

光纤传感技术在流量检测方面的应用研究

赵煜, 朱志成, 牛美玲, 侯德文, 张潜, 周善浩, 康娟*

(中国计量大学 光学与电子科技学院, 杭州 310018)

摘要: 当前工业领域, 特别是微流体测量领域, 对流量的计量提出了更苛刻的要求。结合光纤测量技术的高精度、高灵敏度和抗电磁干扰等特点, 详细介绍了光纤多普勒流量计、光纤流量计、光纤法布里-珀罗(F-P)流量计和光纤“热线”流量计的测量原理和应用发展情况。

关键词: 流量检测; 光纤传感; 光纤光栅; 波长漂移; 多普勒频移

中图分类号: TN929.1; TP212 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2019)05-0005-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.05.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Application research on optical fiber sensing technology in flow detection

ZHAO Yu, ZHU Zhicheng, NIU Meiling, HOU Dewen, ZHANG Qian, ZHOU Shanhao, KANG Juan*

(College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: At present, in the industrial field, especially in the field of microfluidic measurement, more stringent requirements are put forward for flow measurement. Combining with the characteristics of high precision, high sensitivity and anti-electromagnetic interference of optical fiber measurement technology, the measuring principle and application development of optical fiber Doppler flowmeter, optical fiber flowmeter, optical fiber Fabry-Perot (F-P) flowmeter and optical fiber "hotline" flowmeter are introduced in detail.

Key words: flow detection; optical fiber sensing; fiber Bragg grating(FBG); wavelength shift; Doppler shift

0 引言

在流体流量测量领域中, 我们通常需要测量几个重要的流体参数如流量、温度、压力、粘滞度和液位等。随着流量监测对象和测量环境的不断变化, 经常需要在强电磁场、高腐蚀性环境下进行测量作业, 而光纤传感器具有抗干扰、抗腐蚀能力强、耐磨损寿命长以及灵敏度高优点, 非常符合流量测量领域对流量计的新要求, 具有广泛的应用前景。本文将介绍基于光学检测技术的流量计的国内外研究成果, 并分类介绍主要几种光纤流量计的测量原理和典型应用。

收稿日期: 2019-01-19。

基金项目: 国家自然科学基金(61505194)资助; 浙江省大学生科研创新活动计划项目(2018R409010)资助。

作者简介: 赵煜(1996-), 男, 本科, 现就读于中国计量大学光电学院电子科学与技术专业, 在校期间主要从事智能车自动驾驶算法设计以及光纤传感器方向的研究, 参加了全国大学生光电竞赛、飞思卡尔智能车竞赛和浙江省机器人竞赛, 都获得省级以上荣誉。

* 通信作者: 康娟(E-mail: kangjuan@cjlu.edu.cn)。



1 基于光纤传感技术流量测量的研究动态

1.1 基于光学多普勒测速技术的流量传感器

激光多普勒测速技术具有动态响应快、精度强、灵敏度高、非接触性测量和测量范围广等优点。自1982年HNishihara等人^[1]将光纤多普勒测速技术应用到测量血液流速以来, 出现了许多这类基于多普勒技术的血液流量计^[2]。

2013年, 长春理工大学周恒等人^[3]设计了一种无创式光纤血液流速传感器。使用激光做光源, 结合多普勒频移技术和拍频干涉技术, 采集干涉条纹。该流量计对微弱信号具有较高的灵敏度和信噪比, 可以对皮肤血液进行连续的无创检测。

2015年, 杭州电子科技大学黄雪峰等人^[4]提出了基于双芯光子晶体光纤的激光多普勒速度计来测量微流体中的多点速度测量。基于双芯光子晶体光纤的相干特性和控制体特征的理论分析得出, 增大纤芯间距, 可增加控制体内的干涉条纹数量, 从而提高速度测量精度。这种激光多普勒速度计可进行多点速度测

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

量,而且探头具有微型化、系统简单和重复性好等特点,可以实现微流体流场的多点速度同时测量。

2017年,西安工业大学李艳萍等人^[5]在传统激光多普勒测速系统中加入了光纤环行器,设计了一个全光纤激光多普勒测速光路,解决了传统激光多普勒测速光路存在的光功率损耗大、参考光功率不可控等问题,并分析计算了传统光路和改进光路中各光纤无源器件的光功率损耗和整体光路中光的利用率。改进的激光多普勒测速系统提高了光整体的利用率,信号信噪比和对比度都获得了相应的提高。

1.2 基于光散射的流量传感器

在国外,一些基于光纤散射的分布式流量传感器被研究人员提出,他们主要利用布里渊散射的温度和应力测量原理以及瑞利散射的现象,可以实现光纤任一点的流量测量,具有高空间分辨率、高流速分辨率等优点。

2012年,Chen等人^[6]将光时域反射(OTDR)技术和有源光纤流量传感器相结合,研制出了一种分布式流量传感器。该传感系统包括2个部分:一部分是用于解调的Mach-Zehnder干涉OTDR;另一部分是表面镀铜光纤的电流泵浦的有源光纤流量传感器。在0.263m/s的流量下时,该传感器的测量灵敏度为0.014m/(s·℃);高流量测量特性方面,其流速方向角分辨率小于1°,空间分辨率为1cm。由于具有安装简单、高的空间分辨率和对各种恶劣环境的广泛适应性等优点,使得该传感器可以广泛运用于工业流量测量领域。

1.3 基于光纤光栅的流量传感器

光纤传感器的基本原理是将输入光信号经过入射光纤送入调制区调制,使光信号的光学性质(如光的强度、相位和偏振态等)发生变化而成为调制光信号,再经过出射光纤送入光探测器、解调器而获得被测参数^[7]。

20世纪80年代起,随着人们对光纤传感器的深入研究,光纤流量计在流体流量测量领域得到越来越多的关注。光纤流量计的基本原理是:外界流量条件将会改变传输光信号的强度、相位、波长和偏振态等特性,通过特点检测和信号解调方法将流体流速有关的变化量提取出来,从而实现对流速流量的测量^[8]。传统流量计按照工作原理来分类,主要有涡轮式、电磁式、涡街式、靶式、压差式、容积式和转子式等流量计^[9]。然而,传统流量计有着很多不易克服的诸如寿命短、灵敏度低、体积大、质量重和易受电磁干扰等缺

点,将其中的传感电信号转化为光信号后,则极大程度上解决了上述问题。因此,研究人员自然而然地选择了用光纤传感器代替了电子传感器来作为流量计的传感元件。

1.3.1 光纤流量计

光纤涡轮流量计的基本测量原理是当被测流体流过涡轮叶片时,光纤传送的光信号在叶片顶端反射并产生周期性的变化,反射光传输至光探测器转换成相应的电脉冲信号。其反射回来的光的频率与涡轮的转速成正比,也即与被测流体流量成正比,所以测出反射光信号的频率就可以得到流体流量。此类流量计的传感光纤基本上采用多模光纤以尽量更多地收集反射光信号,提高传感器的信噪比^[10]。

2014年,蒋善超等人^[11]通过实验实现了对于敏感元件的多参数的同时测量,他们提出了一种流速和温度共采的基于布喇格光纤光栅(FBG)的涡轮流速传感器。研究人员为了解决了FBG温度应变的交叉敏感,就通过涡轮来实现流体对FBG中心波长的频率调制,从而避免其影响。为了测试传感器的性能,应用快速傅里叶变换(FFT)法分析试验数据,得到传感器流速的检测下限为0.5417m/s,灵敏度为0.0257m/(s·Hz⁻¹),精度达到25mm/s,表明该传感器可以较理想地实现流速/温度的同时检测且测量精度较高。

2015年,西北工业大学杜玉环等人^[12]采用FFT频谱分析法在LabVIEW软件上开发了仿真测试平台,设计了一种双圈同轴式光纤的涡轮流量智能检测系统,其测量频率范围在5~300Hz内,测量误差小于0.5%,具有较高的测量精度和可靠性。

传统靶式流量计机械结构较为复杂、灵敏度低和量程范围窄,不符合高精度测量的要求^[13]。

光纤靶式流量计的测量原理主要是当流体流经靶片时,流体的冲击力使得靶片能够带动等强度悬梁臂产生形变,从而导致悬梁臂上的FBG发生形变并使得FBG中心波长位移。要得出管道内流体流量的大小,只需检测FBG的中心波长的位移变化即可。

1.3.2 其它结构光纤流量传感器

在石油生产中,井下的复杂环境给光纤流量计的设计提出了更多的要求。2002年,布朗大学Tor Kragas等人^[14]研制出了一种能够实时测量压力、温度、流量及相百分含量(滞留量)的井下多相光纤流量计。该流量计采用分布式FBG传感器进行流量传感,该传感器能在一根光纤电缆上进行多路全光纤测量。这种流量计是非浸入式且不含井下电子设备,作为生产管柱的一

部分被装入井中。该流量计由 2 个模块组成:上部组件是一个装有光纤压力传感器和温度传感器的仪器箱,下部包括光学流量计和各组分相流体百分含量传感器。这种光纤流量计的流量误差可达 3%。

2013 年,尚盈等人^[15]提出了一种基于湍流振动原理的非侵入式流量测量系统,该系统主要是针对流量检测中遇到的恶劣环境(如高压、腐蚀和高温等)。此系统通过在管道外壁缠绕特定长度的传感光纤,并在传感光纤两端熔接光纤光栅组成光纤流量传感单元。由于流体流过管壁时可由湍流产生振动,通过密缠绕在管壁上的传感光纤来感应振动,从而实现对流量的监测。由实验数据得到,光纤光栅的相位变化和流速呈二次曲线关系,且该系统可以实时在线测量,测量精度在大流量的条件下较高,为 5%。

2014 年,Chen 等人^[16]分别在单模光纤(SMF)和掺铒光纤上刻写再生型 FBG(RFBG),其中前者作为环境温度的测量元件,后者用来测量同温度下氮气的流速。该流量计的泵浦源和信号源都采用掺铒光纤放大器(EDFA),从而使得系统的复杂性大大降低。实验装置如图 1 所示,该流量计的泵浦源和信号源都采用 EDFA,从而使得系统的复杂性大大降低。该传感器可以在 800℃ 的高温下测量 0.066~0.66m/s 低流速下的氮气流量。

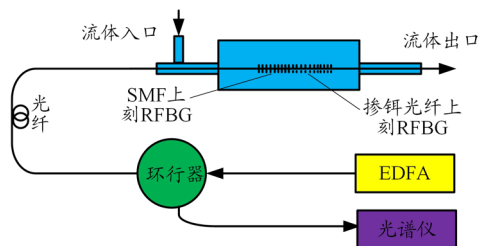


图 1 高温流量计装置原理图

1.4 基于法布里-珀罗(F-P)干涉的流量传感器

光纤 F-P 流量计的测量原理基于光纤 F-P 干涉仪(FFPI)腔的种类不同而产生多种多样的测量类型,主要是当光纤中的光在传输过程中遇到两面反射镜后,多次反射构成多光束干涉。当被测的流量值变化时,干涉腔的腔长随之变化,进而使得光电探测器输出的电信号随着相位差的变化而变化。此类传感器的测量空间分辨率和灵敏度都很高,在光纤传感和光纤通信领域越来越受到人们的重视^[17]。

由于人们对于光纤 F-P 流量计的研究起步较晚,大多是基于 FFPI 的传感器结构。2011 年,台湾国立联

合大学 Lee 等人^[18]提出了一种基于 FFPI 的风速计,可以准确地测量出低流速下的风速大小。

2016 年,Liu 等人^[19]设计了一种基于阵列型硅 FPIs 的微型光纤流体矢量流量传感器。该流量传感器由 4 个 FPIs 组成,1 个在传感器中心,其余的平均分布在其周围。中心的 FPI 被激光器加热后,根据传感器的内部的温度分布,可以从周围 3 个 FPIs 的波长漂移推导出流体矢量(方向和速度)函数,且通过实验验证了该理论。该传感器可以应用于对水下湍流的基本性质进行分析等流体测量领域中。

2017 年, Lee 等人^[20]基于以前的研究提出一种感测流量的热聚合物光纤 F-P 干涉仪(HPFFPI)风速计,测速装置如图 2 所示,此 HPFFPI 是将 SMF 端面连接到紫外光所固化的聚合物上,形成聚合物微腔。使用铜制作的加热器加热该聚合物微腔,使其达到稳态温度 T ,此聚合物对 T 的变化高度敏感。当热聚合物被测量的流动气体冷却时,其光谱的波长条纹发生漂移,便可得到气体流速。实验证明,所提出的 HPFFPI 具有良好的测量响应度和高灵敏度,在 0~2.54m/s 的气流范围内,灵敏度为 1.139nm·s/m,分辨率为 0.0088m/s,空腔长度为 10μm,在光纤测速领域有着较强的商业潜力。

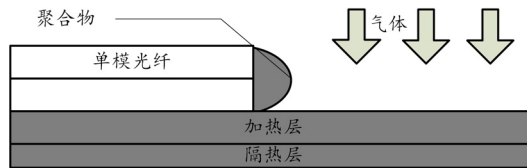
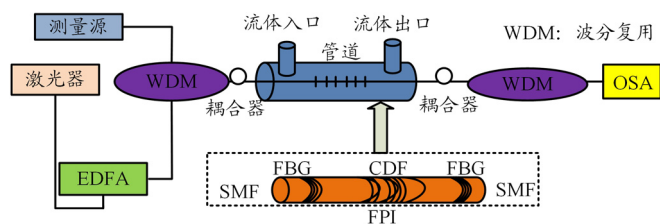


图 2 HPFFPI 风速计示意图

1.5 基于“热线”技术的光纤流量传感器

2011 年,Paulo Caldas 等人^[21]提出了一种基于长周期光纤光栅(LPG)和镀银层 FBG 结合的全光纤“热线”流量计。在该流量计中,泵浦光的绝大部分能量会被有效地耦合到光纤包层去加热银薄膜。当泵浦光功率增大时,传感器对流量的响应也会增大,可得到 0.08m/s 的分辨率。同年,浙江大学 Gao 等人^[22]基于“热线”技术,在掺铒光纤(CDF)上刻写 FBG 实现了流体流量的测量,该流量计在流速 2.0~8.0m/s 之间的范围内,分辨率为 0.012m/s。

2015 年,Li 等人^[23]提出了一种基于 FPI 的紧凑型微流体流量计,实验装置如图 3 所示。此流量计的 FPI 由一对 FBG 和 CDF 所组成的“热线”传感器而构成。当泵浦光通过 CDF 时,FPI 会吸收泵浦光能量而产生自热现象,微流体经毛细管通过时,会根据流速的不



同而带走不同的热量,再依据 FPI 共振峰的波长漂移,从而得到相应的流速大小。实验结果显示:此流量计的灵敏度达到 $70\text{pm}\cdot\text{s}/\mu\text{L}$, 空间分辨率为 $200\mu\text{m}$, 其在微流体流量传感器中有充分的应用前景。

2017年,香港理工大学 Liu 等人^[24]提出了一种基于 CDF 和 FBG 结合的一体式“热线”微型流体流量计,将一段 3mm 长的 FBG 内嵌到 4 个 CDF 中间,再将其整体装入到不锈钢管中构成传感探头。随着激光功率的增加,传感器的灵敏度可以进一步提高。在流速为 0.2m/s 的水和油中,流量计的灵敏度分别达到 0.339nm·s/m 和 0.578nm·s/m,可以区分微小的流量变化为 0.002m/s。

2 结束语

基于光纤测量技术的流量计有着诸多优势,如高精度、高灵敏度、抗电磁干扰强、动态测量范围大、环境适应性强、可分布式传感、可实现耐腐蚀、耐高温高压和传感与信号传输统一等优点,可以用于如大气气流、水下湍流、石油天然气管道、工业气体排放和医学行业的生物体液等多种流体环境下的流量测量。本文介绍了几类基于光纤测量技术流量计的传感及测量原理,并结合了最近时间内科研人员的研究来详细阐述了该类流量计的历史和发展情况。随着机械制造业和光纤测量技术的不断发展,相信在不远的将来会逐渐地有更多技术应用到工业生产和日常生活中。

参考文献.

- [1] NISHIHARA H, KOYAMA J, HOKI N, et al. Optical-fiber laser Doppler velocimeter for high-resolution measurement of pulsatile blood flows[J]. *Applied Optics*, 1982, 21(10): 1785–1790.
- [2] RAISIS A L, YOUNG L E, TAYLOR P M, et al. Doppler ultrasonography and single-fiber laser Doppler flowmetry for measurement of hind limb blood flow in anesthetized horses [J]. *American Journal of Veterinary Research*, 2000, 61(3): 286–290.
- [3] QU X F, IKAWA M, SHIMAUCHI H. Improvement of the detection of human pulpal blood flow using a laser Doppler flowmeter modified for low

flow velocity[J]. Archives of Oral Biology, 2014, 59(2): 199–206.

[4] 周恒, 冯进良, 张桂敏. 一种光纤血液流速传感器的设计[J]. 科技风, 2013(17): 44–45.

[5] 黄雪峰, 赵冠军, 李盛姬, 等. 基于双芯光子晶体光纤的激光多普勒多点速度测量研究[J]. 光学学报, 2015, 35(11): 124–132.

[6] 李艳萍, 王伟, 张雄星, 等. 一种改进的激光多普勒测量光纤光路[J]. 自动化仪表, 2017, 38(4): 66–69.

[7] CHEN Tong, WANG Qingqing, ZHANG Botao, et al. Distributed flow sensing using optical hot-wire grid[J]. Optics Express, 2012, 20(8): 8240–8249.

[8] 杜志泉, 倪锋, 肖发新. 光纤传感技术的发展与应用[J]. 光电技术应用, 2014(6): 7–12.

[9] NEMOVA G, KASHYAP R. Novel fiber Bragg grating assisted plasmon-polariton for bio-medical refractive-index sensors[J]. Journal of Materials Science(Materials in Electronics), 2007, 18(1): 327–330.

[10] 张羽. 浅谈流量计的选型及其应用 [J]. 自动化与仪表, 2007, 22(1): 24–27.

[11] 吴志鹤, 田新启. 光纤涡轮流量传感器及检测系统研究[J]. 南京航空航天大学学报, 1994(3): 423–428.

[12] 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.

[13] 杜玉环, 郭迎清, 薛海东, 等. 基于 LabVIEW 的 FFT 光纤涡轮流量测量系统研究[J]. 仪表技术与传感器, 2015(11): 56–58.

[14] 张华, 赵文柱. 热工测量仪表[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.

[15] KRAGAS T K, III F X, CHRISTOPHER M, et al. Downhole Fiber-Optic Multiphase Flowmeter: Design, Operating Principle, and Testing [J]. Journal of Petroleum Technology, 2002, 54(12): 59–61.

[16] 刘小会, 刘素香, 尚盈, 等. 基于管壁振动频率特性的光纤流量监测系统[J]. 光学仪器, 2015, 37(2): 103–106.

[17] 杨淑连, 盛翠霞, 魏芹芹, 等. 基于啁啾光纤布拉格光栅的流速传感器[J]. 光电子·激光, 2013(9): 1683–1687.

[18] CHEN Rongzhang, YAN Aidong, WANG Qingqing, et al. Fiber-optic flow sensors for high-temperature environment operation up to 800°C [J]. Optics Letters, 2014, 39(13): 3966–3969.

[19] 黎敏, 廖延彪. 光纤传感器及其应用技术[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2008.

[20] LIU Guigen, SHENG Qiwen, HOU Weilin, et al. Optical fiber vector flow sensor based on a silicon Fabry-Perot interferometer array [J]. Optics Letters, 2016, 41(20): 4629–4632.

[21] LEE Cheng-ling, LIU Kai-Wen, LUO Shi-Hong, et al. A Hot-Polymer Fiber Fabry-Perot Interferometer Anemometer for Sensing Airflow [J/OL]. Sensors, 2017, 17(9): 1–8 [2019-09-02]. <https://doi.org/10.3390/s17092015>.

[22] GAO Shaorui, ZHANG Aiping, TAM Hwayaw, et al. All-optical fiber anemometer based on laser heated fiber Bragg gratings [J]. Optics Express, 2011, 19(11): 10124–10130.

[23] ZHAO Yong, WANG Peng, LV Riqing, et al. Highly Sensitive Airflow Sensor Based on Fabry-Perot Interferometer and Vernier Effect [J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(23): 5351–5356.

[24] LIU Zhongyong, LIN Hetin, CHENG Lunkai, et al. Highly sensitive miniature fluidic flowmeter based on an FBG heated by Co²⁺-doped fiber[J]. Optics Express, 2017, 25(4): 4393–4402.