

基于FBG的流量传感器研究进展

贾振安,杨凯庆*,白燕,樊庆赓,赵显锋

(西安石油大学理学院,西安710065)

摘要:流量测量在工业生产过程中极其重要,基于光纤布喇格光栅(FBG)的流量传感器具有一系列的优点而备受重视。结合研究成果,详细说明了常见的靶式FBG流量计、压差式FBG流量计、涡轮式FBG流量计以及其它类型的FBG流量传感器的测量原理和实验情况,最后展望了基于FBG的流量传感器的发展方向。

关键词:流量测量;流量计;光纤传感;光纤布喇格光栅;研究进展

中图分类号:TN914 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2021)01-0001-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.01.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research progress of flow sensor based on FBG

JIA Zhen'an, YANG Kaiqing*, BAI Yan, FAN Qinggeng, ZHAO Xianfeng

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

Abstract: Flow measurement is extremely important in the industrial production process, and the flow sensors based on fiber Bragg grating(FBG) have a series of advantages and attract much attention. Combined with the research results, the measurement principles and experimental conditions of the common target FBG flowmeter, differential pressure FBG flowmeter, turbo FBG flowmeter and other types of FBG flow sensors are described in detail. Finally, the development direction of flow sensors based on FBG is prospected.

Key words: flow measurement; flowmeter; fiber optic sensing; fiber Bragg grating; research progress

0 引言

流量为过程控制中的三大参数之一,作为流量测量的传感器在工业生产过程中应用极其广泛。由于在石油和天然气的开发/开采、提纯处理、储存运输和销售过程中,需要的流量传感器数目巨大,对流量传感器的准确度和可靠性要求十分高,因此在石油和天然气工业中,其计量尤为被人们关注。此外,在蒸汽、氧气、氮气和水等的计量中,也要使用大量的流量传感器,其中很大一部分用于贸易结算,准确度必须满足国家的标准,这对流量传感器提出了很高的要求。

收稿日期:2020-06-28。

基金项目:陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(17JS105)资助;西安石油大学研究生创新与实践能力的培养计划项目(YCS19212065)资助。

作者简介:贾振安(1959—),男,陕西咸阳人,教授,硕士生导师。主持或参加国家自然科学基金项目、国家863计划和陕西省“13115”工程等国家和省部级科研项目共15项;曾荣获“国家技术发明奖二等奖”、“陕西省科学技术一等奖”和“西安市科学技术一等奖”等奖项。

*通信作者:杨凯庆(E-mail: 2862328398@qq.com)。



光纤传感技术是一种新兴的传感测量技术,可用于温度、压力、形变、振动和流量^[1]等参数的测量。光纤传感技术具有体积小、可埋入小型智能结构、灵敏度高、抗电磁干扰^[2]、测量范围宽、可靠性高、能实时监测并可分布式测量^[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等一系列的优点,因此受到广大科研人员的重视。目前,光纤传感技术已经广泛应用于电力系统^[4-6]、航空/航天^[7]、医学^[8-10]、地质勘探^[11-12]和机械工程^[13-14]等领域。而光纤布喇格光栅(FBG)除了光纤传感技术的一般优点外,还具有损耗小、制作封装简单、稳定可靠、易与系统及其它光纤器件连接使用等优点^[15],是光纤传感技术中应用最广泛、最简单的一种光纤无源器件。本文详细介绍几种基于FBG的流量传感器的测量原理和典型应用。

1 FBG 流量传感器的测量原理和种类

1.1 结合传统流量计制作的FBG流量计

传统流量计主要包括靶式流量计、压差式流量计、涡轮式流量计、涡街式流量计和V型内锥式流量

计等^[16],存在着体积大、结构复杂、精度低和易受电磁干扰等缺点,而且传统流量计的测量系统大部分采用电信号,在一些特殊行业(如石油和天然气行业)需要对电路和流量计进行特殊的防爆处理,大大增加了成本。利用FBG和传统流量计结合,使用光信号替代电信号制作而成的新型FBG流量计则可以在很大程度上克服传统流量计的缺点。

1.1.1 靶式FBG流量计

靶式FBG流量计的原理是当流体流动冲击靶片时,使得连接靶片的悬臂梁产生应变,通过测量粘贴在悬臂梁上FBG中心波长的漂移量即可测出流量^[17]。

2016年,刘均等人^[18]设计了一种基于传统靶式流量计的三角形悬臂梁FBG流量计,其结构如图1所示。他们将2个FBG粘贴在三角形悬臂梁前后的中心线处,当悬臂梁弯曲时,面向流体的FBG长度会变长,而另一个FBG会变短,这样双FBG的波长漂移量之差就只受流量影响,与温度无关,既解决了温度应变的交叉敏感问题,又能提高流量计灵敏度。实验测试得出:所设计的流量计的可测量范围为0~3.96 m³/s,线性误差仅为0.31%,因此该结构的FBG流量计的精度很高。

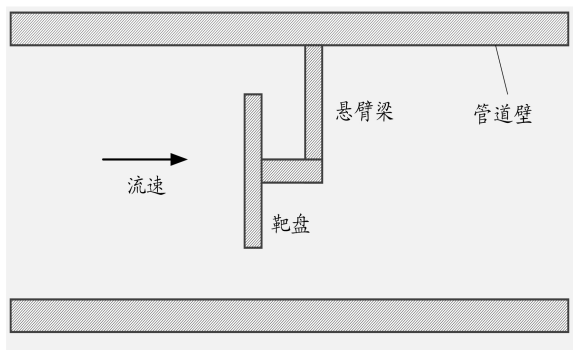


图1 三角形悬臂梁FBG流量计

2018年,Ri-qing Lv等人^[19]设计了一种用不锈钢毛细管取代悬臂梁的靶式流量计,将双FBG对称地粘贴在毛细管内壁的形变最大处,双栅形成的面平行于流体流向。在流量为5~16 m³/h的测量范围内,该流量计流量测量的绝对偏差小于0.25 m³/h,精度为2.27%。该流量计的双FBG粘贴方式既解决了温度应变的交叉敏感问题,又可以有效避免流体冲击,便于封装,还可以应用于一些具有腐蚀性的流体中。

2020年,张正义^[20]设计了一种靶片和悬臂梁一体化的靶式FBG流量计结构,将2个相同的FBG沿中心线粘贴在等强度悬臂梁的两侧,通过FLUENT软件

对流量计进行仿真模拟后,发现一体化结构的FBG靶式流量计比传统靶式流量计对流体流动时产生的影响小。实验测试表明:2个FBG的波长偏移量之和为单个FBG的两倍,一体化结构将流量计的灵敏度提高了一倍,流量计的分辨率是0.049 L/s。

1.1.2 压差式FBG流量计

压差式FBG流量计的原理是使用节流装置(常用的有孔板、文丘里管和喷嘴等)使管道横截面变小,当流体通过时产生压力差,压力差的大小正比于流量大小,通过FBG测量出压力差就可以得到流量^[21]。

2012年,王宏亮等人^[22]设计了一种由文丘里管作为节流管的压差式FBG流量计。文丘里管上有2个取压孔,通过这2个取压孔连接1个光纤光栅压强机构。压强机构由2个波纹膜片组成封闭结构,每个膜片的中心都与1个等腰三角形悬臂梁的顶点通过钢销子连接在一起,并采用2个FBG对称地粘贴在2个悬臂梁上。当2个膜片感受的压力不同时,2个FBG的波长漂移量也不相同,通过测量漂移量差值就能得到流量。这种流量计结构解决了温度与应变的交叉敏感问题,提高了精确度。实验验证与理论分析结果相一致,实验值和理论值的相对误差为2.9%。

2014年,李洪才等人^[23]设计了一种内嵌喷嘴差压式FBG流量计,其结构如图2所示。他们选择内嵌ISA1932标准喷嘴作为节流元件,流体经过喷嘴后产生压差,通过喷嘴两侧的取压孔将压差信号作用在粘贴有FBG的平面膜片上,检测FBG中心波长的偏移量就能检测压差大小,进而可以推导出流体流量的数值。在静态差压特性测试中,数据及拟合结果显示拟合曲线斜率的均值为0.712 nm/MPa。在动态流量测试中,实验数据拟合曲线的系数为0.226 nm/(L·s⁻¹)²;所用解调仪的分辨率为1 pm,计算得出流量计的灵敏度为0.067 L/s。但是,此流量计未消除温度应变交叉敏

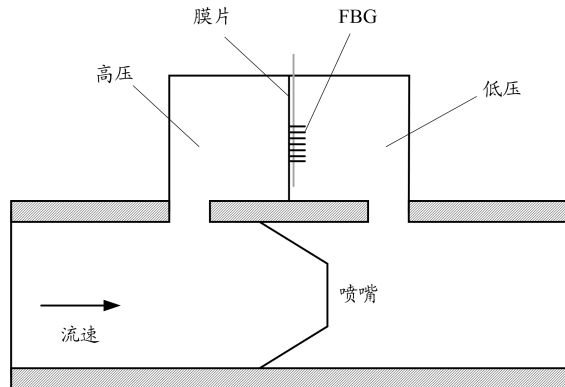


图2 内嵌喷嘴差压式FBG流量计

感的影响,如果再粘贴一个FBG只感受温度和检测波长漂移量差值,就可以消除温度的影响。

1.1.3 涡轮式FBG流量计

涡轮式FBG流量计的原理是当流体流经FBG涡轮流量传感器时,流体冲击力会对涡轮叶片产生冲击使其旋转,叶片会以固定频率经过FBG传感探头,因此产生了周期性脉冲信号,通过测量信号频率就能推导出流体流量^[24]。

2014年,蒋善超等人^[25]设计了一种可以同时测量流速和温度的涡轮式FBG流量计。该流量计利用涡轮实现了流体冲击力对FBG中心波长的频率调制,以及温度和应变在频率域上的区分,可以同时测量流速和温度。由性能试验数据可知:FBG流量计的流速检测精度为25 mm/s,流速检测的下限为0.5417 m/s。应用经验模态分解(EMD)方法分析FBG中心波长的动态信号,得到温度检测精度为0.5℃。从实验结果可以看出,该流量计能够比较理想地实现同时测量流速和温度2种参数。

2016年,Ya-fei Gu等人^[26]针对传统涡轮流量计的测量下限太大、无法满足小流量测量的问题提出了一种改进型FBG涡轮流量计。涡轮的前导叶片经过特殊设计,具有螺旋角,可降低测量下限并提高测量灵敏度。他们建立了改进型流量计的理论模型,理论分析后得出结论:如果前导叶片的螺旋角与涡轮的螺旋角等于90°,则涡轮起始测量的体积流量可以达到最小值,而流量计的灵敏度可以达到最大值。除此之外,他们通过计算流体动力学(CFD)仿真验证了结论的正确性。

涡街式流量计和V型内锥式流量计在实际应用中有很大的缺点,比如涡街式流量计在流体流速太大或太小时都难以检测到输出信号;另外,涡街发生体长时间使用会产生磨损,改变发生体尺寸,测量时就会产生极大误差。V型内锥式流量计存在一定的危险性,一旦V型锥体掉落,对管道的危害极大。因此,这2种FBG流量传感器的研究较少。

1.2 其它FBG流量传感器

除了基于传统流量计测量原理制作而成的FBG流量计,研究人员还使用其它测量原理或传感结构研究出了其它不同种类的FBG流量传感器。

2013年,Wenjun Zhu等人^[27]提出了一种基于镀银FBG的新型气体流量探头。这种传感器使用热线式原理,用银膜吸收泵浦激光的能量,提高初始温度。当气体经过传感器时,会带走部分热量,FBG的中心波长会产生漂移,测量出漂移量即可测得气体流量。镀银

的FBG传感探头体积很小,直径仅为0.125 mm。为了保护FBG,他们在不锈钢毛细管的中间制造一个方孔并将镀银的FBG传感探头固定在孔内。通过有限元方法(FEM)对不同类型的传感探头进行仿真可知,直径为3 mm的毛细管的不锈钢管和长度为12 mm的方孔的传感探头可以提供最佳性能。这些都为基于传感探头的新型气体流量计的开发奠定了良好的基础。

2015年,赵学芳等人^[28]设计了一种基于热线式原理的FBG风力计。风力计的传感结构由镀有金属银膜的FBG和腰椎放大光纤构成。腰椎放大光纤的作用是将激光器的大部分能量耦合进FBG的包层中,可以被银膜吸收以提高温度。实验得出:该风力计的风速测量上限为13.7 m/s,分辨率可达0.001 m/s,灵敏度可达1 nm/(m·s⁻¹)。

2017年,Xu Jiang等人^[29]提出了一种利用光纤加热的FBG流量传感器。该传感器通过测量2个FBG传感器之间的温度差来测量流体流量。其中,一个FBG传感器由温度测量单元和加热单元组成,在加热单元中引入了吸收涂层来代替传统的电阻加热模块,以最大程度地减少爆炸的风险。该传感器中来自放大自发辐射(ASE)光源的C波段光被分成两部分:一部分用于加热吸收涂层;另一部分用于信号处理单元。另一个FBG传感器则是只测量流体温度。通过实验测试,该传感器的流量分辨率为0.77 m³/h,流速分辨率为0.04 m/s。

2017年,Yong Zhao等人^[30]设计了一种微探针型FBG流量计。该流量计使用空心圆柱悬臂来测量流体冲击力进而测得流量,2个FBG固定在悬臂的内壁上形成的面平行于流体流向。实验结果表明:所提出的流量计的稳定性良好,使用分辨率为1 pm的解调器时,该流量计可用于测量0~22.5 m³/h的流量,分辨率为0.81 m³/h,精度为3.6%,仿真和实验都验证了所提出的流量传感器的可行性。微探针型FBG流量计的FBG粘贴在悬臂的内壁上,不会被流体冲击;另外,由于该流量计体积小,流体几乎不会产生压力损失。

2 结束语

本文结合研究人员最近几年在FBG流量传感技术上的研究成果,详细介绍了常见的基于FBG的流量传感器的传感结构和测量原理。未来,包括流量传感器在内的传感器都会朝微型化和多功能化方向发展。FBG体积小,易与其它光纤器件连接使用,可以对流体进行多参数测量和进行分布式实时测量,能满足流

量测量领域未来发展的需求。因此,随着传感技术和制造业的不断进步,基于FBG的流量传感器在传感器市场中必会占据一席之地。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] JIAO S X, ZHAO Y, GU J J. Simultaneous measurement of humidity and temperature using a polyvinyl alcohol tapered fiber Bragg grating[J]. *Instrumentation Science & Technology*, 2017, 46(5): 463–474.
- [3] MOHAMMED A, HU B, HU Z, et al. Distributed thermal monitoring of wind turbine power electronic modules using FBG sensing technology[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(17): 9886–9894.
- [4] LAMMENS K, BERGHMANS F, FERNANDEZ A F, et al. Temperature monitoring of nuclear reactor cores with multiplexed fiber Bragg grating sensors[J]. *Optical Engineering*, 2002, 41: 1246–1254.
- [5] MOHAMMED A, DJUROVIC S. A study of distributed embedded thermal monitoring in electric coils based on FBG sensor multiplexing[J]. *Microprocessors & Microsystems*, 2018, 62: 102–109.
- [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] 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): 27174–27200.
- [8] 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.
- [9] SHI C Y, LI M, LV C L, et al. A high-sensitivity fiber Bragg grating based distal force sensor for laparoscopic surgery[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(5): 2467–2475.
- [10] ZHANG C, MIAO C, GAO H, et al. Research on fiber Bragg grating heart sound sensing and wavelength demodulation method[C]. *Proc. SPIE*. Bellingham: SPIE, 2010: 78531Q-1–78531Q-7.
- [11] REN G, LI T, HU Z, et al. Research on new FBG soil pressure sensor and its application in engineering[J]. *Optik*, 2019, 185: 759–771.
- [12] PENG H, CHEN B, DONG P, et al. Application of FBG sensing technology to internal deformation monitoring of landslide[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020(1): 1–10.
- [13] LIU B, ZHANG S, HE J. Deformation measurement of glass structure using FBG sensor[J]. *Photonic Sensors*, 2019, 9(4): 367–375.
- [14] LIU M, ZHOU Z, TAN Y, et al. Fiber Bragg grating sensors-based mechanical structure damage identification [J]. *Mechanika*, 2012, 18(1): 108–112.
- [15] 陈琦. 光纤光栅传感技术的原理与应用 [J]. *科技信息*, 2011(19): 84–84.
- [16] 田野, 王岳, 郭士欢, 等. 常见流量计的应用[J]. *当代化工*, 2011, 40(12): 1294–1296.
- [17] LIU C T, ZHANG Z Y, LI H C. et al. Research on one-piece structure target flow sensing technology based on fiber Bragg grating [J]. *Photonic Sensors* 2016, 6(4): 303–311.
- [18] 刘均, 李雨泽. 光纤 Bragg 光栅靶式流量传感器设计[J]. *光学仪器*, 2016, 38(4): 368–371.
- [19] 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.
- [20] 张正义. 基于光纤光栅的一体式靶式流量传感技术 [J]. 2020, 41(2): 217–223.
- [21] 王立民, 郭文立, 严晓斌, 等. 差压式流量计在蒸汽计量中的若干问题及解决方法探讨[J]. *中国计量*, 2008(1): 75–76.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 尹川, 李晓琳, 郭政波. 涡轮流量传感器油耗测量及流阻特性实验分析[J]. *中国测试*, 2019, 45(10): 78–83.
- [25] 蒋善超, 隋青美, 王静, 等. 流速 / 温度共采的光纤布拉格光栅涡轮流速传感器[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(10): 2611–2616.
- [26] GU Y F, ZHAO Y, LV R Q, et al. Theory and structure of a modified optical fiber turbine flowmeter[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2016, 50: 178–184.
- [27] ZHU W J, CHENG J, HUANG Z W, et al. Simulation of the gas flow sensing probe based on silver-coated fiber Bragg grating [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013(321–324): 286–292.
- [28] 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(10): 57–59, 62.
- [29] XU J, WANG K D, LI J Q, et al. Optical sensor of thermal gas flow based on fiber Bragg grating[J]. *Sensors*, 2017, 17: 1–9.
- [30] 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 & Measurement*, 2017, 66(3): 502–507.