

# 基于光纤光栅的振动参数监测及信号处理系统

张戌社<sup>1</sup>, 宁辰校<sup>1</sup>, 周荣芳<sup>2</sup>

(1. 河北科技大学机械电子工程学院, 河北石家庄 050054; 2. 石家庄市市政建设总公司第一分公司, 河北石家庄 050000)

**摘要:** 针对光纤光栅传感与其他传感技术相比, 有其独特的优点, 对光纤光栅传感器进行了理论分析, 建立了通过测量光纤光栅传感元件的波长而得到振动参数的理论模型, 介绍了测量信号处理系统的结构, 作了光纤光栅传感器与加速度传感器的振动参数监测实验, 并对实验结果进行了比较。结果表明, 光纤光栅传感器的性能很好, 可以用于低频振动结构的动态实时监测。

**关键词:** 光纤布拉格光栅; 振动传感器; 信号处理

中图分类号: TP212; TN253 文献标识码: A

## Fiber Bragg grating vibrating sensors and its signal processing system

ZHANG Xu-she<sup>1</sup>, NING Chen-xiao<sup>1</sup>, ZHOU Rong-fang<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang Hebei 050054, China; 2. The First Sub-company, Shijiazhuang Municipal Works Company, Shijiazhuang Hebei 050000, China)

**Abstract:** Compared with other sense techniques, fiber Bragg grating sense has its special advantages. In this paper, the theoretical model for measuring the vibration parameters through measuring strain with fiber Bragg grating and the model and sensing equation for fiber Bragg grating sensitive component are explored, and the composition of signal processing system are presented. The vibration testing have been done, two vibration measurement methods of fiber Bragg grating and acceleration transducer are experimentally contrasted. The experiment results indicate that the sensors, based on fiber bragg grating, have their unique merits, and are practical for vibration testing of low-frequency vibrational structure.

**Key words:** fiber Bragg grating; vibration sensors; signal processing

光纤布拉格光栅(FBG)是近年来光纤传感领域中的新型传感器,它具有线性输出、绝对测量、对环境变化不敏感等特点,及可构成传感网、可微型化等诸多优点,其在结构监测中的应用越来越广泛<sup>[1,2]</sup>。

光纤光栅传感器明显优于其他类型光纤传感器之处在于<sup>[1,2]</sup>: 1) 测量信息为波长编码,因此测量信号不受光源起伏、光纤弯曲损耗、连接损耗和探测器老化等因素影响,具有更大的实用性; 2) 避免了一般干涉型传感器中相位测量的不清晰和对固有参考点的需要; 3) 可方便地使用波分复用技术在一根光纤中串接多个布拉格光栅进行分布测量,而且光纤光栅本身可靠性良好,国外已有采用光纤 Bragg 光栅传感器实现结构内部应力应变长期实时监测的先例。

## 1 光纤光栅振动传感原理

收稿日期: 2005-01-18; 修回日期: 2005-03-22; 责任编辑: 陈书欣

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(E2004000417)

作者简介: 张戌社(1965-),女,河北石家庄人,副教授,博士,主要从事光纤传感及应用方面的研究。

由耦合模理论可知,当宽带光在光纤布拉格光栅中传输时,将产生模式耦合,满足布拉格条件式(1)的一个窄带光谱将被反射回来<sup>[1,2]</sup>:

$$\lambda_B = 2n_e \Lambda, \quad (1)$$

式中:  $2n_e$  为导模的有效折射率;  $\Lambda$  为光栅周期。

在实验室条件下,忽略温度的影响,当外界应力发生变化时,引起光纤光栅布拉格波长的偏移量为<sup>[1,2]</sup>

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e) \varepsilon, \quad (2)$$

式中:  $p_e$  为有效弹光系数;  $p_e = n_e^2 [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})]/2$ ,  $p_{11}$  和  $p_{12}$  为弹光系数;  $\nu$  为纤芯材料的泊松比;  $\lambda_B$  为光栅 Bragg 反射波长;  $\Delta\lambda_B$  为外界应力和温度作用下光栅 Bragg 波长的移动量;  $\varepsilon$  为光纤的轴向应变,可以表示为

$$\varepsilon = \frac{1}{\lambda_B} \left( \frac{\partial \lambda_B}{\partial \varepsilon} \right). \quad (3)$$

可见,光纤布拉格光栅的轴向应变灵敏度系数仅取决于材料本身和反向耦合模的有效折射率。单模光纤仅有基模存在,当光纤材料选定后,其灵敏度系数为一定值,这就从根本上保证了光纤光栅作为轴向应变传感器时具有良好的线性输出特性。

对于目前广泛应用的纯熔融石英光纤<sup>[1]</sup>,应变灵敏度系数为  $(1 - p_e) = 0.78$ 。则由式(2)可得:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = 0.78 \varepsilon. \quad (4)$$

光纤光栅的中心波长在外界应力的作用下产生波长移位,解调出波长变化,即可确定应变的变化情况。

由文献[3]可知,等直梁在纯弯曲时其轴向应变与横向振动的关系为

$$\varepsilon(x, t) = \frac{h}{2} \left( \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right), \quad (5)$$

式中  $h$  表示梁的厚度。因此只要测得光纤光栅的波长,即可由式(4)得到梁的应变,再由式(5)得到梁的振动信号。

## 2 测量系统信号处理

目前光纤光栅动态测试技术的应用在中国尚属起步阶段,由于其局限于仪器自身的数据处理界面,使得其在多点、多功能的系统中很难实现动态数据输出,这为实时监测带来诸多不便。另外,光纤光栅应变传感器是利用监测仪器来追踪其在外界环境影响后的布拉格波长,再由波长变化计算出应变值的,这一系列的处理需要类似 MATLAB 一类的软件经过繁琐的运算才能实现,大大限制了动态数据采集及测量时的应用。

LabVIEW 是美国 NI 公司标志性的虚拟仪器软件开发平台之一,可运行于 Windows 2000/NT/9x 等系统中,其鲜明的技术特色<sup>[4]</sup>: 1) 具有丰富的图形元素控件,支持回调功能; 2) 具有设置断点 (SetBreakpoint) 和探针 (ProbeData) 等程序调试功能; 3) 提供多种总线通信控制函数 (RS-232, GPIB, VXI 等); 4) 内含多种基于 Windows NT/9x 风格的软件技术,如 ActiveX Automation 技术、DDE(动态数据交换)技术等; 5) 有很强的数据处理、数据分析功能等。这种图形化的编程语言,使用灵活方便,特别适合用来开发数据采集、仪器控制及数据处理分析等软件。本文的光纤光栅测试数据的动态采集与处理等功能就建立在用 G 语言编程的软件平台 LabVIEW 的基础上。

波长移位监测仪采用日本 ANDO 公司的 F200 监控器,其最高采样频率为 100 Hz,能同时对 40 个传感器进行采集。在数据采集中主要调用了波长监控器的数据采集程序,在此基础上完成软件的其他功能。

由于 F200 波长监控器既可以将传感器的数据直接以文本的形式保存下来,又可以通过 RS232 串口输出数据,而 LabVIEW 同样也具有读取这 2 种数据的功能,故在测量过程中采用了 2 种读取数据的方式,一种是读取文本文件,另一种是直接调用串口数据。在实时监测过程中应采用调用串口数据的方式,并利用软件的数据处理功能获得实时信息。

## 3 应用实验

基于光纤光栅的振动参数监测实验是在柔性梁(长×宽×厚=600 mm×30 mm×2 mm,弹性模量=

$1.96 \times 10^{11}$  GPa)上进行的,实验装置见图1。由激振器(南京航空航天大学的HEV-2型高能激振器)对梁施加各种激振力,光纤光栅感应的光信号通过波长监控器和计算机进行处理,实验所用光纤光栅的中心波长为1 550.45 nm。

为了进行比较,同时采用BK公司的压电式加速度传感器(4374)及电荷放大器(2635)获取梁的加速度响应,其输出端经过抗混淆滤波器,采用东方振动和噪声技术研究所的INV-306信号采集和分析处理软件、硬件系统实现数据的采集,用计算机进行数据处理。

图2为柔性梁受到正弦激励时分别用光纤光栅和加速度计测量得到的响应时程曲线。图3为对加速度计的信号进行分析后得到的频谱图。图4是利用虚拟仪器对光纤光栅测量值进行FFT分析后得到的结果。可以看出,两者符合得很好。

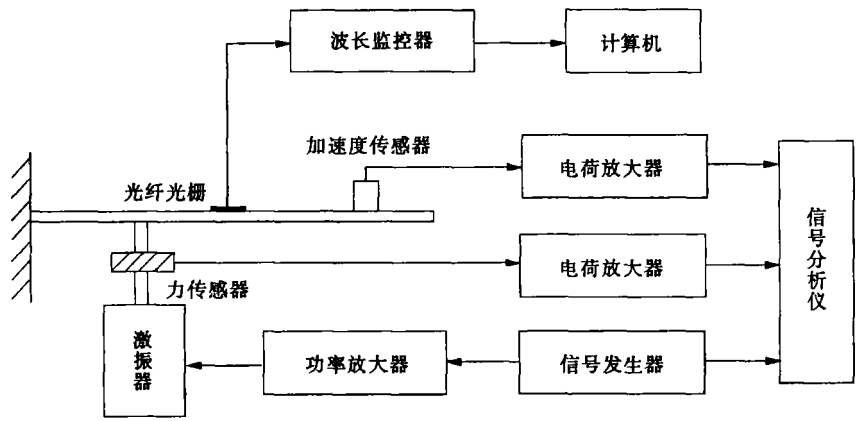


图1 光纤光栅动态性能测试装置  
Fig.1 Dynamic function device of FBG

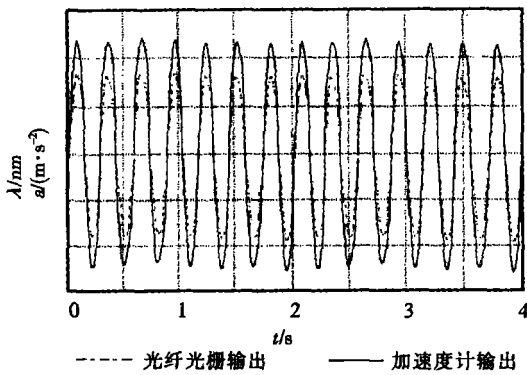


图2 正弦激励下的时程曲线  
Fig.2 Time-varying amplitude/wavelength

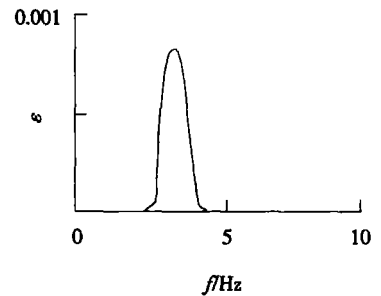


图3 加速度响应的频谱图  
Fig.3 Frequency response of acceleration curve

因为FFT是对序列进行处理的,图4中显示的横坐标是点数,这里设置的是每周期128点,而总采样点为1 024点,所以用点数除以8就是频率,结果为3.375 Hz。增加FFT的点数,能够得到更加精确的频率值。考虑到硬件的成本问题,以及系统的实时性要求,点数越多,FFT运算需要的时间越长,所以,这里选择了1 024点<sup>[5]</sup>。

#### 4 结论

本文建立了测量振动的光纤光栅的等效模型与传感方程,探讨了测量信号处理系统的设计,通过测量可以发现,用光

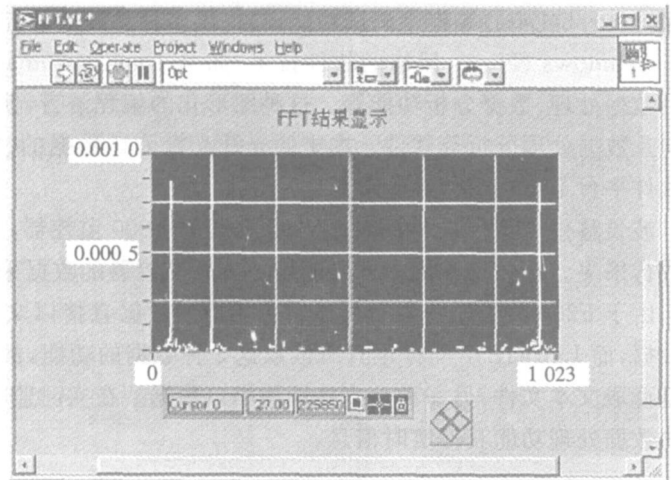


图4 光纤光栅响应频谱图  
Fig.4 Frequency response of FBG

纤 Bragg 光栅传感器与传统的加速度计测得的数据吻合得很好,二者在相同条件下的动态响应特性具有很好的一致性,说明光纤光栅传感器的性能很好,可以用于低频振动结构( $f \leq 40$  Hz)的动态实时监测。

参考文献:

[1] 廖延彪. 光纤光学[M]. 北京:清华大学出版社, 2000.  
 [2] KERSEY A D, DAVIS M A, PATRICK H J, et al. Fiber grating sensors[J]. Lightwave Technol, 1997, 15(8): 1 442-1 462.  
 [3] 王代华. 斜拉索系统动力特性在线监测与振动(半)自动控制[D]. 重庆:重庆大学, 1999.  
 [4] 李湘江, 周建军. 虚拟设备驱动程序的开发设计[J]. 河北工业科技, 2002, 19(1): 4-7.  
 [5] 吴湘淇. 信号、系统与信号处理[M]. 北京:电子工业出版社, 1996.

(上接第 126 页)

表 2 正交试验表

Tab. 2 Orthogonal experiment result

| 试验号   | A    | B    | C    | 产率/%  |
|-------|------|------|------|-------|
| 1     | 1    | 1    | 1    | 71.67 |
| 2     | 1    | 2    | 2    | 63.4  |
| 3     | 1    | 3    | 3    | 55.4  |
| 4     | 1    | 4    | 4    | 37.6  |
| 5     | 2    | 1    | 2    | 58.8  |
| 6     | 2    | 2    | 1    | 54.2  |
| 7     | 2    | 3    | 4    | 50.1  |
| 8     | 2    | 4    | 3    | 35.0  |
| 9     | 3    | 1    | 3    | 50.6  |
| 10    | 3    | 2    | 4    | 45.8  |
| 11    | 3    | 3    | 1    | 40.5  |
| 12    | 3    | 4    | 2    | 47.9  |
| 13    | 4    | 1    | 4    | 15.6  |
| 14    | 4    | 2    | 3    | 30.6  |
| 15    | 4    | 3    | 2    | 28.2  |
| 16    | 4    | 4    | 1    | 33.5  |
| $X_1$ | 2.28 | 1.97 | 2.00 |       |
| $X_2$ | 1.98 | 1.94 | 1.98 |       |
| $X_3$ | 1.85 | 1.75 | 1.72 |       |
| $X_4$ | 1.07 | 1.54 | 1.49 |       |
| $X_1$ | 0.57 | 0.49 | 0.5  |       |
| $X_2$ | 0.20 | 0.48 | 0.49 |       |
| $X_3$ | 0.46 | 0.44 | 0.43 |       |
| $X_4$ | 0.27 | 0.39 | 0.37 |       |
| R     | 0.37 | 0.10 | 0.13 |       |

表 3 最佳条件试验及结果

Tab. 3 Optimum conditions of test and result

| 序 号 | 条 件   |                    |                     | 收率/%  |
|-----|-------|--------------------|---------------------|-------|
|     | 温度/℃  | $m(\text{TEBA})/g$ | $w(\text{NaOH})/\%$ |       |
| 1   | 50~55 | 0.2                | 31                  | 71.65 |
| 2   | 50~55 | 0.2                | 31                  | 71.67 |
| 3   | 50~55 | 0.2                | 31                  | 71.68 |

参考文献:

[1] CONNIE L S, KEITH R. Powell review of the sulfonamides and trimethoprim[J]. Pediatr Rev, 2000, 21(2): 368-371.  
 [2] SATINDER S S, YOSHIDA T A, RODOLPHE C, et al. Gut-lans discovery of molecular mechanisms of neuroprotection using cell-based bioassays and oligonucleotide arrays[J]. Physiol Genomics, 2002, 11(1): 45-52.  
 [3] ROSSO JQ Del. Evaluating the role of topical therapies in the management of rosacea: focus on combination sodium sulfacetamide and sulfur formulations[J]. Cutis, 2004, 73(1 Suppl): 29-33.  
 [4] BLASCO F, PERELLO L, LATORRE J, et al. Cobalt(II), nickel(II), and copper(II) complexes of sulfanilamide derivatives: synthesis, spectroscopic studies, and antibacterial activity, crystal structure of  $[\text{Co}(\text{sulfacetamide})_2(\text{NCS})_2]$ [J]. J Inorg Biochem, 1996, 61(2): 143-154.  
 [5] VENKATESHA B, YONGSHENG S, SHARLYN J, et al. Inactivation of HIV-1 nucleocapsid protein p7 by pyridinioalkanoil thioesters[J]. J Biol Chem, 2000, 275(21): 1 489-1 497.  
 [6] SPINKS C A, WYATT G M, LEE H A, et al. Molecular modeling of hapten structure and relevance to broad specificity immunoassay of sulfonamide antibiotics[J]. Bioconjug Chem, 1999, 10(4): 583-588.  
 [7] ABRAMOVITS W, KENNEDY A J. Sulfur/sodium sulfacetamide preparations[J]. Skinmed, 2004, 3(2): 95-101.  
 [8] 侯 钰, 李小云. 近年畅销商标名药物的数据分析与市场预期[J]. 河北科技大学学报, 2002, 23(4): 32-37.  
 [9] 李 伟, 刘海峰, 靳 红. “药物研究开发知识库”的建设[J]. 河北科技大学学报, 2002, 23(4): 38-41.  
 [10] 刘少成. 药物化学[M]. 北京:中国医药科技出版社, 1991. 510-512.  
 [11] 何黎琴, 完茂林. 磺胺醋酰合成路线改进[J]. 安徽化工, 2003, 29(2): 16-17.  
 [12] 陆 彬, 吴念朱. 药剂学实验[M]. 北京:人民卫生出版社, 1994. 171-176.