

FBG 传感对应变,温度及湿度的同时测量

郭 婷,惠小强

(西安邮电大学 理学院,陕西 西安 710121)

摘 要:为更好地解决交叉敏感这一光纤光栅应用中的瓶颈问题,该文从光纤布喇格光栅(FBG)的传感理论出发,分析了光纤光栅在同时测量应变、温度及湿度时交叉敏感的物理机制。通过给光纤光栅外层镀湿敏材料和温敏材料,推广了双光栅法解决交叉敏感的思路,采用三光栅法实现同时对应变、温度及湿度的测量,并设计了相应的解调方案。通过控制步进电机对基于悬臂梁的匹配光栅施加压力或拉力,从而与传感光栅进行匹配,能对传感光栅的波长漂移量进行高精度的测量。

关键词:光纤光学;光纤布喇格光栅(FBG);交叉敏感;三参量测量;湿敏材料

中图分类号: O439

文献标识码: A

The Simultaneous Measurement of Strain, Temperature and Humidity by FBG Sensors

GUO Ting, XI Xiaoqiang

(School of Science, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: The cross-sensitivity is a bottleneck for fiber grating sensor applications. Based on the sensing theory of fiber Bragg gratings, the physical mechanism of the cross-sensitivity in the simultaneous measurement of strain, temperature and humidity is analyzed. The thinking of double-grating method for solving the problem of cross-sensitivity has been expanded by coating the humidity-sensitive material and temperature-sensitive material on the out-layer of fiber grating. The simultaneous measurement of strain, temperature and humidity has been realized by using the three-grating method and the relevant de-modulating scheme has been proposed. The high-precision measurement of the wavelength shift of sensing grating can be realized by applying pressure and pull on the cantilever-based match grating to match with the sensing fiber Bragg grating.

Key words: fiber optics; fiber Bragg gratings(FBG); cross-sensitivity; the measurement of three parameters; humidity-sensitive material

0 引言

光纤布喇格光栅(FBG)传感器^[1]是一种无源传感器件,其对应变和温度是同时敏感的,故通过直接测量其耦合波长的移动无法区分是应变还是温度所引起的波长漂移,这种交叉敏感^[2]问题严重制约着光纤光栅在传感领域的应用。

目前,解决交叉敏感的主要方法有双波长矩阵法、双参量矩阵算法、温度参考光栅法及温度补偿封装法^[3]等,而这些方法的实质最终都归结为双波长矩阵法。目前的湿度传感器^[4]大多是在其功能材料能发生与湿度有关的物理或化学效应的基础上制造

的,对湿度的光学湿敏检测法^[5]可分为平面光波导法、光纤法及聚合物光学法。本文采用不同包层直径光栅的思路,并运用不同涂覆材料对不同物理量的敏感程度,将双光栅法扩展到了三光栅法,对应变、温度和湿度 3 个物理量同时进行测量,采用匹配光栅的解调方法对采集信号进行解调,设计了完整的对 3 参量同时测量的解调方案,这将为光纤光栅在矿井安全监测中的应用提供理论依据。

1 分析基本原理

光纤光栅^[6]是通过改变纤芯的折射率,产生小的周期性调制而成。由于 FBG 只会对满足其布喇

收稿日期:2012-08-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11174165)

作者简介:郭婷(1987-),女,陕西人,硕士,主要从事光纤传感及通信技术方面的研究。

格条件的波长进行反射,由耦合模理论可知,FBG的特征方程为

$$\lambda_R = 2n_{\text{eff}}\Delta \quad (1)$$

式中: λ_B 为 FBG 的中心波长; n_{eff} 为光纤光栅的有效折射率; Δ 为光纤光栅的周期。

应力、温度的任何扰动都可能引起 n_{eff} 和 Δ 的变化,从而引起 FBG 中心波长的漂移,通过对布喇格波长漂移量的测量,就可得到待测物理量的变化。其中,对式(1)全微分可得布喇格波长的漂移量为

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

由式(2)可知,漂移量与光纤纤芯的 n_{eff} 跟光栅的常数变化有关。当光纤光栅受轴向应力或温度的变化时,光纤光栅的 n_{eff} 和 Δ 都会发生变化,所以 FBG 对应力和温度都是敏感的。其中,应力对波长漂移的影响分为两部分:

- 1) 弹光效应影响光栅的 n_{eff} 。
- 2) 应变影响 Δ 。

温度对波长漂移的影响同样也可分为两部分:

- 1) 热光效应影响 n_{eff} 。
- 2) 热膨胀系数影响 Δ 。

由弹性力学可知,光纤光栅中心波长的漂移 $\Delta\lambda_B$ 随温度和轴向应力的变化可表示为:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \left\{ 1 - \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} [p_{12} - \mu(p_{11} + p_{12})] \right\} \epsilon + \lambda_B (\alpha + \beta) \Delta t \quad (3)$$

其中,两边同时除以 λ_B 得:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left\{ 1 - \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} [p_{12} - \mu(p_{11} + p_{12})] \right\} \epsilon + (\alpha + \beta) \Delta t \quad (4)$$

式中: p_{11}, p_{12} 为材料的弹光系数; μ 为光纤材料的泊松比; α 为热光系数; β 为热膨胀系数; ϵ 为轴向应变; Δt 为温度变化量。

令 $p_e = \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} [p_{12} - \mu(p_{11} + p_{12})]$, 则式(4)可写为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e) \epsilon + (\alpha + \beta) \Delta t \quad (5)$$

由式(5)可看出,当 ϵ 和 Δt 同时发生变化时,FBG 无法区分波长变化由谁引起,变化多大。因此,当测量其中的一个量时,必然会受另一个量的影响。因此,采用直接法不能同时实现温度和应力的测量。由此可见,解决交叉敏感问题是 FBG 传感进行实用化的关键。因为光纤光栅本身对湿度的敏感性较差,故而因湿度变化而导致的波长漂移也会很

小。为此,考虑在光纤光栅的表面涂上一层对湿度敏感^[7]的材料,如碳纤维复合材料。当湿度发生变化时,光纤 λ_R 表面的湿敏材料会膨胀,引起光纤光栅的应变响应。因此,便可把光纤光栅对湿度的传感问题转化成对应变的响应问题。

2 应变、温度和湿度的传感设计

湿敏材料(此处选用聚酰亚胺)的膨胀与湿度及温度有关。因此,FBG₁ 需考虑温度的补偿问题^[8]。湿度所引起的应变 ϵ_M ^[9] 可表示为

$$\epsilon_M = \xi_M C_1 \Delta Y \quad (6)$$

式中 $C_1 = 1 - \frac{E_F r_F^2}{E_F r_F^2 + E_M (r_M^2 - r_F^2)} C_0$, E_M, E_F 分别为湿敏材料与光纤的弹性模量; r_M, r_F 分别为湿敏材料和光纤光栅的半径; C_0 为湿敏材料与光纤的黏结系数; ξ_M 为湿敏材料的湿膨胀系数。

由式(5)可知,温度引起布喇格波长的漂移量为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha_F + \beta_F) \Delta t \quad (7)$$

式中 α_F 和 β_F 分别为 FBG 的热光系数和热膨胀系数。

由于温度的变化还会引起湿敏材料的热膨胀,其热膨胀对光纤光栅应变的影响可表示为

$$\epsilon_T = (\alpha_M - \alpha_F) \Delta t \quad (8)$$

在有温度补偿的情况下,湿度对光纤光栅波长影响^[10]可表示为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = K_M \Delta Y + K_T \Delta t \quad (9)$$

式中: $K_T = (1 - p_e)(\alpha_M - \alpha_F) + \alpha_F + \beta_F$ 为温敏系数; $K_M = (1 - p_e) C_1 \xi_M$ 为湿敏系数。

如图 1 所示,FBG₁ 与 FBG₂ 具有相同纤芯材料及相同包层直径。FBG₃ 与前两者的纤芯材料相同而包层直径不同。FBG₁ 可感受温度、应变及湿度; FBG₂、FBG₃ 均可感应温度、应变^[11]。

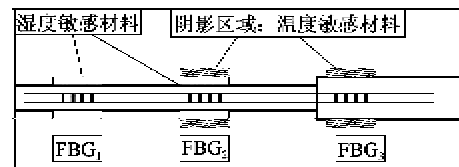


图 1 实验装置示意图

根据式(5)、(9)可得:

$$\frac{\Delta\lambda_{B_2}}{\lambda_{B_2}} = K_{\epsilon_2} \cdot \Delta\epsilon + K_{T_2} \Delta t \quad (10)$$

$$\frac{\Delta\lambda_{B_3}}{\lambda_{B_3}} = K_{\epsilon_3} \cdot \Delta\epsilon + K_{T_3} \Delta t \quad (11)$$

$$\frac{\Delta\lambda_{B_1}}{\lambda_{B_1}} = K_{\epsilon_1} \cdot \Delta\epsilon + K_{T_1} \Delta t + K_{M_1} \cdot \Delta Y \quad (12)$$

因为 FBG₂ 与 FBG₃ 具有相同的纤芯材料,不同的包层直径,应变响应不同,但温度响应相同,即 $K_{T_2} = K_{T_3}$, 由式(7)、(8)可得:

$$\frac{\Delta\lambda_{B_2}}{\lambda_{B_2}} - \frac{\Delta\lambda_{B_3}}{\lambda_{B_3}} = (K_{\epsilon_2} - K_{\epsilon_3}) \cdot \Delta\epsilon \quad (13)$$

当已知 FBG₂ 与 FBG₃ 波长变化的情况下,可求得其应力变化 $\Delta\epsilon$,将 $\Delta\epsilon$ 代入式(8)、(9)中,便可求得温度变化 Δt ,将 $\Delta\epsilon$ 和 Δt 代入式(10)就可求出其湿度变化 ΔY 。

因为 FBG₃ 没有涂湿敏材料,故不用考虑湿度的变化对湿敏材料的影响,只需对 FBG₃ 光纤本身进行温度补偿。由式(5)可知,FBG₃ 的湿敏系数 $K_{T_3} = \alpha + \beta$,应变灵敏系数 $K_{\epsilon_3} = 1 - p_e$ 。

对于 FBG₁、FBG₂,要考虑温度对 FBG 本身及其上涂的湿敏材料的影响,故由式(9)可知,湿敏系数 $K_T = (1 - p_e)(\alpha_M - \alpha_F) + \alpha_T + \epsilon_F$,湿敏系数 $K_M = (1 - p_e)C_{\beta M}$,对于掺锗的石英光纤, $\alpha = 0.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,常温下 $\beta \approx 7.0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,由此算出常温下 $K_T \approx 7.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。当温度变化不大时,一般都认为热光系数 ϵ 是常数,因此,布喇格波长的漂移与温度变化间有较好的线性关系。但实际上 ϵ 是温度的函数。因此,当温度变化范围较大时,应考虑温度的非线性影响。常温下 FBG 的弹光系数 $p_e = 0.22$,故 $K_{\epsilon_3} = 0.78$ 。

由于湿敏膜的厚度直接影响传感器的响应时间及灵敏度,故要综合考虑这 2 个参数与涂层厚度的关系,使其达到最优化。实验证明,湿敏材料聚酰亚胺厚 $21 \mu\text{m}$ 的传感器在灵敏度和响应时间上都表现出了良好的性能^[12]。

3 波长漂移的测量

这里采用匹配光栅滤波法^[13]对上述的光纤光栅的信号进行解调。方案设计如下:

传感元件 FBG₁、FBG₂ 和 FBG₃ 组成传感阵列,解调元件为参数与传感光栅一一对应的参考阵列。其中,3 个匹配光栅均粘贴在悬臂梁上^[14],宽带光源发出的光在经传感光栅阵列后,会形成多波长的反射信号光,通过各等功率耦合器件耦合给匹配光栅。

如图 2 所示,光从宽带光源发出,经过 3 dB 耦

合器进入光纤光栅阵列,满足各传感光栅布喇格条件的光,再经过耦合器进入到匹配光栅,步进电机通过调节悬臂梁自由端,使其波长在一定范围内来回移动,光谱移动范围涵盖了传感光栅的反射谱。当两光纤光栅的波峰重合时,探测器探测的光信号最大,光电转换电压最大,经过放大滤波处理,再经信号采集电路将数据传给单片机。单片机接收到的数据传递给上位机,其通过插值法寻找最大值,根据调谐后光强的变化判断控制步进电机的正或反转,也即控制匹配光栅的拉伸还是压缩。

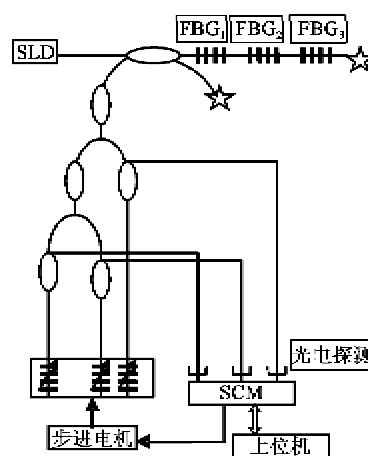


图 2 匹配光栅解调方案设计图

匹配光栅的波长变化量跟悬臂梁的挠度成线性关系,而挠度受步进电机的控制,与步进电机的步数有关,从而可得到步进电机步数与波长的关系。

4 结束语

本文从物理机制上分析了引起交叉敏感的原因,并通过不同包层直径及涂层的方法,给出了能够同时测量应变、温度及湿度 3 个待测量的传感设计。同时,从理论上分析了其可行性,并运用匹配光栅滤波法进行传感解调,给出一套完整的测量方案。但该方案对工艺方面的要求很高,如湿敏材料涂层的厚度,光纤包层的半径及两光纤间如何无损耗的熔接技术。为此,还需要进一步的深入研究。

参考文献:

- [1] 张伟,梁大开,芦吉云,等. 光纤光栅传感系统信号解调技术的研究[J]. 压电与声光,2008,30(6):677-679. ZHANG Wei, LIANG Dakai, LU Jiyun, et al. Research on demodulating technique for fiber grating sensor system[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2008, 30(6): 677-679.
- [2] 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 Yunqi, GUO Zhuanyun, LIU Zhiguo, et al. The mechanism and solutions of cross-sensitivity of fiber grating sensor measurements[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 1999, 10(2): 179-182.
- [3] 武胜军, 王宏力, 张明源. FBG 应变与温度交叉敏感分离方法研究[J]. 传感器与微系统, 2008, 27(3): 27-33.
- WU Shengjun, WANG Hongli, ZHANG Mingyuan. Research on division of cross-sensitivity of strain and temperature of FBG[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2008, 27(3): 27-33.
- [4] 王珍媛, 顾铮天. 光学湿度传感器[J]. 激光与电子学进展, 2007, 11(44): 41-45.
- WANG Zhenyuan, GU Zhengtian. Optical humidity sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2007, 11(44): 41-45.
- [5] 喻小丽, 杨健, 倪彦. 湿度传感器的选用及发展趋势[J]. 自动化技术与应用, 2009, 28(2): 107-110.
- YU Xiaoli, YANG Jian, NI Yan. Applications of the humidity sensor[J]. Techniques of Automation, 2009, 28(2): 107-110.
- [6] 周春新, 曾庆科, 秦子雄, 等. 光纤光栅应变-温度传感器的原理及进展[J]. 激光与电子学进展, 2006, 43(10): 53-58.
- ZHOU Chunxin, ZENG Qingke, QIN Zixiong, et al. Principle and progress of fiber grating strain-temperature sensors[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2006, 43(10): 53-58.
- [7] 李娜, 王国东, 王允建, 等. FBG 温度灵敏及增敏技术的研究进展[J]. 光电技术应用, 2010, 25(6): 31-45.
- LI Na, WANG Guodong, WANG Yunjian, et al. Progress on temperature sensitivity and techniques about sensitivity enhancing of fiber Bragg gratings[J]. Electro-Optic Technology Application, 2010, 25(6): 31-45.
- [8] 毕重颖, 雷飞鹏. 光纤光栅传感检测中交叉敏感问题的研究[J]. 光通信技术, 2010(8): 12-15.
- BI Chongying, LEI Feipeng. Study on cross-sensitivity in fiber gratig sensors and testing[J]. Communication Technology, 2010(8): 12-15.
- [9] 张向东, 李育林, 彭文达, 等. 光纤光栅型温湿度传感器的设计与实现[J]. 光子学报, 2003, 32(10): 1167-1169.
- ZHANG Xiangdong, LI Yulin, PENG Wenda, et al. Design and realization of temperature and relative humidity sensor based on FBG[J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(10): 1167-1169.
- [10] 丁宏伟, 金永君. 光纤布拉格光栅湿度传感器的研究[J]. 科技导报, 2008, 26(22): 54-57.
- DING Hongwei, JIN Yongjun. Study on FBG humidity sensor[J]. Science & Technology Review, 2008, 26(22): 54-57.
- [11] 王宏亮, 张晶, 乔学光, 等. 光纤 Bragg 光栅应变、温度交叉敏感问题的研究[J]. 应用光学, 2008, 5(29): 804-807.
- WANG Hongliang, ZHANG Jing, QIAO Xueguang, et al. Study on strain and temperature cross sensitivity of fiber Bragg grating sensor[J]. J Appl Opt, 2008, 5(29): 804-807.
- [12] 向光华, 忽满利, 乔学光, 等. 基于聚酰亚胺材料的 FBG 湿度传感特性研究[J]. 光电子·激光, 2012, 23(1): 41-45.
- XIANG Guanghua, HU Manli, QIAO Xueguang et al. Study on the characteristics of FBG humidity sensor based on polyimide[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2012, 23(1): 41-45.
- [13] 李丽, 何宏, 林玉池. 压电陶瓷在光纤光栅传感解调中的应用[J]. 压电与声光, 2010, 32(6): 492-495.
- LI Li, HE Hong, LIN Yuchi. The application of piezoelectric ceramic to fiber Bragg grating sensing demodulating[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2010, 32(6): 492-495.
- [14] 禹大宽, 贾振安, 乔学光, 等. 基于靶式和悬臂梁的 FBG 流量/温度同时测量研究[J]. 光电子·激光, 2010, 21(5): 710-713.
- YU Dakuan, JIA Zhen'an, QIAO Xueguang, et al. FBG sensors combining target with cantilever beam for simultaneous measurement of flow-rate/temperature[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2010, 21(5): 710-713.