

文章编号: 0258-7025(2005)07-0956-05

轮辐式温度自动补偿型光纤光栅测力传感器

张伟刚, 李红民, 开桂云, 董孝义

(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

摘要 采用轮辐式传感机构设计, 将两个不同波长的布拉格光栅与轮辐中性轴线同时成相同角度, 粘贴在两个对称轮辐侧面的中间位置构成传感头。利用光纤光栅波长绝对编码的特性, 设计并研制了轮辐式温度自动补偿型光纤光栅测力传感器。理论分析和实验结果证明, 该传感器具有温度自动补偿特性, 可用于压力和拉力的高精度感测, 其最大力的测量值达到 3 kN, 温度自动补偿范围为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

关键词 集成光学; 光纤光栅; 轮辐式; 测力传感器; 温度自动补偿

中图分类号 TN 247; TN 253; TP 212.14 **文献标识码** A

Spoke-Type Fiber Grating Sensor of Measuring Force with Temperature Active Compensation

ZHANG Wei-gang, LI Hong-min, KAI Gui-yun, DONG Xiao-yi

(Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract Adopting the design of spoke-type sensing structure, the sensing head is composed of two Bragg gratings, which have different wavelengths and are bonded to the middle of two symmetrical spoke side surfaces with same angles along the direction of the spoke neutral axis. Using the characteristic of fiber grating absolute code, the spoke-type fiber grating sensor of measuring force with temperature active compensation is designed and manufactured. The theoretical analysis and experimental results indicate that this sensor has the function of temperature active compensation, it can be used in high precision sensing and measuring of pressure and pull, the maximal force measurement value is up 3 kN and the temperature active compensation range is between $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $75\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Key words integrated optics; fiber grating; spoke-type; sensor of measuring force; temperature active compensation

1 引 言

光纤光栅传感器是当前传感器领域研究的热点^[1]。近年来, 诸如感测应变、应力、位移、曲率、角度、压强、电流、电压、频率等类型的光纤光栅传感器已有报道^[2~10]。由于光纤光栅对温度和应变的交叉敏感特性, 使其应用受到一定程度的限制。为了克服这一缺陷, 人们提出了许多解决方法^[11~14]。从温度补偿的方式而言, 主要有主动补偿和被动补偿之分^[15,16]。这两种方式各有所长: 前者机构设计须精巧, 可用单根光栅实现, 属温度直接补偿方式; 而

后者机构设计简单, 贴埋容易实现, 但需增加辅助光栅, 属温度间接补偿方式。在大型土木结构体的应变、地深处矿井支架的形变、石油井下油气的压力、深海舰艇外壳的压强等参量的实时监测中, 特别需要进行温度补偿式测量, 最大限度地削弱温度对测量结果的影响, 以保证监测的有效性和可靠性^[1,17]。

本文设计了一个具有抗剪切的对称四轮辐传感机构, 将光栅串中的两个光纤布拉格光栅作为传感元件, 分别与中性轴线成相同的角度粘贴在两个对称轮辐侧面的中间位置, 研制出温度自动补偿型光纤光栅测力传感器。

收稿日期: 2004-09-06; 收到修改稿日期: 2004-12-06

基金项目: 国家 863 计划(2002AA313110)和南开大学科技创新基金资助项目。

作者简介: 张伟刚(1959—), 男, 黑龙江省伊春市人, 南开大学现代光学研究所教授, 博士, 主要从事光子技术、现代光通信和光纤传感、新型光子器件方面的研究。E-mail: zhangwg@nankai.edu.cn

2 机构与原理

图 1 为轮辐式温度自动补偿型光纤光栅测力传感器机构与原理示意图。该传感器设计成一个由轮毂、轮辐和轮圈组成的具有抗剪切的对称四轮辐结构, 轮毂嵌入轮毂筒之内, 轮毂筒、轮辐、轮圈和基座连为一体。

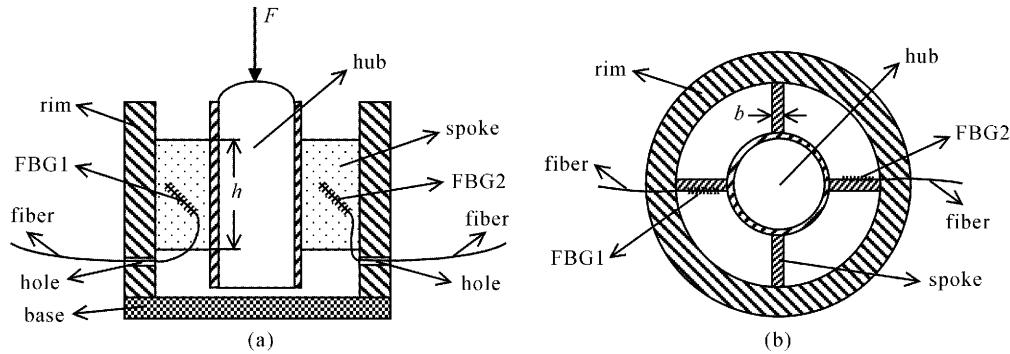


图 1 轮辐式温度自动补偿型光纤光栅测力传感器机构与原理示意图

(a) 侧面图; (b) 俯视图

Fig. 1 Schematic diagram of structure and principle of spoke-type fiber grating sensor of measuring force with temperature active compensation

(a) section; (b) overlook

对于矩形截面的轮辐, 剪应力呈抛物线形分布, 且在轮辐的中性面上剪应力最大, 为平均剪应力的 1.5 倍。弹性体受到剪应力作用时, 会产生剪应变, 其大小受剪切模量 $G = E/[2(1 + \mu)]$ 的制约。由材料力学平面应力状态下的主应力公式可知: 对同一轮辐, 与中性面成 $+45^\circ$ 或 -45° 方向的正应力应等于最大剪应力, 其最大剪应变 ϵ_m 可表示为^[18]

$$\epsilon_m = \frac{3(1 + \mu)F}{2NEbh}, \quad (1)$$

式中 N 为轮辐的对数, E 为材料的杨氏模量, μ 为材料的泊松系数, b 为轮辐截面的宽度, h 为轮辐截面的高度, F 为施加的外力。

在传感机构中, 将光纤光栅串中波长分别为 λ_1, λ_2 的两个光纤布拉格光栅 FBG1 和 FBG2 作为传感元件, 分别与中性轴线成相同的角度 ($+45^\circ$ 或 -45°) 粘贴在两个对称轮辐侧面的中间位置。由光纤光栅传感原理可知, 当轮毂顶部受到均匀垂直压力 F 作用时, 该力通过轮辐的剪应变对粘贴其侧面上的两个光纤光栅产生拉伸或压缩效应, 其中 FBG1 受到拉伸作用, FBG2 受到压缩作用, 从而导致两个光栅的周期发生变化。由光纤光栅传感原理^[19] 及 (1) 式可得, 两个光纤光栅中心波长漂移 $\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2$ 与两个轮辐的最大剪应变 $\epsilon_{1m}, \epsilon_{2m}$ 的关系分

别为: 外力 (或载荷) 作用在轮毂的顶部, 传递到对称轮辐上使之受到纯剪切力的作用, 通过测量轮辐上的剪应力来间接地测量外力。由材料力学知识可知, 若轮毂和轮圈的刚度足够大, 在不超过许用应变的条件下, 可以将每对轮辐视为一根两端固定的弹性梁, 而四个轮辐中的每根承受的剪应力为轮毂所受外力的 $1/4$ 。

别为

$$\frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_1} = \chi(1 - p_e)\epsilon_{1m} = \frac{3\chi(1 - p_e)(1 + \mu)F}{2NEbh} = K_{F1}F, \quad (2)$$

$$\frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_2} = \chi(1 - p_e)\epsilon_{2m} = -\frac{3\chi(1 - p_e)(1 + \mu)F}{2NEbh} = K_{F2}F, \quad (3)$$

式中 p_e 为光纤的有效弹光系数, χ 为应变传递因子, $0 < \chi < 1$, 它与机构设计、衬底材料性质、胶水特性以及光栅的粘贴质量等有关。

考虑到光纤光栅的温度效应, $\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2$ 与力 F 和温度变化 ΔT 的关系分别为

$$\Delta\lambda_1 = K_{F1}F + K_{T1}\Delta T \quad (\text{对 FBG1}), \quad (4)$$

$$\Delta\lambda_2 = K_{F2}F + K_{T2}\Delta T \quad (\text{对 FBG2}), \quad (5)$$

式中 K_{F1}, K_{F2} 和 K_{T1}, K_{T2} 分别为传感器中两个光纤光栅的力和温度的灵敏度系数, K_{F1} 和 K_{F2} 的具体表达式由 (2), (3) 式决定; K_{T1} 和 K_{T2} 与光纤光栅的性质和传感机构衬底材料的热力学性质有关。由于两个光纤光栅的粘贴材料一致, 调整粘贴位置和角度并使之一致, 可使 $K_F = K_{F1} = -K_{F2}, K_T = K_{T1} = K_{T2}$ 。于是, 由力 F 引起的光栅串的波长差为 $\Delta\lambda_{12}$

$= \Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2$, 由(4), (5) 两式得到光栅串波长差 $\Delta\lambda_{12}$ 与外力 F 的关系为

$$\Delta\lambda_{12} = \frac{3\chi(1-p_e)(1+\mu)(\lambda_1 + \lambda_2)}{NEbh} = \xi F, \tag{6}$$

式中 $\xi = K_{F1} - K_{F2}$ 为力 F 的灵敏度系数。(6) 式是轮辐式温度自动补偿型光纤光栅测力传感原理的基本关系式。由(6) 式可知, 两个光栅的波长差 $\Delta\lambda_{12}$ 与外力 F 成正比关系, 且与温度变化无关。这说明, 利用该传感器, 通过测量两个光纤光栅中心波长漂移的变化值, 即可感测外力(或载荷)的大小, 能够实现具有温度自动补偿功能的高精度力的感测。

对于将两个光纤光栅与中性轴线分别成一定角度($+45^\circ$ 和 -45°), 交叉粘贴在同一个轮辐的两个侧面的传感器情况, 其分析方法与此类似, 在此不重述。

3 结果与分析

实验所用的光纤布拉格光栅 FBG1 和 FBG2 是利用相位掩模法自行写制的, $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时 FBG1 和 FBG2 的长度、自由波长、带宽和峰值反射率分别为 12 mm 和 11 mm, 1553.26 nm 和 1551.48 nm, 0.21 nm 和 0.22 nm, 16.0 dB 和 16.5 dB。图 2 为轮辐式温度自动补偿型测力传感器实验装置示意图。其中, 轮毂直径和高度分别为 35 mm 和 32 mm, 轮毂筒厚度为 2 mm; 轮毂顶端为弧状, 高于轮毂筒 5 mm; 轮辐材料为高弹性的耐腐蚀钢材(40CrMoA), 它的高和宽分别为 15 mm 和 3 mm, 轮圈的内径和外径分别为 35 mm 和 50 mm, 厚度和高度分别为 15 mm 和 35 mm; 基座高度为 5 mm, 且与轮辐、轮圈连为一体; 轮毂底端与基座上表面相距 3 mm。

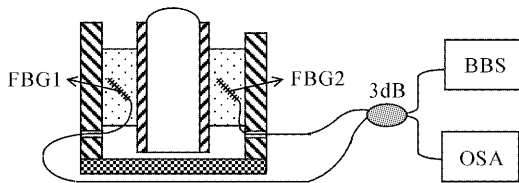


图 2 轮辐式温度自动补偿型测力传感器实验装置示意图

Fig. 2 Experimental setup schematics of spoke-type fiber grating sensor of measuring force with temperature active compensation

实验前, 将 FBG1 和 FBG2 分别与中性轴线同时成 $+45^\circ$ 或 -45° 角, 粘贴在两个对称轮辐侧面的

中间位置, 并使光纤平滑地从预留孔中引出, 分别连接到 3 dB 耦合器同侧的两个接线端; 而耦合器另一侧两个接线端分别与宽带光源(BBS)和光纤光谱仪(OA)连接。

实验中, 利用千斤顶对传感器施加压力, 压力的大小由压力计读出。在 $0\sim 30\text{ kN}$ 的压力范围内, 用测量精度为 0.02 nm 的多波长计进行测量。图 3 给出了 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时 FBG1 和 FBG2 在自由态和 $F = 30\text{ kN}$ 时的波长漂移对比反射谱。

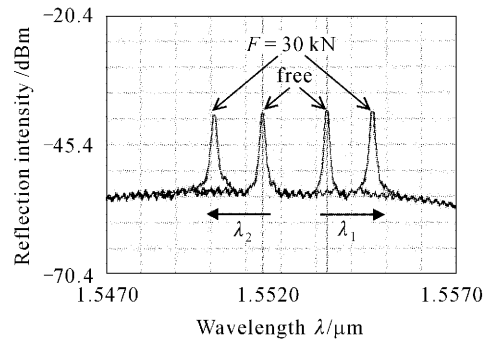


图 3 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时 FBG1 和 FBG2 在自由态和 $F = 30\text{ kN}$ 时的波长漂移对比反射谱

Fig. 3 Contrast reflection spectra of FBG1 and FBG2 wavelength shift at $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$ when $F = 0\text{ kN}, 30\text{ kN}$

图 4 给出了三个典型的温度值下测得的光纤光栅波长漂移量 $\Delta\lambda_{12}$ 与压力 F 的实验曲线。

图 4 中的实心点(圆形、三角形和菱形)为实验测量值, 实线为相应的拟合曲线, 其拟合方程和线性度分别为 $\Delta\lambda_{12} = 0.089F$ 和 0.992 , $\Delta\lambda_{12} = 0.092F$ 和 0.996 以及 $\Delta\lambda_{12} = 0.090F$ 和 0.994 。这三组测量值显示了良好的线性关系, 而且温度变化 ΔT 对 $\Delta\lambda_{12}$ 的测量结果影响甚微。进一步对该传感器在低温区 $-20\text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 10\text{ }^\circ\text{C}$, 常温区 $10\text{ }^\circ\text{C} < T \leq 30\text{ }^\circ\text{C}$ 和较高温区 $30\text{ }^\circ\text{C} < T \leq 75\text{ }^\circ\text{C}$ 进行了多组测力实验, 测量结果表明, 在 $-20\text{ }^\circ\text{C} \sim 75\text{ }^\circ\text{C}$ 温度区间, $\Delta\lambda_{12}$ 与 F 显示出良好的线性关系, 线性拟合度最低达到 0.991; 测力灵敏度的实验平均值 $\bar{\xi}_{\text{exp}}$ 为 0.091 nm/kN。在 $-20\text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 75\text{ }^\circ\text{C}$ 区间, $\bar{\xi}_{\text{exp}}$ 的相对波动值 $\Delta\bar{\xi}_{\text{exp}} / \bar{\xi}_{\text{exp}}$ 在 5% 左右。图 5 给出了在三组典型力作用下, 光纤光栅波长差 $\Delta\lambda_{12}$ 在全温度范围内($-20\text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 75\text{ }^\circ\text{C}$) 的实验曲线。

实验结果表明, 这种轮辐式传感器的设计结构是合理的, 在一定温度范围内具有温度自动补偿功能。并且, 根据工程实际需要, 可以通过改变传感器结构参数对测力灵敏度进行调节。在实际应用中,

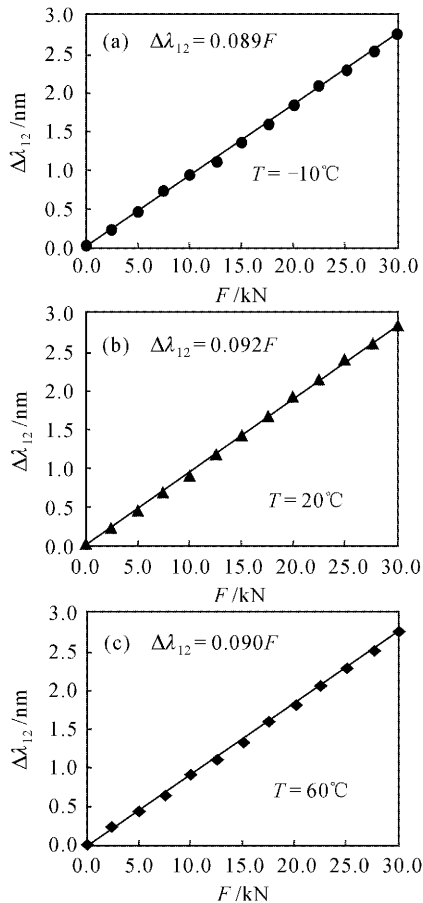


图 4 三个典型的温度值下测得的光纤光栅波长漂移量 $\Delta\lambda_{12}$ 与压力 F 的实验曲线

Fig. 4 Experimental curves between fiber grating wavelength shift $\Delta\lambda_{12}$ and force F for three typical temperature values

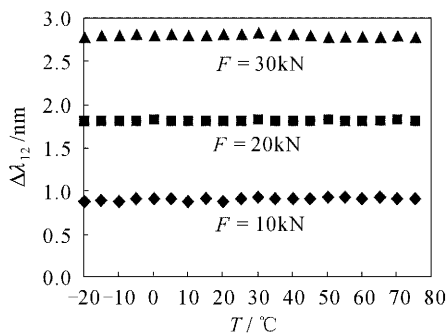


图 5 三组典型力作用下, 光纤光栅波长差 $\Delta\lambda_{12}$ 在全温度范围内 ($-20^\circ\text{C} \leq T \leq 75^\circ\text{C}$) 的实验曲线

Fig. 5 Experimental curves of fiber grating wavelength shift $\Delta\lambda_{12}$ for three typical force values in the temperature range from -20°C to 75°C

通过光电转换器将光信号转换为电信号, 再用计算机进行数据处理, 对测力灵敏度的提高亦有帮助。

对传感器施加 $F > 30$ kN 压力的情况进行了测

试, 结果表明, 在 $30 \text{ kN} < F \leq 50 \text{ kN}$ 范围内, 该传感器响应的线性度变差, 但仍然保持单值输出。

将传感器的主要参数 $\lambda_1 = 1553.26 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 1551.48 \text{ nm}$, $p_e = 0.23$, $N = 2$, $E = 2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$, $\mu = 0.27$, $h = 15 \text{ mm}$, $b = 3 \text{ mm}$ 代入(6)式, 得到实验情况下的应变传递因子 χ 约为 20% 左右。经仔细分析, χ 值较小的主要原因有: 一是理论模型的近似性, 当轮毂的直径与弹性梁的有效长度相当时, 将其作为两端固定梁处理会产生一定的误差; 二是轮辐与轮圈一体化连接是非刚性的, 传感器受力时会产生一定的应变损失; 三是实际传感器轮辐上的主应力方向会偏离 $+45^\circ$ 或 -45° 角, 因而光栅粘贴位置并非最佳; 四是两个传感光栅粘贴的效果不一致, 当温度变化时, 二者波长的漂移不完全同步, 这样会对测量结果产生一定的影响。因此, 需要进一步改进传感器的结构, 优化机构参数 (如调整轮毂直径与弹性梁有效长度比值等), 改善光栅粘贴位置 (如在一个轮辐的正反两个侧面交叉粘贴光栅等), 提高光栅粘贴质量, 以提高传感器的测量灵敏度。

另外, 对该传感器也进行了拉力实验。做拉力实验前, 需要将传感器的底座用螺栓拧紧固定, 轮毂顶端焊接一个拉力环。拉力实验结果表明: 在上述施力范围及温度区间, 该传感器的波长漂移与在压力作用时的响应是一致的, 其线性度和测力灵敏度基本一致。需要注意的是: 压力传感器中的 FBG1 和 FBG2 的自由中心波长需 $\lambda_1 > \lambda_2$, 而拉力传感器中的 FBG1 和 FBG2 的自由中心波长应为 $\lambda_1 < \lambda_2$ 。

轮辐式光纤光栅测力传感器的设计及实验结果表明, 采用轮辐式传感结构, 实现温度自动补偿的大载荷测量的方法是可行的、有效的; 同时, 对新型光纤光栅传感器的设计和工程化应用, 也提供了一条实用可行的途径。通过优化设计并选取刚性强的制作材料, 可以进一步提高测力的灵敏度, 设计并研制出更大载荷感测的新式光纤光栅测力传感器, 并可望应用于货运装卸称衡、大型结构体形变检测、预应力锚固效果评价、爆破震动冲击监测等领域^[20,21]。

4 结 论

设计并研制了一种新型的轮辐式温度自动补偿型光纤光栅测力传感器, 理论分析了传感原理并进行了实验测量。结果表明, 二者在线性度响应、温度自动补偿以及方法的有效性等方面具有一致性; 从传感效率的角度, 需进一步优化结构设计并选取刚

性强的材料。该传感器具有温度自动补偿、双向感测外力、稳定性好、无电磁干扰、抗轴侧力强、构建网络灵便以及适宜工程化应用等优良特性,通过优化设计,还可以将压力和拉力的感测发展为位移、曲率以及振动等参量的高精度测量,并可望在光传感领域发挥重要的作用。

参 考 文 献

- Zhang Weigang, Tu Qinchang, Sun Lei *et al.*. Recent progress in theory, design and applications of fiber grating sensors [J]. *Progress in Physics*, 2004, **24**(4):398~423
张伟刚,涂勤昌,孙磊等. 光纤光栅传感器的理论、设计及应用的最新进展[J]. *物理学进展*, 2004, **24**(4):398~423
- Weigang Zhang, Xiaoyi Dong, Dejun Feng *et al.*. Linear fibre-grating-type sensing tuned by applying torsion stress [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(20):1686~1688
- Liu Zhiguo, Zhang Yibing, Kai Guiyun *et al.*. A new method for fiber-grating linear tuning [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(12):1731~1734
刘志国,张艺兵,开桂云等. 新型光纤光栅线性调谐方法[J]. *光学学报*, 1998, **18**(12):1731~1734
- Zhang Weigang, Zhou Guang, Liang Longbin *et al.*. Experiment of temperature sensitivity fiber grating component packaged with mixed polymer [J]. *Acta Photonics Sinica*, 2001, **30**(8):1003~1005
张伟刚,周广,梁龙彬等. 混合聚合物光纤光栅封装元件的温敏实验[J]. *光子学报*, 2001, **30**(8):1003~1005
- Dong Xinyong, Zhang Ying, Guan Bai'ou *et al.*. Experimental research of fiber grating circumflexion sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(9):806~809
董新永,张颖,关柏鸥等. 光纤光栅曲率传感的实验研究[J]. *光子学报*, 2000, **29**(9):806~809
- Weigang Zhang, Zhiguo Liu, Qiuqin Sheng *et al.*. On-line detecting of the electric current by applying electromagnetic tuning [C]. *SPIE*, 2000, **4220**:109~112
- Ying Zhang, Dejun Feng, Zhiguo Liu *et al.*. High-sensitivity pressure sensor using a shielded polymer-coated fiber Bragg grating [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(6):618~619
- Zhang Weigang, Kai Guiyun, Feng Dejun *et al.*. Experimental analyses of fiber Bragg grating resonance sensing [J]. *Journal of Sensors and Actuator*, 2000, **13**(4):246~250
张伟刚,开桂云,冯德军等. 光纤Bragg光栅的谐振传感实验研究[J]. *传感技术学报*, 2000, **13**(4):246~250
- Fu Haiwei, Qiao Xueguang, Jia Zhenan *et al.*. Stress sensitivity enhanced in-fiber Bragg grating pressure sensor [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(4):473~476
傅海威,乔学光,贾振安等. 应力增敏的光纤布拉格光栅压强传感器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(4):473~476
- Guo Kan, Zhou Yingwu, Lin Feng *et al.*. A novel pressure sensor based on long period fiber grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(8):997~1000
高侃,周赢武,林峰等. 基于长周期光纤光栅的压力传感器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(8):997~1000
- Weichong Du, Xiaoming Tao, H. Y. Tam. Fiber Bragg grating cavity sensor for simultaneous measurement of strain and temperature [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(1):105~107
- Bai'ou Guan, Hwayaw Tam, Xiaoming Tao *et al.*. Simultaneous strain and temperature measurement using a superstructure fiber Bragg grating [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(6):675~677
- Youlong Yu, Hwayaw Tam, Wenghong Chung *et al.*. Fiber Bragg grating sensor for simultaneous measurement of displacement and temperature [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(16):1141~1143
- Zhang Weigang, Xu Zhaowen, Kai Guiyun *et al.*. Sensing measurement of two parameters for torsion and temperature using single fiber grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(9):1070~1075
张伟刚,许兆文,杨翔鹏等. 用单光纤光栅实现扭转与温度的双参量传感测量[J]. *光学学报*, 2002, **22**(9):1070~1075
- G. W. Yoffe, P. A. Krug, F. Ouellette *et al.*. Passive temperature-compensating package for optical fiber gratings [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(30):6859~6861
- Zhang Weigang, Kai Guiyun, Zhao Qida *et al.*. Novel sensing device of fiber Bragg grating with temperature active compensation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(8):999~1003
张伟刚,开桂云,赵启大. 新型光纤布拉格光栅温度自动补偿传感研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(8):999~1003
- Weigang Zhang, Yange Liu, Guiyun Kai *et al.*. A novel independent tuning technology of center wavelength and bandwidth of fiber Bragg grating [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **216**(4~6):343~350
- Zhu Yue, Zhou Bowei, Gu Rong *et al.*. Design of the sensor used for the measure of cut load [J]. *Mechanical Design and Manufacture Engineering*, 2002, **31**(4):87~89
朱晔,周伯伟,顾荣等. 关于轮辐式剪切力传感器的研制与设计[J]. *机械设计与制造工程*, 2002, **31**(4):87~89
- Zhang Weigang, Zhao Qida, Kai Guiyun *et al.*. Wavelength tunable principle and technological progress of fiber Bragg grating based on elastic beam [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2001, **22**(5):299~303
张伟刚,赵启大,开桂云等. 基于弹性梁的光纤光栅波长调谐原理及技术[J]. *半导体光电*, 2001, **22**(5):299~303
- Zhang Weigang, Kai Guiyun, Dong Xiaoyi *et al.*. Theoretical and experimental study of fiber grating multi-point sensing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3):330~336
张伟刚,开桂云,董孝义等. 光纤光栅多点传感的理论和实验研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(3):330~336
- Tu Qinchang, Zhang Weigang, Sun Lei *et al.*. Study on transversal strain on fiber Bragg grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12):1508~1512
涂勤昌,张伟刚,孙磊等. 光纤布拉格光栅横向应变特性的研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(12):1508~1512