

文章编号: 0258-7025(2006)11-1537-05

光纤光栅传感器干涉型解调仪的 稳定性分析和改进

阳 莎, 蔡海文, 黄 冲, 耿健新, 瞿荣辉, 方祖捷

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 提出了一种利用两种不同温度系数的光纤光栅对来对解调仪的不稳定性进行改进的方法, 并进行了理论分析, 研究了影响该解调仪稳定性的几个因素。将所研制的传感器布设在东海大桥上, 组成传感网络, 并用改进后的光纤光栅解调系统对传感器的信号进行解调。在大桥竣工测试时, 该传感解调系统表现出较好的性能。

关键词 光纤光栅; 解调; 传感; 相位补偿

中图分类号 TN 253; TP 212.14 **文献标识码** A

Stability Analysis and Improvement of An Inteferometric Interrogation for Fiber Bragg Grating Sensors

YANG Sha, CAI Hai-wen, HUANG Chong,
GENG Jian-xin, QU Rong-hui, FANG Zu-jie

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract A compensation method with theoretical analysis is proposed to compensate the instability of interrogation by using a pair of fiber Bragg grating (FBG) with different thermal coefficients. The factors that influenced the stability of interrogation had been investigated. Several sensors were installed in Donghai Bridge and formed a sensor network. The signals from sensors were demodulated by the improved interrogator on the final test of Donghai Bridge, which shows good performance.

Key words fiber Bragg grating; demodulator; sensor; phase compensation

1 引言

随着经济的发展, 我国基础设施建设的规模不断加大, 新建的高楼、道路、桥梁、大坝几乎遍地开花。对于这些建筑物健康状况的传感、测控成为一个关系国计民生的重要课题。传感器和传感技术成为科学研究和技术开发的热点。光纤和光纤光栅相对于环境温度和应力应变具有敏感特性, 而且其具有体积小、重量轻、抗电磁干扰性强、耐高温、耐潮湿、耐腐蚀、集信息传输与传感于一体等一系列优点, 已经被广泛应用于传感系统^[1, 2]。

光纤光栅传感的基本原理, 是测量其反射光谱峰值波长值随待测传感量的变化。在实际应用系统中实现峰值波长的准确测量, 是这一技术的关键问题之一。文献[3]报道了用一种基于 3×3 耦合器的马赫-曾德尔干涉仪(MZI)来测量光纤光栅反射峰值波长移动量的方法。该干涉仪具有动态范围大、可判断波长移动方向等优点。但是, 与通常光纤干涉仪的特点一样, 其特性会随环境温度、外界机械力和振动而变化。稳定性成为仪器实用化的主要障碍。

收稿日期: 2006-04-10; **收到修改稿日期:** 2006-05-29

基金项目: 上海市科学技术委员会科研计划项目(03dz11003)资助课题。

作者简介: 阳 莎(1981—), 男, 湖北天门人, 中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室硕士研究生, 主要从事光纤光栅制作、光纤传感等方面的工作。E-mail: yangsuo@sina.com

导师简介: 瞿荣辉(1973—), 男, 湖北人, 中国科学院上海光学精密机械研究所研究员, 博士生导师, 目前研究方向为光纤激光器及光纤传感。E-mail: rhqu@siom.ac.cn

本文对 3×3 光纤耦合器构成的非平衡马赫-曾德尔干涉仪解调系统的稳定性进行了实验研究,分析了基本原因,采用两个不同温度系数的光纤光栅组成光纤光栅对作为补偿器,对干涉仪的漂移作实时的监控和补偿,改进了干涉仪解调系统的稳定性。该解调系统在东海大桥应力温度传感系统中进行了现场实验,取得了较好的效果。

2 光纤光栅的解调和补偿

2.1 干涉仪解调原理

光纤布拉格光栅(FBG)的谐振波长随应变和温度的改变有很好的线性特性。实验测定,对于 1550 nm波段的石英光纤,光纤光栅的应变系数和温度系数分别为 $\alpha = 1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$, $\beta = 11 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ^[4]。光纤光栅的这种线性特性正被广泛地应用于应变和温度的传感器。

在光纤光栅传感系统中,必须解决测定其峰值波长的解调技术。光纤马赫-曾德尔干涉仪^[5]和扫描法布里-珀罗(F-P)干涉仪^[6]是最常用的方法。实验中采用的是基于马赫-曾德尔干涉仪的解调技术,如图 1 所示。其中,FBG1~FBG3 表示光纤光栅传感探头。宽带光源发出的光经过 2×2 耦合器后入射到多个光纤布拉格光栅传感头,各光纤布拉格光栅反射相应波长的信号光,经耦合器进入扫描光纤法布里-珀罗滤波器(FFP),并在不同时间被扫描后进入非平衡马赫-曾德尔干涉仪。马赫-曾德尔干涉仪的三个输出由三个光电二极管同时探测,经放大后由数据采集卡发送给计算机,再用 Labview 编程进行计算和处理。

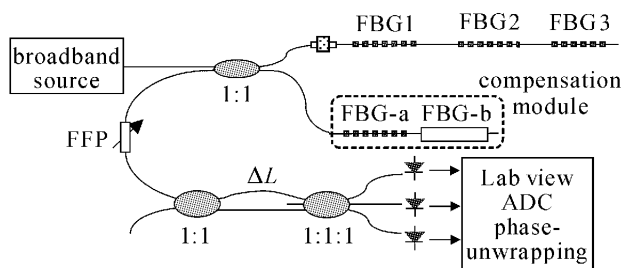


图 1 光纤光栅传感解调仪的结构图

Fig. 1 Schematic diagram of FBG sensor interrogation

文献[3]已经作了分析,指出采用 3×3 耦合器构成马赫-曾德尔干涉仪作为解调器,具有灵敏度不存在死区、能区分相移方向、可进行相位展开(Phase-unwrapping)扩大量程等优点。但是与许多干涉仪型的解调技术一样,存在着稳定性的问题。

实验采用如图 1 中虚线框内的两个光纤光栅 FBG-a 和 FBG-b 组成的补偿模块^[7],改善干涉仪的稳定性。

在无外界扰动的情況下,干涉仪将相位转换为波长的公式为

$$\phi = 2\pi n \Delta L / \lambda, \quad (1)$$

式中 ϕ 为干涉仪两臂的相位差, n 为光纤的折射率, ΔL 为干涉仪两臂的臂长差, λ 为光栅的反射波长。

由传感光纤布拉格光栅反射的光波长的变化,在马赫-曾德尔干涉仪上产生干涉相位差的变化为

$$d\phi = -\frac{2\pi n \Delta L}{\lambda^2} d\lambda = \chi d\lambda, \quad (2)$$

这里引入一个比例系数 $\chi = -\frac{2\pi n \Delta L}{\lambda^2}$, 对于不同中心波长的传感光纤布拉格光栅,其取值也不同。 χ 的取值也可以根据实际波形的周期计算和测定。

考虑到 3×3 耦合器分束比偏离 $1:1:1$ 的情况,以及三个探测器灵敏度及其放大电路放大倍数的差别,经推导^[3],解调后信号光的相位变化计算得

$$\tan \Delta \phi(t) = \frac{\sqrt{3}[\alpha_3 I_2(t) - \alpha_2 I_3(t)]}{\alpha_3 I_2(t) + \alpha_2 I_3(t) - 2\alpha_2 \alpha_3 I_1(t)}, \quad (3)$$

其中 I_1, I_2, I_3 为进入数据采集卡的三个通道的信号,即干涉仪三个输出端口的信号光经光电转换和放大后的电信号。 α_2 和 α_3 分别为 I_2 和 I_3 两个通道相对于 I_1 通道的比值,它反映了耦合器偏离 $1:1:1$ 分束比及三路光电转换特性的差异。从式(3)可以看出,通过测三路放大后的信号 I_1, I_2 和 I_3 的值,就可以得到相位的变化,进而由式(2)计算出入射光波的波长变化。

2.2 稳定性分析及补偿措施

测试光源光强的起伏,将会直接影响测量信号的大小。在用式(3)计算相移时,光源光强的起伏将会自动抵消。当然,这要求光电转换处于线性的范围内。

从干涉仪相位角的测量得到波长的变化,必须保证干涉仪两臂的折射率和臂长不变。实际上,恰恰是由于外界条件的变化,主要是温度和应力的波动,导致光经过干涉仪两臂时的光程差的变化,引起了干涉仪的相位漂移。一般光纤干涉仪两臂的长度都比较长,因此光程差漂移的影响比较严重。由式(1)可见,讨论干涉仪的相位变化至少应当考虑波长、折射率、臂长三个因素

$$\delta\phi = -\frac{2\pi n \Delta L}{\lambda^2} \delta\lambda + \frac{2\pi \Delta L}{\lambda} \delta n + \frac{2\pi n}{\lambda} \delta(\Delta L) = \delta\phi_\lambda + \delta\phi_{env}, \quad (4)$$

式中第一项在本工作中是待测量;后两项反映了由环境的变化导致的干涉仪相位的随机漂移,即合并表示为 $\delta\phi_{env}$,它一般是一个缓变量。 $\delta\phi_\lambda$ 为传感光纤光栅的相移。

光纤的热膨胀系数 $\alpha = 0.55 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$,热光系数 $\beta = 6.67 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。实验中,干涉仪的臂长差为 $\Delta L = 1.6 \text{ mm}$,每臂长约 $L = 1 \text{ m}$,若两臂的温度差变化 ΔT ,则 $\delta\phi_{env} = \frac{2\pi\Delta L}{\lambda}\delta n + \frac{2\pi n}{\lambda}\delta(\Delta L) = \frac{2\pi\Delta L}{\lambda}n \cdot \beta \cdot \Delta T + \frac{2\pi n}{\lambda}L \cdot \alpha \cdot \Delta T$,其中 $n = 1.4502$ 为光纤纤芯的折射率。对于波长为 1550 nm 的光波来说,当 $\Delta T = 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, $\delta\phi_{env} = 0.05165 \times 2\pi$ 。干涉仪在 1550 nm 处干涉曲线的周期为 1.5 nm ,所以两臂的温度变化相差 $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 时 $\delta\phi_{env}$ 对应的波长改变量为 $\frac{2\pi}{1.5 \text{ nm}} = \frac{\delta\phi_{env}}{\Delta\lambda}$,即 $\Delta\lambda = 77.48 \text{ pm}$ 。可以看出温度的微小变化给干涉仪带来很大的波动。再加上外界的振动、应力等因素的影响,干涉仪的稳定性就会更差,这对于解调仪的实用化是一个很大的障碍。

图 2 为在传感光栅未受到外力作用的条件下,实验测量得到的在 50 min 内相位(通过式(2)转换为波长的变化,以皮米为单位)的漂移情况。曲线 2 是在无补偿情况下传感光栅波长相位的漂移。可以看出,对于未受应力影响、峰值波长没有变化的传感光栅,解调后的光信号波长在不到 1 h 的时间中发生了 30 多皮米的漂移。这种漂移就是由于干涉仪受到外界扰动所引起的。无补偿情况下的这种漂移对于快速变化的待测应变的传感,影响还不是很大,但是对于缓慢变化和小的待测应变的传感,影响就很大。

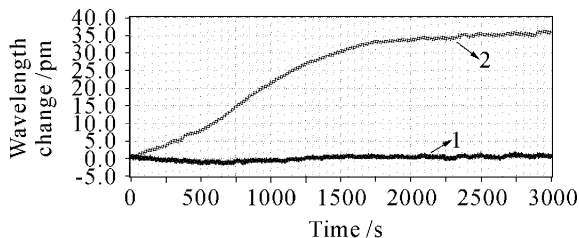


图 2 有补偿和无补偿情况下解调仪的测试信号曲线

Fig. 2 Interrogated signal curves with and without compensation

为了能够准确直观地观察到传感光栅波长的变化,我们需要监测马赫-曾德尔干涉仪的漂移情况。为此,采用由两个不同温度系数的光纤光栅组成的光纤光栅对构成补偿模块,如图 1 中虚线方框所示。

这两个光纤光栅分别固定封装在高、低膨胀系数的两种材料上,本文采用铝块和石英。封装后可以测量得到它们的峰值波长温度系数,然后在不受外力的条件下安装在解调仪内部。解调仪在使用的时候,在每一次测量传感光纤光栅波长变化的同时,也测量补偿模块光纤光栅的波长变化。这两个补偿光栅反射的光波,经过干涉仪后的相位变化可以表示为

$$\delta\phi_a = \gamma_a \delta T + \delta\phi_{env}, \quad (5a)$$

$$\delta\phi_b = \gamma_b \delta T + \delta\phi_{env}, \quad (5b)$$

其中 $\delta\phi_a$ 和 $\delta\phi_b$ 表示两补偿光栅的相位变化, γ_a 和 γ_b 为补偿模块中两个光纤光栅的相位温度系数,它等于峰值波长温度系数乘以式(2)中的系数 χ ,可以事先测定。 δT 为补偿模块处的温度变化。由式(5a)和(5b)可以得到

$$\delta T = (\delta\phi_a - \delta\phi_b) / (\gamma_a - \gamma_b), \quad (6a)$$

$$\delta\phi_{env} = (\gamma_b \delta\phi_a - \gamma_a \delta\phi_b) / (\gamma_a - \gamma_b), \quad (6b)$$

由此可见,测量补偿模块中的两个光纤光栅的相移,就得到环境因素引起的随机漂移因子 $\delta\phi_{env}$ 。将其代入式(4),就可以扣除干涉仪的零漂相移,得到传感光纤光栅的相移 $\delta\phi_\lambda$,从而补偿干涉仪漂移的影响。由上述补偿原理可知,补偿模块中两个光纤光栅的峰值波长,不能与传感光纤光栅的峰值波长相同,这一点在传感相同设计时需要加以考虑。

图 2 中曲线 1 是根据上述方法对曲线 2 的数据作实时校正后的波长,可以看到零漂降到了 $1 \sim 2 \text{ pm}$ 量级,反映出良好的补偿效果。图 3 为在实验室内对安装在悬臂梁上的传感光纤光栅进行测量的实验结果。对悬臂梁施加应力,使光纤光栅的波长逐次变化 10 pm , 20 pm , 30 pm , 40 pm , 50 pm ,然后再释放施加在光栅上的力,如此重复三次。由多波长计和解调仪同时观察其波长变化量,其数据如表 1 所示。解调仪检测到的波长变化,经补偿模块的数据校正后,如图 3 中曲线 3 所示,曲线 1 和 2 为干涉仪测得的两个补偿光栅的信号,反映了干涉仪的漂移情况。补偿计算的波长变化量与多波长计测试结果相差在 2 pm 之内。从图中还可以看出,每次释放施加的力后,光栅的波长变化又回到了零点,说明补偿效果良好。如果没有经过补偿光栅的补偿,则每次释放施加的力后,解调仪显示的波长变化值就不会回到零点,而是相对零点有一个偏移,这个偏移量与干涉仪受到的扰动大小有关,图 3 中曲线 1 和 2 的信号就反映了扰动的大小。

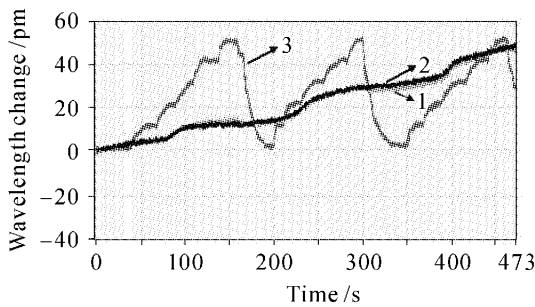


图3 对光栅多次施力重复三次的解调曲线

Fig. 3 Interrogated curves by pressing the FBG sensor for several times

表1 解调仪和多波长计测试结果的比较

Table 1 Comparison of test result between interrogation and multi-wavelength meter

Multi-wavelength display /pm	Interrogation display /pm		
	First	Second	Third
0	0	1	0
10	11	12	11
20	21	21	21
30	31	32	32
40	41	42	42
50	51	51	51

2.3 其他不稳定性因素

除了干涉仪两臂的折射率和臂长之外,还有几个方面的因素会对解调仪的稳定性有所影响。

第一,构成干涉仪的 2×2 和 3×3 光纤耦合器的稳定性,是一个重要因素。虽然这两种元件都是市场供应的成熟产品,在光纤通信系统中广泛应用,但是对于干涉仪来说,还有更高的要求,耦合器的保偏性、分束比随温度的波动等因素都会影响到解调仪的稳定性。其次,在解调仪中采用的扫描光纤法布里-珀罗滤波器的稳定性也是需要考虑的因素。虽然在该解调仪中光纤法布里-珀罗滤波器主要用于传感光纤光栅波长的解复用,不起确定波长的作用,但是它的温度稳定性,包括其驱动器的稳定性,还是一个必须考察的问题。实验发现,由于驱动光纤法布里-珀罗滤波器工作的三角波电压会发生漂移,使得光纤法布里-珀罗滤波器的扫描范围发生变化。三角波电压的频率不稳定性也对解调结果带来影响。而且即使是在恒定的电压下,随着周围温度等的影响,光纤法布里-珀罗滤波器的透射波长和峰值功率也都会有比较大的变化。此外,实际应用中的电磁干扰对解调仪的影响也需要检验,特别是对于微弱信号的检测,必须采用良好的电磁屏蔽。

文献[3]介绍了采用相位展开算法扩大传感测量范围的方法。根据非平衡马赫-曾德尔干涉仪的原理,干涉周期与臂长差成反比。由式(2)可得,检测的相移对于波长变化的灵敏度正比于臂长差: $\frac{\partial\phi}{\partial\lambda}$

$$= \frac{-2\pi n\Delta L}{\lambda^2}$$

适当增加臂长差,将提高这一灵敏度,也即提高被测量对于噪声和漂移干扰的比值: $\partial\phi_\lambda/\partial\phi_{env}$,有利于测量的稳定性。但是另一方面,也增加了相位展开计算的工作量和精度要求。因为 ΔL 的增加将减小干涉仪的自由光谱区: $\Delta\lambda = \lambda^2/(n\Delta L)$ 。这需要在设计传感系统和解调仪时,根据实际使用要求做出折中考虑。

3 光纤光栅准分布式传感系统和解调仪的实际应用

在东海大桥进行了使用文中研制的光纤光栅传感解调仪的实验。为了监测大桥的健康情况,在东海大桥斜拉索部位的桥箱里安装了光纤光栅应变传感器。每个桥箱里分别安装五个不同探测点,用来探测五个不同部位的应变情况。其中三个探测点同时安装应变传感器和温度传感器,两个探测点只安装应变传感器。温度传感器用来监测桥箱内温度的变化,以补偿应变传感器的温度效应。每个桥箱内的八个传感光栅组成一个传感网络,其传感信号用解调仪解调并显示出来。图4为安装的一个应变传感器的图片。

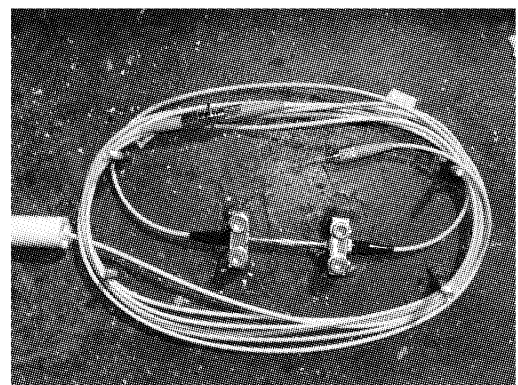


图4 传感器安装的现场图

Fig. 4 Local picture of installed sensor

在大桥竣工测试中,仪器记录了不同负载下的应变情况。静载测试时,24辆卡车缓缓地在桥上前进,并在两个斜拉索之间的主通航孔停留几分钟。动载测试时,2辆卡车一组以不同速度驶过大桥。

大桥静载测试时,24辆卡车一齐开到停泊点,

然后静止不动。撤消静载时,是分批启动撤走。图 5 为加静载和撤消静载时,其中一个传感器的波长变化曲线。可以看出传感器反映了加静载和撤消静载时卡车的应变情况。

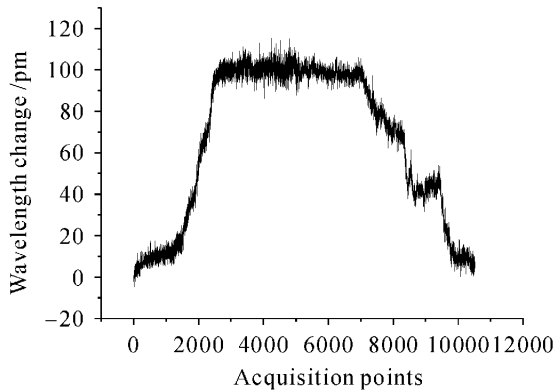


图 5 在桥面加静载和撤消静载时一个传感器波长的变化曲线

Fig. 5 Wavelength change of a sensor by adding and removing static load on bridge

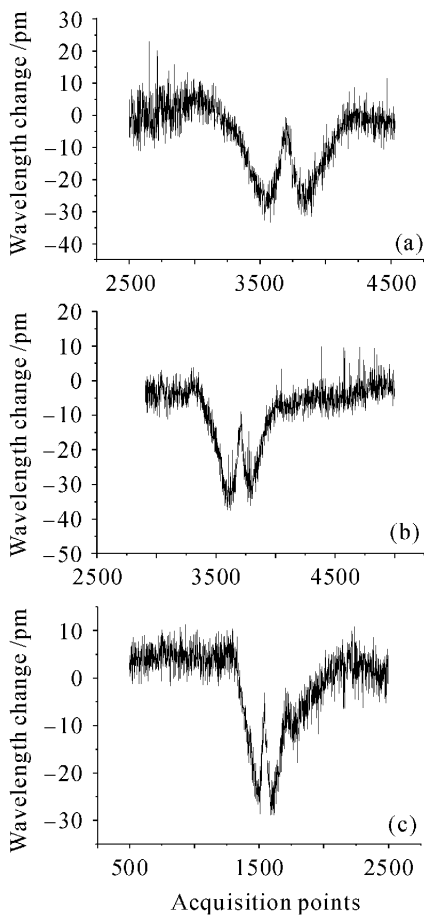


图 6 两辆卡车以 10 km/h(a), 20 km/h(b)和 40 km/h(c)的速度从桥面驶过时的测试信号

Fig. 6 Interrogated signal when two trucks run through the bridge with the velocity of 10 km/h (a), 20 km/h (b) and 40 km/h (c)

图 6(a), (b), (c) 分别为卡车以 10 km/h, 20 km/h 和 40 km/h 的速度从桥上驶过时, 其中一个传感器测得的信号。从图中可以看到, 两辆卡车驶过桥面时引起先后应变的变化。行驶速度越快, 测试信号形状“W”越窄。

4 结 论

建立了一个由 2×2 和 3×3 光纤耦合器构成的非平衡马赫-曾德尔干涉仪, 用来作为准分布式光纤光栅传感系统的解调仪。分析了影响该解调仪稳定性的几个因素。采用光纤光栅对的补偿模块, 较好地解决了干涉仪的漂移问题。报道了传感系统和解调仪在东海大桥应力传感中实际应用的初步结果。用光纤干涉仪作为光纤光栅传感器的解调方法, 具有成本低廉、使用方便的优点, 是光纤光栅传感技术推广应用的一个技术支持。本文工作表明, 采用补偿方法解决解调仪稳定性后, 就有可能将干涉仪推向实际应用。

参 考 文 献

- 1 Turan Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8):1277~1294
- 2 V. Bhatia, A. M. Vengsarkar. Optical fiber long-period grating sensors [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(9):692~694
- 3 Huang Chong, Cai Haiwen, Geng Jianxin *et al.*. Wavelength interrogation based on a Mach-Zehnder interferometer with a 3×3 fiber coupler for fiber Bragg grating sensors [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(10):1397~1400
黄 冲, 蔡海文, 耿健新 等. 基于 3×3 耦合器的马赫-曾德尔干涉仪的光纤光栅波长解调技术[J]. *中国激光*, 2005, **32**(10): 1397~1400
- 4 Huang Rui, Cai Haiwen, Qu Ronghui *et al.*. Separately measurement of strain and temperature using a single fiber Bragg grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2):232~235
黄 锐, 蔡海文, 瞿荣辉 等. 一种同时测量温度和应变的光纤光栅传感器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2):232~235
- 5 A. D. Kersey, T. A. Berkoff. Dual wavelength fiber interferometer with wavelength selection via fibre Bragg grating elements [J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(13):1215~1216
- 6 A. D. Kersey, T. A. Berkoff, W. W. Morie. Multiplexed Bragg grating fiber-laser strain-sensor system with a fiber F-P wavelength filter [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(16):1370~1372
- 7 M. D. Todd, G. A. Johnson, B. L. Althouse. A novel Bragg grating sensor interrogation system utilizing a scanning filter, a Mach-Zehnder interferometer and a 3×3 coupler [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2001, **12**(12):771~777