

基于波长扫描极值解调法的 FBG 温度检测系统

肖怀贵,袁嫣红

(浙江理工大学现代纺织装备技术教育部工程研究中心,杭州 310018)

摘 要: 光纤光栅波长偏移检测技术是光纤光栅传感系统的关键技术之一。探讨用 LabVIEW 编程实现基于波长扫描极值解调法的 FBG 波长检测系统,利用可调谐激光器具有编程控制的功能,系统在光源输出不同扫描步长的条件下测试了 FBG 的温度特性。比较两种峰值计算方法的优缺点。实验结果表明:解调系统具有很好的稳定性。

关键词: LabVIEW; 数据采集; 光纤布拉格光栅; 波长扫描极值法
中图分类号: TP212 **文献标识码:** A

0 引 言

光纤光栅具有耐腐蚀、抗电磁干扰、容易构成传感器网络等优点,因而在温度和应力测量等领域得到了广泛的应用^[1]。光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating,FBG)传感器通过反射波长的偏移感应外界温度或应力的微小变化,传感信号的解调是传感系统的关键技术之一,理论上有很多种解调方法^[2],目前大多光纤光栅传感信号解调仪造价高,阻碍了光纤光栅在测量中的应用^[3]。波长扫描极值法搭建的波长偏移检测系统成本低、稳定性好,适用于波分复用的传感器网络。使用 LabVIEW 编写的程序可以控制可调谐激光器和数据采集过程,LabVIEW 程序使用函数从用户界面或其他渠道获取信息输入,然后将信息显示或传送到其他文件,很好地实现了解调系统的功能。

1 波长扫描极值解调法的传感系统

波长扫描极值解调法的基本原理^[4]是可调谐激光器输出窄带光源,利用激光器输出波长与被测 FBG 中心波长重合时,反射光最强的特性。在全程激光扫描过程中,当光电探测器接收到这一信号为最大时,它所对应的激光输出波长曲线可计算被测传感量的大小。图 1 是波长扫描极值解调法的系统原理图。

解调系统主要由可调谐激光器、光电探测器、数据采集系统、传感 FBG 以及计算机组成。可调谐激光器输出窄带的光源,输出波长可在 1 525~1 565 nm 范围内变化,输出波长范围、步长可通过串口连接的计算机编程控制,并具有频率快速扫描功能。可调谐激光器是系统的重要部件,最小变化步长为 10 pm,它的输出线宽和波长的定性决定了系统的解调分辨率和精度。光电探测器能将 FBG 的反射光转换成可测量的电压信号,系统使用的 NI 公司数据采集卡,单通道

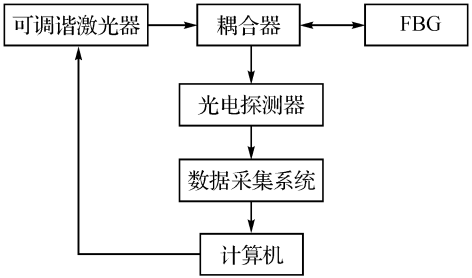


图 1 波长扫描极值解调法系统原理

最高采样速率可达 400 kHz,数据采集卡的模拟输入端连接光电探测器的输出,信号转换为电压后,其幅值变化范围是 0~5 V。数据采集卡使用 USB 接口实现与计算机通讯,可方便地将采集到的数据送入计算机内存。

2 波长偏移检测系统的 LabVIEW 实现

2.1 仪器控制和数据采集

解调系统以 LabVIEW 为工作平台,实现仪器控制和数据采集、处理、显示功能。LabVIEW 中提供了多种仪器通信方式,VISA 函数是仪器编程的一个标准 I/O 应用程序编程接口(API),在框图中几乎所有的 LabVIEW 仪器驱动程序都使用 VISA 函数,VISA 能够控制 GPIB、PXI 或串行仪器。VISA 函数按照通信协议向激光器模块写入相应的命令,从而实现可调谐激光器的波长、步长参数的设置和开始、停止扫描的控制,仪器的可编程控制为激光扫描和数据采集过程提供了有利的条件。

LabVIEW 采用数据流编程方式,具有良好的人机交互界面^[5],DAQ Assistant 可交互式地创建、编辑和运行 NI-DAQmx 虚拟通道和任务,在程序框图上放置 DAQ Assistant 时,会启动 DAQ 助手并创建一项新任务,在创建任务之后,可双击 DAQ 助手编辑该任务,但要注意连接好相应的数据采集硬件。编辑信息主要有测量信号类型、输入通道、采样方式及采样率、硬件连线图。

图 2 是数据采集过程的程序框图,激光器与上位机通信的波特率为 115 200 bps,数据采集卡的采样速率设置为 2 kHz,LabVIEW 程序每次从数据通道读取的数据量为 2 000 点,程序中的 While 循环结构实现数据的读取,采集时间由定时结构控制,在前面板控件波形图中,可观察到实时采集到的数据。为了精确实现波长的定标,激光扫描过程和数据采集过程应同步,检测激光器扫描的起始信号可实现同步。

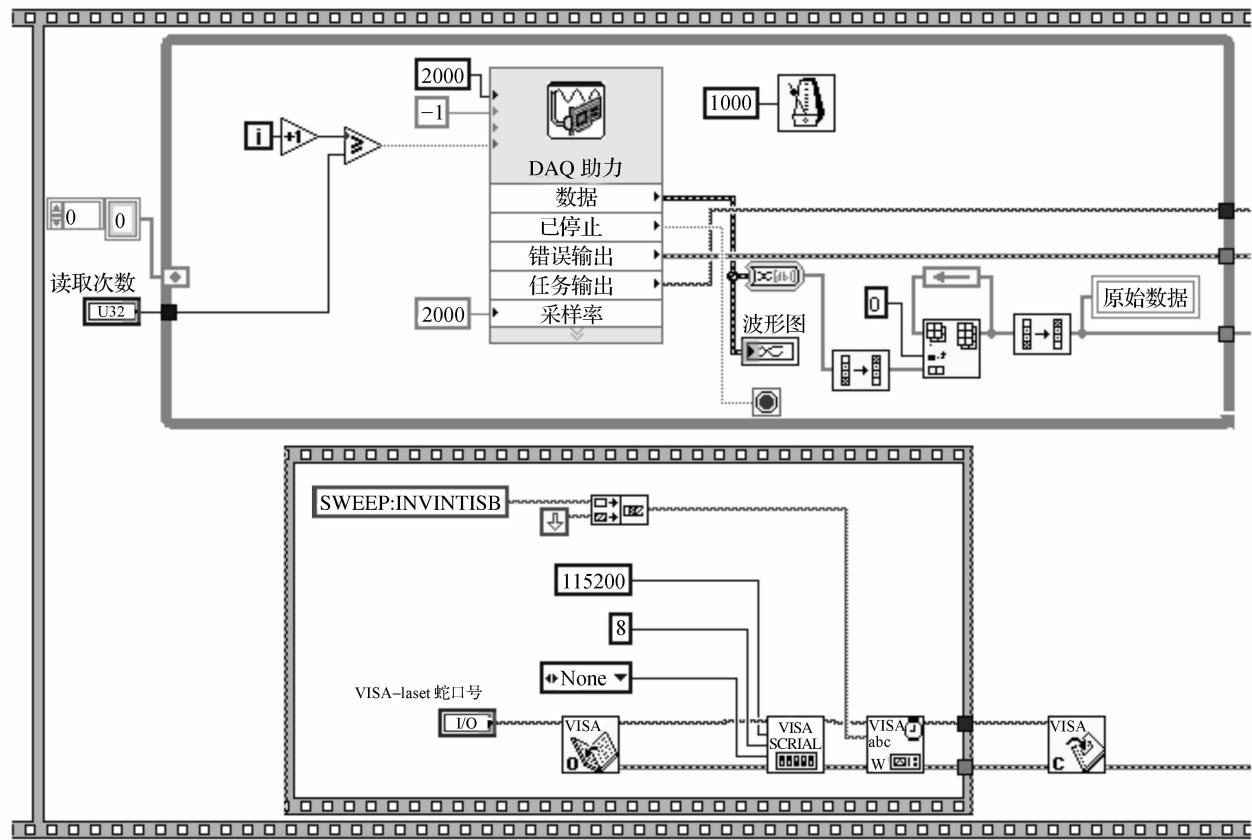


图 2 数据采集程序框图

2.2 信号处理

解调系统的组成部分包括了电路和光路部分,两个部分都可能对系统造成干扰,光纤光栅的制造工艺技术差异或系统的干扰会使反射谱呈现不同的形状,给峰值的判断造成困难,因此信号处理使用抗干扰强的算

法可提高系统的精度和稳定性。此系统的信号处理主要使用数据的奇异项判断、算术平均值法和线性拟合的峰值算法。图 3 是信号处理的程序框图,调用了数据处理和峰值算法子程序。

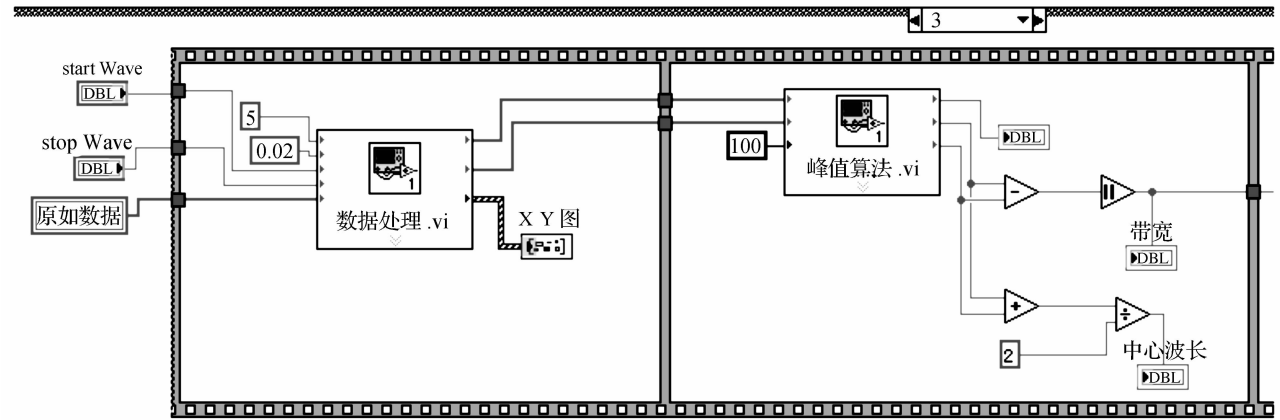


图 3 信号处理程序框图

数据处理程序的主要功能是实现数字滤波,并对激光器的输出波长进行定标,建立起波长—光强的对应关系。数字滤波的过程对原始采样数据进行去除采样数据的奇异项和算术平均值法处理可减少波形的抖动,实现过程如下:设在同一窄带输出光中采集到的数据量为 N ,计算出 N 个数据的平均值 X 和标准偏差 σ ,则每个数据的残差表示为

$$|V_k| = |X - x_i| \tag{1}$$

若 $N > 10$,则

$$|V_k| > 3\sigma \tag{2}$$

将采样数据逐点代入式(1),如果满足式(2),判断该点为异常点处理,然后对采样数据进行均值滤波得到一个平均值,即反射光的光强,对应了光源的一个输出波长值,建立起光强与波长的对应关系。

峰值算法子程序中使用线性拟合法计算反射谱的中心波长,如图 4 所示,其基本思想是在反射谱波形的两侧分别取采样点,设采样点 (x_k, y_k) ,用一元线性回归方程拟合,求方程中 a, b 的最佳估计值,相应的误差方程可表示为^[6]

$$\begin{cases} v_1 = y_1 - \bar{y}_1 = y_1 - (a + bx_1) \\ v_2 = y_2 - \bar{y}_2 = y_2 - (a + bx_2) \\ \vdots \\ v_n = y_n - \bar{y}_n = y_n - (a + bx_n) \end{cases}$$

$\bar{y}_1, \bar{y}_2, \dots, \bar{y}_n$ 为在 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 点上的 y 估计值。按照最小二乘法原理,使各测量点与回归直线的残余误差平方和为最小,即 $\sum_{i=1}^n v_i^2$ 为最小。反射光谱的两边沿经线性拟合后得到两条直线,然后在直线上求出指定功率所对应的波长值 λ_1 和 λ_2 ,这两个值的平均值为反射谱的中心波长 λ_B :

$$\lambda_B = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} \tag{3}$$

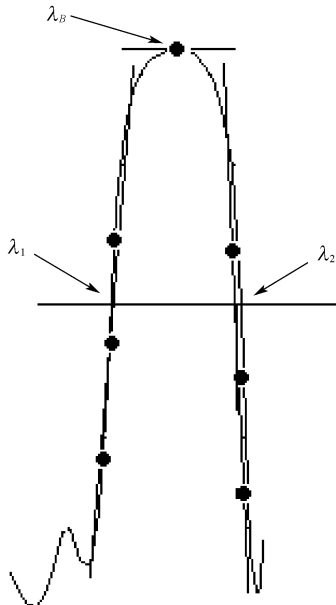


图 4 峰值算法示意

3 实验及结果分析

实验对 FBG 的温度特性进行了测试,实验装置如图 1 所示,测试时将传感 FBG 置于温控箱中。FBG 的中心波长为 1 544. 29 nm,反射率为 96%。温控箱的温度分辨率为 0. 1℃,温控箱与计算机的通信用 LabVIEW 的 VISA 函数实现。在激光器扫描步长和峰值算法不同的条件下,分成 3 个系列的实验,第一系

列实验的扫描步长设置为 0.01 nm,第二系列实验的扫描步长为 0.02 nm,第三系列实验的扫描步长为 0.05 nm.计算反射谱的中心波长时,可直接求取最大功率值对应的波长 λ_b ,也可用文章中介绍的线性拟合法获得中心波长 λ_B .温控箱运行的温度轨迹为 15、25、35、45、55、65℃,其他实验条件保持一致,测试数据保存到电子文件中。3 个系列实验的反射谱波形如图 5、图 6、图 7 所示,3 个系列实验的数据分析结果如图 8、图 9 所示。

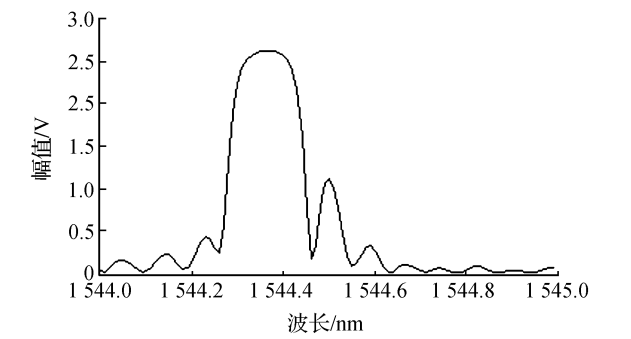


图5 step=0.01 nm 时的反射谱

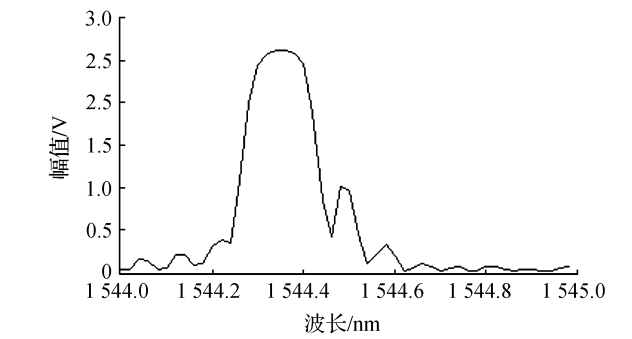


图6 step=0.02 nm 时的反射谱

由图 5~图 7 可知,随着光源扫描步长的增加,FBG 的反射谱波形光滑性变差,最大峰值的位置越来越不稳定,当扫描步长大于 0.5 nm 时,误差急剧增大。图 8 和图 9 是分别用两种方法计算的中心波长值,从实验数据的线性程度分析,系列 1 和系列 2 的实验数据很相近,两者的线性拟合程度都超过了 0.999,但系列 1 实验的系统响应时间是系列 2 的两倍,系列 3 实验的系统响应时间最快,但误差最大。就两种峰值算法而言,在扫描步长合适的情况下,线性拟合的峰值比最大功率值要稳定,这种优越性在反射谱顶部有抖动的情況下会体现得更明显。因此,在保证解调系统精度的前提下,增加光源的扫描速度,可提高被测物理量的实时性。

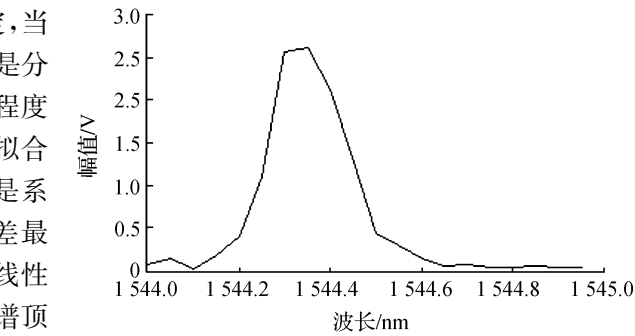


图7 step=0.05 nm 时的反射谱

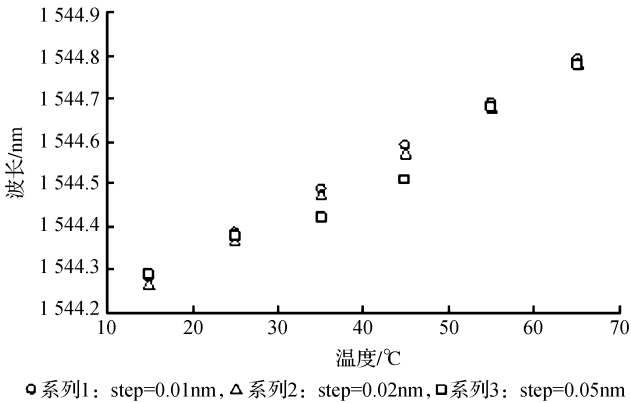


图8 线性拟合的峰值数据分布

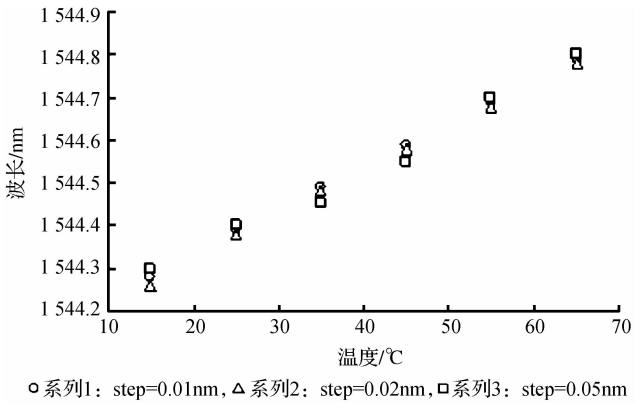


图9 最大功率值的峰值数据分布

4 结 语

使用 LabVIEW 软件编写实验测试过程是一种简便、有效的方法,在波长扫描极值解调法的基础上对 FBG 的温度特性进行了测试,实验结果证明了系统具有很好的稳定性,且成本低。解调系统扫描 1 nm 波长范围的响应时间为 5 s,对于温度灵敏度为 10 pm/℃的光栅,温度变化跨度可达 100℃,能够满足对测量实时性要求不高的系统。光纤光栅传感器已经广泛应用于电力、石油、土木工程等监测领域,光纤传感器解调系统中关键元器件成本的降低将推进光纤传感器的应用。

参考文献:

[1] Kersey A D. A review of recent developments in fiber optic sensor technology[J]. Optical Fiber Technology, 1996(3): 291-317.

[2] 赵 勇. 光纤传感原理与应用技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.

[3] 李爱群, 周广东. 光纤 Bragg 光栅传感器测试技术研究进展与展望(I): 应变、温度测试[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2009, 39(6): 1298-1306.

[4] 张 颖, 刘云启, 刘志国, 等. 波长扫描极值解调法实现光纤光栅应变和温度传感的测量[J]. 光子学报, 1999, 28(11): 979-982.

[5] 雷振山. LabVIEW7 Express 实用技术教程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.

[6] 周润景, 郝晓霞. 传感器与检测技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.

Temperature Detection System of Fiber Bragg Grating Based on
Ultimate Wavelength Scanning Demodulation Method

XIAO Huai-gui, YUAN Yan-hong

(Engineering Research Center of Modern Textile Machinery Technology(Zhejiang Sci-Tech
University), Ministry of Education, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Wavelength shift detection system of fiber Bragg grating is one of the key technologies of fiber optic sensing system. This paper describes the Wavelength shift detection system of fiber Bragg grating based on ultimate wavelength scanning using LabVIEW, and tests the temperature characteristic of fiber Bragg grating in different scanning steps of tunable laser, which is programmed control, and compared advantages and disadvantages of two peak methods. The experiments show that the detection system has higher reliability.

Key words: LabVIEW; data acquisition; fiber bragg grating; ultimate wavelength scanning
(责任编辑: 杨元兆)