

引用格式: JIA Zhenan, YANG Kaiqing, ZHAO Xianfeng, et al. A New FBG Thermal Liquid Flow Sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(2):0206002

贾振安,杨凯庆,赵显锋,等.一种新型FBG热式液体流量传感器[J].光子学报,2021,50(2):0206002

一种新型FBG热式液体流量传感器

贾振安,杨凯庆,赵显锋,白燕,高宏

(西安石油大学 理学院, 西安 710065)

摘要: 光纤布拉格光栅热式流量传感器目前只适用于气体流量,为扩大其应用领域,设计了一种可用于液体流量测量的新型光纤布拉格光栅热式流量传感器。该光纤布拉格光栅热式流量传感器使用陶瓷加热片以恒定功率提供热量,不同流量的液体经过传感器时带走的热量不同,通过检测光纤布拉格光栅中心波长的变化就可以测得传感器的温度变化,进而推导出液体流量大小。通过温度传感测试实验和流量传感测试实验,验证了所设计的传感器可用于液体流量测量。实验结果表明,该传感器的流量测量范围为 40.575~550.664 L/h。

关键词: 光纤传感;热式流量传感器;光纤布拉格光栅;液体流量;流量测量

中图分类号: TN253

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20215002.0206002

A New FBG Thermal Liquid Flow Sensor

JIA Zhenan, YANG Kaiqing, ZHAO Xianfeng, BAI Yan, GAO Hong

(School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract: Fiber Bragg Grating (FBG) thermal flow sensors are only suitable for gas flow currently. In order to expand its application field, a new FBG thermal flow sensor that can be used for liquid flow measurement is designed. A heating ceramic sheet is used to provide heat at a constant power for the FBG thermal flow sensor. Different flow of liquid takes different heat when flow through the sensor. By detecting the change of FBG central wavelength, the temperature change of the sensor can be measured, and then the liquid flow can be deduced. Through temperature sensor test experiment and flow sensor test experiment, it is verified that the designed sensor can be used for liquid flow measurement. The experimental results show that the flow measurement range of the sensor is 40.575~550.664 L/h.

Key words: Optical fiber sensor; Thermal flow sensor; FBG; Liquid flow; Flow measurement

OCIS Codes: 060.2370; 280.4788; 050.2770

0 引言

流量传感器是计量科学技术的组成部分之一,广泛应用于工业生产制造领域。例如,在石油行业中,从原油开采、提纯处理、分配运输和贸易销售等一系列过程都离不开流量传感器,特别是在贸易结算过程中,流量传感器的计量结果是交易的凭证,涉及的交易金额巨大,因此,对流量传感器的精确度和稳定性提出了极高的要求。热式流量传感器体积小、压力损失小、能测量极低的流量、量程比较高,并且热式流量传感器能在层流、过渡流、湍流条件下标定、使用,与流体雷诺数无关,这是其它流量传感器都无法比拟的,因此热式流量传感器以其独特的优点在国内外备受青睐。

基金项目: 陕西省教育厅重点实验室科研计划(No.17JS105),西安石油大学研究生创新与实践能力的培养计划(No.YCS20212128)

第一作者: 贾振安(1959—),男,教授,硕士,主要研究方向为光纤传感技术。Email: jiazhen_an@xsyu.edu.cn

通讯作者: 杨凯庆(1994—),男,硕士研究生,主要研究方向为光纤传感技术。Email: 2862328398@qq.com

收稿日期: 2020-08-18; 录用日期: 2020-11-25

<http://www.photon.ac.cn>

光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)是一种反射波长对温度敏感的光纤无源器件,可用于温度、压力^[1]、振动和流量^[2]等参数的测量。FBG具有一系列的优点:体积小、灵敏度高、抗电磁干扰^[3]、适用于辐射较大的场合以及强腐蚀性或易燃易爆的危险环境、能实时监测并可分布式测量^[4]等。目前,FBG传感技术已经广泛应用于电力系统^[5-7]、航空航天^[8]、医疗设备^[9-11]、土木工程^[12-13]和结构健康监测^[14-15]等领域。近年来,许多科研人员设计了基于FBG传感技术的热式流量传感器。2015年,赵学芳等^[16]设计了一种基于腰椎放大熔接和FBG的热线式风力计。腰椎放大光纤将激光器的大部分能量耦合进FBG的包层中,从而被镀在FBG上的银膜吸收提高温度,不同流量的气体流经传感器时带走的热量不同,使传感器的温度产生变化,通过测量FBG波长的漂移量就可以测得流速。2017年,XU Jiang等^[17]设计了一种利用光纤加热的FBG热式气体流量传感器。该传感器通过测量两个FBG传感器之间的温度差来测量流体流量,其中一个传感器由FBG温度测量单元和光纤加热单元组成,一个传感器则是只测量流体温度的FBG温度传感器。

FBG热式流量传感器目前只适用于气体流量,为了扩大其应用领域,本文设计了一种新型可用于液体流量测量的FBG热式流量传感器,该液体流量传感器使用陶瓷加热片以恒定功率提供热量,提高传感器的初始温度,当不同流量的液体流经时传感器的温度会产生相应的变化,FBG对温度十分敏感,中心波长会随温度变化,通过检测FBG中心波长的变化就可以测得液体流量大小。

1 原理

1.1 FBG温度传感原理

根据光纤的耦合模理论^[18],FBG的中心波长 λ_b 为

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

式中, n_{eff} 为FBG的有效折射率, Λ 为光栅周期。

当FBG受到温度影响时,中心波长的漂移量 $\Delta\lambda_b$ 为

$$\Delta\lambda_b = \lambda_b(\alpha + \xi)\Delta T \quad (2)$$

式中, α 为光纤的热膨胀系数, ξ 为热光系数。

当FBG粘贴在基底上时,由于基底材料的热膨胀系数 α_s 一般都大于光纤的热膨胀系数 α ,因此,当温度上升时,基底受热膨胀会让FBG的中心波长漂移量增加,漂移量 $\Delta\lambda$ 可表示为

$$\Delta\lambda = \lambda_b \left[\alpha + \xi + (1 - P_e)(\alpha_s - \alpha) \right] \Delta T \quad (3)$$

式中, P_e 为光纤的弹光系数。

由以上分析可以看出,FBG只受温度影响时,中心波长漂移量与温差成正比。

1.2 热式流量传感器原理

在管道内传感器和流体的热量交换主要是强制对流换热,满足牛顿公式

$$\phi = hA(T - T_0) \quad (4)$$

式中, ϕ 是传感器的加热量,与加热功率有关, h 是强迫对流换热系数, A 为传感器换热面积, $(T - T_0)$ 是传感器温度 T 与流体温度 T_0 的温差。

强迫对流换热系数 h 与流速、物性参数的关系可表示为^[19]

$$N_u = \frac{hd}{\lambda} = C(P_r)^n (R_e)^m = C \left(\frac{\eta C_p}{\lambda} \right)^n \left(\frac{\rho \nu}{\eta} \right)^m \quad (5)$$

式中, N_u 是努赛尔数, P_r 是普朗特数, R_e 是雷诺系数, d 是直径, λ 是流体的热导率, C 、 n 和 m 是与流体有关的常数, η 是动力粘度, C_p 是流体的定压比热容, ρ 是密度, ν 是流速。

将式(4)和式(5)联立得

$$\phi = A \frac{C\lambda}{d} \left(\frac{\eta C_p}{\lambda} \right)^n \left(\frac{\rho \nu}{\eta} \right)^m (T - T_0) \quad (6)$$

当流量传感器制作完成以及被测流体和实验环境确定后, A 、 d 、 λ 、 C 、 n 、 m 、 η 、 C_p 和 ρ 都是常数,令常数

$$k = A \frac{C\lambda}{d\eta^m} \left(\frac{\eta C_p}{\lambda} \right)^n, \text{式(6)可以简化为}$$

$$\phi = k(\rho\nu)^m(T - T_0) \quad (7)$$

由式(7)可以得出,当传感器的加热功率一定时,流速 ν 与温差 $(T - T_0)$ 成线性函数关系^[20]。又因为体积流量 q_v 与流速 ν 成正比,所以 $(q_v)^m$ 也与 $(T - T_0)$ 成线性函数关系。

由上述理论分析可以看出:在传感器的加热功率一定时,通过检测FBG中心波长可直接测出传感器的温度变化,进而可以推出流量。这种加热功率一定的传感器又被叫做恒功率热式流量传感器。

2 传感器结构及制作方法

FBG热式流量传感器的结构如图1,由微型陶瓷加热片、传感器保护壳、黄铜片和FBG组成。具体制作过程如下:对FBG施加一定的预应力后,使用UV胶将其以全粘贴的方式粘贴在长为20 mm,宽为4 mm,厚度为0.1 mm的黄铜片上,作为传感器的温度敏感元件。FBG与黄铜片的粘结过程中,在保证FBG与黄铜片粘结牢固的前提下,胶结层厚度越薄应变传递越充分^[21]。UV胶在紫外线的照射下可以快速固化,使用的胶量少,胶结层薄,可以使FBG与黄铜片粘结牢固,因此选择UV胶作为粘结胶。黄铜片的热膨胀系数比裸光纤的大,在测量温度时可以起到温度增敏的作用。等待UV胶完全固化后放入温箱加热,将残余应力完全消除。再将黄铜片另一侧与微型陶瓷加热片粘贴,微型陶瓷加热片长为7 mm,宽为5 mm,厚度为1.2 mm,带有两根电极导线,是传感器的加热元件。最后将黄铜片和陶瓷加热片一起放入不锈钢保护管中,并使用灌封导热胶填充保护管,完成封装。保护管由201不锈钢材料制成,长度为60 mm,外径为6 mm,壁厚为0.3 mm。所使用的灌封导热胶具有导热性好(导热系数大于等于0.8),耐高低温(固化后可用于-60~250℃的温度范围),自消泡和绝缘等优点,可以避免保护管内出现气泡或者漏电等情况。传感器完成封装之后,在保护管上端加上一个防水法兰就可以进行流量实验测试,图2为传感器实物。

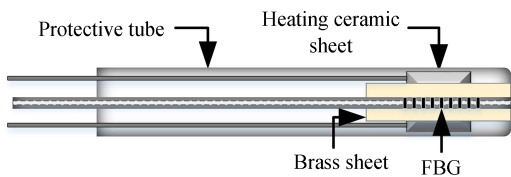


图1 传感器结构

Fig.1 Structure diagram of the sensor



图2 传感器实物

Fig.2 Real object of the sensor

3 实验及结果分析

3.1 温度传感测试实验

传感器温度传感测试实验系统如图3,由泰斯特真空干燥箱(型号:YLD-6000),TV125解调仪和电脑组成。真空干燥箱测温量程为0~400℃,分辨率为0.1℃。TV125解调仪的波长范围为1 510~1 590 nm,波长精度为1 pm。

将FBG全粘贴在黄铜片上后,放入真空干燥箱,先进行第一次温度传感测试。将传感器完全封装并且加上防水法兰后,再重复进行三次温度传感测试。四次温度实验主要验证FBG温度传感原理以及对验证所使用的导热胶具有良好的导热性。实验时,将传感器放入真空干燥箱,FBG通过跳线连接TV125解调

仪,解调仪将FBG中心波长随温度的变化传递至电脑,温度每增加5℃,记录一次FBG中心波长的变化数据。

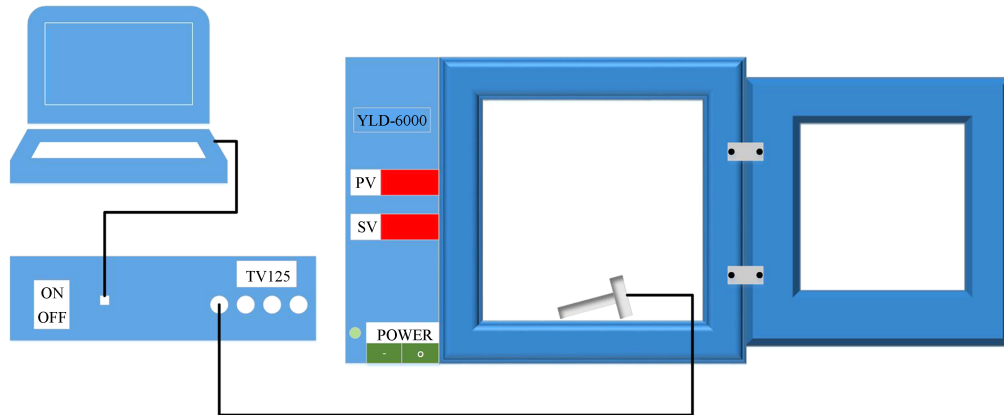


图3 温度传感测试实验系统示意

Fig.3 Schematic diagram of temperature sensor test experimental system

图4是根据四次温度传感测试实验的数据绘制成的传感器的温度响应曲线图。将四组实验数据利用最小二乘法进行拟合,得到FBG的中心波长变化量和温度的关系式为

$$y_1 = 0.01163x + 1544.6675 \quad (8)$$

$$y_2 = 0.01181x + 1544.65875 \quad (9)$$

$$y_3 = 0.01169x + 1544.65875 \quad (10)$$

$$y_4 = 0.01179x + 1544.6575 \quad (11)$$

拟合系数 R^2 分别为0.998 57、0.999 66、0.998 96和0.999 05。在四次温度传感测试实验中,拟合曲线的线性度都比较高,传感器的温度灵敏度分别为11.63 pm/℃、11.81 pm/℃、11.69 pm/℃和11.79 pm/℃,在误差允许范围内符合FBG温度传感原理。另外,四条拟合曲线的重合度也比较高,且封装后温度测试实验的拟合系数更加接近1,说明导热胶的导热性良好,有助于传感器与外界进行热量交换。

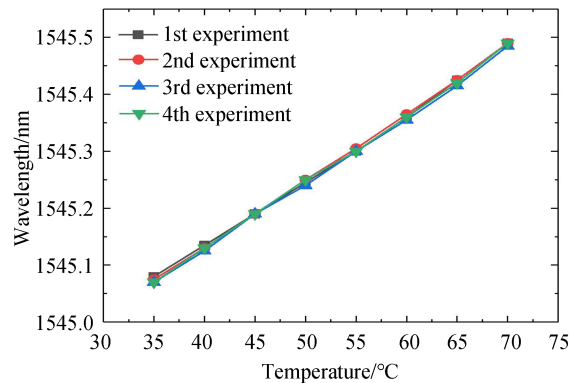


图4 传感器的温度响应曲线

Fig.4 The temperature response curve of sensor

3.2 流量传感测试实验

流量实验装置为SXL-1油气水三项流模拟装置,图5是三项流模拟装置实物图。此装置配置有两种不同管径的可旋转管道、流体温度计、智能流量积算仪、齿轮泵和柱塞泵等,可以进行流体温度测量,水浴加热和高低流量测试等多项操作。

流量传感测试实验所使用的液体为自来水。实验时,将传感器插入88.9 mm细管道的中间处,旋转管道至竖直位置并使其充满水,即处于满管状态。然后使用数控式线性直流稳压电源连接加热片电极引线,设

置加热电压为5 V,电流为0.56 A,等待FBG中心波长稳定后,记录下初始中心波长。最后通过调节齿轮泵的功率来调节流量的大小,齿轮泵每增加1 Hz的功率,记录一组智能流量积算仪示数和FBG中心波长。当齿轮泵功率为22.8 Hz时,低流量智能流量积算仪开始有示数,将其作为第二组数据。在齿轮泵不同的功率下,此次实验中智能流量积算仪示数和FBG中心波长数据记录如表1。根据实验数据利用最小二乘法拟合得到传感器的流量响应曲线,如图6。由拟合曲线图可知,FBG的中心波长变化量和流量的关系式为

$$y = 1545.31047 - 3.08891 \times 10^{-4}x + 6.11954 \times 10^{-7}x^2 - 4.58975 \times 10^{-10}x^3 \quad (12)$$

拟合系数 $R^2 = 0.99932$,拟合度极高。



图5 流量实验装置

Fig.5 Flow experiment device

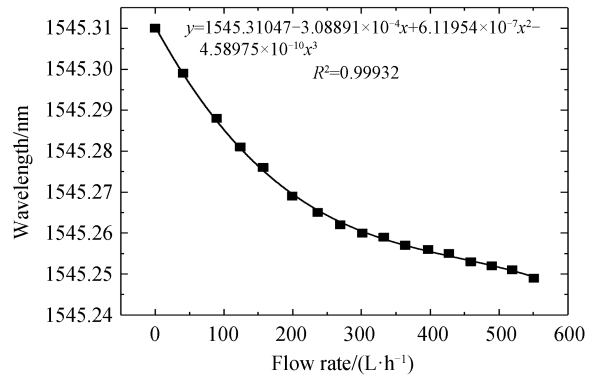


图6 传感器的流量响应曲线

Fig.6 The flow response curve of sensor

表1 传感器流量传感测试实验数据
Table 1 Flow sensor test experimental data

Gear pump power/Hz	Flow rate/(L·h ⁻¹)	Wavelength/nm
0	0	1 545.310
22.8	40.575	1 545.299
24	89.581	1 545.288
25	123.833	1 545.281
26	157.031	1 545.276
27	199.187	1 545.269
28	236.601	1 545.265
29	269.272	1 545.262
30	301.416	1 545.260
31	332.506	1 545.259
32	363.596	1 545.257
33	396.794	1 545.256
34	427.358	1 545.255
35	458.975	1 545.253
36	489.538	1 545.252
37	519.047	1 545.251
38	550.664	1 545.249

实验装置温度计示数为26℃,由于实验过程所用时间较短,外界温度的干扰可以忽略,可以认为流体温度没有变化。由图6可以看出,随着液体流量的增大,带走的热量一直在增加,FBG中心波长的变化量也随之不断增大,说明传感器的温度一直降低。当流量从0增加至500.664 L/h时,FBG中心波长漂移了61 pm,以四次温度实验的温度灵敏度平均值11.73 pm/℃计算,传感器的温度下降了5.2℃左右。当流量从0增加到40.575 L/h时,在0流量附近,流量很小,带走的热量也很少,FBG中心波长并不会发生变化,存在死区问题,因此传感器流量测量的量程下限可以设置为40.575 L/h。当流量大于550.664 L/h,再增加齿轮泵的功率,中

心波长变化量为0,说明达到了传感器流量测量的最大量程,符合牛顿冷却定律^[22]。传感器的FBG中心波长的温度响应范围比流量响应范围大,所以该FBG热式流量传感器的流量测量范围为40.575~550.664 L/h。

增加微型陶瓷加热片的额定加热功率可以使传感器的初始温度更高,在测量液体流量时可以带走更多的热量,从而增大传感器的量程,但需要注意的是,如果传感器的初始温度过高,会导致所测液体汽化,大大影响强制对流换热原理模型,造成误差。以该传感器为例,测量对象为水时,其沸点为100℃,所以选择微型陶瓷加热片时,可以选择加热功率更大的加热片,但是要保证传感器在流量传感测试实验中的中心波长始终小于温度传感测试实验100℃时的中心波长。因此可以根据实际情况选择合适加热功率的微型陶瓷加热片,以达到最优的量程范围和测量效果。另外在测量沸点更高的液体时还需要注意所使用的粘结胶和导热胶的温度使用范围。

4 结论

本文提出了一种新型FBG热式流量传感器,可用于液体流量测量。传感器使用微型陶瓷加热片以恒定功率提供热量,提高传感器的初始温度,不同流量的液体经过传感器时带走的热量不同,通过检测FBG中心波长的变化量就可以测得传感器的温度变化,进而得到液体流量的大小。通过温度传感测试实验和流量传感测试实验验证所设计的传感器可用于液体流量测量,测量范围为40.575~550.664 L/h。另外,可以根据实际情况选择合适加热功率的微型陶瓷加热片,以达到最适合实际的量程范围。该FBG热式流量传感器具有结构简单、安装方便、体积小、压力损失小、适用于腐蚀性液体等优点,利用光纤传感复用技术可以实现分布式管道流量测量,具有很大的应用潜力。

参考文献

- [1] JIANG Youhua, FU Haiwei, ZHANG Jinle, et al. Simultaneous measurement of transverse pressure and temperature based on multi-core fiber cascaded with fiber bragg grating [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46 (1) : 106002. 蒋友华, 傅海威, 张静乐, 等. 基于多芯光纤级联布喇格光纤光栅的横向压力与温度同时测量[J]. *光子学报*, 2017, 46 (1): 106002.
- [2] NOVIKOVA V A, VARZHEL S V, TOKAREVA I D, et al. Liquid flow motion rate measuring method, based on the fiber bragg gratings[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2020, 52(20): 909-913.
- [3] JIAO Shengxi, ZHAO Yong, GU Jiangjin. Simultaneous measurement of humidity and temperature using a polyvinyl alcohol tapered fiber bragg grating[J]. *Instrumentation Science & Technology*, 2017, 46(5): 463-474.
- [4] SUN Yijie, CAO Suqian, XU Hongzhong, et al. Application of distributed fiber optic sensing technique to monitor stability of a geogrid-reinforced model slope[J]. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2020, 6(4):35-44.
- [5] EL-GAMMAL H M, EL-BADAWY E S A, RIZK M R M, et al. A new hybrid FBG with a π -shift for temperature sensing in overhead high voltage transmission lines[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2020, 52(1):1-24.
- [6] DANTE A, DAVID J, CREMONEZI A O, et al. Fiber-optic current sensor based on FBG and terfenol-D with magnetic flux concentration for enhanced sensitivity and linearity[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(7):3572-3578.
- [7] MOHAMMED A, DJUROVIC S. A study of distributed embedded thermal monitoring in electric coils based on FBG sensor multiplexing[J]. *Microprocessors & Microsystems*, 2018, 62(10): 102-109.
- [8] LAMBERTI A, CHIESURA G, LUYCKX G, et al. Dynamic strain measurements on automotive and aeronautic composite components by means of embedded fiber Bragg grating sensors[J]. *Sensors*, 2015, 15(10): 27174-271200.
- [9] WANG Jin, TAO Kuiyuan, ZHU Wanshan, et al. A FBG-OCT catheter to reconstruct vascular shape in intravascular optical coherence tomography[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(9):701-704.
- [10] DZIUDA L. Monitoring respiration and cardiac activity using fiber bragg grating-based sensor[J]. *IEEE transactions on bio-medical engineering*, 2012, 59(7):1934-1942.
- [11] SHI Chaoyang, LI Ming, LV Changlu, et al. A high-sensitivity fiber bragg grating-based distal force sensor for laparoscopic surgery[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(5):2467-2475.
- [12] REN Gaofeng, LI Taoyuan, HU Zhongchun, et al. Research on new FBG soil pressure sensor and its application in engineering[J]. *Optik*, 2019, 185: 759-771.
- [13] PENG Haiyou, CHEN Bolin, DONG Ping, et al. Application of FBG sensing technology to internal deformation monitoring of landslide[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020(1):1-10.
- [14] ZHAO Yan, HU Dianyin, ZHANG Meng, et al. The location monitoring of fatigue crack damage by using the spectral area extracted from FBG spectra[J]. *Sensors*, 2020, 20(8):1-16.
- [15] LIU Mingyao, ZHOU Zude, TAN Yuegang, et al. Fiber bragg grating sensors - based mechanical structure damage

- identification[J]. *Mechanika*, 2012, 18(1):108-112.
- [16] ZHAO Xuefang, WANG Xinhui, DONG Xinyong. FBG hot-wire anemometer based on incorporating with waist-enlarged fiber bitaper[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2015, 34(10):57-59+62.
赵学芳,王新淮,董新永.基于腰椎放大熔接的FBG热线式风力计[J].*传感器与微系统*, 2015, 34(10):57-59+62.
- [17] XU Jiang, WANG Keda, LI Junqing, et al. Optical sensor of thermal gas flow based on fiber bragg grating[J]. *Sensors*, 2017,17(2):1-9.
- [18] KERSEY A D, DAVIS M A. Fiber grating sensors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8):1442-1463.
- [19] LIU Jun, LIU Weishuai. Thermal mass flowmeter based on constant current law[J]. *Control and Instruments in Chemical Industry*, 2015, 42(4):378-380+446.
刘均,刘伟帅.基于恒电流热式质量流量计的研究[J].*化工自动化及仪表*, 2015, 42(4):378-380+446.
- [20] 袁琨翔.热式流量计的误差分析及精度提升方法研究[D].杭州:浙江大学,2015.
- [21] 张桂花.表面黏贴式光纤光栅传感原理及其实验研究[D].西安:西安科技大学,2013.
- [22] 王新淮.光纤光栅风力计研究[D].杭州:中国计量学院,2015.