

长周期光纤光栅温度传感器应变交叉敏感的研究

梁丽丽¹, 刘明生^{1,2}, 李燕³, 李国玉³, 杨康³

(1. 河北工业大学信息工程学院, 天津 300401; 2. 石家庄铁路职业技术学院, 河北 石家庄 050041;
3. 邯郸学院信息技术研究所, 河北 邯郸 056005)

摘要:长周期光纤光栅是透射谱光栅, 纤芯基模与同向各阶包层模发生耦合, 谐振波长和幅值对外界环境的变化非常敏感, 比传统布拉格光纤光栅具有更好的温度、应力、弯曲、扭曲、横向载荷、折射率等的传感特性。由于长周期光纤光栅对两个或者多个参量都是敏感的, 当光纤光栅用于传感测量时, 很难分辨出各个参量分别引起的被测量的变化, 交叉敏感问题比布拉格光纤光栅严重的多。交叉敏感是光纤光栅传感中的关键问题。分析了目前较为典型的解决策略和方案, 在此基础上提出了联系思想和解决方案, 提出并实验验证了一种解决长周期光纤光栅温度传感测量中应力与温度的交叉敏感问题。充分利用了LPFG温度与应变交叉敏感的现象, 利用联系的思想, 将应变对温度的负面干扰转变为正面的增敏。

关键词:长周期光纤光栅(LPFG); 交叉敏感; 解决方案

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)03-1020-04

Solutions of strain and temperature cross-sensitivity of long period fiber grating temperature sensing

Liang Lili¹, Liu Mingsheng^{1,2}, Li Yan³, Li Guoyu³, Yang Kang³

(1. School of Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;
2. Shijiazhuang Railway Vocational and Technical College, Shijiazhuang 050041, China;
3. Institute of Information Technology, Handan College, Handan 056005, China)

Abstract: Long period fiber grating is transmission spectrum grating, which is fiber core basic model coupling with cladding modes, and resonance wavelength and amplitude of long period fiber grating is very sensitive to the change of external environment, long period fiber grating has better sensing properties than traditional FBG in temperature, stress, bending, distortion, lateral load, refractive index, and so on. Because the long period fiber grating was sensitive to two or more parameters, when optical fiber grating for sensing measurement, it was difficult to distinguish the change of the measured caused by the various parameters respectively, and cross-sensitivity problem of long period fiber grating was more serious than that of the fiber Bragg grating. The cross-sensitivity was the key problem of fiber

收稿日期: 2014-07-05; 修订日期: 2014-08-15

基金项目: 国家 863 计划(2013AA014203); 河北省应用基础研究计划重点基础研究项目(13960306D);
邯郸市科学技术研究与发展计划项目(1220103080)

作者简介: 梁丽丽(1986-), 女, 硕士生, 主要从事光纤光栅传感方面的研究。Email: liangli070118@163.com

导师简介: 刘明生(1960-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光纤光栅方面的研究。Email: liums601001@sina.com

grating sensors. Based on analysis of the current typical ideas and solutions, one idea and solution of relation was proposed in this paper, and solves cross-sensitivity between stress and temperature in the long period fiber grating temperature sensing measurement. This idea makes full use of the cross-sensitivity phenomenon of the temperature and strain of LPFG and turns the negative interference of the strain on the temperature to positive sensitization.

Key words: LPFG; cross-sensitivity; solutions

0 引言

长周期光纤光栅(LPFG)传感器作为一种正在蓬勃发展的传感技术,以其抗电磁干扰能力强、耐腐蚀、尺寸小、重量轻、灵敏度高等优点,在土木工程、石油化工、航空航天等领域取得了广泛应用。因此对其目前在理论和应用中所存在的各关键问题的逐步解决必将带来重要的科学意义和经济价值。其中解决交叉敏感问题是光纤光栅传感器得到实用化并且走向大规模生产的重要前提。

1 交叉敏感问题及其解决方案简介

所谓交叉敏感即LPFG对两个或者多个参量都是敏感的,当光纤光栅用于传感测量时,很难分辨出各个参量分别引起的被测量的变化。因此在实际应用必须采取各种措施进行补偿或区分。综合学术界提出的各种解决交叉敏感问题的方法,基本思想大致可以分为三类:区分、去敏、抵消。

(1) 区分

所谓区分是指将各个干扰量能够进行区分的表示。例如典型的方法双光栅法^[1]和双参量法^[2]。另外补偿的方法也是基于此思想,例如不同包层直径组合法^[3]主要是利用具有不同包层直径的两只光纤光栅对于温度和应变的灵敏度系数是不同的原理来实现的。区分的思想可以解决交叉敏感的问题,并且可以实现多参量的同时测量,但是该方法对光栅的要求很高,制作难度大,实用化困难。

(2) 去敏

所谓去敏,就是对于其他一切干扰量进行去敏处理,例如长周期光纤光栅进行液体温度传感,被测量是LPFG透射谱的谐振波长的漂移量,那么对于周围干扰量(压强、浓度、液位、折射率、应力,其他忽略不计)引起的谐振波长的漂移要尽量避免。去敏策略

的实现方法主要为利用特种光纤^[4],特种写制方法^[5]或者特种的封装方式^[6-7]使得该光栅对某个量不敏感,但是这种方法,只能使得光栅对某一个量去敏,目前还不能使得光栅只对被测量敏感而对其他所有的干扰量去敏的方法。

(3) 抵消

所谓抵消,就是用两个或者多个光栅从不同角度同时进行测量,将结果加权相加使得将干扰量产生的影响相抵消,例如参考光栅法。这种方法会随着干扰量的增加而急剧的复杂化。

实际的应用中综合利用以上三种思想,利用多个去敏特性光栅从不同角度同时进行测量,去除一部分干扰量的影响,再抵消一部分干扰量的影响,从而达到传感测量被测量的目的。

2 联系的思想解决交叉敏感问题

通过上面的分析可以看出尽管以上各种方案从理论上能够解决交叉敏感问题,但是它们都对光栅的要求很高,实施起来比较复杂,减弱了光纤光栅传感体积小、重量轻、结构简单的优势,使得本来并不复杂的交叉敏感问题变得更加复杂化。

以上的交叉敏感问题的解决策略的基本思想是“去异”,实物是发展变化辩证统一的,所以从“求同”的思想,文中提出联系的策略。所谓联系,就是建立干扰因素与被测因素之间的内在联系,让干扰因素对谐振波长的漂移量影响转移到被测因素上来。例如压强与温度之间具有很紧密的联系,对于具体的环境,压强可以用温度进行表示,对于特定的一根长周期光纤光栅,其温度特性和压强特性是一定的,所以我们可以将利用温度表示的压强带入到LPFG压强特性满足的关系式里,导出由于压强引起的谐振波长的漂移量与温度之间满足的关系式,结合LPFG本身的温度特性的满足的关系式,这样就可以导出

在这样特定的环境下温度与谐振波长之间的关系, 这样便可以解调出温度值。

对于特定的传感环境, 假设被测量为 y , 干扰量为 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, LPFG 透射谱谐振波长与各个量之间的特性关系为: $\lambda_0=f_0(y)$ 、 $\Delta\lambda_1=f_1(x_1)$ 、 $\Delta\lambda_2=f_2(x_2)$ 、 $\Delta\lambda_3=f_3(x_3)$ 、 \dots 、 $\Delta\lambda_n=f_n(x_n)$, 损耗峰幅值与各个量之间的特性关系为: $A_0=g_0(y)$ 、 $\Delta A_1=g_1(x_1)$ 、 $\Delta A_2=g_2(x_2)$ 、 $\Delta A_3=g_3(x_3)$ 、 \dots 、 $\Delta A_n=g_n(x_n)$ 。那么在这个特定的环境下, LPFG 透射谱的谐振波长与损耗峰幅值与各个干因素的关系为:

$$\lambda=\lambda_0+\Delta\lambda_1+\Delta\lambda_2+\Delta\lambda_3+\dots+\Delta\lambda_n=f_0(y)+f_1(x_1)+f_2(x_2)+f_3(x_3)+\dots+f_n(x_n) \quad (1)$$

$$A=A_0+\Delta A_1+\Delta A_2+\Delta A_3+\dots+\Delta A_n=g_0(y)+g_1(x_1)+g_2(x_2)+g_3(x_3)+\dots+g_n(x_n) \quad (2)$$

设各个干扰量与被测量之间的关系为: $x_1=y_1(y)$ 、 $x_2=y_2(y)$ 、 $x_3=y_3(y)$ 、 \dots 、 $x_n=y_n(y)$ 将以上各式带入上式便可以得到 LPFG 动态传感系统谐振波长和损耗峰幅值分别于被测量之间的关系为:

$$\lambda=f_0(y)+f_1[y_1(y)]+f_2[y_2(y)]+f_3[y_3(y)]+\dots+f_n[y_n(y)] \quad (3)$$

$$A=g_0(y)+g_1[y_1(y)]+g_2[y_2(y)]+g_3[y_3(y)]+\dots+g_n[y_n(y)] \quad (4)$$

将各个因素都转换到被测量上来, 这样便可以得到这个特定的环境下 LPFG 透射谱图中谐振波长和损耗峰幅值随被测量的变化情况, 进而可以解调出被测量。

3 LPFG 的温度传感测量

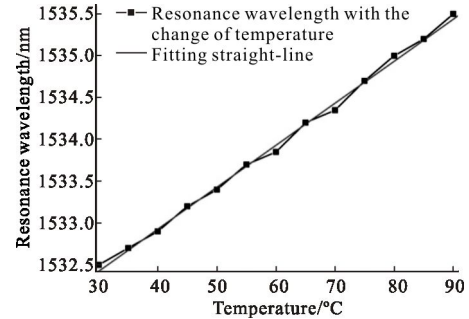
由于 LPFG 在应力状态下才有透射谱, 所以在应力状态下封装好 LPFG。预应力的的大小随着 LPFG 的不同而不同, 文中采用的是用高频 CO_2 激光器在普通单模光纤上写制的 LPFG, 周期和写制的能量每次保持不变, 多次试验结果表明, 该设置写制的 LPFG 最佳的预应力大小等于 50 g 砝码所产生的重力。将该光栅用于温度传感测量时, 由于热胀冷缩的原因应力也会随着温度变化, 应力的改变也会引起 LPFG 透射谱的变化。由于应力的改变时由于温度的变化引起的, 所以利用他们之间的联系:

$$\varepsilon=f(\Delta T) \quad (5)$$

导出 LPFG 谐振波长随温度的变化关系为:

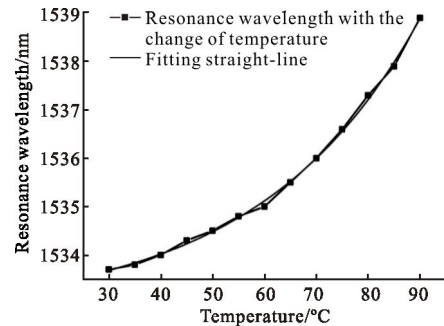
$$\Delta\lambda=\frac{d\lambda_{\text{res}}}{dT}\Delta T+\frac{d\lambda_{\text{res}}}{d\varepsilon}\varepsilon+g(\Delta T, \varepsilon)=\frac{d\lambda_{\text{res}}}{dT}\Delta T+\frac{d\lambda_{\text{res}}}{d\varepsilon}f(\Delta T)+g(\Delta T, f(\Delta T)) \quad (6)$$

对同一根光栅先后进行轴向应力恒定的温度传感实验和一定应力封装后的温度传感实验, 多次实验结果如图 1 所示。



(a) 轴向应力恒定

(a) Constant axial stress



(b) 轴向应力随温度改变

(b) Axial stress changing with the temperature

图 1 谐振波长随液体温度的拟合关系

Fig.1 Resonance wavelength with the change of the liquid temperature

图 1(a)为轴向应力恒定时 LPFG 温度特性曲线和拟合曲线之间的关系, 拟合关系式为: $\lambda_2=1531.91868+0.05033T$, 由此可见轴向应力恒定时谐振波长随温度的变化关系基本成线性关系^[8], 且温度灵敏度约为 $0.05033\text{ nm}/^\circ\text{C}$; 图(b)为轴向应力随温度改变时, LPFG 温度特性曲线与拟合曲线之间的关系, 拟合关系式为: $\lambda=1532.80182+0.33521e^{T/31.04336}$, 由此可见轴向应力随温度改变时谐振波长随温度的变化基本成指数关系。在 $30\sim 60\text{ }^\circ\text{C}$ 之间和从 $60\sim 90\text{ }^\circ\text{C}$ 之间分别对图 1(a)进行线性拟合, 其斜率分别为 $0.04571\text{ nm}/^\circ\text{C}$ 和 $0.12714\text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。由此可见, 在一定温度范围内轴向应力随温度改变的 LPFG 比轴向应力恒定的 LPFG 温度传感性能要好。因此利用联系的思想将干扰因素对被测量的负干扰转为正面的增敏, 充分利用了它们之间的联系。

4 结论

在应力状态下利用胶黏剂固定 LPFG 使得轴向应力随温度改变实现去除轴向引力与温度之间的交叉敏感的方法充分利用了 LPFG 温度与应变交叉敏感的现象,利用联系的思想,将应变对温度的负面干扰转变为正面的增敏。由此可见,充分认识光纤光栅的交叉敏感特性将给交叉敏感问题的解决带来突破性进展。充分利用每个方法的优点才能大大提高光纤光栅传感在实际中的应用,随着写制技术和封装技术的不断提高,光纤光栅传感技术一定具有美好的发展前景。

参考文献:

- [1] Xu M G, Archambault J L, Reekie L, et al. Discrimination between strain and temperature effects using dual wavelength fiber grating sensors[J]. *Electron Lett*, 1994, 30(13): 1085–1087.
- [2] Patrick H J, Williams G M, Kersey A D, et al. Hybrid fiber Bragg grating P long period fiber grating sensor for strain P temperature discrimination[J]. *IEEE Photo Tech Lett*, 1996, 8(9):1223–1225.
- [3] James S W, Dockney M L, Tatam R P. Simultaneous independent temperature and strain measurement using in fiber grating sensors [J]. *Electron Lett*, 1996, 32(12): 1133–1134.
- [4] Liu Xingchen, Rao Yunjiang, Ran Zengling, et al. Temperature and strain characteristic of Long Period Fiber Grating (LPFG) induced by high frequency CO₂ laser pulses [J]. *Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition)*, 2011, 39(3): 43–46. (in Chinese)
- [5] 刘兴晨, 饶云江, 冉增令, 等. 高频 CO₂ 激光脉冲写入的掺硼 LPFG 温度应变特性[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2011, 39(3): 43–46.
- [5] Rao Yunjiang, Wang Yiping, Ran Zengling, et al. Simultaneous measurement of transverse load and temperature using a single long-period fiber grating element [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30(12): 1116–1120. (in Chinese)
- [6] 饶云江, 王义平, 冉增令, 等. 单个长周期光纤光栅实现横向负载和温度的同时测量 [J]. 中国激光, 2003, 30(12): 1116–1120.
- [6] Huang Yonglin, Li Jie, Kai Guiyun, et al. Temperature compensation package for fiber Bragg gratings[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2003, 39(1): 70–72.
- [7] Zhou Bing, Liang Dakai, Wang Yan. A method of temperature compensation for long-period fiber grating [J]. *Piezoelectric & Acousto-optics*, 2008, 30(2): 159–160. (in Chinese)
- [7] 周兵, 梁大开, 王彦. 长周期光纤光栅的一种温度补偿方法[J]. 压电与声光, 2008, 30(2): 159–160.
- [8] Liang Lili, Liu Mingsheng, Li Yan, et al. The method of one-time writing LPFG using high frequency CO₂ laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(9): 090503. (in Chinese)
- [8] 梁丽丽, 刘明生, 李燕, 等. 使用高频 CO₂ 激光器一次写入长周期光纤光栅的方法[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(9): 090503.