

# 三维光纤布拉格光栅应变传感器的温度补偿技术

郭瑜, 朱星盈, 倪屹, 王娟, 李岱林

江南大学物联网工程学院, 江苏 无锡 214000

**摘要** 对三维光纤布拉格光栅(FBG)应变传感器的温度补偿问题进行研究,设计了新型温度补偿膜片,并采用参考光纤法对传感器进行温度补偿。实验发现,未经老化处理的裸纤在30~40℃之间会出现温度拐点,致使温度灵敏系数降低,所以封装之前必须进行老化处理。通过有限元热力分析可知,新型温度补偿膜片在-10~50℃之间自身的最大微应变约为0.073  $\mu\epsilon$ ,受热膨胀系数失配的影响较小,系统的可靠性较高。同时悬臂梁式的缓存结构可使温度补偿光纤在测量过程中不受外界复杂环境的影响,在origin中拟合温度补偿膜片与应变测量传感膜片联合补偿的结果,修正之后线性度可以达到0.9999以上,满量程精度约为0.05%。

**关键词** 光纤光学; 光栅; 温度补偿膜片; 联合温度补偿; 光纤传感器

中图分类号 TN29

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.050602

## Temperature Compensation Technique Applied to 3-Dimensional Fiber Bragg Grating Strain Sensor

Guo Yu, Zhu Xingying, Ni Yi, Wang Juan, Li Dailin

School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214000, China

**Abstract** We present a novel technique of temperature compensation for 3-dimensional fiber Bragg grating (FBG) strain sensor, and design a temperature compensation diaphragm for temperature compensation of the strain sensor by using reference optical fiber compensation method. Experiment results demonstrate that bare fiber without aging process can appear inflection temperatures between 30 °C to 40 °C, which results in the decrease of the temperature sensitivity coefficient. So we must make aging process firstly before encapsulation to improve the sensitivity of the sensor. Based on the finite element thermal analysis, it is found the designed temperature compensation diaphragm's maximum strain is about 0.073  $\mu\epsilon$  when the temperature is increased from -10 °C to 50 °C, which demonstrates the thermal expansion coefficient mismatch has less influence on the diaphragm and this system has high temperature reliability. Besides, sensing accuracy of the fiber sensor is improved by the design of cantilever structure, which makes the sensing immune to the complex environment. We fit and revise the results of joint compensation between temperature compensated diaphragm and the strain sensing diaphragm by the origin. The results show that the sensing linearity can reach more than 0.9999, and the full range accuracy is about 0.05%.

**Key words** fiber optics; grating; temperature compensated diaphragm; combined temperature compensation; optical fiber sensor

**OCIS codes** 060.3735; 060.2270; 060.3738; 060.2370

## 1 引言

光纤通信与光纤传感技术在近几十年里发展极为迅速,除了可应用到常见的结构监测等领域<sup>[1]</sup>,同

时也开始应用到如应变点定位、光纤超声传感、液体浓度测量、倾角测量等其他新的领域<sup>[2-4]</sup>,其封装工艺也从以往的胶黏剂发展到镀金焊接<sup>[5]</sup>。由于材料本身受温度影响较大,许多光纤布拉格光栅(FBG)

收稿日期: 2017-10-30; 收到修改稿日期: 2017-11-16

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61701195)、江苏省自然科学基金青年基金(BK20160190)、中央高校基础科研经费(JUSRP11740)

作者简介: 郭瑜(1985—),男,博士,讲师,硕士生导师,主要从事光纤传感、光电集成方面的研究。

E-mail: guoynju@163.com

传感系统都必须进行温度补偿,温度补偿的方法众多且已经应用到许多工程测量中<sup>[6-8]</sup>。随着方法与工艺的日趋成熟,对测量精度的要求也越来越高。传感系统的整体结构设计还有待完善<sup>[9]</sup>。

一般传统的光纤光栅温度补偿的方法可以分为外温度补偿和内温度补偿两种<sup>[10-11]</sup>、外温度补偿是借助外部材料(如结构监测工程中常用的上下梁)的属性对温度进行补偿,而内温度补偿则是指根据光纤光栅对温度和应变的敏感差异,算出应变与温度的补偿参数。参考光纤法是内补偿应用最广的一种,这种方法通过引入一个仅受温度影响的参考光栅,求解温度与应变波长的相对影响。

本文介绍了一种光纤光栅的新型温度补偿方法,解决了温度与应力交叉影响的问题。通过大量实验发现,光纤光栅的温度敏感系数的实验值与理论值由于受外部封装材料等因素的影响相差较大,且未经老化处理过的裸纤在 30~40 °C 时温度灵敏系数会突然减小。利用光纤光栅结构与封装的特点对光纤光栅的温度补偿装置进行结构设计,对温度补偿膜片与应变测量传感膜片联合补偿的结果进行拟合,其线性度远高于国内同类型产品的线性度 0.99<sup>[12]</sup>。

## 2 传感装置

### 2.1 传感原理

工程上,一般将三维 FBG 应变传感器焊接在被测装置上,而温度补偿膜片则以悬臂梁的方式单端

固定于被测装置上,并与应变测量传感膜片连接,如图 1 所示,将栅区封装在片上的凹槽内,其中应变传感光栅 4 处于拉伸状态,温度补偿光栅 3 处于正常预拉伸状态。设它们具有相同的应力系数,应变传感光栅 4 的初始中心波长为  $\lambda_{10}$ ,温度补偿光栅 3 的初始中心波长为  $\lambda_{20}$ 。当应力和温度同时变化时,应变传感光栅 4 的波长变为  $\lambda_1$ ,温度补偿光栅 3 的波长变为  $\lambda_2$ 。在受压情况下,忽略温度与应力同时作用时二次项系数的影响,有<sup>[13]</sup>

$$\lambda_1 - \lambda_{10} =$$

$$\lambda_{10} (1 - \rho_e) \Delta \epsilon + \lambda_{10} (1 + \xi) \Delta T, \quad (1)$$

$$\lambda_2 - \lambda_{20} = \lambda_{20} (1 + \xi) \Delta T, \quad (2)$$

式中:  $\rho_e$  为光纤的弹光系数;  $\xi$  为光纤的热光系数; 温度变化为  $\Delta T$ ; 应变变化为  $\Delta \epsilon$ 。其中  $\rho_e$  和  $\xi$  的大小只与材料本身有关。解(1)式和(2)式的二元一次方程,可得

$$\Delta \epsilon = \frac{\lambda_1 \lambda_{20} - \lambda_2 \lambda_{10}}{\lambda_{10} \lambda_{20} (1 - \rho_e)}, \quad (3)$$

式中:  $\Delta \epsilon$  为所求传感器去除温度影响后的应变测量值。但在工程应用中应变测量值存在误差的原因有二: 1) 由于制造工艺以及材料本身不能完全相同,两根光纤的热敏感系数与应力敏感系数很难完全相等; 2) 宿主材料与光纤光栅材料产生的热膨胀系数失配问题。因此为了使传感测量结果满足高精度要求,需要对实验结果进行标定,求出标定系数。

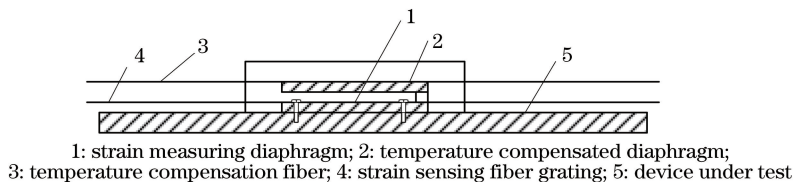


图 1 传感装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sensing device

### 2.2 传感器的结构设计

传统的光纤光栅传感器的封装一般可分为金属和胶黏两种<sup>[14]</sup>。传感器结构的设计在考虑其测量性能的同时,还应考虑加工、封装等工艺过程。为了减小温度补偿的误差,温度补偿膜片宿主结构的材料应与应变传感器的材料一致。材料选用 TC4 钛合金材料,因这种材料的弹性模量比一些常见的如不锈钢等金属材料小,故可以提高测量的精度。

应变传感测量膜片如图 2 所示,其环形平面弹簧结构承担整个结构的大部分形变,可以对光栅和平板结构进行减敏,实现大应变测量。当传感器固

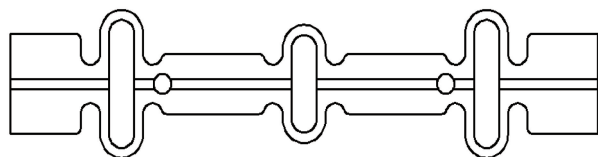


图 2 应变测量传感膜片外形结构图

Fig. 2 Configuration of strain measuring sensing diaphragm  
定在被测物体上工作时,待测物的应变通过固定端传递到两端大环形弹簧上,再传递到光纤光栅上,从而使 FBG 的中心波长产生漂移,实现应变的大范围测量。

温度补偿膜片的结构如图 3 所示,其采取悬臂梁的结构与应变测量传感膜片单端固定在一起,不受外界应力的作用,将被测结构设计为曲面或垂直面,这种缓冲型设计结构的优势在于可以提高重心位置,减小材料自身重力的影响,故该结构可以应用于外界环境复杂的情况。同时也可以通过减小传感器的面积来增大使用空间。在实际应用中宿主结构与光纤光栅结构的应变变化范围不同,其原因主要是 TC4 的热膨胀系数大于光纤光栅的热膨胀系数,从而导致产生热膨胀失配的问题。对于这一问题,在工程上需采用标定方法对其进行处理,即通过实验测量温度与波长的变化系数。这个系数是一个温度与失配引起应变之后测量结果的耦合值,通过这一固定值即可求出去除温度变化之外的应力与波长的变化关系。同时由于应变测量传感膜片与温度补偿膜片材料相同,所以在相同温度变化下受热膨胀系数失配的效果是相同的,这样由于热温度膨胀

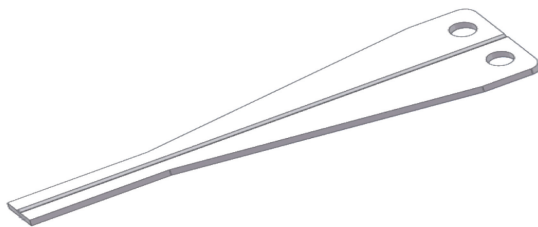


图 3 温度补偿膜片外形结构图

Fig. 3 Shape drawing of temperature compensated diaphragm  
失配对结果的误差影响在计算时可相互抵消,从而保证测量结果的准确性。

将温度补偿膜片结构在 ANSYS 中进行温度从  $-10\sim+50\text{ }^{\circ}\text{C}$  的仿真,应变结果如图 4 所示。仿真结果表明:在较大温度变化范围内,温度补偿膜片自身的最大微应变为  $0.073\text{ }\mu\epsilon$ ;在温度变化  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,宿主结构的微应变很小,对标定结果的影响也相对较小。综上所述,即使存在热膨胀系数失配的问题也并不影响对应变结果的标定与测量。

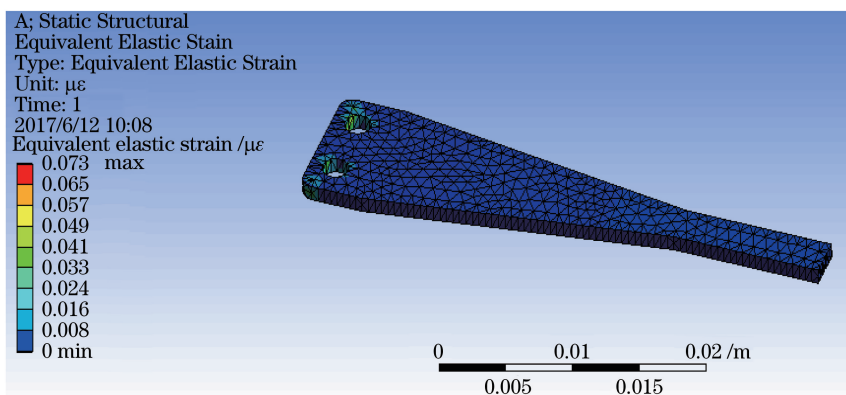


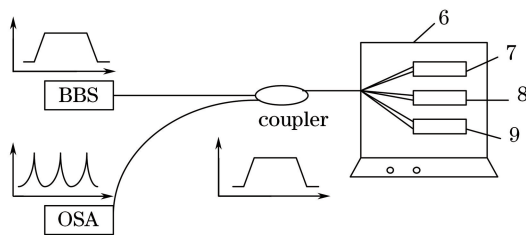
图 4 温度补偿膜片应变有限元分析结果

Fig. 4 Strain finite element analysis of temperature compensated diaphragm

### 3 实验结果及分析

图 5 为实验装置原理图,其中带宽光源(BBS)发出的光经耦合器传到实验所用的 3 组传感器上,再经耦合器返回到光谱分析仪(OSA)上,从而得到传感器中

各组波长随温度变化的值。利用温度控制箱 6 可以设置实验的温度变化以及所对应的时间。第 1 组采用初始波长相等的预拉伸温度补偿膜片应变测量传感膜片;第 2 组采用预拉伸应变测量传感膜片和温度补偿膜片,前者的波长比后者波长长约  $4\sim 5\text{ nm}$ ;第 3 组与



6: temperature controlled chamber; 7, 8, 9: three dimensional FBG strain sensor encapsulated

图 5 实验装置原理图

Fig. 5 Schematic diagram of test device

第1组相同,使用波长相近的FBG进行封装,便于对结果的标定系数进行对比。

实验中,采用温度补偿膜片与应变测量传感膜片联合补偿温度,温度补偿膜片封装在传感器的中间位置,而对应的应变测量膜片安装在其下部,实验中仅对三维传感器中的中间一对温度补偿膜片进行测量。首先将封装好的3组传感器放在温控箱中,实验温度设为 $-10\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,每 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为一个阶梯,保持时间为 $10\text{ min}$ ,实验中发现全新的裸纤在 $30\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间温度敏感性开始减弱。

为了验证实验的可靠性,将初始波长为 $1541\text{ nm}$

左右的全新裸纤封装在传感器中,当温度稳定后取波长平均值,在origin中对第1组波长值与温度值进行仿真,得到波长与温度的线性关系如图6所示。由图6可知,全新的裸纤在未经过温度老化处理时,在 $30\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间确实存在拐点,故在使用前必须作温度老化处理。

对3组传感器进行老化处理之后,进行温度与波长的标定实验。设其中第1组温度补偿膜片与应变测量传感膜片的波长分别为 $\lambda_1, \lambda_2$ ;第2组分别为 $\lambda_3, \lambda_4$ ;第3组分别为 $\lambda_5, \lambda_6$ 。将3组数据整理得到的拟合结果如图7所示。

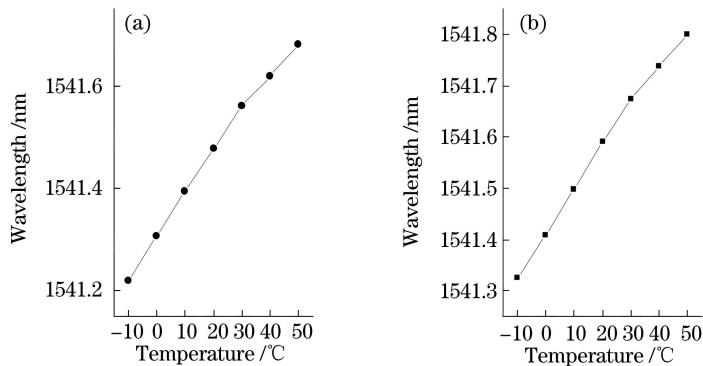


图6 波长随温度变化曲线。(a)应变测量传感膜片;(b)温度补偿膜片

Fig. 6 Wavelength variation curves with temperature. (a) Strain measuring diaphragm; (b) temperature compensated diaphragm

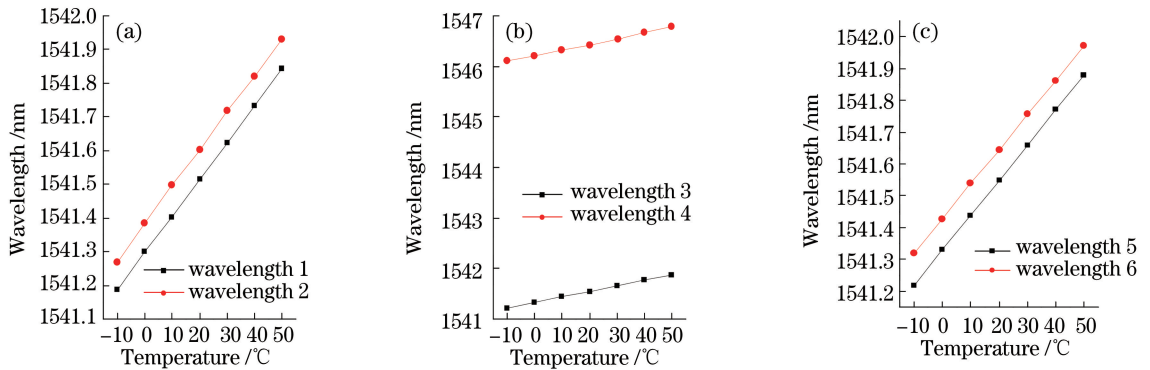


图7 温度与波长关系直线。(a)第1组;(b)第2组;(c)第3组

Fig. 7 Relationship between temperature and wavelength. (a) First group; (b) second group; (c) third group

温度联合补偿的目的在于求出温度补偿膜片与应变膜片分别受温度影响的波长调制的对应关系。通过以上仿真结果可知,这一关系是线性的,即标定出线性系数即可在系统后端去除应变传感膜片受温度的影响,在origin中对3组传感器的调制线性系数进行拟合,拟合关系直线与实际关系直线结果如图8所示。

由图8(a)~(c)的结果可以看出,联合温度补偿后的线性度很好,实际关系直线与拟合关系直线在图中几乎重合,第1组的线性度约为 $0.99997$ ,第2组约为 $0.99982$ ,第3组约为 $0.99987$ 。由图8(d)可知,残差控制在 $1.5\text{ pm}$ 以内,最小残差接近于 $0$ ,温度补偿效果良好。



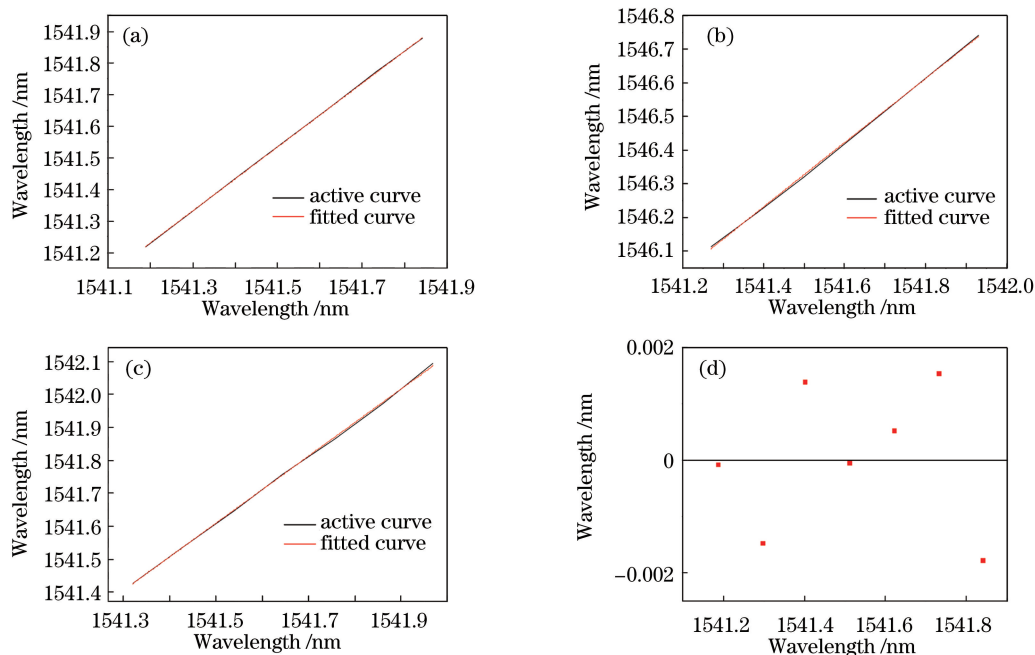


图 8 拟合结果。(a)第 1 组;(b)第 2 组;(c)第 3 组;(d)平均残差

Fig. 8 Fitting results. (a) First group; (b) second group; (c) third group; (d) mean residual error

## 4 结 论

通过实验结果证明,经过老化处理后的 FBG 可以避免温度补偿过程出现温度拐点的问题,同时用波长相近的 FBG 对应变测量传感膜片与温度补偿膜片进行封装补偿效果更好,经过计算传感器的满量程精度达到 0.05%,线性度为 0.999 以上,相比于许多同类传感器高了一个数量级。新型温度补偿膜片在结构设计上对减小测量误差的效果较好,这种利用新型温度补偿膜片的温度补偿方法可以避免传统方法在结构设计上的多种局限性,也可以避免应变变化不均匀所引起的测量误差。该产品具备封装简单、结构小巧、误差低、补偿方法简单等优点,可以广泛应用于各种需要温度补偿的光纤传感装置。

## 参 考 文 献

- [1] Xu G Q, Xiong D Y. Applications of fiber Bragg grating sensing technology in engineering[J]. Chinese Optics, 2013, 6(3): 306-317.  
徐国权, 熊代余. 光纤光栅传感技术在工程中的应用[J]. 中国光学, 2013, 6(3): 306-317.
- [2] Xie T, Wang X, Li C, *et al.* Mercury piston differential optical fiber Bragg grating tilt sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(3): 0306002.  
谢涛, 王行, 李川, 等. 水银柱活塞差动式光纤布拉格光栅倾角传感器[J]. 光学学报, 2017, 37(3):

0306002.

- [3] Tan H Y, Zhu W X, Zhang H L, *et al.* Manufacturing and performance analysis of intelligent steel strand embedded with prepressure large scale fiber Bragg grating sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0410001.  
覃荷瑛, 朱万旭, 张贺丽, 等. 内嵌预压式大量程光纤光栅传感器的智能钢绞线的研制与性能分析[J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0410001.
- [4] Tan H Y, Huo T T, Zhu W X. Desensitization effect of helix-slant composite technology on fiber Bragg grating sensor [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(3): 030601.  
覃荷瑛, 霍婷婷, 朱万旭. 螺旋倾斜复合技术对光纤布拉格光栅传感器的减敏作用[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(3): 030601.
- [5] Li Y L, Feng Y, Peng X L, *et al.* Simultaneous measurement of the temperature and force using a steel cantilever soldered with a partially nickel coated in-fiber Bragg grating[J]. Optics Communications, 2012, 285(21/22): 4275-4279.
- [6] Yang Y Q, Yang Q, Ge W, *et al.* Temperature compensated GMM-FBG current sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(10): 2377-2383.  
杨玉强, 杨群, 葛伟, 等. 温度自动补偿超磁致伸缩材料布拉格光栅光纤电流传感器[J]. 光学精密工程, 2016, 24(10): 2377-2383.

- [7] Li T L, Tan Y G, Han X, *et al.* Diaphragm based fiber Bragg grating acceleration sensor with temperature compensation [J]. *Sensors*, 2017, 17(1): 218.
- [8] Li J Z, Sun B C. Theory analysis of novel fiber Bragg grating temperature compensated method based on thermal stress [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(2): 27024115.  
李剑芝, 孙宝臣. 新型光纤光栅温度自补偿方法理论分析[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(2): 27024115.
- [9] Chen H, Yan G, Zhuang W, *et al.* Research on preload and sensing characteristics of fiber Bragg grating strain sensor [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(9): 1128-1132.  
陈昊, 闫光, 庄炜, 等. 光纤光栅应变传感器预紧封装及传感特性研究[J]. *激光与红外*, 2016, 46(9): 1128-1132.
- [10] Wang Y, Liu J P, Liu J H, *et al.* Transverse load sensor based on optical fiber extrinsic Fabry-Perot interferometer with high sensitivity and temperature self-compensation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(6): 1433-1440.  
王彦, 刘加萍, 刘吉虹, 等. 温度自补偿高灵敏度非本征光纤珐珀横向负载传感器[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(6): 1433-1440.
- [11] Brady G P, Kalli K, Webb D J, *et al.* Simultaneous measurement of strain and temperature using the first- and second-order diffraction wavelengths of Bragg gratings [C] // *IIEE Proceedings-Optoelectronics*, 1997, 144(3): 156-161.
- [12] Pang D D, Sui Q M, Jiang M S. New fiber Bragg grating high temperature sensing network based on diffraction demodulation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(11): 1105005.  
庞丹丹, 隋青美, 姜明顺. 基于衍射解调的新型光纤光栅高温传感网络[J]. *中国激光*, 2011, 38(11): 1105005.
- [13] Ansari F, Yuan L B. Mechanics of bond and interface shear transfer in optical fiber sensors [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, 124(4): 385-394.
- [14] Sun Q Z, Wang J Y, Zhang W, *et al.* Polymer packaged longitudinal microstructured fiber based distributed pressure sensing system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(8): 0802003.  
孙琪真, 汪静逸, 张威, 等. 聚合物封装的纵向微结构光纤分布式压力传感系统[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(8): 0802003.