

文章编号:1002-2082(2006)03-0235-04

可分离温度影响的 FBG 应变测量方法

刘汉平¹, 王健刚², 杨田林³, 陈冰泉¹

(1. 山东大学 控制科学与工程学院, 济南 250061; 2. 莱阳农学院 工程学院,
山东 莱阳 265200; 3. 山东大学 威海分校 空间科学与应用物理系, 山东 威海 264209)

摘要: 光纤布拉格光栅在通信和传感领域具有广泛的应用。利用光纤布拉格光栅中心波长的偏移,可以测量温度和应变等多种物理量,但必须解决光栅对温度和应变的交叉敏感问题。该文简要分析了光纤光栅作为传感器的基本原理及其优点,设计了利用参考光栅法分离温度影响以及利用掺铒光纤的自发发射放大特性分离温度影响的 2 种应变测量方法。最后,介绍了一种利用倾斜光纤光栅的主模和边模对布拉格光栅中心波长的偏移进行解调的方法,该方法成功地分离了温度对应变测量的影响。

关键词: 光纤光栅传感器;倾斜光纤光栅;掺铒光纤放大器

中图分类号:TN253;TN929.11

文献标志码:A

Method to measure strain by separating temperature effect with fiber Bragg grating

LIU Han-ping¹, WANG Jian-gang², YANG Tian-lin³, CHEN Bing-quan¹

(1. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;
2. School of Engineering, Laiyang Agricultural University, Laiyang 265200, China; 3. Department of Space Science and Applied Physics, Shandong University at Weihai, Weihai 264209, China)

Abstract: The fiber Bragg gratings (FBG) have found wide applications in the field of communication and sensing. Temperature, strain and other physical parameters can be measured by detecting the shift of the central wavelength in FBGs, but cross sensitivity of FBG to temperature and strain needs to be solved. The principle and advantage of FBG sensors are investigated briefly, reference grating method and Erbium-doped fiber amplifying method to separate the temperature effect are given. A method to demodulate the shift of the central wavelength in FBGs by using the main mode and the side mode of a tilted fiber grating is introduced. With this method, the effect of temperature on strain detection is discriminated successfully.

Key words: fiber Bragg grating sensor; tilted fiber grating; Erbium-doped fiber amplifier

引言

光纤布拉格光栅传感器(FBGS)是伴随着光纤通信技术和传感技术的发展,尤其是光纤布拉格光栅(FBG)侧面写入技术的突破而迅速发展起来的一种新型传感技术。与传统的传感技术相比较,

FBGS 具有一系列显著优点:(1)体积小、重量轻,可嵌于结构内部进行检测;(2)耐腐蚀、抗电磁干扰,可在非常恶劣的环境中工作;(3)敏感性高、测量精确;(4)波长解调,受光源波动、环境干扰等影响小;(5)适于大规模分布测量等。因此,FBG 传感

收稿日期:2004-12-22; 修回日期:2005-10-30

作者简介:刘汉平(1971—),男,山东高密人,山东大学博士研究生,主要从事光纤传感的研究。E-mail:liuhanping206@163.com
技术一问世就引起了人们的极大兴趣,已在许多领域得到应用。本文简要分析了 FBG 作为传感器的

基本原理,并给出了2种利用FBG单独测量应变的方法。

1 FBG传感器的基本原理

从特定宽带光源发出的光经过FBG时,有一部分窄带光被FBG反射。反射光的中心波长即布拉格波长可表示为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \tag{1}$$

式中, λ_B 为布拉格波长,又称为FBG中心波长; n_{eff} 为光纤纤芯有效折射率; Λ 为布拉格周期。

对于目前使用的FBG,其反射率一般都大于90%,反射带宽为0.1~0.2 nm,FBG的长度为1~10 mm,中心波长位于光纤的第3个低损耗窗口1550 nm附近。当FBG受到外界影响(主要是环境温度变化,发生轴向应变和受到横向压力)时,其有效折射率和布拉格周期都会发生相应变化,从而引起FBG中心波长的偏移。如果只考虑以上3个因素的线性影响,忽略高阶影响项,则FBG中心波长偏移可表示为^[1]

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left\{ 1 - \frac{n^2}{2} [\rho_{12} - \nu(\rho_{11} + \rho_{12})] \right\} \epsilon + (\alpha + \xi)\Delta T + \left[-\frac{1-2\nu}{E} + \frac{n^2}{2E}(1-2\nu)(2\rho_{12} + \rho_{11}) \right] P \tag{2}$$

式中, ρ_{11} 和 ρ_{12} 为光纤的光弹系数; ν 为泊松比; α 为热膨胀系数; ξ 为热光系数; E 为杨氏模量; ΔT 为温度变化量; n 为有效折射率; ϵ 为轴向应变; P 为作用于光纤侧面的单位面积上的压力。

公式(2)中的系数都可以通过实验测定且对不同光纤基本保持不变,故可简化为^[2]

$$\Delta\lambda_B = K_1\epsilon + K_2\Delta T + K_3P \tag{3}$$

式中, K_1, K_2, K_3 分别为FBG的应变敏感系数、温度敏感系数和压力敏感系数。

对一个普通的裸光纤,其数值为^[2]

$$K_1 \approx 1.15 \text{ pm}/\mu\epsilon; K_2 \approx 11 \text{ pm}/\text{C}; K_3 \approx -3.0 \text{ pm}/\text{MPa}$$

显然FBG的压力敏感系数很小,故可忽略其压力敏感性,只考虑轴向应变和温度变化对FBG中心波长的影响。这样(3)式可简化为

$$\Delta\lambda_B = K_1\epsilon + K_2\Delta T \tag{4}$$

由此可见,FBG在受到轴向应变和温度变化影响时中心波长会发生相应偏移。根据这个偏移可推知外界影响因素的情况,这就是使用FBG制作传感器的基本原理。从(4)式可以看出,轴向应变和温度变化都能引起FBG中心波长变化,即FBG中心波长对温度和应变是交叉敏感的,实验时必须解

决这个问题。

2 分离温度影响的2种方法

由上面的介绍可知,FBG可用作温度或应变传感器,但必须解决温度和应变的交叉敏感问题。一般来说,若想利用FBG单独测量环境温度,只需使FBG不受到应变影响,而仅受温度影响就可以了。但若想利用FBG单独测量应变或者同时测量应变和温度,问题则要复杂得多。关于这个问题,国内外已有不少解决办法。例如,利用FBG和长周期光纤光栅组成的混合周期光栅法^[3],由FBG和非本征型法布里-珀罗干涉腔组成的敏感元件法^[3],高保偏光纤上的双重FBG法等^[3]。这些方法各有特点,适合于不同情况下温度和应变的测量。本文对FBG传感器进行了辅助设计,消除了温度对应变测量的影响,并介绍了一种新颖的利用倾斜光栅(TFBG)对波长偏移进行解调的方法(可供FBG传感器设计者参考)。

2.1 用双FBG传感探头分离温度影响

为了分离温度对应变测量的影响,由2个相互邻近的中心波长相同但光栅长度不同的FBG组成一个传感探头(FBG1的长度 L_1 大于FBG2的长度 L_2),如图1所示。其中FBG1装在一个玻璃管里,2端与玻璃管固定,使其只受外界温度影响;而FBG2不装在玻璃管里,受温度和应变影响。由于光纤和玻璃管具有相同的热胀系数,因此FBG1和



图1 双FBG传感探头

Fig. 1 Dual-head FBG sensor

FBG2的温度敏感系数相同。这样,当传感探头未受应变影响时2个FBG中心波长偏移相同,只产生1个反射信号;当探头处有应变时2个FBG中心波长偏移不同,产生2个反射信号。由于2个FBG的长度不同,因而反射率不同,即2信号的峰值强度不同,FBG1的反射信号峰值大于FBG2的信号峰值。2光栅的中心波长偏移分别表示为^[4]

$$\begin{cases} \Delta\lambda_1 = A\Delta T \\ \Delta\lambda_2 = A\Delta T + B\epsilon \end{cases} \tag{5}$$

其中, A 为双FBG的温度敏感系数; B 为FBG2的应变敏感系数。

显然,这2个光栅反射波长的差值是FBG2所受应变的线性函数,即

$$\Delta\lambda = \Delta\lambda_2 - \Delta\lambda_1 = B\epsilon \tag{6}$$

由(6)式可见,只要测定了 $\Delta\lambda$,即可分离温度对

FBG 波长偏移的影响,从而确定传感探头处的应变。为了把波长偏移量 $\Delta\lambda$ 确定下来,可以使用一个倾斜光栅(TFBG)作为解调器。在制作时使用的干涉条纹与光纤轴线不是严格垂直,而是有一个微小夹角(如取 1.5°)。这种光栅的透射谱有 2 条凹陷,对应 2 条谱线,分别称为主模(main mode)和边模(side mode),其波长用 λ_{RM} 和 λ_{RS} 表示,如图 2 所示。

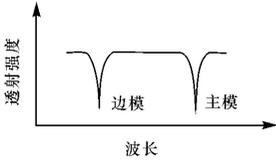


图 2 倾斜光栅的透射谱线

Fig. 2 Transmission spectrum of the tilted FBG

TFBG 的一个重要特性是主模和边模波长受温度和应变影响,但其波长差 $\Delta\lambda_0 = \lambda_{RM} - \lambda_{RS}$ 不受温度和应变影响。根据这个特性,可以用 TFBG 作为解调元件组成检测装置,如图 3 所示。

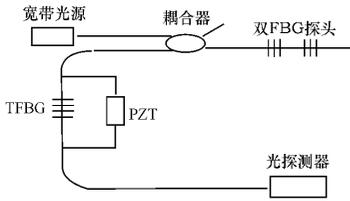


图 3 用 TFBG 检测 FBG 中心波长偏移

Fig. 3 Detection for shift of the FBG central wavelength with TFBG

宽带光源发出的光经过一个 3dB 耦合器进入传感探头。TFBG 2 端与一个压电陶瓷伸张器(PZT)相固定,PZT 2 端加有 10 Hz 的锯齿型扫描电压,从而使 TFBG 的主模和边模可发生周期性的同向偏移。当传感探头未受应变影响时只产生 1 个反射信号。在一个扫描周期的初期,TFBG 的主模和边模波长都小于传感探头的反射信号波长,此时这个反射信号可以全部透过 TFBG 到达光探测器 PD,产生一个直流信号(电压或电流)。但随着加在 PZT 2 端电压的增大,TFBG 的主模和边模波长先后 2 次与传感探头反射信号一致,此时传感信号将被 TFBG 阻断而不能被 PD 探测器接收,从而形成 2 个电压(或电流)极小值,它们之间的时间间隔为 Δt_0 ,对应于 TFBG 2 条透射谱线的波长差,如图 4(a)所示。当传感探头处有应变时,则会产生 2 个波长不同的反射信号。它们经过 TFBG 透射后

被 PD 接收,PD 的输出信号有 4 个极小值,分为 2 组。每一组极小值中下陷程度较大部分对应 FBG1 的反射信号,下陷程度较小部分对应 FBG2 的反射信号。每组极小值时间间隔为 Δt ,如图 4(c)所示,这个时间间隔对应着传感探头 FBG1 和 FBG2 反射信号的波长差。因此,传感器受应变影响而引起的反射波长偏移可表示为

$$\Delta\lambda = \Delta\lambda_0 \frac{\Delta t}{\Delta t_0} \quad (7)$$

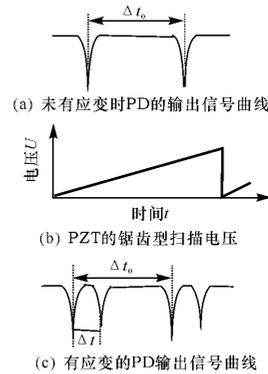


图 4 PZT 的扫描电压和 PD 探测器的输出信号

Fig. 4 Photodiode signals and strain signal applied to the PZT

由(7)式即可把 $\Delta\lambda$ 确定下来,从而可推知传感器所受应变的大小。由 FBG1 和 FBG2 反射信号的相对位置还可以判断传感探头处 FBG2 所发生的应变是伸长了还是收缩了。若 FBG2 的信号在 FBG1 的信号右边时, $\lambda_2 > \lambda_1$, 则 FBG2 伸长了;相反则 FBG2 收缩了。利用双 FBG 探头及 TFBG 解调光栅分离温度效应可消除温度对应变测量的影响。这种方法的优点是检测装置比较简单,检测成本低,且分离温度的效果比较好,对应变的测量精度高。这种方法特别适合于建筑物、桥梁等结构的应变检测。

2.2 用 EDFA 的自发发射放大特性分离温度影响

除了采用双 FBG 组成传感探头分离温度对应变测量的影响外,还可以由掺铒光纤放大器(EDFA)和 FBG 共同组成传感探头分离温度和应变。由于 EDFA 在一个特定波长范围内(例如 1 480 nm 附近)的小信号增益 G 是温度的线性函数,而 EDFA 放大的自发发射(ASE)功率 P_{ASE} 可表示为^[5]

$$P_{ASE} = n_{sp} h \nu \Delta \nu [G(T) - 1] \quad (8)$$

式中, n_{sp} 为自发发射系数; h 为普朗克常数; ν 为

光的频率; $\Delta\nu$ 为 ASE 的带宽。

显然 P_{ASE} 也是温度的线性函数,其波动反映了所处环境温度的变化。因此,可以把 EDFA 和 FBG 靠在一起做成一个传感探头,基本装置如图 5 所示。

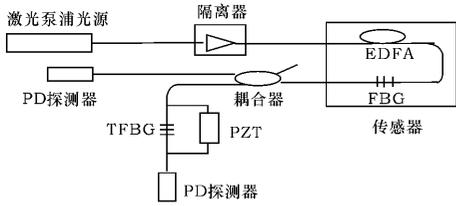


图 5 用 EDFA 和 FBG 检测温度和应变的基本装置

Fig. 5 Experimental setup for simultaneous measurement of strain and temperature with a single FBG and an EDFA

泵浦激光发出的光经过隔离器进入传感器。这些光经 EDFA 的自发发射放大,有一部分被 FBG 反射后从传感器输出。输出信号经耦合器后一部分直接进入 PD 探测器检测 EDFA 的功率 P_{ASE} 的变化,另一部分经 TFBG 后可检测传感探头中 FBG 的中心波长的变化。由理论分析可知,EDFA 的自发发射功率的变化及 FBG 中心波长的变化可表示为

$$\begin{cases} \Delta P = A\Delta T \\ \Delta\lambda = B\epsilon + C\Delta T \end{cases} \quad (9)$$

式中, ΔT 为探测器处温度的变化; ϵ 为 FBG 产生的应变; A 为 EDFA 功率的温度系数; B 和 C 分别为 FBG 的应变和温度系数。

A, B 和 C 是由检测系统自身性质决定的常数,可由实验测定。因此,只要检测出了功率和波长的变化,即可由方程求出温度变化和应变,从而分离出温度对应变测量的影响。

该检测方法的优点是,EDFA 放大的自发发射功率很大(增益可达 30 dB)^[6],受传输损耗及外界环境干扰的影响比较小,特别适合于温度分布基本

相同的应变场的分布测量,例如建筑物、桥梁、矿井内等。这些区域各点温度差别小,而应变差别大,这时可利用 EDFA 的宽带特性(增益带宽可达 30 nm)^[6],采用波分复用技术,在 1 根光纤上把 EDFA 和多个中心波长不同的 FBG 串联起来。探测区域内的温度变化可由 EDFA 的功率变化确定,各点的应变可由 FBG 中心波长的变化除去温度影响后确定下来。由于 EDFA 的光具有放大作用,因此 FBG 的透射谱的峰值强度(凹陷深度)也得到了相应放大,从而使信号易于测量。

3 结论

以上分析了 FBG 传感器的基本原理,给出了利用 FBG 测量应变的 2 种方法。利用这 2 种方法可以有效地分离温度对 FBG 中心波长偏移的影响,解决 FBG 对温度和应变的交叉敏感问题,实现对桥梁、堤坝、建筑物等应变的精确测量。

参考文献:

[1] RAO Yun-jiang. In fiber Bragg grating sensors[J]. Meas Sci Technol, 1997, (8)4:355-375.
 [2] WANG Yong, TJIN S C, LIM T K, et al. Monitoring of concrete curing process with embedded fiber Bragg gratings[J]. SPIE, 2001, 4204:23-30.
 [3] 王惠文. 光纤传感技术与应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2001.
 [4] KANG S C, KIM S Y, LEE S B, et al. Temperature-independent strain sensor system using a tiled fiber Bragg grating demodulator[J]. IEEE Photonics Technology Lett, 1998, 10(10): 1461-1463.
 [5] 王玉田, 王遂, 张玉艳, 等. 用单光纤布拉格光栅实现应力和温度同时测量[J]. 仪器仪表与装置, 2001, 16(4):12-14.
 [6] 张明德, 孙小茵. 光纤通信原理与系统[M]. 南京:东南大学出版社, 2001.

(上接第 234 页)

[3] MATSUI Y, PELUSI M D, SUZUKI A. Generation of 20 fs optical pulse from a gain-switched laser diode by a four-stage soliton compression technique [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1999, 11 (10):1217-1219.
 [4] WU Jian, LOU Cai-yun, LI Yu-hua, et al. Theoretical and experimental study on compression of chirped optical pulses utilizing dispersion-compensation and high-order soliton effect[J]. Acta Physica

Sinica, 1998, 47(4):619-623.
 [5] AGRAWAL G P. Nonlinear Fiber Optics: Applications of Nonlinear Fiber Optics[M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002:42.
 [6] DAI Ju-feng, MA Xiao-hong, YU Jin-long, et al. Compression of picosecond optical pulses in comb like dispersion fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(10):1161-1164.