

光纤应变、温度、振动同时测量新技术的研究\*

曾祥楷 饶云江 余般梅 王义平 朱 涛 冉曾令

(重庆大学光电工程学院,重庆 400044)

**摘 要** 本文介绍了集成式 Bragg 光纤光栅(FBG)和非本征型 Fabry-Perot 干涉腔(EFPI)复合传感器的结构及应用该传感器同时测量静态应变、温度和振动的原理。利用 FBG、EFPI 和低相干性干涉信号解调方法实现了用一个传感器同时测量三个参量。实验结果表明温度精度达 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,应变精度为 $\pm 20\mu\epsilon$ ,振幅分辨率达 1nm,测量重复性好。

**关键词** 光纤传感器;光纤光栅;F-P 干涉仪;应变;温度;振动

0 引言

近年来,Bragg 光纤光栅(FBG)与其它光纤干涉传感器结合而形成的传感系统<sup>1</sup>的研究引起了人们的极大兴趣,这种传感器可广泛用于复合材料、大型建筑结构、宇航飞行器、军工产品等的结构健康自诊断,以实现所谓的智能材料和结构在线检测与分析等<sup>2</sup>。在结构健康状态检测中,多参量的同时测量是十分必要的,例如静态应变和温度及其分离以实现热应变误差校正就相当重要。此外,除静态应变和温度外的结构振动模态测试和分析也十分重要<sup>3</sup>。

应用单一传感器进行多参量传感具有传感参量多、传感头体积小、易于遥测、降低成本、系统集成度高等特点,所以,多参量的同时传感是当今传感领域中的一个重要发展方向。光纤传感器由于具有在一根光纤上可以同时传递如强度、相位、波长、偏振等多种光信号的特性,因而可望为解决多参量同时测量这一科学难题提供一条可行的途径。就温度和应变同时测量而言,由于 FBG 具有许多独特的优点,故与 FBG 有关的多参量传感技术已形成了一个研究热点。FBG 和其它光纤传感器结合以实现温度和应变的传感方法<sup>1</sup>有双波长 FBG 法、FBG 基频与二次谐波波长法、不同包层尺寸的 FBG 法、FBG 和长周期光栅法等。这些方法在进行温度和应变的分离及热应变误差校正时比较

复杂,精度较低,且难于进行高灵敏度的振动测量。

事实上,非本征型 F-P 干涉(EFPI)可用于应变测量<sup>4</sup>,FBG 可用于温度监测。这两种形式的传感元件集成在同一个石英毛细管中便构成光纤光栅 FBG/EFPI 温度及应变传感器<sup>5</sup>。在此基础上,本文首次利用低相干性干涉<sup>5</sup>信号 PZT 快速扫描解调法从 EFPI 干涉腔中提取振动信息,通过一定的数据处理,可进行温度应变校正并进行静态应变、温度和振动的同时测量,这就是下面介绍的 FBG/EFPI 光纤应变、温度及振动传感系统。

1 传感器结构及其系统

FBG/EFPI 集成传感器结构如图 1 所示,传感器由石英毛细管、光导入导出单模光纤及其中的 FBG、用作反射端的多模光纤构成。峰值波长为 1548nm、长度约为 5mm 的 FBG 被写入单模光纤,在离光栅中心 5mm 处的一端切断;单模和多模光纤均插入内外直径分别为 128/300 $\mu\text{m}$ 、长

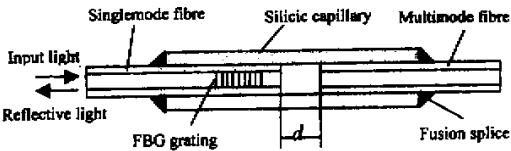


图 1 传感器结构  
Fig.1 Schematic diagram of the FBG/EFPI

\*国家杰出青年科学基金(600025515)和重庆大学博士后基金资助项目  
万方数据  
收稿日期:2001-03-16

50mm 的石英管中,两光纤端面相距约为几百微米,光纤光栅和由光纤端面构成的非本征型 F-P 腔位于中间位置;在石英管两端,光纤和石英管熔接在一起. 光纤光栅在石英管中处于自由状态,不受应力作用,用于温度检测;单、多模光纤端面构成的传感 F-P 腔长在应变作用下产生相应位置变化,用于应变检测,这就构成了可同时检测温度和应变的 FBG/EFPI 光纤传感器.

用 FBG/EFPI 传感器和低相干性干涉信号 PZT 快速扫描解调法同时检测静态应变、温度和振动的传感系统如图 2 所示. 中心波长分别为 1.55 $\mu\text{m}$ 、1.31 $\mu\text{m}$  的两宽带光源通过 2 个 2 $\times$ 2 耦合器 C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub> 进入 FBG/EFPI 传感器,FBG 光栅反射 1548nm 附近的一个窄带光,其余波长的光透过 FBG 光栅,并在传感器 EFPI 的两光纤端面反射而产生干涉条纹.FBG 的反射光和 EFPI 干涉条纹迭加在一起,通过耦合器 C<sub>2</sub> 和 1 $\times$ 2 波分复用器 WDM 分波后,1.55 $\mu\text{m}$  光谱段内的 FBG 反射光和 EFPI 干涉条纹进入光谱分析仪 OSA,其典型光谱如图 3 所示. 1.31 $\mu\text{m}$  光谱段内的 EFPI 干涉条纹通过 2 $\times$ 2 耦合器 C<sub>3</sub> 到达另一由单模光纤的端面和 PZT 上多模光纤端面一起形成的解调 F-P 腔,当解调 F-P 腔的腔长与传感 F-P 腔长一致时,将产生干涉信号,这里应用了低相干性干涉信号解调技术中的伪外差相位探测方法以测量由于振动带来的传感 F-P 腔长的微小变化<sup>5,6</sup>. 该干涉信号通过 C<sub>3</sub> 到达光电探测器 PD. PD 电信号和同频的 PZT 驱动器同步信号同时送入锁相放大器,锁相放大器的输出与两信号的相位差成正比. 锁相放大器的输出和光谱仪数据经波形存储器和计算机处理后,即可获得经校正过的静态应

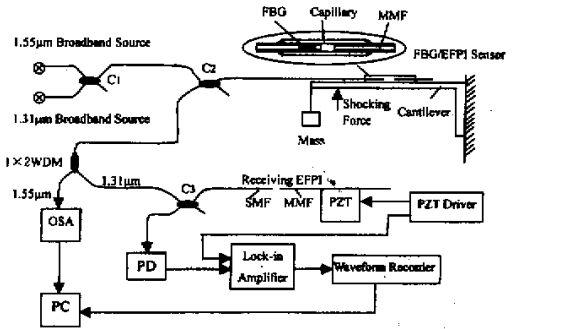


图 2 静态应变、温度和振动检测系统  
Fig. 2 Schematic diagram of the FBG/EFPI sensor system for simultaneous static-strain, temperature and vibration measurement

变、温度和振动参量.

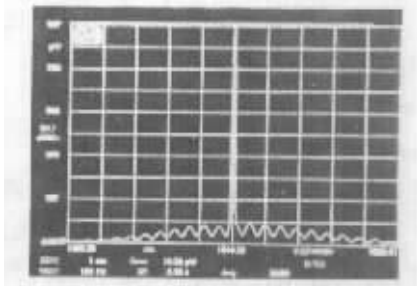


图 3 1.55 $\mu\text{m}$  谱段内的 FBG 和 EFPI 传感器的反射光谱  
Fig. 3 Reflective spectra of both the FBG and the EFPI sensor in the 1.55 $\mu\text{m}$  range

## 2 测量原理

光谱仪接收 1.55 $\mu\text{m}$  附近 40nm 区域内的 FBG 反射光和 EFPI 干涉条纹信号,用于温度和静态应变的测量;波形存储器得到 1.31 $\mu\text{m}$  附近 40nm 区域内低相干性干涉信号的相位随传感器 EFPI 腔长变化的波形,用于振动测量.

### 2.1 温度测量

光谱仪上的 FBG 相对反射光强系数为  $R(\lambda) = \tanh(\Omega)$ , 式中  $\Omega = \pi n(L_G/\lambda)(\Delta n/n)\eta(V)$ ,  $\eta(V) = 1 - 1/V^2$ ,  $V \geq 2.4$  为归一化频率,  $n$  为纤芯折射率,  $L_G$  为光栅长度,  $\lambda$  为波长,  $\Delta n/n$  为相对折射率差. 该式决定了光栅中心波长  $\lambda_0$  (本传感器为 1548nm 附近) 有一尖锐的较大反射峰,其峰值远大于干涉条纹强度. 光谱仪测量温度  $T$  时 FBG 峰值波长相对于温度  $T_0$  时的漂移量  $\Delta\lambda$ ,其关系为

$$T = k_1 \Delta\lambda + T_0 \quad (1)$$

式中,  $k_1$  为 FBG 的温度系数. 只要测量出波长相对漂移量  $\Delta\lambda$ ,即可测量温度  $T$ .

FBG 反射光和 EFPI 干涉光叠加在一起, EFPI 干涉谱是余弦周期变化,导致 FBG 反射谱峰的非对称性变形,峰值点将偏离中心位置;随着应变、温度、腔长的变化,这种非对称变形是随机的. 若仍用常规峰值点法确定 FBG 中心波长将引起较大的测量误差. 为此,取 3dB 带宽处平均波长作为 FBG 中心波长,其测量精度较高.

### 2.2 静态应变测量

FBG 中心波长周围的光谱是 EFPI 干涉谱,光谱仪上的 EFPI 干涉条纹分布为

$$I_{\text{FP}}(\lambda) = R_i T(\lambda) [1 + S(\lambda) \cos(2kd)] \quad (2)$$

式中,  $R_i$  为光纤端面反射率,  $T(\lambda) = 1 - R(\lambda)$ ,  $S(\lambda)$  为干涉条纹衬比(度),  $k = 2\pi/\lambda$  为波数,  $d$  为传感器 EFPI 腔长. EFPI 的光谱为余弦分布,但幅

值远小于 FBG 反射幅值。在干涉光谱中任取余弦分布的两个峰值点波长  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ ，由此计算 EFPI 腔长  $d$  为

$$d=m\lambda_1\lambda_2/(2|\lambda_1-\lambda_2|) \tag{3}$$

式中， $m$  为  $\lambda_1$  到  $\lambda_2$  间的干涉条纹数。

在高精度测量中，要考虑温度对石英管、光纤长度的影响。传感器的石英管埋入或表面粘附于被测物，受到应变作用时，EFPI 腔长将发生变化。通过式(4)，可测量出在不受应变和受到应变  $\epsilon$  作用时的 EFPI 腔长变化量  $\Delta d$ ，并在测量出温度  $T$  后，则应变为

$$\epsilon=k_2\Delta d+k_3T \tag{4}$$

式中， $k_2$  为 EFPI 腔长应变系数； $k_3$  为 EFPI 的温度应变系数。这些系数通过标定来确定。

2.3 振动的测量

1.31 $\mu\text{m}$  段的光在传感 EFPI 腔和外调 EFPI 腔中产生低相干性干涉(当两腔长相同时)，干涉后的光强经 PD 光电转换输出信号  $S(d_1, d)$  为

$$S(d_1, d)=S_0+\int_{-\infty}^{+\infty}\varphi(\lambda)\cos2\pi\lambda^{-1}(d_1-d)\text{d}\lambda \tag{5}$$

式中， $\varphi(\lambda)$  为光探测器的光谱响应函数； $d_1$  为解调 EFPI 腔长； $S_0$  为直流分量。

因为， $d_1>0, d>0, S$  取极大值的条件为  $d_1-d=m\lambda, m$  取整数， $m=0$  时  $S$  取最大值。

在微振动测试时，传感器 EFPI 腔长和解调 EFPI 的扫描腔长均小于  $\lambda$ 。PZT 在锯齿波电压作用下，腔长  $d_1$  也将锯齿波地变化。每当  $d$  与  $d_1$  相差  $\lambda$  时，PD 探测器产生一个极大值，经低通滤波和整形处理后，PD 输出是与锯齿波同频的准正弦波；与 PZT 驱动器扫描同频方波比相，锁相放大器的输出与比相信号的相差成正比。该相差取决于传感 EFPI 腔长的变化，被测物的振动使传感 EFPI 腔长  $d$  产生相应的变化。设振动信号为  $V(t)$ ，则腔长  $d$  变化量为  $\Delta d=k_4V(t)$ ，式中  $k_4$  为常量， $t$  是时间。

当 PZT 扫描频率为  $f_s$  且  $f_s$  大于振动频率的若干倍以上时，PD 输出的准正弦信号  $S_{\text{PD}}$

$$S_{\text{PD}}=A\sin[2\pi f_s t+\varphi_0+k_4V(t)] \tag{6}$$

式中， $A$  为幅值， $\varphi_0$  为无振动时的初始相位常量。与扫描同频的同步信号为

$$S_{\text{syn}}=B\sin(2\pi f_s t+\varphi_1) \tag{7}$$

式中  $\varphi_1$  为初相位常量， $B$  为幅值。锁相放大器输出信号为  $S_{\text{PD}}$  和  $S_{\text{syn}}$  的相位差成正比，则

$$\phi_{\text{out}}=k_5V(t)+\varphi_2 \tag{8}$$

式中， $k_5$  转换常量， $\varphi_2=\varphi_1-\varphi_0$  为无振动时的两信号初始相位差。

输出  $\phi_{\text{out}}$  与振动信号是线性关系，反映了振动的实际情况，包括振幅、振动频率及阻尼系数等相关参量。

3 传感实验

根据图 2 所示原理框图实现了悬臂梁静态应变、温度和振动的同时监测实验。实验的主要参量为：光源是带宽 40nm、中心波长分别为 1.55 $\mu\text{m}$ 、1.31 $\mu\text{m}$  的二个宽带超发光二极管(SLD)光源；PZT 驱动电压为 9V $\pm$ 500mv，锯齿波扫描频率为 50Hz；PD 输出信号放大倍数为 3 $\times 10^4$ 。FBG/EFPI 光纤传感器粘贴于悬臂梁的上表面，悬臂梁的端头悬挂重物以产生静态应变，在其下表面中心位置施加一个冲击力以使悬臂梁产生自振。

通过光谱仪测量 FBG 中心波长漂移量得到的温度实验曲线如图 4 所示；本传感系统和电子应变仪对悬挂重物产生应变的实测对比曲线如图 5 所示；悬臂梁受冲击力时测得的冲击振动实验曲线如图 6 所示，该曲线表明其固有自振频率为 3Hz。

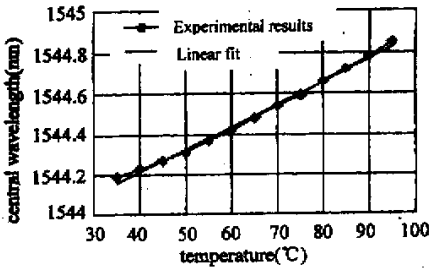


图 4 FBG 温度实验曲线  
Fig. 4 Results of temperature measurement with the averaged wavelength method

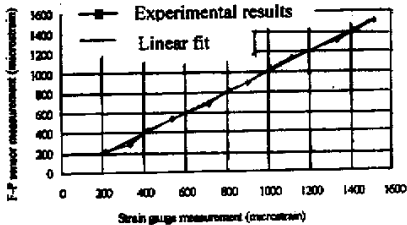


图 5 EFPI 与电子应变仪测量结果对比  
Fig. 5 Results of strain measurement compared with gauge measurement

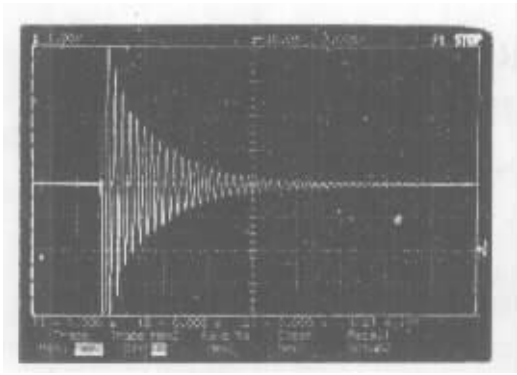


图 6 悬臂梁自激振动响应曲线  
Fig. 6 Experimental results of self-excited vibration response of the cantilever beam

4 结论

本文将 FBG 光栅和 EFPI 干涉腔集成在同

一个石英毛细管中构成内置复合传感器,通过光谱测量实现温度和静态应变的同时监测;同时,由两个 EFPI 干涉腔形成的低相干性干涉效应经压电陶瓷 PZT 的锯齿波快速扫描相位解调,实现了振动的测量. 采用 3dB 带宽平均波长法确定 FBG 中心波长,基本消除了 EFPI 干涉谱引起的畸变和串扰对温度测量的影响. 用温度校正静态应变的热应变误差,用比相方法解调微振动量,实现了高精度、高分辨率的温度、静态应变和振动的同时测量. 实验表明,应变测量精度可达  $\sim \pm 20\mu\epsilon$ , 温度测量精度达  $\pm 1^\circ\text{C}$ , 振动分辨率达 1nm. 传感器的温度稳定性好,测量精度高,结构紧凑体积小,耐腐蚀,经过进一步的改进,在许多场合如桥梁的健康监测中具有很好的应用前景.

参考文献

1 Rao Y J. Review article: in-fiber Bragg grating sensors. Meas Sci & Technol, 1997(8): 355~375  
2 Udd E(ed). Fibre optic smart structure. New York: John Wiley & Sons, 1995  
3 Rao Y J, Henderson P J, Jackson D A, Zhang L, Bennion I. Simultaneous strain, temperature and vibration measurement using a multiplexed in-fibre-Bragg-grating/fibre Fabry-Perot sensor system. Electronics Lett, 1997 (24): 2063~2064  
4 Bhatia V, Murphy K A, Claus R O, Jones M E, Grace J L, Tran T A, Greene J A: Optical fibre based absolute extrinsic Fabry-Perot interferometric sensing system. Meas Sci & Technol, 1996(7): 58~61  
5 Liu T, Wu M, Rao Y J, Jackson D A, Fernando G F. A multiplexed optical fibre-based extrinsic Fabry-Perot sensor system for in-situ strain monitoring in composites. J Smart Mater. and Struct, 1998(7): 1~7  
6 Rao Y J, Jackson D A. Recent progress in fibre optic low coherence interferometry. Meas Sci & Technol, 1996(7): 981~999  
7 Jackson D A, Kersey A D, Corke M, Jones J D C. Pseudo heterodyne detection scheme for optical interferometers. Electron Lett, 1982(18): 1081~1083

SIMULTANEOUS STATIC-STRAIN,TEMPERATURE  
AND VIBRATION MEASUREMENT USING A SINGLE  
FIBRE-OPTIC SENSOR

Zeng Xiangkai,Rao Yunjiang,Yu Banmei,Wang Yiping,Zhu Tao,Ran Zengling

*Department of Optronic Eng,Chongqing University,Chongqing 400044*

Received date:2001-03-16

**Abstract** A novel fibre-optic sensor integrating an in-fibre Bragg grating (FBG) and an extrinsic Fabry-Perot interferometer (EFPI) in series, used for simultaneous static strain, temperature and vibration measurement, is presented in this paper. This sensor system simultaneously measures the three parameters using the method of low coherence interferometric signal demodulation combined with optical spectrum measurement of the FBG and EFPI. The experimental results show that a static strain accuracy of  $\pm 20\mu\epsilon$ , a temperature accuracy of  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  and a vibration resolution of  $\sim 1\text{nm}$  have been achieved with good repeatability.

**Keywords** Optical fibre sensor; In-fibre gratings; Fabry-Perot interferometers; Static strain; Temperature; Vibration measurement

**Zeng Xiangkai** was born in Sichuan Province, China in 1965. He received his B. E. , M. E. and Ph. D. degrees from the Department of Optronic Engineering and the State-Run Key Lab. of Mechanical Transfer, Chongqing University in 1988, 1991 and 1999, respectively. He had worked at the Chengdu Center of Scientific Instrumentation, Academia Sinica During 1991-1995. Now he is a postdoctoral research fellow in Chongqing University and his interest is in the field of optical fiber communication and sensing.