

温度应变双参量同时测量的光纤传感技术研究

倪晓红¹, 桂菲菲², 王玉田², 吴春辉²

(1. 河北省沧州师范学院, 河北 沧州 061001; 2. 河北省测试计量技术及仪器重点实验室(燕山大学), 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 光纤光栅用于传感领域存在应变和温度的交叉敏感问题。从温度与应变的分离方法方面主要分双波长矩阵法和双参量矩阵法两类, 综述了用于温度和应变同时测量的光纤光栅传感器的最新研究成果, 对一些基于其他理论的新方法也做了简要的介绍。概括了各方法的基本原理, 并对这些方案的优点和不足进行了分析。

关键词: 光纤光栅; 应变; 温度; 交叉敏感; 同时测量

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2011.07.003

Simultaneous measurement of temperature and strain using fiber grating

NI Xiao-hong¹, GUI Fei-fei², WANG Yu-tian², WU Chun-hui²

(1. Cangzhou Normal University, Cangzhou 061001, China;

2. Hebei Key Laboratory of Measurement Technology and Instrument, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: Strain and temperature cross-sensitivity problem exists in fiber grating sensing field. The solutions of simultaneous measurement of strain and temperature which are based on the dual-wavelength and dual-parameter matrix methods are reviewed and some new methods based on other theories are introduced briefly. The advantages and disadvantages of each scheme proposed are also analyzed.

Key words: fiber grating; strain; temperature; cross-sensitivity; simultaneous measurement

1 引言

光纤光栅传感器具有其他传感器无法比拟的优点, 例如: 抗电磁干扰、质量轻、耐高温性好(工作温度上限可达 400 °C 以上)、传输距离远、耐腐蚀等, 因此在光纤通讯和光纤传感等领域具有广阔的应用前景。但由于光纤光栅存在应变温度交叉敏感效应, 给检测灵敏度带来不可避免的影响, 严重制约了光纤光栅传感器在实际中的应用, 因此, 解决交叉敏感问题具有十分重要的意义。自 20 世纪 90 年代以来, 人们就开始进行这方面的研究, 提出了许多解决的方案, 并不断有新的方法出现。本文将重点介绍近几年来这方面的最新研究进展。

2 光纤光栅温度、应变同时测量方法

通过分析现有的光纤光栅温度应变同时测量解决方案, 从温度与应变的分离方法方面这些方案大

致可以分为以下两类。

2.1 双波长矩阵法

这种方法的基本原理是利用两个光栅中心反射波长均对应变和温度进行敏感, 由于灵敏度系数不同可以构成两个独立的方程, 通过求解方程组来确定应变和温度的变化量。两个中心反射波长的灵敏度系数差异越大, 获得的温度与应变的准确程度越高。这种方法可以用单根或两根光栅来实现。

张祝林等^[1]在一根光纤上, 间隔足够长制作两

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 60977061, 61071202); 河北省自然科学基金项目(No. F2010001312, F20100001313); 教育部科学技术重点项目(No. 210025)资助。

作者简介: 倪晓红(1979-), 女, 硕士, 河北省沧州师范学院计算机讲师。

收稿日期: 2011-03-09; **修订日期:** 2011-04-20

个光纤布拉格光栅(FBG)用于温度和应变的测量,原理如图1所示。两个FBG分别置于石英玻璃管中,FBG1的两端用环氧树脂与管壁固定,只受温度影响,FBG2为自由状态,同时感应温度和应变的影响,其表达式为:

$$\begin{pmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & K_{T1} \\ K_{\varepsilon 2} & K_{T2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{pmatrix} \quad (1)$$

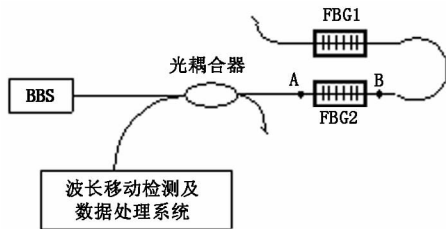


图1 双FBG法实现温度和应变同时测量的原理

根据两光栅对温度和应变不同的灵敏度系数值,由式(1)就可以计算出温度和应变的变化。实验表明,当被测温度在10~65℃,轴向应变在50~350μ ε 范围内时,实测的结果与实际值比较接近。

叶险峰等^[2]对普通型的双光栅矩阵法做了改进。实验中,在悬臂梁的上下两面分别粘贴光纤Bragg光栅(如图2所示),通过分别测量这两个光栅的波长位移来克服交叉敏感问题,实现对温度和应变的同时测量。这种方法只需一个光源,简化了光路,且无需采用性能差别很大的光纤光栅,从而降低传感器对光纤光栅的要求,具有实际应用前景。

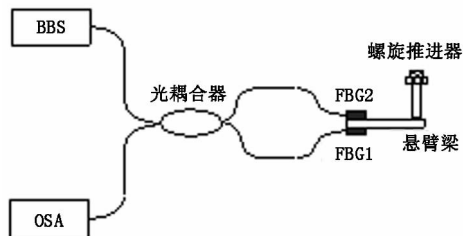


图2 改进型双光栅矩阵法原理图

2008年,朱丹丹等^[3]利用自行设计的分布式光纤光栅应变和温度同时测量系统,采用时钟脉冲宽带光源,结合时分和波分复用技术,选用不同包层直径光纤光栅相熔接的应变补偿法设计传感头,实现了温度和应变的同时测量。系统在应变和温度的测量范围为0~2500μ ε 和25~120℃,测量误差分别为±17μ ε 和±1℃。但是不同直径光栅的熔接处使光纤的抗拉强度大大降低,同时光传感信号也存在一定的损耗。

张先臣^[4]利用相位掩模法在双折射光纤上刻制光纤Bragg光栅。由于存在双折射效应,当有温

度和应变的影响时,光栅中心反射波长分别对应于快轴和慢轴分离。两中心反射波长的差值随着温度和应变的变化而变化,从而实现应变和温度的同时测量。2008年,Zhou等人^[5]在高双折射光纤环镜(high-birefringence fiber loop mirror, Hi-Bi FLM)中加入一个FBG,在60℃和600μ ε 的范围内实现了精度分别为±1℃和±21μ ε 的温度和应变的同时测量。

2009年,宋韵等^[6]提出基于旋转折变型长周期光纤光栅(R-LPFG)实现应变和温度同时测量的新方法。R-LPFG是先将光纤扭曲用高频CO₂激光脉冲曝光,制作出光栅后再释放扭曲使光栅重新处于自由状态后得到的,光纤轴向折射率旋转变化的特殊结构使得R-LPFG的谐振峰发生了分裂现象,并且这两个分裂峰的谐振波长漂移对外界温度的响应方向相同、大小相近,而对轴向应变的响应却方向相反。因此,基于R-LPFG这种独特的应变和温度特性,可用于实现温度和应变的同时测量。

卓仲畅等人^[7]在制作光纤光栅的过程中通过调制相位掩模板和振幅掩模板,使光栅同时具有长周期光栅和取样光栅的双重特性。利用长周期光栅的某一中心反射波长和取样光栅的某一中心反射波长分别与应变和温度呈线性关系的特点,实现应变和温度的同时测量。在0~1800μ ε 和20~100℃的测量范围内,最大测量误差分别为±40μ ε 和±1℃。

最近,胡兴柳等^[8]利用长周期光纤光栅的不同损耗峰具有不同温度和应变传感灵敏度的特性,提出了一种使用单个LPG对温度和应变两参数进行同时区分测量的新方案。通过观测其相应损耗峰的光谱图,得到因测量参数变化而导致的谐振波长的偏移,再根据相应的参数求解矩阵方程。当温度或应变变化较小时,交叉敏感对参数的测量基本上不产生影响;而当温度或应变变化较大时,可通过适当补偿消除交叉敏感而带来的偏差。实验测得的温度和应变误差分别是±0.192℃和±22μ ε 。在实际环境下,当温度或应变的变化较大时,由此产生的损耗峰响应的非线性可能会使得分辨率变差,并且这种非线性还会对谐振波长的漂移和交叉灵敏度有影响。如何消除非线性对其他参量的影响,是该方案需要进一步解决的问题。

单光栅双波长矩阵法通过一定的制作方法或封

装工艺,使单光栅产生两个中心反射波长,分别对温度和应变具有不同的响应灵敏度,由此实现温度和应变的同时测量。这种方法相比起采用双光栅的双波长矩阵法来讲,在成本、结构的简洁性、解调的方便程度、光栅的稳定性等方面都具有一定的优势,但还需要在测量范围、封装结构等方面做进一步的工作。

2.2 双参量矩阵法

双参量矩阵法中一个参量是 Bragg 波长,另一个是其他参量,或者是除 Bragg 波长外的另外 2 个参量。只要它们是对应变、温度同时敏感并呈线性关系的物理量(如光强、功率、频率、时间等)均可,通过求解与双波长矩阵法类似的方程组,实现应变和温度的同时测量。

2004 年,王远生等^[9]设计了利用单个光纤 Bragg 光栅同时测量应变和温度的实验系统,如图 3 所示。将一个 25 mm 长的 FBG 置于温控腔中,光栅中间的一段固定,上端连接光源,下端悬挂砝码。通过控制砝码的重量,调节光栅的轴向应变,改变下端光栅的 Bragg 波长。上半截光栅的布拉格波长 λ_{B1} 只随温度变化,下半截光栅的布拉格波长 λ_{B2} 随应变和温度变化。温度、应变发生变化后,光栅两个分裂的 Bragg 波长差值($\lambda_{B2} - \lambda_{B1}$)仅表征应变的变化,而 λ_{B1} 与初始布拉格波长的差值($\lambda_{B1} - \lambda_{B0}$)仅表征温度的变化。实验系统应变和温度灵敏度的实验结果分别为 $1.172 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 和 $10.78 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。

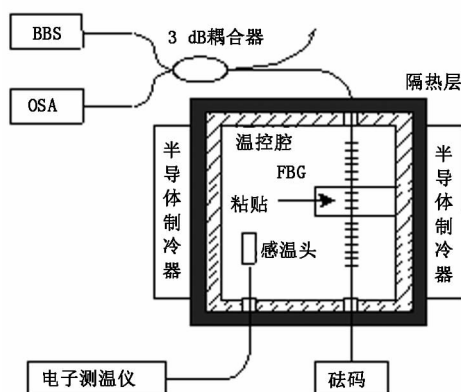


图3 单个 FBG 进行应变和温度同时测量实验系统原理图

尉婷等^[10]将 FBG 粘帖于矩形悬臂梁的侧面,利用悬臂梁自由端垂直位移时产生的梯度应变传递到光纤光栅上,从而产生带宽展宽的啁啾效应用于位移传感测量,中心波长的漂移作为温度传感解调,实现对温度和位移的同时区分测量。此实验在 6.15 mm , 45°C 的测量范围内,位移和温度的灵敏度

分别为 $0.513 \text{ nm}/\text{mm}$ 和 $0.029 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,分辨率分别达到 0.193 mm 和 3.4°C 。

2005 年,邱卫卫等^[11]将单根光纤 Bragg 光栅的一半 FBG2 固定在等强度梁的轴线上,另一半 FBG1 保持自由状态,如图 4 所示。当悬臂梁的自由端发生位移时, λ_{B2} 发生变化,同时 λ_{B1} 不变,从而产生两个反射峰,并且这两个反射峰具有不同的温度系数。当悬臂梁位移和温度都发生变化时(分别为 y 和 ΔT), λ_{B1} 的波长漂移只和温度变化有关, λ_{B2} 的波长漂移则和两者均有关。由此可以得到类似式(1)的关系式:

$$\begin{pmatrix} \Delta\lambda_{B1}/\lambda_{B1} \\ \Delta\lambda_{B2}/\lambda_{B2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & K_{T1} \\ K_{y2} & K_{T2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y \\ \Delta T \end{pmatrix} \quad (2)$$

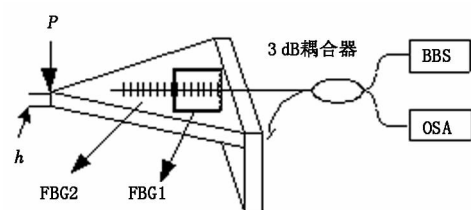


图4 等强度梁温度、位移测量装置示意图

由式(2)可知,通过测得 $\Delta\lambda_{Bi}$,就能确定温度和位移的变化,从而实现温度和位移的同时测量。但这种方法的不足之处在于,每次测量前需将光谱仪的读数调零,然后使荷载(应力)从小到大,再逐步减小到原来的零载荷状态,给实际应用带来了不便,并且该种封装手段,易出现反射光谱的啁啾问题。

朱丹丹等^[12]采用传输矩阵法,通过测量反射光谱的反射率变化以及光栅中心反射波长的漂移,实现单根取样光纤光栅对应变和温度的同时测量。通过仿真计算出了取样光栅反射率和波长与温度、应变变化的函数关系式,得出应变测量范围为 $0 \sim 1800 \mu\epsilon$,温度测量范围为 $0 \sim 180^\circ\text{C}$ 。

2009 年,Zhao 等人^[13]设计的系统中采用高双折射光纤环镜作传感头,写在光子晶体光纤中的 LPG 作滤波器。系统输出的光波长的变化和光功率的变化分别与温度和应变呈线性关系,通过求解系数矩阵得出温度和应变的变化量。在实验测试的范围内,温度和应变的分辨率分别达到 $\pm 0.32^\circ\text{C}$ 和 $\pm 8.9 \mu\epsilon$ 。

双参量矩阵法适用于某些特定场合,可以根据不同的要求设计或制造不同的 FBG 传感器,从而对不同的参数进行检测。不足之处在于结构较复杂,

已不具有波长编码的优点,从而易受光源波动等其他因素的影响,进行传感信号解调时也比较复杂,因此在实际应用中有一定的局限性。

2.3 其他测量方案

近年来,又有一些新的测量方法不断涌现。比如,人们从软件的角度,利用遗传算法、神经网络算法、单纯形算法等一些算法来完成温度和应变的同时测量。

2006年,Cheng等^[14]使用两个光栅对进行温度和应变的同时测量,两光栅对均由一个FBG和一个啁啾FBG组成。一个光栅对用于测量温度和应变,另一个仅用于测量温度。用遗传算法对两个光栅对的反射波长结果进行处理,得到了温度和应变的变化量。2007年,邵军等^[15]应用BP神经网络技术抑制温度对压力传感器的影响,提高了压力传感器的选择性。在19~75℃的范围内,将引入的温度误差从1915%降为2%,表明了BP神经网络良好的补偿效果,同时还提出可以通过增加输出层神经元的方法,实现温度和应变的同时测量。最近,李靖等人^[16]报道了将BP神经网络用于温度和应变同时测量的成果。实验中采用两支光栅,将两光栅的Bragg波长作为输入层,输出层为温度和应变,选择适当的函数利用Matlab工具箱进行网络训练后,得到温度和应变的变化量。其中,温度误差不超过2%,应变误差不超过5%,证明了使用BP神经网络对光纤光栅传感器进行数据处理是可行的,并具有一定的实用前景。虽然应用算法的计算量较大,但随着算法的进一步优化和计算机性能的提高,算法检测将得到更多的应用。

3 前景展望

光纤光栅传感技术以其独特的优越性越来越受到人们的重视,能否有效地解决温度与应变的交叉敏感问题是光纤光栅传感器实用化的关键。本文详细介绍了近几年出现的解决交叉敏感问题,进行温度应变同时测量的方案,并对各自的优缺点做了简要的分析。随着对光纤光栅传感技术研究的进一步深入,新技术、新方法会不断涌现,使其更符合实用化的要求。

参考文献:

[1] Zhang Zhulin, Yang Zhenkun, Li Wenhong. Temperature and strain-sensed researches of double fiber bragg gratings

[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(6): 607-610. (in Chinese)

张祝林,杨振坤,李文宏,等. 双光纤布拉格光栅温度和应变传感研究[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(6): 607-610.

[2] Ye Xianfeng, Liu Tao. Optic fiber grating sensor based modified dual-grating matrix operation[J]. Opto-electronic Engineering, 2003, 30(3): 23-25. (in Chinese)

叶险锋,刘涛. 改进型双光栅矩阵运算光纤光栅传感器[J]. 光电工程, 2003, 30(3): 23-25.

[3] Zhu Dandan, Li Weixin, Li Zhiquan. A distributed fiber Bragg grating system for simultaneous measurement of the strain and temperature [J]. Acta Metrologica Sinica, 2008, 29(1): 29-32. (in Chinese)

朱丹丹,李伟欣,李志全,等. 分布式光纤光栅应变和温度同时测量系统[J]. 计量学报, 2008, 29(1): 29-32.

[4] Zhang Xianchen. Simultaneous strain and temperature measurements using fiber birefringence effect[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(8): 20-21. (in Chinese)

张先臣. 利用光纤双折射效应实现应变和温度同时测量[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(8)增刊: 20-21.

[5] Zhou D P, Li Wei, Lit John W Y, et al. Simultaneous measurement of strain and temperature based on a fiber Bragg grating combined with a high-birefringence fiber loop mirror[J]. Optics Communications, 2008, 281(18): 4640-4643.

[6] Song Yun, Zhu Tao, Rao Yunjing. Simultaneous measurement of strain and temperature using a long-period fiber grating with rotary refractive index modulation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(5): 1129-1133. (in Chinese)

宋韵,朱涛,饶云江,等. 旋转折变型长周期光纤光栅实现应变和温度的同时测量[J]. 中国激光, 2009, 36(5): 1129-1133.

[7] Zhuo Zhongchang, KIM J B, Wang Dongwei. Simultaneous measurement of strain and temperature Based on sample fiber Bragg grating[J]. Optoelectronic Technology, 2009, 29(2): 89-91. (in Chinese)

卓仲畅, K M J B, 王东伟, 等. 基于取样光纤光栅实现应变和温度的同时测量[J]. 光电子技术, 2009, 29(2): 89-91.

[8] Hu Xingliu, Liang Dakai, Lu Guan. Simultaneous discriminating measurement of temperature and strain Based on a long period grating s spectrum [J]. Spectroscopy and

- Spectral Analysis, 2010, 30(3): 851 - 854. (in Chinese)
- 胡兴柳, 梁大开, 陆观, 等. 基于单长周期光纤光栅光谱特性的温度和应变同时区分测量[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(3): 851 - 854.
- [9] Wang Yuansheng, Yang Dongxiao, Bi Gang. Simultaneous measurements of strain and temperature with a fiber Bragg grating[J]. Journal of Translucation Technology, 2004, 3: 449 - 452. (in Chinese)
- 王远生, 杨冬晓, 毕岗, 等. 单个光纤布拉格光栅实现应变温度同时测量的研究[J]. 传感技术学报, 2004, 3: 449 - 452.
- [10] Wei Ting, Qiao Xueguang, Jia Zhenan. Displacement and temperature simultaneous measurement with single fiber Bragg grating[J]. Journal of Translucation Technology, 2005, 18(2): 358 - 362. (in Chinese)
- 尉婷, 乔学光, 贾振安, 等. 单光纤光栅实现位移、温度同时区分测量[J]. 传感技术学报, 2005, 18(2): 358 - 362.
- [11] Qiu Weiwei, Jiang Qi, Sui Qingmei. An experiment of simultaneous displacement and temperature sensing with FBG[J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 2005, 6: 22 - 25. (in Chinese)
- 邱卫卫, 蒋奇, 隋青美. FBG 位移和温度双参量传感实验研究[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2005, 6: 22 - 25.
- [12] Zhu Dandan, Li Zhiquan, Wang Haifang. Study on sampled fiber grating sensing characteristic based on SPSS software[J]. Laser & Infrared, 2009, 39(5): 521 - 523. (in Chinese)
- 朱丹丹, 李志全, 王海芳. 基于 SPSS 软件的取样光栅传感特性分析[J]. 激光与红外, 2009, 39(5): 521 - 523.
- [13] Zhao C L, Zhao J R, Huang X G. Simultaneous strain and temperature measurement using a highly birefringence fiber loop mirror and a long-period grating written in a photonic crystal fiber[J]. Optics Communications, 2009, 282(20): 4077 - 4080.
- [14] Cheng H C, Huang J F, Lo Y L. Simultaneous strain and temperature distribution sensing using two fiber Bragg grating pairs and a genetic algorithm[J]. Optical Fiber Technology, 2006, 12(4): 340 - 349.
- [15] Shao Jun, Liu Junhua, Qiao Xueguang. Study on increasing selectivity of fiber Bragg grating pressure sensor with BP neural network[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(7): 1531 - 1534. (in Chinese)
- 邵军, 刘君华, 乔学光, 等. 利用 BP 神经网络提高光纤光栅压力传感器的选择性[J]. 传感技术学报, 2007, 20(7): 1531 - 1534.
- [16] Li Jing, Liu Wei, Liu Jia. Simultaneous measurement of strain and temperature with fiber grating Based on BP network[J]. Journal of Shijiazhuang Institute of Railway Technology, 2009, 8(4): 46 - 49. (in Chinese)
- 李靖, 刘微, 刘佳. 基于 BP 网络的光纤光栅传感器对温度和应变的同时测量[J]. 石家庄铁路职业技术学院学报, 2009, 8(4): 46 - 49.