

·信息与信号处理·

## FBG 应变传感器温度交叉敏感补偿技术研究

王雯珍, 刘月明

(中国计量学院光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要:** 光纤光栅传感器目前在工业上对高温压力管道表面的应变监控有着广泛的应用。但由于存在应变和温度的交叉影响,使传感器的测量精确度受到了一定的限制,不能满足工业实际需要。通过分析FBG应变传感器的基本工作原理,针对FBG的应变、温度交叉敏感问题,提出并采用了二元回归分析算法来实现FBG应变传感器的温度补偿模型。由计算机程序运行结果和实验结果表明,利用二元回归分析法对FBG应变传感器进行数据融合处理后,温度灵敏系数由 $2.74 \times 10^{-2}/^{\circ}\text{C}$ 降低为 $9.16 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ,温度的交叉敏感性得到明显改善,可满足高温压力管道应变测量的实际测量要求。

**关键词:** 光纤 Bragg 光栅;交叉敏感;温度补偿;数据融合

中图分类号: TP212.44

文章标识码: A

文章编号: 1673-1255(2014)-02-0051-06

## Research on Temperature Cross Sensitivity Compensation Technology of FBG Strain Sensor

WANG Wen-zhen, LIU Yue-ming

(College Of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Binary regression analysis algorithm is proposed and adopted to realize the temperature compensation model of fiber Bragg grating (FBG) strain sensor through analyzing the basic operation principle of the sensor and the issues of FBG strain and temperature cross sensitivity. Computer program and experiment results show that the temperature sensitivity coefficient is lower from  $2.74 \times 10^{-2}/^{\circ}\text{C}$  to  $9.16 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$  after data fusion processing. And the temperature cross sensitivity is obviously improved to meet the actual measurement requirements of strain measurement in high-temperature pressure conduit.

**Key words:** fiber Bragg grating; cross sensitivity; temperature compensation; data fusion

光纤布拉格光栅(FBG)传感器是一种典型的波长调制型光纤传感器<sup>[1]</sup>,与传统的光纤传感器相比,FBG具有很多明显的技术优势,如:精度高、易集成、抗干扰能力强、可实现多点分布式测量等。因此工业上对光纤光栅应变传感器的应用较为广泛,但由于在高温情况下,传感器应变和温度的交叉敏感现象已明显影响到其测量能力,限制了光纤光栅应变传感器的发展<sup>[2]</sup>。

因FBG对应变和温度都是敏感的,当FBG同时感受二者变化时,仅从单个光纤光栅反射波长的变

化难以分辨出应变和温度的单独变化量,即出现应变、温度交叉敏感问题。这种交叉敏感问题严重影响了传感器对待测目标参量的测量精确性,为了解决FBG的交叉敏感问题,人们提出了多种技术方案<sup>[3-19]</sup>,这些方案按照其原理可分为以下几种:双波长矩阵运算法<sup>[4-5]</sup>、双参量矩阵运算法<sup>[6-7]</sup>、温度(应变)软件补偿法<sup>[8-15]</sup>、具有特殊性能光纤光栅法<sup>[16-19]</sup>等。但这些方法大多需要特定的光纤结构支持,其制作、实施和解调实现起来比较麻烦,而且不能完全消除交叉敏感现象。

收稿日期: 2013-11-26

作者简介: 王雯珍(1992-),女,陕西商洛人,本科,主要研究方向为光纤传感技术和微机电系统技术;刘月明(1965-),博士,教授,主要研究方向为光纤传感技术和微机电系统技术。

采取二元回归分析方法,通过计算机程序对现有传感器采集到的数据进行二元融合处理,建立温度和应变量的二元回归拟合模型<sup>[20]</sup>,可有效降低温度和应变的交叉敏感性,以实现传感器对目标参量应变的测量要求。

## 1 光纤光栅应变传感器工作原理

### 1.1 工作原理

光纤光栅能应用于传感领域,是因为其对入射光可进行有选择的反射,其中心反射波长 $\lambda_B$ 可表示为

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (1)$$

式中, $n_{eff}$ 为光栅有效折射率; $\Lambda$ 为光栅栅距。

应变变化时,光弹效应和栅距几何尺寸变化的双重作用会导致光栅反射波长发生移动;温度变化时,光纤的热光效应和热膨胀作用也会引起反射波长的变化。当外界温度和应变发生变化时,相应的Bragg波长的改变为

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = (1 - P_e)\Delta\varepsilon + (\xi_f + \alpha_f)\Delta T \quad (2)$$

式中, $P_e$ 、 $\alpha_f$ 和 $\xi_f$ 分别为光纤的弹光系数、热膨胀系数和热光系数。

当温度和应变的变化同时发生时,被测的应变信号和FBG应变传感器输出信号间存在着较大的非线性误差。

为了剔除温度对应变的干扰,实验中采取了双波长法,针对同一段测量点,使用两根FBG进行测量。其中FBG1为测量光栅,FBG2为参考光栅。

### 1.2 实验装置

实验装置示意图如图1所示。

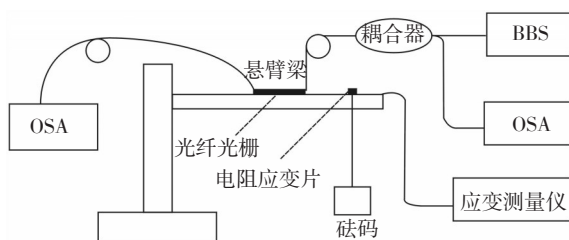


图1 实验装置示意图

由宽带光源(BBS, 1 550 nm SLD 台式光源)发出的光,经过光纤 3 dB 耦合器入射到 FBG 中,由光栅

反射回的信号再经耦合器送到光谱仪(OSA, AQ6370)中,由此检测FBG反射中心波长的漂移量。将耐高温FBG1(中心波长为1 448 nm,反射率为95.26%)粘结于“T”应变片基底上,同时将耐高温FBG2(中心波长为1 549 nm,反射率为95.26%)单端粘结于基底上。然后再将等强度梁置于恒温箱(GHX-50)中,温度值由恒温箱控制,实验中待测应变值由等强度悬臂梁所悬挂的载荷控制,同时高温电阻应变片结合应变测量仪提供悬臂梁的实际应变对比值。

图1所示的实验装置中,选用等强度悬臂梁加载待测应变,FBG的中心波长会随着悬臂梁载荷的改变而发生漂移。根据材料力学的悬臂梁弯曲理论,可推导得等强度梁弯曲时其表面应变 $\varepsilon$ 为<sup>[21]</sup>

$$\varepsilon = \frac{6FL}{BEh^2} \quad (3)$$

式中, $F$ 为作用在加载点的载荷; $L$ 、 $B$ 、 $h$ 、 $E$ 分别为等强度悬臂梁的长度、宽度、厚度和弹性模量,实验中等强度悬臂梁的 $L$ 、 $B$ 、 $h$ 、 $E$ 分别为300 mm、40 mm、3.5 mm、 $2.1 \times 10^5$  MPa。将高温光栅应变片沿横向和纵向粘贴在悬臂梁的表面轴线上,实物效果如图2所示。

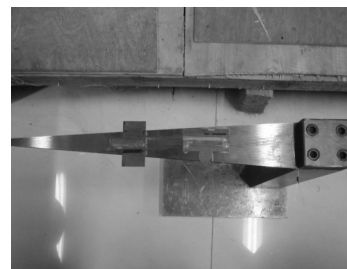


图2 光纤光栅应变片在悬臂梁上的分布图

## 2 二元回归分析法

FBG传感器有两个参量(应变和温度)的信息,采取曲面拟合算法对其进行回归分析,称之为二元回归分析法。其融合过程如图3所示。

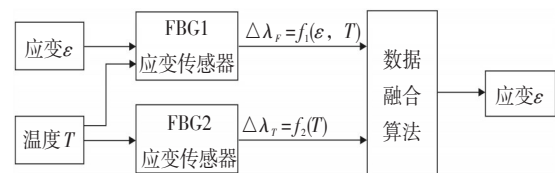


图3 传感器数据融合系统框图

其二元曲面拟合方程如下

$$\varepsilon = \alpha_0 + \alpha_1 \lambda_1 + \alpha_2 \lambda_2 + \alpha_3 \lambda_1^2 + \alpha_4 \lambda_2^2 + \alpha_5 \lambda_1 \lambda_2 + r_1 \quad (4)$$

$$T = \beta_0 + \beta_1 \lambda_1 + \beta_2 \lambda_2 + \beta_3 \lambda_1^2 + \beta_4 \lambda_2^2 + \beta_5 \lambda_1 \lambda_2 + r_2 \quad (5)$$

式中,  $\alpha_0 \sim \alpha_5, \beta_0 \sim \beta_5$  为常系数,  $r_1, r_2$  为高阶无穷小量,  $\lambda_1, \lambda_2$  分别为 FBG1 和 FBG2 的输出波长。

如果已知上述各式中的常系数, 则式(4)与式(5)就是消除交叉敏感, 求取被测量  $\varepsilon$  的温度补偿模型。为此, 首先要进行二维标定实验, 由最小二乘法原理确定均方误差最小条件下的常系数。

### 2.1 实验标定

在应变传感器的量程范围内(250~2 000 g)确定 3 个应变标定点, 在工作温度范围内(60 °C~300 °C)确定 7 个温度标定点, 共计有  $3 \times 7 = 21$  个标定点。并根据式(3)将载荷的质量值转化为应变值。

于是由应变  $\varepsilon$  与温度  $T$  标准值发生器产生在各个标定点的标准输入值为

$$m_i (g): 250, 1\ 250, 2\ 000;$$

$$\varepsilon_i (\mu\varepsilon): 42.86, 214.29, 342.86, i=1, 2, 3, m=3;$$

$$T_j (^\circ\text{C}): 60, 100, 140, 180, 220, 260, 300, j=1, 2, \dots, n=7。$$

对每个标定点的标准输入值读取相应的输出值  $\lambda_{1_{ij}}$  和  $\lambda_{2_{ij}}$ , 其中  $\lambda_{1_{ij}}$  是 FBG1 在应变和温度分别为  $\varepsilon_i, T_j$  时的输出波长,  $\lambda_{2_{ij}}$  是 FBG2 在应变和温度分别为  $\varepsilon_i, T_j$  时的输出波长。

将贴有应变片的悬臂梁送入温度控制箱中, 在载荷从 250 g 分次递增到 2 000 g 的情况下, 每隔 40 °C 记录一次两根光纤光栅的中心波长, 得到 FBG 中心波长的实验标定数据如表 1 所示。

表 1 “T”型应变片 FBG 中心波长的实验标定数据

温度/(°C)		60	100	140	180	220	260	300
载荷 42.86 $\mu\varepsilon$	FBG1/nm	1 549.475 2	1 550.327 2	1 551.179 2	1 552.031 2	1 552.883 2	1 553.735 2	1 554.587 2
	FBG2/nm	1 550.221 6	1 550.633 6	1 551.045 6	1 551.457 6	1 551.869 6	1 552.281 6	1 552.693 6
载荷 214.29 $\mu\varepsilon$	FBG1/nm	1 549.647 4	1 550.499 4	1 551.354 1	1 552.203 4	1 553.055 4	1 553.907 4	1 554.759 4
	FBG2/nm	1 550.220 0	1 550.632 6	1 551.044 3	1 551.456 7	1 551.868 7	1 552.280 7	1 552.691 9
载荷 342.86 $\mu\varepsilon$	FBG1/nm	1 549.776 5	1 550.628 5	1 551.480 5	1 552.332 5	1 553.184 5	1 554.036 5	1 554.888 5
	FBG2/nm	1 550.220 8	1 550.628 9	1 551.042 8	1 551.454 3	1 551.865 7	1 552.282 0	1 552.693 6

表 1 中波长变化为小数点之后的量, 为凸显波长变化, 便于后续的数据处理, 改为取相对波长  $\Delta\lambda$  来进行模型回归。取初始值分别为两个光栅在温度:

60 °C, 载荷: 42.86  $\mu\varepsilon$  的测量值, 则其  $\Delta\lambda$  数据如表 2 所示。

表 2 “T”型应变片 FBG 中心波长  $\Delta\lambda$  的实验标定数据

温度/(°C)		60	100	140	180	220	260	300
载荷 42.86 $\mu\varepsilon$	FBG1/pm	0	852.0	1 704.0	2 556.0	3 408.0	4 260.0	5 112.0
	FBG2/pm	0	412.0	824.0	1 236.0	1 648.0	2 060.0	2 472.0
载荷 214.29 $\mu\varepsilon$	FBG1/pm	172.2	1 024.2	1 878.9	2 728.2	3 580.2	4 432.2	5 284.2
	FBG2/pm	-1.6	411.0	822.7	1 235.1	1 647.1	2 059.1	2 470.3
载荷 342.86 $\mu\varepsilon$	FBG1/pm	301.3	1 153.3	2 005.3	2 857.3	3 709.3	4 561.3	5 413.3
	FBG2/pm	-0.8	407.3	821.2	1 232.7	1 644.1	2 060.4	2 472.0

2.2 数据处理

由传感系统对21个标定点测得的输出波长,应变拟合值  $\varepsilon_{ij}(\Delta\lambda_{1_{ij}}, \Delta\lambda_{2_{ij}})$  根据式(4)为

$$\varepsilon_{ij}(\Delta\lambda_{1_{ij}}, \Delta\lambda_{2_{ij}}) = \alpha_0 + \alpha_1\Delta\lambda_{1_{ij}} + \alpha_2\Delta\lambda_{2_{ij}} + \alpha_3\Delta\lambda_{1_{ij}}^2 + \alpha_4\Delta\lambda_{2_{ij}}^2 + \alpha_5\Delta\lambda_{1_{ij}}\Delta\lambda_{2_{ij}} + r_1 \quad (6)$$

由线性代数知识,可依照式(6)将全部标定点的数据计算公式写成矩阵形式

$$\varepsilon = H \cdot \alpha \quad (7)$$

式中,  $H = [1 \ \Delta\lambda_{1_{ij}} \ \Delta\lambda_{2_{ij}} \ \Delta\lambda_{1_{ij}}^2 \ \Delta\lambda_{2_{ij}}^2 \ \Delta\lambda_{1_{ij}} \cdot \Delta\lambda_{2_{ij}}]$   
 $\alpha = [\alpha_0 \ \alpha_1 \ \alpha_2 \ \alpha_3 \ \alpha_4 \ \alpha_5]^T$

$$\text{则 } \alpha = (H^T \times H)^{-1} \cdot H^T \cdot \varepsilon \quad (8)$$

利用MATLAB软件工具箱可轻松直接地求解式(8)的矩阵运算。得到常系数 $\alpha$ 的值,取五位有效数字,则应变拟合方程为

$$\varepsilon = 44.2329 + 0.9717\Delta\lambda_1 - 2.0127\Delta\lambda_2 + 4.2063 \times 10^{-6} \cdot \Delta\lambda_1^2 + 6.0035 \times 10^{-6} \Delta\lambda_2^2 - 1.0983 \times 10^{-5} \Delta\lambda_1 \Delta\lambda_2 \quad (9)$$

同理可得到温度数据拟合值  $T_{ij}(\Delta\lambda_{1_{ij}}, \Delta\lambda_{2_{ij}})$ ,

根据式(5)为

$$T_{ij}(\Delta\lambda_{1_{ij}}, \Delta\lambda_{2_{ij}}) = \beta_0 + \beta_1\Delta\lambda_{1_{ij}} + \beta_2\Delta\lambda_{2_{ij}} + \beta_3\Delta\lambda_{1_{ij}}^2 + \beta_4\Delta\lambda_{2_{ij}}^2 + \beta_5\Delta\lambda_{1_{ij}}\Delta\lambda_{2_{ij}} + r_2 \quad (10)$$

$$\beta = (H^T \times H)^{-1} \cdot H^T \cdot T \quad (11)$$

$$T = 59.9396 + 8.6363 \times 10^{-4} \Delta\lambda_1 + 9.5442 \times 10^{-2} \Delta\lambda_2 + 6.5588 \times 10^{-7} \Delta\lambda_1^2 + 3.3671 \times 10^{-6} \Delta\lambda_2^2 - 3.0092 \times 10^{-6} \Delta\lambda_1 \Delta\lambda_2 \quad (12)$$

将实验测量数据代入方程(9)对被测量进行拟合重构,得到融合后的应变拟合值,并与融合前的实验标定值进行对比,如表3所示。

表3 融合后的应变拟合值与标定值对比

温度/(°C)	60	100	140	180	220	260	300
标定值/ $\mu\varepsilon$	42.86	42.86	42.86	42.86	42.86	42.86	42.86
拟合值/ $\mu\varepsilon$	44.23	43.04	42.29	41.97	42.08	42.63	43.61
误差/ $\mu\varepsilon$	1.37	0.18	-0.57	-0.89	-0.78	-0.23	0.75
标定值/ $\mu\varepsilon$	214.29	214.29	214.29	214.29	214.29	214.29	214.29
拟合值/ $\mu\varepsilon$	214.90	212.96	215.92	212.61	213.18	214.19	217.26
误差/ $\mu\varepsilon$	0.61	-1.33	1.63	-1.68	-1.11	-0.1	2.97
标定值/ $\mu\varepsilon$	342.86	342.86	342.86	342.86	342.86	342.86	342.86
拟合值/ $\mu\varepsilon$	338.99	346.48	342.69	344.19	346.34	338.94	341.53
误差/ $\mu\varepsilon$	-3.87	3.62	-0.17	1.33	3.48	-3.92	-1.33

将实验测量数据代入方程(12)对被测量进行拟合重构,得到融合后的温度拟合值,并与融合前的实

验标定值进行误差对比,如表4所示。

表4 融合后的温度拟合值与标定值对比

温度/(°C)	60	100	140	180	220	260	300
$\varepsilon = 42.86 \mu\varepsilon$							
拟合值/(°C)	59.94	99.99	140.02	180.04	220.03	260.01	299.98
误差/(°C)	-0.06	-0.01	0.02	0.04	0.03	0.01	-0.02
$\varepsilon = 214.29 \mu\varepsilon$							
拟合值/(°C)	59.95	100.04	140.02	180.05	220.03	259.99	299.85
误差/(°C)	-0.05	0.04	0.02	0.05	0.03	-0.01	-0.15
$\varepsilon = 342.86 \mu\varepsilon$							
拟合值/(°C)	60.18	99.83	140	179.93	219.83	260.18	300.07
误差/(°C)	0.18	-0.17	0	-0.07	-0.17	0.18	0.07

### 2.3 模型评价

由表3和表4的拟合结果可看出,经数据融合处理后的模型拟合结果与实验标定值基本一致,应变与温度的误差值均控制在小范围内,因此可认为这个模型是可靠的。

用融合处理前后的灵敏度温度系数指标来评价温度稳定性的改善程度,其计算公式为

$$\text{融合前: } \alpha_s = \frac{\lambda(T_1) - \lambda(T_2)}{\lambda(T_1)\Delta T} \quad (13)$$

$$\text{融合后: } \alpha_s = \frac{\varepsilon(T_1) - \varepsilon(T_2)}{\varepsilon(T_1)\Delta T} \quad (14)$$

式中,  $\lambda(T_1)$ 、 $\lambda(T_2)$  及  $\varepsilon(T_1)$ 、 $\varepsilon(T_2)$  分别为同一输入应变作用下,工作温度为  $T_1$ 、 $T_2$  时,传感器的输入值与输出值。 $\Delta T = T_2 - T_1$ , 为工作温度变化范围。

由表2标定数据可知,  $\Delta T = 300 - 60 = 240$  °C; 应变传感器的输出波长信号随温度升高而增加,在满量程应变值  $342.86 \mu\varepsilon$  时,输出波长随温度变化有最大改变量  $\Delta\lambda_{\max}$  为

$$\Delta\lambda_{\max} = |\Delta\lambda(T_1) - \Delta\lambda(T_2)| = |301.3 - 5413.3| = 5112 \text{ pm} \quad (15)$$

且  $\lambda(T_1) = \lambda(60^\circ) = 776.5 \text{ pm}$ , 则由式(13)计算可得融合前灵敏度温度系数为

$$\alpha_s = \frac{\Delta\lambda(T_1) - \Delta\lambda(T_2)}{\Delta\lambda(T_1)\Delta T} = \frac{5112}{776.5 \times 240} = 2.74 \times 10^{-2} /^\circ\text{C} \quad (16)$$

由表3融合处理后数据可知,在  $\Delta T = 240$  °C 温度范围内,应变融合计算值不存在随温度变化单调上升或下降的规律,而是围绕期望值随机偏离。在满量程  $\varepsilon_{FS} = 342.86 \mu\varepsilon$  时,两个温度点融合计算应变值的最大偏差为

$$\Delta\varepsilon_{\max} = |\varepsilon(T_1) - \varepsilon(T_2)| = |346.48 - 338.94| = 7.54 \mu\varepsilon \quad (17)$$

$$\alpha_s = \frac{\varepsilon(T_1) - \varepsilon(T_2)}{\varepsilon(T_1)\Delta T} = \frac{7.54}{342.86 \times 240} = 9.16 \times 10^{-5} /^\circ\text{C} \quad (18)$$

由以上可以看出,利用二元回归融合处理后的温度灵敏系数由  $2.74 \times 10^{-2} /^\circ\text{C}$  降低为  $9.16 \times 10^{-5} /^\circ\text{C}$ , 温度的交叉敏感性得到明显改善。

### 3 结论

分析了FBG应变传感器的基本工作原理,针对FBG的应变、温度交叉敏感问题,通过双波长实验法,采用二元回归分析算法来实现其温度补偿模型。经计算机程序和实验结果表明,进行数据融合处理后,温度灵敏系数由  $2.74 \times 10^{-2} /^\circ\text{C}$  降低为  $9.16 \times$

$10^{-5} /^\circ\text{C}$ , 温度的交叉敏感性得到明显改善。与其他传感器系统相比,利用软件程序进行温度补偿,对传感器系统无改变,且操作简单方便。但是这种算法也存在一定缺陷,需要在使用前对传感器进行预设。

### 参考文献

- [1] 侯俊芳,裴丽,李卓轩,等. 光纤传感技术的研究进展及应用[J]. 光电技术应用, 2012, 27(1): 49-53.
- [2] 杨樟成,徐汉锋,董新永. 高温光纤光栅的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(5): 21-28.
- [3] 金秀梅. 光纤光栅应变,温度交叉敏感问题研究现状分析[J]. 石家庄铁路职业技术学院学报, 2011, 10(2): 53-56.
- [4] Liu N, Li Y, Wang Y, et al. Bending insensitive sensors for strain and temperature measurements with Bragg gratings in Bragg fibers[J]. Optics express, 2011, 19(15): 13880-13891.
- [5] 孟展,陈瑞霞,金何,等. 基于双材料悬臂梁的光纤光栅应力与温度传感器[J]. 光电子·激光, 2011, 22(3): 343-346.
- [6] 王宏亮,邬华春,冯德全,等. 高温高压油气井下光纤光栅传感器的应用研究[J]. 光电子·激光, 2011, 1: 6.
- [7] Huang J, Zhou Z, Wen X, et al. A diaphragm-type fiber Bragg grating pressure sensor with temperature compensation [J]. Measurement, 2013, 46(3): 1041-1046.
- [8] 魏鹏,李丽君,郭俊强,等. 光纤 Bragg 光栅应力传感中温度交叉敏感问题研究[J]. 应用光学, 2010, 29(1): 105.
- [9] 缪长青,田洪金,肖迎春,等. 基于小波多分辨力的光纤应变监测信号的多尺度分析研究[J]. 计测技术, 2013, 33(4): 15-20.
- [10] 华静,刘月明,何正炎,等. 基于 AWG 的耐高温长周期光纤光栅应变监测信号解调技术研究[J]. 传感技术学报, 2012, 25(6).
- [11] 陈晓艳,董朝轶,李永亭,等. 基于多层感知器网络的农作物疾病诊断系统[J]. 计算机技术与发展 ISTIC, 2011, 21(11).
- [12] 樊晓宇. 光纤光栅应变传感器温度补偿系统研究[J]. 光通信技术, 2012, 36(6): 7-9.
- [13] 章慧. 基于 BP 神经网络的压力传感器数据融合[J]. 湖南工程学院学报(自然科学版), 2011(1): 18.
- [14] 刘珑,曾秋孙,王杰,等. 基于 Matlab 数据处理的光栅光谱法测量溶液浓度[J]. 化学工程与装备, 2010(4): 5.
- [15] 丁蕾,廖同庆,陶亮. 基于 SVR 的多传感器数据融合处

理方法[J]. 传感技术学报, 2011, 24(5): 710-713.

- [16] 顾铮, 邓传鲁. 镀膜光纤光栅应用与发展[J]. 中国激光, 2009 (6): 1317-1326.
- [17] 孟展, 陈瑞霞, 金何, 等. 基于双材料悬臂梁的光纤光栅应力与温度传感器[J]. 光电子·激光, 2011, 22 (3): 343-346.
- [18] 曾虹, 乐淑萍, 刘月明. 高温光纤布拉格光栅“T”型应变片技术研究[J]. 传感技术学报, 2013, 26 (3):

338-341.

- [19] 安佳丽, 梁厚慧, 金永兴, 等. 基于倾斜光纤光栅的温度不敏感振动传感器[J]. 中国激光, 2012, 39 (B06): 402-406.
- [20] 刘君华. 智能传感器系统[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2010: 182-185.
- [21] 蔡怀崇, 闵行. 材料力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2004: 93-96.

(上接第30页)

光能力要比短波长区域弱, 光场向包层泄露, 光功率降低, 从而 $\Gamma$ 值减小趋势越明显。

### 3 结论

通过对气孔八边形排列的光子晶体光纤进行数值模拟计算发现, 掺杂纤芯直径、掺杂折射率是影响掺杂光子晶体光纤的关键因素。掺杂纤芯直径、掺杂折射率的变化会引起纤芯和包层的相对折射率差的变化, 从而使得光功率分布发生变化, 引起掺杂光子晶体光纤的特性变化。这些规律对使用光子晶体光纤构建高功率光纤激光器、光纤放大器提供了必要的理论指导。

### 参考文献

- [1] 王伟, 侯蓝田. 光子晶体光纤的现状和发展[J]. 激光与光电子学进, 2008, 45(2): 43-58.
- [2] Cucinotta A, Selleri S, Vincetti L, et al. Holey fiber analysis through the finite-element method [J]. IEEE Photonic Technol Lett, 2002, 14(11):1530-1532.

- [3] 关春颖, 苑立波. 基于有限元方法的光子晶体光纤特性分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2004, 25(4):532-535.
- [4] 吴重庆. 光波导理论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 267-269.
- [5] Haxha S, Ademgil H. Novel design of photonic crystal fibers with low confinement losses, nearly zero ultra-flatted chromatic dispersion, negative chromatic dispersion and improved effective mode area[J]. Opt. Communications, 2008, 281 (2) 278-286.
- [6] Beeker P C, Olsson N A, SimPson J R. Erbium-doped fiber amplifiers: fundamentals and technology[M]. SanDiego: Aeademie Press, 1999:140-144.
- [7] 李书婷. 光子晶体光纤的数值模拟[D]. 西安: 西北大学, 2006.
- [8] Lim H, Ilay F, Wise F. Femtosecond ytterbium fiber laser with photonic crystal fiber for dispersion control [J]. Opt. Express, 2002, 10(25):1497-1502.
- [9] 宋有建, 胡明列, 张弛, 等. 高脉冲能量大模场面积光子晶体光纤飞秒激光器[J]. 科学通报, 2008, 53(13):1511-1515.
- [10] Randy C Gile, Emmanuel Desurvire. Modeling Erbium-doped fiber amplifiers[J]. Journal of Lightwave Technology, 1991, 9 (2):271-283.

(上接第45页)

- [2] 阎石. 数字电子技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 475-477.
- [3] 谢自美. 电子线路设计[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2003: 105-109.
- [4] 李运涛, 王庸贵, 刘继平. 一种实时数据采集与监控系统[J]. 中国测试技术, 2004, 30(1): 25-28.
- [5] 罗苑棠. CPLD/FPGA 常用模块与综合系统设计实例精

讲[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007: 22-25.

- [6] 高健. 动态参数检测与虚拟仪器综合系统[J]. 国外电子元件, 2006, 14(2): 60-61.
- [7] 赵俊超. 集成电路设计VHD教程[M]. 北京: 希望电子出版社, 2002: 47-49.
- [8] 李红旗, 李东光, 李世义. 基于CPLD的弹载高速存储测试系统关键技术研究[J]. 弹箭与制导学报, 2007, 72(1): 1-3.