

一种基于 FBG 的多功能复合流量传感技术

刘春桐 李洪才* 冯永保 蔡 伟 赵晓枫 杨志勇

第二炮兵工程大学, 陕西 西安 710025

摘要 针对传统流量测量中存在的测量灵敏度不高、测量参数单一, 传感器体积较大等不足, 提出一种基于光纤布拉格光栅(FBG)的多功能复合流量传感器。传感器以 FBG 差压式流量测量为结构主体, 同时有机集成了 FBG 温度和压力传感器, 从而实现对被测流体的流量、压力和温度的同时测量。在介绍 FBG 传感原理的基础上, 分析了毛细钢管封装 FBG 温度传感器和盲管式 FBG 压力传感器的工作机理。同时, 在分析差压式 FBG 流量传感器工作原理的基础上, 介绍了 FBG 多功能复合流量传感器的结构和实现原理。分别采用水浴装置、压力表校验仪和综合流量测试台对多功能复合传感器中的 FBG 温度、压力和流量传感器进行了传感特性实验。测试结果表明, FBG 温度传感器的灵敏度为 0.015 nm/°C, FBG 压力传感器的灵敏度为 0.028 nm/MPa, FBG 流量传感器的分辨率为 0.068 L/s。同时, 传感器的温度测量功能可作为参考, 从而克服 FBG 压力及流量测量中的温度交叉敏感效应。

关键词 光纤光学; 光纤布拉格光栅; 多功能; 流量传感; 压力; 温度

中图分类号 TP212; TN253 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.s106004

A Multi-Function Integrated Flow Sensing Technology Based on FBG

Liu Chun tong Li Hong cai Feng Yong bao Cai Wei Zhao Xiao feng Yang Zhi yong

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

Abstract In view of the problems such as the low measurement accuracy, single measuring parameter, large sensor volume are exist in the traditional flow measurement, and a multifunction integrated flow sensor based on fiber Bragg grating (FBG) is designed. The multifunction flow measurement using FBG differential pressure type flow measurement as structure body, and integrating FBG temperature and pressure sensor, thus the fluid flow, pressure and temperature are measured at the same time. On the base of introducing the FBG sensing principle, the capillary tube packaging FBG sensor and the blind-piple FBG pressure sensor working principle are analyzed. Meanwhile, on the basis of analysis the sensing principle of differential pressure type FBG flow sensor, the structure and realize principles of the multifunction FBG flow sensor are introduced. Using water bath, pressure gauge calibration meter and integrated flow test plantform, which test the sensing charactors of the FBG temperature, pressure and flow sensor within the multifunction FBG sensor. According to the test results, the sensitivity of FBG temperature sensor is 0.015 nm/°C, the sensitivity of FBG pressure sensor is 0.028 nm/MPa, and the sensitivity of FBG flow sensor is 0.068 L/s. At the same time, the temperature sensor is used as a reference, which can solve the temperature inter-sensitive effect in the FBG pressure and flow measurement.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; multi-function; flow sensing; pressure; temperature

OCIS codes 060.2370; 060.3735; 150.4232

1 引 言

在复杂机电设备液压系统的自动检测中, 流量、压力和温度等参数是系统在线监测中最常用到的重要参

收稿日期: 2015-01-25; **收到修改稿日期:** 2015-03-11

基金项目: 军内科研(EP113075)

作者简介: 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: liuct72@sinna.com

* **通信联系人.** E-mail: honghuang2009@163.com

数^[1-3]。随着技术的日益进步和工程应用的发展需求,传统的流量、压力和温度传感器仅对单一参数进行敏感,而且输出为弱电信号,容易受外界强电磁干扰及环境因素的影响^[4-5],不易实现多参量、多点位的分布式传感及远距离测试等功能。光纤布拉格光栅(FBG)作为一种新型光纤无源器件,通过特殊的封装和结构设计可以实现多种参量的高精度测量^[6-8]。与传统的电学类传感器相比,不仅具有体积小、重量轻、灵敏度高等优点,而且具备较强的抗电磁干扰能力,易于复用和构成传感网络^[9-11]。因此,非常适合工程领域复杂机电设备检测中高精度、多参数、分布式传感的技术需求。

基于FBG的温度及应变(应力)传感器的发展已经较为成熟,而FBG流量传感器多数仍处在实验室研究阶段^[12-14],且已报道的FBG流量传感器仍局限于对单个流量参数的测量,已难以满足当前复杂机电系统检测中多参数、分布式传感的发展需求。在流量测量的几种典型结构中,涡街和靶式结构流量计,均存在阻碍流体流动的可动部件,不适于高压及高速流体的测量,而差压式的流量测量则较为理想^[15-16]。但现有的几种差压式FBG流量传感器均未实现多个参数的同时测量,而且传感器的结构装配、密封设计和可维护性等尚存问题。这也是当前FBG流量传感器没能实现产品化的重要原因之一。针对上述问题,本文采用FBG为敏感元件,以FBG差压式流量测量为结构主体,同时集成FBG压力和温度传感器,使其能够实现对被测流体的流量、压力和温度的同时测量。传感器采用面密封结构,拆装维护方面,尤其适用于液压系统的传感测量。而且能够满足易燃易爆、强电磁辐射等恶劣环境条件下,以及远距离、分布式传感的技术需求。

2 FBG温度及压力传感的实现原理

2.1 FBG传感的基本原理

根据耦合模理论,对于宽带入射光,FBG周期性的折射率扰动仅会对波长范围很窄的一段光谱产生影响,即只有满足布拉格条件^[17]:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

光波才能被光栅所反射,其余的透射光谱则不受影响。由(1)式可知,中心反射波长 λ_B 随光栅的周期 Λ 和纤芯的有效折射率 n_{eff} 的改变而改变。温度和应变是FBG可直接敏感的物理量。温度通过热光效应和热膨胀效应来影响 λ_B ,应变则通过弹光效应和光栅周期的变化来影响 λ_B , λ_B 随应变和温度变化产生的漂移为^[18]

$$\Delta\lambda_B = (\alpha + \zeta)\lambda_B\Delta T + (1 - P_e)\lambda_B\epsilon = K_T\Delta T + K_\epsilon\epsilon, \quad (2)$$

式中 α 和 ζ 为光纤的热膨胀系数和热光系数, P_e 为光纤的有效弹光系数, ϵ 为轴向应变, K_T 、 K_ϵ 分别为FBG的温度和应变灵敏度系数。(2)式即为分析FBG传感的理论基础。

2.2 毛细钢管FBG温度传感原理

FBG本身就具有较好的温度灵敏性,但是由于裸FBG没有涂覆层的保护,极易折断,无法直接应用工程实际。实际使用中需要根据被测对象采取一定的封装措施和工艺,来满足使用环境的要求。结合液压系统中阀体温度测量的特点,采用毛细钢管的封装结构实现FBG对温度的测量,其结构原理图如图1所示。

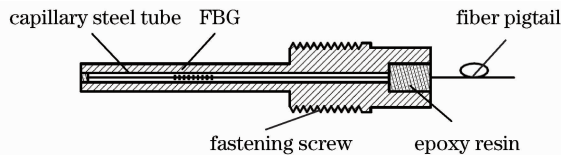


图1 FBG温度传感器结构原理图

Fig. 1 Structure schematic of FBG temperature sensor

当外界温度发生改变时,光栅就会产生热膨胀以及热光效应,从而引起FBG波长 λ_B 的变化。根据FBG的温度敏感机理, $\Delta\lambda_B$ 与温度变化 ΔT 之间的关系^[19]为

$$\Delta\lambda_B = (\alpha + \zeta)\lambda_B\Delta T = K_T\Delta T, \quad (3)$$

式中 α 为毛细钢管和光纤的综合热膨胀系数,表示光栅周期随温度的变化率, ζ 为FBG的热光系数,表示折射率随温度的变化率, K_T 为FBG的温度灵敏系数,与毛细钢管的物理性质以及封装工艺有关,理想情况下为一常数。

2.3 盲管式 FBG 压力传感原理

FBG 压力传感器采用盲管式封装结构,其结构原理如图 2 所示。FBG 在封装时进行预拉伸,通过盲管底部固定的弹性膜片感受流体压力的大小产生形变,从而带动 FBG 产生轴向应变,由于光栅周期的伸缩以及弹光效应,引起 λ_B 产生变化。

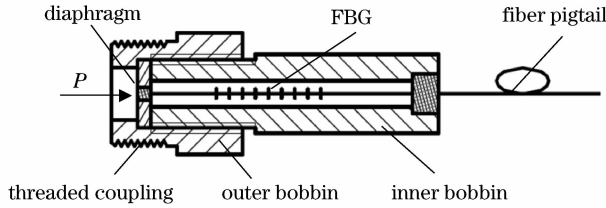


图 2 盲管式 FBG 压力传感结构原理图

Fig. 2 Structure schematic of blind pipe FBG pressure sensor

根据图 2 中的结构,弹性膜片在压力 P 的作用下将产生弹性变形,并引起 FBG 沿轴向产生应变 ϵ_z ,则由此引起的 FBG 中心波长变化量 $\Delta\lambda_B$ 为

$$\Delta\lambda_B = (1 - P_e)\epsilon_z \cdot \lambda_B. \quad (4)$$

由于 FBG 产生的轴向应变也可以认为是弹性膜片产生的切向形变量,而根据平面膜片的应变原理, ϵ_z 与其左侧敏感的压力 P 之间的关系^[20]为

$$\epsilon_z = K \frac{3P}{8t^2E}(1 - \nu^2)R^2, \quad (5)$$

式中 t 为膜片厚度, E 为膜片材料的杨氏模量, ν 为泊松比, R 为膜片的半径, K 为系数,其值与膜片尺寸有关。于是可以得到压力 P 与 FBG 产生的 $\Delta\lambda_B$ 之间的关系为

$$\Delta\lambda_B = K \frac{3(1 - P_e)R^2\lambda_B}{8t^2E}(1 - \nu^2) \cdot P. \quad (6)$$

(6)式即为盲管式 FBG 压力传感器的理论公式,当传感器的结构尺寸及材料均确定时,(6)式仅为 $\Delta\lambda_B$ 和压力 P 之间的线性函数关系。

3 FBG 多功能复合流量传感器的实现原理及结构设计

3.1 FBG 差压式流量传感原理

差压式流量传感的原理是在密封管道中引入节流装置,将流体流量信号转化为差压信号,然后通过传感器测量的差压值计算出流量大小。采用的 FBG 差压式流量传感结构如图 3(a)所示。由于标准喷嘴较孔板的测量精度高、压力损失小、使用寿命较长,因此选择标准喷嘴作为节流元件。FBG 沿径向粘贴在圆形膜片的中央位置,如图 3(b)所示。通过检测 FBG 的波长变化来获取流体经过喷嘴后形成的压差,进而计算出流量。

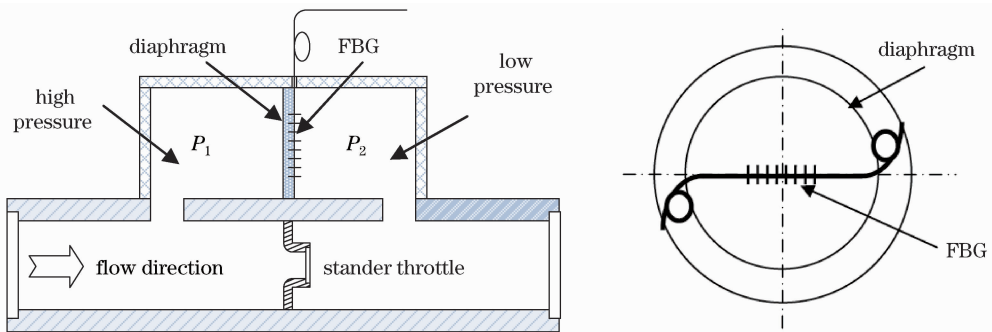


图 3 FBG 差压式流量传感结构原理图。(a)传感器结构原理图;(b)FBG 在膜片上的粘贴示意图

Fig. 3 Structure schematic of FBG differential pressure style flow sensor. (a)Structure schematic of the sensor;
(b)schematic of the FBG paste up on planar diaphragm

由于被测流体可视为不可压缩流体,流体的体积流量 Q_v 与经过喷嘴后两侧产生的压力差 ΔP 之间的关

系应为

$$\frac{1}{\lambda_B} \cdot \frac{d\lambda_B}{dT} = 2 \left(\frac{1}{n_{\text{eff}}} \cdot \frac{dn_{\text{eff}}}{dT} + \frac{1}{\Lambda} \cdot \frac{d\Lambda}{dT} \right), \quad (7)$$

式中 A_0 为喷嘴的面积, β 为喷嘴的直径比, ρ 为流体密度, 均为常量, 即流量 Q_v 与喷嘴产生的差压 ΔP 之间存在着确定的数学关系。

另外, 根据小挠度平面膜片的应变原理, 圆形膜片两侧存在压差 ΔP 时, 膜片将产生相应的应变^[20]。由于 FBG 的敏感栅区长度通常约 8~10 mm, 而 FBG 栅区各点受到的应变并不相同, 此时取 FBG 所受到的平均应变值, 于是可得到 FBG 的布拉格波长的偏移量为

$$\Delta\lambda_B = K \frac{3(1-\nu^2)(1-P_c)R^2\lambda_B}{8t^2E} \cdot \Delta P, \quad (8)$$

(8)式即为 FBG 差压式流量传感的特性方程。式中 t 为膜片厚度, E 为膜片材料的杨氏模量, ν 为泊松比, R 为膜片的半径, K 为系数, 其值与膜片尺寸、FBG 粘贴位置有关。当传感器结构及 FBG 选定之后, (8)式仅为布拉格波长的偏移量 $\Delta\lambda_B$ 与压差 ΔP 之间的关系式, 其余参量均为常数。

考虑到喷嘴作为节流元件时 Q_v 与 ΔP 之间的(7)式, 与(8)式联立, 可得

$$\Delta\lambda_B = K \frac{3\rho(1-\nu^2) \cdot (1-P_c)(1-\beta^4) \cdot R^2 \cdot \lambda_B Q_v^2}{16t^2EA_0^2}, \quad (9)$$

(9)式即为采用标准喷嘴时 FBG 流量传感器的布拉格波长漂移量 $\Delta\lambda_B$ 与被测流体流量 Q_v 之间的关系式, 也是该结构进行传感测量的理论依据。

3.2 FBG 多功能复合流量传感器的结构实现原理

根据上述 FBG 针对温度、压力和流量的传感原理, 为了实现基于 FBG 的多参数测量的有机集成, 以 FBG 差压式流量测量为基础结构, 在进出口附近设置 FBG 压力传感器; 同时在传感器的主阀体结构上安装 FBG 温度传感器, 用于测量被测流体的温度变化。从而实现基于 FBG 的流量、压力和温度同时测量的多功能流量传感, 其结构原理如图 4 所示。

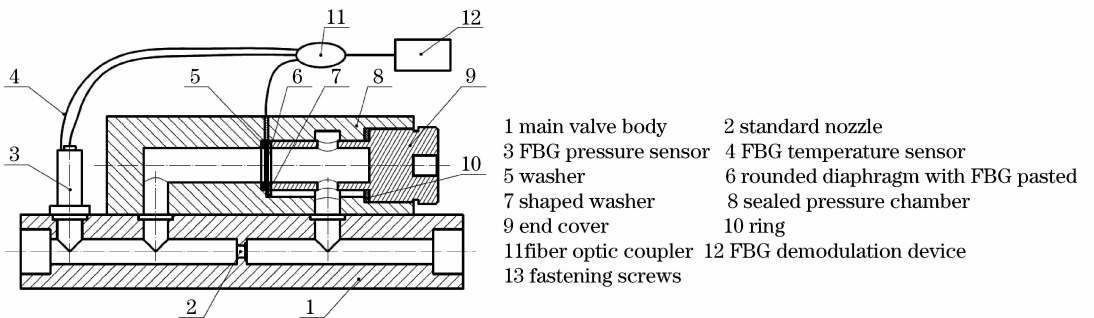


图 4 基于 FBG 的压差式流量传感器结构原理

Fig. 4 Structure schematic of differential pressure style flow sensor based on FBG

由图 4 可知, 主阀体两端留有管接头螺纹用于与被测管道的连接, 传感器的左侧为被测流体的入口, 喷嘴位于阀体管道的中间位置。低压和高压引油口分别位于喷嘴的前后两侧, 并分别将被测流体引入低压腔和高压腔。圆形膜片安装在高低压腔体之间, FBG 沿径向粘贴在膜片上, 用于敏感膜片两侧流体的压力差。

为了检测被测流体的压力, 在靠近左侧的入口处设置了测压孔, 采用上述的 FBG 压力传感器实现。同时, 在主阀体上预留了安装 FBG 温度传感器的测温小孔, 利用上述的 FBG 温度传感器实现对被测流体温度的测量。为了减小传感器的体积, 且便于传感器的安装及使用, 该结构的主阀体与取压腔之间采用面密封结构。密封端盖用于压紧圆形膜片, 垫片用于实现高压流体侧的密封。

该传感器可通过光纤耦合器实现对流量、压力和温度的同时测量, 便于充分利用 FBG 波长编码的独特优点。其中, FBG 温度传感器还可作为对流量、压力测量的温度解耦或补偿, 从而解决 FBG 的交叉敏感问题。

4 实验结果及分析

为了验证 FBG 多功能复合流量传感器的传感特性,分别选择中心波长为 1547.774、1551.664 和 1530.021 nm 的 FBG 作为温度、压力和流量传感器的敏感元件,并进行传感器样品的制作和封装。FBG 中心波长的测量采用分辨率为 1 pm 便携式 FBG 解调仪,该解调仪内部集成了超辐射发光二极管(SLED)光源模块和高速解调模块,波长测量范围为 1520~1570 nm。图 5 为利用 1×3 耦合器将 FBG 温度、压力和流量传感器同时接入 FBG 解调仪中的软件测量界面。

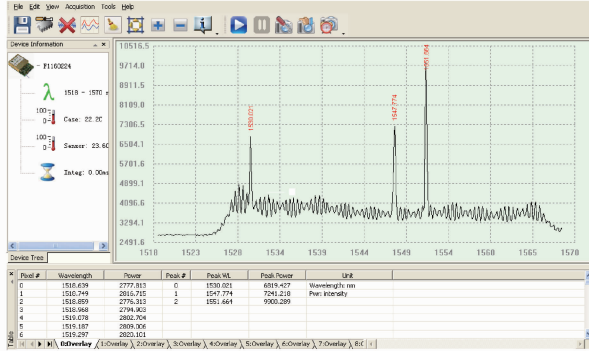


图 5 FBG 解调仪的软件测量界面

Fig. 5 Software measurement interface by FBG demodulator

从图 5 可以看出,3 个不同中心波长的 FBG 被明显区分开来,由于不同中心波长的 FBG 代表了不同的物理量,因此可以根据相应 FBG 中心波长的变化量,利用(3)、(6)和(9)式分别得到对应参量的值。由于该传感器中的各个 FBG 传感器的功能相对独立,分别针对 FBG 温度、压力和流量传感器进行传感特性实验。

4.1 FBG 温度传感器的特性测试

考虑到水的比热容较大,利用水浴实验装置可实现温度的缓慢上升和精确测量,实验中将毛细钢管封装的 FBG 温度传感器与分辨率为 0.1 °C 的 Pt100 热电阻温度传感器固定在一起,放入水浴装置内。从室温至 80 °C,每隔 1 °C 记录 FBG 温度传感器的中心波长。将测量结果进行处理,如图 6 所示。

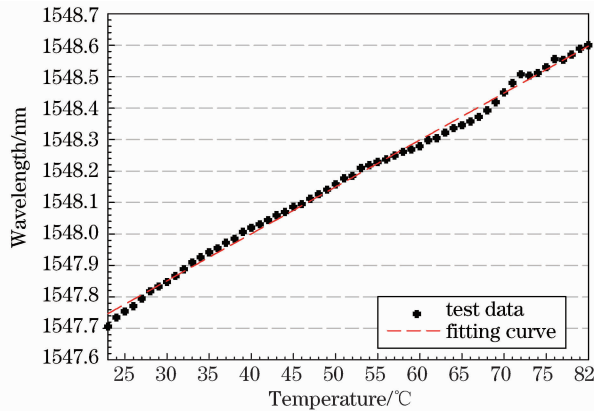


图 6 FBG 温度传感器的实验测量结果

Fig. 6 Test measurement results of FBG temperature sensor

从实验结果可以看出,FBG 温度传感器的中心波长随温度的上升逐渐呈线性增加,这与(3)式的规律相符合。在温度增加至 60 °C 以上时测量数据稍有波动,这主要是由于传感器中毛细钢管两端采用了环氧树脂封装,而环氧树脂受热后产生非线性膨胀所致。在对温度并非需要精确测量的场合,仍可以满足多数应用需求。利用最小二乘法对上述实验结果进行拟合,可得拟合曲线为

$$\lambda_T = 1547.404 + 0.015T. \quad (10)$$

根据拟合结果可知该传感器的温度灵敏度为 0.015 nm/°C,由于所采用的 FBG 解调仪的分辨为 1 pm,从而可得 FBG 温度传感器的分辨率约为 0.07 °C。

4.2 FBG 压力传感器的特性测试

考虑到液压系统工作时的压力工况,FBG 压力传感器设计时的许用压力为 35 MPa。实验中选用压力表校验仪来实现对 FBG 压力传感器进行实验,将制作封装好的 FBG 压力传感器固定在压力表校验仪的一端,另一端安装标准压力表(分辨率为 0.1MPa)作为实验参照。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;当压力达到 30 MPa 时再逐步卸荷,仍隔 1 MPa 时保持一段时间,直至压力恢复至 0 MPa,记录在整个过程的 FBG 压力传感器的中心波长值,实验测量数据如图 7 所示。

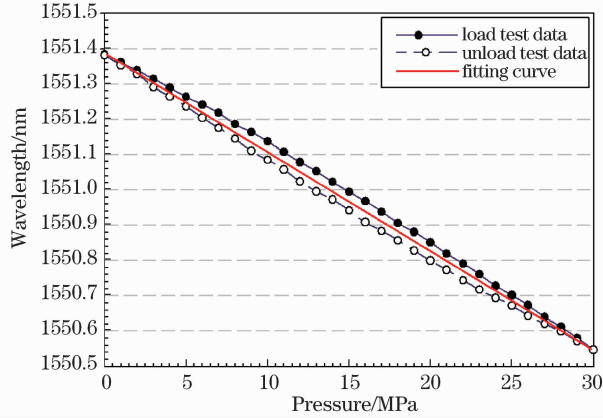


图 7 FBG 压力传感器加载及卸载实验测量结果

Fig. 7 Load and unload test results of FBG pressure sensor

从实验结果中可以看出,在对 FBG 压力传感器逐渐加压和卸荷的情况下,FBG 的中心波长变化与压力变化基本呈线性变化关系,这与(6)式中所推导的结论基本相符。利用最小二乘法对上述测量数据进行线性拟合可得

$$\lambda_P = 1551.388 - 0.028P. \quad (11)$$

根据拟合结果可知,该 FBG 压力传感器的灵敏度约为 -0.028 nm/MPa ,负号表示当压力增大时,传感器的 FBG 中心波长逐渐减小。从而可以得到该传感器在 0~30 MPa 的测量范围内的压力分辨率为 0.036 MPa。此外,实验中发现压力加载和卸荷过程中,传感器存在一定的迟滞效应,其最大迟滞对应的波长差值约为 0.5 nm,对应的压力差值约为 2 MPa。

4.3 FBG 流量传感器特性测试

与温度和压力测量属于静态测量不同,流量属于动态测量,实验装置较为复杂。实验中利用液压综合试验台来对 FBG 流量传感器的流量特性进行测试,其实验原理如图 8 所示。

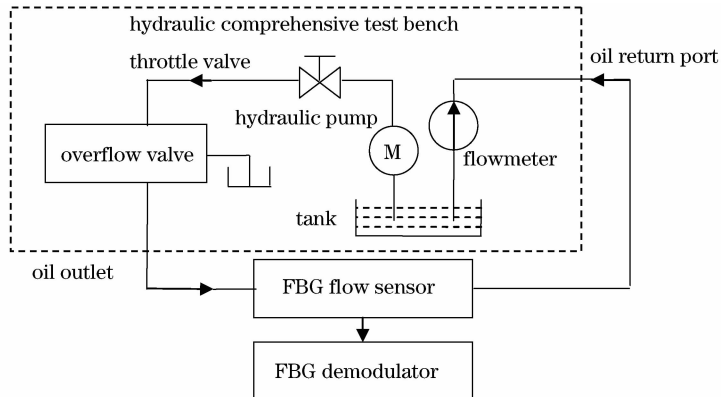


图 8 FBG 流量传感器传感特性实验原理图

Fig. 8 Experimental principle of FBG flow sensor characteristics

实验中通过管接头将 FBG 流量传感器与实验台的进、出油口进行连接,构成液压回路。系统中的溢流阀用于调定系统工作的最高压力,起保护作用。节流阀则串联于 FBG 流量传感器的前端,用于实现液压系

统流量大小的调节。实验中,通过逐步调节液压综合实验台中节流阀的开口大小,实现改变流量大小的调节,同时记录流量表的示值和 FBG 流量传感器的波长变化。经过对所测得的数据进行处理,可得 FBG 流量传感器随着流量的变化,其波长的变化趋势如图 9 所示。

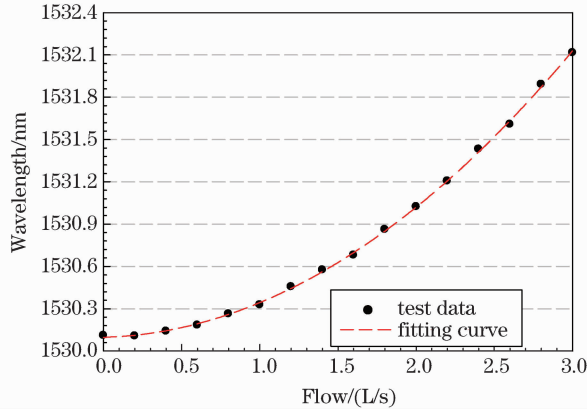


图 9 FBG 流量传感器的波长随流量的变化曲线

Fig. 9 Wavelength variation curve of FBG flow sensor varies with the flow

从图 9 中测量数据的变化趋势可以看出,该曲线呈现出二次函数曲线的变化规律,这与(9)式中所揭示的 FBG 流量传感器的波长变化量与被测流体流量的平方成正比的规律相符合。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

$$\lambda_B = 1530.097 + 0.215Q^2. \quad (12)$$

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 $0.215 \text{ nm}/(\text{L}/\text{s})^2$ 为该传感器的灵敏度。当采用分辨率为 1 pm 的解调仪时,经过换算,该 FBG 流量传感器的分辨率为 $0.068 \text{ L}/\text{s}$ 。

5 结 论

针对传统流量检测中存在的测量灵敏度不高、测量参数单一,传感器体积较大等不足,设计了一种基于 FBG 的多功能复合流量传感器。传感器以 FBG 差压式流量测量为结构主体,同时有机集成了 FBG 温度和压力传感器,从而实现对被测流体的流量、压力和温度的同时测量。论文在分析差压式 FBG 流量传感器工作原理的基础上,介绍了 FBG 多功能复合流量传感器的结构和实现原理。分别采用水浴装置、压力表校验仪和综合流量测试台对多功能复合传感器中的 FBG 温度、压力和流量传感器进行了传感特性试验。测试结果表明,FBG 温度传感器的灵敏度为 $0.015 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,FBG 压力传感器的灵敏度为 $0.028 \text{ nm}/\text{Mpa}$,FBG 流量传感器的分辨率为 $0.068 \text{ L}/\text{s}$ 。同时,传感器的温度测量功能可作为参考,克服 FBG 压力及流量测量中的温度交叉敏感效应。该传感器具有测量灵敏度较高、体积紧凑、环境适应能力强,不受电磁干扰和机械振动的影响,且易于实现传感复用并构成准分布式检测网络,因此在大型机电设备液压系统的自动检测及故障诊断方面具有比较优势和广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Shan H. Study of micro power ultrasonic wave flow meter [C]. IEEE 2013 Fourth International Conference on Digital Manufacturing & Automation, 2013, 29-30: 1245-1248.
- 2 Zhou Rusheng, Jiao Zongxia, Wang Shaoping. Current research and developing trends on fault diagnosis of hydraulic systems [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(9): 6-13.
周汝胜, 焦宗夏, 王少萍. 液压系统故障诊断技术的研究现状与发展趋势[J]. 机械工程学报, 2006, 42(9): 6-13.
- 3 Zhang Jiali, Wang Ming, Cai Dongyan, *et al.*. A fiber Fabry-Perot micro pressure sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0428002.
朱佳利, 王 鸣, 蔡东艳, 等. 光纤法布里-珀罗微压传感器[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0428002.
- 4 Chen Jianjun, Zhang Weigang, Tu Qinchang, *et al.*. High-sensitivity flow velocity sensor based on fiber grating [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(8): 1136-1139.
陈建军, 张伟刚, 涂勤昌, 等. 基于光纤光栅的高灵敏度流速传感器[J]. 光学学报, 2006, 26(8): 1136-1139.
- 5 Li Hongmin, Gao Hongwei, Liu Bo, *et al.*. A novel fiber Bragg grating flowmeter [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2006, 19(4): 1195-1197.
李红民, 高宏伟, 刘 波, 等. 一种新型的光纤光栅测流传感器[J]. 传感技术学报, 2006, 19(4): 1195-1197.

- 6 Li Hongcai, Liu Chuntong, 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.
- 7 Liu Chuntong, Li Hongcai, Zhang Zhili, *et al.*. Study on the sensing characteristics of fiber Bragg grating packaged by aluminum alloy slice [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2008, 19(7): 905-908.
刘春桐, 李洪才, 张志利, 等. 铝合金封装光纤光栅传感特性研究[J]. 光电子 • 激光, 2008, 19(7): 905-908.
- 8 Tong Z, Wang J, Zhang W, *et al.*. Simultaneous measurement of refractive index, temperature and strain based on core diameter mismatch and polarization-maintaining FBG [J]. Optoelec Tronics Letters, 2013, 9(3): 0238-0240.
- 9 Yu T, Yang M, Gang X, *et al.*. Magnetic field sensor based on fiber Bragg grating with a spiral microgroove ablated by femtosecond laser [J]. Opt Lett, 2013, 21(14): 17386-17391.
- 10 Wang Yubao, Lan Haijun. Study of fiber Bragg grating sensor system based on wavelength-division multiplexing/time-division multiplexing [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(8): 2196-2201.
王玉宝, 兰海军. 基于光纤布拉格光栅波/时分复用传感网络研究[J]. 光学学报, 2010, 30(8): 2196-2201.
- 11 Jiang M, Sui Q, Jia L, *et al.*. FBG-based ultrasonic wave detection and acoustic emission linear location system [J]. Optoelectronics Letters, 2012, 8(3): 220-223.
- 12 Li Chuan, Zhao Cong, Xu Jiangchun. Target Type Fiber Grating Liquid Flowmeter; China, 20090094845.0[P]. 2010-01-20.
李 川, 赵 聪, 许江淳. 靶式光纤光栅液体流量计; 中国, 20090094845.0[P]. 2010-01-20.
- 13 Jiang Qi, Yang Meng, Gao Fangfang. Double-Fiber Bragg Grating Differential Pressure Flowmeter; China, 201220063173.4[P]. 2012-11-21.
蒋 奇, 杨 猛, 高芳芳. 双光纤光栅压差流量计; 中国, 201220063173.4[P]. 2012-11-21.
- 14 Cui Jiancheng, Xiao Boxuan, Song Yansheng, *et al.*. Flow Rate Device Provided with Small-Caliber High-Pressure Spray Nozzle and Based on Fiber Grating Micro-Pressure-Difference Sensing; China, 201220353252.9[P]. 2013-01-02.
崔建成, 肖博轩, 宋彦圣, 等. 基于光纤光栅微压差传感的微小管径高压喷嘴流量装置; 中国, 201220353252.9[P]. 2013-01-02.
- 15 Zhao Hongxia, Bao Jilong, Chen Ying. Bending sensing rules for long period fiber gratings[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(9): 1681-1685.
赵红霞, 鲍吉龙, 陈 莹. 长周期光纤光栅弯曲传感特性[J]. 光学学报, 2008, 28(9): 1681-1685.
- 16 Wei T. Simultaneous sensing of displacement and temperature with a single FBG [J]. Optoelectronics Letters, 2011, 7(1): 26-29.
- 17 D Roberson, P Niewczas, J R. McDonald, *et al.*. Interrogation of a dual-fiber-Bragg-grating sensor using an arrayed waveguide grating [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(6): 2641-2645.
- 18 Yu Dakuan, Jia Zhenan, 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.
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.
- 19 Sun Li, Yue Chuanyun, Song Yansheng. Analysis and modication of demarcate error of FBG sensor by equal [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2007, 18(7): 776-779.
孙 丽, 岳川云, 宋岩升. 基片式光纤布拉格光栅传感器应变传递分析[J]. 光电子 • 激光, 2007, 18(7): 776-779.
- 20 Peng Xingling, Zhang Hua, Li Yulong. Thermal stress and the associated photoelastic effect of the metal coated fiber loop [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1106004.
彭星玲, 张 华, 李玉龙. 金属镀层光纤环的热应力及其引起的弹光效应[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1106004.

栏目编辑: 苏 岑