

doi: 10.3788/gzxb20144302.0228001

一种新型光纤 Bragg 光栅流量传感器的仿真 与实验研究

蒋奇, 高芳芳

(山东大学 控制科学与工程学院, 济南 250061)

摘 要: 为了克服传统单个光纤布喇格光栅传感器对温度交叉敏感的问题, 设计制作了一种基于双光纤布喇格光栅的以阻流件和弹性体为换能元件的流量传感器. 该流量传感器采用弹性伞状结构体作为流量传感器的换能元件, 用硅胶树脂封装双光纤光栅的弹性伞状结构体, 起到了温度补偿的作用且提高了应变测量灵敏度. 用有限元优化传感器结构, 在 1~20 m/s 的流速下利用 ANSYS 对传感器结构和传感器周围的流体场进行模拟分析, 并计算了传感器的灵敏度, 实验证明了硅胶树脂作为封装材料的优越性. 进行了砝码干校法模拟实验, 完成传感器封装前后的性能测试, 通过提取该传感器的反射谱信号特征值, 得到封装前后传感器的载荷响应灵敏度分别为: 1.71 nm/kg, 0.103 nm/kg. 表明该流量传感器结构简单、安装方便、具有较好的线性度和灵敏度.

关键词: 传感器; 流量; 有限元; 光纤; 双光栅; FLUENT; 流速

中图分类号: TP212.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)02-0228001-7

Simulation and Experimental Research of a Novel Flow Sensor Based on Fiber Bragg Grating

JIANG Qi, GAO Fang-fang

(School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: A novel flow sensor based on double fiber Bragg grating was designed and made to overcome the temperature cross-sensitivity problems of traditional single fiber Bragg grating sensor. The elastic umbrella structures were employed as conversion elements and silicone resin as encapsulating material, and an effective solution double-grating structure was taken. The temperature natural compensation and its measuring sensitivity were improved. Finite element was used to optimize the structure of the flow sensor. Its structure and the fluid field around it were simulated and analyzed by ANSYS software within the velocity of 1~20 m/s and the sensitivity of the sensor was calculated. The advantages of silicone resin as encapsulating material and its temperature sensitivity were verified through experiments. The performances of the sensor packaging before and after were tested and the reflection spectrum signal characteristic values of the fiber grating were extracted with good linearity, high response sensitivity of 1.71 nm/kg and 0.103 nm/kg, respectively. The experiment results show that the flow sensor owns simple structure, good linearity and high sensitivity.

Key words: Sensor; Flow; Finite element; Fiber; Double FBG; FLUENT; Velocity

OCIS Codes: 280.4788; 050.2770; 060.2370

0 引言

工业生产过程和自动化控制领域, 流量是经常被

检测和控制的参量之一, 用于检测流量的仪表也是多种多样. 机械转子流量传感器被广泛应用, 由于其机械结构复杂具有较高的测量误差和测量准确度较低; 超

基金项目: 国家自然科学基金 (Nos. 61271073, 51079080) 和教育部新世纪优秀人才项目 (No. NCET-10-0541) 资助

第一作者: 蒋奇 (1973-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为检测技术与自动化装置、新型传感和光纤传感器. Email: jiangqi@sdu.edu.cn

通讯作者: 高芳芳 (1985-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感器. Email: gaofangfang1114@163.com

收稿日期: 2013-04-23; 录用日期: 2013-07-10

<http://www.photon.ac.cn>

声波流量计、电磁和声学多普勒流速仪风速计, 有较高的测量准确度和更容易使用, 但成本较高且很容易受电磁干扰. 近几年光纤流量传感技术得到了较好的发展. 与传统流量计相比, 光纤流量传感器具有大动态测量范围、耐高温高压、强抗电磁干扰能力等诸多优点.

光纤布喇格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)作为一种新型的光子无源器件^[1], 本质上, 它是在纤芯内形成一个窄带的(透射或反射)滤波器或反射镜. 光纤光栅的反射波长对应变比较灵敏, 将光纤光栅传感原理与传统流量检测原理结合在一起, 研究出高性能的FBG流量传感器, 对于现代工业流量测量的发展具有极大的价值和深远的意义. 目前国内外对光纤光栅流量传感器的研究进展情况有^[2-3]; 基于靶式结构的FBG流量传感器, 将光纤光栅直接粘贴于悬臂梁对称的两个面上, 两个FBG正好起到温度补偿的作用; 基于文丘里管结构的FBG流量传感器, 其原理是设计测量管道的粗细不同, 粗细两个截面产生的压强差, 通过这个存在的压强差作用于光纤光栅传感器上, 使光纤光栅中心波长发生偏移, 通过光纤光栅中心波长的偏移量得到流量(流速)的实测值; 基于涡街结构的FBG流量传感器, 这种结构的FBG流量计是将传统的涡街流量计与光纤光栅传感原理结合起来, 流体流经涡街发生体, 在涡街发生体的下游会产生一定频率的漩涡, FBG涡街流量计是采用FBG测量产生的漩涡频率; 基于V型内锥的FBG流量传感器, 也是差压流量计的一种. 这种结构的FBG流量传感器结构简单, 但是不足之处是存在危险性, V型锥体一旦脱离就会变成子弹, 危险性非常大. 本文采用波长调制、抗干扰能力强、重量轻、耐腐蚀等特点的光纤光栅器件^[4], 将传感结构设计成两个相对的同样的弹性伞状结构体, 把FBG敷设在对称的两支撑弹性体内, 形成光纤光栅流量传感器, 它可用于液体和气体的流量监测. 最后进行了传感器流量传感系统的砝码干校法模拟实验.

1 流量传感器的设计

1.1 FBG的应变传感原理

光纤光栅是利用光纤的光敏性在紫外光照射下产生光致折射率变化, 在纤芯上形成周期性的折射率分布, 从而可以对入射光中相位匹配的频率产生相干反射, 形成中心反射峰. 根据模耦合理论^[5-8], 宽带光在光纤Bragg光栅中传输时, 会产生模式耦合, 由光纤光栅的Bragg方程可知其中心波长 λ_B 可表示为^[9]

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (1)$$

式中, λ_B 为光纤光栅的中心波长, 也就是反射波的波长; Λ 为光栅周期; n 为纤芯的有效折射率. 假设光纤光栅仅受轴向应变作用, 温度保持不变^[10-11], 则由式(1)得到轴向应变引起的光纤Bragg波长变化为

$$\Delta\lambda_B = 2\Lambda\Delta n_{\text{eff}} + 2n_{\text{eff}}\Delta\Lambda \quad (2)$$

当只考虑受到纵向应变时, 光纤光栅的波长偏移可表示为^[12]

$$\Delta\lambda_{B,S} = \lambda_B(1 - p_e)\epsilon \quad (3)$$

式中, P_e 为有效弹光系数, 且

$$p_e = \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \quad (4)$$

式中, p_{11} 和 p_{12} 是应变光学张量, ν 是泊松比. 对常用单模光纤来说 $p_e \approx 0.22$, 则式(3)可化为

$$\Delta\lambda_{B,S} = 0.78\lambda_B\epsilon \quad (5)$$

当FBG中心波长为1555 nm, 则由式(5)可知应变灵敏度为1.22 pm/ $\mu\epsilon$.

1.2 有限元分析

采用ANSYS12.1 workbench平台中的Fluid Flow(FLUENT)进行流量计所测流场的模拟. 首先在Geometry中建立模型进行前处理, 在Mesh里进行网格划分. 然后在分析计算模块导入前处理器生成的网格模型, 在Setup模块中设置分析准确度、瞬态解析时间和流体密度、粘度等相关参量, 在Solution模块初始化施加边界条件完成计算. 在后处理模块可看到彩色等值线显示、梯度显示、矢量显示、粒子流迹显示等云图和矢量图, 也可将计算结果以图表、曲线形式显示或输出.

用ANSYS软件对传感器结构进行模拟分析, 比较模拟各个结构模型下的各参量最后得到流量传感器的最终模型. 然后, 对传感器结构进行二维建模和网格划分^[13]得到图1. 模拟分析时假设进口速度均匀, 垂直于进口流场方向上的流体速度为零. 在所有壁面上施加无滑移边界条件; 假定流体不可压缩, 并且其性质为恒值, 在这种情况下, 压力就可以考虑相对值, 因此在出口处施加的压力边界条件是相对压力为零^[14].

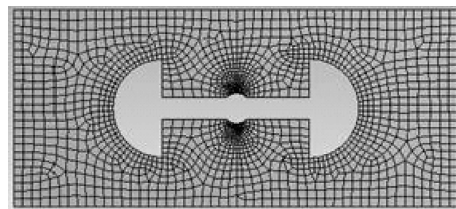


图1 划分网格后的模型

Fig.1 The model after mesh

模拟流体介质为空气; 介质温度为20℃; 最大流速为 $V_{\text{max}} = 20 \text{ m/s}$ ^[15], 最小流速为 $V_{\text{min}} = 1 \text{ m/s}$; 流体的密度和粘度分别为 1.225 kg/m^3 和 $0.05 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$; 管道内径为80 mm. 在入口处分别施加流速 $V = 1 \sim 20 \text{ m/s}$. 软件模拟传感器周围的流体场, 观测传感器周围各处的流速及压力值. 当流速为5 m/s时, 速度云图和压力云图如图2所示, 从图中可知在管道中传感器周围速度和压力的变化趋势及管道中各处的速度和压力大小, 颜色的深浅代表大小, 在阻流件前面压力逐渐

增大流速逐渐减小,在其后面压力呈现先增大后减小的趋势流体流速呈现逐渐增加的趋势.

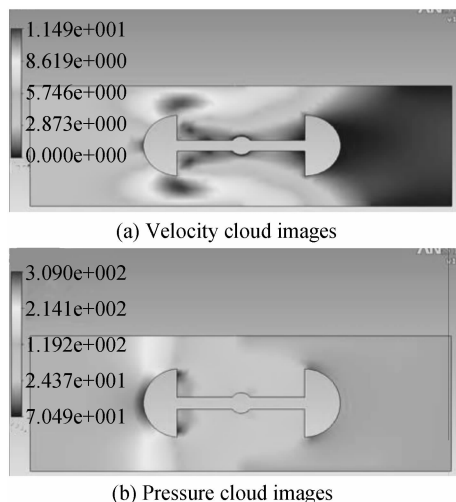


图2 速度云图和压力云图

Fig. 2 The velocity and pressure cloud images

在 1~20 m/s 等不同流速下,运用 ANSYS 软件可以得到传感器弹性体上各点的静压力. 不同流速下传感器两弹性体中点位置的静压力大小 P_1 、 P_2 及压差 P

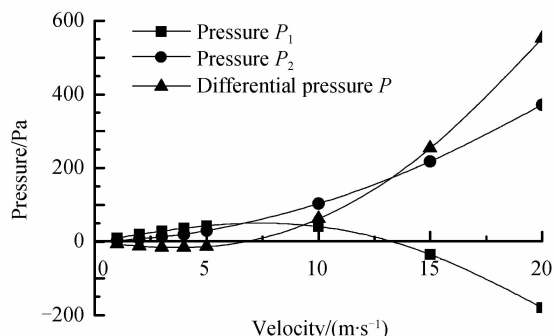


图3 不同流速下的压强

Fig. 3 Static pressure under different velocities

如图 3 所示. 由图中曲线可知,流速作用下两弹性体所受的静压力方向相反大小近似相等. 在一定误差范围内各静压力和压差的大小随空气流速的增大而变大,计算可得静压力的相对灵敏度为 $29.425 \text{ m/s} \cdot \text{Pa}$.

1.3 传感器的结构设计

为了产生流体压力变形,在流量管的轴向中心方向设有两个相对的同样的弹性伞状结构体,两个伞状结构体由阻流件半圆体和支撑弹性体组成. 弹性伞状结构体均采用机械强度高、热稳定性好、吸附性能高、化学性质稳定的硅胶树脂材料制作而成. 在同一根光纤上间距刻制加工制作的同一参量的光纤布喇格光栅 FBG_1 和 FBG_2 封装在硅胶弹性结构体内. 管内流体流到弹性伞状结构体时产生压力,流体会向外扩张,使得第一个支撑弹性体及光纤光栅传感器也受拉,使第二个支撑弹性体受压,其上的光纤光栅也受压.

制作后的流量传感器实物如图 4,传感器及其安装管道的相关参量设置如表 1. 在设计好的弹性结构体上,沿中心轴线方向刻线槽,在槽里打磨光滑后,把酒精清洗后的裸 FBG 用 502 胶固定一端,另一端进行预拉紧后,再用 502 固定,最后用环氧树脂胶沿着径向线槽将 FBG 封装于弹性体内.

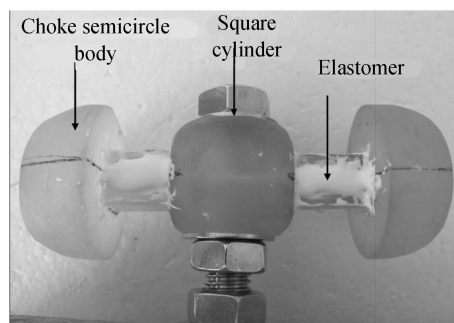


图4 流量传感器的结构

Fig. 4 The structure of the flow sensor

表 1 传感器的参量设置

Table 1 Parameters of this sensor

Elastomer parameters				Pipe parameters			
Parameter	Description	Value	Unit	Parameter	Description	Value	Unit
R_1	The radius of semicircle body	2	cm	E_1	Yong's modulus of outer cylinder	200	GPa
L_1	The length of square cylinder	3	cm	ν	Poisson ratio	0.29	
W_1	The width of square cylinder	3	cm	D_1	Inner diameter	80	mm
W_2	The width of elastomer	0.8	cm				
L_2	Effective length of elastomer	3	cm				

此光纤 Bragg 光栅流量传感器的测量原理为:流体流动时冲击阻流件半圆体,流体作用阻流件上的力传递给弹性体,弹性体发生纵向应变,从而引起光纤

Bragg 光栅波长移位变化. 通过合适的数学模型换算便可得到被测介质的流量值,即测量过程为:流量变化 \rightarrow 阻流件受力变化 \rightarrow 弹性体发生变形 \rightarrow 光纤 Bragg 光

栅波长发生偏移→用光纤光栅解调仪检测波长偏移量
→通过数学模型计算出流体流量变化量。

1.4 双光纤 Bragg 光栅对传感器的温度补偿原理

当光纤光栅传感器所受应力或温度发生改变时,光栅中心反射波长都将会产生相应的偏移.该传感器设计中采用温度和应变响应系数基本相同的两个光纤光栅实现了传感器的温度自动补偿.双光栅粘贴在对称的两支撑弹性体上,当两弹性体一侧受拉一侧受压(相同大小的拉力和压力)时,双光栅产生的应变大小相等方向相反.

由式(1)可知,当传感器头所处温度改变 ΔT ,所受应力产生的形变为 $\Delta\epsilon$ 时有

$$\Delta\lambda_B(T,\epsilon) = (\alpha + \zeta)n_{eff}\Delta T + (1 + P_e)n_{eff}\Delta\epsilon = K_T\Delta T + K_\epsilon\Delta\epsilon \quad (6)$$

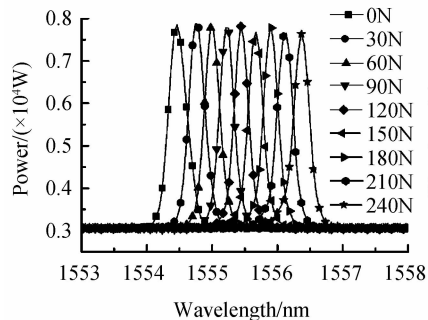
$$\text{则 } \Delta\lambda_B = K_T\Delta T + K_\epsilon\Delta\epsilon \quad (7)$$

$$\Delta\lambda_{B_1} = K_T\Delta T - K_\epsilon\Delta\epsilon \quad (8)$$

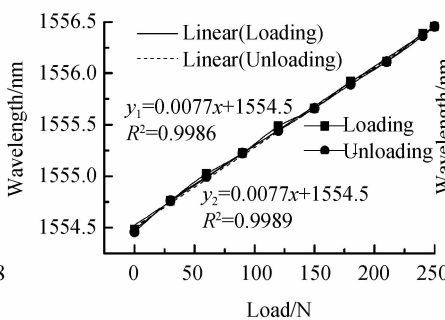
两式相减得

$$\Delta\lambda_{B_1} - \Delta\lambda_{B_2} = 2K_\epsilon\Delta\epsilon \quad (9)$$

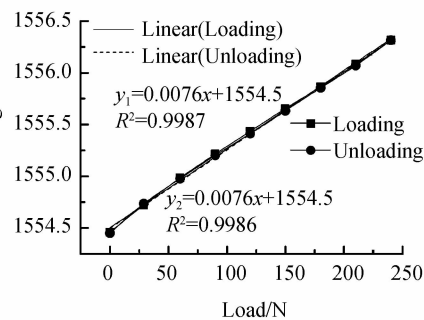
由式(9),可知双光栅中心波长的差值与两倍的形变 $\Delta\epsilon$ 成线性关系,这不但有效地补偿了温度变化对应变测量的影响,而且还将应变测量灵敏度提高了一倍^[16-19].



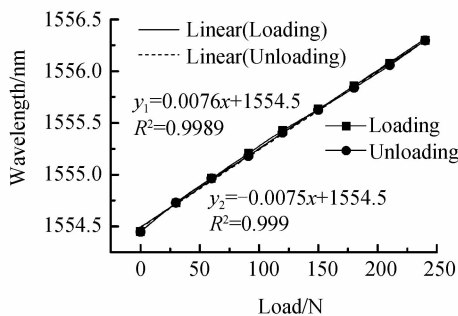
(a) Reflection spectrum of FBG



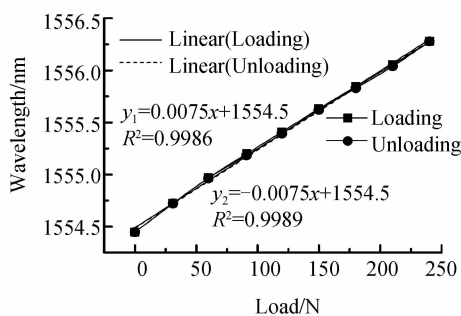
(b) First loading and unloading



(c) Second loading and unloading



(d) Third loading and unloading



(e) Fourth loading and unloading

图6 径向实验

Fig. 6 Radial experiment

轴向实验时以步长为 10 N 从 0 N 开始施加压力直至 50 N,同样往复加载卸载数次,每次都记录 FBG 的反射谱及中心波长.第一次加载时 FBG 的波形偏移情况及前四次加卸载时中心波长的偏移及其拟合曲线

2 传感器的实验测试

2.1 选取硅胶树脂弹性结构体实验

采用硅胶树脂块将 FBG 封装在其中,制作光纤光栅—硅胶树脂压力传感器,并进行轴向和径向压力实验.光纤光栅—硅胶树脂传感器及径向和轴向压力实验装置图如图 5.径向压力实验时以步长为 30 N 从 0 N 开始施加压力直至 240 N,这样往复加载卸载数次,每次都用光纤解调仪模块记录 FBG 的反射谱及中心波长.第一次加载时 FBG 的波形偏移情况及其拟合曲线如图 6.由图 6 可知,传感器在受到径向压力时 FBG 的波形向波长偏大的方向偏移,多次加载卸载曲线及拟合直线显示传感器的线性度和重复性较好.

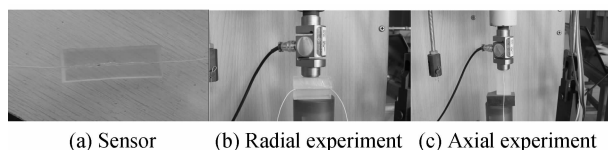


图5 光纤光栅—硅胶树脂传感器及实验装置

Fig. 5 Silica optical fiber grating strain sensor and experiment site map

如图 7.由图可知,传感器在受到轴向力时 FBG 的波形向波长偏小的方向偏移,多次加载卸载曲线及拟合直线显示传感器的线性度和恢复性较好.

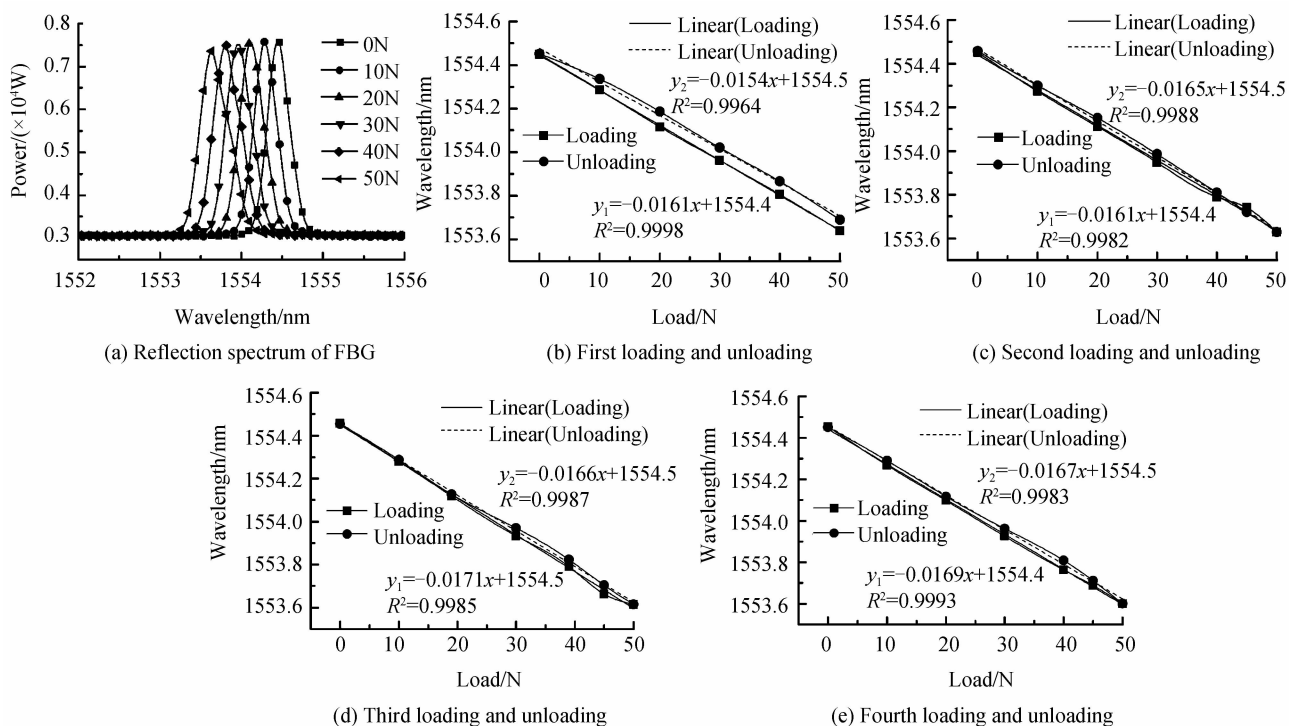


图 7 轴向实验

Fig. 7 Axial experiment

光纤光栅—硅胶树脂压力传感器的径向和轴向实验表明,该硅胶传感器的线性度和重复性较好,证明光纤光栅封装在硅胶内效果较好.从而验证了该光纤光栅流量传感器弹性结构体采用硅胶树脂材料的优越性.

2.2 传感器测试实验

搭建测试实验光路如图 8,FBG₁ 和 FBG₂ 封装在传感器弹性体内,光谱输出端用 AQ6317B 光谱分析仪解调光栅中心反射波长的移动.根据有限元模拟分析的结果知,在流体的冲击下两弹性体所受静压力大小近似相等方向相反,因此在封装前后的 FBG 传感器两侧分别施加相同的拉力和压力进行砝码干校法模拟实验.

光谱分析仪来记录 FBG 的反射谱和反射谱的 FWHM (半波带宽).

当拉力(压力)发生变化时,FBG 的波形及在不同拉(压)力作用下 FWHM 的变化情况如图 9,用最小二

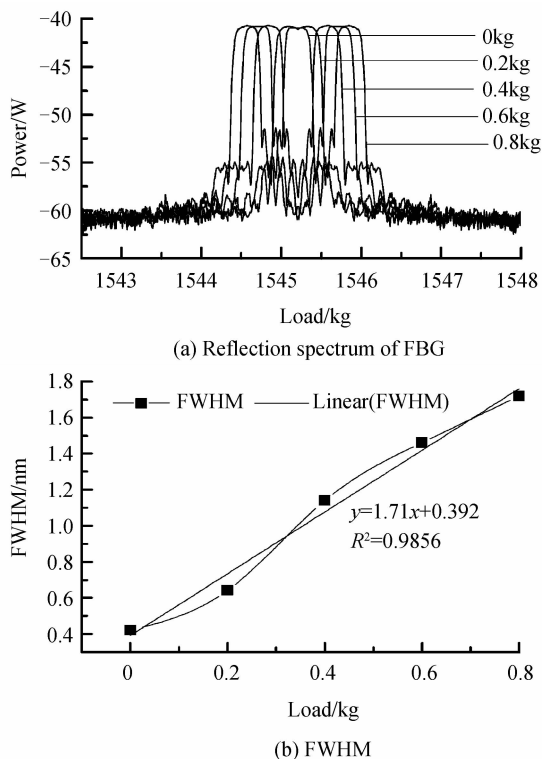


图 9 不同拉(压)力作用下 FBG 波形及 FWHM 变化情况
Fig. 9 FBG spectra and FWHM under different tension or pressure

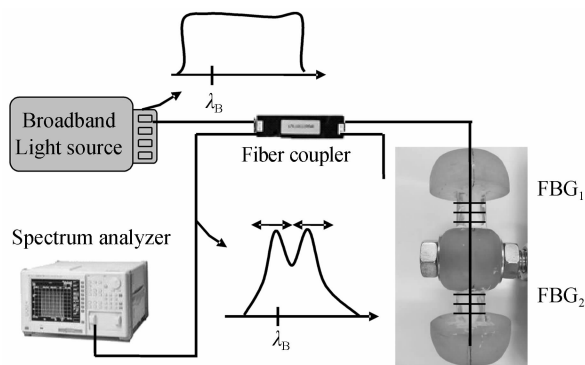


图 8 实验光路

Fig. 8 The experimental light path

首先,用裸光纤光栅来进行实验.实验时在裸光纤两侧分别以步长 0.2 kg,从 0 kg 开始施加同样的拉力和压力直到 0.8 kg,这样往复加载卸载数次,每次都

乘法原理绘制线性拟合曲线 $y=1.71x+0.392$, 拟合率为 0.985 6. 由图可知, FWHM 随拉(压)力的增加而变大并呈线性, 而其中心波长几乎不变. 分析实验数据得出 FWHM 灵敏度为 1.71 nm/kg. 然后, 对封装好的 FBG 传感器两侧分别以步长 0.4 kg, 从 0.1 kg 开始施加拉压力直到 2.5 kg. 同样往复加载卸载数次, 每次都使用光谱分析仪来记录 FBG 的反射谱和 FWHM.

当拉(压)力发生变化时, FBG 的波形及在不同拉(压)力作用下 FWHM 的变化情况如图 10, 用最小二乘法原理绘制线性拟合曲线 $y=0.103x+0.3513$, 拟合率为 0.990 3. 由此可知, FWHM 随拉(压)力的增加而变大并呈线性, 分析实验数据得出 FWHM 灵敏度为 0.103 nm/kg.

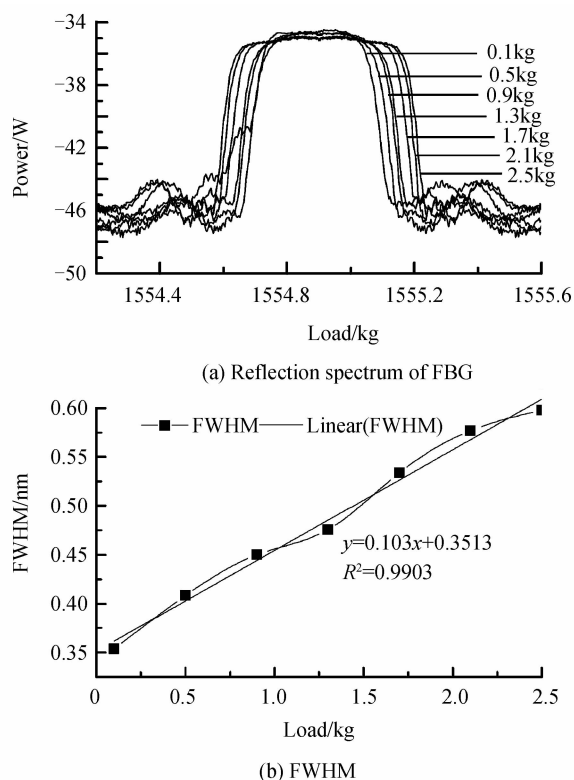


图 10 不同拉(压)力作用下 FBG 波形及 FWHM 变化情况
Fig. 10 FBG spectra and FWHM under different tension or pressure

3 结论

该流量传感器采用两个参量相同的光纤光栅分布敷设在对称拉推结构中, 这种设计克服了传统单个 FBG 传感器对温度交叉敏感的问题, 起到了温度补偿的作用且提高了应变测量灵敏度. 用有限元优化传感器结构, 模拟不同流速下传感器周围流速及压力. 实验表明硅胶树脂作为 FBG 的封装材料的优越性. 通过砝码干校法模拟实验, 分析得出传感器中的光纤 Bragg 光栅的 FWHM 与所加拉(压)力呈线性关系, 该传感器的载荷相应灵敏度为 0.103 nm/kg. 论文采用传感

器两端拉力、压力模拟实验, 来反演管道内气体或液体流量—传感器承受的拉力、压力关系, 从而进行流量测试, 真实管道内的液体和气体实验, 在后续工作中.

参考文献

- [1] KIRKENDALL C K, DANDRIDGE A. Overview of high performance fibre-optic sensing[J]. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 2004, **37**(PII S0022-3727(04)39793-718): 197-216.
- [2] YU Da-kuan, QIAO Xue-guang, JIA Zhen-an, *et al.* Research on fiber Bragg grating flowmeter and its progress[J]. *Study on Optical Communications*, 2008, **6**: 37-39.
禹大宽, 乔学光, 贾振安, 等. 光纤 Bragg 光栅流量传感器的研究及进展[J]. *光通信研究*, 2008, **6**: 37-39.
- [3] ZHAO Cong. A fiber Bragg grating target type flow sensor based on the structure of shaft seal diaphragm[D]. Kun Ming; Kunming University of Science and Technology, 2009.
赵聪. 一种基于轴封膜片结构的光纤 Bragg 光栅靶式流量传感器[D]. 昆明; 昆明理工大学, 2009.
- [4] ZHANG Dong-sheng, GUO Dan, HU Chun-chi, *et al.* The measurement of distributing pressure in molding cavity based on fiber bragg grating sensors[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(5): 847-850.
张东生, 郭丹, 胡春池, 等. 基于光纤光栅传感的模压腔内压强分布式测量[J]. *光子学报*, 2007, **36**(5): 847-850.
- [5] CHEN Jian-jun, ZHANG Wei-gang, TU Qin-chang, *et al.* High-sensitivity flow velocity sensor based on fiber grating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **26**(8): 1136-1139.
陈建军, 张伟刚, 涂勤昌, 等. 基于光纤光栅的高灵敏度流速传感器[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1136-1139.
- [6] REN Liang. The application of fiber bragg grating technology in structure health monitoring[D]. Dalian; Dalian University of Technology, 2008.
任亮. 光纤光栅传感技术在结构健康监测中的应用[D]. 大连; 大连理工大学, 2008.
- [7] HILL K O. Photosensitivity in optical fiber waveguides; From discovery to commercialization[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, **6**(6): 1186-1189.
- [8] ROBERT G Hunsperger. Integrated optics[M]. New York; Springer, 2009.
- [9] GUAN Shou-hua, YU Qing-xu, SONG Shi-de, *et al.* Theoretical and experimental study on temperature characteristic of long-period fibre grating[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2007, **20**(3): 543-545.
关寿华, 于清旭, 宋世德, 等. 长周期光纤光栅温度特性的理论与实验研究[J]. *传感技术学报*, 2007, **20**(3): 543-545.
- [10] JIANG Qi, DU Huai-guang, HU Debo, *et al.* Hydraulic pressure sensor based on fiber Bragg grating[J]. *Optical Engineering*, 2011, **50**(6): 064401-064404.
- [11] SHAO Li-yang, JIANG Qi, ALBERT Jacques. Fiber optic pressure sensing with conforming elastomers[J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(35): 6784-6788.
- [12] OTHONOS Andreas. Fiber Bragg gratings[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1997, **68**(12): 4309-4341.
- [13] 商跃进. 有限元原理与 ANSYS 应用指南[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [14] LI Ming, LIU Zhi-yuan, FU Hai-wei, *et al.* Two dimension value simulation investigation of a fiber-optic Bragg grating flow sensor[J]. *Optical Communication Technology*, 2009, **10**: 41-42.
李明, 刘志愿, 傅海威, 等. 一种光纤 Bragg 光栅流量传感器二维数值模拟研究[J]. *光通信技术*, 2009, **10**: 41-42.

- [15] DANIEL Weceł, TADEUSZ Chmielniak, JANUSZ Kotowicz. Experimental and numerical investigations of the averaging Pitot tube and analysis of installation effects on the flow coefficient[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2008, **19**(5): 301-306.
- [16] WANG Hai-ping, CHEN Rong, LIN Bin, *et al.* Temperature compensation of FBG sensors with double fiber bragg gratings[J]. *Laser & Infrared*, 2003, **33**(3): 218-220.
王海平, 陈荣, 林斌, 等. 双光纤 Bragg 光栅用于 FBG 型传感器的温度补偿[J]. *激光与红外*, 2003, **33**(3):218-220.
- [17] CUI Liu-zhu, JIANG Yi, LIU You-hai. A fiber optic displacement sensor with temperature compensation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(11): 1667-1670.
崔留住, 江毅, 刘有海, 等. 具有温度补偿的光纤位移传感器[J]. *光子学报*, 2011, **40**(11):1667-1670.
- [18] HU Yu-rui, TANG Yuan-hong, LI Chuan, *et al.* Fiber bragg grating flow sensor[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2010, **23**(4): 471-474.
胡玉瑞, 唐源宏, 李川. 光纤 Bragg 光栅流量传感器[J]. *传感技术学报*, 2010, **23**(4):471-474.
- [19] HU Zhi-xin, MA Yun-bin, TAN Dong-jie, *et al.* Oil pipeline sliding monitoring system based on fiber bragg grating sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(1): 33-36.
胡志新, 马云宾, 谭东杰, 等. 基于光纤光栅传感的管道滑坡监测方法研究[J]. *光子学报*, 2010, **39**(1):33-36.