

# FBG 传感器应变标定方法\*

白生宝, 肖迎春, 黄博, 刘国强

(中国飞机强度研究所全尺寸飞机结构静力/疲劳航空科技重点实验室 西安, 710065)

**摘要** 为了提高光纤光栅应变传感器测量精度, 针对光纤光栅传感器工程应用情况, 提出了一种光纤布拉格光栅 (fiber bragg grating, 简称 FBG) 传感器应变特性标定方法。通过理论分析和实验标定了封装式光纤光栅应变传感器的灵敏度系数, 对传感器理论与实验灵敏度系数误差进行了分析。实验结果表明, 该方法简单、易行, 用于光纤光栅传感器使用前的标定, 可以提高基于光栅传感器的测量精度和准确性。同时, 该方法为光纤光栅传感器的工程推广应用奠定了基础。

**关键词** 光纤布拉格光栅; 标定; 应变; 灵敏度

**中图分类号** TN253; V214.3<sup>+</sup>2; TP211.6; TH86

## 引言

飞机结构健康监测技术是利用集成在结构中的先进传感器/驱动器网络, 在线实时地获取与结构健康状况有关的信息(如应力、应变、温度及损伤等), 结合先进的信息处理方法和力学建模方法, 提取结构特征参数, 识别结构的状态和故障, 从而实现对结构状态的连续监测<sup>[1-2]</sup>。连续监测可以使飞机结构实施“视情维护”策略, 因而可提高飞机安全性, 同时可减少直接运营成本和直接维护成本。光纤布拉格光栅 (fiber Bragg grating, 简称 FBG) 传感器利用反射波长对温度、应力、应变、压力等物理参数的敏感特性为基础, 相对于传统传感器, FBG 具有体积小、重量轻、可复用、抗电磁干扰、抗腐蚀、可埋入复合材料结构中等优点, 因而 FBG 传感器被认为是航空航天结构健康监测中最有前途的传感器之一<sup>[3]</sup>。近年来, 国内外针对 FBG 传感器工程应用问题开展了大量的研究<sup>[4-11]</sup>, 重点研究了 FBG 应变/温度传感器特性、安装工艺、封装技术、补偿技术及应用测试等, 取得了很多成果, 加快了 FBG 传感器在工程应用中的进程。

FBG 传感器的应变灵敏度系数是一个极其重要的参数, 它直接影响测量结果, 但由于 FBG 传感器在使用过程中为了保证传感器成活率和监测的长期性, 一般都要对其进行不同形式封装和使用粘接剂进行安装, 加之使用环境的不同, FBG 本身的传感特性会

发生变化。为了保证监测数据真实性和测量结果准确性, 在使用前根据不同使用要求和环境条件必须对 FBG 传感器的应变灵敏度系数进行标定<sup>[12-13]</sup>, 但对 FBG 传感器的标定国内外尚无标准。笔者提出了一种新颖的 FBG 应变传感器的标定方法, 该方法采用等弯矩梁和四点弯曲加载实现了对 FBG 传感器应变灵敏度系数的标定, 且简单易行; 并对柔性基底封装的 FBG 传感器<sup>[14]</sup>进行了标定实验, 验证了该方法的可行性。结果表明, 该标定方法可有利提高测量结果的准确性, 为基于 FBG 应变传感器的航空航天器结构应变测量和健康监测可靠性奠定了基础。

## 1 FBG 传感器应变传感原理

FBG 是在光纤纤芯内介质折射率呈周期性调制的一种光纤传感组件, 其作用效果相当于在纤芯内形成一个窄带的(透射或反射)滤光器或反射镜, 当一束中心波长为  $\lambda$  的宽光谱光经过 FBG 时, 被光栅反射回一束单色光  $\lambda_B$ 。光纤光栅的反射或透射峰的波长与光栅的折射率调制周期以及纤芯有效折射率有关, 而外界温度或应变的变化会影响光纤光栅的折射率调制周期和纤芯折射率, 从而引起光纤光栅的反射或透射峰波长的变化, 温度、应变的变化会引起光纤布拉格光栅的周期和折射率的变化, 从而使光纤布拉格光栅的反射谱和透射谱发生变化。通过检测光纤布拉格光栅的反射谱和透射谱的变

\* 中航工业技术创新基金资助项目(2013F62348R)  
收稿日期: 2014-03-16; 修回日期: 2014-06-16

化,就可以获得相应的温度和应变的信息,这就是用光纤布拉格光栅测量温度和应变的基本原理。

由光谱特性可知,FBG 的反射谱中心波长为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

其中: $\lambda_B$  光栅中心波长; $\Lambda$  为光栅折射率变化周期; $n_{\text{eff}}$  为光栅有效折射率。

由式(1)可知,FBG 的中心波长 $\lambda_B$  随有效折射率和光线光栅周期改变而改变。应变可引起光栅周期的伸缩和弹光效应,温度可引起热膨胀效应和热光效应,而弹光效应和热光效应可使光栅的有效折射率 $n_{\text{eff}}$  发生变化,热膨胀效应可引起光栅周期 $\Lambda$  的变化,由式(1)可知 FBG 中心波长的偏移可写成

$$\Delta\lambda_B = 2\Delta n_{\text{eff}}\Lambda + 2n_{\text{eff}}\Delta\Lambda \quad (2)$$

由弹性力学及弹光效应、热光效应、热膨胀效应的理论,式(2)可写成

$$\Delta\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \left\{ \left[ 1 - \left( \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} \right) [P_{12} - \mu(P_{11} + P_{12})] \right] \cdot \varepsilon_1 + (\alpha_s + \xi_s) \Delta T \right\} \quad (3)$$

其中: $P_{11}$  和  $P_{12}$  为光纤的弹光系数; $\mu$  为泊松比; $\varepsilon_1$  为轴向应变; $\alpha_s$  为热光系数; $\xi_s$  为热膨胀系数; $\Delta T$  为温度变化量。

式(3)可以简化为

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B [(\alpha_s + \xi_s)\Delta T + (1 - P_e)\varepsilon] = K_T\Delta T + K_\varepsilon\varepsilon_1 \quad (4)$$

其中: $P_e = 1 - \left( \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} \right) [P_{12} - \mu(P_{11} + P_{12})]$ ;  $K_\varepsilon = \lambda_B(1 - P_e)$  为应变灵敏度系数。

假设外界温度恒定不变,即 $\Delta T=0$  时,有

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B [(1 - P_e)\varepsilon_1] = K_\varepsilon\varepsilon_2 \quad (5)$$

其中: $\Delta\lambda_B$  为传感器中心波长的漂移量; $K_\varepsilon$  为 FBG 的应变灵敏度系; $\varepsilon_2$  为光栅应变。

同样,假设外界温度恒定不变,式(4)可简化为

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - P_e)\varepsilon_1 \quad (6)$$

对于普通单模石英光纤, $P_e$  约为 0.22,按式(6)可计算出中心波长 1 510~1 590 nm 的 FBG 传感器应变灵敏度系数平均值为 1.209 pm/ $\mu\varepsilon$ 。

## 2 FBG 传感器应变标定方法

应变标定方法主要采用准确、简单的四点弯等弯矩梁作为基本结构,如图 1 所示。在标准梁粘贴 FBG,通过施加载荷使梁上产生应变,通过计算得到梁表面的应变以及 FBG 的灵敏度系数,从而实现 FBG 传感器的应变特性标定。

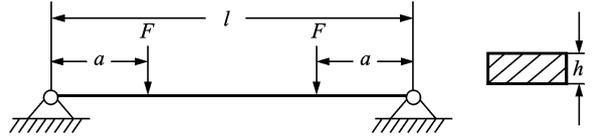


图 1 标定方法原理

Fig. 1 Calibration method principle

根据材料力学理论可得,梁上加载点之间的等弯段应力为

$$\sigma = \frac{My}{I} = \frac{24E\omega y}{3l^2 - 4a^2} \quad (7)$$

那么,梁上下表面上的应变为

$$\varepsilon = \pm \frac{Mh}{2EI} = \pm \frac{12\omega h}{3l^2 - 4a^2} \quad (8)$$

其中: $M$  为梁等弯段弯矩; $I$  为梁横截面的惯性矩; $h$  为梁的厚度; $E$  为梁材料的弹性模量; $l$  为梁上两支撑点间的距离; $a$  为支撑点到加载点之间的距离; $\omega$  为梁中点处的挠度。

由式(5)和式(8)可得 FBG 传感器应变灵敏度系数为

$$K_\varepsilon = \frac{(3l^2 - 4a^2) \Delta\lambda_B}{12\omega h} \quad (9)$$

## 3 封装 FBG 应变传感器标定实验与分析

采用该标定方法对中国飞机强度研究所研制的柔性基底封装 FBG 传感器<sup>[14]</sup> 的应变灵敏度系数进行标定,FBG 传感器粘贴在梁等弯部分的上下表面,上下表面共粘贴 4 支传感器,如图 2 所示。等弯矩标定梁安装在应变计性能鉴定机上进行加载,如图 3 所示。

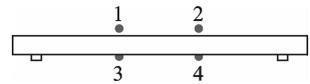


图 2 FBG 传感器安装示意图

Fig. 2 Installation position of FBG sensor



图 3 实验装置

Fig. 3 Experiment device

按 500  $\mu\epsilon$  一级逐级加载,直至  $\pm 2\,000\ \mu\epsilon$  后卸载,每组正式实验重复 3 次。实验加载拟合曲线如图 4~图 9 所示。

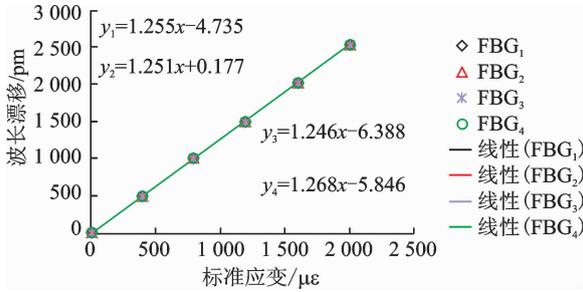


图 4 FBG 波长变化与应变之间关系(第 1 次拉伸)  
Fig. 4 The relationship between FBG sensor central wavelength and strain(the first stretch)

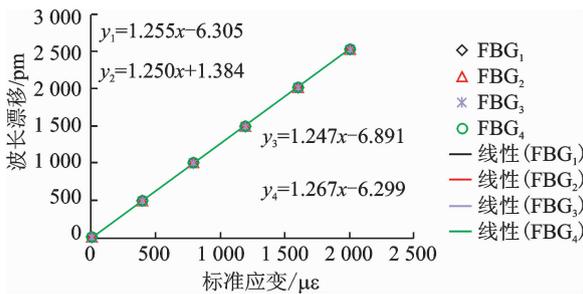


图 5 FBG 波长变化与应变之间关系(第 2 次拉伸)  
Fig. 5 The relationship between FBG sensor central wavelength and strain (the second stretch)

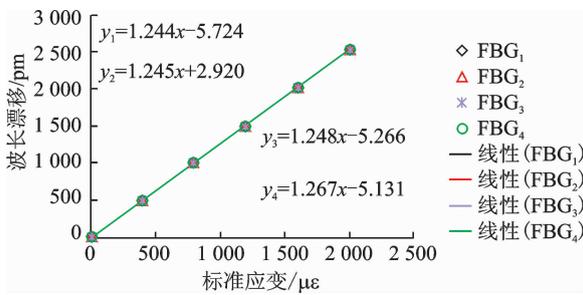


图 6 FBG 波长变化与应变之间关系(第 3 次拉伸)  
Fig. 6 The relationship between FBG sensor central wavelength and strain (the third stretch)

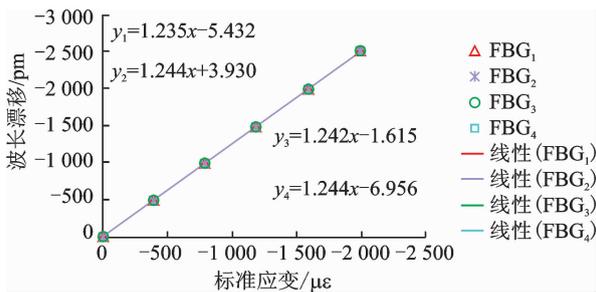


图 7 FBG 波长变化与应变之间关系(第 1 次压缩)  
Fig. 7 The relationship between FBG sensor central wavelength and strain (the first compress)

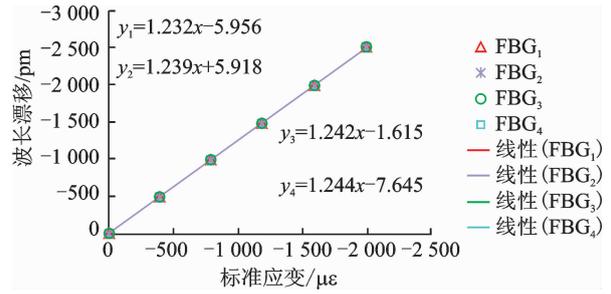


图 8 FBG 波长变化与应变之间关系(第 2 次压缩)  
Fig. 8 The relationship between FBG sensor central wavelength and strain (the second compress)

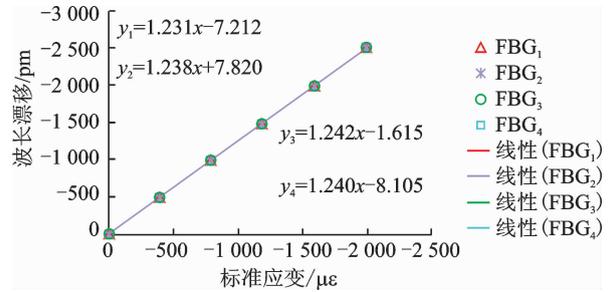


图 9 FBG 波长变化与应变之间关系(第 3 次压缩)  
Fig. 9 The relationship between FBG sensor central wavelength and strain (the third compress)

由以上实验数据及 FBG 传感器应变灵敏度系数计算公式(9)得到,该批次柔性基底封装 FBG 应变传感器的平均应变灵敏度系数为 1.246,具体如表 1 所示。

表 1 FBG 传感器灵敏度系数

Tab. 1 Sensitivity of FBG sensor  $\text{pm}/\mu\epsilon$

传感器编号	拉应变灵敏度系数	压应变灵敏度系数	总体灵敏度系数
FBG <sub>1</sub>	1.251	1.233	1.242
FBG <sub>2</sub>	1.249	1.240	1.245
FBG <sub>3</sub>	1.247	1.242	1.245
FBG <sub>4</sub>	1.267	1.243	1.255

由此可见,封装的 FBG 传感器理论应变灵敏度系数与经过标定的应变灵敏度系数存在较大差异,其主要原因为 FBG 传感器在使用时通过粘接剂进行安装,并采用了封装形式,封装材料、安装工艺(粘接剂的选择、粘接长度、宽度及厚度等)、环境条件(温度、湿度)等影响了结构真实应变的传递。由此引起的应变测量数据必然存在较大误差。

因此在 FBG 传感器的实际工程应用中,不同批次 FBG 传感器、不同的封装方式、安装工艺、环境条件下必须对 FBG 应变传感器灵敏度进行标定,以保证测量数据准确。

## 4 结束语

针对 FBG 传感器在实际使用时,由于采用封装形式、粘接剂安装等造成 FBG 传感器本身应变灵敏度系数发生变化,影响到测量数据的准确性等问题,提出了一种 FBG 传感器应变灵敏度系数的标定方法。该方法简单、易行,适用于 FBG 应变传感器使用前的标定,为建立 FBG 传感器高精度要求的结构应变测量、结构健康监测和加快 FBG 传感器的推广应用奠定了基础。

### 参 考 文 献

- [1] 袁胜芳,结构健康监测[M].北京:国防工业出版社,2007:1-23.
- [2] der Auweraer H V, Peeters B. International research projects on structural health monitoring: an overview [J]. Structural Health Monitoring 2003, 2:341.
- [3] 于秀娟,余有龙,张敏,等.光纤光栅传感器在航空航天复合材料/结构健康监测中的应用[J].激光杂志,2006,27(1):1-3.  
Yu Xiujuan, Yu Youlong, Zhang Min, et al. Applications of fiber Bragg grating sensor for aerospace composite and structures health monitoring[J]. Laser Journal, 2006,27(1):1-3. (in Chinese)
- [4] 刘春桐,李洪才,张志利,等.铝合金箔片封装光纤光栅传感特性研究[J].光电子·激光,2008,19(7):905-908.  
Liu Chuntong, Li Hongcai, Zhang Zhili, et al. Study on the sensing characteristics of fiber Bragg grating packaged by aluminum alloy slice[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2008,19(7):905-908. (in Chinese)
- [5] 曹彬,欧攀,贾明,等.一种新型光纤光栅温度补偿装置[J].中国激光,2008,35(12):1959-1961.  
Cao Bin, Ou Pan, Jia Ming, et al. An innovative temperature-compensate package for fiber Bragg grating[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(12): 1959-1961. (in Chinese)
- [6] 贾振安,乔学光,傅海威,等.光纤光栅温度增敏技术[J].西北大学学报:自然科学版,2003,33(4):417-420.  
Jia Zhenan, Qiao Xueguang, Fu Haiwei, et al. Temperature sensitivity enhancement technology of fiber Bragg gratings[J]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 2003,33(4):417-420. (in Chinese)
- [7] 李鹏飞,万方义,崔卫民,等. FBG 传感器在飞行器结构健康监测中的可行性研究[J].机械强度,2011,33(4):624-628.  
Li Pengfei, Wan Fangyi, Cui Weimin, et al. Feasibility of FBG sensor for aircraft structure health monitoring[J]. Journal of Mechanical Strength, 2011, 33(4):624-628. (in Chinese)
- [8] 白生宝,肖迎春,黄博,等.基于 FBG 传感器的冲击损伤定位[J].振动、测试与诊断,2011,31(4):479-483.  
Bai Shengbao, Xiao Yingchun, Huang Bo, et al. Damage detection based on fiber bragg grating sensor[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(4):479-483. (in Chinese)
- [9] 王为,林玉池,赵美蓉,等.基于 SPC 与小波变化的光纤光栅型损伤识别[J].振动、测试与诊断,2011,31(5):566-569.  
Wang Wei, Lin Yuchi, Zhao Meirong, et al. Damage identification technology based on fiber bragg grating using SPC and wavelet transform[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(5): 566-569. (in Chinese)
- [10] 何俊,周智,董慧娟,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):2339-2349.  
He Jun, Zhou Zhi, Dong Huijuan, et al. Design of coefficient-adjustable FBG strain sensors[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(11): 2339-2349. (in Chinese)
- [11] 李琳,付世晓,杨建民.运用光纤光栅传感器的涡激振动测试技术[J].振动、测试与诊断,2011,31(6):582-587.  
Li Lin, Fu Shixiao, Yang Jianmin. Measuring technique based on the fiber Bragg used in the vortex-induced-vibration model test [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011,31(6):582-587. (in Chinese)
- [12] 李宏男,任亮.结构健康监测光纤光栅传感技术[M].北京:中国建筑工业出版社,2008:151-153.
- [13] 孙丽.光纤光栅传感应用问题解析[M].北京:科学出版社,2012:23-31.
- [14] 白生宝,肖迎春,黄博,等.一种光纤光栅应变传感器:中国,ZL201120244307.8[P].2011-11-25.



**第一作者简介:**白生宝,男,1979年12月生,高级工程师。主要研究方向为光纤光栅传感技术和结构健康监测技术。曾发表《基于 FBG 传感器的冲击损伤定位》(《振动、测试与诊断》2011年第31卷第4期)等论文。

E-mail: bab623@163.com

