

引用本文:张栋宇,白燕,刘国权,等. 应用于注水井的靶式光纤布喇格光栅流量传感器[J]. 光通信技术,2023,47(3):79–85.

应用于注水井的靶式光纤布喇格光栅流量传感器

张栋宇¹,白 燕¹,刘国权²,陈 强²,乔学光^{3*}

(1.西安石油大学 理学院,西安 710065;

2.中国石油测井有限责任公司 测井技术研究院,西安 710005.;3.西北大学 物理学院,西安 710127)

摘要:为了解决注水井下安装和维护传感器难度大和成本高的问题,设计和理论分析了一种基于杠杆-铰链结构的靶式光纤布喇格光栅(FBG)流量传感器,将传感器结构中的 FBG₁ 和 FBG₃ 分别粘贴在杠杆-铰链两端构成差动结构,使传感器具有低启动与大量程特性;通过温度补偿光栅 FBG₂ 实现了温度和流量的同时测量。对传感器的结构进行了仿真与优化,得出传感器的优化参数,并以此参数为基础进行流量测量、重复性、温度测量、温度补偿、稳定性等实验。实验结果表明,该传感器可以同时测量流体流量和温度,其温度灵敏度为 17.94 pm/℃,流量分辨率为 0.039 L/s。

关键词:光纤传感器;流量;温度;监测;石油测井

中图分类号:TP212; TN253 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2023)03-0079-07

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.03.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Target fiber Bragg grating flow sensor for water injection well

ZHANG Dongyu¹, BAI Yan¹, LIU Guoquan², CHEN Qiang², QIAO Xueguang^{3*}

(1. School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

2. Logging Technology Research Institute, China Petroleum Logging Co., Ltd., Xi'an 710005, China;

3. School of Physics, Northwest University, Xi'an 710127, China)

Abstract: In order to solve the problems of difficulty and high cost in installing and maintaining sensors in water injection well, a target type fiber Bragg grating(FBG) flow sensor based on lever-hinge structure is designed and theoretically analyzed. FBG₁ and FBG₃ in the sensor structure are pasted on the two ends of lever-hinge respectively to form a differential structure, which makes the sensor have the characteristics of low start-up and large range. Temperature compensation grating FBG₂ is used to measure the temperature and flow simultaneously. The structure of the sensor is simulated and optimized, and the optimization parameters of the sensor are obtained. Based on these parameters, flow measurement, repeatability, temperature measurement, temperature compensation and stability experiment are carried out. The experimental results show that the sensor can simultaneously measure the fluid flow and temperature, its temperature sensitivity is 17.94 pm/℃ and the flow resolution is 0.039 L/s.

Key words: optical fiber sensor, flow, temperature, monitoring, oil well measuring

0 引言

随着深层石油勘探的快速发展,具有复杂孔喉特征的低渗透储层稳步增加^[1],一般通过注水来维持储

层的压力,以提高石油开发效率^[2]。因此,准确检测注水井中温度、压力和流量显得尤为重要和紧迫。目前,国内外研究人员已经对温度和压力传感器进行了大量研究,但对流量传感器的报道较少。传统的电类流量传感器难以在井下 170 ℃ 或更高温度下稳定工作,具有易燃和爆炸的缺点。此外,井下的电磁干扰会显著严重电类传感器的可靠性^[3-4]。光纤布喇格光栅(FBG)传感器具有灵敏度高、耐腐蚀、抗电磁干扰、易于实现准分布等优点^[5-10],可用于井中分层流体流量的测量。FBG 流量传感器(用于流量测量的 FBG 传感器)主要有差压式^[11]、靶式^[12]、热线式^[13]3 种。其中,差压式流量传感器的取压管与传感元件安装在管路外部^[14-15],不便在井内安装;热线式流量传感器需要安装热源^[16-18],降低

收稿日期:2023-03-07。

基金项目:国家自然科学基金项目(61927812,61735014)资助;中国石油集团科研项目(2021DJ4004)资助;西安石油大学研究生创新基金项目(YCS21113155)资助。

作者简介:张栋宇(1996—),男,硕士研究生,主要研究方向为油气勘探与生产中井下流量测量的光纤光栅传感技术。

***通信作者:**乔学光(1955—),男,理学博士,教授,博士生导师,主要研究方向为光电子技术、光纤通信与传感、油气勘探与生产中的光纤传感器系统、地质勘探、长距离油气管道泄漏检测等。



张栋宇,白燕,刘国权,等:应用于注水井的靶式光纤布喇格光栅流量传感器

了FBG的安全特性,且该传感器适用于小流量测量,不适用于注水井中的大流量测量;靶式传感器具有测量范围大、耐高压和抗振性好的特点,适用于注水井中的流量监测。但是,由于注水井内的过流通道的直径只有23 mm左右,靶式流量传感器的悬臂长度可达50 mm,只能在管道上安装凸台或薄壁圆筒来容纳悬臂梁^[19-22],导致在注水井下安装和维护传感器的难度大、成本高。

本文提出一种基于杠杆-铰链结构的靶式FBG流量传感器,显著缩小传感器尺寸,且无需安装额外的容纳装置,可直接安装在注水井中。

1 传感器结构设计及测量原理

1.1 结构设计

图1为本文提出的靶式FBG传感器(下文简称传感器)的结构示意图。该传感器由靶片、传力杆、杠杆-铰链、光纤粘贴盘、基座、扇形帽组成。扇形帽的半径与管道的半径相同,将扇形帽紧压在管道内壁上固定传感器。杠杆-铰链固定在基座前端,杠杆的输入端通过传力杆与靶片相连。在杠杆的输出端增加了一个额外的粘贴盘来增加输出端的截面积,以便于固定光栅。杠杆的迎流面为流线型设计,以减少流体对杠杆的影响。粘贴盘、基座顶部和基座底部都刻有浅凹槽,用于放置光纤。将用于流量传感的FBG₁和FBG₃施加预应力后,固定在杠杆的输出端和基座之间。靶片受到流体压力时,压力将通过杠杆-铰链传递到FBG₁和FBG₃,使其中心波长发生漂移。因此,可以通过监测中心波长的偏移量来测量流量。温度补偿光栅FBG₂与FBG₁、FBG₃处于同一温度场中,将其粘贴在基座顶部的凹槽内用于消除温度影响。

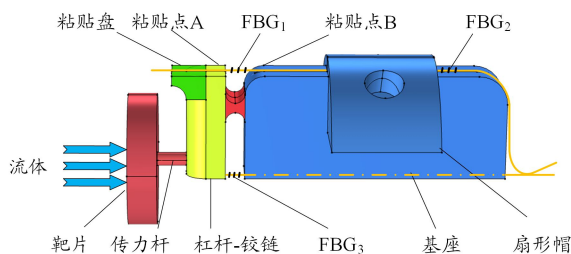


图1 靶式FBG流量传感器结构示意图

1.2 测量原理

假设注入管道的流体密度为 ρ ,靶片面积为 A_1 ,阻力系数为 ζ ,流速为 v ,压力为 P ,则流体对靶片的压力可以根据伯努利方程进行计算,如式(1)所示。

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

压力 P 通过杠杆传递到FBG₁。假设杠杆为刚体, l_1 和 l_2 分别表示杠杆动力臂和阻力臂的长度, K_M 为杠杆-铰链的旋转刚度, K_f 为FBG₁的弹性系数,忽略杠杆-铰链受剪力的变形。假设杠杆的输入位移和输出位移分别为 x_{in} 和 x_{out} ,根据受力平衡可以得到

$$Pl_1 + K_f l_1 x_{in} = K_M \theta + K_f l_2 x_{out} \quad (2)$$

其中, θ 为铰链的转动角度, $\theta = x_{out}/l_2$; x_{in} 和 x_{out} 的关系如式(3)所示, ω 为杠杆-铰链的放大倍数。

$$x_{in} = \omega x_{out} \quad (3)$$

若 ε 是轴向应变,则FBG₁、FBG₂、FBG₃的中心波长的变化 $\Delta\lambda$ 与应变变化 $\Delta\varepsilon$ 、温度变化 ΔT 的关系为

$$\Delta\lambda_1 = K_{\varepsilon 1} \varepsilon_1 + K_{T1} \Delta T \quad (4)$$

$$\Delta\lambda_2 = K_{\varepsilon 2} \varepsilon_2 + K_{T2} \Delta T \quad (5)$$

$$\Delta\lambda_3 = K_{\varepsilon 3} \varepsilon_3 + K_{T3} \Delta T \quad (6)$$

其中, K_{ε} 为FBG的应变灵敏度系数,且 $K_{\varepsilon 1} = K_{\varepsilon 2} = K_{\varepsilon 3}$; K_T 为温度灵敏度系数,由于封装导致各FBG的热膨胀系数发生变化,因此 K_{T1} 、 K_{T2} 、 K_{T3} 不同。3个FBG处于相同的温度场中,它们具有相同的温度变化 ΔT 。用式(4)减去式(6)得到差动结构的波长与应变的关系为

$$\Delta\lambda_{13} = K_{\varepsilon 1} (\Delta\varepsilon_1 - \Delta\varepsilon_3) + (K_{T1} - K_{T3}) \Delta T \quad (7)$$

式(7)可简化为

$$\Delta\lambda_{13} = K_{\varepsilon 1} \Delta\varepsilon_{13} + K_{T13} \Delta T \quad (8)$$

其中, $\Delta\varepsilon_{13} = \Delta\varepsilon_1 - \Delta\varepsilon_3$, $K_{T13} = K_{T1} - K_{T3}$ 。

将式(5)与式(8)构建双参数矩阵,可以区分测量温度和应变^[23]。

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{13} \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\varepsilon 1} & K_{T13} \\ K_{\varepsilon 2} & K_{T2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} \quad (9)$$

消除温度项后,得到波长变化与应变的关系为

$$\Delta\lambda = K_{\varepsilon 1} \Delta\varepsilon_{13} \quad (10)$$

如果FBG₁和FBG₃的两粘贴点的距离为 a ,则应变 ε 可以计算为

$$\varepsilon = x_{out}/a \quad (11)$$

若管道内径为 D ,靶径为 d ,体积流量 Q 与流速 v 的关系为

$$Q = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) v \quad (12)$$

联立上述各式得到波长变化与流量的关系为

$$\Delta\lambda = \frac{8}{\pi^2 (D^2 - d^2)^2} \times \frac{K_{\varepsilon} l_1 l_2 \rho \zeta A_1}{a (K_f l_2^2 + \omega K_f l_1 l_2 + K_M)} Q^2 \quad (13)$$

其中, E_f 和 A_f 分别为光纤的杨氏模量和横截面积, K_f

和 $K_M^{[24]}$ 可以表示为

$$K_f = \frac{A_f E_f}{a} \quad (14)$$

$$K_M = \frac{E_1 b u^2}{12} \times \left[\frac{2s^3 (6s^2 + 4s + 1)}{(2s+1)(4s+1)^2} + \frac{12s^4 (2s+1)}{(4s+1)^{5/2} \arctan \sqrt{4s+1}} \right]^{-1} \quad (15)$$

其中, E_1 为铰链的杨氏模量, s 为中间参数 ($s=u/t$), b 、 t 、 u 分别为铰链部分的厚度、腰宽、半径。由式(13)可知,波长变化与流量呈二次关系,而且可以通过移动杠杆-铰链的位置来改变测量范围与灵敏度。

2 仿真和结构优化

本文使用 COMSOL 软件进行有限元仿真,对传感器的结构进行仿真和优化。仿真参数如下:传感器由 304 不锈钢制成,杨氏模量为 1.93×10^5 MPa,泊松比为 0.3;靶片半径为 7.8 mm,靶外部分高度为 11.5 mm;杠杆的长度为 11 mm,杠杆-铰链的腰部宽度和半径均为 1 mm;基座固定,杠杆-铰链、靶片和传力杆部分可自由移动,流体的压力垂直于靶片;为 FBG₁ 和 FBG₃ 设置预应力以模拟 FBG 封装后的拉伸状态。

2.1 传感器应变分布模拟

向传感器施加压力,计算得到 FBG 上的应变分布,当对靶片施加 1 MPa 压力时计算出的应变分布如图 2 所示。可以看出,应变主要分布在柔性杠杆-铰链和 FBG₁、FBG₃ 上。当 FBG₁ 受力进一步拉伸,FBG₃ 则部分回缩。FBG₁ 上的归一化应变分布如图 3 所示。可以看出,FBG₁ 上的应变分布均匀,表明这种传感器结构可以避免 FBG 产生啁啾。



2.2 FBG 的应变与粘贴距离的模拟

由式(11)可知,FBG 上的应变与两粘贴点之间的距离有关。在 1 MPa 的压力下,将粘贴点 A 和 B 之间的距离从 1 mm 逐渐改为 8 mm,得到应变随距离变化的曲线如图 4 所示。可以看出,FBG₁ 和 FBG₃ 上的应变随着距离的增加而减小,2 个 FBG 在 1 mm 距离处产生的应变分别约为 8 mm 距离处的 5 倍和 3 倍。

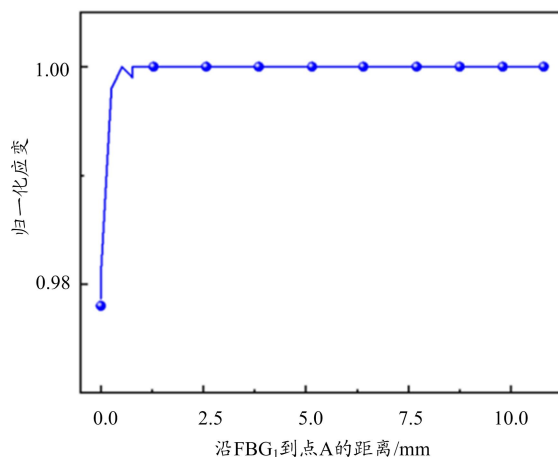


图3 FBG₁ 的归一化应变分布

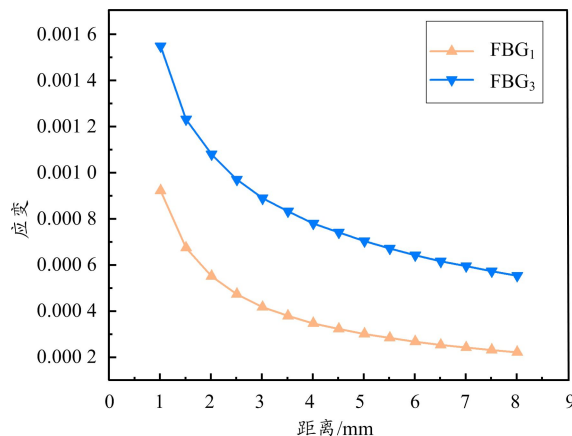


图4 应变随距离变化的曲线

2.3 FBG 的应变与杠杆-铰链位置及腰宽的模拟

将杠杆-铰链的位置从传力杆的水平高度开始逐渐向上移动,计算各位置处对应的 FBG₁、FBG₃ 应变之和,应变之和随杠杆-铰链位置变化的曲线如图 5 所示。可以看出,应变之和随杠杆-铰链位置的增高而增加,在 7~7.5 mm 时应变取得最大值,但增速趋于平缓。

杠杆-铰链的腰宽应尽可能窄,使杠杆-铰链能够

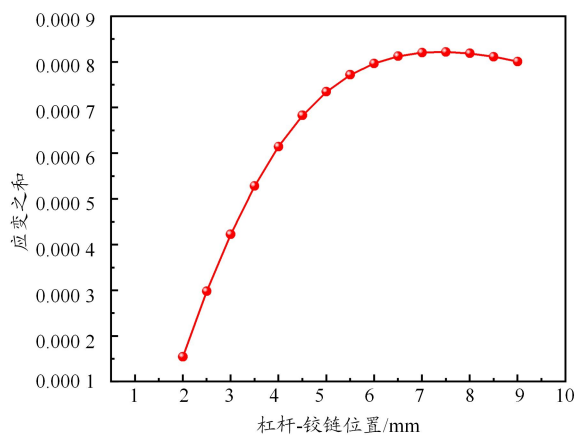


图5 应变之和随杠杆-铰链位置变化的曲线

张栋宇,白燕,刘国权,等:应用于注水井的靶式光纤布喇格光栅流量传感器

将流体的动能转化为光纤的弹性势能,而不是将流体的动能储存在杠杆-铰链中。本文改变杠杆-铰链的腰宽以获得杠杆输出的位移和 FBG_1 上的应变,仿真结果如图 6 所示。可以看出, FBG_1 、 FBG_3 上的应变之和与杠杆的输入输出位移之和随着杠杆-铰链腰宽的增加而减小。兼顾传感器的灵敏度与量程,同时考虑加工难度,本文设置杠杆-铰链腰宽为 1 mm。

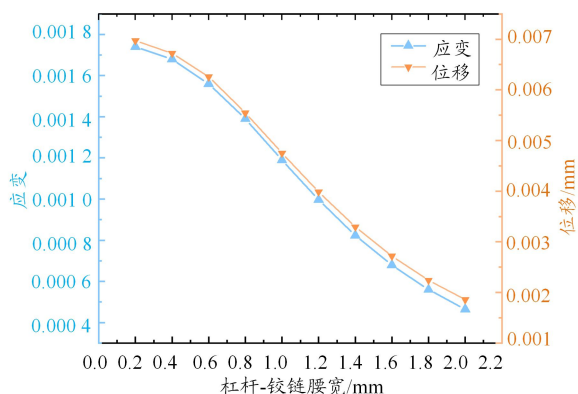


图6 杠杆-铰链腰宽与杠杆输出位移、 FBG_1 应变的关系

综合考虑测量要求后,本文传感器的优化参数如下: FBG_1 的粘贴点 A 和 B 之间的距离为 4 mm, FBG_3 的粘贴距离与 FBG_1 相同; 杠杆-铰链的位置在 7 mm 处, 杠杆-铰链腰宽为 1 mm; 基座两侧的直角改为圆角, 避免光纤在拉伸过程中被直角切断。

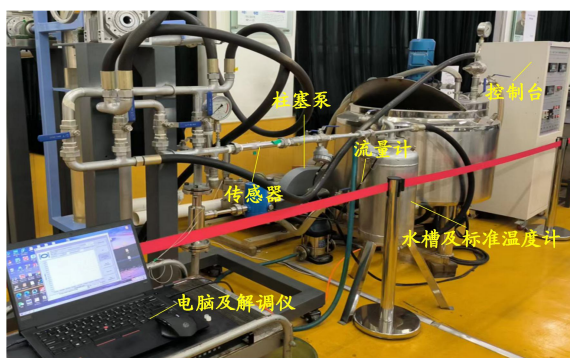
3 实验和讨论

本文对优化参数后的传感器进行实验。传感器使用 304 不锈钢材质加工, 使其具有耐腐蚀、耐高温、成本低等优点。FBG 的栅区长度为 3 mm, 实验采用电加热熔化玻璃颗粒的方法来固定 FBG。

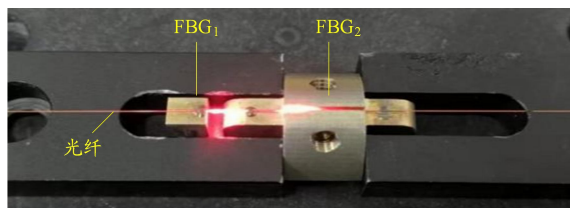
3.1 流量测量实验

实验系统及传感器实物图如图 7 所示。罐中的流体由柱塞泵泵出, 通过控制台改变柱塞泵的频率来调节流体流量, 经标准流量计和传感器流回罐内。罐中的标准温度计用于检测流体温度, 管道上安装的标准流量计可以实时监测流体流量。 FBG_1 和 FBG_2 为同一根光纤上写入的 2 个光栅, 光纤从管道中拉出并连接到解调仪。

流量测量实验在 15 °C 环境温度下进行。流体流量为 968~4 300 L/h 时, 记录不同流量下 FBG 的反射光谱和中心波长, 如图 8 所示。可以看出, 随着流量的增加, FBG_1 的反射光谱红移, FBG_3 的反射光谱蓝移, FBG_2 的反射光谱没有发生明显漂移。同时, FBG_1 和 FBG_3 的波形没有变化。这表明本文所设计的传感结构



(a) 实验系统



(b) 传感器

图7 实验系统与传感器实物图

能够避免 FBG 产生啁啾。

流量测量实验中心波长曲线如图 9 所示。可以看出, FBG_1 、 FBG_3 的中心波长与流量呈二次关系, 与理论分析相符。实验测得 FBG_1 和 FBG_3 的中心波长随流量变化的二次项系数分别为 2.09×10^{-8} 和 -3.11×10^{-8} 。将 FBG_1 和 FBG_3 的中心波长曲线相减得到差动结构的波长 $\Delta\lambda_{13}$ 与流量的二次曲线, 其系数为 5.2×10^{-8} 。据此系数计算得到流量分辨率为 0.038 L/s。

低启动是井下流量传感器的一项重要指标, 但对于传感器而言, 低启动与大量程往往难以兼备。因此, 本文将实验平台的柱塞泵更换为齿轮泵以进行小流量测试。调节齿轮泵频率, 使流量步长为 100 L/h, 在流量为 100~1 000 L/h 内分别升高、降低流量, 得到低启动测试 $\Delta\lambda$ 变化曲线如图 10 所示。经计算, 可以得出 $\Delta\lambda$ 变化曲线二次项系数为 5.04×10^{-8} , 流量分辨率为 0.039 L/s。这表明本文所提传感器对小流量具备敏感性, 具有低启动的优点。

3.2 重复性实验

重复性是衡量传感器性能稳定性的重要指标。本文在不同时间重复 2 次实验, 流量步长为 300 L/h, 流体流量为 968~4 300 L/h。传感器重复实验 $\Delta\lambda_{13}$ 变化曲线如图 11 所示。可以看出, 4 条测试曲线非常接近, 表明传感器的重复性较好。由于几次实验的环境温度不同以及水温的轻微波动, 因此仍存在微小差异。

3.3 温度测量实验

本文在温度分辨率为 0.1 °C 的干燥箱(型号为 101-

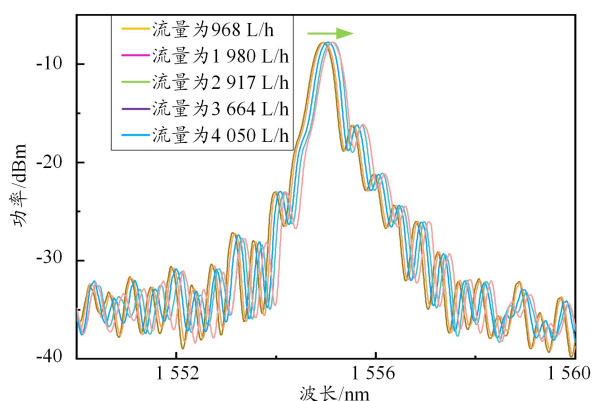
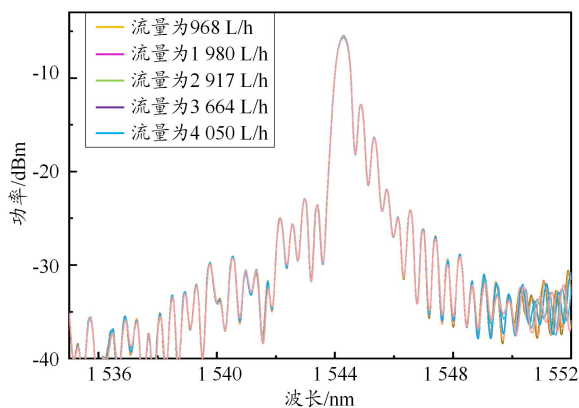
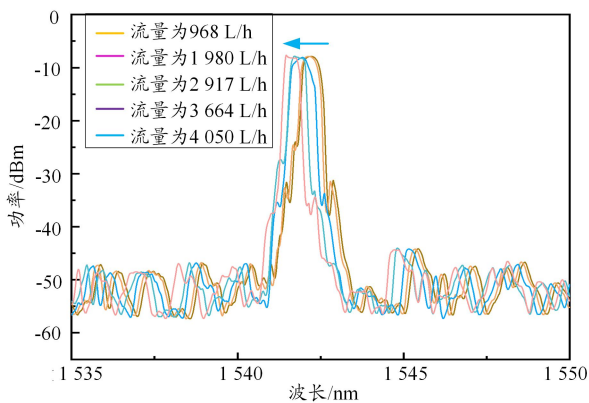
(a) FBG₁ 反射光谱(b) FBG₂ 的反射光谱(c) FBG₃ 的反射光谱

图8 FBG在不同流量下的反射光谱

2AB)中进行温度测量实验,温度为30~200℃。首先将FBG₂粘贴在基座底部的凹槽中,然后将传感器放置在干燥箱中,通过光纤连接到解调仪,实验结果如图12所示。可以看出,FBG的波长偏移与温度呈线性关系,FBG₁、FBG₂、FBG₃的温度灵敏度分别为17.49、17.94、15.15 pm/℃。FBG₁和FBG₃对温度的敏感度略低于FBG₂,表明金属的热膨胀应变由于杠杆-铰链而没有完全转化到FBG₁和FBG₃,与理论分析得到的式(10)

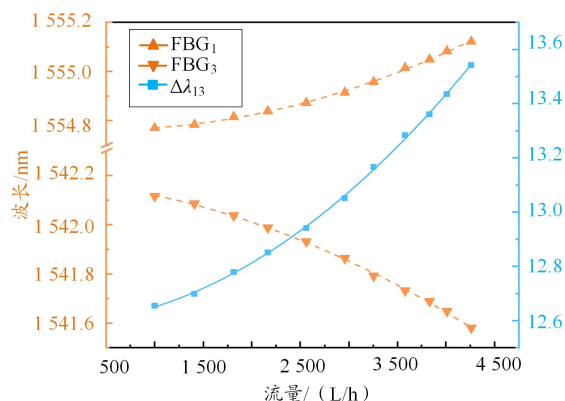
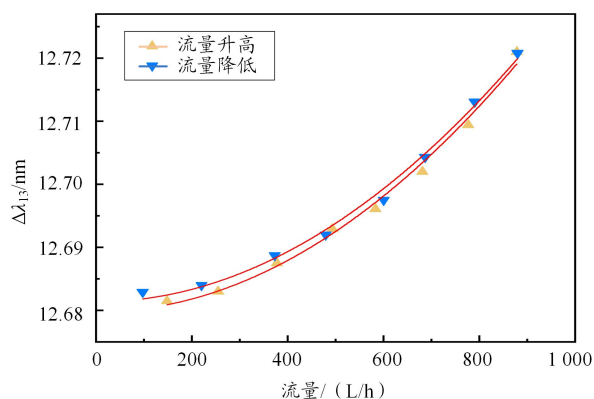
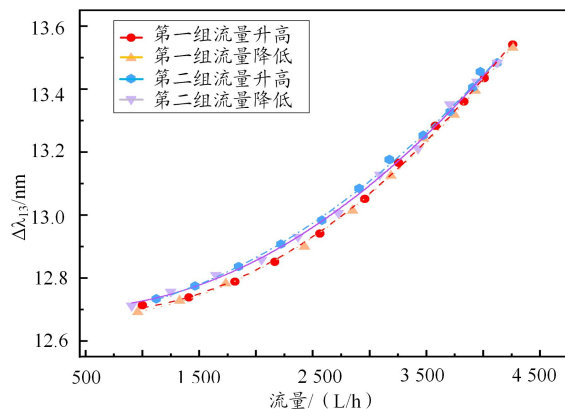


图9 流量测量实验中心波长变化曲线

图10 低启动测试实验时的 $\Delta\lambda$ 变化曲线图11 传感器重复实验时的 $\Delta\lambda_{13}$ 变化曲线

一致。将FBG₁与FBG₃的温度灵敏度相减,得到差动结构的温度灵敏度仅为2.34 pm/℃,表明差动结构本身具有较好的去除温度干扰的能力。

3.4 温度补偿实验

FBG₂可以进一步去除温度影响,并且实现温度与流量的同时测量。将水注入水箱内壁和外壁之间的夹层并加热,实现水浴加热水箱中的流体目的。设置不同的水浴温度,重复3次实验。流量在预设水温下改变,得到FBG₁和FBG₃的差动波长 $\Delta\lambda_{13}$ 以及FBG₂的

张栋宇,白燕,刘国权,等: 应用于注水井的靶式光纤布喇格光栅流量传感器

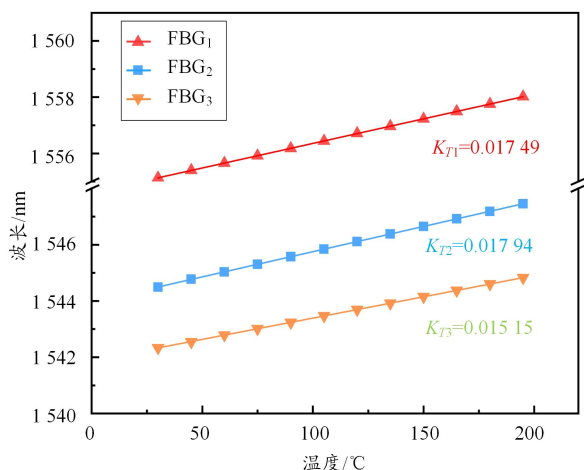


图 12 FBG 的中心波长随温度变化情况

中心波长随流量的变化,如图 13 所示。可以看出,差动波长随流量呈二次变化,而 FBG₂ 的中心波长不随流量改变。

当对传感器分别进行 15.1、21.5、31.9 °C 温度补偿后,波长漂移量与流量的关系如图 14 所示。可以看出,在不同温度下,波长漂移量随流量改变产生的偏

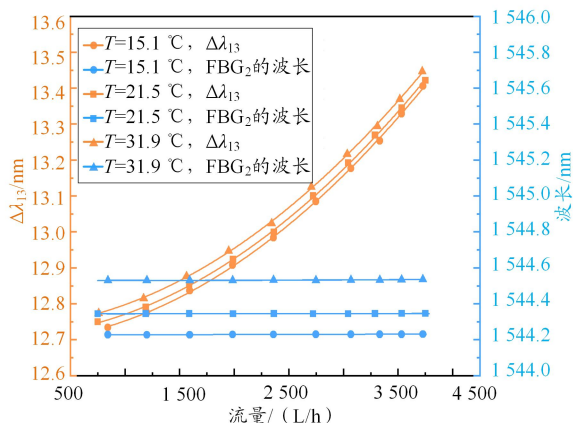


图 13 不同温度下中心波长随流量变化情况

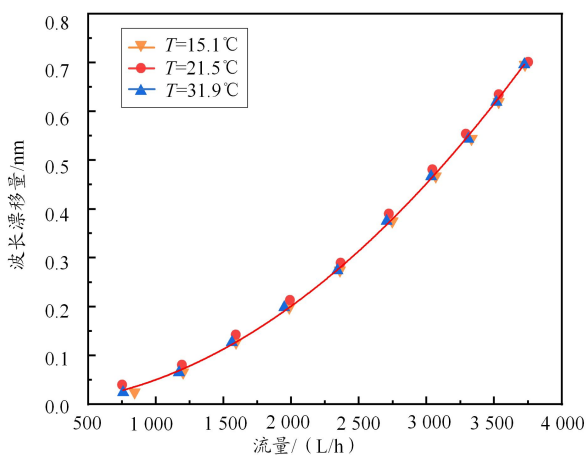


图 14 温度补偿测试时的波长漂移量与流量之间的关系曲线

移是一致的。此时的二次项系数为 5.03×10^{-8} , 因此可计算出流量分辨率为 0.039 L/s。该流量分辨率与流量测量实验得到的流量分辨率相差 0.001 L/s。这表明温度补偿后的传感器可以同时测量流量和流体温度。

3.5 传感器的稳定性

传感器的稳定性对于注水井或管道中的流量测量非常重要。实验时,每隔一段时间改变柱塞泵的流量,记录 FBG 中心波长的变化,得到波长随时间变化情况如图 15 所示。可以看出,FBG₂ 的中心波长基本不发生变化;FBG₁ 和 FBG₃ 的中心波长波动很小,但随着流量的增加,波动逐渐增大,产生的最大偏差约为 300 pm。经分析认为,这个偏差是由于管道的振动造成的。因此,本文所提传感器具有良好的稳定性与响应速度。

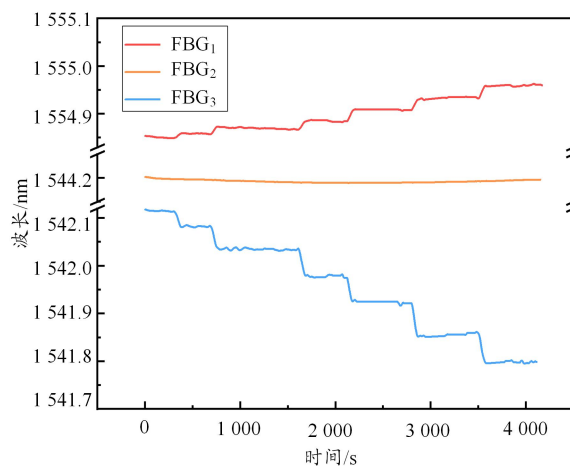


图 15 波长随时间变化情况

4 传感器特性对比

传感器是否可以安装在管道中取决于悬臂梁与管道的相对尺寸比值,比值小于 1 表示传感器可以直接安装在管道中;比值为 1 或更大表示传感器不能直接安装在管道中,需要额外安装三通或凸台来容纳传感器。本文对几种传感器特性进行了比较,结果如表 1 所示。可以看出,已报道的传感器的悬臂梁与

表 1 各种靶式 FBG 流量传感器的尺寸和分辨率

悬臂的类型	长度/ mm	比值	流量分辨 率/(L/s)	温度灵敏 度/(pm/°C)
空心圆柱悬臂 ^[19]	40	1	0.047	10.25
一体式悬臂梁 ^[20]	40	2.5	0.049	—
矩形梁 ^[4]	50	—	—	—
空心圆柱悬臂梁 ^[25]	>33	>1.03	0.047	25
一体式悬臂梁 ^[26]	40	1.33	0.076	—
本文传感器	11	0.48	0.039	17.95

管道的比值都大于等于1,通常通过减小悬臂梁的厚度和增加靶片面积来提高传感器的分辨率。本文提出的传感器的比值仅为0.48,可以直接安装在管道中,能同时测量流量和温度。该传感器通过差动结构提高了流量测量分辨率,还可以通过更改杠杆-铰链的位置、腰宽进一步提高分辨率,无需增加靶片面积,降低了压力损失。

5 结束语

本文提出了一种基于杠杆-铰链结构的靶式FBG流量传感器。该传感器通过监测杠杆输出端位移引起的FBG应变来获得流量值。这种结构不仅可以避免FBG发生啁啾而且明显缩小了传感器的尺寸。该传感器通过差动结构提高了流量分辨率,并具有低启动的特点。当流量为0~4300 L/h时,流量分辨率为0.039 L/s。此外,该传感器可以同时测量流体流量和温度,其温度灵敏度为17.94 pm/°C。如果将多个传感器组成准分布式传感器阵列,则可以同时监测注水井中分层流体的流量和温度。

参考文献:

- [1] SVALOV A M. Hydrodynamic researches of nonlinear filtrations in low-permeable reservoirs [J]. Neftyanoe khozyaystvo - Oil Industry, 2021 (1): 32-37.
- [2] KHAN M J, MUTHER T, AZIZ H, et al. Investigating the impact of injection-water salinity and well strategies on water mobility and oil production in an oil-wet reservoir [J]. Modeling Earth Systems and Environment, 2021, 7(1): 247-260.
- [3] HRIBAR J, DONLAGIC D. Optical flow sensor based on the thermal time-of-flight measurement [J]. Optics Express, 2021, 29(6): 8846-8860.
- [4] PERIKALA M, PATHI V V L, RAJAN L S, et al. Cantilever supported Fiber Bragg Grating flow sensor for space applications [J]. IEEE Sensors, 2021, 21(3): 2651-2657.
- [5] SHEN W, YAN R J, XU L, et al. Application study on FBG sensor applied to hull structural health monitoring [J]. Optik, 2015, 126(17): 1499-1504.
- [6] MARQUES R D, PRADO A, ANTUNES P, et al. Corrosion resistant FBG-based quasi-distributed sensor for crude oil tank dynamic temperature profile monitoring [J]. Sensors, 2015, 15(12): 30693-30703.
- [7] CAI S S, LIU F, WANG R L, et al. Narrow bandwidth fiber-optic spectral combs for renewable hydrogen detection [J]. Science China Information Sciences, 2020, 63(12): 221-229.
- [8] 赵煜,朱志成,牛美玲,等. 光纤传感技术在流量检测方面的应用研究 [J]. 光通信技术, 2019, 43(5): 5-8.
- [9] 马跃辉,刘兴,王华,等. 基于磁致伸缩效应的FBG电流传感器 [J]. 光通信技术, 2022, 46(3): 18-21.
- [10] 冯森林,王兆香,王谦,等. 一种用于同时测量温度和磁场强度的磁流体LPFG-FBG传感器 [J]. 光通信技术, 2023, 47(2): 28-33.
- [11] LYU G H, CHE G H, LI J Q, et al. Design of novel FBG-based sensor of differential pressure with magnetic transfer [J]. Sensors, 2017, 17(2): 375-383.
- [12] LV R Q, ZHENG H K, ZHAO Y, et al. An optical fiber sensor for simultaneous measurement of flow rate and temperature in the pipeline [J]. Optical Fiber Technology, 2018, 45: 313-318.
- [13] ZHANG T X, GUO T, WANG R H, et al. A hot-wire flowmeter based on fiber extrinsic Fabry-Perot Interferometer with assistance of fiber Bragg grating [J]. Optics Communications, 2021, 497: 126952-1-126952-5.
- [14] LIM J, YANG Q P, JONES B E, et al. DP flow sensor using optical fibre Bragg grating [J]. Sensors and Actuators. A: Physical, 2001, 92(1): 102-108.
- [15] 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.
- [16] GUO W, WANG L, LIU C P. Prediction of gas-liquid two-phase flow rates through a vertical pipe based on thermal diffusion [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2021, 60(6): 2686-2697.
- [17] LI Y, YAN G, ZHANG L, et al. Microfluidic flowmeter based on micro hot-wire sandwiched Fabry-Perot interferometer [J]. Optics Express, 2015, 23(7): 9483-9493.
- [18] LIU Z Y, HTEIN L, CHENG L K, et al. Highly sensitive miniature fluidic flowmeter based on an FBG heated by Co²⁺-doped fiber [J]. Optics Express, 2017, 25(4): 4393-4402.
- [19] ZHAO Q, ZHENG H K, LV R Q, et al. Novel integrated optical fiber sensor for temperature, pressure and flow measurement [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 280: 68-75.
- [20] LIU C, ZHANG Z, LI H, et al. Research on one-piece structure target flow sensing technology based on fiber Bragg grating [J]. Photonic Sensors, 2016, 6(4): 303-311.
- [21] ZHAO Y, GU Y F, LV R Q, et al. A small probe-type flowmeter based on the differential fiber Bragg grating measurement method [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(3): 502-507.
- [22] OOI B L, GILBERT J M, AZIIZ A R A. Analytical and finite-element study of optimal strain distribution in various beam shapes for energy harvesting applications [J]. Acta Mechanica Sinica, 2016, 32(4): 670-683.
- [23] JAMES S W, DOCKNEY M L, TATAM R P. Simultaneous independent temperature and strain measurement using in-fibre Bragg grating sensors [J]. Electronics Letters, 1996, 32(12): 1133-1134.
- [24] 陈贵敏,贾建援,刘小院,等. 椭圆柔性杠杆-铰链的计算与分析 [J]. 工程力学, 2006, 23(5): 152-156.
- [25] 向洋,孙世政,党晓圆,等. 基于光纤布喇格光栅的流量温度复合传感研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(14): 15-22.
- [26] 刘春桐,王鹏致,李洪才,等. 一种FBG靶式流量传感的结构设计及实验研究 [J]. 光电子·激光, 2015, 26(3): 529-534.