

一种基于 LabVIEW 的准分布式光纤光栅传感解调系统设计

王鹏致 刘春桐 李洪才 吴荣晶

第二炮兵工程大学二系, 陕西 西安 710025

摘要 针对光纤布拉格光栅(FBG)准分布式传感解调系统进行了专门的研究。结合准分布式传感解调信息混杂、动态范围大等特点,自行搭建了FBG传感解调系统。以实验室现有的复合传感器为平台,基于LabVIEW软件,开发出一种适用于光纤光栅准分布式传感解调的测试平台,使得承载有温度、压力、流量信息的波长变化智能区分,并通过相应计算将被测物理量实时显示。通过实验,对温度、压力、流量传感器分别进行了标定,得出相应的计算参数;通过综合实验,系统分辨出了不同物理量的波长值并直接显示被测量,实现了高精度可视化实时显示的目的,验证了系统设计的可行性与可靠性。

关键词 传感器; 准分布式传感解调; 光纤布拉格光栅; LabVIEW; 解调技术

中图分类号 TP212 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.022801

A Quasi Distributed Fiber Bragg Grating Sensing Demodulation System Design Based on LabVIEW

Wang Pengzhi Liu Chuntong Li Hongcai Wu Rongjing

The Second Department, Second Artillery Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710025, China

Abstract In view of the optical fiber Bragg grating (FBG) quasi distributed sensing demodulation system, a specialized study is studied. In view of mixed information, large dynamic range and other characteristics in quasi distributed sensing demodulation system, a FBG sensing demodulation system is set. Using laboratory existing composite sensor as a platform, based on the LabVIEW software, a suitable system for distributed optical fiber grating sensor demodulation is designed, which makes the temperature, pressure, flow information based on wavelength changes are distinguished intelligently and the physical quantities measured are displayed real-time through the corresponding calculation. Through this experiment, the temperature sensor, pressure sensor and flow sensor are calibrated respectively, the parameters are calculated; through the comprehensive experiment, the system identified the wavelength value of different physical quantities and displayed physical quantities directly, realized the purpose of the high precision visualization and real-time display, verified the feasibility and reliability of the system design.

Key words sensors; quasi distributed sensing demodulation; optical fiber Bragg grating; LabVIEW; demodulation technology

OCIS codes 060.3735;060.3738;060.2300

1 引言

光纤光栅(FBG)传感器具有抗电磁干扰、耐腐蚀、电绝缘、高灵敏度和低成本等特点^[1],其已在土木工程^[2]、航空航天^[3]、机械制造^[4]、医疗卫生^[5]等领域广泛用于应变、温度、振动等参量的测量^[6]。光纤光栅传感器是一种波长调制型器件,外界物理量的变化会影响光纤光栅的中心波长,通过测量光纤光栅中心波长的变化即可获得外界物理量的变化情况^[7]。基于其自身波长调制的这个特点,可以通过波分复用实现准分布式测量,成为了光纤光栅传感技术中的研究热点^[8-9]。准分布式光纤光栅传感系统的解调方案直接影响传感系统的

收稿日期: 2015-06-14; 收到修改稿日期: 2015-07-16; 网络出版日期: 2016-01-08

作者简介: 王鹏致(1990—),男,硕士研究生,主要从事光纤光栅传感解调方面的研究。E-mail: wpzhyj@163.com

导师简介: 刘春桐(1972—),男,博士,教授,主要从事光电技术、光纤传感技术及应用等方面的研究。

E-mail: liuchuntong2001@163.com

动态范围、检测精度等重要参数。

1999年, Henderson等率先将 LabVIEW 技术引入到光纤光栅解调技术中来, 极大地促进了光栅传感解调技术的进步。近年来, 唐宗等^[10-12]针对解调中的某些关键问题进行了深入研究, 但针对准分布式传感解调系统尚缺乏专门的研究。本文基于此背景, 利用 LabVIEW 软件平台控制可调谐激光器和数据采集过程, 对信号进行运算处理和显示, 很好地实现光纤布拉格光栅传感解调系统的功能要求, 使得准分布式测量更加容易方便。

2 准分布式传感解调系统组成

2.1 光纤光栅复合传感器

如图1所示, 实验室设计的多功能光纤光栅复合传感器实现了对温度、压力、流量的同时测量^[13], 温度传感器通过把光纤光栅胶封在不锈钢钢管内实现了对温度的高灵敏度测量, 压力和流量都通过相应的结构设计使之转化为弹性膜片的形变, 通过测量形变即可感知压力、流量信息^[14]。通过耦合器把多路光信息合成到一根传输光纤上, 并通过光开关等元件, 可以在同一套解调设备上搭架多个传感器, 实现对多点位多参量的准分布式测量。

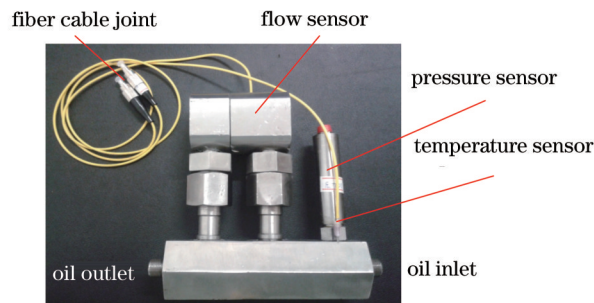


图1 光纤光栅复合传感器实物照片

Fig.1 Photo of composite fiber grating sensor

2.2 传感解调系统

准分布式传感解调系统如图2所示, 宽带光源(超辐射发光二极管 SLED 光源)经耦合器进入多路光开关阵列, 光开关受数控器控制可选通光路, 光波经由 1×3 光纤分路器分别进入光纤光栅复合传感器的温度、压力和流量三个单元, 并通过携带被测物理量信息的反射光进入基于可调谐光纤法布里-珀罗(F-P)滤波原理的光纤光栅解调模块, 从而获得相应传感器的波长偏移信号; 光纤光栅解调模块通过 USB 接口总线将解调信息传递至上位机, 通过上位机的人机交互测试软件的数据处理后即可获得液压系统中被测物理量的大小。

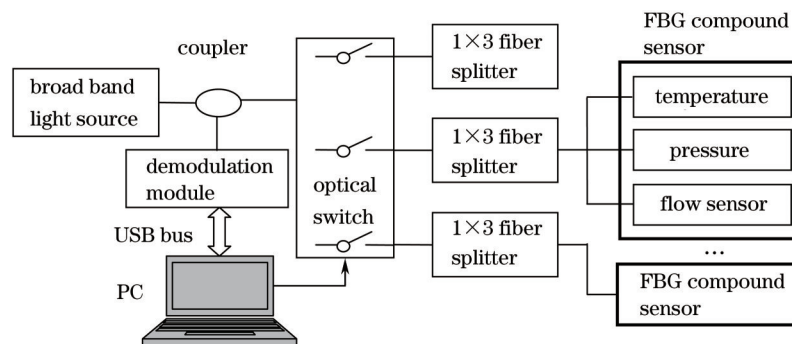


图2 分布式传感解调系统

Fig.2 Distributed sensing demodulation system

在设计 F-P 腔时, 需要综合考虑测量范围和测量精度, 适当设计两镜面的距离和镜面反射率, 以满足设计要求。在对分布式传感网络进行解调时, 对 F-P 腔的要求首先是它的自由光谱范围必须大于所有多信道复用信号的频谱宽度之和, 以避免信号重叠, 造成混乱; 同时为了在自由光谱内容纳更多的传输信道, 要求信道间距小, 也就是要求 F-P 腔带宽较窄。根据可调谐 F-P 滤波器的性能要求, 结合光纤光栅分布式测量系统解调的实际情况, 选择 BaySpec 公司的 WaveCapture 系列高速光纤光栅解调模块。

3 基于LabVIEW的解调系统设计

3.1 总体设计

将光纤光栅信号解调系统软件分成四个标准组件模块:1) 人机界面模块:操作仪器开始工作、设置仪器系统参数、仪器数据显示、故障信息显示等。2) 参数设置模块:接收来自上位机的用户操作控制命令,如:数据保存路径、数据保存间隔等设置。3) 波长解调算法模块:将采集得到的电压信号数据转化成波长值。波长解调算法、寻峰算法已被封装成相应的函数,使用中只需调用相应的函数即可实现。4) 数据库管理系统模块:将仪器获取的数据分别存入相应的数据库中,定时对数据进行刷新,对记录一定时间长度的数据进行存储、回放、分析等运算。根据软件模块划分的功能要求,设计出如图3的软件主流程图。

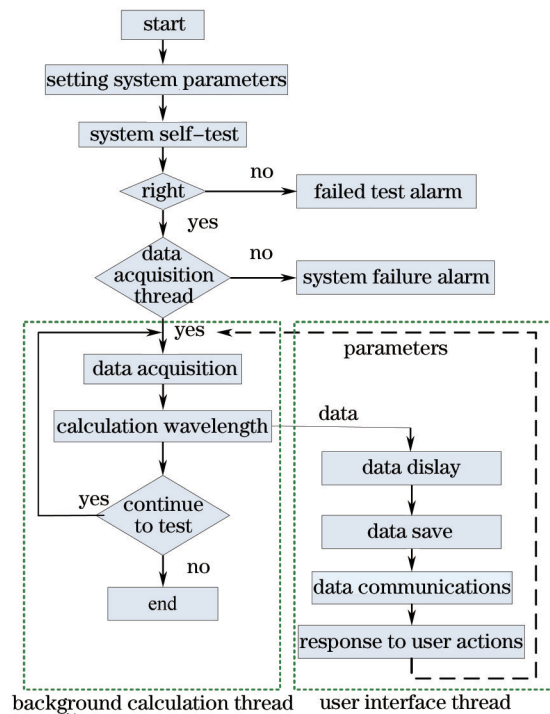


图3 光纤光栅解调系统软件主流程图

Fig.3 Main process of fiber Bragg grating demodulation system software diagram

3.2 前面板设计

前面板的设计主要应包括三个部分:开关控制硬件部分、参数设置部分及结果显示部分:1) 开关控制硬件部分:打开及关闭系统软件,选择及控制通道开启等。2) 参数设置部分:设置采样频率;根据不同传感器使用的光纤光栅中心波长值设置相对应的波长范围,用于区分温度、压力、流量信号;根据标定实验结果,输入温度、压力、流量相对应的斜率和截距,为综合实验测量提供计算参数。3) 结果显示部分:显示光谱,温度、压力、流量测量结果等。

3.3 程序框图设计

由于分布式解调系统中波长带宽较大,必须进行大范围扫描。系统设计了40 nm(1525~1565 nm)带宽的波长测量范围。在这个范围内,划分512个采样点,循环扫描,寻找波峰,搜寻到波峰后首先根据不同的区间范围智能地辨别为温度、压力、流量信号,然后代入相对应的计算参数进行运算,计算结果直接显示在前面板相应位置。数据采集、寻峰程序框图如图4所示。

系统为了区分不同传感器反射回来的波长信息,采用区间法进行智能分辨。在传感器设计时即采用中心波长有较大差异的光纤光栅,因为在传感过程中,中心波长的偏移量有限(一般不会超过 ± 1.5 nm),故设定一定的范围区间,在此区间的反射波峰即认定为特定的被测量信息。以温度传感解调为例,温度传感器中封装的光纤光栅中心波长为1547.754 nm,则温度波长范围设置为1546.000~1549.000 nm,即在这个波长范围的反射波峰即为温度信息。

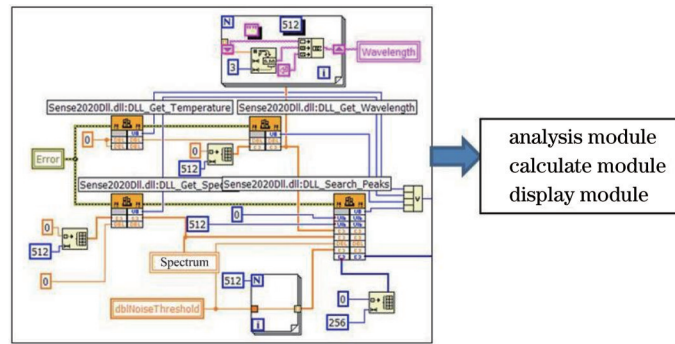


图4 数据采集程序框图

Fig.4 Data acquisition program

如图5所示,图(a)即为在参数设置中输入温度、压力、流量反射波峰波长范围的程序框图,图中右半部分为根据标定实验得知被测物理量与波长变化的对应关系,输入其计算参数。图(b)中反射波峰值进入分析计算模块,首先与设置的各个区间范围进行比较,确定所携带的信息类型,尔后进入相应的计算、显示程序。

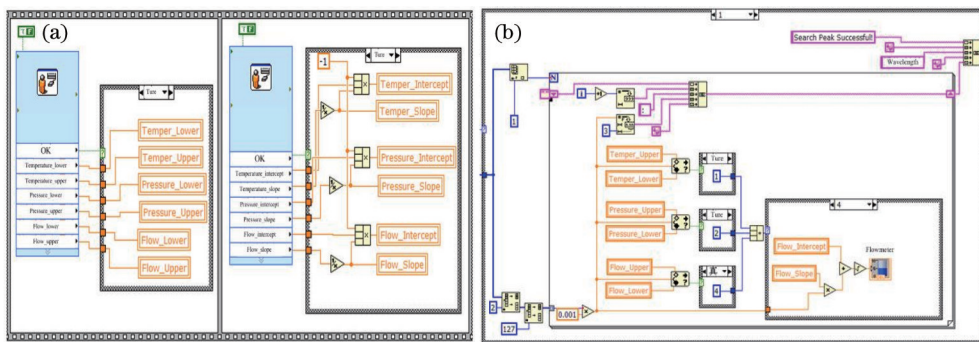


图5 分析、计算、显示程序框图

Fig.5 Analysis, calculation and display processing program

4 实验验证

4.1 标定实验

4.1.1 温度标定实验

光纤光栅温度传感器的封装选用导热性能良好的不锈钢管,制作完成后的光纤光栅温度传感器采用水浴加热实验装置对其进行了标定实验,如图6(a)所示。温度基准采用精度为0.2℃的水银温度计,从室温加热至80℃,在此过程中记录水浴加热对应的温度值对应的光纤光栅中心波长的值,并进行处理和数据拟合,结果如图6(b)所示。

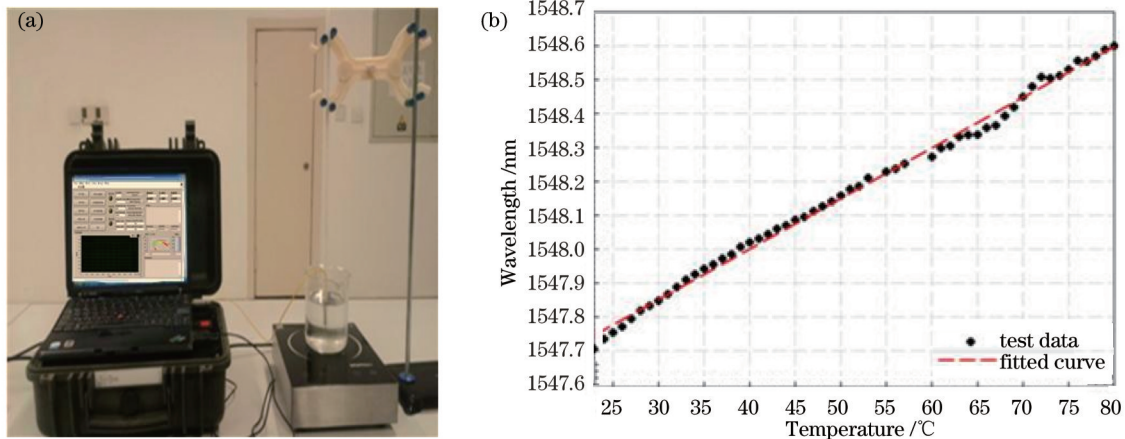


图6 温度传感器标定实验及数据处理

Fig.6 Physical figure and fiber Bragg grating temperature sensor calibration experiment

利用最小二乘拟合对实验数据进行线性拟合,得到 λ_B 与 T 之间的关系为:

$$\lambda_B = 1547.404 + 0.0149T, \quad (1)$$

可知,该光纤光栅温度传感器拟合曲线的斜率为 $0.0149 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,相关系数 R 为 0.9978 ,拟合的标准偏差为 0.0172 。

4.1.2 压力标定实验

封装好的光纤光栅压力传感器采用压力表校验仪进行标定,压力检测基准的压力表精度为 0.1 MPa ,实验照片如图 7(a)所示。实验中,压力校验仪从 0 MPa 至 30 MPa 逐步加压,每隔 1 MPa 时保持一段时间,记录此时的光纤光栅中心波长值。实验数据如图 7(b)中所示。

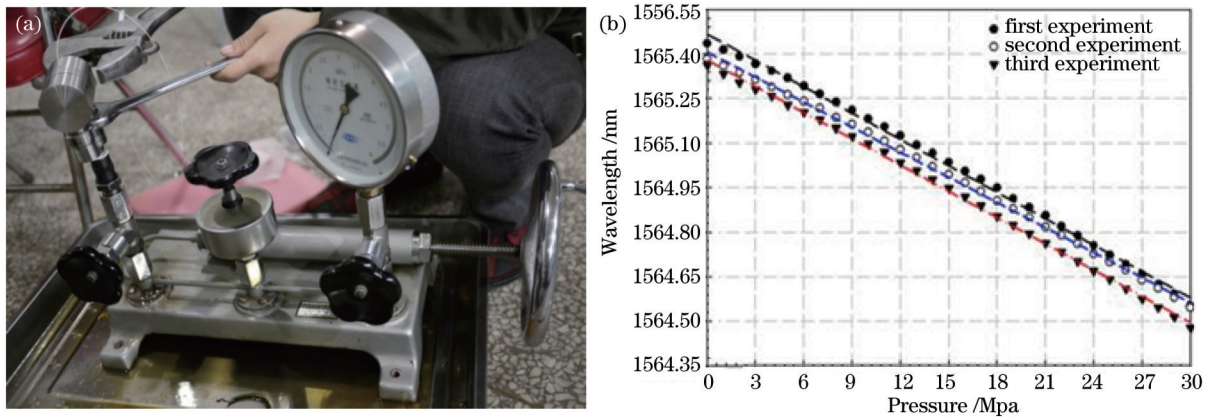


图7 压力传感器标定实验及数据处理

Fig.7 Fiber Bragg grating pressure sensor object graph and calibration experiment

利用最小二乘拟合法对三组实验数据进行线性拟合,可得拟合曲线方程为

$$\begin{cases} \lambda_1 = 1565.467 - 0.0296P \\ \lambda_2 = 1565.407 - 0.0281P \\ \lambda_3 = 1565.380 - 0.0294P \end{cases}, \quad (2)$$

上述三组实验数据拟合曲线的斜率较为接近,其均值约为 $29 \text{ pm}/\text{MPa}$ 。

4.1.3 流量标定实验

将 ISA1932 标准喷嘴内嵌于流量传感器的主阀体中作为节流口,平面膜片选用 304# 不锈钢,将光纤光栅粘贴在平面膜片上。通过管接头分别将光纤光栅流量传感器和液压综合试验台的进出口回路相连,调节节流阀开口大小实现试验台流量的调节,同时记录光纤光栅流量传感器的波长变化,如图 8 中所示。

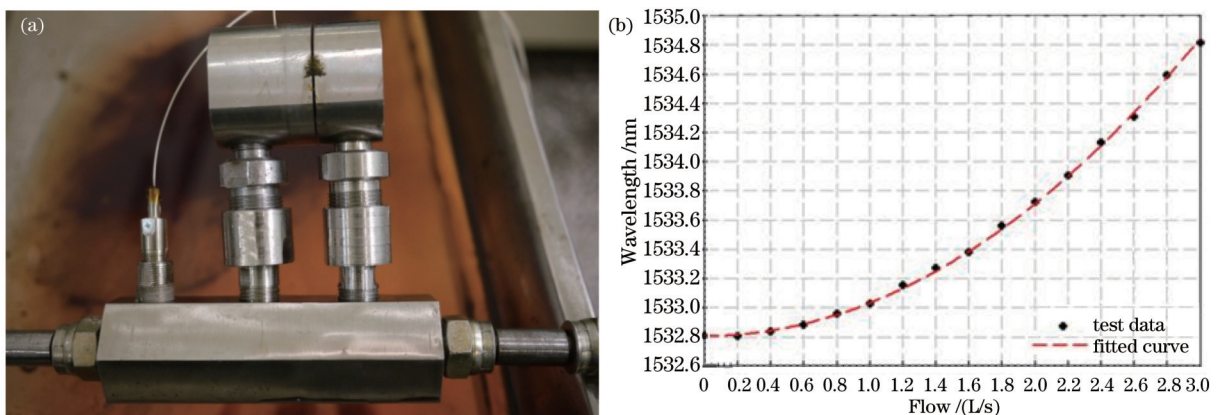


图8 流量传感器实物图及实验结果

Fig.8 Flow sensor object diagram and experimental results

利用最小二乘拟合法对实验测试数据进行拟合,可得拟合曲线方程为:

$$\lambda_B = 1532.811 + 0.226Q_v^2, \quad (3)$$

拟合曲线印证了传感器的波长变化与流量的平方成正比的关系,系数为 $0.226 \text{ nm}/(\text{L}/\text{s})^2$ 。

4.2 综合实验

把光纤光栅温度、压力、流量传感器组合到一起,通过耦合器连接到一起,把复合传感器连接到液压综合试验台上进行测试,监测液压油温度、压力及流量变化。并在液压回路中接入 WELKIN Model 2000 型应变片式靶式流量计、PT500-501 压力传感器,利用液压综合试验台油箱的内置温度测量装置测量油液温度。实验照片如图 9 所示。

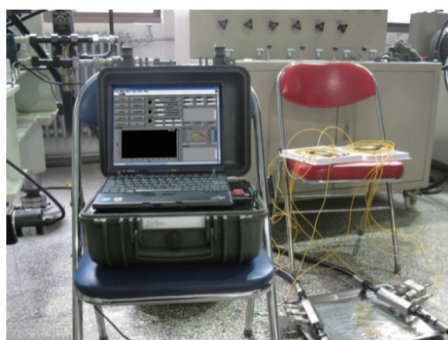


图9 综合实验照片图

Fig.9 Comprehensive experimental pictures

打开设备后,输入通过标定实验得知温度、压力、流量的相关计算参数,尔后根据传感器中心波长的不同,设置不同的波长范围。温度、压力、流量传感器中光纤光栅的中心波长分别为 1547.754、1565.336、1532.814 nm,则相应的波长范围设置为 1546.000~1549.000、1564.000~1567.000、1531.000~1534.000 nm。并根据标定实验的结果输入相对应的计算参数。

打开液压设备进行实验,在前面板上观测谱线变化及各个被测物理量的值。反射谱线如图 10 所示;温度、压力、流量的显示面板如图 11 所示。可知,此解调系统正确分辨了不同被测信号,并通过计算,实时显示了测量结果。

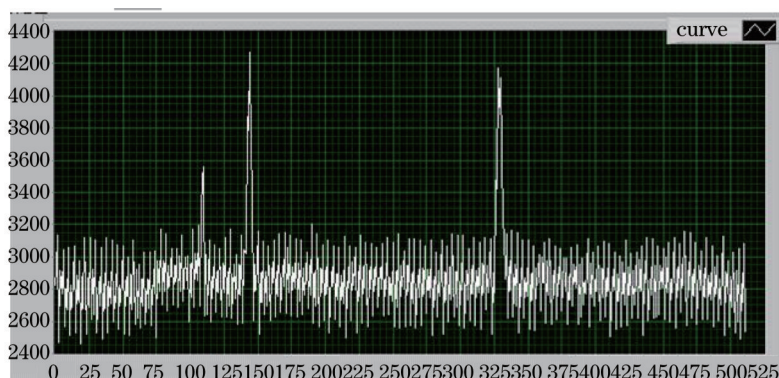


图 10 反射光谱图

Fig.10 Reflection spectrum

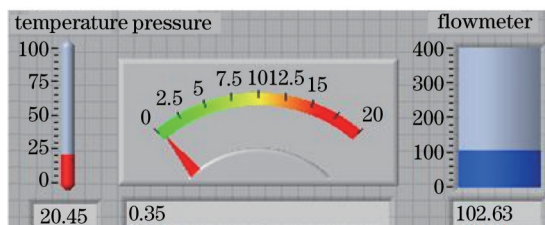


图 11 被测量实时显示界面

Fig.11 Measured real-time display interface

通过节流阀调节流量变化,每隔 1 min 对温度、压力、流量值分别进行记录,并与标准传感器进行比较。如图 12 所示,图(a)~(c)分别为温度、压力、流量的实验结果。由于光纤光栅温度传感器安装在复合传感器主阀体上,故随着时间的推移,阀体温度由于节流口对油液的作用而逐渐升高,而油箱中测温装置反映的是液压油

返回油箱后的温度,故阀体中油液温度较油箱中油液温度略高,图 12(a)中两条曲线有差异,变化趋势一致;本次试验没有负载,故油路压力基本保持不变,光纤光栅压力传感器的取油口在标准喷嘴的上游,喷嘴在油路中产生压差,故此处压力比油路中压力略高;光纤光栅流量传感器与标准传感器基本上一致。

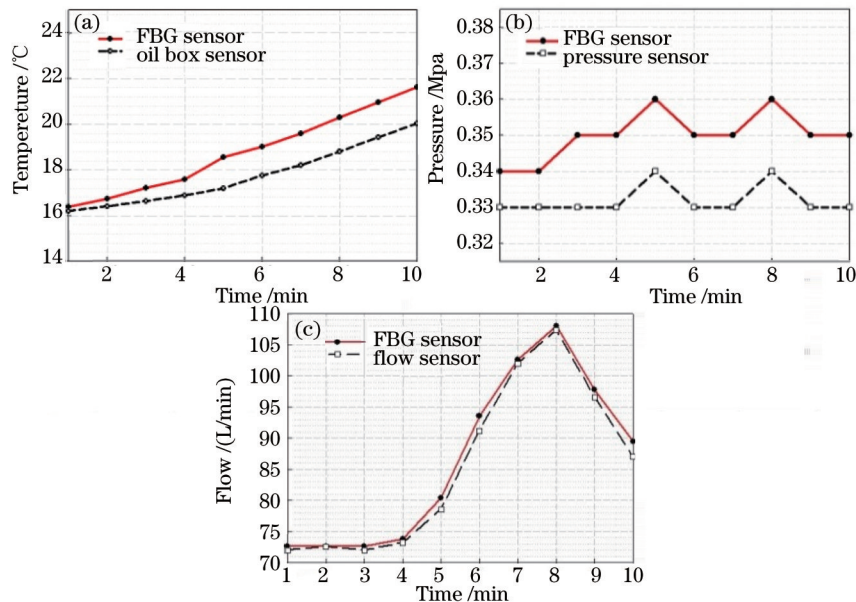


图 12 温度、压力、流量实验结果对比

Fig.12 Experimental results of temperature, pressure and flow

5 结 论

针对准分布式传感解调信息混杂、动态范围大等特点,自行搭建了FBG传感解调系统,以实验室现有的复合传感器为平台,基于LabVIEW软件,开发出一种适用于光纤光栅准分布式传感解调系统,使得承载有温度、压力、流量信息的波长变化智能区分,并通过相应计算将被测物理量实时显示。通过标定实验,得出相应的计算参数;通过综合实验,传感解调系统成功分辨出了不同物理量的波长值并直接显示被测量,使得光纤光栅的准分布式测量更加容易方便。

参 考 文 献

- 1 Chen Z, Yuan L, Hefferman G, *et al.*. Terahertz fiber Bragg grating for distributed sensing[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(10): 1084-1087.
- 2 Qin Yinhui, Liu Wenji, Jiang Hua, *et al.*. Application of FBG sensor in civil engineering detection[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2011, 31(8): 157-162.
覃银辉, 刘文吉, 蒋 华, 等. 光纤光栅传感器应用于土木工程检测的实验研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(8): 157-162.
- 3 Wang Chao, Yao Jianping. Ultrafast and ultrahigh-resolution interrogation of a fiber Bragg grating sensor based on interferometric temporal spectroscopy[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(19): 2927-2933.
- 4 Zhang Fan. Theory and Technology of Fiber Bragg Grating Sensor Network for Mechanical Equipment Condition Monitoring [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014.
张 帆. 机械装备状态监测的光纤光栅传感网相关理论与技术研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- 5 Yu Qian. Study on Optical Fiber Temperature Sensors for Human Body Temperature Monitoring[D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2012.
虞 倩. 高精度医用光纤温度传感器的研制及其特性研究[D]. 杭州: 中国计量学院, 2012.
- 6 Wang Yongjun, Liu Yongchao, Zhang Jingtao, *et al.*. Interrogation technology for high-speed and high-resolution fiber Bragg grating sensor system[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0205003.
王拥军, 刘永超, 张靖涛, 等. 高速高分辨率光纤布拉格光栅传感系统的解调技术[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0205003.
- 7 Au H Y, Kihjwiania S K, Fu H Y, *et al.*. Temperature-insensitive fiber Bragg grating based temperature sensor with large dynamic range [J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(11): 1714-1720.

- 8 Zhang Caixia, Zhang Zhenwei, Zheng Wanfu, *et al.*. Study of a quasi-distributed optical fiber sensing system based on ultra-weak fiber Bragg gratings[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0405004.
张彩霞, 张震伟, 郑万福, 等. 超弱反射光栅准分布式光纤传感系统研究[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0405004.
- 9 Markus J Schmid, Mathias S Muller. Measuring Bragg gratings in multimode optical fibers[J]. Optics Express, 2015, 23(6): 8087-8094.
- 10 Tang Zong. A FBG Temperature Demodulation System Based on LabVIEW Software Design[D]. Nanjing: Nanjing University, 2012.
唐宗. 基于LabVIEW的光纤光栅温度解调系统软件设计[D]. 南京: 南京大学, 2012.
- 11 Wang Guiying, Jin Jie, Lv Chengang. A novel fiber Bragg grating sensors interrogation system based on Labview[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2012, 34(6): 824-827.
王桂英, 金杰, 吕辰刚. 基于Labview的光纤光栅波长解调系统[J]. 压电与声光, 2012, 34(6): 824-827.
- 12 Deng Xiwang. The Research of FBG Sensor Demodulation System Based on NI Data Acquisition Module[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.
邓希望. 基于NI数据采集模块光纤光栅传感解调系统研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- 13 Li Hongcai, Liu Chun tong, Feng Yongbao, *et al.*. An embedded nozzle differential pressure style flow sensor based on FBG [J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2014, 25(10): 1886-1891.
李洪才, 刘春桐, 冯永保, 等. 一种内嵌喷嘴差压式FBG流量传感器[J]. 光电子·激光, 2014, 25(10): 1886-1891.
- 14 Hu Yurui, Tang Yuanhong, Li Chuan. Fiber Bragg grating flow sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2010, 23(4): 471-474.
胡玉瑞, 唐源宏, 李川. 光纤Bragg光栅流量传感器[J]. 传感技术学报, 2010, 23(4): 471-474.

栏目编辑: 刘丰瑞