

一种光纤布喇格光栅涡街流量传感器

贾振安^{1,2,3,4}, 王恒超^{1,2,3,4}, 史小宇^{1,2,3,4}, 高 宏^{1,2,3,4}, 白 燕^{1,2,3,4}, 樊 伟^{1,2,3,4}

(1. 西安石油大学 理学院, 陕西 西安 710065; 2. 陕西省油气资源光纤探测工程技术研究中心, 陕西 西安 710065; 3. 陕西省油气井测控技术重点实验室, 陕西 西安 710065; 4. CNPC 重点实验室——油藏光纤动态检测研究室, 陕西 西安 710065)

摘 要:在流量计量领域中,利用光纤传感技术对涡街流量计量的研究较少,故具有重要的研究意义。该文设计了一种悬臂梁式的光纤布喇格光栅涡街流量传感器,其利用悬臂梁自由端振动使光纤布喇格光栅中心波长发生周期性移位,从而测量涡街频率,得到流体流量信息。温度传感测试实验与流量传感测试实验结果表明,该传感器温度灵敏度为 17 pm/°C,涡街流量灵敏度为 0.018 95 Hz/(L·h⁻¹),非线性误差为 2.23%。实验验证了该传感器可应用于液体涡街流量计量。

关键词:光纤传感; 光纤布喇格光栅; 涡街流量计

中图分类号:TN253 **文献标识码:**A

A Fiber Bragg Grating Vortex Flow Sensor

JIA Zhen'an^{1,2,3,4}, WANG Hengchao^{1,2,3,4}, SHI Xiaoyu^{1,2,3,4}, GAO Hong^{1,2,3,4},

BAI Yan^{1,2,3,4}, FAN Wei^{1,2,3,4}

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

2. Shaanxi Engineering Research Center of Oil and Gas Resource Optical Fiber Detection, Xi'an 710065, China;

3. Shaanxi Key Laboratory of Measurement and Control Technology for Oil and Gas Wells, Xi'an 710065, China;

4. Key Laboratory of CNPC—Research Laboratory for Optical Fiber Dynamic Detection of Oil Reservoirs, Xi'an 710065, China)

Abstract: In the field of flow metering, there is relatively little research on vortex flow measurement using fiber optic sensing technology, so it has important research significance. The paper designed a cantilever beam type fiber Bragg grating vortex flow sensor is designed, which utilizes the vibration of the free end of the cantilever beam to periodically shift the center wavelength of the fiber Bragg grating, thereby measure the vortex frequency and get the fluid flow information. The temperature sensing test and flow sensing test are carried out. The results show that the temperature sensitivity of the sensor is 17 pm/°C, the vortex flow sensitivity is 0.018 95 Hz/(L·h⁻¹), and the nonlinear error is 2.23%, which verifies that the sensor can be applied to measure the liquid vortex flow.

Key words: fiber optic sensing; fiber Bragg grating (FBG); vortex flow meter

0 引言

流量测量是现今工程领域中十分重要的一个环节,对流量传感器的准确度与稳定性有着极高的要求。卡门涡街现象是一种典型的流致振动现象^[1],最初研究涡街现象的目的是为了防灾,如高层建筑、桥梁缆绳、钻井平台等的损毁或折断。但涡街现象存在两面性,利用涡街发生体下游的涡街信号作为重要测量参量设计的涡街流量计在流量测量领域占据一角。与此同时,涡街流量计以独特的设计思路

和优点,在现今先进的工业生产中发挥着重要作用。

近年来,光纤布喇格光栅(FBG)作为光纤传感^[2-4]领域中重要部件,利用光纤布喇格光栅具备灵敏度高,体积小和抗电磁干扰强等优良特点,可以用于多种流量测量方式^[5],但大多数为靶式^[6]、压差式^[7]、涡轮式^[8]和热式^[9]等方法,缺少对涡街流量传感技术的研究。Shoichi Takashima 等^[10]介绍了一种双光纤光栅的互相关流量计,实验证明,该流量计在 0~1.0 m/s 内具有良好的线性关系。李红民等^[11]设计了一种不受温度影响的光纤光栅涡街流

收稿日期:2023-10-12

基金项目:陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(NO.18JS093);西安石油大学研究生院创新与实践能力培养计划项目(NO.YCS23114194)

作者简介:贾振安(1959-),男,陕西省咸阳市人,教授,硕士。通信作者:王恒超(1999-),男,硕士生。

量传感器,通过使用 PIN 光电探测器接受涡街流量传感器的光信号,并利用带通滤波器消除低频波动以解决光纤光栅温度交叉敏感问题。Dong H J 等^[12]将光纤布喇格光栅封装在圆柱发生体内,将涡街信号对发生体的谐振冲击转化为布喇格光栅轴向应变,从而探测流量。该流量计在检测油井流量时有较好的测量范围。赵栋等^[13]提出了一种基于白光干涉原理的全光纤涡街流量测量方法,通过相位调制来检测涡街信号对光纤交替变化的横向作用力,从而得到涡街频率,进而对流量进行计量。全克帅等^[14]设计了一种基于旋涡发生体的 FBG 流量计,通过在涡街发生体内开设导压腔,且导压腔内部粘贴固定有悬臂梁上的 FBG,将光栅波长漂移与悬臂梁自由端挠度联系起来,实现了对流体脉动式冲击的光学测量。刘月圆等^[15]利用小波变换处理差压式涡街流量计的涡街信号,水流实验误差小于 0.5%,为湿蒸汽计量提供了新思路。

FBG 涡街流量传感器目前仍处在更深层次研究中,为了将光纤传感与涡街流量计相结合,本文设计了一种基于 FBG 的涡街流量传感器。该传感器通过弹簧钢片作为悬臂梁,将涡街信号转化为悬臂梁振动,同时作用于 FBG,当不同流量经过传感器时,FBG 中心波长移位频率不同,进而测量出涡街频率,通过涡街频率的大小反映了液体流量大小。

1 FBG 涡街流量传感原理及传感器制作

1.1 FBG 传感原理

FBG 是一种纤芯折射率发生轴向周期性调制的无源光波导器件。由耦合模理论^[16]可知,FBG 中心反射波长 λ_B 取决于光纤栅距 Λ 和纤芯有效折射率 n_{eff} ,即:

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

图 1(a)为 FBG 在 1 550 nm 附近的反射光谱。作为光纤传感器件,FBG 具有对温度 ΔT 和应变 $\Delta \epsilon$ 同时敏感的属性,即

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda_B} = (1 - p_e) \cdot \Delta \epsilon + (\alpha + \xi) \cdot \Delta T \quad (2)$$

式中 p_e 、 α 、 ξ 分别为弹光系数、热膨胀系数和热光系数。

通过监测布喇格中心波长 λ_B 漂移可以得到外界物理量。光栅的栅区长度 L 的选择对 FBG 传感

性能测量十分重要,栅区长度 L 对反射率的影响如图 1(b)所示。由图可见, $L = 10$ mm 的 FBG 综合性能最优。

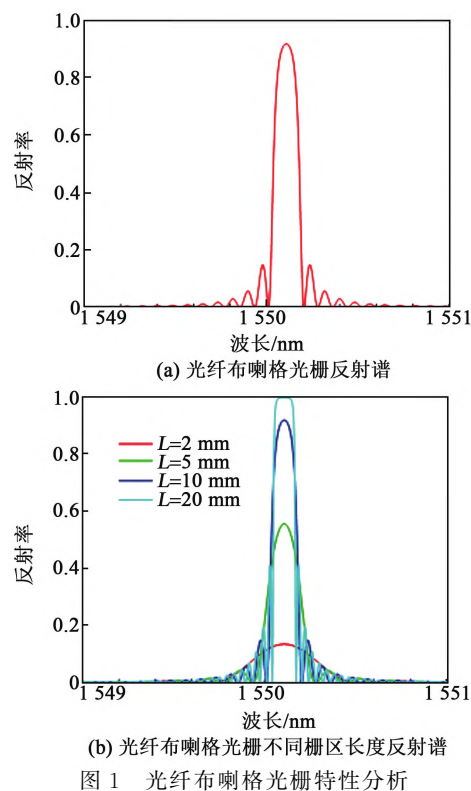


图 1 光纤布喇格光栅特性分析

1.2 涡街流量原理

图 2 为涡街信号产生及原理。在一定雷诺数下,当流体流过阻流体时,阻流体下游会交替产生周期性脉动旋涡,该旋涡称为卡门涡街,也称涡街信号,阻流体被称为涡街发生体^[17]。本文选用三角柱型发生体。研究发现,其对应斯特劳哈尔数 S_r 为 0.16。涡街产生的频率 f 与流体流速 U_1 之间的关系为

$$f = \frac{S_r}{d} U_1 \quad (3)$$

式中: S_r 为斯特劳哈尔数,与雷诺数有关; d 为涡街发生体迎流面的宽度,三角柱发生体一般满足 $d/D = 0.28$, D 为测量管径。

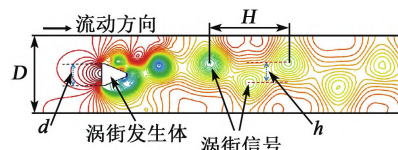


图 2 涡街信号产生及原理

流速 U_1 、管道截面面积 S 与流量 Q 之间的关系为

$$Q = S \cdot U_1 \quad (4)$$

当旋涡稳定时,两列旋涡之间的距离 h 与同列中相邻两旋涡之间的距离 H 满足:

$$\frac{h}{H} = \frac{1}{\pi} \sinh^{-1}(1) = 0.2806 \quad (5)$$

1.3 传感器测量原理与制作

图3为实验原理图。经上述分析可知,当涡街沿管道的轴向前进时,所产生的旋涡自旋方向相反,且在发生体下游产生垂直于流动方向的升力。旋涡是交替产生的,故升力也是交替变化的,能同时为悬臂梁提供受迫振动的驱动力,因此悬臂梁会产生受迫振动,振动方向与升力的方向一致。检测悬臂梁受迫振动的频率(即涡街产生的频率)可得到流量信息。

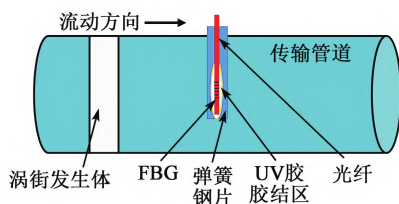


图3 实验原理图

根据振动力学,受迫振动方程可表示为

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \frac{\rho S}{g} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = F(x, t) \quad (6)$$

式中: E 为杨氏模量; I 为惯性矩; EI 为常数0; ρ 为密度; S 为截面积; g 为重力加速度。

在忽略扭转的情况下,式(6)中 $F(x, t)$ 利用傅里叶变换可表示为

$$F(x, t) = F \sin \frac{n\pi x}{l} \sin(\omega t) \quad (7)$$

式中 F, ω 分别为受迫振动的最大振幅和圆频率。

联立式(2),忽略温度对FBG的影响,则FBG中波长漂移与 $F(x, t)$ 的关系为

$$\Delta\lambda = \frac{6\lambda_0 F(1-p_e) \cdot (H-x)}{SEh} \sin \frac{n\pi x}{l} \sin(\omega t) \quad (8)$$

在 $F(x, t)$ 周期性作用下,通过FBG中心波长的移位振动谱体现涡街信号的频率 f 。不同的流量流过涡街发生体,并在下游产生不同的涡街频率,通过封装在悬臂梁上的FBG来接收涡街信号。

传感器制作过程如图4所示。首先,悬臂梁选用厚度为0.1 mm的弹簧钢片,并将其加工成长为25 mm、宽为3 mm的矩形等强度悬臂梁,并进行除

油、除锈处理,选择矩形等强度悬臂梁可以减小悬臂梁的共振频率;其次,本实验主要是考虑涡街信号的频率,对FBG的受力情况不做过多分析,故选用栅区长度 L 为10 mm的FBG,并对FBG施加一定的预应力后,固定在宽度3 mm的轴线中间位置,涂覆UV胶,并利用紫外线灯照射UV胶处。由于UV胶在使用时用量较少且胶结层较薄,可使FBG与弹簧钢片粘接牢固,并将涡街信号充分传递在FBG上,实验效果较好^[18]。

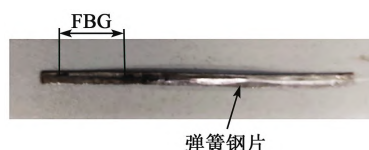


图4 传感器实物图

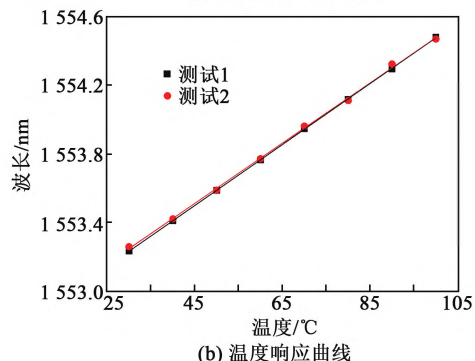
2 实验验证

2.1 温度传感实验

温度传感实验系统如图5所示。系统由101-2AB电热鼓风干燥箱、MOI-OSSM-ATX-1光纤光栅动态解调仪和计算机组成。电热鼓风干燥箱测量温度的量程为0~400℃,分辨率为0.1℃。光纤光栅动态解调仪测试软件为ENLIGHT,采样频率最大为5 000 Hz,分辨率为1 pm。



(a) 温度测试系统框图



(b) 温度响应曲线

图5 温度传感实验测试装置与响应曲线

本次温度传感测试为两组重复性实验。将传感器粘贴在电热鼓风干燥箱内,随着温度的升高,FBG中心波长发生红移,解调仪将中心波长与温度的变

化规律输入计算机。本实验温度灵敏度测试范围为 30~100 ℃, 间隔 10 ℃, 分别做两组实验, 每个测量点稳定保温 5 min, 得到 FBG 的中心波长与温度之间的拟合关系式为

$$\begin{cases} y_1 = 0.0178x + 1552.6990 \\ y_2 = 0.0176x + 1552.7209 \end{cases} \quad (9)$$

响应曲线中温度灵敏度分别为 17.8 pm/℃ 和 17.6 pm/℃, 且两次实验线性度均为 0.999, 这符合 FBG 温度传感原理。

2.2 流量传感实验

流量传感实验系统由 SXL-1 油气水三项流模拟装置、涡街流量计、MOI-OSSM-ATX-1 光纤光栅动态解调仪、LPS-305 数控式线性直流稳压电源(可提供±DC30 V)和计算机构成, 如图 6 所示。其中 SXL-1 油气水三项流模拟装置配备两组不同管径的可旋转管道和 DN25 的直管段, 可测量液体、气体流量, 利用柱塞泵、齿轮泵提供流量输入, 同时还配备流量温度计、耐震压力表等。涡街流量计选用型号为 HYLUGB-DC-D25-J, 且内置三角柱型涡街发生体, 流量测量精度为 1.5, 适用温度为 -30~250 ℃, 液体测量范围为 1.2~16 m³/h, 气体测量范围为 8~50 m³/h。

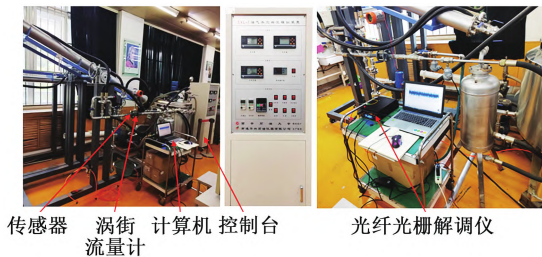


图 6 流量实验装置

本实验选择在 SXL-1 油气水三项流模拟装置中 DN25 直管段进行测试, 涡街流量计利用法兰对夹方式安装位置在 DN25 直管且保持上游 10DN、下游 5DN 处, 这符合涡街流量计安装要求, 使流量输入能提供准确且稳定的涡街信号, 同时利用 LPS-305 数控式线性直流稳压电源为涡街流量计提供稳定 DC 24 V。流量传感测试介质为常温液态水。实验时将所制作的传感器利用环氧树脂胶水密封固定在涡街流量计下游, 调节旋转管道并使其缓慢达到满管状态, 保证流量测量回路的完整性。实验采用柱塞泵变频控制流量输入, 通过解调仪实时监测。

调节每个测量点后, 水流稳定 5 min, 共计测试 10 个测量点, 记录 FBG 波长与时间的关系。

流量实验测试时, FBG 起始中心波长为 1 554.089 nm, ENLIGHT 采样频率设置为 500 Hz。图 7 将 10 个测量点的 FBG 波长移位频率即涡街频率变化规律, 时间轴的疏密程度反映了 FBG 波长移位频率。

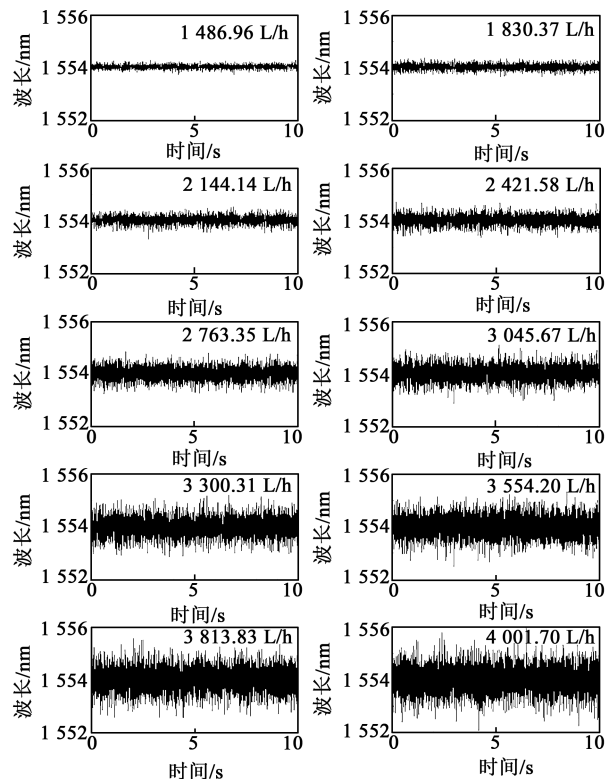
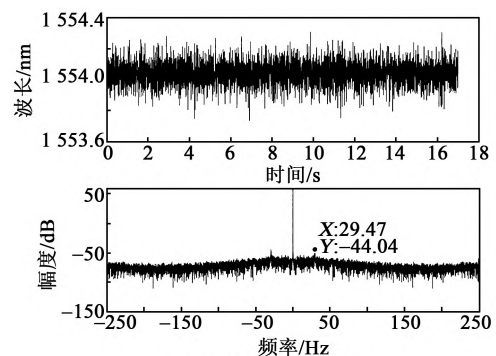


图 7 10 次流量测量点中心波长变化图

由于涡街流量计自身的流量测量范围和实验条件的限制, 流量测量量程为 1 486.96~4 001.70 L/h。本实验利用涡街流量计提供的涡街频率作为参考, 实验数据利用 MATLAB 做 FFT 处理。图 8 为两个极限测量点的时域、频域响应特性。



(a) 最小流量 1 486.96 L/h

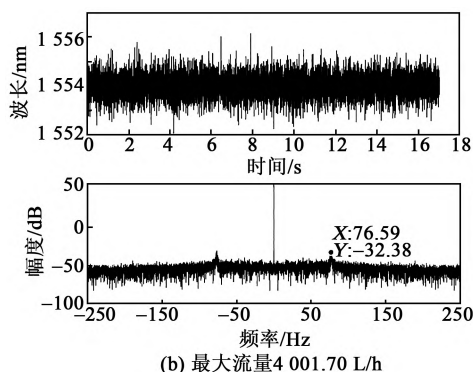


图8 两个极限测量点时频响应

图9为流量响应曲线。涡街频率分别由涡街流量计与MATLAB提供,二者得到的涡街频率具有很高的重合度,FBG得到涡街频率 f 与流量 Q 拟合曲线方程为

$$f = 0.01895 \cdot Q + 1.03143 \quad (10)$$

由式(10)可以得到FBG流量测量灵敏度为 $0.01895 \text{ Hz}/(\text{L} \cdot \text{h}^{-1})$ 。

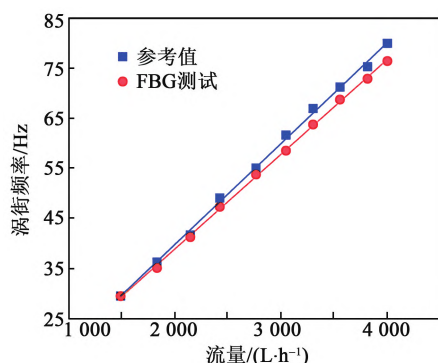


图9 流量响应曲线

实验测试中最大误差 $\Delta_{\max} = 1.04875$,非线性误差为2.23%,由此可以看出,该传感器具有较好的线性度和灵敏度。

本实验需要注意的是悬臂梁的选型。小口径测量中,若弹簧钢片太厚,则没有振动效果;若弹簧钢片太薄,则振动效果明显。但这种传感器属于微悬臂梁结构,加工困难,且对于水流量测量还需考虑防锈问题,因此要根据实际情况做防锈处理以及考虑FBG与弹簧钢片胶结层的耐用持久性。

3 结束语

本文提出了一种FBG涡街流量传感器,可应用于液体介质的流量测量。传感器将涡街信号作用在悬臂梁上并传递给FBG,其具有结构简单,成本低和准确度高的特点,且对光学测量涡街流量领域具有较高的研究价值。在实验条件允许的范围内,测

试温度灵敏度为 $17 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 、涡街流量灵敏度为 $0.01895 \text{ Hz}/(\text{L} \cdot \text{h}^{-1})$,且线性度均在0.99以上,非线性误差为2.23%,流量测量量程为 $1486.96 \sim 4001.70 \text{ L/h}$ 。另外,对于悬臂梁的选型与FBG封装增敏方面仍是该传感领域的重点问题。未来研究应围绕对液体介质的温度与流量实现分布式光纤传感监测和FBG检测到的涡街信号后处理方面,以达到FBG涡街流量传感器的微型化、多参数化的发展。

参考文献:

- [1] WU Ying, CHENG Zhi, RYLEY M, et al. Modelling of flow-induced vibration of bluff bodies: A comprehensive survey and future prospects [J]. Energies, 2022,15(22):1996-1073.
- [2] 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.
ZHAO Yu, ZHU Zhicheng, NIU Meiling, et al. Research on the application of fiber optic sensing technology in flow detection [J]. Optical Communication Technology, 2019,43(5):5-8.
- [3] 贾振安,杨凯庆,白燕,等. 基于FBG的流量传感器研究进展[J]. 光通信技术,2021,45(1):1-4.
JIA Zhen'an, YANG Kaiqing, BAI Yan, et al. Research progress of FBG-based flow sensor [J]. Optical Communication Technology, 2021,45(1):1-4.
- [4] YAO Wenjuan, PEN Wei, ZHANG Xinpu, et al. Self-compensating fiber optic flow sensor based on dual fiber Bragg gratings[C]//[S.l.]: International Symposium on Advanced Optical Manufacturing & Testing Technologies: Design, International Society for Optics and Photonics, 2012.
- [5] 禹大宽,贾振安,乔学光,等. 光纤Bragg光栅流量传感器的研究及进展[J]. 光通信研究,2008(6):37-39.
YU Dakuan, JIA Zhenan, QIAO Xueguang, et al. Research and progress of fiber Bragg grating flow sensor [J]. Optical Communication Research, 2008(6): 37-39.
- [6] ZHANG Dongyu, BAI Yan, LIU Guoquan, et al. Optical fiber flow sensor based on a lever-hinge configuration [J]. Applied Optics, 2023, 62(16): 4268-4274.
- [7] 王宏亮,陈娇敏. 压差式光纤Bragg光栅流量传感器[J]. 仪表技术与传感器,2012(4):10-11.
WANG Hongliang, CHEN Jiaomin. Differential pressure type fiber Bragg grating flow sensor [J]. Instrumentation Technology and Sensors, 2012(4):10-11.

- [8] GU Yafei, ZHAO Yong, LV Riqing, et al. Theory and structure of a modified optical fiber turbine flowmeter[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2016, 50: 178-184.
- [9] JIA Zhenan, REN Jie, LIU Yinggang, et al. A hot-wire flowmeter based on polymer-filled extrinsic-phase-shift fiber Bragg grating [J]. Optik, 2023, 274: 170571.
- [10] SHOICHI T, HIROSHI A, HIROAKI N. A water flowmeter using dual fiber Bragg grating sensors and cross-correlation technique[J]. Sensors & Actuators, A. Physical, 2004, 116(1): 66-74.
- [11] 李红民, 高宏伟, 刘波, 等. 一种新型的光纤光栅涡街流量传感器[J]. 传感技术学报, 2006(4): 1195-1197.
LI Hongmin, GAO Hongwei, LIU Bo, et al. A new type of fiber grating vortex flow sensor[J]. Journal of Sensing Technology, 2006(4): 1195-1197.
- [12] DONG Huijian, CAI Yong, HE Jun, et al. The vibration analysis of a novel vortex flowmeter based on fiber Bragg grating [J]. Advanced Materials Research, 2012, 1675(485): 526-531.
- [13] 赵栋, 吴红艳, 唐璜. 基于白光干涉原理的全光纤涡街流量测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(5): 1038-1042.
ZHAO Dong, WU Hongyan, TANG Juan. All-fiber vortex flow measurement method based on white light interference principle[J]. Journal of Instrumentation, 2011, 32(5): 1038-1042.
- [14] 全克帅, 薛俊华, 杨洪磊, 等. 基于旋涡发生体的光纤 Bragg 光栅流量计的研究[J]. 光学技术, 2014, 40(1): 79-83.
TONG Keshuai, XUE Junhua, YANG Honglei, et al. Research on fiber Bragg grating flowmeter based on vortex generator [J]. Optical Technology, 2014, 40(1): 79-83.
- [15] 刘月圆, 梁玉娇, 郑盟, 等. 新型均速管涡街流量传感器的测量特性研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(12): 10-18.
LIU Yueyuan, LIANG Yujiao, ZHENG Meng, et al. Measurement characterization of a new type of vortex flow sensor with homogeneous tube [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(12): 10-18.
- [16] 王健刚, 刘汉法. 耦合模理论对光纤光栅的分析[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2007(1): 84-87.
WANG Jiangang, LIU Hanfa. Analysis of fiber grating by coupled mode theory [J]. Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition), 2007(1): 84-87.
- [17] 姜仲霞, 姜川涛, 刘桂芳. 涡街流量计[M]. 北京: 中国石化出版社, 2006: 41-50.
- [18] 肖日升, 黄冰. 高性能 UV 延迟固化结构胶的制备及其性能研究[J]. 粘接, 2022, 49(5): 5-8.
XIAO Risheng, HUANG Bing. Preparation of high-performance UV delayed-curing structural adhesives and their properties [J]. Adhesion, 2022, 49(5): 5-8.