

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210412

液位-液压-温度同时检测光纤隔膜传感器^{*}

姚建南¹, 刘志成¹, 钟年丙¹, 何雪丰¹, 张天恒²

(1. 重庆理工大学光纤传感与光电检测重庆市重点实验室智能光纤感知技术重庆市高校工程研究中心 重庆 400054; 2. 重庆理工大学机械检测技术与装备教育部工程研究中心 重庆 400054)

摘要:为了实现液位、液压及温度三参数同时准确检测,本文首先采用光纤 Bragg 光栅(FBG)、弹性隔膜、微腔、FBG 固定板及导气管构建了光纤隔膜传感器,搭建了测量系统。其次,建立了传感器测量理论模型,实验研究了传感器对液位、液压及温度的响应特性。最后,为了研究传感器对外界环境变化的抗干扰能力,实验研究了温度、倾角和液位动态变化速率对液位及液压测量结果产生的影响。研究表明:当液位变化速率为 10~100 cm/min、传感器倾斜角度在 -30° ~ 30° 范围、温度在 20°C ~ 60°C 范围时,传感器输出信号与液位 0~220 cm 及液压 0~22 kPa 间具有线性关系,液位及液压测量结果不受液位变化速率、传感器倾角及温度变化的影响;传感器液位、液压及温度灵敏度分别为 35.16 pm/cm、359.46 pm/kPa 和 10.07 pm/ $^{\circ}\text{C}$,最大相对误差为 5.6%。

关键词: 液位; 液压; 光纤 Bragg 光栅; 传感器; 准确测量; 灵敏度

中图分类号: TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5020

Fiber-optic diaphragm sensor for simultaneous detection of liquid-level-hydraulic-temperature

Yao Jiannan¹, Liu Zhicheng¹, Zhong Nianbing¹, He Xuefeng¹, Zhang Tianheng²

(1. Chongqing Key Laboratory of Optical Fiber Sensor and Photoelectric Detection, Chongqing Engineering Research Center of Intelligent Optical Fiber Sensing Technology, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;
2. Engineering Research Center of Mechanical Testing Technology and Equipment, Ministry of Education, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: To accurately detect liquid level and pressure, a fiber optic diaphragm sensor and the measurement system are firstly prepared in this article. The sensor consists of fiber Bragg grating (FBG), elastic diaphragm, microcavity, FBG fixture and silica gel tube. Secondly, the theoretical model of the sensor to detect the liquid level and pressure is formulated, and the response characteristics of the sensor to the liquid level, pressure and temperature are experimentally studied. Finally, to study the anti-interference ability of the sensor to changes in the external environment, the effects of temperature, inclination angle and liquid level velocity on the measurement results of the sensor are experimentally studied. Results show that when the liquid level velocity is in the range of 10~100 cm/min, the sensor's inclination angle is in the range of -30° ~ 30° , and the tested liquid temperature is in the range of 20°C ~ 60°C . A linear relationship between the sensor output and liquid level 0~220 cm and pressure 0~22 kPa is obtained. The measurement results of the sensor are not affected by liquid velocity, sensor's inclination angle, and temperature change. The liquid level, pressure and temperature sensitivity of the sensor reach 35.16 pm/cm, 359.46 pm/kPa and 10.07 pm/ $^{\circ}\text{C}$, respectively. The maximum relative error is 5.6%.

Keywords: liquid level; pressure; FBG; sensor; accurate measurement; sensitivity

收稿日期: 2022-09-08 Received Date: 2022-09-08

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52176178)、重庆市高校创新研究群体项目(CXQT21035)、重庆市自然科学基金创新发展联合基金(CSTB2022NSCQ-LZX0059)、重庆理工大学研究生创新项目(gzlcx20222032)资助

0 引言

在化工生产、冶金工业、石油工业等诸多领域,液位及液压实时在线准确监测是保障其存储装置及系统安全正常运行的关键。由于光纤液位及液压传感器^[1-15]具有抗电磁干扰、耐酸碱腐蚀、电绝缘、连续测量、几何尺寸小、使用寿命长等优点,相对于传统的电容式^[16-18]、超声波式^[19]以及磁致伸缩式液位传感器^[20],其在易燃易爆、强腐蚀性、强电磁干扰等恶劣环境下有较大的竞争优势。

目前,国内外已报道的光纤液位传感器主要有:尖端反射型^[21]、光泄露型^[22-23]、光强反射型^[24]以及光纤光栅型传感器^[25]。其中,光纤光栅液位传感器有折射率型^[26]、浮力型^[27]以及压力隔膜型^[28]。压力隔膜型光纤光栅液位传感器结构简单、灵敏度高、精度高,是最具潜力且应用到工程实践中的连续式大量程光纤液位传感器。虽然压力隔膜型光纤光栅液位传感器具有上述诸多优势,但现有研究主要集中于提高传感器灵敏度,而液位检测的最大量程小于110 cm^[29],难以满足工程实际需求。更为重要的是,当前关于光纤 Bragg 光栅(fiber Bragg grating, FBG)同时实现大量程液位、液压及温度测量的文献还未见报道。因此研制一种准确同时检测大量程液位、液压及温度的 FBG 传感器十分必要。

本文采用光纤 Bragg 光栅、弹性隔膜、微腔、FBG 固定装置及导气管构建了一种新型的隔膜型大量程 FBG 液位-液压-温度传感器。搭建了传感器测量系统;建立了传感器同时检测液位-液压-温度的理论模型;实验研究了传感器对液位-液压-温度的响应特性,液位变化速率、液体温度和倾角对传感器液位-液压测量产生的影响。

1 实验

1.1 实验材料及仪器

实验采用石英单模光纤,FBG 反射中心波长为1 550 nm、长度为5 mm。弹性隔膜选用500 μm厚的天然橡胶隔膜(natural rubber diaphragm, NRD)。导气管选用耐腐硅胶管(内外直径分别为0.5和2 mm)。光纤光栅解调仪波长解调范围为1 510~1 590 nm,扫描频率为0.5~2 Hz,波长分辨率为1 pm。传感器塑性材料为聚甲基丙烯酸甲酯(polymethyl methacrylate, PMMA),FBG 粘接剂为环氧树脂 AB 胶。

1.2 传感器制备

液位及液压传感器由微腔、导气管、FBG_1、FBG_2、天然橡胶隔膜、FBG 固定板(PMMA 材料)构成。传感器结构示意图,如图1(a)所示。传感器(长、宽、高均为

4 cm)采用 PMMA 材料构成,并分为区域 I、区域 II、区域 III 和区域 IV 4 个区域。区域 I 为微型液体腔,其顶部和侧面底部开有($\varnothing=3$ mm)小孔用于液体注入和流出,右侧面开有椭圆形(长轴为20 mm、短轴为15 mm)开口,用于液体流出,从而对区域 II 的 NRD 发生形变提供水压。FBG_1 固定在 NRD 表面用于感知由于液位变化引起 NRD 发生形变产生的应力和液相温度变化信息;为了提高 FBG_1 在弹性隔膜上的横向粘附强度,首先将距离 FBG_1 光栅区上下各1 cm、长约5 mm处石英光纤涂覆层去除,然后使用环氧树脂 AB 胶将去除涂覆层的光纤区域粘贴在弹性隔膜上,静置24 h,待 AB 胶完全固化后,即获得用于感知应力(液位液压)及温度变化信息的传感单元。FBG_2 固定在 PMMA 板上;为了提高 FBG_2 在 PMMA 板上粘附强度,同样将连接 FBG_2 的石英光纤涂覆层去除,并使用 AB 胶将去除涂覆层的光纤粘附在 PMMA 板(PMMA 板开有与微型容器右侧位置对称、大小相同的椭圆孔)上,即获得用于感知温度变化信息的传感单元。区域 IV 为微型空气腔,其左侧面开有椭圆形(长轴为20 mm、短轴为15 mm)开口,且腔室内部为空心(充满空气),顶部开有2 mm的小孔,用于连接硅胶管(长度为3 m);硅胶管有2个功能:功能一是将连接 FBG_1 和 FBG_2 的 Fiber_1 和 Fiber_2 从传感探头处引出(本文中,为了有效消除温度对液位及液压测量结果产生的影响,FBG_1 和 FBG_2 位于同一高度),即光纤固定在硅胶管内表面;功能二是将区域 III 与区域 IV 构成的密闭室与外界相连,保持相同的压力,从而保证 NRD 在变化过程中不受气压的影响。

传感器封装过程如下:首先在传感器区域 I~IV 的接触表面涂覆一层密封硅脂,然后采用8枚螺丝(直径为4 mm)固定,固定好的器件即为用于液位、液压及温度同时测量的 FBG 隔膜传感器。

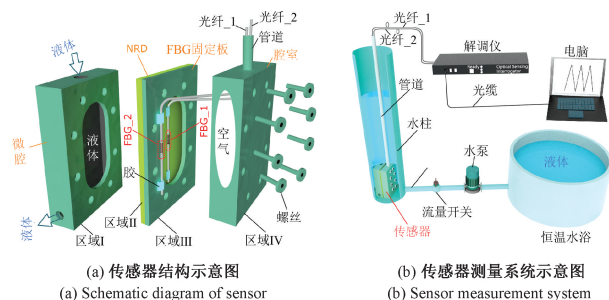


图1 传感器结构及实验系统图

Fig. 1 Sensor structure and experimental system diagram

1.3 实验系统及运行

传感器测量系统结构由传感器、恒温水域、泵、光纤光栅解调仪、测试水管等构成,如图1(b)所示。传感器置入测试水管中,测试水管高度为2.5 m、内径为10 cm。

连接传感器的硅胶管将 FBG_1 和 FBG_2 连接的光纤引出(由光纤光栅解调仪解调),并使外界环境与传感器微型空气腔保持相同的大气压力。

实验过程中,通过水泵将恒温水浴内的水(控温精度为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$)注入测试水管内部,从而引起传感器隔膜发生形变,引起 FBG_1 产生应变,导致中心波长发生漂移;同时,液位越高,两侧形成压力差越大,导致隔膜发生形变越严重,引起 FBG_1 中心波长漂移量越大。因此,在恒定温度下,通过检测 FBG_1 中心波长漂移量即可实现对液位高度的测量。此外液位高度和压力具有一一对应关系,即该传感器可实现对液位及液压二元参数的同时测量。最后,因为 FBG_2 固定在不易发生形变的 PMMA 板上,只响应液相温度变化信息;因此,将 FBG_2 和 FBG_1 耦合,可消除温度对 FBG_1 测量结果产生的影响。因此,传感器可实现对液位液压及温度三参数的准确测量。

2 传感器理论分析

FBG 的 Bragg 波长(λ_B)与光纤有效折射率(n_{eff})和光栅周期(Λ)呈现线性关系

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

由于光纤光弹效应,应变可以使 λ_B 发生漂移;同时由于光纤热光效应和热膨胀,温度会引起 λ_B 漂移,即 FBG_1 对应变和温度共同敏感,Bragg 中心波长的漂移量($\Delta\lambda_B$)定义为:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B[(1 - P_e)\varepsilon_f + (\alpha + \zeta)\Delta T] \quad (2)$$

其中, P_e 为光纤有效弹光系数, ε_f 为光纤受到的应力, α 为光纤材料的热膨胀系数, ζ 为热光系数, ΔT 为温度变化量。相同温度和应力下, $\Delta\lambda_B$ 不仅取决于光纤的物理参数,还受到隔膜的几何参数影响。

为了实现光纤隔膜传感器对液位-液压-温度的准确测量,采用温度补偿单元 FBG_2 对 FBG_1 温度干扰信号进行补偿。首先假设 $k(1 - P_e)\varepsilon$ 和 $(\alpha + \zeta)\Delta T$ 分别为液位灵敏度系数(K_L)(本文中 ε 由液位变化产生, k 为修订系数)、温度灵敏度系数($K_{T,1}$);则不同液位下,FBG_1 的绝对 Bragg 波长($\lambda_{B,L}$)与初始 $\lambda_{B,0}$ 、 ΔT 和液位变化(ΔL)间的关系可表示为:

$$\lambda_{B,L} = K_L\Delta L + K_{T,1}\Delta T + \lambda_{B,0} \quad (3)$$

液位高度与静水压力(P)间具有如下函数关系:

$$P = \rho gh \quad (4)$$

其中, ρ 为液体密度, g 为重力加速度(如表 1 所示), h 为液位高度。则不同 P 下,FBG_1 的绝对 Bragg 波长($\lambda_{B,P}$)与初始 $\lambda_{B,0}$ 、 ΔT 和压力变化(ΔP)间的关系可表示为:

$$\lambda_{B,P} = K_P\Delta P + K_{T,1}\Delta T + \lambda_{B,0} \quad (5)$$

其中, K_P 为压力灵敏度系数。另外,对于 FBG_2,由于不受液位和液压变化的影响,其绝对 Bragg 波长($\lambda_{B,T}$)只受温度的影响,可表示为:

$$\lambda_{B,T} = K_{T,2}\Delta T + \lambda_{T,0} \quad (6)$$

其中, $K_{T,2}$ 和 $\lambda_{T,0}$ 分别为 FBG_2 温度灵敏度系数和初始中心波长。由式(3)、(5)和(6),可得如下矩阵:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{B,L} \\ \lambda_{B,T} \\ \lambda_{B,P} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_L & K_{T,1} & 0 \\ 0 & K_{T,2} & 0 \\ 0 & K_{T,1} & K_P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta L \\ \Delta T \\ \Delta P \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_{B,0} \\ \lambda_{T,0} \\ \lambda_{B,0} \end{bmatrix} \quad (7)$$

通过实验可先确定传感器灵敏度系数 K_L 、 $K_{T,1}$ 、 $K_{T,2}$ 和 K_P ,然后通过矩阵的逆运算,即可获得液位及液压变化信息:

$$\begin{bmatrix} \Delta L \\ \Delta T \\ \Delta P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_L & K_{T,1} & 0 \\ 0 & K_{T,2} & 0 \\ 0 & K_{T,1} & K_P \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{B,L} \\ \Delta\lambda_{B,T} \\ \Delta\lambda_{B,P} \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, $\Delta\lambda_{B,L}$ 和 $\Delta\lambda_{B,P}$ 分别表示液位和压力变化对应 FBG_1 中心波长漂移量(由于本文的液体压力是由液位变化所引起的,与液位一一对应,所以此处 $\Delta\lambda_{B,L}$ 和 $\Delta\lambda_{B,P}$ 在数值上是相等的), $\Delta\lambda_{B,T}$ 表示温度变化对应 FBG_2 中心波长漂移量。由于温度对 FBG_1 的影响可以根据式(8)进行消除。因此,在恒定温度下,对于 FBG_1,其谐振中心波长漂移量与光纤通过隔膜形变产生的应变(ε_f)间的关系可表示为:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - P_e)\varepsilon_f \quad (9)$$

本文中,应变来源于液位变化对橡胶隔膜产生变形所致;因此橡胶隔膜受到液压产生的应变(ε_c)与静态液压 P 间的函数关系可表示为:

$$\varepsilon_c = \frac{3\sqrt{2}(1 - V^2)R^2}{8E_t t^2} P \quad (10)$$

其中, V 和 E_t 分别是橡胶隔膜的泊松率和杨氏模量, R 是橡胶隔膜半径, t 是橡胶隔膜厚度。因为石英光纤的杨氏模量通常比天然橡胶膜片的杨氏模量高出几个数量级,所以光纤会对膜片变形施加限制。假设光纤上的合成应变(ε_f)与光纤和隔膜的杨氏模量和直径之间的比率成线性比例,则作用在光纤上的轴向应变(ε_f)为:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_c \frac{E_r \times d_r}{E_f \times d_f} \quad (11)$$

其中, d_r 是橡胶隔膜的有效直径(薄膜的纵向和横向距离的平均值)。 d_f 表示光纤光栅的直径, E_f 表示光纤光栅的杨氏模量;因此式(11)可以改写为:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{3\sqrt{2}(1 - P_e)(1 - V^2)R^2 E_r d_r}{8E_t t^2 E_f d_f} P \quad (12)$$

静水压力灵敏度系数 K_P 表示为:

$$K_P = \frac{\Delta\lambda_B}{P} = \frac{3\sqrt{2}\lambda_B(1 - P_e)(1 - V^2)R^2 d_r}{8E_t t^2 d_f} \quad (13)$$

本文中,每增加 10 cm 液位相当于 0.981 kPa 静水压力。因此,液位灵敏度可以表示为:

$$K_L = \frac{\Delta \hat{\lambda}_B}{h} = \frac{3\sqrt{2}\lambda_B \rho g (1 - P_e) (1 - V^2) R^2 d_r}{8E_f t^2 d_f} \quad (14)$$

表 1 液位及液压光纤隔膜传感器参数
Table 1 Parameters of liquid level and pressure fiber-optic diaphragm sensor

符号	物理意义	数值	符号	物理意义	数值
λ_B	光纤光栅初始反射中心波长	1 550 nm	g	重力加速度	$9.80 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$
n_{eff}	光纤有效折射率	1.47	ρ	水的密度	$1\,000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
P_e	光纤有效弹光系数	0.22	ζ	光纤光热系数	$6.8\times10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
d_f	光纤直径	125 μm	R	橡胶隔膜有效半径	9.25 mm
E_f	光纤的杨氏模量	$70\times10^3 \text{ MPa}$	d_r	橡胶隔膜有效直径	18.50 mm
t	橡胶隔膜厚度	500 μm	E_r	橡胶隔膜杨氏模量	2.39 MPa
V	橡胶隔膜泊松比	0.49			

3 实验结果与讨论

3.1 传感器对温度响应特性

为了研究传感器对温度的响应特性,将传感器放置于恒温水浴锅内,水浴锅温度范围设置在 25℃~70℃,温度增长步长为 5℃。在每一个步长下,待 FBG 反射中心波长变化稳定后,使用光纤光栅解调仪连续记录 3 min 稳定的中心波长数据,取这组数据的平均值(数据最大标准差为 0.014)作为该温度对应的反射波长值,得到实验结果如图 2 所示。

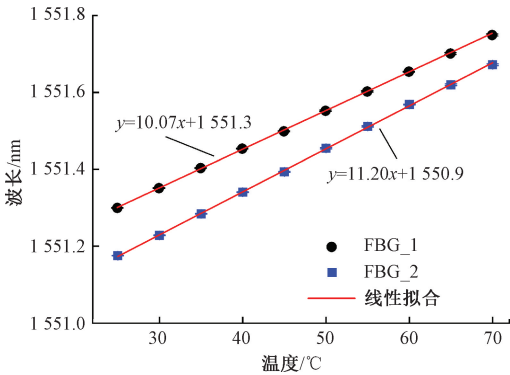


图 2 传感器温度响应特性

Fig. 2 The temperature response curves of sensor

由图 2 可知:FBG 反射中心波长在温度上升的过程中出现红移,FBG_1 和 FBG_2 的灵敏度分别为 10.07 和 11.20 pm/℃,线性度分别为 0.999 8 和 0.999 7,最大相对误差为 0.25%;表明传感器可实现对温度的准确测量,且可使用 FBG_2 对 FBG_1 进行温度补偿,实现传感器对液位及液压进行准确测量。

因此,利用式(13)、(14)和表 1 中的物理参数,可以数值计算求得该传感器的理论温度灵敏度、压力灵敏度和液位灵敏度分别为 10.01 pm/℃、352.50 pm/kPa 和 34.54 pm/cm。

3.2 传感器静态与动态液位及液压响应特性

为了研究传感器对水溶液静态液位及液压的响应特性,将液位设置在 0~220 cm,温度控制在 25℃,液位增量步长设置为 20 cm;为了提高传感器测量结果的准确性,每一个步长下都保持 1 min 恒定液位后,通过光栅解调仪连续记录 3 min FBG_1 中心波长数据(采样间隔为 500 ms),取这一组数据的平均值(数据最大标准差为 0.333)作为该液位对应的 Bragg 反射波长值,实验结果如图 3 所示。

由图 3(a)可知,在温度为 25℃,FBG_1 在 0~220 cm 液位量程范围内谐振中心波长出现了线性红移(线性度为 $R^2=0.990$);当静态液位下降时,FBG_1 谐振中心波长出现了线性蓝移(线性度为 $R^2=0.982$),FBG_1 对液位静态上升和下降平均响应灵敏度为 35.04 pm/cm。FBG_1 谐振中心波长出现红移是因为随着液位的升高,液压增大,橡胶隔膜形变增大,传感器受到的应力增大;FBG_1 谐振中心波长出现蓝移是因为随着液位的降低,液压减小,从而橡胶隔膜形变逐渐恢复,FBG_1 受到的应力逐渐减弱;传感器呈现出高的灵敏度归因于橡胶隔膜具有良好的液压致形变特性。静态液位上升和下降导致 FBG_1 谐振中心波长漂移产生的最大相对误差为 2.7%(220 cm 处),高重复性是因为橡胶隔膜具有良好的变形与可恢复变形特性。因此,图 3(a)表明恒温下 FBG_1 可实现对静态液位的准确测量。

由图 3(b)可知,在温度为 25℃,静态液压升高时,FBG_1 在 0~22 kPa 液压量程范围内谐振中心波长出现了红移且与液压间具有线性关系;当静态液压降低时,FBG_1 谐振中心波长出现了线性蓝移且同样与液压间保持线性关系;静态液压升高和降低过程中,FBG_1 谐振中

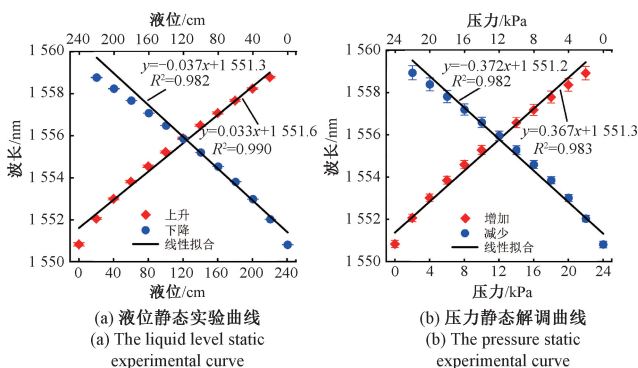


图3 FBG_1 液位静态响应特性

Fig. 3 The static response curves of FBG_1

心波长与液压间的平均线性度为 $R^2 = 0.982$, 平均压力灵敏度为 369.50 pm/kPa 。在液压 $0 \sim 22 \text{ kPa}$ 范围, 静态液位升高和降低产生的液压导致 FBG_1 谐振中心波长漂移产生的最大相对误差为 1.6% (22 kPa 处), 表明在恒温下, FBG_1 可实现对静态液压的准确测量。

为了研究 FBG_1 对液位上升和下降液位高度与液压的动态响应特性, 当液体温度为 25°C 时, 实验首先研究了液位上升和下降速率分别为 60 和 40 cm/min , FBG_1 谐振中心波长与液位高度和液压变化间的关系 (数据最大标准差为 0.12679), 如图 4(a) ~ (b) 所示; 在此基础上, 进一步研究了不同液位上升速率和不同下降速率下, FBG_1 谐振中心波长变化信息, 如图 4(c) ~ (d) 所示。

由图 4(a) 可知, 在恒定液位上升和下降速率下, FBG_1 谐振中心波长与液位高度间具有线性关系 (线性度为 $R^2 = 0.988$), 且液位上升与液位下降间 FBG_1 最大相对测量误差为 4.1% 。图 4(b) 显示 FBG_1 谐振中心波长与液压间具有线性关系 (线性度为 $R^2 = 0.996$), 最大相对测量误差为 3.7% 。FBG_1 对动态液位及液压呈现出高重复性 (从图 4(a) 和 (b) 内插图也可以看出, FBG_1 谐振中心波长变化具有高重复性), 其原因在于橡胶隔膜具有快速变形与可恢复变形特性, 同时本文制作的传感器具有优异的封装结构。在液位动态实验时 (液体流速 100 cm/min), 使用采样间隔为 500 ms 的光纤光栅解调仪可实时观测到对应液位及液压产生的反射中心波长, 显示了传感器的快速响应特性。因此, 在恒温下, 传感器能实时准确的测量恒定流速液位上升和下降条件下的液位高度和液压。

由图 4(c) ~ (d) 可知, 在不同液位变化速率 ($10 \sim 100 \text{ cm/min}$) 下, 传感器对液位高度响应同样具有高重复性 (最大相对误差为 5.6%) 和线性度 ($R^2 = 0.982$), 以及传感器对液压响应也呈现出高重复性和快

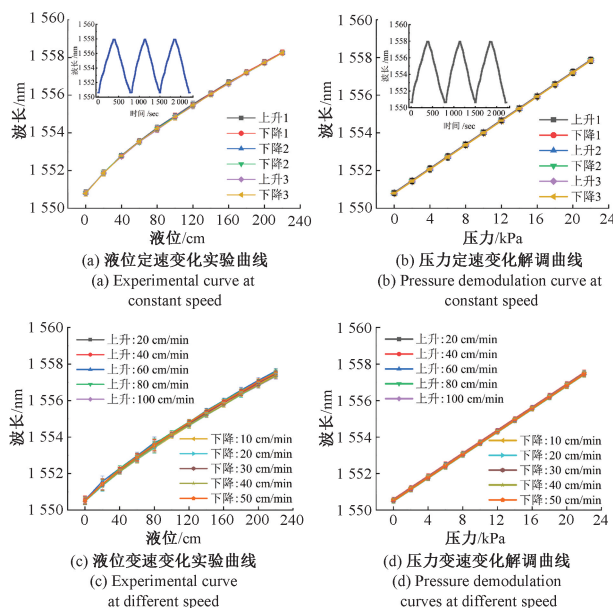


图4 FBG_1 动态响应特性

Fig. 4 The dynamic response curves of FBG_1

速响应特性 (最大相对误差为 4.2%) 和线性度 ($R^2 = 0.991$); 原因同样是因为天然橡胶隔膜具有良好、快速的变形性和回弹性。

综合图 3 和 4 实验结果可以看出: 在恒定温度下 (25°C), FBG 隔膜传感器中 FBG_1 在天然橡胶隔膜的协助下, 可以实时、灵敏、准确地测量液位及液压, 且传感器对 $0 \sim 220 \text{ cm}$ 液位、 $0 \sim 22 \text{ kPa}$ 液压具有良好的线性响应特性。

3.3 温度对传感器性能的影响

为了研究温度对 FBG_1 响应特性的影响, 实验首先研究了 $20^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ 范围内, FBG_1 谐振中心波长与液位高度和液压变化间的关系, 如图 5(a) ~ (b) 所示; 在此基础上, 通过 FBG_2 对 FBG_1 温度信息进行补偿, 得到补偿后不同温度下 FBG_1 对液位及液压的响应特性, 如图 5(c) ~ (d) 所示。

由图 5(a) ~ (b) 可知, 在 $20^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$ 温度、 $0 \sim 22 \text{ kPa}$ 液压范围, FBG_1 线性灵敏度达到 0.985 且液位及液压灵敏度分别为 34.55 pm/cm , 354 pm/kPa , 可满足常温环境液位及液压实际测量需求。然而在 $30^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ 范围内, 随着温度的升高, FBG_1 对液位和液压的线性灵敏度降低, 且在 220 cm 液位处, 最大测量误差达到 34% (数据最大标准差为 0.349); 其原因在于高温导致天然橡胶隔膜发生热膨胀, 导致橡胶隔膜对液位应变产生的弹性变形减小, 进而引起传感器灵敏度随着温度的升高降低, 在 $0 \sim 220 \text{ cm}$ 液位、 $0 \sim 22 \text{ kPa}$ 液压范围, 难以实现对液位和液压的准确测量。

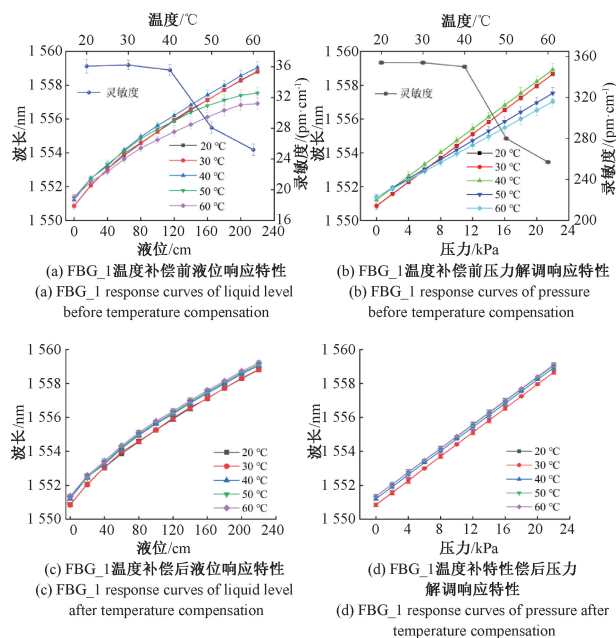


图5 FBG_1 温度补偿前后液位及压力响应特性

Fig. 5 FBG_1 response curves of liquid level and pressure before temperature compensation and after temperature compensation

由图 5(c)~(d)可知,在 20℃~60℃ 温度范围内,采用 FBG_2 测量的温度结果和 30℃~60℃ 的灵敏度曲线($S=-0.114T+12.386$, $R^2=0.87706$)对 FBG_1 进行温度补偿后,传感器输出信号的平均线性度达到 $R^2=0.983$,平均液位和液压灵敏度分别为 35.4 pm/cm、351.6 pm/kPa,最大相对误差为 4.7%,满足液位及液压测量的实际需求。表明传感器在 0~220 cm 液位和 0~22 kPa 液压量程内,FBG_1 在 FBG_2 温度补偿下,可实现对液位及液压二元参数的准确测量。

3.4 倾角对传感器性能的影响

为了模拟真实环境下,当传感器发生倾斜时,如图 6(a)所示,传感器倾斜角度对传感器测量结果产生的影响。在液体温度为 25℃,液位上升速率为 60 cm/min 时,实验研究了传感器倾角在 -30°~30° 范围任意变化下,FBG_1 谐振中心波长与液位高度和液压变化间的关系(数据最大标准差为 0.157 49),如图 6(b)~(c)所示。

图 6(b)~(c)显示,在 -30°~30° 倾角范围内,传感器发生倾斜时,测得的液位及液压上升曲线与无倾角时的曲线最大相对误差为 2.8%,液位及液压灵敏度分别达到 35.05 pm/cm 和 357.29 pm/kPa ($R^2=0.980$);其原因在于传感器封装结构良好,传感器性能稳定;因此,传感器测量结果不受倾角变化的影响。

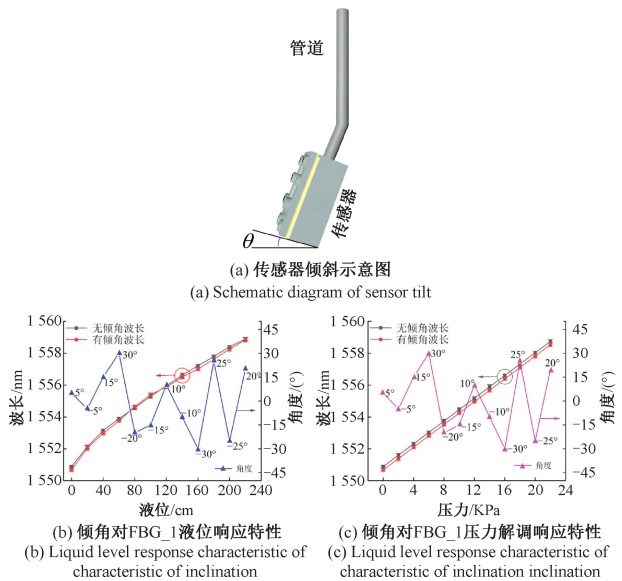


图6 倾角对传感器响应特性

Fig. 6 Sensor response characteristics of inclination

表 2 所示为本文制作的液位及液压传感器在灵敏度和量程范围内与其他将 FBG 嵌入环氧树脂、石墨烯等弹性材料进行对比,本文制作的液位及液压传感器有较高的液位及液压灵敏度及液位量程。

表 2 代表性液位、压力传感器性能比较					
Table 2 Performance comparison of representative hydraulic and pressure sensors					
感知器件及数量	液位灵敏度 /(pm·cm ⁻¹)	液位量程 /mm	压力灵敏度 /(pm·kPa ⁻¹)	压力范围 /kPa	参考文献
2 个 FBG	27.40	500	无该功能	无该功能	[28]
2 个 FBG	24.80	1 000	无该功能	无该功能	[10]
5 个 FBG	10.21	750	无该功能	无该功能	[11]
2 个 FBG	无该功能	无该功能	0.26	2 000	[3]
2 个 FBG	无该功能	无该功能	13.14	272	[14]
2 个 FBG	无该功能	无该功能	3.40	200	[13]
2 个 FBG	35.16	2 200	359.46	22	本文

此外对比图 3~6,发现不同液位变化速率、温度及倾角下,传感器对液位测量结果的最大相对误差为 5.6%(平均液位灵敏度为 35.16 pm/cm),对液压测量结果的最大相对误差为 4.4%(平均液压灵敏度为 359.46 pm/kPa)。因此,本文构建的传感器可同时实现对液位、液压及温度三参数的准确测量,且传感器具有以下矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} \Delta L \\ \Delta T \\ \Delta P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 35.16 & 10.07 & 0 \\ 0 & 11.20 & 0 \\ 0 & 10.07 & 359.46 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \lambda_{B,L} \\ \Delta \lambda_{B,T} \\ \Delta \lambda_{B,P} \end{bmatrix} \quad (15)$$

4 结 论

本文采用两根 FBG(FBG_1 和 FBG_2)、良好压致形变天然橡胶隔膜、FBG 固定板、微腔及导气管构建了一种新型大量程液位、液压及温度 3 个参数同时测量的光纤隔膜传感器。其中 FBG_1 粘附在橡胶隔膜表面,同时响应温度和液位液压变化信息;FBG_2 粘附在 PMMA 板表面,只响应温度变化信息并用于补充温度对 FBG_1 测量结果产生的负面影响。实验结果表明:当液位变化速率在 10 ~ 100 cm/min、传感器倾角在 $-30^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 、温度 $20^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ 温度范围内时,传感器对液位及液压呈现出线性响应特性,且测量结果最大相对误差为 5.6%,表明传感器测量结果受流速、温度及倾角影响小,稳定性高。此外,在 0~220 cm 液位、0~22 kPa 液压下,传感器平均液位及液压灵敏度分别达到 35.16 pm/cm 和 359.46 pm/kPa;传感器温度灵敏度为 10.07 pm/ $^{\circ}\text{C}$ 。因此,本文研究研制的光纤隔膜传感器能同时实现液位-液压-温度三参数同时测量。传感器测量结果的准确性和灵敏度均能满足实际工程应用需求,研究成果有助于推动液位/液压传感器技术的发展及工程应用,以及有助于推动智能光纤感知技术的发展。

参考文献

- [1] ZHANG J W, YANG J R, HOU L T, et al. Temperature compensated fiber-optic liquid level sensor by micro-sphere based in-line michelson interferometer [J]. Optical Fiber Technology, 2022, 68: 102817.
- [2] 张雯, 刘小龙, 何巍, 等. LPFG 和 FBG 级联结构双参数光纤传感器研究 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(8): 2047-2054.
ZHANG W, LIU X L, HE W, et al. Study on dual parameter fiber sensor based on LPFG cascaded with FBG structure [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(8): 2047-2054.
- [3] ZHAO Y, ZHENG H K, LYU R Q, et al. A practical FBG pressure sensor based on diaphragm-cantilever [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 279 (15): 101-106.
- [4] RUI Z J, XIANG Z H, ZENG F, et al. Liquid level sensor with high sensitivity based on hetero core structure [J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22 (14): 14051-14057.
- [5] 白浪, 郑刚, 张雄星, 等. 一种光纤调频连续波激光干涉液位传感器 [J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(7): 293-300.
- BAI L, ZHENG G, ZHANG X X, et al. Optical fiber frequency-modulation continuous-wave laser interference liquid level sensor [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(7): 293-300.
- [6] LIU M, WU Y, DU C, et al. FBG-based liquid pressure sensor for distributed measurement with a single channel in liquid environment [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(16): 9155-9161.
- [7] 许滨华, 何宁, 何斌, 等. 基于分布式光纤传感器的管道受弯变形检测试验研究 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(8): 20-30.
XU B H, HE N, HE B, et al. Experiment study on pipeline bending deformation monitoring based on distributed optical fiber sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(8): 20-30.
- [8] WANG T T, LIU B, ZHAO L L, et al. High-sensitivity liquid level sensor based on the balloon-shaped fiber optic MZI [J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 4(2): 1-7.
- [9] OLIVEIRA L A, SOUSA F B, SOUSA F M, et al. Prototype of a sensor for simultaneous monitoring of water level and temperature of rivers in amazon using FBG [J]. Springer, 2022, 54: 731.
- [10] AMEEN O F, YOUNUS M H, AZIZ M S, et al. Design and fabrication of liquid pressure sensor using FBG sensor through seesaw hinge mechanism [J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 14(5): 6855107.
- [11] MARQUES A F, PENG G D, WEBB D. Highly sensitive liquid level monitoring system utilizing polymer fiber Bragg gratings [J]. Optics Express, 2015, 23 (5): 6058-6072.
- [12] XU G, HE B, LI H L, et al. FBG pressure sensor in pressure distribution monitoring of ship [J]. Optics Express, 2022, 30(12): 21396-21409.
- [13] FAN Q G, JIA Z A, FENG D Q, et al. Highly sensitive FBG pressure sensor based on square diaphragm [J]. Optik, 2021, 225: 165559.
- [14] VENGAL R P, SRIMANNARAYANA K, SAI S M, et al. FBG based high sensitive pressure sensor and Its low-cost interrogation system with enhanced resolution [J]. Photonic Sensors, 2015, 5(4): 321-329.
- [15] YANG J Y, YUE L N, ZHANG Q, et al. Research on a fiber Bragg grating hydrostatic level based on elliptical ring for settlement deformation monitoring [J]. Optics Express, 2022, 30(17): 31086-31106.
- [16] HANNI J R, VENKATA S K. A novel helical electrode type

- capacitance level sensor for liquid level measurement[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 315: 112283.
- [17] BHAR I, MANDAL N. Design of a noncontact passive LC-based level sensor with a readout system[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 9501509.
- [18] 谢君, 李德才, 朱锐棋. 霍尔式磁性液体微压差传感器的设计及特性研究[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(6): 27-34.
- XIE J, LI D C, ZHU R Q. Design and characteristic research on the magnetic fluid micro pressure difference sensor based on Hall elements[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(6): 27-34.
- [19] HUANG S L, LONG W, LIAO J B, et al. An optimized lightweight ultrasonic liquid level sensor adapted to the tilt of liquid level and ripple[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(1): 121-129.
- [20] 闫瑞杰, 李海香, 李利权, 等. 基于 DSP 的磁致伸缩液位传感器的设计[J]. *太原理工大学学报*, 2008, 39(3): 289-291.
- YAN R J, LI H X, LI L Q, et al. The design of magnetostrictive liquid level sensor based on DSP[J]. *Journal of Taiyuan University Of Technology*, 2008, 39(3): 289-291.
- [21] GE J, CHENG X, GUI K, et al. Oblique end face coupling optical fiber sensor for point fuel level measurement[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, 297: 111505.
- [22] XUE P, BAO H, WU B, et al. Fabrication of a screw-shaped plastic optical fiber for liquid level measurement[J]. *Optical Fiber Technology*, 2020, 57: 102237.
- [23] 陈俊琰, 李林洋, 辛鑫, 等. 准确测量液位的反射式螺旋塑料光纤传感器[J]. *光学学报*, 2022, 42(1): 97-105.
- CHEN J L, LI L Y, XIN X, et al. Reflective spiral plastic fiber-optic sensor for accurate detection of liquid level[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(1): 97-105.
- [24] ZAIDAN A H, YASIN M, PUJIYATI M, et al. Liquid level sensor using two fiber bundles[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018(280): 552-558.
- [25] LAI C W, LO Y L, YU J P, et al. Application of fiber Bragg grating level sensor and fabry-pérot pressure sensor to simultaneous measurement of liquid level and specific gravity[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(4): 827-831.
- [26] OSUCH T, JUREK T, MARKOWSKI K K, et al. Simultaneous measurement of liquid level and temperature using tilted fiber Bragg grating[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(5): 1205-1209.
- [27] XU D S, LIU H B, LUO W L. Development of a novel settlement monitoring system using fiber-optic liquid-level transducers with automatic temperature compensation[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2018, 67(9): 1-9.
- [28] CAMILO A R, ARNALDO G, PAULO S B, et al. Liquid level measurement based on FBG-embedded diaphragms with temperature compensation[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(1): 193-200.
- [29] VORATHIN E, HAFIZI Z M, ISMAIL N, et al. FBG water-level transducer based on PVC-cantilever and rubber diaphragm structure[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(17): 7407-7414.

作者简介



姚建南, 2019 年于四川农业大学获得学士学位, 现为重庆理工大学硕士研究生, 主要从事光纤传感方面的研究。

E-mail: yaojannan@163.com

Yao Jiannan received his B.Sc. degree from Sichuan Agricultural University in 2019. He is currently a master student at Chongqing University of Technology. His main research interest is optical fiber sensing.



钟年丙(通信作者), 分别于 2006 年、2010 年在重庆理工大学获得学士、硕士学位, 在 2013 年获得重庆大学博士学位, 现为重庆理工大学教授, 主要从事光纤传感及光催化方面的研究。

E-mail: zhongnianbing@163.com

Zhong Nianbing (Corresponding author) received his B.Sc. and M.Sc. degrees both from Chongqing University of Technology in 2006 and 2010, and received his Ph.D. degree from Chongqing University in 2013. He is currently a professor at Chongqing University of Technology. His main research interests include optical fiber sensing and photocatalysis.