

文章编号 1004-924X(2025)14-2178-13

推挽式高灵敏光纤光栅水压传感器研究

洪博诚^{1,2}, 吴崇坚¹, 于 淼¹, 常天英^{1*}, 姜海明², 崔洪亮¹

(1. 中国科学院深圳先进技术研究院, 广东 深圳 518055;

2. 广东工业大学 机电工程学院, 广东 广州 510006)

摘要:针对高精度水位实时监测的技术需求,本研究创新性提出基于推挽式光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)结构的水压传感方法。通过圆形弹性膜片、传力杆、滑块与双FBG构建复合传感单元,实现压力-光信号的高效转换。首先,基于弹性力学理论建模与有限元仿真分析,建立双FBG推挽式传感系统的波长偏移量与压力间的线性响应模型。然后,经系统实验验证,该传感器在0~2 MPa量程内展现出1 820.05 pm/MPa的压力灵敏度,线性度与重复性分别达0.69%和0.557%,响应时间为0.55 s,具备较高的压力灵敏度、良好的稳定性、较快的响应速度和极弱的蠕变特性。特别值得关注的是,其温度交叉灵敏度低至0.000 6 pm/°C,成功实现温度自补偿功能。研究表明,该设计通过推挽结构有效抑制环境温度干扰,突破传统传感器灵敏度与量程间的性能折中,同时兼具全光纤无源特性及分布式组网能力。研究结果为海洋环境监测装备提供新型解决方案,其优异的抗干扰特性和工程适用性,标志着其在深海水压实时监测领域具有重要应用前景。

关键词:水压传感器;光纤布拉格光栅;推挽式;压力响应特性;温度不敏感性

中图分类号: TB133 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20253314.2178

CSTR: 32169.14.OPE.20253314.2178

Research on push-pull high-sensitivity fiber Bragg grating underwater pressure sensor

HONG Bocheng^{1,2}, WU Chongjian¹, YU Miao¹, CHANG Tianying^{1*},

JIANG Haiming², CUI Hongliang¹

(1. Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences,
Shenzhen 518055, China;

2. School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology,
Guangzhou 510006, China)

* Corresponding author, E-mail: ty.chang@siat.ac.cn

Abstract: In view of the need of high sensitive water level real-time monitoring, we propose and demonstrate a Fiber Bragg Grating (FBG) based accurate water pressure sensor, which relies on the design of a push-pull sensing structure consisting of a dual of FBGs experiencing opposing compression/dilation, inte-

收稿日期: 2025-03-25; 修订日期: 2025-05-13.

基金项目: 国家重点研发计划项目(No. 2022YFC3003801); 广东省基础与应用基础研究基金项目(区域联合基金-重点项目)(No. 2023B1515120009); 中国科学院战略性先导科技专项(No. XDC0190403); 深圳市基础研究重点项目(No. JCYJ20220818101206015, No. JCYJ20220818101609021)

grated with other mechanical stress-amplification elements. A composite sensing unit was constructed using a circular elastic membrane, a force transmission rod, a slider, and a pair of FBGs to achieve efficient conversion of pressure optical signals. Based on the elastic mechanics theory modeling and the finite element simulation analysis, a linear response model between the wavelength offset and the pressure for the dual FBG push-pull sensing system was established. Experimental testing of the sensor established the following technical parameters of the sensor: pressure sensing range 0-2 MPa, pressure sensitivity 1 820.05 pm/MPa, linearity 0.69%, repeatability 0.56%, response time 0.55 s, indicating that this sensor has high pressure sensitivity, good stability, fast response speed, and extremely weak creep characteristics. Of especially noteworthy is the insensitivity of the sensor to minute environmental temperature variation, with a temperature sensitivity of 0.000 6 pm/°C. Our research work demonstrated the present approach can not only achieve high sensitivity and large sensing range, but also effectively minimize the cross-sensitivity between temperature and pressure, realizing temperature self-compensation and shielding from other environmental perturbations. As this fiber optic sensor is completely passive, without electrical power on the wet-end, and easy to multiplex, it has the potential of playing a decisive role in future oceanic applications.

Key words: underwater pressure sensor; fiber Bragg grating; push-pull; pressure response characteristic; temperature insensitivity

1 引言

海水压力作为海洋环境监测的核心参数之一,在海洋灾害预警系统构建^[1-4]、海洋化学与物理过程研究^[5],特别是海啸波实时监测领域^[6]具有不可替代的观测价值。当前主流压力传感技术主要依赖电学传感器,如 Ting Li 团队(2022)研发的压阻式绝对水压传感器,虽实现 0~120 MPa 量程内 0.425 mV/V/MPa 灵敏度与 0.018 2%FS 精度^[7],但其固有的电磁敏感性及海底供电瓶颈严重制约其在极端海洋环境中的适用性^[8-9]。这一技术局限促使研究者将目光转向具有本征无源、抗电磁干扰、易组网复用等优异特性的光纤传感技术。

相比之下,光纤光栅水压传感器由于需要解调仪、高性能光源等设备导致初期投入成本比电学传感器高,但是具有体积小、结构紧凑、耐腐蚀、光信号传输不受电磁干扰、使用寿命长、多路复用、几乎无环境污染等优点,适合于海洋恶劣条件^[10-13]。FBG 是诸多光纤光栅中最成熟、应用最广泛的一种光栅。然而,裸 FBG 的压力灵敏度仅为 3.04 pm/MPa^[14],其灵敏度过低,无法直接用于深水水压测量,因此通常引入机械结构作为压力放大器来提高灵敏度。目前常用的机械

结构包括薄壁圆柱^[15]、波纹管^[16]、聚合物封装^[17]和隔膜^[18]等。例如,2020 年,Zheng 等人设计一种基于薄壁椭圆柱的水压传感器^[19],在 0~1 MPa 的水压范围内,实现 1 198 pm/MPa 的灵敏度。这类传感器在较大范围内表现出良好的灵敏度,但对于海洋高精度测量需求仍有提升空间。在 2022 年,Oliveira 等人设计的基于波纹管结构的传感器^[20],在 0~0.04 MPa 的压力下达到 92 000 pm/MPa 的灵敏度,虽然测量灵敏度极高,但其在较大压力范围内的变形较大、稳定性较差,影响测量精度。而基于聚合物封装的传感器,如 Liu 等人于 2020 年设计的传感器^[21],在 0~15.5 MPa 范围内实现 51.296 pm/MPa 的灵敏度,但在温度补偿方面仍存在不足,不适合温度波动较大的环境应用。相比之下,隔膜结构的光纤光栅传感器因其灵敏度高、线性度良好,特别适合海洋环境下的高精度水压测量。

近年来,基于膜片的光纤光栅压力传感器的性能优化得到深入研究。2009 年,Harith Ahmad 等人^[22]采用薄 316 不锈钢金属膜片与光纤光栅组合,开发一种压力传感器,最大测试压力为 0.69 MPa,灵敏度为 1.667 nm/MPa;然而,这种方法在提升灵敏度的同时,也不可避免地产生较大的温度和压力交叉敏感问题。2019 年,E. Vorathin

等人^[23]根据膜片的切向应变特性,设计一种基于天然橡胶膜片和啁啾光纤光栅(Chirped Fiber Bragg Grating,CFBG)的水压传感器,利用CFBG的特性实现温度补偿,在0.02 MPa范围内达到25 300 pm/MPa的灵敏度,线性相关系数为0.981;尽管该传感器灵敏度较高,但其径向粘贴方式容易导致膜片受到不均匀应力,进而影响线性度。2024年,Jing等人^[24]采用将光纤竖直粘贴于膜片中心的方式,设置压力腔室和温度参考腔室分别用于压力测量和温度补偿,在0.6 MPa范围内实现14 666 pm/MPa的灵敏度,有效减少FBG粘贴过程中引起的啁啾效应;然而,受限于其水压测量范围,只能应用于低水位或浅海的水压监测。

目前,多种FBG水压传感结构已展现出良好的压力响应性能,但多数仍需附加温度补偿光栅,造成结构冗余,且温度补偿光栅利用率低。为此,本文提出一种推挽式FBG水压传感器新方案,采用316L不锈钢膜片和滑块的复合结构,结合双FBG推挽式应变传递机制,实现轴向应变倍增与温度交叉敏感的主动补偿。该结构有效实现温度补偿光栅的二次利用,在保持结构紧凑的同时,兼具良好的水压灵敏度与较宽的测量范围。本文重点开展以下研究工作:(1)建立推挽式FBG压力传感理论模型,阐明灵敏度增强与温度补偿机理;(2)开展推挽式传感结构性能仿真,验证传感器设计的合理性;(3)开展压力循环实验与温漂测试,进一步验证传感器性能;(4)构建综合评价体系,与近年代表性研究进行多维度性能对比。实验结果表明,该传感器在保持2 MPa宽量程的同时,达到1 820.05 pm/MPa灵敏度与0.69%线性度,且具有温度自补偿特性,为深海高精度压力监测提供新型解决方案。

2 推挽式FBG水压传感技术机理分析

2.1 传感结构设计

图1显示双FBG推挽式传感结构设计图和实物图。传感器由四个关键部件组成,分别为圆形弹性膜片、传力杆、滑块以及两个的FBG。

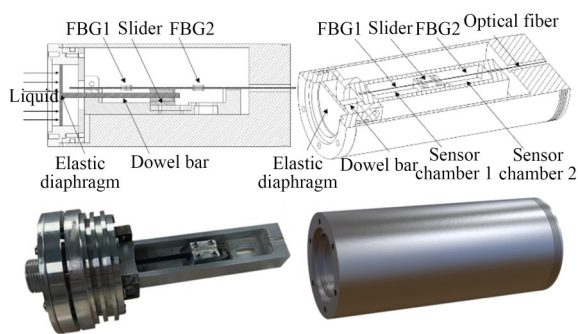


图1 传感结构设计图和实物图

Fig.1 Design sketch and physical diagram of sensor structure

整个传感器可以分为水压感应和测量两部分。水压感应部分以圆形弹性膜片为核心,直接承受外部海水压力,并通过传力杆将膜片形变传递至内部测量单元。水压测量部分主要由FBG、传力杆和滑块组成,用于实现压力信息的光学转换。为确保水压变化的敏感响应,FBG1和FBG2在安装时均施加初始预应力,并通过环氧胶固定于结构凹槽中。当膜片因外部水压发生形变时,传力杆受推带动滑块沿轴向运动,使FBG1受拉伸,FBG2受压缩,导致腔室1中FBG1预应力增加,而腔室2中FBG2的预应力减小,分别引起其中心波长的红移与蓝移,实现传感器一推一挽对称结构。二者波长偏移差量与外部海水压力变化呈线性关系,从而实现对水压的测量。

2.2 传感机理分析

基于上述结构,在被测量水压增加时,FBG1由于滑块移动而受到拉伸应变,而FBG2由于压缩产生负应变,并且都处于同一温度环境下。两FBG受到应变和温度影响均会产生中心波长偏移。因此,两个FBG的中心波长变化量可以表示为^[25]:

$$\Delta\lambda_{\text{FBG1}} = \lambda_{\text{FBG1}}(1 - p_e)\epsilon + \lambda_{\text{FBG1}}(\alpha + \zeta)\Delta T, \quad (1)$$

$$\Delta\lambda_{\text{FBG2}} = -\lambda_{\text{FBG2}}(1 - p_e)\epsilon + \lambda_{\text{FBG2}}(\alpha + \zeta)\Delta T, \quad (2)$$

其中: $\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2, \lambda_1$ 和 λ_2 分别是FBG1和FBG2的中心波长变化量和初始中心波长; ϵ 是FBG的轴向应变; ΔT 是温度变化; p_e 是有效弹光系数; α 是热膨胀系数; ζ 是热光系数。将等式(1)和等式(2)相减,则两个FBG中心波长变化量相减,不仅消除温度对传感器的影响,而且还将水压灵敏

度提高一倍,可表示为^[26-27]:

$$\frac{\Delta\lambda_{\text{FBG1}}}{\lambda_{\text{FBG1}}} - \frac{\Delta\lambda_{\text{FBG2}}}{\lambda_{\text{FBG2}}} = 2(1 - p_e)\epsilon. \quad (3)$$

在水压作用过程中,为了保证膜片变形为主要影响因素,传感器外壁将被固定,因此传导到光纤的轴向变形可以简化为周边夹紧的平面膜片。膜片的简化受力状态可如图 2 所示,传感器中的平面圆形膜会同时受到水的均匀压力和传力杆对膜片的集中力。

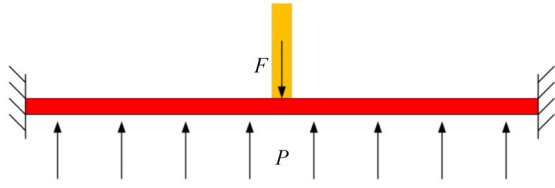


图 2 膜片受力模型图

Fig. 2 Diagram of the force model of the diaphragm

根据弹性理论,特别是在小变形和线弹性的假设下,带硬芯圆形膜片在均匀压力和集中力下的挠度最大值可以表示为^[28]:

$$\omega_p = Pk_p, \quad (4)$$

$$k_p = \frac{3(1 - \mu^2)R^4}{16Eh^3} \left[1 - (r/R)^4 + 4(r/R)^2 \ln r/R \right], \quad (5)$$

$$\omega_F = Fk_F, \quad (6)$$

$$k_F = \frac{3(1 - \mu^2)R^2}{4\pi Eh^3} \left[1 - (r/R)^2 \frac{1 - (r/R)^2 + 4\ln^2(r/R)}{1 - (r/R)^2} \right], \quad (7)$$

其中: E 是膜片的杨氏模量; μ 是膜片的泊松比; r 是传力杆半径; R 是膜片的半径; h 是膜片的厚度; k_p 是水压作用下膜片的变形系数; k_F 是集中力作用下膜片的变形系数。

均匀压力和集中力属于作用在膜片上方向相反的两组变量,因此膜片的总变形可以表示为:

$$\omega = \omega_p - \omega_F. \quad (8)$$

集中力 F 主要来源于光纤伸长时增大的拉力、光纤压缩时减少的预应力以及滑块的滑动摩擦力。可将光纤看作弹簧,其弹性系数为 k_f ,则集中力 F 可以表示为:

$$F = 2\omega k_f + f_s F_N, \quad (9)$$

$$k_f = \frac{AE_f}{l}, \quad (10)$$

其中: A 是光纤横截面积; E_f 是光纤弹性; l 是光纤有效长度; f_s 是滑块的滑动摩擦系数, F_N 是滑块在垂直方向上的载荷。

光纤受到的轴向应变可由公式 $\epsilon = \Delta l/l$ 得到, Δl 是光纤的长度变化量。由于光纤是粘接在滑块上,膜片的轴向位移也会使光纤沿轴向产生相同的长度变化。因此,根据式(4)~式(10),可以得到应变关系式如式(11):

$$\epsilon = \frac{Pk_p - f_s F_N k_F}{l + 2lk_f k_F}. \quad (11)$$

将式(11)代入式(3),光纤光栅的中心波长变化量之差与液压 P 的关系可以表示为:

$$\frac{\Delta\lambda_{\text{FBG1}}}{\lambda_{\text{FBG1}}} - \frac{\Delta\lambda_{\text{FBG2}}}{\lambda_{\text{FBG2}}} = k_\lambda P + b, \quad (12)$$

$$k_\lambda = \frac{2k_p(1 - p_e)}{l + 2lk_f k_F}, \quad (13)$$

$$b = -\frac{f_s F_N k_F}{l + 2lk_f k_F}, \quad (14)$$

其中: k_λ 是波长与压力的线性系数; b 是波长与压力的截距系数。设计的水压传感器所采用各参数如表 1 所示,则该传感器理论压力灵敏度为 1 625.85 pm/MPa。

表 1 水压传感器的性能参数

Tab.1 Performance parameters for the water pressure sensor

Symbol	Physical significance	Value
λ_{FBG1}	Wavelength value of FBG1	1 535 nm
λ_{FBG2}	Wavelength value of FBG2	1 540 nm
A	Optical fiber's cross-sectional area	0.012 3 mm ²
l	Optical fiber's length	35 mm
E_f	Optical fiber's elasticity modulus	72 000 N/mm ²
p_e	Optical fiber's elastic optical coefficient	0.216
R	Elastic diaphragm's radius	21 mm
E	Stainless steel 316L's elasticity modulus	193 000 N/mm ²
μ	Stainless steel 316L's poisson ratio	0.3
h	Elastic diaphragm's thickness	1.9 mm
r	Dowel bar's radius	1.5 mm
f_s	Sliding friction coefficient of slider	0.008

2.3 传感结构有限元仿真

2.3.1 膜片性能分析

为了进一步研究膜片尺寸参数对传感器性能的影响,针对膜片的厚度和半径进行有限元仿真分析,以便选取最佳参数。图 3(a)显示,在膜片厚度 h 和硬芯半径 r 分别被设定为 1.9 mm 和 1.5 mm 的条件下,压力灵敏度随着膜片半径 R 的增加而上升,而测量量程则随之下降。图 3(b)则展示在 R 和 r 分别为 21 mm 和 1.5 mm 时, h 对

性能的影响。分析结果显示,随着 h 的增加,传感器压力灵敏度下降,而测量量程则相应增加。这表明膜片厚度的增加能够提高传感器的最大承受压力范围,但会降低其对压力变化的响应能力。综合上述分析,为了权衡压力灵敏度和量程之间的相互制约,最终选定膜片半径 R 为 21 mm,厚度 h 为 1.9 mm。当然,亦可根据以上分析另择不同的膜片参数,以便达到某种实际应用需求。

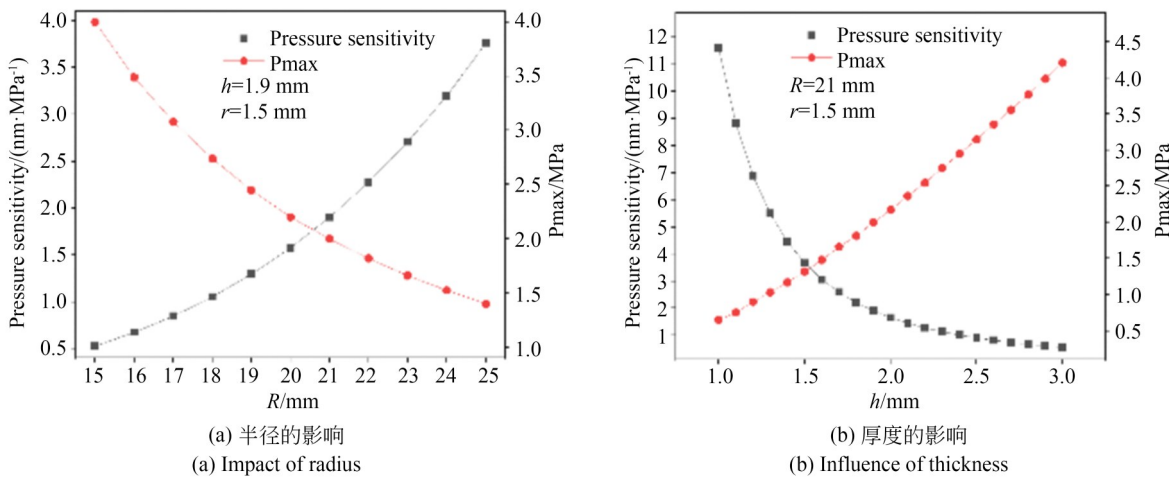


图 3 膜片参数与传感器压力灵敏度和测量范围的关系曲线

Fig. 3 Relationship curve between diaphragm parameters and the pressure sensitivity and measurement range of the sensor

2.3.2 传感结构受力仿真

基于上述结构和材料参数,采用有限元方法建立三维仿真模型,对膜片施加 2 MPa 均匀载荷,并对其外壁施加固定约束,得到应力和位移变化云图,如图 4 所示。

图 4(a)表明,应力主要集中在膜片的边缘区

域。所用的 316L 不锈钢在室温下的屈服应力约为 290 MPa,许用应力约为 241 MPa,安全系数取 1.2。仿真结果显示最大应力为 229 MPa,低于许用应力,说明膜片在 0~2 MPa 的载荷范围内处于线性弹性区间,从而能保证膜片的结构强度和可靠性。从图 4(b)显示,膜片的最大变形发生在其中心区域,变形量随着径向距离增大而逐渐减少。通过理论计算公式(4)~公式(8)得到的膜片中心最大位移 w 为 0.047 4 mm,而仿真结果为 0.055 32 mm,略大于理论值。其可能原因分析如下:(1)理论分析的简化假设。膜片周围区域的金属结构也会发生附加的微小变形;(2)仿真中考虑的应力集中效应。相比较于理论计算,其反映更真实的非均匀载荷分布,尤其是在边界和载荷作用点等应力集中区域;而应力集中会引起更大的局部变形,增加挠度。根据公式(12),得膜片式 FBG 压力传感器的仿真压力灵敏度为 1 902. 12 pm/MPa。

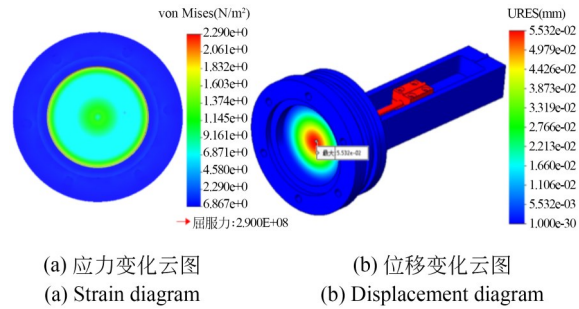


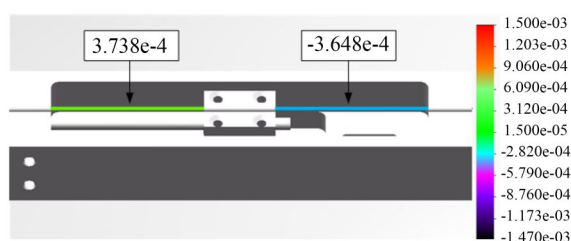
图 4 模拟压力为 2 MPa 时应力和位移变化云图

Fig. 4 Strain and displacement diagram with pressure 2 MPa

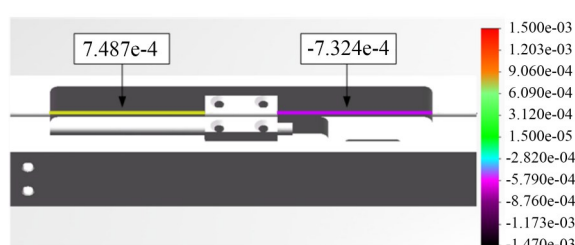
2.3.3 双光纤光栅应变一致性仿真

为了验证传感器在水压变化过程中两个光纤光栅的应变一致性,并确保差动测量方式能够实现灵敏度的两倍提升,对光栅的应变响应进行仿真分析。在不同水压条件下 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 MPa, 仿真光纤光栅的应变变化情况, 结果如图 5 所示。仿真结果表明, FBG1 产生正应变, 同时 FBG2 产生负应变, 符合结构设计的理论预期。图 5 表明, 在 0~0.5 MPa, 0~1.0 MPa, 0~1.5 MPa 和 0~2 MPa 的水压变化过程中, 两光栅应变变化分别为 373.8/ $-364.8 \mu\epsilon$, 748.7/

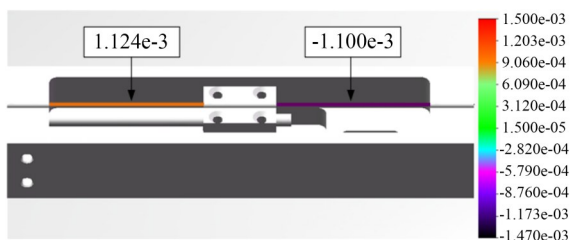
$-732.4 \mu\epsilon$, 1 124/ $-1 100 \mu\epsilon$, 1 499/ $-1 468 \mu\epsilon$ 。对结果进一步分析, 当水压从 0 升至 0.5 MPa 时, FBG1 与 FBG2 的应变变化分别为 373.8 $\mu\epsilon$ 和 $-364.8 \mu\epsilon$; 0.5 MPa 至 1.0 MPa 阶段分别为 374.9 $\mu\epsilon$ 和 $-367.6 \mu\epsilon$; 1.0 MPa 至 1.5 MPa 阶段分别为 375.3 $\mu\epsilon$ 和 $-367.6 \mu\epsilon$; 1.5 MPa 至 2.0 MPa 阶段分别为 375.0 $\mu\epsilon$ 和 $-368.0 \mu\epsilon$ 。综合上述数据可见, 各阶段两个光栅的最大绝对差值仅为 9 $\mu\epsilon$, 表明传感器在整个工作范围内具备良好的应变对称性, 两光栅具有较高的响应一致性, 从而确保差动测量方式的有效性。



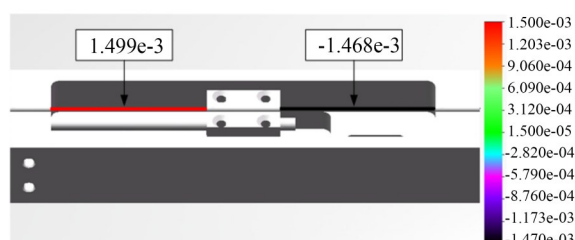
(a) 0.5 MPa应变云图
(a) 0.5 MPa strain cloud map



(b) 1.0 MPa应变云图
(b) 1.0 MPa strain cloud map



(c) 1.5 MPa应变云图
(c) 1.5 MPa strain cloud map



(d) 2.0 MPa应变云图
(d) 2.0 MPa strain cloud map

图5 传感器应变云图

Fig. 5 Sensor's strain cloud map

2.3.4 温度影响仿真

在 FBG 传感系统中, 温度变化会引起光栅的布拉格波长漂移, 影响压力测量的准确性。推挽式传感器通过差动测量方法有效抑制温度干扰, 其前提是两光栅需处于一致的温度环境。为了验证该条件, 本文采用瞬态传热分析方法, 模拟传感器由 24 $^{\circ}\text{C}$ 升至 25 $^{\circ}\text{C}$ 的温度变化过程, 并监测两个光栅的温度变化情况, 如图 6 所示。当传感器的温度达到外界温度的 90% 时, 认为系统

进入稳态。仿真结果显示, 两光栅在 250 s 内温度均趋于稳定。因此可以通过分析 250 s 内的温度数据, 判断两光栅所处温度环境的一致性。进一步对比两光栅温度差异, 如图 7 所示, 结果表明在稳态过程中光栅间的最大差为 0.013 97 $^{\circ}\text{C}$, 相对于 1 $^{\circ}\text{C}$ 的温度变化来说, 这一差值极小, 说明两光栅几乎处于相同的温度环境, 可有效实现温度补偿。

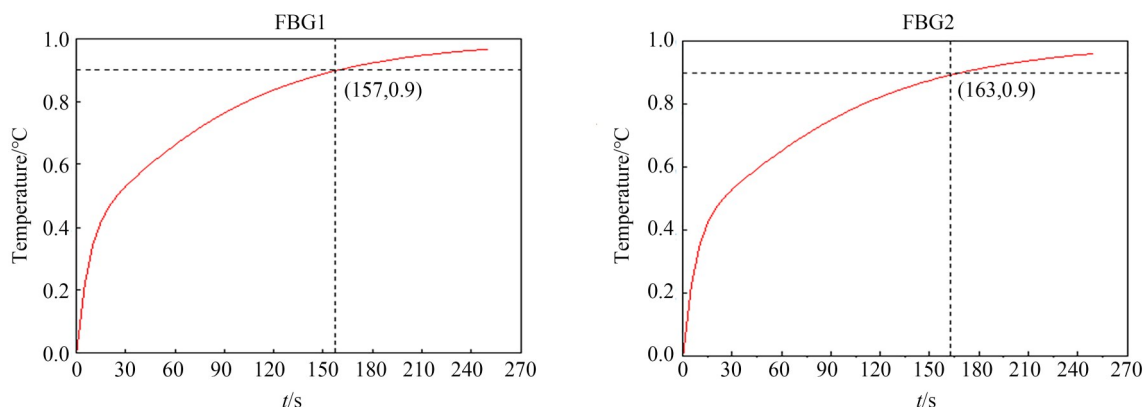


图6 光栅温度变化曲线

Fig. 6 FBG's temperature change curve

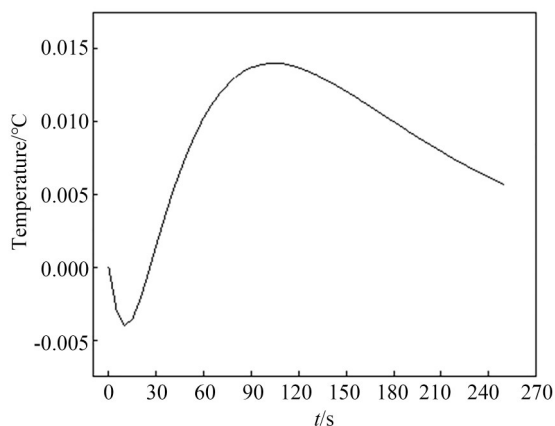


图7 两光栅温度差变化曲线

Fig. 7 Two FBGs' temperature difference change curve

3 推挽式FBG水压传感器实验结果与分析

根据上述的水压传感器结构设计和传感机理分析,该传感器应具有很高的压力灵敏度和很强的温度免敏性。为了验证其性能,后续实验将采用光纤光栅解调仪(1 pm 波长分辨率、 ± 0.4 pm 波长精度)及其他相关设备,对该传感器压力和温度响应特性进行系统测试,并对实验数据进行处理分析。

3.1 压力性能测试实验及分析

推挽式光纤光栅水压传感器的压力性能测试装置如图8所示。实验中,传感器受压部分通过橡胶软管连接压力校准装置(型号:MY-YJ600A),同时数字压力表(型号:DPI 104)实时

读取施加压力值(量程0~100 MPa,0.05%FS的准确度和1 kPa的分辨率)。传感器光纤输出端接入光纤光栅解调仪,用于实时采集FBG1和FBG2的反射波长,记录每个压力点对应的波长变化量。

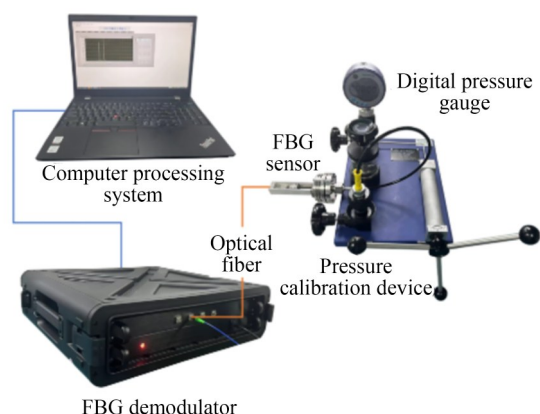


图8 压力性能测试框图

Fig. 8 Pressure performance test block diagram

实验在0~2 MPa的范围内以0.1 MPa的步长进行升压和降压测试,并重复三次以验证传感器的重复性和稳定性,测试曲线见图9。图9显示随压力增加FBG1的波长发生红移,FBG2则发生蓝移;这表明在压力作用下,FBG 1受到拉伸,FBG 2受到压缩,与设计预期相符,见方程(1)和方程(2)。其中,局部放图标示整条曲线中最大误差处同一压力点对应的波长变化区间(error bar)。实验结果表明,传感器对被测压力表现出优良的线性响应和重复性,即FBG1的平

均压力灵敏度为 914.17 pm/MPa,线性相关系数优于 0.999 95;FBG2 的平均压力灵敏度为 905.88 pm/MPa,线性相关系数优于 0.999 96。

基于推挽式结构,将两个 FBG 中心波长取差值即为传感器随着压力值的波长变化量。图 10 展示在三个压力循环测试过程中,FBG1 与 FBG2 中心波长差值随着压力值的变化曲线,表

征其良好的重复性和线性度。由此得出传感器总灵敏度为 1 820.05 pm/MPa,线性相关系数优于 0.999 6,验证推挽式结构能实现灵敏度加倍的设计目标,与设计预期相符,见方程(3)。

通过分析上述压力测试曲线,可以得出:(1)在 0~2 MPa 的压力范围内,传感器的实际压力响应灵敏度为 1 820.05 pm/MPa,接近仿真值

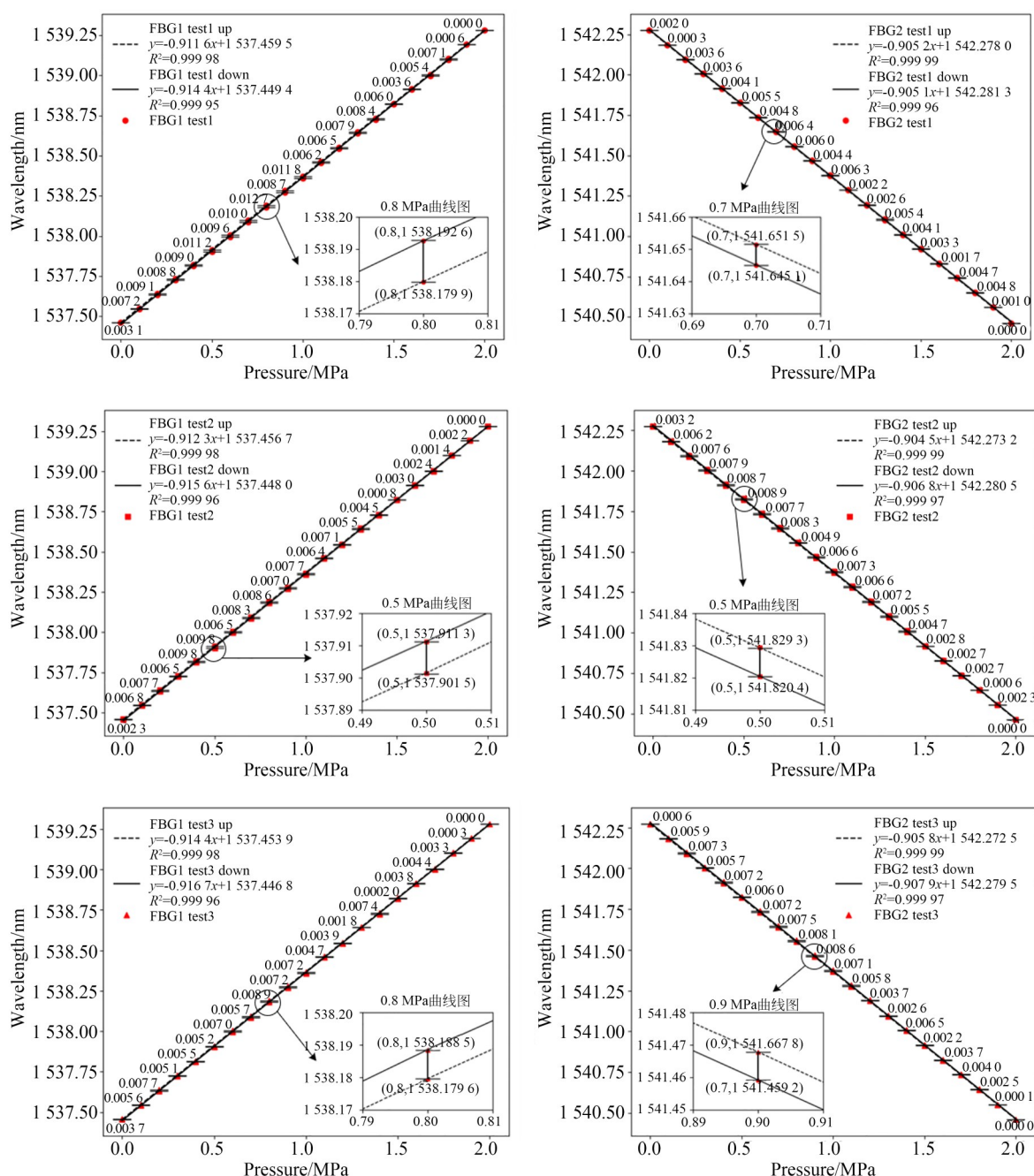


图9 三次测试FBG1和FBG2中心波长随压力的变化曲线

Fig. 9 Curve of the central wavelengths of FBG1 and FBG2 with pressure during three testing processes

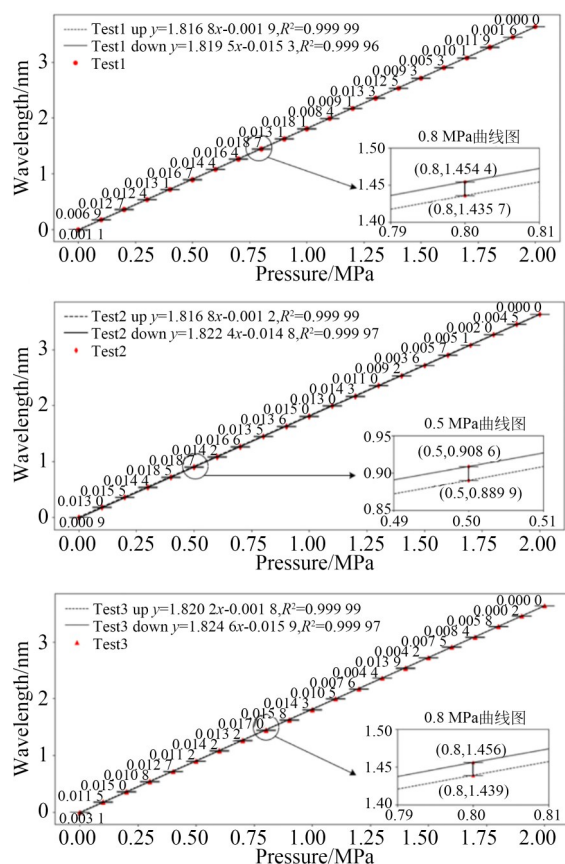


图 10 三次测试 FBG1 和 FBG2 中心波长差随压力变化曲线

Fig. 10 Curve of central wavelengths' difference of FBG1 and FBG2 with pressure during three testing processes

1 902. 12 pm/MPa。(2)采用最小二乘法^[29]拟合压力与波长变化量之间的关系曲线来评估线性度。线性度为 0.69%，表明测量值与拟合值一致，反映传感器优异的线性响应性能。(3)迟滞误差通过升压与降压同一压力点波长差计算，结果为 0.516%。(4)重复性分析中，利用贝塞尔公式计算^[29]获得最大标准差为 $\sigma=0.006\ 73$ ，依据极差法评估传感器的重复性为 $\zeta=3s/\lambda_{FS}=0.557\%$ 。

根据公式(1)和公式(2)，在不考虑温度对光纤影响的情况下，光纤的波长变化与应变呈线性关系。因此，波长偏移量可用来判断滑块运动过程中 FBG1 和 FBG2 应变变化的一致性。为了验证该一致性，在 0~2 MPa 的压力范围内，按 0.2 MPa 步进进行测试，并记录每个压力点波长变化，计算每个压力点相对于上一压力点间 FBG1 与 FBG2 的波长差值。实验结果如图 11 所示，最大波长差为 7.1 pm。结合灵敏度测试结果，每个

压力点变化的平均波长变化约为 182 pm，即波长变化的差异占比约为 4%，说明两光栅具有较好的应变同步性。相较于有限元仿真结果，该实验测得的应变差异较大，可能由以下因素导致：机械结构误差，滑块在传力过程中存在微小的机械间隙或形变，导致两光栅受力不完全对称；环氧树脂粘接光纤的不均匀和其材料的蠕变性能对光纤应变传递产生影响；实验环境中可能存在轻微的温度波动，造成额外的波长漂移，影响测量准确性。

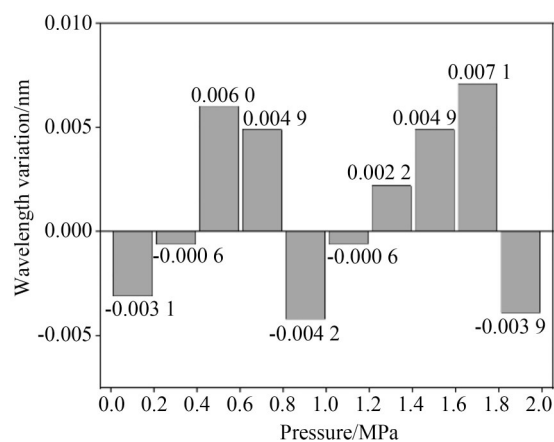


图 11 两 FBG 中心波长差随每个压力点变化的柱状图

Fig. 11 Bar chart of two FBGs' wavelength difference change with each pressure point

为评估传感器在快速压力变化下的动态响应性能，开展阶跃压力响应测试实验。利用压力校准装置给予传感器加载至 2 MPa 的稳态压力后，瞬时卸载至大气压，以此模拟阶跃水压变化过程；记录传感器输出压力随时间变化的响应曲线，结果如图 12 所示。为量化其响应速度，定义下降时间为传感器输出值从 90% 下降至 10% 所需的时间。根据实验数据分析，传感器在阶跃卸载过程中输出响应实时性高，测得下降时间为 0.55 s。该结果表明，所设计的布拉格光纤光栅水压传感器在动态水压突变下具有良好的实时响应特性。

另外，为了评估所设计水压传感器在恒定载荷下的长期稳定性，开展蠕变性能测试实验。施加传感器恒定水压载荷 0.5 MPa，并持续监测其输出响应值，记录 30 min 内的压力测量变化情况，结果如图 13 所示。实验结果表明，随着时间

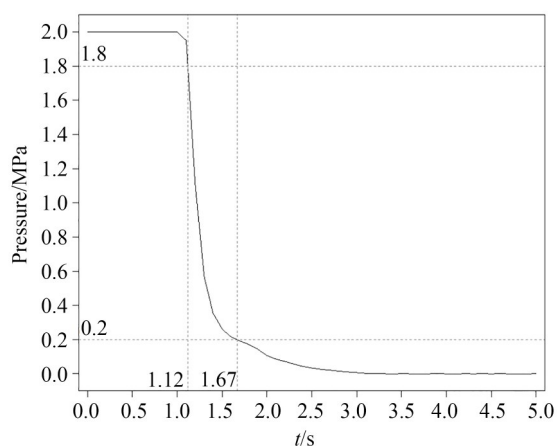


图 12 传感器在满载-卸载过程中的动态响应曲线

Fig. 12 Dynamic response curve of the sensor during the full-load-unload process

进程,其输出值在 0.5 MPa 附近上下波动,最大变化为 0.001 977 MPa,据此得到传感器的蠕变误差为 0.4%。值得注意的是,在长时间恒压测试中利用橡胶密封圈密封外界连接件与压力校准装置的连接处,势必会发生微量的压力泄漏,因此由蠕变引起的变化量应比实际测量值的要小很多。另外,本文传感器的主要受载件包括光纤、碳纤维传力杆及铝合金滑动部件;光纤及碳纤维材料本身具有极高的弹性模量和优良的抗蠕变能力;铝合金部件虽有一定蠕变倾向,但其所承担的应变很小,且作用于 FBG 的应变传递路径短、面积小,在传感部件整体中的比重很小。综上,结合实验测试与结构特性分析可知,本文传感器整体的蠕变特征非常微弱,可忽略不计。

3.2 温度性能测试实验及分析

FBG 本身具有温度敏感性,其中心波长会随着环境温度的变化而漂移,进而影响实际测得的应变值或压力值的准确性。因此基于 FBG 的光纤压力/应变传感器需要具有温度补偿能力。为了验证本文所述水压传感器的温度补偿性能,搭建如图 14 所示的温度测试系统。将传感器置于高低温湿热试验箱(型号:PL-150,温度范围:0~100℃,分辨率:0.01℃)内,用于调控传感器所处的周围环境温度;利用光纤光栅解调仪记录 FBG1 和 FBG2 中心波长变化。

实验过程中,调控试验箱内温度从 30℃逐步升高到 70℃,以 5℃为步进进行测试。结果如图

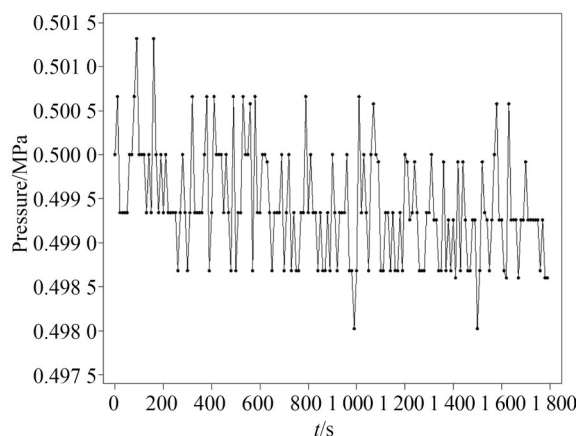


图 13 0.5 MPa 恒压下传感器输出压力随时间变化曲线

Fig. 13 Curve of the sensor output pressure varying with time under a constant pressure of 0.5 MPa

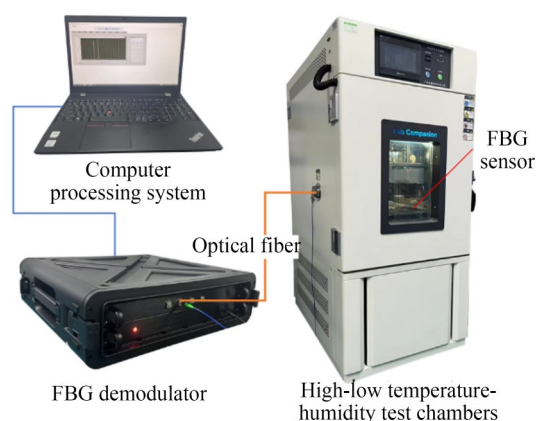


图 14 温度性能测试框图

Fig. 14 Temperature performance test block diagram

15 所示,FBG1 和 FBG2 的中心波长均随温度线性变化,温度灵敏度分别为 0.037 0 nm/℃和 0.037 6 nm/℃,线性相关系数分别为 0.999 8 和 0.999 9。

为进一步评估温度补偿效果,传感器中两 FBG 中心波长差随着温度变化的关系曲线如图 16 所示。实验表明,当温度从 30℃变化到 70℃时,FBG1 和 FBG2 单独的波长变化量分别为 1.484 2 nm 和 1.509 5 nm,而两者波长差变化为 0.025 3 nm。这表明,本文的推挽式双 FBG 技术大大降低温度变化对传感器波长的影响。据此计算,推挽式结构整体的温度灵敏度仅为 0.000 6 nm/℃,相比单独使用 FBG 时的温度灵敏度(0.037 0 nm/℃和 0.037 6 nm/℃)降低 60 倍。进一步分析表明,在未补偿的条件下,10℃

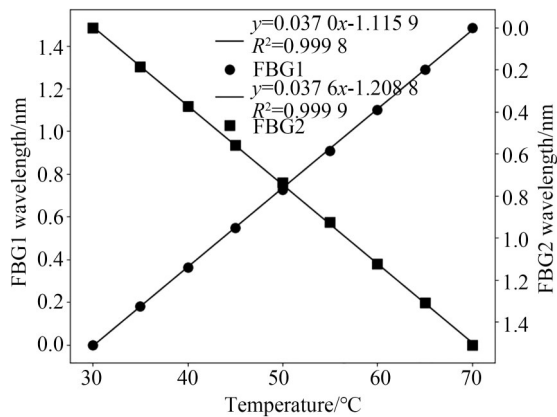


图 15 FBG1和FBG2中心波长随温度的变化曲线
Fig. 15 Curve of the central wavelengths of FBG1 and FBG2 with temperature

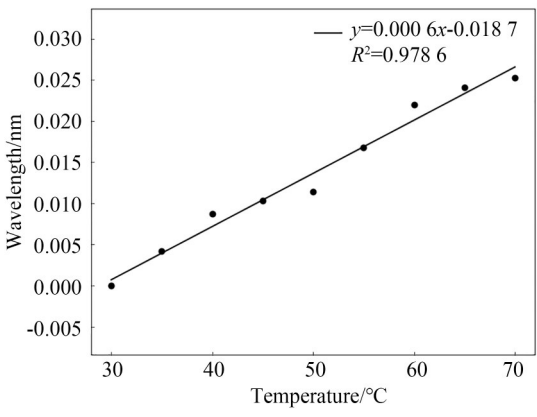


图 16 FBG1和FBG2中心波长差随温度的变化曲线
Fig. 16 Curve of the central wavelengths difference of FBG1 and FBG2 with temperature

的温度变化量将引起约 0.4 MPa 的压力误差;而补偿后其误差降至 0.003 MPa,这意味着本文所述的水压传感器几乎不再受到温度变化的干扰。由此证明,推挽式双 FBG 不仅成功地提高传感器的压力灵敏度,而且有效地消除温度对压力测量结果的交叉敏感,确保传感器在复杂环境中的高精度压力测试性能。

最后,通过详尽调研,将本文所述的光纤水压传感器与近年来报道的光纤水压传感器性能

进行对比,包括最大灵敏度、线性度和水压测量范围,如表 2 所示。与其他所报道的光栅水压传感器相比,本文研发的推挽式 FBG 水压传感器不仅具有较高灵敏度和良好线性度,还兼顾较宽的压力测量范围,综合性能较佳。特别是,引入推挽结构,有效减轻海水压力测量中的外部环境温度干扰,且重复性和可靠性较高,湿端无需供电,适用于海洋恶劣环境下的长期实时水压监测。

表 2 所提出的方案与近年来报道的光栅水压传感器比较

Tab. 2 Comparative analysis of performance of proposed sensor with recently reported schemes

Citation	Sensitivity/($\text{pm}\cdot\text{MPa}^{-1}$)	Sensing range/MPa	Liner dependence
This work	1 820.050	0~2.0	99.998%
Junhao Jing (2024) ^[24]	14 666.000	0~0.6	99.990%
Vaddadi (2022) ^[30]	19 240.000	0~0.3	99.640%
Fan (2021) ^[31]	3 402.000	0~0.2	99.850%
Wang (2020) ^[32]	1 611.000	0~1.0	99.985%
Mingyao Liu (2020) ^[21]	51.296	0~15.5	99.696%
Jia (2019) ^[33]	622.710	0~2.0	99.996%
Manuvinakurake (2018) ^[26]	1 030.000	0~2.0	99.940%

4 结 论

本文设计一种基于膜片和滑块结构结合的推挽式光纤布拉格光栅水压传感器,并通过实验验证其优异的性能。通过使用圆形弹性膜片作为承压元件,结合滑块结构,将外部海水压力传

递至推挽式双 FBG 传感器,实现压力的高灵敏度测量;并且具有良好的线性度、重复性、实时响应性、极弱的蠕变特性和温度不敏感性。实验结果表明,该传感器具有 2 MPa 的测量范围,同时具备 1 820.05 pm/MPa 的压力灵敏度;双 FBG 推挽技术显著提升光纤传感器的压力灵敏度,并且

有效消除压力与温度之间的交叉敏感性,温度敏感系数仅为 $0.0006 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$,确保在复杂环境中的应用稳定性。这一技术在光纤传感领域展现出强大的优势,特别适于海洋环境高精度、长时间实时监测需求。

作者贡献声明:

洪博诚:论文构思和撰写,测量实验设计及

数据整理和分析;

吴崇坚:测量实验数据分析;

于森:实验设计和指导;

常天英:项目管理,提供资源,论文审核、修改及编辑写作;

姜海明:论文写作指导;

崔洪亮:项目管理,提供资源,科研思路指导和编辑修改。

参考文献:

- [1] LIU Z Y, ZHANG S Q, YANG C K, *et al.* Submarine optical fiber sensing system for the real-time monitoring of depth, vibration, and temperature [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9: 922669.
- [2] HOWE B, AUCAN J, BARROS J, *et al.* SMART cables observing the oceans and earth[C]. *OCEANS 2021: San Diego-Porto. September 20-23, 2021, San Diego, CA, USA.* IEEE, 2021: 1-7.
- [3] ZHANG S Q, MEI Y C, XIA T T, *et al.* Simultaneous measurement of temperature and pressure based on Fabry-Perot interferometry for marine monitoring[J]. *Sensors*, 2022, 22(13): 4979.
- [4] MIN R, LIU Z Y, PEREIRA L, *et al.* Optical fiber sensing for marine environment and marine structural health monitoring: a review[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 140: 107082.
- [5] YAN Y X, GU Z T, WANG Y. Design and simulation of a cascaded-coated LPG-FBG sensor structure for simultaneous monitoring of CTD in ocean [J]. *Journal of Optics*, 2024, 53(1): 169-180.
- [6] GURU PRASAD A S, ASOKAN S, TATAVAR-TI R. Detection of tsunami wave generation and propagation using fiber bragg grating sensors [C]. *SENSORS, 2009 IEEE. October 25-28, 2009, Christchurch, New Zealand.* IEEE, 2009: 1278-1281.
- [7] LI T, SHANG H P, WANG B, *et al.* High-pressure sensor with high sensitivity and high accuracy for full ocean depth measurements[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(5): 3994-4003.
- [8] XU W, WANG J, ZHAO J F, *et al.* Reflective liquid level sensor based on parallel connection of cascaded FBG and SNCS structure[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(5): 1347-1352.
- [9] WEI H Z, XU D S, MENG Q S. A newly designed fiber-optic based earth pressure transducer with adjustable measurement range [J]. *Sensors*, 2018, 18(4): 932.
- [10] VORATHIN E, HAFIZI Z M, AIZZUDDIN A M, *et al.* A natural rubber diaphragm based transducer for simultaneous pressure and temperature measurement by using a single FBG [J]. *Optical Fiber Technology*, 2018, 45: 8-13.
- [11] VORATHIN E, HAFIZI Z M, AIZZUDDIN A M, *et al.* A highly sensitive multiplexed FBG pressure transducer based on natural rubber diaphragm and ultrathin aluminium sheet[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 106: 177-181.
- [12] RONG Q Z, QIAO X G. FBG for oil and gas exploration [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(11): 2502-2515.
- [13] 王天祺, 南鑫灏, 蔡林原, 等. 高灵敏度、高精度的光栅应变传感系统[J]. *光学精密工程*, 2024, 32(22): 3257-3265.
WANG T Q, NAN X H, CAI L Y, *et al.* Grating strain sensing system with high sensitivity and high precision[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(22): 3257-3265. (in Chinese)
- [14] SCHENATO L, AGUILAR-LÓPEZ J P, GALTAROSSA A, *et al.* A rugged FBG-based pressure sensor for water level monitoring in dikes[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(12): 13263-13271.
- [15] SONG D C, WEI Z X, ZOU J L, *et al.* Pressure sensor based on fiber Bragg grating and carbon fiber ribbon-wound composite cylindrical shell [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2009, 9(7): 828-831.
- [16] PACHAVA V R, KAMINENI S, MADHUVARASU S S, *et al.* FBG based high sensitive pressure sensor and its low-cost interrogation sys-

- tem with enhanced resolution [J]. *Photonic Sensors*, 2015, 5(4): 321-329.
- [17] LAO J D, WANG C, TANG Y Q, *et al.* Liquid pressure sensor based on fiber Bragg grating with an adjustable structure [J]. *Sensors*, 2022, 22(23): 9188.
- [18] HER S C, WENG S Z. Fiber Bragg grating pressure sensor integrated with epoxy diaphragm [J]. *Sensors*, 2021, 21(9): 3199.
- [19] ZHENG H K, ZHAO Y, ZHAO Q, *et al.* High sensitivity optical fiber pressure sensor based on thin-walled oval cylinder [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 310: 112042.
- [20] DE OLIVEIRA L A, DE SOUSA F B, DE SOUSA F M, *et al.* Prototype of a sensor for simultaneous monitoring of water level and temperature of rivers in the Amazon using FBG [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2022, 54(11): 731.
- [21] LIU M Y, WU Y B, DU C R, *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.
- [22] AHMAD H, CHONG W Y, THAMBIRATNAM K, *et al.* High sensitivity fiber Bragg grating pressure sensor using thin metal diaphragm [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2009, 9(12): 1654-1659.
- [23] VORATHIN E, HAFIZI Z M, AIZZUDDIN A M, *et al.* A novel temperature-insensitive hydrostatic liquid-level sensor using chirped FBG [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(1): 157-162.
- [24] JING J H, GUO Y X, WANG T, *et al.* A femto-second fiber Bragg grating-based high-sensitivity ocean pressure sensor [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(10): 16102-16112.
- [25] 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.
- [26] MANUVINAKURAKE M, GANDHI U, MAN-GALANATHAN U, *et al.* Design, fabrication and testing of fiber Bragg grating based fixed guided beam pressure sensor [J]. *Optik*, 2018, 158: 1063-1072.
- [27] LIANG M F, FANG X Q, WU G, *et al.* A fiber Bragg grating pressure sensor with temperature compensation based on diaphragm-cantilever structure [J]. *Optik*, 2017, 145: 503-512.
- [28] LIANG M F, FANG X Q. Application of fiber Bragg grating sensing technology for bolt force status monitoring in roadways [J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(1): 107.
- [29] FENG D Q, XU D P, CHEN F Y, *et al.* An FBG temperature - pressure sensor based on diaphragm and special-shaped bracket structure [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(4): 3589-3596.
- [30] VADDADI V S C S, PARNE S R, V P V, *et al.* Design and fabrication of liquid pressure sensor using FBG sensor through seesaw hinge mechanism [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14(5): 6855107.
- [31] 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.
- [32] WANG L, WANG Y J, WANG J F, *et al.* A high spatial resolution FBG sensor array for measuring ocean temperature and depth [J]. *Photonic Sensors*, 2020, 10(1): 57-66.
- [33] JIA Z, FAN Q, FENG D, *et al.* Design and investigation of the fiber Bragg grating pressure sensor based on square diaphragm and truss-beam structure [J]. *Optical Engineering*, 2019, 58(9): 097109.

作者简介:



洪博诚(1999—),男,广东汕头人,硕士,2022年于广东技术师范大学获得学士学位,2025年于广东工业大学获得硕士学位。主要从事光纤光栅传感与机械结构设计方面的研究。E-mail: bcho373@163.com

通讯作者:



常天英(1981—),女,山东烟台人,博士,研究员,博士生导师。2009年于山东大学获得博士学位。主要研究先进光纤传感技术及应用。E-mail: ty.chang@siat.ac.cn