

超低温宽温域环境下 FBG 传感器应变标定方法

王 强¹, 马国鹭², 盖 文¹, 顾正华¹

(1. 中国空气动力研究与发展中心设备设计及测试技术研究所 绵阳, 621000)

(2. 西南科技大学制造过程测试技术教育部重点实验室 绵阳, 621000)

摘要 在某超低温风洞结构健康监测的工程中, 光纤光栅传感器被用来实时监测风洞洞体结构变形, 然而超低温及宽温域的环境会极大地影响应变测量精度。为解决光纤光栅传感器在 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至常温范围的应变测量的温度影响, 进一步提高测量精度, 提出了一种超低温宽温域环境下的光纤布拉格光栅 (fiber-optic Bragg grating, 简称 FBG) 传感器应变灵敏度系数标定方法。该方法通过一套超低温宽温域标定系统对 FBG 传感器在 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的多个温度点的应变灵敏度系数进行了试验测量, 利用该标定结果修正超低温宽温域环境下温度对应变的测量结果, 可有效提高光纤光栅传感器的应变测量精度。试验还发现, FBG 传感器的应变灵敏度系数呈现出随温度降低而升高的规律, 该结论对进一步开展超低温宽温域环境下 FBG 应变传感器温度补偿研究奠定了基础。

关键词 低温; 标定; 应变; 灵敏度; 光纤布拉格光栅

中图分类号 TN253; V211.74; TH74

引 言

结构健康监测技术是利用先进传感器在线实时采集结构状态信息 (如温度、应变、加速度、裂纹等), 实现对结构状态的在线监测, 及时或早发现结构故障和隐患。某超低温风洞内部温度变化范围为 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至常温, 洞体结构承受巨大的热应力和气动压力, 为实时监测风洞洞体结构变形, 需要对洞体进行在线的结构健康监测。

FBG 传感器基于反射波长对温度、应变等物理参数的敏感特性, 相比于传统传感器, 可复用、抗干扰、接线少等是其最大优点, 在结构健康监测领域具有较好的应用前景, 并已逐步在各行业得到应用^[1-5]。近年来, 国内外开展了一些针对 FBG 传感器在极端环境下应用的研究工作, 重点研究了 FBG 温度/应变传感器在高低温环境下使用的封装工艺、安装工艺、温度补偿技术以及传感器特性^[6-9]。

应变灵敏度系数是 FBG 应变传感器非常重要的参数, 受到传感器不同封装形式、安装工艺及使用环境的影响可能会发生变化。为此, 在工程使用前必须模拟超低温风洞的实际环境对 FBG 传感器在 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至常温的工作温度范围内的应变灵敏度系数进行试验测量。白宝生等^[10]采用四点弯等弯矩梁结构对常温胶黏式 FBG 传感器的应变灵敏度

系数进行了试验测量。曹敏等^[11]采用电子万能试验机方式对钢管封装的 FBG 传感器的应变灵敏度系数进行了常温环境下的试验测量。闫继送等^[12]采用拉伸装置对分布式光纤传感系统的应变灵敏度系数进行了常温环境下的试验测量。余项等^[13]采用简易装置试验测量了裸光纤光栅在常温和液氮温度下的弹光系数, 而弹光系数与应变灵敏度系数直接相关。上述研究中的标定装置均不具备控温能力, 只对常温和液氮温度的 FBG 传感器应变灵敏度系数进行了测量。胡挺等^[14]设计了高温应变片参数标定系统对高温环境下的电阻应变片灵敏度、热输出、零漂和蠕变等参数进行了标定, 但该标定装置应变加载范围有限。

1 FBG 应变传感原理

FBG 是利用掺杂光纤的光敏性, 采用干涉仪紫外曝光、化学腐蚀以及飞秒激光等方式在光纤纤芯内部形成折射率呈周期性调制的一种光纤传感器件。其传感原理是当中心波长为 λ 的宽光谱光经过 FBG 时, 会被光栅反射回一束波长为 λ_B 的单色光, 该反射光波长 λ_B 与光栅的折射率调制周期和纤芯有效折射率有关, 而 FBG 所处环境温度和应变的变化则会影响光纤光栅的折射率调制周期和光纤折射

率,从而导致光纤光栅反射光谱波长 λ_B 发生变化。通过检测和解调FBG的反射光谱 λ_B 的变化量,就可以获得相应的温度和应变信息。

一般的,FBG反射光谱中心波长为

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

其中: λ_B 为FBG反射光谱中心波长; Λ 为FBG折射率变化周期; n_{eff} 为纤芯有效折射率。

当FBG所处环境温度变化时,热光效应和热膨胀效应引起FBG有效折射率和周期变化,导致反射光谱中心波长变化。当FBG受到应变时,产生的轴向拉伸使得FBG周期直接发生改变,同时由于还存在弹光效应使得纤芯折射率也发生改变,共同作用导致反射光谱中心波长发生改变。在外界温度稳定的情况下,FBG仅受到应变,则式(1)可写成

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

假设外界温度恒定不变,即 $\Delta T = 0$ 时,由弹性力学和相应数学推导可得反射光谱中心波长漂移量和应变的关系式^[6]为

$$\Delta\lambda_B = (1 - P_e)\lambda_B \epsilon = K_e \epsilon \quad (3)$$

其中: $\Delta\lambda_B$ 为FBG反射光谱中心波长漂移量; P_e 为FBG弹光系数; λ_B 为FBG反射光谱初始中心波长; K_e 为传感器应变灵敏度系数; ϵ 为轴向应变。

考虑到风洞结构健康监测使用环境的超低温、宽温域特点,笔者采用了一种焊接式金属化光纤光栅应变传感器,主要包含菱形应变基座和金属化光纤光栅,如图1所示。光纤栅区及附近区域表面涂镀金属层后套入金属细管中,并采用特殊工艺将金属化光纤与金属细管进行固定,再将金属细管焊接于菱形基座的一条轴并施加一定标准的预紧力。菱形基座的另一条轴通过安装焊点焊接固定在被测结构上,菱形应变基座将两个安装焊点轴向的结构应变转换为光纤光栅的波长变化。

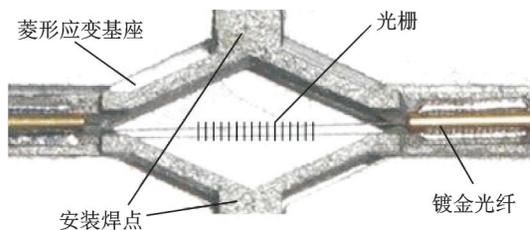


图1 镀金FBG应变传感器

Fig.1 Gold-plated FBG strain sensor

该焊接式金属化光纤光栅应变传感器采用无胶封装和安装,避免了胶黏剂长期使用存在的老化、蠕变现象,以及超低温环境下胶黏剂脱落等问题,可以提高光纤光栅应变传感器在超低温宽温域环境下的

长期稳定性和可靠性。同时,FBG传感器尾纤采用耐低温的聚酰亚胺涂覆层纤芯,可以减小低温环境下光传输功率的损耗。

2 FBG传感器应变标定方法与装置

FBG应变传感器的超低温宽温域标定系统主要由FBG应变传感器、光纤光栅解调仪、万能试验机、液氮罐、保温箱、夹具、拉伸试件、引伸计以及铂电阻温度传感器等组成,如图2所示。该标定系统通过控制液氮喷入量和喷入频率实现对保温箱内的温度控制,温度稳定度为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。试验前将传感器焊接安装在由实际被测风洞结构材料制成的拉伸试件上以模拟实际的测量状态,对FBG应变传感器安装到被测物之后的应变灵敏度进行测量。电子万能试验机拉伸夹头使试件产生轴向应变,引起FBG应变传感器反射光谱波长的变化,引伸计实测拉伸试件变形量作为标定源。相比于文献[10]中的试验装置,提高了应变标定范围且提供了宽温域的变温控温环境。

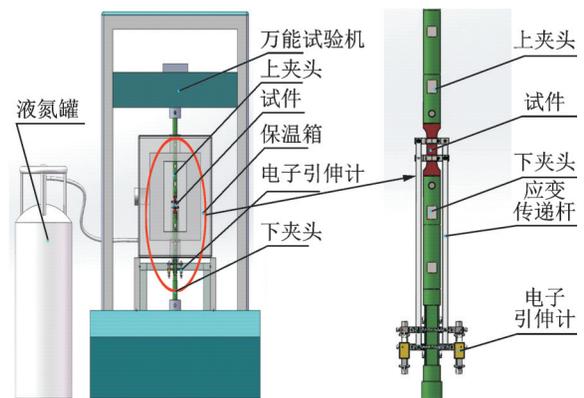


图2 标定试验装置构成图

Fig.2 Calibration experimental device

在 $20^\circ\text{C} \sim -196^\circ\text{C}$ 的温度范围,每间隔 60°C 作为一个温度梯度,在每个温度梯度进行 $0 \sim 3\,000\ \mu\epsilon$ 的满量程拉伸, $0 \sim 3\,000\ \mu\epsilon$ 应变范围每间隔 $375\ \mu\epsilon$ 设置一个检测点。具体的,当保温箱内温度达到设置温度后保温 $10\ \text{min}$,待温度稳定拉伸试件,试件变形量达到预设值后保持 $10\ \text{min}$,记录解调仪中的中心波长和引伸计测量值。

需要注意的是,该超低温宽温域标定系统的标定源是通过引伸计测量拉伸试件实际变形量得到的,而不能采用万能试验机施加拉力 F 计算得出拉伸试件理论变形量作为标定源。其原因在于,理论变形量 ΔL 与拉力 F 的关系式为

$$\Delta L = \frac{F}{EA} L \quad (4)$$

其中： ΔL 为拉伸试件理论变形量； F 为拉力； E 为试件弹性模量； A 为试件横截面积； L 为试件初始长度。

式(4)中弹性模量 E 是常温下测得的,而随着温度不断降低,拉伸试件材料弹性模量也随之变化,且低温下材料弹性模量通常未知。另外,由于温变效应,拉伸试件横截面积也会随着温度降低而变化。综合上述两个因素,理论变形量 ΔL 不能作为超低温宽温域环境下的标定源。而通过引伸计测量拉伸试件实际变形量 $\Delta L'$,直接反映了由于万能试验机拉力和温变效应导致的拉伸试件综合变形量,则轴向应变 ϵ 的关系式应为

$$\epsilon = \frac{\Delta L'}{L} \times 10^6 \quad (5)$$

由于引伸计不能在低温环境下测量,该标定系统设计了应变传递杆将试件变形量传递到保温箱外,再用引伸计进行测量。为验证该标定源的准确性,在室温环境下对试件进行拉伸。室温环境试件弹性模量已知,且认为试件横截面积不变,则试件理论变形量和引伸计实测变形量应当一致。试验数据显示,室温环境试件理论变形量和实测变形量偏差基本在2%以内,如图3所示,表明将试件应变传递后采用引伸计实测变形量作为标定源的方法可行。

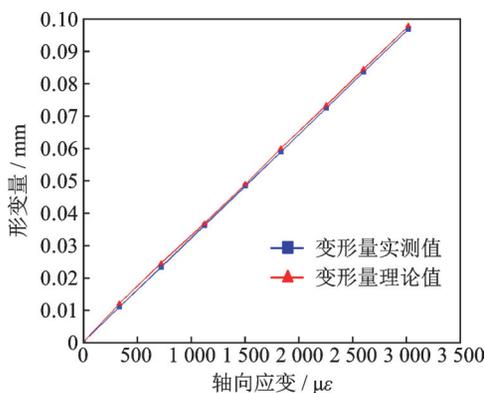


图3 室温试件变形量理论值与实测值

Fig.3 Theoretical and measured values of specimen deformation at room temperature

3 FBG 传感器应变标定试验与分析

试验测量前,拉伸试件的正反面各焊接安装1个FBG应变传感器,分别编号为1#FBG应变传感器和2#FBG应变传感器,如图4所示。随后将拉伸试件夹持在万能试验机夹头上下两端,如图5所示。

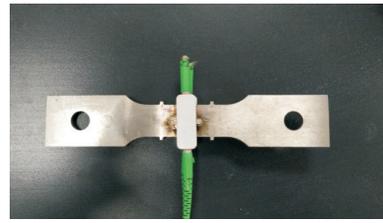


图4 传感器安装实物图

Fig.4 Installation position of FBG sensor



图5 局部试验装置实物图

Fig.5 Physical object of local experimental device

按照每间隔 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为一个温度梯度,在每个温度梯度按 $375\text{ }\mu\epsilon$ 作为应变梯度进行试验加载,直至 $3\text{ }000\text{ }\mu\epsilon$,记录2个FBG应变传感器的反射光谱中心波长数据。1#和2#FBG应变传感器的试验数据拟合曲线如图6、图7所示。图中横坐标为根据引伸计实测试件变形量得到的试件轴向应变值,纵坐标为光纤光栅反射光谱中心波长漂移量。该波长漂移量是指在某一温度点时每个应变梯度值下的光纤光栅反射光谱中心波长值与该温度点光纤光栅零载荷反射光谱中心波长值之差。

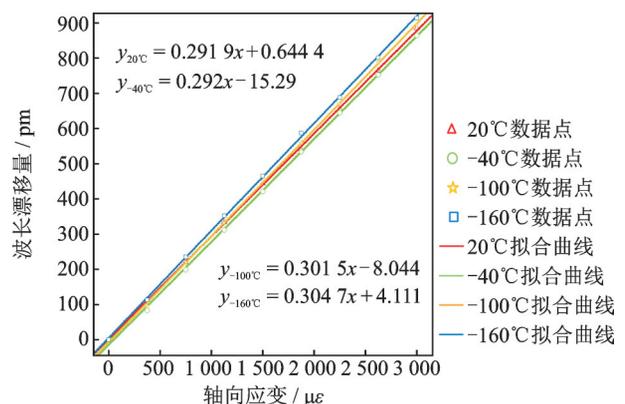


图6 1#FBG传感器波长漂移量与应变关系

Fig.6 The relationship between 1# FBG sensor wavelength drift and strain

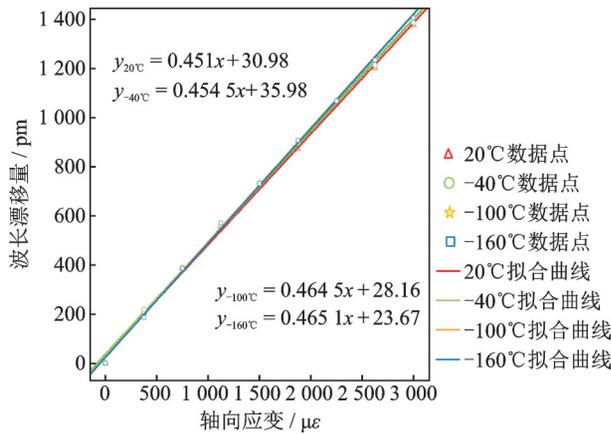


图7 2#FBG传感器波长漂移量与应变关系

Fig.7 The relationship between 2# FBG sensor wavelength drift and strain

由以上试验数据得出2个FBG应变传感器在各温度梯度点的应变灵敏度系数,如表1所示。

表1 FBG传感器拉伸应变灵敏度系数

Tab.1 Tensile strain sensitivity of FBG sensors

温度/°C	1#FBG拉应变灵敏度系数/($\mu\text{m} \cdot \mu\text{e}^{-1}$)	2#FBG拉应变灵敏度系数/($\mu\text{m} \cdot \mu\text{e}^{-1}$)
20	0.291 9	0.451 0
-40	0.292 0	0.456 3
-100	0.301 5	0.464 5
-160	0.304 7	0.465 1

数据表明,安装在试件上的2个FBG应变传感器的应变灵敏度系数均呈现随温度降低而升高的规律。结合式(3),该测试结果与文献[13]中发现的裸光纤布拉格光栅在液氮温度下的弹光系数小于常温下的弹光系数现象规律的是一致的。

此外,2个FBG应变传感器的灵敏度系数相差较大,因此在实际工程应用中必须对每个FBG应变传感器的灵敏度系数进行标定。同时,FBG传感器在刻栅、封装以及安装工艺的一致性方面还需要进一步提高,否则在实际工程应用时将会带来繁重的标定工作量和高昂的费用支出。

4 结束语

针对FBG应变传感器在某超低温风洞结构健康监测方面的实际使用需求,提出将金属化封装的FBG应变传感器焊接安装在拉伸试件上,然后在超低温宽温域环境下进行应变灵敏度系数的标定,以提高应变测试精度。本研究的创新点在于:①对已安装的FBG传感器灵敏度系数进行测量,最大程度

地将封装、安装等因素对传感器灵敏度系数的影响都考虑进来;②设计了超低温宽温域标定试验装置,采用引伸计间接测量试件变形量作为FBG传感器应变系数的标定源,并对源的准确性进行了验证;③实际测得了从-160 °C到常温范围多个温度点的FBG应变传感器的应变灵敏度系数值,试验数据表明,应变灵敏度系数随着温度降低而升高,为FBG传感器的低温环境结构健康监测工程应用奠定了基础。

参 考 文 献

[1] ATLI-VELTIN B, VOSTEEN A, CHENG L K. Experimental demonstration of health monitoring of composites using FBG sensor arrays [C]//AIAA SciTech Forum: Wind Turbine Health Monitoring and Reliability. San Diego, California:[s.n.],2019.

[2] FENG S Y, ZHANG C, ZHOU Y, et al. Application of fiber bragg grating sensor in PHC pipe pile: axial force test [C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental. [S.l.]:Iop Publishing Ltd., 2018.

[3] JIA Z G, WANG Z Y, SUN W, et al. Pipeline leakage localization based on distributed FBG hoop strain measurements and support vector machine [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2019, 196:1-13.

[4] 王义平,唐剑,尹国路,等. 光纤光栅制作方法及传感应用[J]. 振动、测试与诊断,2015,35(5):809-819. WANG Yiping, TANG Jian, YIN Guolu, et al. The fabrication method and sensing application of fiber grating [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015,35(5):809-819. (in Chinese)

[5] 宋世德,张作才,王晓娜. 光纤布拉格光栅钢筋腐蚀传感器[J]. 振动、测试与诊断,2018,38(6):1255-1259. SONG Shide, ZHANG Zuocai, WANG Xiaona. Optical fiber grating sensors for monitoring corrosion of reinforcing steel [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018,38(6):1255-1259. (in Chinese)

[6] 李杰燕. 高低温环境下光纤传感的传感特性及相关技术研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2013.

[7] 张瑞华. 光纤测温技术在低温领域的应用研究[D]. 武汉:华中科技大学,2015.

[8] 郭明金,姜德生. 镀金光纤光栅温度传感器的低温特性[J]. 低温物理学报,2006,28(2):138-141. GUO Mingjin, JIANG Desheng. Temperature sensor with plating gold [J]. Chinese Journal of Low Temperature Physics, 2006, 28(2):138-141. (in Chinese)

[9] 丁旭东,张钰民,夏嘉斌,等. 金属化封装光纤光栅传感

- 器超低温特性研究[J]. 激光与红外, 2017, 47(6): 773-777.
- DING Xudong, ZHANG Yumin, XIA Jiabin, et al. Study on ultralow temperature characteristics of metallic packaging FBG sensor [J]. Laser & Infrared, 2017, 47(6):773-777. (in Chinese)
- [10] 白宝生,肖迎春,黄博,等.FBG传感器应变标定方法[J].振动、测试与诊断, 2016, 36(2):321-324.
- BAI Baosheng, XIAO Yingchun, HUANG Bo, et al. Research on strain calibration method of fiber Bragg grating sensor [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(2):321-324. (in Chinese)
- [11] 曹敏,王恩,李博,等.FBG应变传感器标定过程中的不确定度研究[J].传感器与微系统, 2016, 35(9):30-32.
- CAO Min, WANG En, LI Bo, et al. Research on uncertainty in process of FBG strain sensor calibration [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2016, 35(9):30-32. (in Chinese)
- [12] 闫继送,袁明,张志辉,等.基于拉伸装置的光纤应变系数标定及误差分析[J].光电工程, 2014, 41(1):23-28.
- YAN Jisong, YUAN Ming, ZHANG Zhihui, et al. Calibration and error analysis of strain coefficient of optical fiber based on stretching device [J]. Opto-Electronic Engineering, 2014, 41(1):23-28. (in Chinese)
- [13] 余项,张东生,聂铭,等.液氮温度下裸光纤布拉格光栅弹光系数试验测量[J].大连理工大学学报, 2016, 56(6):631-635.
- YU Xiang, ZHANG Dongsheng, NIE Ming, et al. Experimental measurement of elastic-optic coefficient of bare fiber Bragg grating at liquid nitrogen temperature [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2016, 56(6):631-635. (in Chinese)
- [14] 胡挺,王文瑞,尹曰雷,等.高温应变片参数标定系统的设计与试验研究[J].传感技术学报, 2015, 28(9): 1341-1346.
- HU Ting, WANG Wenrui, YIN Yuelei, et al. Design and experiment research of high temperature strain calibration system [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2015, 28(9):1341-1346. (in Chinese)



第一作者简介:王强,男,1990年10月生,硕士、工程师。主要研究方向为风洞测控技术和健康监测技术。
E-mail: cardewq2@163.com

欢迎订阅《振动、测试与诊断》

《振动、测试与诊断》由工业和信息化部主管,南京航空航天大学 and 全国高校机械工程测试技术研究会联合主办,是反映振动、动态测试及故障诊断学科领域的科研成果及其应用情况的技术性刊物。主要刊登国内外以振动测试与故障诊断为中心的动态测试理论、方法和手段的研究及应用方面的技术文献,包括实验测试技术、测试仪器的研制、方法和系统组成、信号分析、数据处理、参数识别与故障诊断以及有关装置的设计、使用、控制、标定和校准等,不拘泥于行业和测试项目。

本刊为EI Compendex数据库收录期刊和中文核心期刊,双月刊,每逢双月末出版,每本定价30元,全年180元。欢迎订阅和投稿,欢迎在本刊刊登各类广告和科技信息。

编辑部地址:南京市御道街29号 邮政编码:210016 电话:(025)84893332
邮发代号:28-239 E-mail:qchen@nuaa.edu.cn 网址:http://zdc.nuaa.edu.cn