

# 光纤光栅压力传感器中应力迟滞的消除方法\*

胡志新<sup>1,2</sup> 朱 军<sup>2</sup> 张 陵<sup>1</sup> 王宏亮<sup>3</sup>

(1 西安交通大学航天航空学院, 西安 710049)

(2 长安大学工程机械学院, 西安 710064)

(3 西安石油大学理学院, 西安 710065)

**摘 要** 提出了一种利用双光纤光栅消除光纤光栅压力传感器中应力迟滞的方法. 将两个相同波长的光纤布拉格光栅分别对称粘贴于悬臂梁的上下表面并串接在一起, 外压力作用下可实现调谐双光栅布拉格波长差. 研究表明, 该方法可消除弹性元件材料所引起光纤光栅压力传感器的应力迟滞, 改善传感器的线性响应特性和重复性, 在 0~40 MPa 的压力范围内, 双峰波长差的调谐范围为 5.12 nm, 是单峰波长调谐范围的 2 倍, 压力调谐双峰波长差的灵敏度可达 0.128 nm/MPa, 是压力调谐单峰波长灵敏度的 2 倍.

**关键词** 光纤光学; 光纤光栅; 压力传感; 应力迟滞消除

**中图分类号** TN25 **文献标识码** A

## 0 引言

光纤光栅压力传感器系统中, 需要解决的难题就是提高其灵敏度<sup>[1~4]</sup>, 即传感器的增敏问题. 实现压力传感器的增敏通常是借助于机敏材料的弹性形变, 将其应变传递到沿光纤光栅轴线方向上, 引起光纤光栅布拉格波长发生偏移, 以达到对应力等参量高灵敏度调谐的目的. 然而, 传感器的重复性和准确度在很大程度上取决于机敏材料和粘贴胶的弹性迟滞大小. 一般说来, 任何弹性材料, 不论是金属, 还是非金属, 在工作时都同时存在不同程度的弹性滞后、弹性后效和蠕变, 弹-塑性力学中称这种现象为弹性迟滞效应. 弹性迟滞是测量过程中引起传感器重复性误差与稳定性误差的主要原因之一<sup>[5]</sup>, 它影响着以弹性机敏材料为衬底的光纤光栅压力传感器灵敏度的提高. 为了解决上述问题, 本文借助等强度悬臂梁与传递压力元件组合的光纤光栅压力传感系统的实验装置进行了理论和实验研究, 有效地消除了材料的弹性迟滞对传感器测量过程重复性和稳定性的影响, 从而提高了光纤光栅压力传感系统的压力响应灵敏度、重复性、稳定性和线性响应特性, 为设计高分辨力的光纤光栅压力传感器提供了行之有效的技术途径.

## 1 单光纤光栅压力传感系统增敏问题

### 1.1 压力传感增敏装置及理论模型

采用等强度梁与传递压力元件的组合, 将光纤

光栅沿梁长方向中心线粘贴于悬臂梁的下表面, 构成如图 1 的光纤光栅压力传感系统, 在温度不变的

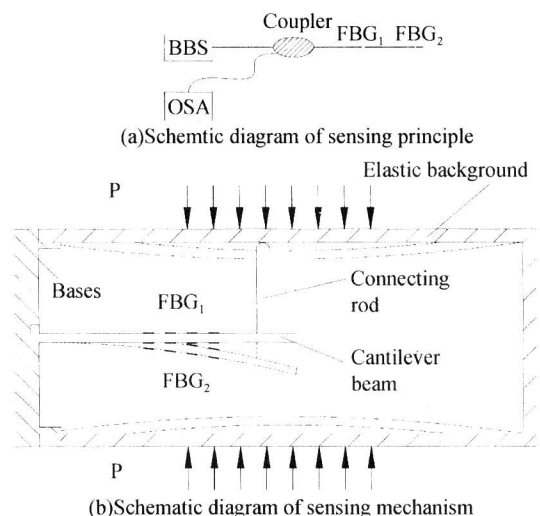


图 1 传感器机构与原理

Fig. 1 Schematic diagram of sensing mechanism and principle

情况下, 光纤光栅反射中心波长  $\lambda_B$  随梁的自由端在集中载荷下产生位移  $\Delta h$  之间的变化关系可写为

$$\lambda = K_1 \Delta h + \lambda_0 \quad (1)$$

式中, 比例系数  $K_1 = \frac{6\lambda_0(1-p_e)(L-x)h}{L^3}$ ,  $p_e$  为光纤的弹光系数,  $\lambda_0$  为光纤光栅在应力为零、温度为某温度并保持恒定时的自由波长,  $x$  为光纤光栅粘贴中心到梁的自由端的距离,  $h$  为梁的厚度,  $L$  为梁的长度. 悬臂梁自由端的位移  $\Delta h$  可认为是通过传递压力元件在外压力作用下发生向内弯曲引起顶杆自由端位移传递而获得, 于是有

$$\Delta h = K_2 P \quad (2)$$

式中, 比例系数  $K_2 = \frac{6\lambda_0 h D R^2 (1-p_e)(L-a)(2-\mu)}{E L^3 (R^2 - 1)}$ ,

\* 陕西省自然科学基金(2000C34)和陕西省工业攻关项目(2001K06-G20), 长安大学校基金资助

Tel: 029-87758038 Email: hzx1965@163.com

收稿日期: 2006-04-02

其中  $E$  为传递压力元件的弹性模量,  $\mu$  为传递压力元件的泊松系数, 因此  $R^2$  是传递压力元件内外径之比, 为一常量,  $D$  为传递压力元件的内径,  $a$  为光栅粘贴位置到梁的固定端的距离, 可见传递压力元件自由端位移与所测压力成线性关系. 综合式(1)、(2)可得

$$\lambda = K_1 K_2 P + \lambda_0 \quad (3)$$

令  $K = K_1 K_2$ , 则式(3)可写成

$$\lambda = KP + \lambda_0 \quad (4)$$

由式(3)或式(4)表明: 系统灵敏度系数等于悬臂梁自由端位移调谐光纤光栅布拉格波长的灵敏度系数与传递压力元件内液体或气体的压力调谐其自由端位移灵敏度系数的乘积, 可见, 通过调整传感系统中与  $K_1$  和  $K_2$  有关的参量, 可实现传感系统较大幅度的增敏.

## 1.2 迟滞效应的影响

取悬臂梁长度为 30 mm, 将光纤光栅粘接于悬臂梁的下表面, 得出如图 2 的加压和减压过程的压力调谐单光纤光栅布拉格波长关系的实验曲线. 实验结果发现, 加压和减压过程中压力调谐光纤光栅布拉格波长的不可逆过程明显表现出来, 加压和减压到同一压力时, 布拉格波长不是单值, 而是出现了  $\lambda'$  和  $\lambda''$  两个值. 另由实验规律看出: 减压相对于加压时的布拉格波长偏移总是呈现滞后状态, 这就导致传感器在测量过程中的重复性、稳定性及线性变坏, 使测量误差增大.

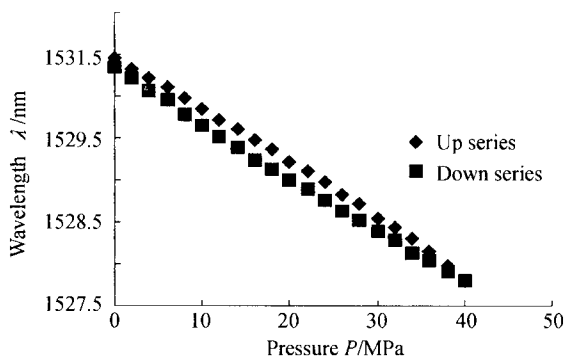


图 2 单光纤光栅粘接于梁的下表面时反射波长  $\lambda$  随压力  $P$  的变化关系

Fig. 2 Variation of reflective wavelength  $\lambda$  with pressure  $P$  as the single fiber grating is adhered to the down surface of cantilever beam

这种弹性迟滞效应虽然是通过光纤光栅布拉格波长变化反映出来的, 但它并非是熔融石英光纤材料自身表现出来的, 因为石英光纤材料的这种塑性形变是很小的<sup>[5]</sup>, 它也并非是光栅粘贴质量所致. 显然, 这种迟滞效应主要是悬臂梁和压力传递元件两种材料所固有的. 实验还表明, 光纤光栅无论粘贴于悬臂梁的上表面还是下表面, 在同一压力下, 弹性迟

滞等量存在. 因此, 要使此结构得到高灵敏度输出, 就必须设法消除这种迟滞效应带来的影响, 它是设计和研发一切基于弹性衬底实现高灵敏度的光纤光栅压力传感器所必须考虑的课题.

## 2 弹性迟滞补偿

为了消除这种迟滞效应的影响, 本文采用了在悬臂梁的上下表面同时粘贴两只光纤光栅, 并熔接相串联, 利用压力调谐双光栅产生双布拉格波长差进行检测. 加压时, 上表面粘贴的光纤光栅布拉格波长  $\lambda_1$  向长波方向偏移, 而下表面粘贴的光纤光栅布拉格波长  $\lambda_2$  向短波方向偏移. 对于同一压力  $P$  来说,  $\lambda_1$  的对应值为  $\lambda_1'$ ,  $\lambda_2$  的对应值为  $\lambda_2'$ , 减压时,  $\lambda_1$  沿短波方向偏移, 而  $\lambda_2$  则沿长波方向偏移. 同样, 对于同一压力  $P$  来说,  $\lambda_1$  的对应值为  $\lambda_1''$ ,  $\lambda_2$  的对应值为  $\lambda_2''$ , 且  $\lambda_1''$  和  $\lambda_2''$  相对于同一  $P$  值其对应波长值  $\lambda_1'$  和  $\lambda_2'$  均为偏大. 考虑迟滞效应带来的非线性影响, 引入灵敏度系数  $\xi = \frac{d\omega}{dp}$ , 它为非常系数, 并设定加压和减压过程的微塑性形变量分别为  $\xi^*(p, t)P$  和  $\xi^{**}(p, t)P$ , 它们引起双 FBG 波长在加压和减压过程的附加漂移量分别为  $\Delta^* \lambda_\xi$  和  $\Delta^{**} \lambda_\xi$ , 尽管它们与待测压力的微塑性形变量  $\xi^*(p, t)P$  和  $\xi^{**}(p, t)P$  的非线性关系尚不清楚, 但通过检测波长差就可消除这种迟滞效应带来的非线性影响. 从式(4)出发, 并考虑迟滞效应, 加压和减压过程中, FBG 波长漂移与压力  $P$  的变化关系分别表示为

$$\lambda_1' + \Delta^* \lambda_\xi = (K + \xi^*(p, t))P + \lambda_{10} \quad (6)$$

$$\lambda_2' + \Delta^* \lambda_\xi = (-K + \xi^*(p, t))P + \lambda_{20} \quad (7)$$

$$\lambda_1'' + \Delta^{**} \lambda_\xi = (-K + \xi^{**}(p, t))P + \lambda_{10} \quad (8)$$

$$\lambda_2'' + \Delta^{**} \lambda_\xi = (K + \xi^{**}(p, t))P + \lambda_{20} \quad (9)$$

式(7)和式(8)中的负号表示直线斜率为负. 式(6)减式(7)和式(8)减式(9)得

$$\Delta\lambda_{12} = \lambda_1' - \lambda_2' = 2KP + (\lambda_{10} - \lambda_{20}) \quad (10)$$

$$\Delta\lambda_{12} = |\lambda_1'' - \lambda_2''| = 2KP + (\lambda_{10} - \lambda_{20}) \quad (11)$$

由式(10)和(11)得

$$\Delta\lambda_{12} = \Delta\lambda_{12}' \quad (12)$$

式(12)说明, 利用待测压力调谐双 FBG 波长之差, 无论调谐灵敏度多高, 在加压和减压过程中, 压力调谐 FBG 波长变化的迟滞效应都不会对测量的重复性带来影响. 这就从本质上补偿了迟滞效应的影响.

## 3 实验结果及分析

在同一光纤纤芯上的两个不同位置处分别写有两个相同布拉格波长的光纤光栅, 分别记为 FBG1 和 FBG2, 将它们用 353D 型高温固化胶粘贴于悬臂

梁的上表面和下表面,粘贴时使光栅轴线严格保持在沿梁长方向中心线上,并保持光栅在上下表面严格对称,如图 1. 悬臂梁材料采用超弹性钛镍合金,梁的一端刚性固定于传递压力元件左侧中心处,悬臂梁自由端与传递压力元件的中点通过连杆相连,梁的位移受传递压力元件向内弯曲来调控. 传递压力元件材料采用磷青铜,将其置于油压罐,压力由 2.5 级、其分度值为 0.01 MPa、量程为 60 MPa 的标准压力表进行检测,测试结果如图 3,FBG<sub>1</sub> 和 FBG<sub>2</sub> 的布拉格波长变化及其波长差由 Agilent 86142B 型光纤光谱仪测量. 当压力由零增至 40 MPa 时,梁的自由端向下逐渐弯曲,FBG<sub>1</sub> 沿其轴向逐渐被拉伸,其反射波长  $\lambda_1$  沿长波方向偏移,与此同时,FBG<sub>2</sub> 沿其轴向被逐渐压缩,其反射波长  $\lambda_2$  沿短波方向偏移,波长差  $\Delta\lambda$  由零展宽至 5.12 nm. 当压力由 40 MPa 减至零时,FBG<sub>1</sub> 反射波长  $\lambda_1$  反向沿短波方向偏移. 与此同时,FBG<sub>2</sub> 反射波长  $\lambda_2$  反向沿长波方向偏移,波长差  $\Delta\lambda'$  由 5.12 nm 收缩至零,压力调谐双布喇格波长差的灵敏度可提高到 0.128 nm/

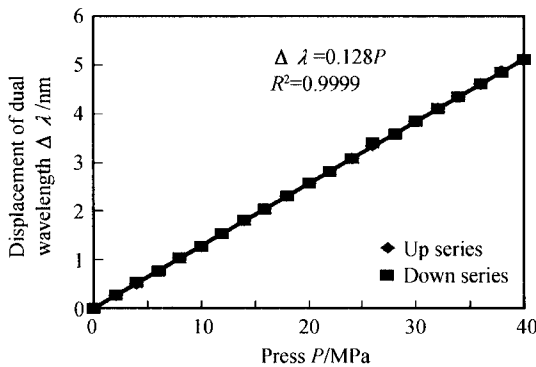


图 3 双光栅在加压和减压时反射波长差  $\Delta\lambda$  与压力  $P$  的关系

Fig. 3 Reflective wavelength disparity  $\Delta\lambda$  versus pressure  $P$  when the dual grating is pressured and decompressed

MPa,且在加压和减压全过程所测得压力与双光纤光栅布拉格波长差的关系曲线完全重合,几乎呈现出波长差  $\Delta\lambda$  随压力  $P$  变化过程的可逆性,迟滞效应影响被消除.

## 4 结论

采用双光纤光栅并利用压力调谐双光栅双布拉格波长差的方法,有效地补偿了加载和卸载过程应变的迟滞效应,因而获取了压力调谐双光纤光栅双布拉格波长差的良好线性度和高的灵敏度,这种方法大大改善和提高了传感系统的重复性和准确度,提高了基于弹性元件作为弹性衬底的光纤光栅压力传感器的可靠性.

## 参考文献

- 1 Kersey A D, Davis M A. Fiber grating sensors. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, **15**(8):1442~1463
- 2 詹亚歌,蔡海文,耿建新,等. 吕槽封装光纤光栅传感器的增敏特性研究. *光子学报*, 2004, **33**(8):952~955  
Zhan Y G, Cai H W, Geng J X, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8):952~955
- 3 胡志新,朱军,张陵. 新型高准确度光纤光栅压力传感系统. *光子学报*, 2006, **35**(5):709~711  
Hu Z X, Zhu J, Zhang L. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(5):709~711
- 4 孙安,乔学光,贾振安. 耐高压光纤 Bragg 光栅压力传感技术研究. *光子学报*, 2004, **33**(7):823~825  
Sun A, Qiao X G, Jia Z A. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(7):823~825
- 5 李科杰. 新编传感器技术手册. 北京:国防工业出版社, 2002. 59~154  
Li K J. *New Handbook of Sensors Technology*. Beijing: National Defence Industry Publishing Company, 2002. 59~154

## A Method to Eliminating the Stress Delay from Fiber Grating Pressure Sensors

Hu Zhixin<sup>1,2</sup>, Zhu Jun<sup>2</sup>, Zhang Ling<sup>1</sup>, Wang Hongliang<sup>3</sup>

<sup>1</sup> School of Aerospace, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049

<sup>2</sup> Construction Machinery School, Chang'an University, Xi'an 710061

<sup>3</sup> College of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065

Received date: 2006-04-02

**Abstract** A method to eliminating the stress delay from fiber grating pressure sensors by means of dual fiber grating is proposed. The tuning for Bragg wavelength disparity of the dual grating can be realized in the case of the effect of external pressure by a method that symmetrically adheres two FBGs with the same wavelength respectively to the upper and down surfaces of the cantilever beam and links them up in series. The result of the research shows that the technology can eliminate the stress delay of the fiber-grating pressure sensor caused by the elastic material of the devices, and improve the linear response characteristic and repeatability. Under the condition of the pressure range of 0~40 MPa, the tuning range of the system dual-peak wavelength disparity is 5.12 nm (two times of the range of single-peak wavelength tuning) and the sensitivity of dual-peak wavelength disparity in pressure tuning can reach the high degree of 0.128 nm / MPa (also two times of the single-peak one).

**Keywords** Fiber optics; Fiber grating; Pressure sensing; Elimination of stress delay



**Hu Zhixing** received his Master's degree in March, 1995 from Nanjing University of Science & Technology, China, and now he is studying for a doctorate at Xi'an Jiaotong University and working as a teacher in Chang'an University, China. His research interests are some testing and fiber sensing technology.