

文章编号: 0253-2239(2006)08-1136-4

基于光纤光栅的高灵敏度流速传感器*

陈建军^{1, 2} 张伟刚¹ 涂勤昌¹ 邹玉姣² 赵天工¹ 杜晓娜¹ 董孝义¹

(¹ 南开大学信息技术科学学院现代光学研究所光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)
(² 南开大学物理科学学院, 天津 300071)

摘要: 利用光纤光栅压强传感机构和汾丘里管设计了一种基于光纤光栅的流速传感器, 并推导了光纤光栅中心波长漂移量与流速的关系式。实验表明, 该传感器具有较高的灵敏度, 稳定性较好, 光纤光栅的中心波长随流速的增加而不断向短波方向漂移, 而带宽几乎没有变化, 实验和理论符合得较好。该流速传感器的动态感测范围为 51.0~148.2 mm/s, 在该范围内, 至少可感测到 0.3 mm/s 的流速变化, 这是目前所报道的最优值。优化光纤光栅压强传感机构及汾丘里管的参量, 可测量其它速度段的流速, 并可进一步提高传感灵敏度。

关键词: 光纤光学; 光纤光栅; 流速; 传感器; 开口环

中图分类号: TB937; TH814; TN253 文献标识码: A

High-Sensitivity Flow Velocity Sensor Based on Fiber Grating

Chen Jianjun^{1, 2} Zhang Weigang¹ Tu Qinchang¹ Zou Yujiao² Zhao Tiangong¹
Du Xiaona¹ Dong Xiaoyi¹

(¹ *Key Laboratory of Opto-Electronic Information Science and Technology, Ministry of Education, Institute of modern optics, College of Information and Technology Science, Nankai University, Tianjin 300071*)
(² *College of Physics Science, Nankai University, Tianjin 300071*)

Abstract: A novel flow velocity sensor based on fiber grating by using the fiber grating pressure sensing setup and Venturi tube is designed. The expression of relationship between the flow velocity and the shift of central wavelength of fiber grating is derived and the experimental results are in good agreement with theoretical analysis. The central wavelength of fiber grating shifts to the shorter wavelength with rise of the flow velocity, while the bandwidth is almost unchanged. The sensor is very sensible to the flow velocity, and very stable. The measuring range is 51.0~148.2 mm/s and in that range the sensor can distinguish the change of the flow velocity as low as 0.3 mm/s which is the lowest to our knowledge. By optimizing the parameters of the sensor, the sensitivity can be improved and it can measure the velocity of different ranges.

Key words: fiber optics; fiber grating; flow velocity; sensor; opening loop

1 引 言

光纤光栅是利用光纤材料的光敏性在光纤纤芯上建立的一种空间周期性折射率分布, 其作用在于改变或控制光在该区域的传播行为与方式。光纤光栅具有精度高、抗电磁干扰、适于恶劣环境工作等优点^[1~3]。将多个波长不同的光纤光栅串联, 可进行多点或准分布式测量。因此, 光纤光栅在光纤传感

等领域发挥着愈来愈重要的作用^[4, 5]。

流速/流量是工业生产过程、能源计量、环境保护监测、水工及河工模型试验中一个重要参量。使用最早、应用最广泛的流速/流量传感器是机械转子式^[6], 其技术相对成熟, 但由于受机械结构限制, 其测量误差大、精度低。超声波流速仪^[7]、电磁流速仪^[8]和声学多普勒流速仪^[9], 测量精度较高、使用简

* 国家自然科学基金(60577018)、国家 863 计划(2002AA313110)、南开大学科技创新基金、光电信息技术科学教育部重点实验室开放课题(2005-06)和南开大学本科生创新科研项目资助课题。

作者简介: 陈建军(1982~), 男, 湖南衡阳人, 南开大学物理科学学院本科生, 主要从事光纤光栅传感技术的研究。

E-mail: cjj02342@mail.nankai.edu.cn

收稿日期: 2005-11-07; 收到修改稿日期: 2006-02-21

便,但成本高,且易受电磁波干扰。光纤流速/流量计是近十年来发展起来的流速/流量传感器^[10,11],本文以光纤光栅为传感基元,采用波长绝对编码设计了一种流速传感器。

2 原 理

本流速传感器用到的汾丘里管如图 1 所示。大圆管的内径为 d_1 ,小圆管(喉部)的内径为 d_2 ,流体从左向右流过,设截面 1 和截面 2 分别通过导管 I,导管 II 的中线,截面 1 和截面 2 上的流速,压强,高度分别为 (v_1, P_1, Z_1) 和 (v_2, P_2, Z_2) 。

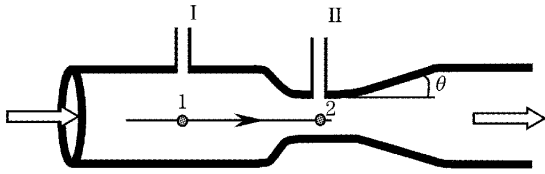


图 1 汾丘里管结构图

Fig. 1 Schematic diagram of Venturis tube

由流体连续性方程和伯努利方程可得,当汾丘里管平放时, $Z_1 = Z_2$, 截面 1 和截面 2 的压强差为

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{\rho}{2} \left[\left(\frac{d_1}{d_2} \right)^4 - 1 \right] v_1^2 = \frac{\rho}{2} \left[\left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 - 1 \right] v^2, \quad (1)$$

其中 ρ 为液体的密度, $v = v_1$ 为液体的流速。从(1)式可以看出截面 1 和截面 2 的压强差和流速成二次关系,即流速测量可转换为压强测量。

设计的光纤光栅压强传感机构由光纤布拉格光栅(FBG)、开口环、密闭铝箔管(只能沿轴向伸缩,且弹性系数很小)、密闭有机玻璃圆筒等组成,如图 2 所示。中心波长为 λ_0 的光纤布拉格光栅粘贴于开口环直梁侧面,光纤布拉格光栅轴向与直梁表面平行。开口环平放在有机玻璃圆筒里,它的两个半圆拱分别连在铝箔管和有机玻璃圆筒上。选取合适的圆筒

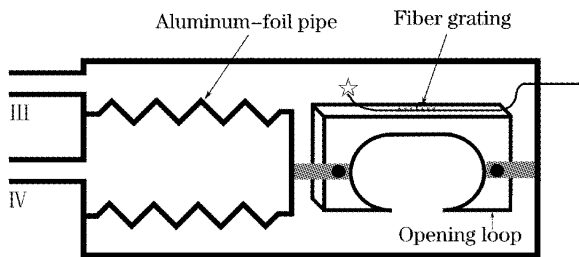


图 2 光纤光栅压强传感机构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the fiber grating pressure sensing setup

长度,尽量使铝箔管及开口环处于自然状态。导管 III、IV 分别与汾丘里管的导管 I、II 相连。

由文献[12]知,当温度不变时,开口环在拉力 F 作用下,光纤布拉格光栅中心波长的漂移量为

$$\Delta \lambda = - \frac{12\lambda_0(1-p_e)d}{Ea^3b} \left(\frac{a}{2} - \frac{a^2}{12d} \right) F, \quad (2)$$

其中 a 为开口环直梁宽度, b 为直梁厚度, d 为力 F 与直梁中线的距离($d = r + a/2$, 其中 r 为开口环半圆拱的半径), p_e 为光纤的有效弹光系数($p_e \approx 0.22$), E 为开口环材料的杨氏模量, $\Delta \lambda$ 为负,表示光纤布拉格光栅中心波长向短波方向漂移。

由于铝箔管弹性系数很小,开口环受到的拉力 $F \approx \Delta PS$, 其中 S 为铝箔管的横截面积, ΔP 为铝箔管内外压强差,即截面 1 和截面 2 的压强差。综合(1)式和(2)式,得光纤布拉格光栅中心波长漂移量与流速的关系为

$$\Delta \lambda = - \frac{12\lambda_0(1-p_e)d}{Ea^3b} \left(\frac{a}{2} - \frac{a^2}{12d} \right) \Delta PS = - \frac{6\mu\lambda_0(1-p_e)\rho d S}{Ea^3b} \left(\frac{a}{2} - \frac{a^2}{12d} \right) \times \left[\left(\frac{d_1}{d_2} \right)^4 - 1 \right] v^2, \quad (3)$$

式中 μ 为修正系数。从(3)式易知, $\Delta \lambda$ 与流速成二次关系,即可利用波长编码技术来测量流速的大小。从上式还可以看出, $\Delta \lambda$ 与 $d, a, b, d_1/d_2$ 有关。改进汾丘里管及开口环的结构,可进一步提高流速传感灵敏度。

3 实验设计及结果分析

实验装置图如图 3 所示。相应参量为: $r = 60.0 \text{ mm}$, $a = 4.42 \text{ mm}$, $b = 3.00 \text{ mm}$, $d = 62.2 \text{ mm}$, $E \approx 2500 \text{ N/mm}^2$, $d_1 = 26.5 \text{ mm}$, $d_2 = 11.0 \text{ mm}$, $\theta = 9^\circ$, $S = 9.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, $\lambda_0 = 1562.2 \text{ nm}$ 。

实验过程中,把汾丘里管和压强传感机构固定

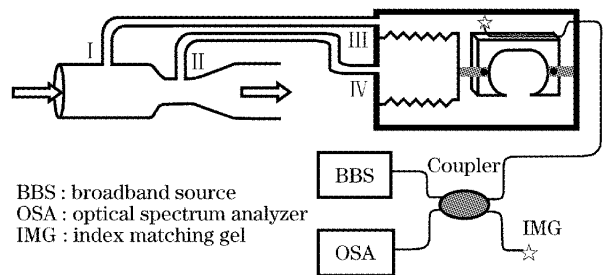


图 3 光纤光栅流速传感器实验装置图

Fig. 3 Experimental setup of flow velocity sensor based on fiber grating

于自制的架子上。先对压强传感器进行预热,然后将汾丘里管的 I、II 导管水平放置,并且分别与压强传感机构的 III、IV 导管连接。由自制宽带光源(BBS)发出的光,经 3 dB 耦合器到达光纤布拉格光栅,反射回来的光再次经 3 dB 耦合器,最后到达光谱分析仪(OSA)。在光谱分析仪中可测得光纤布拉格光栅中心波长随流速变化的漂移情况。假设水从左向右流,得到部分流速时的光谱图,如图 4 所示,其中光谱①对应光纤光栅的初始位置,②~⑥对应的流速分别为 79.4 mm/s, 92.6 mm/s, 130.3 mm/s, 139.1 mm/s, 148.2 mm/s。从图 4 可以看出,光纤布拉格光栅中心波长随流速增加而向短波方向漂移,带宽则几乎没有变化,与上述理论分析基本相符。

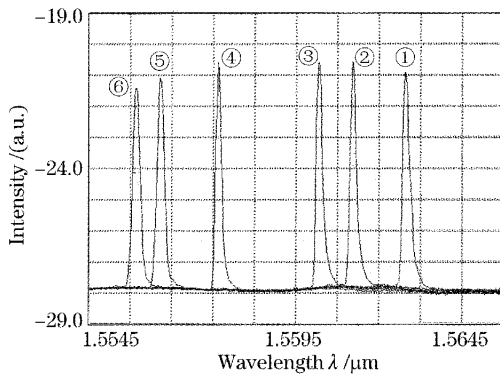


图 4 光纤光栅中心波长在不同流速下的反射谱

Fig. 4 Reflection spectra of uniform fiber grating under different flow velocities

图 5 是在室温为 28 °C 时 $v-\Delta\lambda$ 的拟合曲线。从图中可以看出,光纤布拉格光栅中心波长漂移量与流速近似成二次关系: $\Delta\lambda = -3.42 \times 10^{-4} v^2 + 0.9$ ($\Delta\lambda \leq 0$),且动态范围约为 51.0~148.2 mm/s。由于光谱仪可分辨到 0.01 nm,因此该流速传感器在

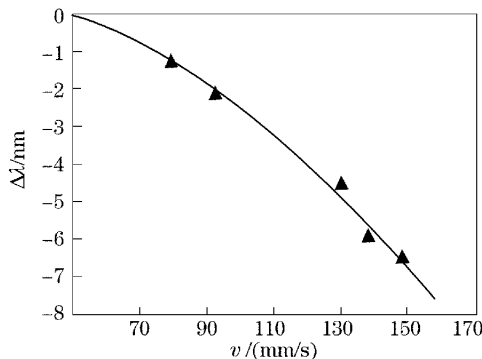


图 5 流速与光纤光栅中心波长漂移量的拟合曲线

Fig. 5 Relationship between the shift of the central wavelength of fiber grating and the flow velocity

此动态范围内至少可分辨出 0.3 mm/s 的流速变化。理论计算光纤光栅中心波长漂移量与流速的关系为 $\Delta\lambda = -4.80 \times 10^{-4} v^2$,计算得该传感器的修正系数 $\mu = 0.71$ 。根据实际需要,进一步优化开口环结构,可改善其应变传递效率,提高修正系数 μ 值。图 5 中纵轴的截距不为零,这是由于铝箔管和有机玻璃圆筒之间存在一定的摩擦力,相当于该传感器存在一微小的敏感阈值。经查询可知,此微小敏感阈值低于目前流速传感器最小感测下限^[6~11]。减少或消除摩擦力的影响,可有效降低测量下限,进而提高其动态测量范围。

4 结 论

利用光纤光栅压强传感机构和汾丘里管设计了一种结构简单、灵敏度高的光纤光栅流速传感器。实验表明,该传感器的光纤光栅中心波长漂移量与流速成二次关系,其动态感测范围为 51.0~148.2 mm/s,且在此范围内至少可分辨 0.3 mm/s 的流速变化。该光纤光栅流速传感器以光纤光栅为传感单元,无任何旋转部件,精度高、可多点分布式及远程动态监测。因此,这种新型的光纤光栅流速传感器可应用于石油、水利等领域的流速/流量的动态测量与监控。

参 考 文 献

- 1 Weigang Zhang, Yange Liu, Guiyun Kai *et al.*. A novel independent tuning technology of center wavelength and bandwidth of fiber Bragg grating[J]. *Opt. Commun.*, 2003, **216** (4~6): 343~350
- 2 Weigang Zhang, Guiyun Kai, Xiaoyi Dong *et al.*. Temperature-independent FBG-type torsion sensor based on combinatorial torsion beam[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(8): 1154~1156
- 3 Tu Qinchang, Zhang Weigang, Sun Lei *et al.*. Study on transversal strain on fiber Bragg grating[J]. *Chin. J. Laser*, 2004, **31**(12): 1508~1512 (in Chinese)
涂勤昌,张伟刚,孙磊等. 光纤布拉格光栅横向应变特性的研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(12): 1508~1512
- 4 Zhang Weigang, Kai Guiyun, Dong Xiaoyi *et al.*. Theoretical and experimental study of fiber grating multi-point sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 330~336 (in Chinese)
张伟刚,开桂云,董孝义等. 光纤光栅多点传感的理论实验研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(3): 330~336
- 5 Tu Qinchang, Zhang Weigang, Chen Jianjun *et al.*. A novel high-sensitivity chirp tuning device of fiber grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(9): 1153~1156 (in Chinese)
涂勤昌,张伟刚,陈建军等. 一种新颖的高灵敏度光纤光栅带宽调谐机构[J]. *光学学报*, 2005, **25**(9): 1153~1156
- 6 Liang Lanzhen, Chen Zhijun, Wang Yibo. Signal detector of propeller flow velocity meter [J]. *Process Automation Instrumentation*, 2003, **24**(5): 41~43 (in Chinese)
梁岚珍,陈志军,王一波. 旋桨式流速仪信号检测器[J]. *自动化*

- 仪表, 2003, 24(5): 41~43
- 7 Wang Yanxia, Fu Xing, Li Zhengguang *et al.*. The precision on-line ultrasonic measurement of flow [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2003, 24(3): 202~205 (in Chinese)
王艳霞, 傅星, 李正光等. 高精度的超声波在线流量测量[J]. 计量学报, 2003, 24(3): 202~205
- 8 Li Xiaojing, Wang Ping, Lu Jingshan. Improvement of performance of electromagnetic flowmeter at low flow velocity by cross-correlation method [J]. *Control and Instruments in Chemical Industry*, 2004, 31(6): 68~70 (in Chinese)
李小京, 王萍, 卢景山. 用相关算法改善电磁流量计低流速性能[J]. 化工自动化及仪表, 2004, 31(6): 68~70
- 9 Xue Yuanzhong, Gu Jinghua, Wei Taoyuan. The working principle of the ADP and its applications in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. *Marine Sciences*, 2004, 28(10): 24~28 (in Chinese)
薛元忠, 顾靖华, 韦桃源. 声学多普勒流速剖面仪原理及其在长江中下游的应用[J]. 海洋科学, 2004, 28(10): 24~28
- 10 Yao Jun, Fu Jingqi, Zhang Chengyan *et al.*. Development of the optic fiber flowmeter [J]. *J. Transducer Technology*, 2002, 21(3): 1~5 (in Chinese)
姚骏, 付敬奇, 张承燕等. 光纤流量传感器的进展[J]. 传感器技术, 2002, 21(3): 1~5
- 11 Zhang Xingzhou, Li Xuyou. Optical fiber flow sensor [J]. *J. Transducer Technology*, 1999, 18(1): 57~59 (in Chinese)
张兴周, 李绪友. 光纤流量传感器[J]. 传感器技术, 1999, 18(1): 57~59
- 12 Chen Jianjun, Zhang Weigang, Tu Qinchang *et al.*. A new setup to tune the center wavelength of FBGs [J]. *Optoelectronics Lett.*, 2005, 1(2): 107~109

"名家讲坛" 征稿启事

为了让读者进一步全面了解光电子各领域的发展历程及研究进展,《激光与光电子学进展》杂志将从 2006 年下半年开始推出专题栏目“名家讲坛”,邀请国内外著名学者、教授、高级研发人员讲述激光与光电子技术发展过程中的关键技术、重要突破以及目前的研究热点。内容涉及理论探讨、技术突破、材料研发和市场开拓等相关领域。同时面向广大读者征稿,要求如下:

- 1、作者在激光与光电子应用领域具有一定造诣,并在某一方面有较深入的研究或对该领域的发展态势有较全面和前瞻的把握。
- 2、文章涉及内容应在激光与光电子领域占有重要地位,具有客观的总结性或者高度的前瞻性。
- 3、文章最好配有一定数量的图表(最好为彩色),字数不少于 6000,最好不超过 20 000。
- 4、投稿同时,请作者提供作者简介,包括研究领域、研究成果等。
- 5、论文一经录用,本刊将优先发表,并酌付稿酬。
- 6、投稿地址:上海市 800-211 邮政信箱《激光与光电子学进展》编辑部



欢迎大家踊跃投稿,让我们共同期待“名家讲坛”的精彩呈现!

邮政编码: 201800

电子邮件: gwjg@mail.shcnc.ac.cn

联系电话: 021-69918166

《激光与光电子学进展》编辑部

主编 刘其元