

文章编号: 2095-4980(2013)06-0981-05

基于布拉格光纤光栅的结构体变形监测

陈丽娟, 陈晓怀, 刘芳芳

(合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘 要: 对大坝、隧道等结构体外部变形监测的手段较多且成熟, 但对其内部的变形监测手段因为电类传感器、全球定位系统等应用的局限性, 目前还难监测或者监测的成本昂贵且精确度不高。针对这个问题, 利用布拉格光纤光栅, 采用可调谐匹配光纤光栅法, 设计了可远程控制的具有温度自补偿功能的动态变形监测系统。系统的分辨力为 100 nm, 非线性误差为 150 nm, 实验证明该方法用于结构体的内部变形监测不仅可行, 而且成本较低, 结构简单, 灵敏度高, 适合结构体内部变形监测的需要。

关键词: 变形监测; 布拉格光纤光栅; 温度自补偿; 可调谐匹配光栅法; 远程监控

中图分类号: TN919.71

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201306.0981

Internal deformation monitoring of structures based on Fiber Bragg Grating

CHEN Li-juan, CHEN Xiao-huai, LIU Fang-fang

(School of Instrument Science and Opto-electronic Engineering, Hefei University of Technology, Anhui Hefei 230009, China)

Abstract: The methods about external deformation monitoring of dams, tunnels or other structures become more and more mature. But it is difficult to monitor internal deformation sometimes, or such monitoring is very expensive and the accuracy is not high because of the limitations of the electric sensors, GPS and other applications. In order to solve these problems, a remote control deformation monitoring system is designed based on the Fiber Bragg Grating(FBG) with the temperature compensation, which adopts the demodulation method of the tunable matching fiber grating. The test results show that the measurement resolution is 100 nm and a nonlinear error is 150 nm. The method is feasible, effective and with low cost.

Key words: deformation monitoring; Fiber Bragg Grating; temperature compensation; tunable matching grating method; remote monitoring

为保障大坝、隧道和边坡等土木工程结构和基础设施的安全, 需要通过对它们的健康状况进行实时监测和诊断, 并采取一定的措施避免事故的发生或者减少事故发生后的损失, 这已经成为人们对现代工程越来越迫切的要求。世界各国特别是发达国家都在积极探索可用于工程结构的、行之有效的健康监测方法与系统^[1-2]。

目前对于这类结构体外部的变形监测, 常规的监测手段还是以电测方式为主, 一般采用高精度度、抗干扰的位移计、电阻应变变化、全站仪和 GPS 等方法。但对结构体内部的变形监测, 由于受信号接收的限制, GPS、全站仪无法实现测量; 沉降仪、测斜仪等这类电测传感器普遍存在寿命短, 不易实现分布式测量, 不能抗电磁干扰, 易受环境影响, 成本较高等缺点。因此常规测量手段已不能满足长期监测结构工程健康的要求^[3-6]。

布拉格光纤光栅(FBG)以其特有的灵敏度高, 抗电磁干扰能力强, 耐腐蚀, 体积小, 结构灵活, 易实现分布式测量和远距离实时监测等特点成为一种新型传感器技术, 在结构健康领域有很强的竞争力和很广阔的应用空间。目前 FBG 及其解调系统的大规模商用的制约瓶颈主要在于昂贵的成本和系统的稳定性和可靠性^[7]。本文为实现对大坝、隧道和边坡等内部的沉降变形监测的需要, 设计了基于 FBG 的动态变形远程监测系统。

1 FBG 传感原理

光纤布拉格光栅是在光纤纤芯内介质折射率呈周期性调制的一种光纤无源器件,其实质是在纤芯内形成一个窄带的滤光器或者反射镜。光纤布拉格光栅传感原理是:宽带光源射入反射型 FBG 时,符合其中心波长的光被反射回来,而其他光能透射。当温度不变时,光纤布拉格光栅的反射波长 λ_B 的漂移量 $\Delta\lambda_B$ 随着轴向应变的变化而改变,通过检测 $\Delta\lambda_B$ 即可测得微应变的大小, $\Delta\lambda_B$ 和微应变 ε 的关系见式(1), P_e 是光纤的光弹系数。

$$\Delta\lambda_B = (1 - P_e)\lambda_{B0}\varepsilon \quad (1)$$

由于光纤光栅在本征上对温度敏感,温度和沿光纤轴向的应变都可直接影响 FBG 的布拉格波长,而 FBG 本身并不能区别温度和应变各自的贡献。在对准静态或静态的应变信号进行检测时,总会存在一定的环境温度变化,对于单模光纤光栅, λ_B 随着温度和应变的变化规律可以用下式表示:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_{B0}} = (1 - P_e)\Delta\varepsilon + (\alpha + \zeta)\Delta T \quad (2)$$

式中: λ_{B0} 为不受外力、温度为 0℃ 时该光纤光栅的初始中心波长; $\Delta\varepsilon$ 和 ΔT 分别为光纤光栅所受的应变和温度变化量; α 和 ζ 分别为光纤的热膨胀系数和热光系数。由式(2)可知:由于布拉格光栅波长对应变和温度都是敏感的,当光纤光栅用于传感测量时,单个光纤光栅无法分辨出应变和温度引起的波长的改变,即存在着应变温度交叉敏感问题,解决交叉敏感问题对于 FBG 传感器的发展非常重要^[8]。本文采用参考光栅温度补偿的方法来解决这个问题。

2 系统设计

2.1 系统工作原理

基于 FBG 的变形监测系统的工作原理见图 1, FBG1 是测量传感光栅, FBG2 是温度补偿参考光栅, FBG3 是匹配光栅。测量时,宽带光源(光源的波长范围是 1 525 nm 到 1 570 nm)的光通过隔离器和耦合器 1 进入到 FBG1 中,波长与 FBG1 一致的光被反射回来,通过耦合器 2,进入到匹配 FBG2。压电陶瓷周期性地驱动匹配光栅,使其波长发生变化。当匹配光栅的波长和传感 FBG1 达到一致时,光强 E1 和 E2 最大重合,这时探测器 PD 接收到的经过耦合器 2 反射回来的光的光强达到峰值,见图 2。处理器通过检测压电陶瓷的电压,根据压电陶瓷的电压和位移之间的标定关系,可以计算出匹配光栅的位移,从而得到传感光栅因结构体变形力拉伸所产生的位移。本地处理器通过以太网将测量的数据传到远程监控中心,实现远程实时监控。图 1 中 FBG3 为温度补偿参考 FBG,其波长范围与测量 FBG 不重叠,不参与应变的测量。系统中传感 FBG1 的布拉格波长和参考 FBG3 的布拉格波长分别为 1 551.5 nm 和 1 552.5 nm,直径均为 0.125 mm,长度为 10 mm,为了消除环境温度变化等对传感 FBG 所带来的干扰,2 根光栅在封装时要靠紧贴一起。实际测量时,对测量传感器上只施以压力,因此在没有测量时,参考 FBG 和测量 FBG 的反射谱很靠近,一旦后者受到压力后,它的光谱将只会向左移,而参考 FBG 的反射谱此时几乎不漂移。这样就可以用 1 根匹配光栅同时解调 2 根光栅传感器信号的系统设计,可以减少因光学器件和光路差异而引起的额外误差。

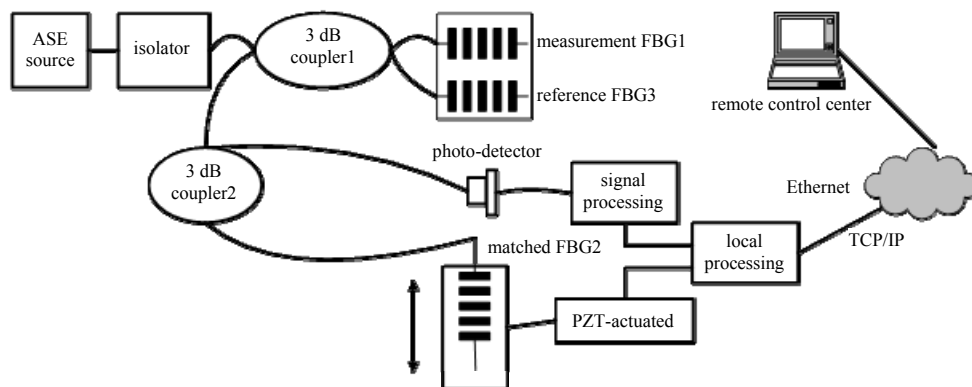


Fig.1 Structure of system
图 1 系统结构图

2.2 信号解调设计

信号解调是监测系统的重要部分,解调方法直接决定了系统的解调精确度、价格和稳定性。目前实际工程中,普遍运用价格昂贵的光纤光栅解调仪来对FBG解调,所以难以大规模推广应用,因此结构简单,分辨率高,价格低廉的解调是实用化的关键。本文采用可调谐匹配光栅法来进行解调,这种方法成本低,解调精确度高。硬件电路由信号解调电路和压电陶瓷(Piezoelectric Ceramic Transducer, PZT)的驱动电路组成,见图3。

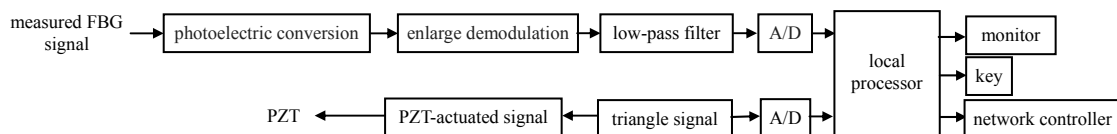


Fig.3 Scheme of the demodulation method of tunable matching fiber grating

图3 可调谐匹配光栅解调法的总体方案

光电探测器采用的是高灵敏度的 InGaAs 平面结构,7 MHz PIN 探测器将反射回来的参考光栅的信号转化为电信号,再通过峰值检波电路提取峰值信息,该信息被送入处理器处理。当处理器判定参考光栅和测量光栅的光强达到最大时,读取压电陶瓷的电压,通过压电陶瓷的实时电压和位移之间的关系计算出压电陶瓷的位移即参考光栅的位移,从而得到测量光栅的波长变化量,以此计算出系统的变形量。针对可调谐匹配光栅法,解调的软硬件部分均采用嵌入式系统的设计思路,与通用的波长解调仪相比,不仅简化整个系统的结构,而且节省系统成本。

压电陶瓷驱动信号的产生有2种方案:一种是用现有的信号发生器,另一种是自主设计的信号发生器模块。考虑到系统的集成化、自动化和小型化的需求,采用后一种方案。

3 试验系统

3.1 PZT 标定

实验中,匹配光栅用 AB 胶粘贴在 PZT 上,匹配光栅的布拉格波长为 1 548.5 nm,直径为 0.125 mm,长度为 10 mm,压电陶瓷的位移就是匹配光栅的位移,因此 PZT 的标定精确度决定了系统的精确度。在本设计中,压电陶瓷用 0 V~5 V 的三角波驱动,测量时只使用三角波上升沿的电压,且将三角波的直流减小到只有 40 mV 以下,同时采用高精度的位移标定系统,这样可以有效减小压电陶瓷蠕变非线性性的影响。试验中,采用 Renishaw XL-80 激光干涉仪作为位移标定系统,该干涉仪的精确度是 0.5 ppm(相对误差为 0.5×10^{-6}),频率达到 50 Hz,最大测量速度 4 m/s。

压电陶瓷的位移值变化存在随机误差,对测得的数据取平均值,对电压-位移曲线进行 8 阶广义多项式拟合,压电陶瓷的拟合曲线和实测曲线见图4,可看出位移小于 5 μm 时,拟合误差小于 500 nm,其余范围内,拟合的误差小于 100 nm,因此光纤光栅的实际感测范围是 5 μm ~30 μm 。在实际变形测量中,为了扩大传感器的测量范围,测头的结构设计需要结合水准仪、裂缝计和位移计。

3.2 实验结果

将 FBG 传感器用针管封装,将封装后的传感器一端固定在工作台上,另一端固定在纳米级定位台上,通过

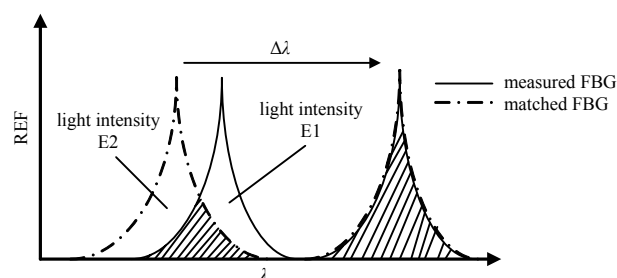


Fig.2 Diagram of the detector receiving light intensity

图2 探测器接收光强示意图

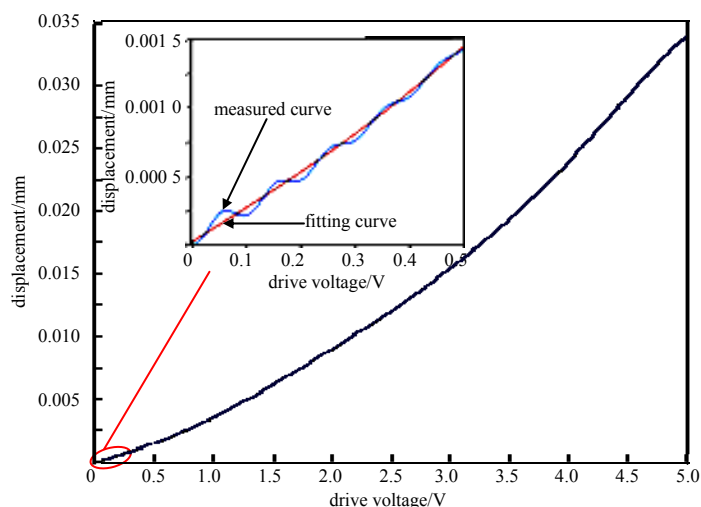


Fig.4 Fitting curve and the measured curve of the PZT

图4 压电陶瓷拟合曲线和实测曲线

定位台的运动来拉伸传感器。定位台的精确度为 5 nm。实验装置见图 5。封装时,补偿 FBG 要靠近传感 FBG,形成双 FBG 传感结构,传感器 FBG 同时感测微位移和温度,补偿 FBG 只感测温度,实质是 2 个传感器处于同一变化的环境场中。通过随后的数据处理,由温度引起的误差可以实时进行补偿。在温度实验中,用 1 个热源去缓缓靠近传感器,然后又离开。图 6(a)是传感 FBG 的输出,图 6(b)是补偿 FBG 的输出,图 6(c)是系统经过补偿后的输出。通过对传感 FBG 人为增加了 2 个不同的干扰,测试补偿 FBG 的增敏效果。第 1 次当温度变化时,图 6(a)和图 6(b)的 2 个光纤光栅传感器的信号输出有明显变化,但通过对传感 FBG 进行补偿,图 6(c)的最终信号输出几乎没有被改变。第 2 次,当系统中出现别的原因的干扰(如光强的波动、电路系统的干扰等),2 个传感器都受到影响,但图 6(c)的最终信号输出也几乎没有被改变。因此该实验说明,这样的双传感的补偿设计不仅能消除温度干扰,而且对于不明原因的干扰也能够消除,这就提高了传感器的灵敏度和系统的稳定性。

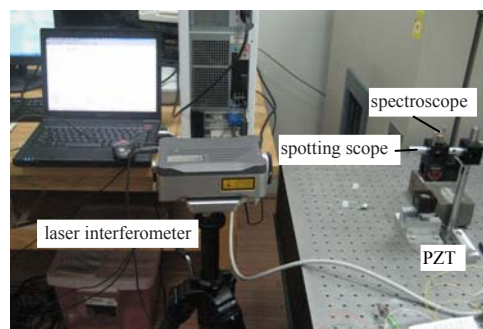


Fig.5 Experimental setup

图 5 实验装置

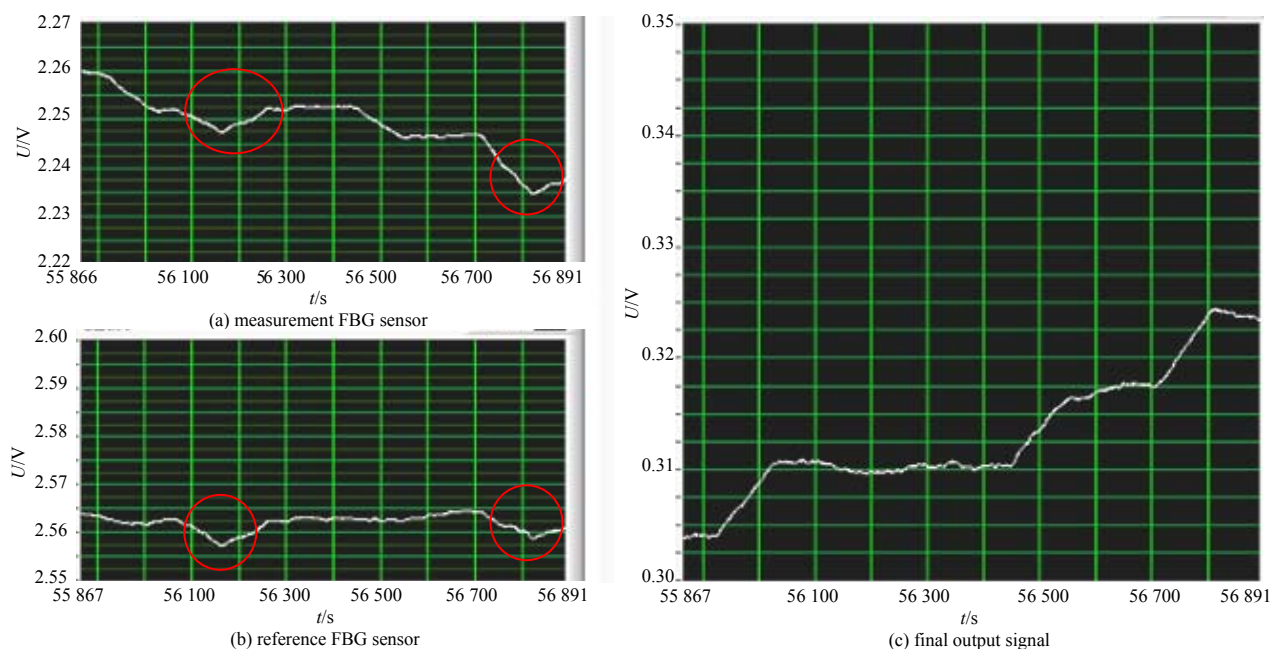


Fig.6 Stability of FBG-based sensing system

图 6 基于光纤光栅的双传感结构的稳定性

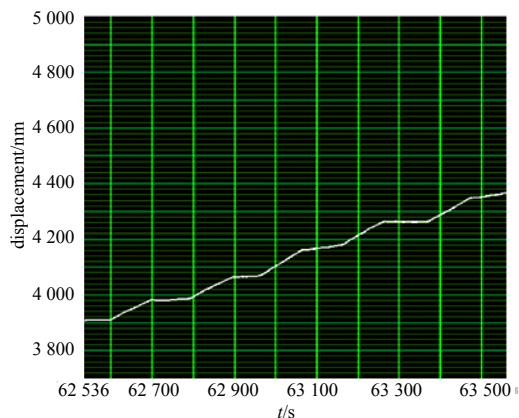


Fig.7 Resolution of system

图 7 系统的分辨力

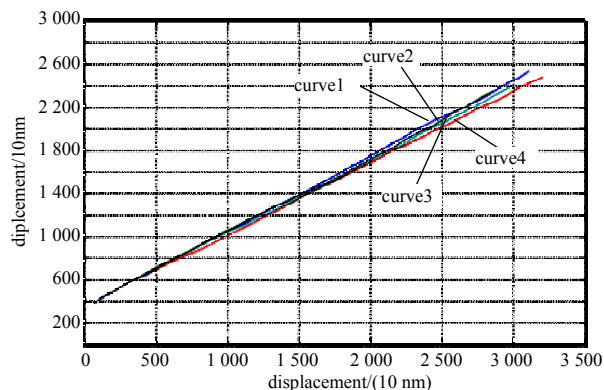


Fig.8 Repeatability of system

图 8 系统的重复性

图7是使用PI纳米定位台步径为0.05 μm 时测量信号的输出,可以看出系统的分辨力100 nm。在线性度试验中,利用最小二乘拟合法,得到系统的非线性误差为150 nm,主要是来自压电陶瓷的非线性误差。图8是系统测量的4组数据,可以看出,重复性误差较大,这主要是由于在每次测量过程中测量光纤拉伸时产生的不同倾斜角导致。所以在实际的工程应用中,应考虑将光栅悬挂于垂直位置,以减少重复性误差的影响。

4 结论

FBG 光纤光栅以其优良的特性在结构健康监测系统中有着广泛的应用前景,但成本和精确度是制约其发展的主要瓶颈。采用合适的系统结构和解调技术,提高测量的分辨率和精确度,降低使用光纤光栅的成本是目前这一领域的研究方向。本文提出并设计的嵌入式监测系统,代替价格昂贵的光纤光栅解调仪,相关实验表明,系统具有较好的稳定性、重复性和很好的灵敏度。在进一步完善传感器的封装后,该系统可应用于大坝、桥梁、隧道等各类需要实时和远程监测的领域。

参考文献:

- [1] Hugo F Lima, M Dominguesa Fátima, Rogério N Nogueira, et al. Dual scale structural health monitoring system combining FBG sensors and laser scanning[EB/OL]. [2010-04-30]. <http://dx.doi.org/10.1117/12.827712>.
- [2] Zhang Zhili, Fu Zhulin, Zhao Bing, et al. Research of Weapon Equipments Health Monitoring Based on FBG Intelligent Composite Materials[EB/OL]. [2010-04-30]. <http://dx.doi.org/10.1117/12.865499>.
- [3] 赵星光,邱海涛. 光纤 Bragg 光栅传感技术在隧道监测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 587-593. (ZHAO Xingguang, QIU Haitao. Application of Fiber Bragg Grating Sensor Technology to Tunnel Monitoring[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 587-593.)
- [4] Lee Chin-Hyung, Park Ki-Tae, Joo Bong-Chul, et al. Test-bed for the remote health monitoring system for bridge structures using FBG sensors[EB/OL]. [2010-04-30]. <http://dx.doi.org/10.1117/12.821304>.
- [5] 朱鸿鹄,殷建华,张林,等. 大坝模型实验的光纤传感变形监测[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(6): 1188-1194. (ZHU Honghu, YIN Jianhua, ZHANG Lin, et al. Deformation Monitoring of Dam Model Test by Optical Fiber Sensors[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(6): 1188-1194.)
- [6] 王莹,赵伟,宋茂忠. 全球定位系统信号模拟中导航电文生成与测试[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(3): 393-398. (WANG Ying, ZHAO Wei, SONG Maozhong. Generation and test of navigation message in GPS signal simulation[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013, 11(3): 393-398.)
- [7] Takahashi I, Sekine K, Takeyama H, et al. Life cycle structural health monitoring of airframe structures by strain mapping using FBG sensors[EB/OL]. [2010-04-30]. <http://dx.doi.org/10.1117/12.847262>.
- [8] 丁邦宙. 基于光纤布拉格光栅的触发式三维测头的研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2011. (DING Bangzhou. Design and Development of the 3-D Probe Based on Fiber Bragg Grating[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2011)

作者简介:



陈丽娟(1978-),女,合肥市人,讲师,在读博士研究生,主要研究工作是精密测试技术及仪器.email:shawiu2000@163.com.

陈晓怀(1954-),女,安徽省安庆市人,教授,博士生导师,主要从事精密测试技术及仪器、精度理论的研究。

刘芳芳(1978-),女,安徽省淮南市人,副教授,主要从事精密测试技术及仪器、光纤光栅传感的研究。