

doi: 10.3788/gzxb20164511.1106001

基于 FBG 的液压系统中流量/压力/温度同时测量技术

刘春桐, 张正义, 李洪才, 何祯鑫, 赵晓枫, 吴荣晶

(火箭军工程大学 发射工程系, 西安 710025)

摘 要: 针对传统液压系统检测中存在的传感器功能单一、体积较大、测量精度不高等问题, 提出一种光纤光栅复合传感器. 该传感器以一体化的靶片式流量传感结构为基础, 融合光纤光栅压力和温度传感器, 可以实现对液压系统流量、压力和温度的同时测量. 在对各参数传感模型理论分析的基础上, 对传感器的结构进行设计, 并制作了传感器实物. 利用液压综合试验系统等设备对传感器进行了性能测试和参数标定, 得到其流量灵敏度为 0.049 L/s, 压力灵敏度为 28.4 pm/Mpa, 温度灵敏度为 14.9 pm/°C, 验证了传感器设计的合理性. 同时, 传感器的温度测量功能可在流量和压力测量中作为参考, 克服温度的交叉敏感效应, 提高传感器的环境适应能力.

关键词: 光纤布喇格光栅; 液压系统; 多功能传感; 流量; 压力; 温度

中图分类号: TN235

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)11-1106001-7

Flow/Pressure/Temperature Simultaneous Measurement Technology in Hydraulic System Based on FBG

LIU Chun-tong, ZHANG Zheng-yi, LI Hong-cai, HE Zhen-xin, ZHAO Xiao-feng, WU Rong-jing
(Emission Department of Engineering, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: In view of the sensor problems, such as insufficient function, large size, low measurement accuracy, existing in the conventional detection methods for the hydraulic system, a compound sensor based on fiber Bragg grating was designed. On the basis of the integration of target-type flow sensor, the sensor combines with fiber Bragg grating temperature and pressure sensor simultaneously, so the flow, pressure and temperature of hydraulic system can be measured simultaneously. Based on theoretical analysis of each parameter sensing model, the sensor structure was designed, and the sensor was produced in practice. The equipments such as hydraulic pressure colligation test system were used for the sensor performance testing and calibration. The results show that, the flow measurement sensitivity of the sensor is 0.049 L/s, the pressure sensor measurement sensitivity is 28.4 pm/Mpa, the temperature sensor measurement sensitivity is 14.9 pm/°C, and the sensor design reasonableness is verified. Meanwhile, the temperature measuring function of the sensor can be used as a reference fiber Bragg grating, when the fiber Bragg grating flow and pressure sensor are used in measurement, which can overcome the crossed sensitivity with temperature, and improve the sensor adaptability.

Key words: Fiber Bragg grating; Hydraulic system; Multifunction sensing; Flow; Pressure; Temperature

OCIS Codes: 060.0060; 060.3738; 280.0280; 280.4788

基金项目: 国家自然科学基金(No. 41404022)和陕西省自然科学基金(No. 2015JM4128)资助

第一作者: 刘春桐(1972-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光电技术、光纤传感技术及应用. Email: liuchuntong2001@163.com

通讯作者: 张正义(1993-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤光栅传感技术. Email: 13022719922@163.com

收稿日期: 2016-05-25; 录用日期: 2016-09-01

0 引言

在特种车辆液压系统检测领域中,油路的流量、压力和温度是系统工作状态监测和故障分析需要的重要参数^[1]. 液压系统检测中传统的传感元件多数属于电学元件,其本身产生的静电及电火花等会给系统安全带来不确定因素,并且容易遭受强电磁干扰等外界恶劣环境状态的影响^[2]. 传统的液压系统检测传感器存在着体积大、灵敏度不高、测量参数单一、检测点数受限、不易实现网络化测试等不足,单一参数的测量已不能满足分布式传感及信息化、网络化测控的发展需求.

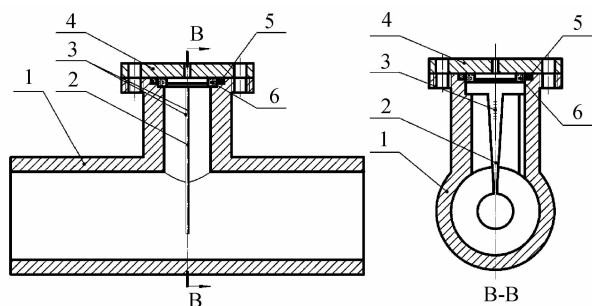
光纤布喇格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)是一种新型光纤无源器件,其与传统的电学类传感元件有本质的区别^[3];它主要利用光波作为传感传输的载体,光纤作为传输的媒介,栅区部分作为敏感元件,感知和检测被测参量的变化^[4-5]. 因此,光纤光栅传感器在继承了光纤传感器质量轻、尺寸小、抗电磁干扰、便于远距离传输等优点的同时,还具备灵敏度高、不受入射光强度波动的影响、便于组成传感网络等诸多优点^[6-8].

利用 FBG 对应变的敏感原理,禹大宽等^[9]基于靶式结构利用两个 FBG 实现了流量、温度的同时测量. 王正方等^[10]采用靶式流速测量结构,把流速参数转换为 FBG 可直接敏感到的应变参数,实现了对流速的测量. Pachava V R 等^[11]通过测量施加压力与 FBG 中心波长的线性关系,实现了对压力的测量. 李洪才等^[12]设计了一种内嵌喷嘴差压式 FBG 流量传感器,测试了其静压特性和动态流量特性. 然而,以上多是针对单个参数的传感研究,专门针对液压系统在高温高压环境下,进行温度、压力和流量同时测量的研究鲜有报道. 本文融合流量、压力和温度传感于一体,研制了一种便于实现准分布式传感及网络化测试的光纤光栅多功能传感器,可应用于高温高压、强电磁干扰、易燃易爆等恶劣环境中.

1 传感器设计

1.1 一体式靶式 FBG 流量传感器设计

设计的一体式靶式流量传感器如图 1,由等强度悬臂梁和阻流靶片构成的一体式靶片,利用线切割的方法进行整体加工;悬臂梁安装时须保证阻流靶片的圆心与测量管道的轴线重合,阻流靶片与流体流速的方向垂直,这主要依靠主阀体顶端凸台部分的凹槽来实现;两个中心波长一致的 FBG 对称粘贴于悬臂梁两侧的中心轴线位置,形成差动结构. 通过被测流体对阻流靶片的冲击力,带动悬臂及粘贴其两侧的 FBG 产生形变,从而根据中心反射波长的偏移量,实现对被测流体流量大小的测量.



1, Valve body; 2, One-piece body target; 3, FBG; 4, Hermetically end closure; 5, Type O sealing ring seal end cover; 6, Polytetrafluoroethylene gasket

图 1 一体式靶式流量传感器

Fig. 1 One-piece flow sensor target type

当流体冲击靶片时,靶片所受的冲击力由流体动压力、流体静压力(压力差)和粘滞摩擦力三部分组成,当流体流量较大时流体动压力和静压力起主要作用. 设流体密度为 ρ ,靶片面积为 A_1 ,局部阻力系数 ζ ,流体在圆形靶片前侧的平均流速为 v_0 ,压力为 p_0 ,通过靶片与管道环形孔隙时的平均流速为 v ,压力为 p ,由伯努利方程推导得出

$$A_1(p_0 - p) + A_1\left(\frac{\rho v_0^2}{2} - \frac{\rho v^2}{2}\right) = \frac{1}{2}\rho\zeta v^2 A_1 \quad (1)$$

式中, $A_1(p_0 - p)$ 为流体作用在靶上的静压力,记为 F_1 ; $A_1(\rho v_0^2/2 - \rho v^2/2)$ 为作用在靶上的动压力,记为 F_2 ; 作用在靶片上的合力为 $F = F_1 + F_2$,则流体流速与靶片所受流体冲击力之间的关系为

$$F = \frac{1}{2}\rho\zeta v^2 A_1 \quad (2)$$

流体流动对靶片的冲击力作用到悬臂梁上,对称粘贴在等强度悬臂梁两侧中心轴线上的 FBG 将发生形变,从而使其中心波长发生相应的偏移. 迎着流体方向粘贴的 FBG 的中心波长将增大,背着流体方向粘贴的 FBG 的中心波长将减小,其偏移量大小相等. 由于两个 FBG 处在同一温度场中,温度变化引起的波长偏移量相等,则两个 FBG 波长的变化量分别表示为

$$\Delta\lambda_{B1}/\lambda_B = (1 - P_e)\epsilon + (\xi + \alpha)\Delta T \quad (3)$$

$$\Delta\lambda_{B2}/\lambda_B = -(1 - P_e)\epsilon + (\xi + \alpha)\Delta T \quad (4)$$

双 FBG 波长变化总量与所受轴向应变之间的关系可表示为

$$\Delta\lambda = \Delta\lambda_{B1} - \Delta\lambda_{B2} = 2\epsilon(1 - P_e)\lambda_B \quad (5)$$

式(5)即可说明双 FBG 构成的差动结构在提高灵敏度的同时,可有效克服温度-应变交叉敏感问题. 由力学原理可知,等强度悬臂梁表面应变 ϵ 与自由端所受力 F 的关系为^[13]

$$\epsilon = \frac{6FL}{Ebh^2} \quad (6)$$

式中, b 、 h 分别为等强度悬臂梁的底部宽度和厚度, L 为自由端的长度, E 为材料的杨氏模量.

联立式(5)、(6)可得波长变化总量与自由端加载力 F 之间的关系为

$$\Delta\lambda = \frac{12FL}{Eb^2h^2} (1 - P_e) \lambda_B \quad (7)$$

假定管道中油液为不可压缩流体,根据流体总流的连续性方程,假设 A_2 为管道内径 D 和靶径 d 之间的环隙面积,则联立式(2)、(6)、(7)可得流过 A_2 的流量为

$$Q = A_2 v = (D^2 - d^2) \sqrt{\frac{\pi b h^2 E}{24 \lambda_B (1 - P_e) L \zeta \rho d^2}} \cdot \sqrt{\Delta\lambda} = K_Q \cdot \sqrt{\Delta\lambda} \quad (8)$$

对于典型的石英光纤, $P_e = 0.22$; 悬臂梁尺寸及靶片尺寸确定后, b, h, L, E 均为常数; 对于特定流体, ρ, ζ 为定值. 由式(8)易知, 流体流量的大小与 FBG 波长偏移量的平方根成正比, 或者说 FBG 波长偏移量与流量的平方成正比.

1.2 膜片式 FBG 压力传感器设计

把 FBG 粘贴在压力圆膜片上, 圆膜片在压力油液的作用下发生形变, 从而带动与膜片固联的 FBG 发生相应的形变, FBG 的中心波长发生偏移, 通过测量中心波长的偏移量即可得知油液的压力.

由小挠度平面膜片的应变原理可知, 圆形平面膜片在压力差 ΔP 的作用下, 低压一侧膜片表面会受到径向应力和切向应力的作用, 即存在径向应变 ϵ_r 和切向应变 ϵ_t , 分别为

$$\begin{cases} \epsilon_r = \frac{3\Delta P}{8t^2 E} (1 - u^2) (R^2 - 3r^2) \\ \epsilon_t = \frac{3\Delta P}{8t^2 E} (1 - u^2) (R^2 - r^2) \end{cases} \quad (9)$$

式中, t 为圆形平面膜片的厚度, R 为半径, u 为泊松比. 由式(9)可知, 圆形平面膜片表面圆心位置的应变为

$$\epsilon_r = \epsilon_t = \frac{3\Delta P}{8t^2 E} (1 - u^2) R^2 \quad (10)$$

将 FBG 沿直径方向粘贴在圆形平面膜片中心位置. 由于 FBG 直径很小, 故切向应变可忽略不计, 其主要受到径向应变的作用; 由于栅区有一定的长度 (10 mm 左右), 不同点位所受到的应变大小各不相同, FBG 的平均应变可等效表示为

$$\epsilon = K \frac{3\Delta P}{8t^2 E} (1 - u^2) R^2 \quad (11)$$

式中, K 为等效系数, 其值大小与圆形平面膜片的直径、厚度、选材以及 FBG 粘贴位置有关.

假设光纤光栅压力传感器使用过程中温度保持不变, 即 FBG 只受圆形平面膜片径向应变的作用, 其中心波长的偏移量为

$$\Delta\lambda = K \frac{3}{8t^2 E} (1 - u^2) R^2 \cdot (1 - P_e) \lambda_B \cdot \Delta P =$$

$$K_p \cdot \Delta P \quad (12)$$

由式(12)可知, 当圆形平面膜片的直径、厚度、材质确定之后, R, t, E, u 即为定值, 对于特定的粘贴方式, 对应有固定的 K 值, 压力灵敏系数 K_p 恒定不变. 由此可知, 中心波长的偏移量 $\Delta\lambda$ 与差压 ΔP 之间呈良好的线性关系.

光纤光栅压力传感器如图 2, 其主要由上端盖、膜片、基体、管接头、O 型密封圈五部分组成. 基体为截面积为正方形的长方体, 由硬铝合金加工而成, 下部通过螺纹与管接头连接, 利用组合垫圈实现密封; 中部打孔贯通上下; 上部打有 2 mm 高的台阶孔, 此处放置 O 型密封圈实现与压力膜片紧密连接. 上端盖亦对应打有 2 mm 高的台阶孔, 放置密封圈的同时, 给压力膜片受压变形提供足够的空间. 整个装置通过管接头接入液压油路中, 压力油流经基体作用在压力膜片上, 基体与上端盖之间通过 4 枚螺钉对膜片进行紧固. 由于圆形压力膜片不易加工、装配, 这里选用正方形压力膜片, 如图 3. 膜片上下各自放置有一个 O 型密封圈, 一方面对油液进行密封, 另一方面压紧膜片, 使方形膜片在压力检测过程中的工作区域实质为圆形, 则其在压力计算中可等效为圆形膜片.

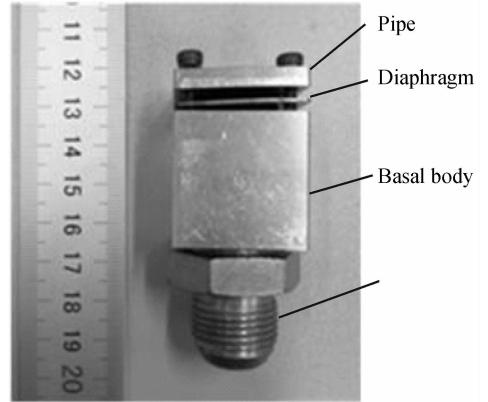


图 2 光纤光栅压力传感器
Fig. 2 Fiber Bragg grating pressure sensor

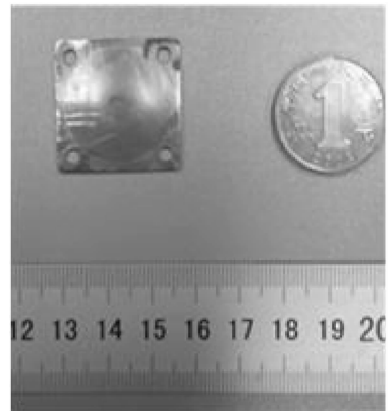


图 3 压力膜片
Fig. 3 Pressure diaphragm

1.3 毛细钢管式 FBG 温度传感器设计

裸光纤光栅具有较好的温度特性,但其温度灵敏度较低,而且裸光纤光栅没有涂覆层的保护,极易折断,故无法直接应用于工程实际的测量,使用过程中必须采用一定的结构形式和封装工艺,来满足光纤光栅温度传感器测量精度和使用环境的要求^[14].

在对 FBG 封装过程中,如果选用热膨胀系数较大的基底材料对其进行嵌入式封装,当温度改变时,封装材料的热膨胀效应会带动 FBG 的栅距发生相应的变化,因此这种封装方式在保护光栅的同时可有效提高 FBG 的温度灵敏度^[15].

对于热膨胀系数 B 较大的基底材料,当外界温度改变时,材料产生的应变与温度变化量间的关系为

$$\epsilon = B\Delta T \quad (13)$$

将 FBG 采用嵌入的方式封装于基底材料中, η 是材料与光栅偶联质量有关的常数,材料热膨胀而带动 FBG 的栅距发生变化,即

$$\epsilon' = \eta\epsilon = \eta B\Delta T \quad (14)$$

此时,当外界温度发生变化时,FBG 受到温度和应变的同时作用,FBG 中心波长的偏移量为

$$\Delta\lambda_B = (K_T + \eta BK_\epsilon)\Delta T \quad (15)$$

式中, K_T 为 FBG 的温度灵敏系数, K_ϵ 为 FBG 的应变灵敏度系数.由式(15)易知:当封装材料选定之后, η 、 B 恒定不变,则 FBG 中心波长的偏移量与温度的变化量之间成线性关系,这种封装方式有效提高了 FBG 的温度灵敏度.

根据在液压检测中的应用背景、测量特点及 FBG 温度传感器的封装要求,设计了封装于毛细钢管的光纤光栅传感器,如图 4.选用毛细钢管作为基底材料,主要是由于它具有较大的热膨胀系数和良好的导热性能,可以尽可能降低被测对象到 FBG 之间的热阻导致的温度梯度.

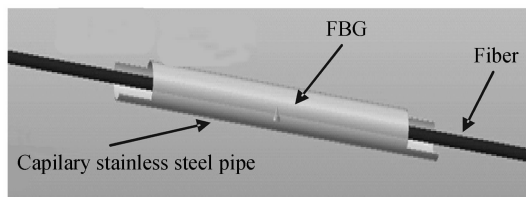


图 4 光纤光栅温度传感器结构原理

Fig. 4 Principle of the structure of fiber Bragg grating temperature sensor

毛细钢管直径 1.5 mm、壁厚 0.2 mm.在毛细钢管两侧各削去一半,形成两个细槽,中间留有 20 mm 的中空部分,将选好的 FBG 套入毛细钢管中,FBG 的两头用光纤调整架紧固,加载一定的预拉力,并将栅区部分放置于毛细钢管的中空部分,在两侧细槽部分用改性环氧树脂粘贴剂进行黏结,注意在粘贴过程中防止粘贴剂粘在 FBG 的栅区部分.光纤光栅温度传感器如

图 5.

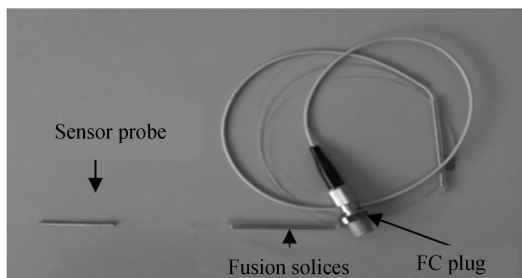


图 5 光纤光栅温度传感器

Fig. 5 Fiber Bragg grating temperature sensor

2 多功能传感器的结构设计

为实现传感器小型化、集成化和网络化的设计要求,设计过程中,力求结构简单、紧凑,便于加工、装卸、密封,结构尽量模块化,不同模块之间相互独立,便于功能的集成、传感器的检修.

光纤光栅多功能靶式流量传感器是以一体式靶式流量传感器为基础,在其上加装压力检测模块和温度传感器.压力检测模块与 1.2 节设计的膜片式压力传感器类似,流量检测模块与压力检测模块之间有通孔贯通上下,使压力油液顺利作用在压力膜片上;温度传感器是将 1.3 节设计的毛细钢管式温度传感器通过螺纹结构安装在夹板上,传感探头位于一体式靶片的后侧.光纤光栅流量、压力和温度传感器的尾纤,分别通过在凸台和夹板上预先加工的细孔引出,然后用环氧树脂对细孔及其穿过的光纤尾纤进行封装,以避免油液渗漏.

根据传统靶式流量计和 FBG 传感器的设计要求,结合应用实际情况和加工工艺,给出了多功能传感器的结构模型,其模型如图 6.

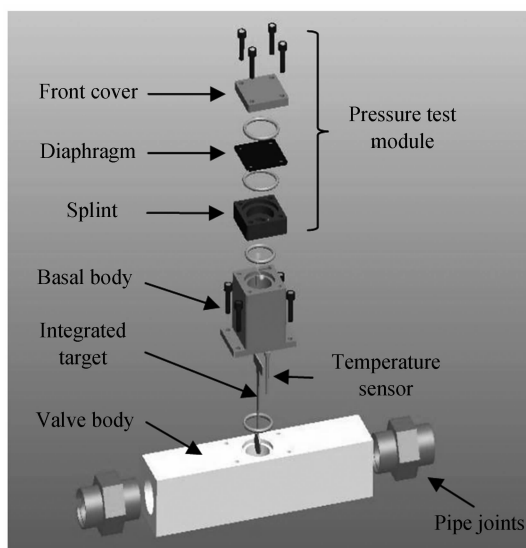


图 6 光纤光栅多功能靶式流量传感器结构

Fig. 6 Structure of fiber Bragg grating multi-function target type flow sensor

多功能传感器主要有以下 7 部分组成:

1) 阀体:流量传感器的基本部分,也是整个多功能传感器的基础部分,两侧通过管接头与液压回路相连接;

2) 一体式靶片:将圆形流阻靶片与等强度悬臂梁合二为一,由一块板材线切割加工而成;一对中心波长一致的 FBG 对称粘贴于等强度悬臂梁两侧的中轴线上,把油液的冲击力转化为 FBG 中心波长的变化;

3) 凸台:通过螺钉与阀体紧固连接,其与阀体之间通过 O 型密封圈实现油液密封,凸台内部中空,内表面顶部开有细槽,用于安装固定一体式靶片;

4) 夹板:流量检测模块与压力检测模块的中间元件,与凸台之间通过 O 型密封圈实现油液密封;中部开有通孔,用以将油液引入压力检测模块;光纤光栅温度传感器安装紧固在夹板上;

5) 压力膜片:FBG 粘贴于膜片径向中心位置,将油液压力值转化为光纤光栅中心波长的变化,与端盖和夹板通过螺钉紧密连接,其有效工作范围为圆形;

6) 端盖:通过 O 型密封圈压压力膜片,通过螺钉把压力膜片、夹板紧固在凸台上;

7) 温度传感器:毛细钢管结构,粘贴固定于一个空心螺钉内,整体安装于夹板上的螺孔内。

综合考虑各种材料的性能与材料的易取性以及良好的加工性能,一体式靶片及压力膜片的材质采用 304# 不锈钢,光纤光栅多功能流量传感器中的阀体、凸台、夹板、端盖的材质选用硬铝合金。加工出多功能传感器的实物照片如图 7。

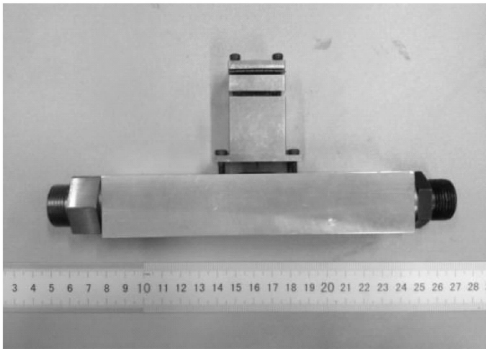


图 7 光纤光栅多功能靶式流量传感器实物

Fig. 7 Real object of fiber Bragg grating multi-function target type flow sensor

3 实验验证

3.1 流量实验

自行搭建液压回路,如图 8。移动油源装置主要由液压泵和油箱组成,为整个系统供油;一体式靶式流量传感器接入液压油路中,在其上游串联一个智能型涡轮流量计,作为流量测量的标准,通过节流阀调节回路中流量的大小。智能型涡轮流量计的量程范围为

0.5 ~ 10 m³/h(0.14 ~ 2.78 L/s),测量精度为 1.0 级,公称通径为 10 mm,压力极限为 25 MPa。在流量测试液压回路中,油液由油泵泵出,经过溢流阀、节流阀后进入流量检测设备,流经涡轮流量计、光纤光栅一体式靶式流量传感器之后回到油箱。靶式流量传感器通过管接头串联在回路中,光纤引线接入光纤光栅解调设备。实验照片如图 9。

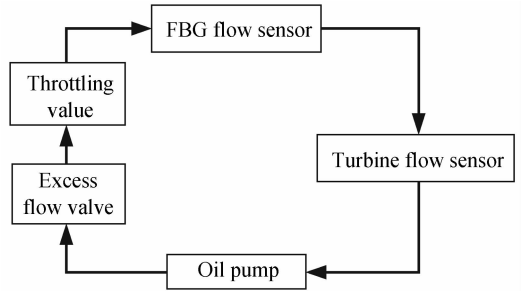


图 8 流量测试系统油路

Fig. 8 Circuit diagram of flow test system

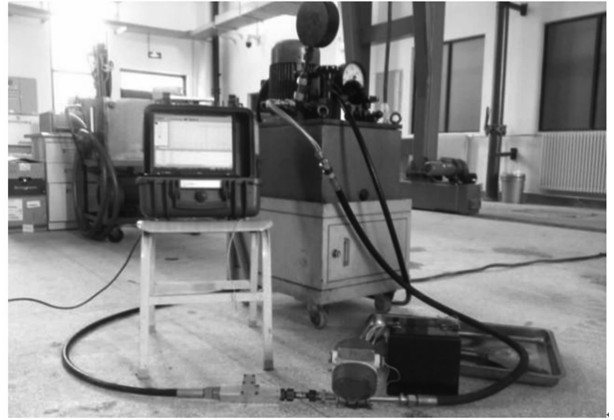


图 9 流量传感器测试系统

Fig. 9 Flow sensor test system

接通测试油路及传感光路,启动油源,此时在解调设备中读取一对 FBG 的中心波长值,作为流量为 0 L/s 时的实验数据。而后启动油源,调节节流阀开口大小使得测试回路中流量逐步增大,待涡轮流量计示值稳定后(约 1~2 min),每隔 0.2 L/s 分别记录下光纤光栅靶式流量传感器 FBG 1、FBG 2 的中心波长值。运用最小二乘法分别对 FBG 1、FBG 2 的中心波长、双 FBG 中心波长的偏移量进行拟合处理,结果如图 10。

由式(8)可知,一体式靶式流量传感器中 FBG 中心波长的偏移量与流量的平方成正比,而图 10 中测试数据明显呈二次曲线规律,拟合曲线方程为

$$\begin{cases} \lambda_{B1} = 1550.087 + 0.213 Q^2 \\ \lambda_{B2} = 1549.938 + 0.216 Q^2 \\ \Delta\lambda_B = 0.1419 + 0.423 Q^2 \end{cases} \quad (16)$$

拟合曲线印证了传感器的中心波长偏移量与流量的平方成正比,双 FBG 中心波长偏移总量是单个 FBG 偏移量的二倍,相应地,双 FBG 构成的差动结构使流

量传感灵敏度翻倍. 由二次项系数 $0.423 \text{ nm}/(\text{L}/\text{s})^2$ 和解调仪的分辨率 1 pm , 可知光纤光栅一体式靶式流量传感器的分辨率为 $0.049 \text{ L}/\text{s}$.

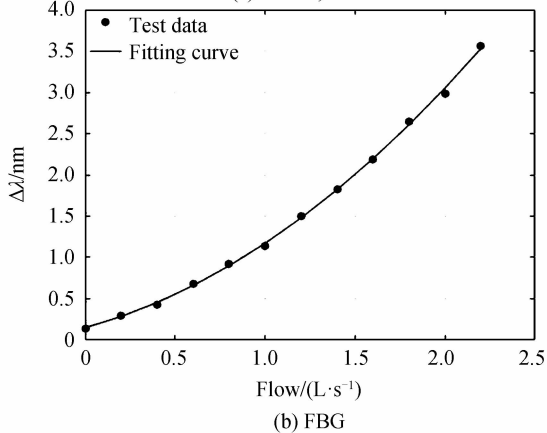
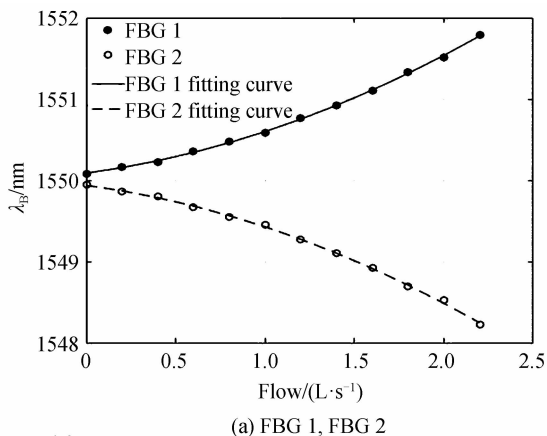


图 10 流量传感器实验数据拟合

Fig. 10 Experimental data fitting of flow sensor

3.2 压力实验

根据 1.2 节中膜片式光纤光栅压力传感器的设计方案, 敏感膜片采用厚度为 2 mm 的 304 号不锈钢板. 膜片式光纤光栅压力传感器的标定, 采用压力表校验仪和光纤光栅解调仪, 作为压力检测基准的压力表精度为 0.2 MPa , 量程为 25 MPa , FBG 压力传感器通过管接头接入压力表校验仪测试接口. 实验照片如图 11. 实验中, 压力校验仪从 0 MPa 至 25 MPa 逐步加



图 11 压力传感器标定实验装置

Fig. 11 Calibration experiment device of pressure sensor

压, 每隔 1 MPa 时保持一段时间, 记录此时的 FBG 中心波长值. 为验证 FBG 压力传感器的重复性, 重复进行了三次加卸载实验. 将实验数据进行最小二乘拟合, 结果如图 12.

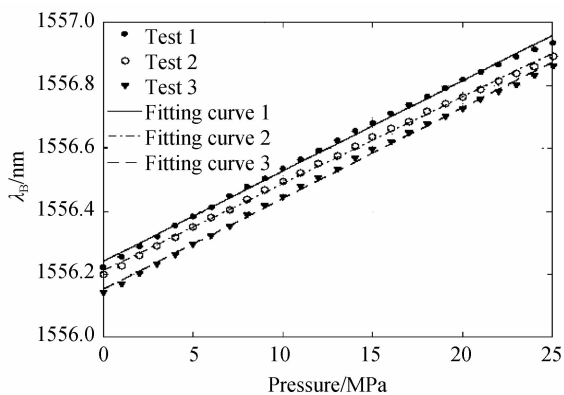


图 12 压力传感器实验数据拟合

Fig. 12 Experimental data fitting of pressure sensor

由式(12)可知, FBG 中心波长随压力的变化呈线性关系. 而实验拟合结果表明, 所得数据呈现了较好的线性特征. 对图 12 中三组实验数据进行线性拟合, 可得它们的拟合曲线方程为

$$\begin{cases} \lambda_1 = 1556.242 + 0.0287P \\ \lambda_2 = 1556.213 + 0.0276P \\ \lambda_3 = 1556.153 - 0.0289P \end{cases} \quad (17)$$

三组实验数据拟合曲线的斜率较为接近, 其均值约为 $28.4 \text{ pm}/\text{MPa}$, 由于解调仪的分辨率为 1 pm , 因此膜片式光纤光栅压力传感器的分辨率为 0.035 MPa .

3.3 温度实验

为了验证毛细管管式光纤光栅温度传感器的可靠性及灵敏度, 采用水浴加热实验装置对其进行标定实验. 实验中所采用的 FBG 的中心波长为 1542 nm , 温度基准采用精度为 0.2°C 的水银温度计. 实验装置如图 13, 利用水浴加热实验装置, 从室温加热至 80°C , 记录加热过程中温度值对应的 FBG 中心波长的值, 对实验数据进行拟合处理, 如图 14.

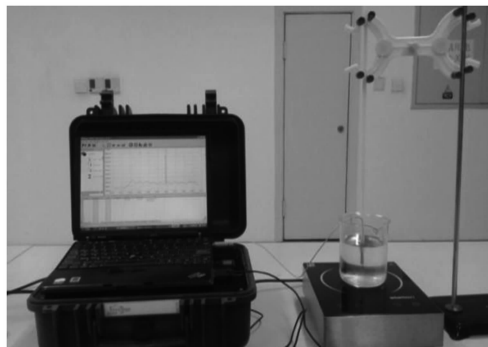


图 13 温度传感器标定实验装置

Fig. 13 Calibration experiment device of temperature sensor

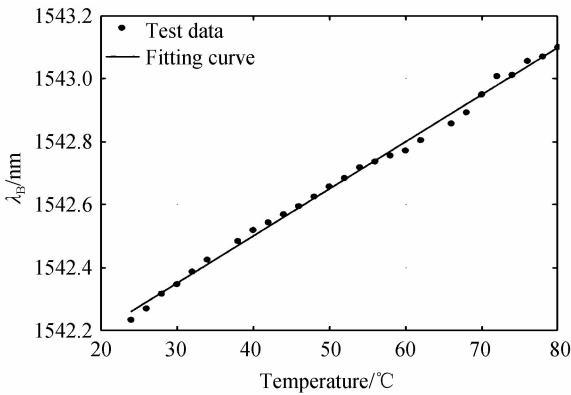


图14 温度传感器实验数据拟合

Fig. 14 Experimental data fitting of temperature sensor

由式(15)可知,毛细钢管式温度传感器FBG中心波长的偏移量与温度的变化量呈线性关系.从实验结果中也可以看出,随着水温的上升,FBG的中心波长随之线性增加.利用最小二乘法对实验数据进行线性拟合,得到FBG中心波长 λ_B 与对应温度 T 之间的关系为

$$\lambda_B = 1541.904 + 0.0149T \quad (18)$$

拟合曲线的相关系数 r 为0.9977,拟合的标准偏差为0.0171.该FBG温度传感器的灵敏度为14.9 pm/°C.由于光纤光栅解调装置的波长分辨率为1 pm,则该传感器的温度分辨率约为0.07 °C,优于传统温度传感器.

4 结论

本文充分利用光纤光栅独特的技术优势,针对液压系统多参量、高精度检测的实际需要,以靶式流量传感器作为基础,对光纤光栅采用独特的封装技术和精巧的结构设计,研制了一种融合温度、压力、流量测量为一体,便于实现准分布式传感及网络化测试的光纤光栅多功能靶式流量传感器.在液压回路中,以智能型涡轮流量计为基准,对一体式靶式光纤光栅流量传感器进行了流量实验,得出了FBG中心波长偏移量与流量变化的关系,计算出其实际的流量分辨率为0.049 L/s;通过压力表校验仪对膜片式光纤光栅压力传感器进行了校验,得出其灵敏度为28.4 pm/Mpa;通过水浴加热实验,利用水银温度计对毛细钢管式光纤光栅温度传感器进行了标定,得出其灵敏度为14.9 pm/°C.

参考文献

[1] ZHAO Bing. Research on FBG sensing technology and its application in equipments test[D]. Xi'an: Second Artillery Engineering College, 2009.
赵兵. 光纤光栅传感技术研究及其在装备检测中的应用[D]. 西安:第二炮兵工程学院, 2009.

[2] LEEUNG CULSATIEN T, LUCAS G P. Measurement of velocity profiles in multiphase flow using a multi-electrode electromagnetic flow meter [J]. *Flow Measurement and*

Instrumentation, 2013, **31**(6): 86-95.

- [3] HE Xiao-yan. Study on the characteristic of MC-FBG and applications in optical fiber sensors [D]. Xiamen: Xiamen University, 2014.
何小燕. 多芯光纤光栅的特性及其在光纤传感方面的研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2014.
- [4] MAJIIMDER M, GANGOPADHYAY T K, CHAKRABORTY A K, et al. Fiber Bragg gratings in structural health monitoring- Present status and applications [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2008, **147**(1): 150-164.
- [5] WANG Yu-bao, LAN Hai-jun. Study of fiber Bragg grating sensor system based on wavelength-division multiplexing/time-division multiplexing [J]. *Acta Optical 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.
- [6] CHEN Z, YUAN L, HEFFERMAN G, et al. Terahertz fiber Bragg grating for distributed sensing [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, **27**(10): 1034-1087.
- [7] DAMIAN R, PAWEL N, JAMES R M, et al. Interrogation of a dual-fiber-Bragg-grating using an arrayed waveguide grating [J]. *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, 2007, **56**(6): 2641-2645.
- [8] JIANG M S, SUI Q M, JIA L, et al. FBG-based ultrasonic wave detection and acoustic emission linear location system [J]. *Optoelectronics Letters*, 2012, **8**(3): 220-223.
- [9] YU Da-kuan, JIA Zhen-an, QIAO Xue-guang, 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.
- [10] WANG Zhen-fang, WANG Jing, SUI Qing-mei, et al. A target-type fiber Bragg grating flow velocity sensor [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2012, **23**(1): 1-8.
王正方, 王静, 隋青美. 靶式光纤Bragg光栅流速传感器的研制[J]. 光电子·激光, 2012, **23**(1): 1-8.
- [11] PACHAVA V R, KAMINENI S, MADHUVARASU, et al. Fiber Bragg grating-based hydraulic pressure sensor with enhanced resolution [J]. *Optical Engineering*, 2015, **54**(9): 096104.
- [12] LI Hong-cai, LIU Chun-tong, FENG Yong-bao, 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.
- [13] JIANG Qi, GAO Fang-fang. Simulation and experimental research of a novel flow sensor based on fiber Bragg grating [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(2): 0228001.
蒋奇, 高芳芳. 一种新型光纤Bragg光栅流量传感器的仿真与实验研究[J]. 光子学报, 2014, **43**(2): 0228001.
- [14] YANG Xiu-feng, ZHANG Chun-yu, TONG Zheng-rong, et al. Experimental research of temperature sensing properties of a novel fiber grating [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2011, **38**(4): 141-144.
杨秀峰, 张春雨, 童峥嵘, 等. 一种新型光纤光栅温度传感特性的实验研究[J]. 中国激光, 2011, **38**(4): 141-144.
- [15] FERNÁNDEZ-VALDIVIELSO C, MATÍAS I R, ARREGUI F J. Simultaneous measurement of strain and temperature using a fiber Bragg grating and a thermo chromic material [J]. *Sensors & Actuators: A. Physical*, 2002, **101**(1): 107-116.