

# 一种基于光纤光栅的应力传感器研究\*

李健苹

(重庆广播电视大学, 重庆 400052)

**摘要:**通过将光纤光栅固定在悬臂梁的上下表面,提出一种基于光栅的应力传感器,这种传感器首次提出将光栅通过预紧的方式将其两端粘贴在悬臂梁上,可以有效遏制因光栅应变不均而产生的反射峰啁啾变化,同时能提供温度补偿。通过实验证明了这种传感光栅反射峰的波长变化随应力的增加呈良好线性关系。增加了反射峰之间的距离变化,可达 0.65 nm。同时分辨力也有所提高,达到满量程的 1%。

**关键词:**光纤光栅; 应力; 悬臂梁

**中图分类号:**TP212.9

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-6693(2016)04-0123-05

光纤传感器以其耐腐蚀、抗电磁干扰、电绝缘性好、高灵敏度和可分布式测量等优点逐渐受到许多应用场合的青睐。在煤矿、油井、气田、滑坡监测等场合应用光纤传感器更能发挥其独特的功能<sup>[1-5]</sup>。力值测量是这些场合常见的检测项目,因此设计一种高精度的光纤力学传感器有着巨大的应用前景。

光纤光栅是利用光纤材料的光敏性,在纤芯内形成空间相位光栅,其作用的实质是在纤芯内形成一个窄带的滤光器或反射镜,入射光经过光纤光栅时,满足光纤光栅布拉格条件的光波将会被反射,其它光会被透射。光纤光栅具有类似应变片的作用,具有很高的灵敏度。在上述一些需要防爆式力学传感器的特殊场合,用光纤光栅制作应力传感器将被测参数转化成光栅应力进行测量具有重要的研究价值。前期对于光栅应力传感器的研究主要体现在利用增加参考光纤进行温度补偿<sup>[6]</sup>、增大光纤光栅周期以提高灵敏度<sup>[7]</sup>等方面,对于光栅粘贴于悬臂梁<sup>[8]</sup>之类的弹性体时其应变分布不均匀研究不够充分,即光栅直接粘贴于悬臂梁类弹性体因弹性体的应变不呈均匀分布,从而导致光纤光栅的应变分布不均匀,反射波长产生啁啾效应<sup>[9]</sup>,即反射峰中心波长会出现上下摆动状况。因此,如何设计弹性体的结构尺寸以及将均匀光纤光栅与弹性体以何种方式结合成为制作光栅应力传感器的关键,本文中设计了一种基于均匀光纤光栅具有高分辨率、温度补偿功能、良好线性功能的应力传感器。通过实验验证了这种应力传感器能够提高分辨率,光栅反射峰不受温度影响,波长基本无啁啾变化的结论。

## 1 实验原理

光纤光栅的布拉格波长可表示如下:

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

式中, $\lambda_B$  为布拉格波长, $\Lambda$  为光栅条纹周期, $n_{eff}$  为光纤有效折射率。

当光纤光栅受到轴向应力或者温度变化影响时,光纤光栅的几何尺寸将发生变化,引起有效折射率和光栅周期常数的变化,进而改变布拉格波长<sup>[10]</sup>:

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = (1-P_e)\Delta\epsilon + [\zeta + (1-P_e)a_{sub}]\Delta T \quad (2)$$

式中, $P_e$  为光纤光栅弹光系数, $\Delta\epsilon$  为应变变化, $\zeta$  为光纤材料热光系数比, $a_{sub}$  为光纤光栅附着的基体材料的热膨胀系数, $\Delta T$  为温度变化。

实验选取正六面体均质悬臂,其结构如图 1 所示。

根据材料力学原理<sup>[11]</sup>,梁 ABCD 受力 F 作用后,若  $l > 5h$ ,则该梁可等效为受横力作用,其受力后变形如 AB'CD'所示,弹性变形阶段,中性面 EE'长度保持 l 不变。AB'增大,CD'减小。中性面应变为零,上表面受拉,

\* 收稿日期:2016-01-09 网络出版时间:2016-07-07 16:33

作者简介:李健苹,女,副教授,研究方向为计算机应用,E-mail: 1165055283@qq.com

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20160707.1633.032.html>

下表面受压,其上下表面应力绝对值  $\sigma$  为:

$$\sigma = Mh / 2I, \tag{3}$$

式中,  $M$  为梁截面的弯矩,  $h$  为梁高,  $I$  为截面惯性矩。

若在上下表面粘贴光栅,则由于上部受拉,下部受压,上下两表面光栅的波长将会朝长短波长移动。若采用两根结构相近、温度灵敏度系数相同的光纤光栅,则其不受外加应力作用时反射波长分别为  $\lambda_{B1}, \lambda_{B2}$ , 则两波长值接近, 将其通过预加内应力的方式分别粘贴在上下表面, 两粘结点之间的悬臂梁产生内应力, 粘结点应力差带动光栅产生应变, 上表面光栅受拉, 其内应力继续增大, 波长向长波长方向移动, 下表面受压, 其内应力减小, 波长向短波长方向移动, 悬臂梁上下表面光纤光栅具体安装如图 2 所示。

根据几何关系可知道, 光栅受到的轴向应力为  $\sigma \cos \frac{\theta}{2}$ , 光栅应变为  $\frac{\sigma \cos \frac{\theta}{2}}{E}$ ,  $E$  为光栅的弹性模量。选用铝合金材料,  $\theta$  虽然与  $F$  的大小有关, 设

计在弹性变形范围内, 其  $\theta$  值不超过  $2^\circ$ , 则将  $\cos \frac{\theta}{2}$  近似为 1 的误差不超过  $\frac{1}{1000}$ 。设梁的宽度为  $b$ , 则  $M = Fl, I = \frac{bh^3}{12}$ , 故在上表面  $AB'$  粘贴光纤光栅后结合(2)、(3)式感受应变得到波长变化为:

$$\Delta\lambda_{B1} / \lambda_{B1} = 6(1 - P_e)Fl \cos \frac{\theta}{2} / (Eb h^2) + [\zeta + (1 - P_e)a_{sub}] \Delta T. \tag{4}$$

下表面  $CD'$  粘贴光纤光栅后:

$$\Delta\lambda_{B2} / \lambda_{B2} = -6(1 - P_e)Fl \cos \frac{\theta}{2} / (Eb h^2) + [\zeta + (1 - P_e)a_{sub}] \Delta T, \tag{5}$$

令  $C_1 = 6(1 - P_e)l \cos \frac{\theta}{2} / (Eb h^2), C_2 = [\zeta + (1 - P_e)a_{sub}]$ 。

由此可见, 当梁的几何尺寸及材料构成固定时, 布拉格反射波长变化只与外界作用力和温度变化有关。两布拉格波长变化之差  $\Delta\lambda$  为:

$$\Delta\lambda = \Delta\lambda_{B1} - \Delta\lambda_{B2} = C_1 F (\lambda_{B1} + \lambda_{B2}) + C_2 \Delta T (\Delta\lambda_{B1} - \Delta\lambda_{B2}), \tag{6}$$

即

$$\Delta\lambda / (\lambda_{B1} + \lambda_{B2}) = C_1 F + C_2 \Delta T (\lambda_{B1} - \lambda_{B2}) / (\lambda_{B1} + \lambda_{B2}). \tag{7}$$

由(7)式可以看出, 因光栅反射波长接近, 可选择差值在 1 nm 内的两光栅构成光栅偶,  $\lambda_{B1} - \lambda_{B2} \ll \lambda_{B1} + \lambda_{B2}$ , 对 1 550 nm 左右的光栅而言, 则  $(\lambda_{B1} - \lambda_{B2}) / (\lambda_{B1} + \lambda_{B2}) \approx 1 / 3000 \approx 0$ , 所以光纤光栅反射中心波长变化只与外界作用力成正比, 几乎与温度无关。

光纤光栅粘贴于悬臂梁的上下表面, 其特征在于并不直接将整段光栅粘贴于悬臂梁上下表面, 而是将光栅利用预紧(即预先使光栅产生一定的内应力)的方式使其两端固定在悬臂梁上下表面, 施加一定的内应力可以防止光栅松动对初始力不敏感, 光纤光栅传感段是悬空的, 不与悬臂梁接触, 这种方式可以有效遏制悬臂梁应变不均匀而带来布拉格反射波长的啁啾效应。由图 2 还可以看出, 对悬臂梁上下表面进行开槽, 这样可以避免悬臂梁在受力变形后光纤光栅直接与悬臂梁接触, 产生摩擦或者弯曲等影响光纤光栅的准直度。悬臂梁采取中间开挖孔洞的方式以减小横截面的惯性矩, 从而增大悬臂梁中间段的挠度, 增大光纤光栅的应力, 提高传感器的灵敏性。悬臂梁中间开挖孔洞同时也有利于增大传感器的使用体积, 否则因悬臂梁采用铝合金材料其弹性模量较大, 必须减小悬臂梁的高度或宽度在同等受力条件下才能增加传感器的灵敏性, 但体积减小以后不利于实际应

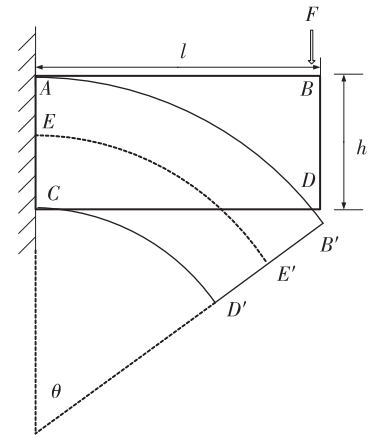
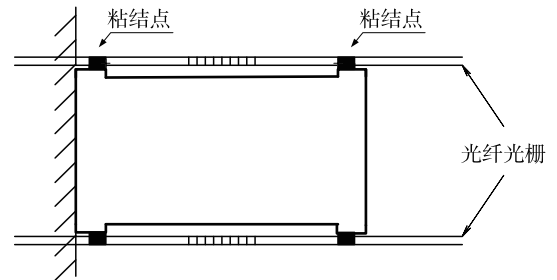
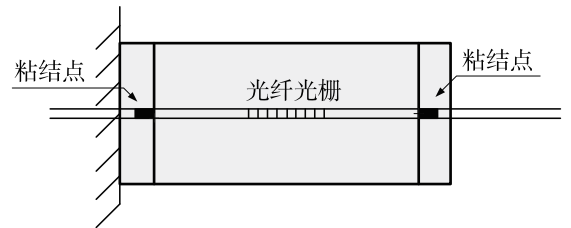


图 1 悬臂梁受力变形

Fig.1 Deformation of forced cantilever beam



a 侧视图



b 俯视图

图 2 悬臂梁传感器结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of cantilever sensor structure

用的安装,如锚固螺钉等。开挖孔洞还有利于提高悬臂梁的抗偏载性能。因此在悬臂梁中间开挖孔洞能够有效地将灵敏性与实用性良好结合。当悬臂梁右端受到向下的力作用时,悬臂梁上部拉伸从而带动光栅使其内应力增加,则反射波长向长波长方向移动,悬臂梁下部受到压缩则光栅预紧的内应力会减小,从而使光栅反射波长向短波长方向移动。(6)式从两光纤光栅平衡状态下得出,对于预紧的光纤光栅,其预紧内应力可以等效为受到悬臂梁端施加的外力的作用,则(4)式可等效为受力  $F_1$  作用:

$$\Delta\lambda_{B1}/\lambda_{B1} = C_1(F + F_1) + C_2\Delta T. \tag{8}$$

(5)式等效为受力  $F_2$  作用:

$$\Delta\lambda_{B2}/\lambda_{B2} = -C_1(F + F_2) + C_2\Delta T. \tag{9}$$

(6)式则可以表示成:

$$\Delta\lambda \approx C_1 F(\lambda_{B1} + \lambda_{B2}) + C_1(\lambda_{B1} F_1 + \lambda_{B2} F_2). \tag{10}$$

(9)式的后一项在光栅预紧粘贴之后变成常数,可以当作初始值进行归零处理。所以同样可以得出当温度变化时,两光栅变化量相同,从而可以实现温度补偿效果,两光栅的波长变化差值与外界作用力  $F$  成正比。

## 2 实验结果

实验选用北京长城计量测试技术研究所研制的反射中心波长为 1 532 nm 的光纤光栅,其反射半高宽度仅为 0.2 nm,其 3 dB 分辨率带宽为 0.08 nm。实验中采取将上表面光栅预紧至反射中心波长 1 532.647 nm,下表面光栅预紧至反射中心波长 1 532.819 nm。用 AB 胶将预紧的光纤按图 2 固定在悬臂梁上下表面,随着载荷的增加,上表面光栅反射中心波长往长波长方向移动,下表面反射中心波长往短波长方向移动。悬臂梁的长为 50 mm、高为 15 mm、宽为 20 mm,中间开挖 10 mm 和 5 mm 的孔洞,其承受极限载荷约为 5 000 g。激光器采用中心波长 1 550 nm 蝶形封装 SLED 光源,其 3 dB 带宽大于 60 nm,其长期稳定度小于  $-0.02$  dB/8 h。光谱仪核心部件选用美国 Bayspec 公司生产的 FBGA,其波长分辨率为 0.001 nm。实验测量原理如图 3 所示。

对悬臂梁应力传感器重复测量 3 次取平均值结果如表 1 所示。

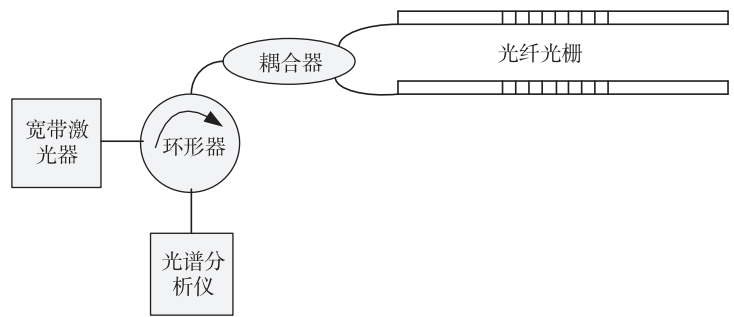


图 3 光栅传感器测量示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of grating sensor

表 1 两光栅反射峰随载荷变化数据

Tab. 1 The ratio data of the reflection peak and the load

施加载荷/g	上表面光栅反射波长/nm	波长增加量/nm	下表面光栅反射波长/nm	波长减小量/nm	波长改变量之差/nm
0	1 532.647	0.000	1 532.819	0.000	0.000
50	1 532.652	0.005	1 532.813	-0.006	0.011
100	1 532.658	0.011	1 532.807	-0.012	0.023
500	1 532.704	0.057	1 532.763	-0.056	0.113
1 000	1 532.757	0.110	1 532.705	-0.114	0.224
1 500	1 532.818	0.171	1 532.651	-0.168	0.339
2 000	1 532.868	0.221	1 532.599	-0.220	0.441
2 500	1 532.927	0.280	1 532.542	-0.277	0.557
3 000	1 532.981	0.334	1 532.498	-0.321	0.655

实验中,由于光谱分析仪的分辨率为 0.001 nm,其重复性约为 0.002 nm,因此可以认为波长变化大于 0.002 nm 则可以分辨出最小载荷量。当载荷加至 20 g 时,单根光纤的波长变化约为 0.002 nm,此时不能明显从光谱仪上读出数据,而两根光栅波长变化差为 0.004 nm 则可以很好地从光谱仪上分辨出,因此可以认为此应力传感器的分辨力为 20 g。可见两根光栅粘贴于上下表面的设置提高了传感器的分辨率。由表 1 可以看出,其

上下表面光栅反射波长变化量基本相等,当载荷达到 3 000 g 时,单根波长变化量达到 0.3 nm。两光栅波长变化差值达到 0.6 nm,其分度数达到 150,较之前报道的传感器分度数有所提高。做出数据线性回归直线如图 4 所示。

通过图 4 可以看出直接通过最小二乘法拟合荷载与波长的变化成良好的线性关系,相关系数达到 0.999 7。进一步运用 1 000 g, 2 000 g, 3 000 g 三点插值计算方法对数据做线性校准,可使其最大当量误差为 2.6%。一般工作测力仪的精度为 2 级,即当量误差为 2%,这表明该传感器接近实用水平。

将传感器放入 30 °C 环境中,其上表面光纤光栅波长移动至 1 532.774 nm,改变量为 0.127 nm,下表面移动至 1 532.943 nm,其改变量为 0.124 nm。可见上下表面光栅温度变动引起的波长改变量基本相同,其不完全一致的主要原因除与测量误差有关外还与两光栅自身结构不完全相等有关系。

综合考虑实验,由于悬臂梁的制作工艺、光纤光栅的粘贴水平和仪器误差等原因,传感器的线性水平还有待于进一步提高。实验中重复性、稳定性都能达到 2% 以内,测量范围为 0.65 nm,较之前报道的 0.2 nm 测量范围提高了近 3 倍,而实际光纤光栅在弹性变化范围内受拉力作用其波长变化可达 4 nm,所以在生产加工中可以将光纤光栅施加一定拉力使其波长变化 1 nm 后固定在支架上面,待将光栅粘贴好后再去除支架。这样可以不仅有利于提高测量范围扩大至 3 nm,还有利于保证光栅预紧的状态。同时通过工艺的改善还可以增加传感器的灵敏度。通过改变悬臂梁结构的优化设计还可以进一步提高传感器的分辨率,进一步通过选取不同的材质和设计不同的悬臂梁结构进行传感器响应灵敏度的优化,最终达到光纤光栅应力传感器商品化的效果。

### 3 结语

本实验通过将光纤光栅巧妙地用预紧内应力方式把光栅两端固定在悬臂梁上下表面,实现了温度补偿的应力测量,同时可以遏制光栅的啁啾变化。实验装置简单,分辨率 0.004 nm 和测量范围 0.65 nm 都能够比单根光栅作用时提高一倍,线性好,其分度数可达到 150。克服了传统光纤应力传感器只具有单一温度补偿或者不能克服啁啾变化的缺点,通过实验验证了该传感器结构的可行性。该实验作为定性实验从测试结果出发验证了理论推导的温度补偿和增大测量范围特点,为光纤光栅应力传感器的实用化提供了进一步的参考作用。

### 参考文献:

- [1] 林枫,蔡海文,夏志平,等. 光纤光栅滤波的瓦斯传感系统的研究[J]. 中国激光,2005,32(4):549-552.  
Lin F, Cai H W, Xia Z P, et al. Study on Fiber methane sensings system using FBG filters[J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(4): 549-552.
- [2] Butov O V, Golant K M, Grifer V I, et al. Versatile in-fiber Bragg grating pressure sensor for oil and gas industry[EB/OL]. [2015-12-20]. [https://www.researchgate.net/publication/236009523\\_Versatile\\_in-fiber\\_Bragg\\_grating\\_pressure\\_sensor\\_for\\_oil\\_and\\_gas\\_industry\\_Presentaion\\_at\\_OFS-18\\_Cancun\\_2006](https://www.researchgate.net/publication/236009523_Versatile_in-fiber_Bragg_grating_pressure_sensor_for_oil_and_gas_industry_Presentaion_at_OFS-18_Cancun_2006).
- [3] 陈文建,迟泽英,李武森. 天然气水合物相变测试用光纤传感器[J]. 光子学报,2005,34(12):1814-1817.  
Chen W J, Chi Z Y, Li W S. Optical Fiber sensor for the measurement of marine natural gas hydrates phase change [J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(12): 1814-1817.
- [4] 刘邦,朱正伟,刘京诚. 光纤传感技术在山体滑坡的应用[J]. 压电与声光,2012,34(1):27-32.  
Liu B, Zhu Z W, Liu J C. Application of optical Fiber sensing technology to landslides[J]. Piezo Electric & Acousto-optics, 2012, 34(1): 27-32.
- [5] Zhu Z W, Liu D Y, Yuan Q Y, et al. A novel distributed optic Fiber transducer for landslides monitoring[J]. Opt Laser Eng, 2011, 49: 1019-1024.
- [6] 范文龙,董新永,董孝义. 温度补偿的悬臂梁光纤光栅力传感研究[J]. 光子学报,2001,30(11):1385-1387.  
Fan W L, Dong X Y, Dong X Y. Temperature-compensated tension sensor with Fiber grating[J]. Acta Photonica Sinica, 2001, 30(11): 1385-1387.
- [7] 张志荣,张冠茂,张晓萍. 长周期光纤光栅应变和温度传感灵敏度研究[J]. 光子学报,2009,38(1):103-106.  
Zhang Z R, Zhang G M, Zhang X P. Strain and temperature

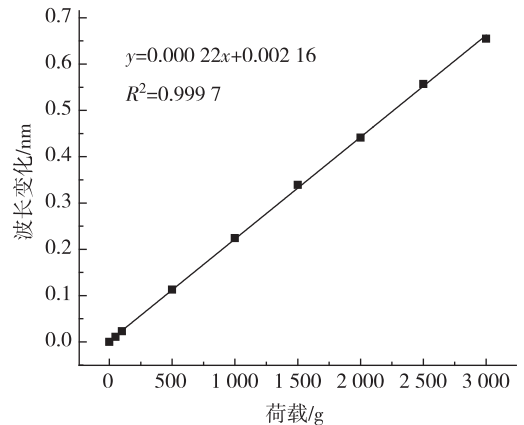


图 4 反射峰波长随载荷变化关系

Fig. 4 The relationship between reflection peak wavelength with load change

- sensitivities of long period Fiber grating[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(1):103-106.
- [8] 刘钦朋, 乔学光, 贾振安, 等. 双悬臂梁光纤 Bragg 光栅应力传感器[J]. 光子学报, 2007, 36(9):1645-1647.
- Liu Q P, Qiao X G, Jia Z A, et al. FBG sensor for stress based on double cantilever beam[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(9):1645-1647.
- [9] 余有龙, 刘志国, 关柏鸥, 等. 利用悬臂梁将均匀周期光纤光栅变为啁啾光纤光栅[J]. 中国激光, 1999, 26(10):912-916.
- Yu Y L, Liu Z G, Guan B O, et al. Transforming a uniform Fiber grating into a chirped one using a cantilever beam [J]. Chinese Journal of Lasers, 1999, 26(10):912-916.
- [10] 刘云启, 郭转运, 刘志国, 等. 光纤光栅传感测量中的交叉敏感机制及其解决方案[J]. 光电子激光, 1999, 10(2):179-182.
- Liu Y Q, Guo Z Y, Liu Z G, et al. The mechanism and solutions of cross-sensitivity of Fiber grating sensor measurements[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 1999, 10(2):179-182.
- [11] 刘鸿文. 材料力学 I[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- Liu H W. Mechanics of materials I[M]. Beijing: Higher Education Press, 2011.

## A Stress Sensor Based on Fiber Bragg Grating

LI Jianping

(Chongqing Radio & TV University, Chongqing 400052, China)

**Abstract:** The Fiber Bragg grating is fixed on the upper and lower surface of the cantilever. A kind of stress sensor based on Fiber Bragg grating is proposed. For the first time, the advance tensioning Gratings are pasted on the cantilever beam by both ends. The sensor can effectively curb the chirp of reflecting peak due to the different strain distribution in grating, at the same time can provide temperature compensation. The experiment proves that the fiber Bragg grating sensor reflecting peak wavelength is relative to the stress as good linearity. The distance between two reflect in peaks is increased to 0.65 nm. Resolution is improved at the same time. It is one percent of full scale.

**Key words:** Fiber Bragg grating; stress; cantilever

(责任编辑 游中胜)