,增敏倍数为 $44.959/10.081=4.5$ 倍,且线性度良好。为了考察温度解耦增敏式应变传感器温度测试的重复性,将第一循环作为温度基准,求第二、三循环所采集数据的相对偏移量,结果如图 9 所示。

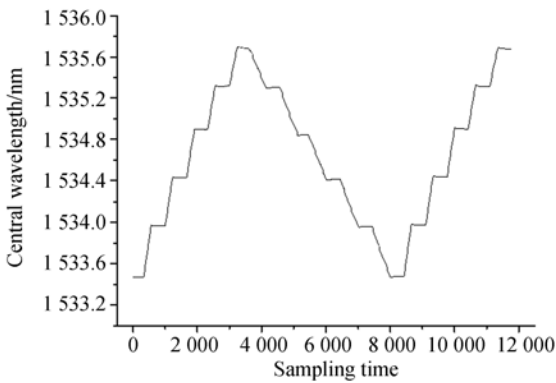


图 6 传感器温度模块中心波长与采集次数的关系曲线
Fig. 6 Relation between central wavelength of the temperature module and acquisition times of FBG sensor

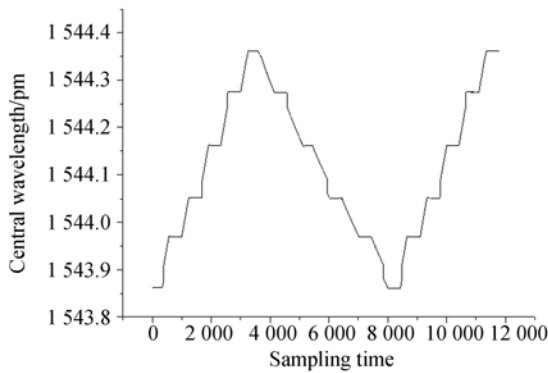


图 7 参考光纤光栅中心波长与采集次数的关系曲线
Fig. 7 Relation between central wavelength of reference fiber grating and acquisition times

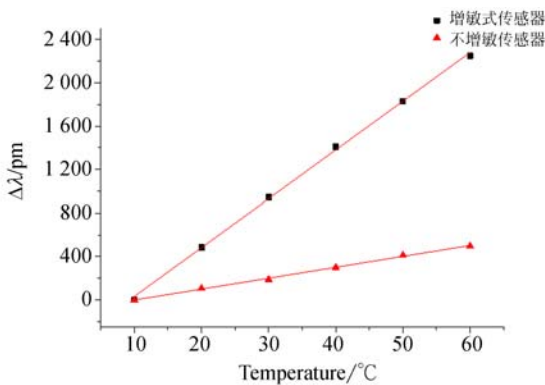


图 8 温度传感器中心波长偏移量与温度的关系曲线
Fig. 8 Relation between offset of central wavelength and temperature

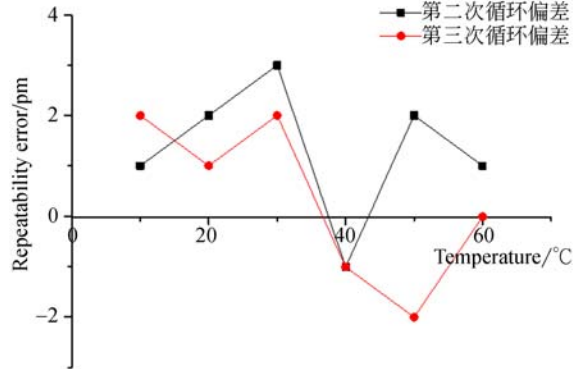


图 9 温度解耦增敏式应变传感器温度重复性偏差曲线
Fig. 9 Temperature repeatability errors of temperature decoupling enhanced strain sensor

由图 9 可知,各温度点所采集的中心波长的最大偏差范围为 ± 4 pm,该误差对温度采集带来的影响不超过 0.1°C ,认为在合理范围内,该设计可行。

4.2 应变增敏效果测试及分析

为了测试传感器的增敏效果,搭建如图 10 所示的试验系统,采用 MTS 拉伸试验机,与传感器贴在同一水平截面的高精度 KYOWA 应变片采集的数值为标准应变值,并采用同样性能电阻应变片组建板桥一对一补偿式电路,与同一水平截面裸封装参考光纤进行对比^[16]。搭建试验系统如图 10 所示。

在采集过程中,选取 45 号钢为拉伸试验件,根据拉伸件的杨氏模量以及横截面积尺寸,要达到 $500 \mu\epsilon$ (微应变),需要施加 8 000 N 的夹持拉力^[17]。实验器材主要有 Sigma 高精度应变测试仪,最小分辨率为 $1 \mu\epsilon$,最大采集频率为 500 Hz; MTS 拉伸试验机,最大拉力为 250 kN;温度标定环节相同的平坦宽带光源以及 Ibsen 高速解调模块。

为了获得连续时间情况下应变和中心波长的同步变化规律,针对 Sigma 高精度应变测试仪以及 Ibsen 高速解调模块的上位机软件,通过编写

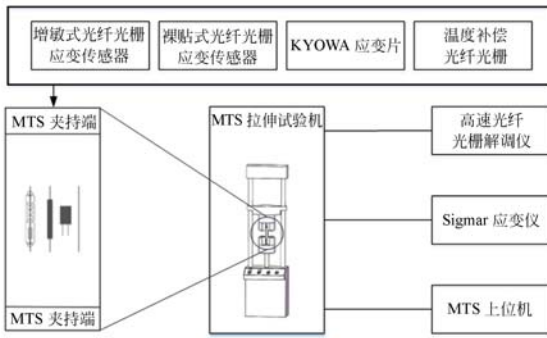


图 10 应变标定实验系统

Fig. 10 Strain calibration experiment system

LabVIEW 软件实现传感器应变和中心波长的同步采集存储。

在采集过程中,程控设置拉伸试验机,在给予初始 2 000 N 拉力的条件下,以 1 000 N 为步进,逐级递增至 10 000 N,做拉-压-拉-压两个循环,通过读取应变片的输出数值,实测拉力与应变之间的关系,如图 11 所示。

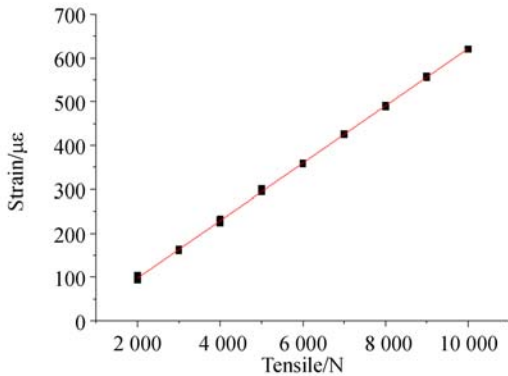


图 11 拉力与构件的应变关系曲线

Fig. 11 Relation curve of tensile and structural strain

拟合函数为:

$$\epsilon = 0.065 F - 33.635; R^2 = 0.999. \quad (8)$$

在考察增敏式应变传感器的增敏效果、线性度及重复性的过程中,在与增敏式应变传感器的同横截面位置裸贴中心波长不同的光纤光栅,得出不增敏情况下光纤光栅测应变的灵敏度系数,同时采用串联温度补偿光纤光栅的方法,排除温度参量对测试结果的影响,如图 10 所示。通过算法排除环境温度的影响,将拉力值与增敏式应变传感器的反射中心波长进行最小二乘拟合,得出其关系曲线如图 12 所示,拟合函数及线性度为式(9),线性度判定系数 $R^2 = 0.999$,线性度良好。

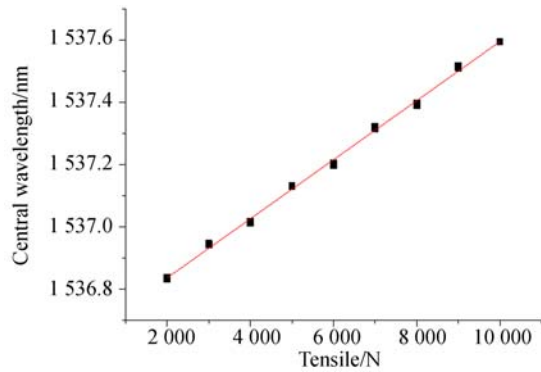


图 12 拉力与增敏式应变传感器中心波长的关系曲线

Fig. 12 Relation between tensile and central wavelength of strain sensitive strain sensor

$$\lambda = 9.47 \times 10^{-5} F + 1537.646; R^2 = 0.999. \quad (9)$$

结合式(8),得出增敏式应变传感器中心波长与基底所受应变之间的关系函数为:

$$\lambda = 1.46 \times 10^{-3} \epsilon + 1537.696. \quad (10)$$

增敏效果及重复性是考察传感器性能的重要指标,通过算法排除环境温度影响后,将两支不同性能的应变传感器在两次拉伸压缩循环所采集的反射中心波长数据进行算法处理,得出稳定点中心波长与拉力值 2 000 N 时中心波长的偏差量,并分别进行最小二乘拟合,考察两曲线斜率倍数及各稳定情况下,拟合函数如图 13 所示。

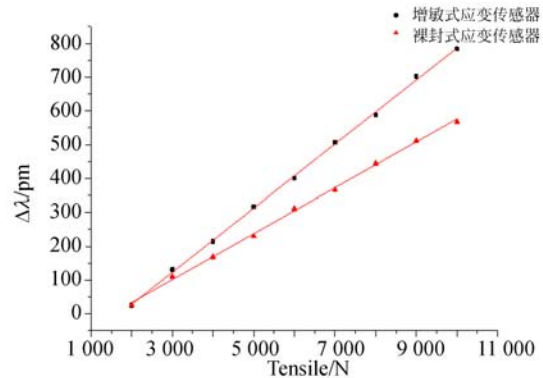


图 13 拉力与光纤光栅中心波长偏移量关系曲线

Fig. 13 Relation between tensile and central wavelength offset of fiber grating

拟合函数为:

$$\begin{cases} \Delta\lambda_1 = 0.095 F - 160.809; R^2 = 0.998 \\ \Delta\lambda_2 = 0.068 T - 101.778; R^2 = 0.999 \end{cases}. \quad (11)$$

分析拟合数据可知,增敏式应变传感器增敏效果明显,能够达到 $0.095/0.068 = 1.4$ 倍。同于温度重复性判定方法,将第一循环作为温度基准,

求第二、三、四循环所采集数据的相对偏移量,如图 14 所示。由图可知,增敏式应变传感器的重复

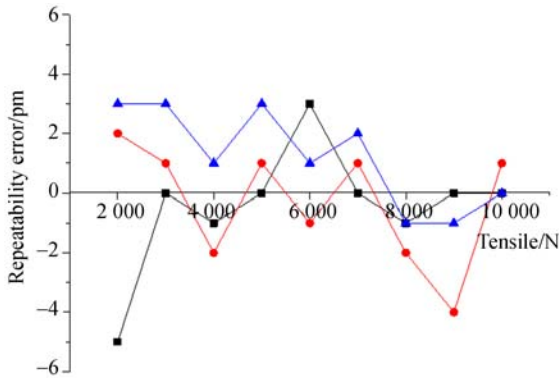


图 14 光纤光栅传感器应变重复性偏差曲线

Fig. 14 Strain repeatability error of FBG sensor

参考文献:

- [1] 李飞,周占廷,谢帅. 试验设计在飞机载荷谱飞行实测中的应用[J]. 航空科学技术, 2017, 28(4): 43-46.
LI F, ZHOU ZH T, XIE S. The application for design of experiment in aircraft load spectrum flight measurement [J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2017, 28(4): 43-46. (in Chinese)
- [2] 闫楚良. 飞机载荷谱实测技术与编制原理[M]. 北京:航空工业出版社, 2010: 5-6.
YAN CH L. *Aircraft load spectrum measurement technique and compilation principle* [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2010: 5-6. (in Chinese)
- [3] DAVIS C, TEJEDOR S, GRABOVAC I, *et al.*. High-strain fiber Bragg gratings for structural fatigue testing of military aircraft [J]. *Photonic Sensors*, 2012, 2(3): 215-224.
- [4] RYU C Y, LEE J R, KIM C G, *et al.*. Buckling behavior monitoring of a composite wing box using multiplexed and multi-channelled built-in fiber Bragg grating strain sensors[J]. *NDT & E International*, 2008, 41(7): 534-543.
- [5] KIM J H, SHRESTHA P, PARK Y, *et al.*. Application of fiber Bragg grating sensors in light aircraft: ground and flight test[C]. *23rd International Conference on Optical Fiber Sensors*, 2014: 91578V.
- [6] 陈勇,刘保林,刘焕淋,等. 基于光纤布拉格光栅的载荷定位与检测方法[J]. 机械工程学报, 2016, 52(18): 8-15.
CHEN Y, LIU B L, LIU H L, *et al.* Load location and measurement system based on fiber Bragg grating sensor [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(18): 8-15. (in Chinese)
- [7] NICOLAS M J, SULLIVAN R W, RICHARDS W L. Large scale applications using FBG sensors: determination of in-flight loads and shape of a composite aircraft wing [J]. *Aerospace*, 2016, 3(3): 18.
- [8] 何俊,周智,董惠娟,等. 灵敏度系数可调布拉格光栅应变传感器的设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(11): 2339-2346.
HE J, ZHOU ZH, DONG H J, *et al.*. Design of coefficient-adjustable FBG strain sensors[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(11): 2339-2346. (in Chinese)
- [9] 闫光,庄炜,刘锋,等. 具有增敏效果的光纤光栅应变传感器的预紧封装及传感特性[J]. 吉林大学学报(工学版), 2016, 46(5): 1739-1745.
YAN G, ZHUANG W, LIU F, *et al.* Preload package and characteristics of a sensitizing effect sensor based Fiber Bragg Grating(FBG)[J]. *Journal of Jilin University*, 2016, 46(5): 1739-1745. (in Chinese)
- [10] 李玉龙,温昌金,赵诚. 光纤光栅增敏封装工艺及装置研究现状[J]. 激光与红外, 2013, 43(11):

性偏差不超过 $\pm 5 \mu\text{m}$,误差对测试结果的影响不超过 $3 \mu\epsilon$,在预期设计的允许范围内,重复性良好,设计合理。

5 结 论

本文设计了一种能够对温度参量精确解耦的增敏式光纤光栅应变传感器,通过特殊的基底设计,以及特殊的光纤光栅制作工艺,实现了对结构件所受应变的精确测量。通过温度循环试验以及拉力循环试验,考察了传感器对温度和应变两参量的线性度、增敏效果以及重复性。实验结果表明,该传感器的温度误差小于 $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$,应变误差小于 $3 \mu\epsilon$ 。将该传感器应用在飞机载荷谱的实测过程中,对进一步提高基于光纤光栅原理的载荷谱准确编制具有一定的指导意义。

- 1203-1211.
- LI Y L, WEN CH J, ZHAO CH. Research status of the sensitivity enhancing and encapsulation technologies & devices of the fiber Bragg grating[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(11):1203-1211. (in Chinese)
- [11] 吴入军,郑百林,贺鹏飞,等. 埋入式光纤布拉格光栅传感器封装结构对测量应变的影响[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(1):24-30.
- WU R J, ZHENG B L, HE P F, *et al.*. Influence of encapsulation structures for embedded fiber-optic Bragg grating sensors on strain measurement [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(1):24-30. (in Chinese)
- [12] 曹毅,刘凯,单春成,等. 抗拉柔性铰链的理论建模及有限元分析[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(1):119-125.
- CAO Y, LIU K, SHAN CH CH, *et al.*. Theory modeling and finite element analysis of tensile flexure hinge[J]. *Opt. and Precision Eng.*, 2016, 24(1):119-125. (in Chinese)
- [13] 陈永当,鲍志强,任慧娟,等. 基于 SolidWorks Simulation 的产品设计有限元分析[J]. *计算机技术与发展*, 2012, 22(9):177-180.
- CHEN Y D, BAO ZH Q, REN H J, *et al.*. Finite element analysis for product design based on SolidWorks simulation[J]. *Computer Technology & Development*, 2012, 22(9):177-180. (in Chinese)
- [14] 李永伟,韩兴德,于国庆. FBG 温度传感器增敏封装技术及实验研究[J]. *光学技术*, 2009, 35(3):461-463.
- LI Y W, HAN X D, YU G Q. Packaging technique of enhancing temperature-sensitivity for fiber Bragg grating sensor [J]. *Optical Technique*, 2009, 35(3):461-463. (in Chinese)
- [15] 闫光,韩小进,阎楚良,等. 复合材料圆柱壳轴压屈曲性能分析[J]. *复合材料学报*, 2014, 31(3):781-787.
- YAN G, HAN X J, YAN CH L, *et al.*. Buckling analysis of composite cylindrical shell with cover under axial compressive load[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2014, 31(3):781-787. (in Chinese)
- [16] AVITABLIE P, HARVEY E, RUDDOCK J. Comparison of full field strain distributions to predicted strain distributions from limited sets of measured data for SHM applications [J]. *Key Engineering Materials*, 2013, 569-570:1140-1147.

作者简介:



张开宇(1995—),男,安徽亳州人,2011年于安徽理工大学获得学士学位,主要从事光纤传感技术的研究。E-mail: zhangkaiyu1995@qq.com

导师简介:



祝连庆(1963—),男,浙江兰溪人,教授,博士生导师,1982年、1989年于合肥工业大学分别获得学士和硕士学位,2013年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要研究方向为光纤传感、光纤激光器、光电精密测试技术等。E-mail: zhulianqing@sina.com