

轮辐式光纤光栅压力传感器的设计与实现*

罗建花 开桂云 刘 波 曹 晔 李红民 高宏伟 赵 健 张伟刚 董孝义

(南开大学现代光学所,天津 300071)

摘 要 利用光纤光栅作为基本传感元件,设计研制了一种基于轮辐式压力盒装置的新型光纤光栅压力传感器. 常温下在 0~30 KN 的范围内,其测量线性度达到 99.91%,灵敏度达到 22 N,且响应速度快. 与其它类型的光纤光栅压力传感器相比,轮辐式光纤光栅压力传感器具有更大的测量范围、更高的抗干扰能力,并且由于光纤光栅本身的波分复用特性,可以很方便地构成压力传感网络进行多种物理量、多点的测量. 实验表明:本传感系统具有结构简单、操作方便、滞后小、重复性好、结构高度小、重量轻等优点,在桥梁、大厦等超大型建筑以及大型管道等的检测与监测方面将会有更为广阔的应用前景.

关键词 轮辐式;压力传感器;Bragg 光栅

中图分类号 TP212 **文献标识码** A

0 引言

基于光纤光栅的光纤传感器是以光纤光栅做敏感元件的功能型光纤传感器,与传统的传感器相比有很多不可比拟的优点^[1]. 此外,光纤光栅传感器还具有线性响应快,易于集成和插入损耗小等优点,将其埋于被测材料中可方便地测出材料内部的应力和温度场. 光纤光栅传感器的发明是光传感和光通讯领域中的重要应用,对光纤光栅传感器的研究已成为当前光纤传感器的重要研究热点. 随着光纤光栅制造技术的进步及其性能的日益改善以及应用开发研究成果的不断涌现,光纤光栅传感器在传感领域中将占有越来越重要的地位^[2].

但是,由于光纤本身很纤细(外径约为 125 μm),其主要成分是 SiO_2 ,故特别脆弱,尤其其它的抗剪切能力更差. 因此,将其作为传感器在工程实际中不加保护地直接应用是难以实现的,一般在实际应用中均加以各种技术的保护性封装. 但目前,国内外对光纤光栅的封装技术及工艺研究报道很少,尤其是针对工程应用中的工程化保护性封装工艺及技术更为少见. 因此,研究实用的光纤光栅工程化保护性封装工艺技术其意义十分重大.

本文针对土木工程粗放式施工的特点,采用轮辐式压力盒结构装置,设计了一种新型的轮辐式光纤光栅压力传感器^[3]. 它不但具有对光纤光栅可靠的保护作用,适合工程化应用特点,还具有很高的测量准

确度. 与电阻应变式压力传感器相比,由于光纤光栅本身采用波长编码,因此光纤光栅压力传感器可以很方便地利用波分复用原理,构成传感阵列和网络系统,因而具有广泛的应用前景.

1 基本工作原理

实验中所使用的光纤光栅均为 Bragg 光纤光栅,其折射率调制周期是均匀的,故满足 Bragg 条件,即

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

式中, λ_B 为 Bragg 波长, n_{eff} 为光栅有效折射率(折射率调制幅度大小的平均效应), Λ 为光栅周期(折射率调制的空间周期).

当作用于光纤光栅的被测物理量(如温度,应力等)发生变化时,将引起 n_{eff} 和 Λ 的相应改变,从而导致 λ_B 的漂移. 反过来,通过检测 λ_B 的漂移,即可得知被测物理量的信息. 光纤 Bragg 光栅传感器的研究工作主要集中在温度和应力的准分布式测量上. 温度和应力的变化所引起的 λ_B 的漂移可表示为^[4]

$$\Delta\lambda_B = 2n\Lambda \left\{ 1 - \left(\frac{n^2}{2}\right) [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{22})] \right\} \epsilon + \left[\alpha + \frac{\left(\frac{dn}{dT}\right)}{n} \right] \Delta T = \lambda_B (K_T \Delta T + K_\epsilon \epsilon) \quad (2)$$

式中, ϵ 为应力, P_{ij} 为光压系数, ν 为横向变型系数(泊松比), α 为热胀系数, ΔT 为温度的变化量. 因此由上式可知,在排除或者忽略温度变化影响的时候,光纤光栅 Bragg 波长的变化仅与应力的变化相关,且是成正比的^[5],根据这一原理即可利用光纤光栅来测量压力的变化.

轮辐式压力传感器是近年来国内外研制和应用的一种新型传感器,无论是在测量领域的广度,还是在测量的准确度上它都有着很强的竞争力^[6]. 本文

* 国家科技部 863 计划项目(2002A313110),天津市科技重大攻关项目(043182011),天津市科委重点基金项目(033800211)

Tel: 022-23509849 Email: lubilin@mail.nankai.edu.cn

收稿日期: 2004-10-20

将用光纤光栅代替传统的电阻应变片作为传感元件贴在轮辐式传感器的轮辐上,通过测量轮辐上的剪应力,从而间接的测量出载荷.在由压力转换为 Bragg 波长变换过程中,将经历两个环节组成的变换过程^[7],可得表征轮辐式光纤光栅压力传感器的基本特征的关系式:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = K_r \cdot \frac{F}{E \cdot A} \quad (3)$$

即 Bragg 波长变化 $\Delta\lambda_B/\lambda_B$ 与它所感受到的压力 F 成正比,与材料的弹性模量 E 和弹性体的几何尺寸 A 成反比.其中 K_r 为光纤 Bragg 光栅的应变灵敏系数.

常见的轮辐式传感器外形结构如图 1,轮辐式传感器有四、六、八幅甚至十二幅的结构设计,幅数越多制作起来越困难.实验中采用的为四幅式结构,即相当于两个直角相交的双端剪切梁式传感器.且这种传感器顶部为半圆型结构,因此对轴向侧力有很好的抵抗力,而对水平侧力可认为是无向性的,这一特点可以大大简化其所需要的保护装置.

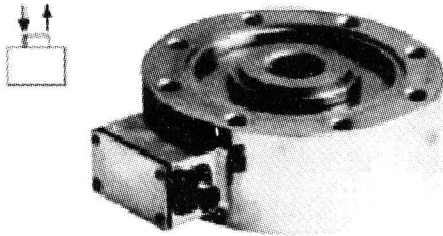


图 1 轮辐式压力盒外形结构
Fig. 1 The outline frame of spoke-structure pressure box

实验中,将光纤光栅(FBG)粘贴在各轮辐侧面中间与中心轴线成 45° 的方向上(由材料力学可知, 45° 的方向受到的剪切力最大,且在正负 45° 的方向上分别受到拉伸、压缩的应力作用.),通过测量 FBG 波长的变化来测量轮辐上的剪应力,从而间接地测量载荷.图 2 为该传感器的截面图,图 3 为设计制作的轮辐式光纤光栅压力传感器的实物图.

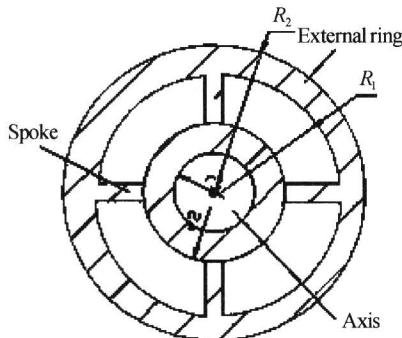


图 2 轮辐式传感器截面
Fig. 2 The sectional diagram of spoke-structure sensor

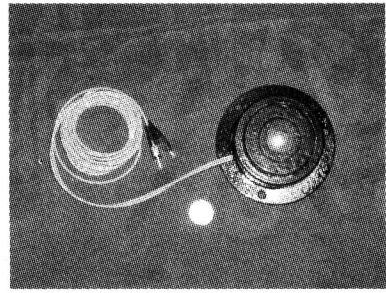


图 3 轮辐式光纤光栅压力传感器实物
Fig. 3 The spoke-structure FBG pressure sensor

2 实验结果及分析

实验所用的光纤 Bragg 光栅是利用位相掩模法制作的,自由状态下其中心反射波长为 1544.76 nm , 3 dB 带宽为 0.26 nm ,反射率为 90% ,光栅的长度约为 15 mm .光纤光栅粘贴于轮辐式压力盒的一轮辐侧面与轴线成 45° 的方向,图 4 为轮辐式压力传感器压力实验的实验装置图.宽带光源发出的光经 3 dB 耦合器入射到光纤光栅压力传感器中,由光纤光栅(FBG)反射的光经 3 dB 耦合器进入 HP 86120C 型多波长计.

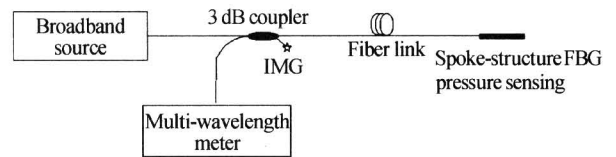


图 4 轮辐式压力传感器压力实验的实验装置
Fig. 4 The experimental configuration of spoke-structure FBG pressure sensing system

实验中给压力传感器施加的压力,采用千斤顶实施,压力的大小由压力计测量.表 1 为在 $0 \sim 30 \text{ kN}$ 的压力范围内测得的轮辐式光纤光栅压力传感器其压力与波长的实验实测值.

表 1 实验数据

压力/kN	波长/nm
0	1544.760
5	1544.510
10	1544.280
15	1544.050
20	1543.840
25	1543.640
30	1543.400

图 5 为根据表 1 做出的该轮辐式光纤光栅压力传感器的压力响应曲线.由图 5 可以看出,随着压力 0 到 30 kN 逐渐增大,Bragg 峰值波长呈线性下降(随着压力的增大,轮辐上受到的剪切力增大,从而光栅不断压缩,导致 Bragg 峰值波长降低),其线性度达到 99.91% .从实验结果可以看出,该传感器的压力测量

曲线有良好的线性。采用四次多项式 $y = -9 \times 10^{-7} x^4 + 4 \times 10^{-5} x^3 - 0.0004 x^2 - 0.048 x + 1544.8$ 进行拟合, 结果发现 $R^2 = 1$ 。由此可以得到, 该传感器压力测量曲线在测量范围内与上述四次曲线完全重合。因此为了该传感器对压力可以更准确的测量, 实际应用中可以通过计算机采用上述四次多项式对测量到的数据进行非线性差值。另外, 由于传感器是人工封装的, 每个都存在一定的个性, 并不完全相同。从实验中总结出, 增大光栅的粘贴角度(使之尽量接近 45° 角粘贴), 采用与光纤、金属结合更为紧密的胶, 改进粘贴工艺, 设计更为合理的施力、测力装置, 还可以提高该传感器的性能。从实验数据还可以看出, 在 $0 \sim 30 \text{ kN}$ 的变化范围内, Bragg 光栅的峰值波长漂移量为 1.36 nm , HP86120C型多波长计的分辨率为 1 pm , 因此该传感系统的测量灵敏度大约为 22 N 。

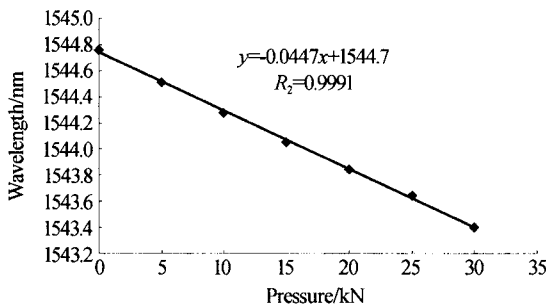


图5 轮辐式压力传感器测量曲线

Fig. 5 The measured pressure sensing curve of Spoke-structure pressure sensor

因为上述实验是在环境温度恒定的情况下进行的, 没有考虑温度对 FBG 中心反射波长的影响。但是光纤光栅传感器对温度和应力都是敏感的, 即温度、应力均能引起布喇格光栅中心波长的漂移, 当光纤光栅用于传感测量时, 很难区分它们分别引起的被测量量的变化。在实际工程化应用时必须考虑温度的影响, 可以参考国内外的很多方案来改良轮辐式光纤光栅压力传感器。例如引入参考光栅实现温度补偿的应力测量^[8], 施加与温度作用相反的应变以补偿由温度引起的波长变化^[9], 双光栅矩阵运算法^[10]等。考虑到轮辐式光纤光栅传感器的特殊性, 可以在传感器同一轮辐两个侧面粘贴两根光纤光栅, 通过测量它们的波长漂移来分析温度和压力的变化。

3 结论

设计制作了一种新型的基于轮辐式压力盒的光纤光栅压力传感器, 并在常温下进行了压力实验。轮辐式光纤光栅压力传感器具有测量范围大、抗干扰能力强、便于构成传感网络以及适用于工程化应

用等优良特性。实验结果表明, 该传感器具有很高的线性, 在 $0 \sim 30 \text{ kN}$ 测量范围内, 测量灵敏度大约 22 N 。考虑到实验在常温下进行, 没有消除温度的干扰, 达不到工程化应用的条件。下一步应该对这种轮辐式光纤光栅压力传感器进行改良, 消除它对温度的敏感, 并且与网络技术结合起来, 在桥梁、大厦等超大型建筑以及大型管道等的检测与监测方面将会有更为广阔的应用前景。

参考文献

- 王维波. 测量光纤光栅传感器中布喇格波长移动量的研究进展. 激光与光电子学进展, 2004, **41**(5): 35~40
Wang W B. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2004, **41**(5): 35~40
- Kersey D, Davis M A, Patrick H J, et al. Fiber grating sensor. *J of Lightwave Tech*, 1997, **15**(8): 1442~1463
- 陶宝祺, 王妮. 电阻应变式传感器. 北京: 国防工业出版社, 1993. 110~112
Tao B Q, Wang N. *Strain-dependent Resistance Sensor*. Beijing: China National Defense Industry Press, 1993. 110~112
- 马卫东, 施伟, 付浩军, 等. 光纤光栅传感器的工作原理及研究进展. 光通信研究, 2001, (4): 58~62
Ma W D, Shi W, Fu H J, et al. *Study on Optical Communication*, 2001, (4): 58~62
- 刘云启, 郭转运, 刘志国, 等. 光纤光栅的压力传感特性研究. 光子学报, 1999, **28**(5): 443~445
Liu Y Q, Guo Z Y, Liu Z G, et al. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(5): 443~445
- 高飞鹞. 轮辐式传感器的几种应用方式. 上海计量测试, 1995, **22**(3): 13~15
Gao F Y. *Shanghai Measurement and Testing*, 1995, **22**(3): 13~15
- 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. 机械设计与制造工程, 2002, **31**(4): 87~89
Zhu Y, Zhou B W, Gu R, et al. *Machine Design and Manufacturing Engineering*, 2002, **31**(4): 87~89
- Kersey D, Berkoff T A, Morey W W. Fiber-optic Bragg grating strain sensor with drift-compensated high-resolution interferometric wavelength-shift detection. *Opt Lett*, 1993, **18**(1): 72~74
- Yoffe G W, Krug P A, Ouellette F, et al. Passive temperature-compensating package for optical fiber gratings. *Appl Optics*, 1995, **34**(30): 6859~6861
- Xu M G, Archambault J L, Reekie L, et al. Discrimination between strain and temperature effects using dual-wavelength fibre grating sensors. *Electron Lett*, 1994, **30**(13): 1085~1087

The Design and Realization of Spoke FBG Pressure Sensor

Luo Jianhua, Kai Guiyun, Liu Bo, Cao Ye, Li Hongmin, Gao Hongwei, Zhao Jian,
Zhang Weigang, Dong Xiaoyi

Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071

Received date: 2004-10-20

Abstract A novel FBG sensor based on spoke-structure pressure box by utilizing FBG as the element sensing component is presented. Under room temperature, within the range of 0~30KN, its linearity and sensitivity reaches 99.91% and 22 N, respectively. Furthermore, it has excellent repeatability and high response speed. Compared with other FBG sensors, the spoke FBG sensor has wider measurement range and higher interference resistance. In addition, owing to its applicability for WDM systems, sensing networks can be constructed by FBG sensor to measure multi-point and many physical parameters. This research demonstrates that the designed sensing system has the advantages of simple and compact structure, easiness for manufacture, little delay time, good repeatability, light weight, etc. And it will have various applications in the fields of monitoring large buildings such as bridges, mansions and mass-scale tunnels.

Keywords Spoke-structure; Pressure sensor; Fiber Bragg grating



Luo Jianhua was born in 1980 in Shandong Province. She received her M. S. degree from the Institute of Modern Optics, Nankai University in 2005. Now she is a Doctor candidate in the Institute and her research interests are fiber sensors, fiber Bragg sensing system and fiber communication.