

基于光纤法布里-珀罗传感的高速气流测量系统

王超^{1,2,3}, 张学智^{1,2,3}, 江俊峰^{1,2,3}, 刘琨^{1,2,3}, 王双^{1,2,3}, 刘铁根^{1,2,3*}

¹天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072;

²天津大学光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072;

³天津大学光纤传感研究所, 天津 300072

摘要 针对水利枢纽高速气流的流速测量需求,提出了一种基于光纤法布里-珀罗(F-P)传感技术的湍流流速测量系统。该系统由风速测量探头和偏振低相干干涉解调单元组成,利用两支 F-P 传感器检测流场的压力和温度变化,以实现流速的计算。通过追踪单个条纹的峰位置和七步相移法,对低成本线阵 CCD 采集到的干涉信号进行高精度解调。在温度为 20~40 °C 和压力为 98~110 kPa 的环境下对两支传感器进行标定,用于滞止压力测量的传感器的压力绝对误差小于 0.018 kPa,用于流场温度测量的传感器的温度绝对误差小于 0.08 °C。利用该系统进行了速度为 9.3~93 m/s 的气流检测,流速绝对误差小于 0.49 m/s。实验结果表明,该系统可以实现高速湍流的流速测量,成本低,有广泛的应用前景。

关键词 光纤光学; 光纤传感器; 法布里-珀罗; 低相干干涉; 相移干涉法; 流体测量

中图分类号 TN29

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1206005

High-Speed Airflow Measurement System Based on Optical Fiber Fabry-Perot Sensing

Wang Chao^{1,2,3}, Zhang Xuezhong^{1,2,3}, Jiang Junfeng^{1,2,3},

Liu Kun^{1,2,3}, Wang Shuang^{1,2,3}, Liu Tiegeng^{1,2,3*}

¹School of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

²Key Laboratory of Opto-electronics Information Technology, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

³Institute of Optical Fiber Sensing, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract In this study, we propose a turbulent flow-velocity measurement system based on the optical fiber Fabry-Perot (F-P) sensing technology, which can be used to monitor the high-speed airflow velocity at hydrojunctions. The proposed system comprises an airflow sensor holder and a polarized low-coherence interferometry demodulation section. The flow-velocity is calculated using two F-P sensors, which can be used to measure the pressure and temperature variation of the airflow field. Further, the interference signal obtained using a low-cost linear CCD can be accurately demodulated by tracing the peak position of a single fringe pattern and using the seven-step phase shifting method. The two F-P sensors are calibrated in the temperature range of 20-40 °C and the pressure range of 98-110 kPa. The pressure absolute error of the sensor used to measure the stagnation pressure is less than 0.018 kPa, while that with respect to the temperature of the sensor used to measure the airflow field temperature is less than 0.08 °C. The proposed system is used to measure the airflow velocities ranging from 9.3 to 93 m/s, and the absolute error of the flow-velocity is less than 0.49 m/s. The experimental results indicate that the proposed system can be employed to measure the flow-velocity of high-speed turbulence with a low cost and possesses a wide application prospect.

Key words fiber optics; optical fiber sensor; Fabry-Perot; low-coherence interferometry; phase shifting interferometry; fluid flow measurement

OCIS codes 060.2370; 120.2230; 120.3180

收稿日期: 2019-12-30; 修回日期: 2020-02-21; 录用日期: 2020-03-23

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0401902)、国家自然科学基金(U1833104, 61735011, 61675152, 61405139)

* E-mail: tgliu@tju.edu.cn

1 引 言

流量是工业生产和现代生活的重要参数,广泛存在于科学研究、工农业生产、国防建设等领域。近年来,随着各领域对流量测量需求的日益增多,该类仪器受到广泛关注,出现了多种新型的流量测量仪器,从原理上可分为差压式流量计^[1]、容积式流量计^[2]、热线式流量计^[3]、超声式流量计^[4]、涡街式流量计^[5]等。

随着光纤传感技术的飞速发展,近些年出现了大量以光纤传感器为基础的流量计,如光纤涡轮流量计^[6]、光纤激光多普勒流量计^[7]、光纤布拉格光栅(FBG)流量计^[8]等。与电学传感器相比,光纤传感器本身不带电,具有抗电磁干扰、耐腐蚀、防水、灵敏度高、体积小、可嵌入等特点,容易组成光纤传感网络,可实现单纤多点和多参数传感,能够完成传统传感器很难甚至不可能完成的任务。Zamarreno等^[9]利用16个FBG传感器组成 8×8 传感网格,实现了对管道内单相湍流的流速以及水/空气两相流体中气泡形状的实时检测,该方法利用流体作用在传感器上的应力,使其布拉格波长发生移动,并通过波长解调实现流场测量。Li等^[10]将FBG传感器与“热线”式原理相结合,利用流体流经传感器使其温度变化的特点,实现 $0 \sim 4.5$ m/s的流速解调。诸多流量测量研究着眼于管道等密闭条件下的小流量测量,而针对开放环境中高速气流的流速检测研究鲜有报道。

为了提高水利枢纽运行的安全性,利用补气进行掺气减蚀是削弱高速水流对水工建筑物破坏性冲击的有效方法之一^[11],而补气洞风速是评估掺气效果的重要参数。在大型水利枢纽中,补气洞中气流的平均流速最高可达 89 m/s^[12],但补气洞中环境潮湿,所以采用电学传感器进行监测有很大难度。针对高速气流的监测需求,本文提出了一种由基于双法布里-珀罗(F-P)传感器的风速测量探头和偏振低相干干涉解调单元^[13]组成的低成本风速测量系统。首先利用气体湍流流场仿真优化风速测量探头的形状和结构;然后采用低相干干涉单条纹峰位置与相移法结合的方法,通过标定得到传感器的压力和温度传感特性;最后通过实验,该系统解调了高风速流场中压力与温度的变化,实现了最高 93 m/s风速的检测,误差小于 0.49 m/s。

2 原理和仿真

2.1 系统构成

基于双F-P传感器的风速测量探头和偏振低相干干涉解调单元^[13]构成了风速测量系统,结构如图1所示。该系统由风速测量探头、光路、采集卡及计算机组成。风速测量探头的迎流向前表面和平行流向的顶面各有一支F-P传感器,传感器的感应硅膜片与风速测量探头的表面持平。F-P传感器的硅膜片在外界气压发生变化时会发生形变从而改变F-P腔长,并且由于采用闭腔结构,因此通过压力标定可以实现绝对压力的测量;封闭腔内有微量气体,

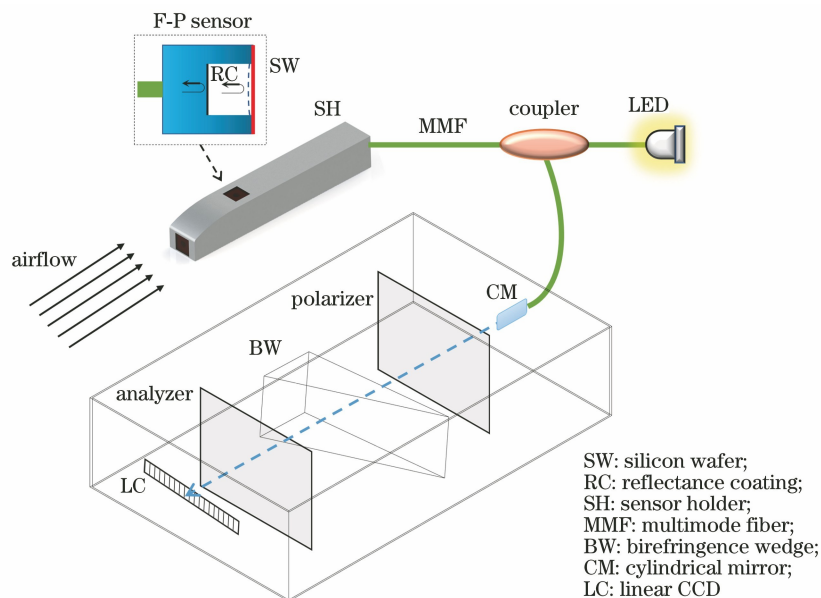


图1 气流流速测量系统示意图

Fig. 1 Schematic of airflow velocity measurement system

温度变化会导致 F-P 腔长的变化,所以在外界压力稳定的条件下可通过信号解调实现温度测量或补偿。该传感器的双参量敏感特性使其可以利用流场中压力和温度与腔长的关系实现气流流速解调。系统所采用的光源是中心波长为 605 nm 的发光二极管(LED),光源发出的低相干光经多模光纤传输,经 3 dB 耦合器进入 F-P 传感器,并在硅膜片内表面和底面镀膜之间形成干涉^[14];从传感器反射回的干涉信号经耦合器进入密闭遮光的偏振解调单元;在解调单元中,传感信号光依次经过柱面镜、起偏器、双折射光楔及检偏器,当偏振光通过双折射光楔产生的寻常光和非寻常光之间的光程差等于 F-P 腔长的 2 倍时,就会在线阵 CCD 的对应位置采集到低相干干涉条纹;CCD 采集到的光谱信号被采集卡采集,最后由计算机进行存储和处理。

2.2 风速测量探头的外形设计与仿真优化

当气流流经风速测量探头时,由于被阻挡而在风速测量探头前表面的流速滞止为 0,因此气流的动能转化为对前表面传感器的压力势能 P_s ,在平行于气流方向的风速测量探头顶面放置传感器,测得参考压力 P_r , ρ 是待测流体的密度。根据伯努利原

理,对于理想流体,风速 v 可表示为

$$v = \sqrt{\frac{2(P_s - P_r)}{\rho}} \quad (1)$$

实际的气流是具有黏度的湍流,根据边界层理论,由于气流与探头表面的摩擦作用,距离前表面一定距离并紧贴风速测量探头表面处存在流速为 0 的边界层。边界层内流体动能完全转化为热力学能,从而使得探头表面温度升高,而硅膜片持平于探头表面的滞止传感器和参考传感器会受到流场中探头温度变化的影响。合理选取参考传感器在探头顶面的位置,使其位于边界层中,令其在流场中流速作用前后感应到的压力不变,从而通过解调其信号变化得到流场内的温度。位于前表面的滞止传感器在流场中同时受到滞止压力和温度变化的影响,将参考传感器测得的流场温度代入滞止传感器进行计算,可以求得滞止压力,从而利用(1)式实现气流流速的计算。

在之前的工作中^[15],对于边长为 D 的风速测量探头,将探头前部形状设计为半长轴为 $2D$,半短轴为 D 的椭圆弧线,为了避开前部的漩涡负压区域,参考传感器放置于距离前表面 $3.5D$ 的位置,如图 2(c)所示,当 D 为 10 mm 时,该距离为 35 mm。通

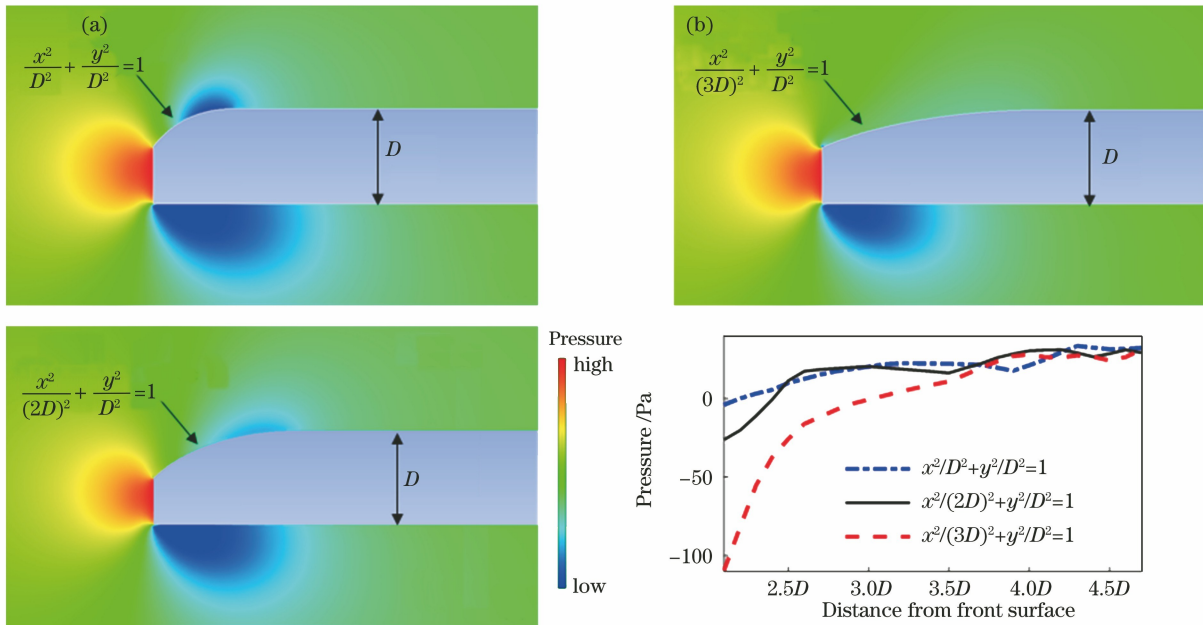


图 2 不同前部曲线形状下,风速测量探头周围的流场压力分布。(a)半径为 D 的圆弧线;(b)半长轴和半短轴分别为 $3D$ 和 D 的椭圆弧线;(c)半长轴和半短轴分别为 $2D$ 和 D 的椭圆弧线;(d)三种不同形状的风速测量探头距离其前表面不同距离处的压力曲线

Fig. 2 Pressure distributions of flow field around airflow sensor holder under different forebody shapes. (a) Circle with radius of D ; (b) ellipses with semi-major and semi-minor axes of $3D$ and D , respectively; (c) ellipses with semi-major and semi-minor axes of $2D$ and D , respectively; (d) pressure curves of airflow sensor holders with three different forebody shapes at different distances from their front surfaces

过仿真发现,对风速测量探头的形状进行优化可以缩短两支传感器间的距离,从而提高温度补偿的精度,进而提高风速测量的精度。可采用两种方法来减小传感器间距离:优化探头形状和减小探头的边长。

优化探头形状指优化前部曲线形状,在保证前表面传感器正确测量滞止压力的条件下,参考传感器需要避开漩涡区域,即在保证参考压力值不变的前提下实现感应流场温度变化的测量。基于计算流体力学的有限体积法可以实现湍流条件下流场的仿真,利用 k - ω 湍流模型可分析曲线函数对探头周围流场压力分布的影响。从图 2 可以看出,随着曲线的半长轴从 D 增加到 $3D$,曲线形状从圆变成椭圆,前部漩涡的影响范围和程度逐渐减小,而图 2(b)中的椭圆曲线减弱效果最佳,流场压力过渡最平滑。对于半径为 D 的圆弧曲线,距离前表面 $3.9D$ 避开漩涡区域的最佳位置如图 2(d)所示。对于图 2(b)中的风速测量探头,该椭圆曲线最平滑,抑制了漩涡的产生,对流场影响最小,并且在气流作用于探头后,距离前表面 $3D$ 位置的壓力没有发生变化,因此可将参考传感器放置在距离前表面 $3D$ 位置以实现在压力不变条件下流场温度的测量。因此将顶面弧线设计为半长轴 $3D$ 、半短轴 D 的椭圆弧线,该方案相比较其他方案可以实现更好的参考传感

器温度测量效果。除了改变探头形状,通过紧凑型设计和精细的金属航空铝材质的数控精密加工,在 F-P 传感器感应硅膜片边长为 5 mm 的前提下,风速测量探头的边长 D 可以减小为 7 mm 。总之,通过结合改进顶面曲线和减小边长两种方法,参考传感器距离前表面滞止传感器的距离可缩短为 21 mm 。

2.3 基于单条纹峰位置结合相移法的低相干干涉解调方法

利用线阵 CCD 采集低相干干涉条纹,其位置与 F-P 腔的腔长存在对应关系,所以可用于解调。但由于受到光学器件加工误差、光的非垂直入射及双折射光楔色散等因素的影响,采集到的原始低相干干涉条纹往往会发生畸变,所以直接采用整体干涉条纹的包络或质心等的位置信息进行解调会导有较大的误差,而追踪单个条纹的峰位置可以解决这一问题^[16]。因此采用基于单条纹的峰位置与相移法结合的方法,以得到干涉条纹的准确位置,实现高精度解调。

通过条纹峰值对应的 CCD 像素直接解调,解调精度会受像素尺寸的限制,而在使用低成本 CCD 的条件下利用相移法可以得到更加准确的峰位置,从而得到亚像素级的精度。利用七步相移法公式^[17]可以求出组成干涉条纹的采样点的相位,表达式为

$$\varphi(x) = \arctan \frac{3I\left(x - \frac{\lambda}{4}\right) - 3I\left(x + \frac{\lambda}{4}\right) + I\left(x + \frac{3\lambda}{4}\right) - I\left(x - \frac{3\lambda}{4}\right)}{4I(x) - 2I\left(x - \frac{\lambda}{2}\right) - 2I\left(x + \frac{\lambda}{2}\right)}, \quad (2)$$

式中: x 是条纹中某点的位置; λ 是干涉条纹波长,相位间隔是 $\lambda/4$; I 是对应点的强度。计算条纹中所有点的相位后,利用最小二乘法得到拟合曲线,曲线与横轴交点即是单条纹峰的准确位置^[18]。通过多项式拟合可得到单条纹准确峰位置和 F-P 腔长的拟合函数。在采集实际信号时,先对原始信号进行傅里叶滤波,然后通过设定的阈值得到单条纹的峰位置,随后利用相移法计算出准确峰位置,最后利用峰位置与压力的拟合函数实现解调。

3 实验与分析

3.1 传感器标定

用于感应流场变化的基于 F-P 传感器的风速测量探头的单晶硅膜片厚度为 $30\text{ }\mu\text{m}$, F-P 腔半径为 1.2 mm ,杨氏模量为 130 GPa ,泊松比为 0.2782 ,

该探头的 F-P 腔长/流速变化灵敏度系数为 $5.026\text{ nm}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ 。基于偏振低相干干涉原理的解调仪产生光程差的核心器件是双折射光楔,解调仪的 F-P 腔长分辨能力为 0.867 nm ,解调腔长范围是 $19.5 \sim 32.5\text{ }\mu\text{m}$ 。系统的风速测量精度为 0.17 m/s ,受限于实验室的风速产生装置,风速测量范围是 $0 \sim 93\text{ m/s}$ 。

在不同温度下对两支 F-P 传感器进行了压力标定。将滞止传感器和参考传感器放入压力容器中,再将压力容器置于恒温箱。标定过程中,温度设定为 $20 \sim 40\text{ }^\circ\text{C}$,温度间隔为 $2.5\text{ }^\circ\text{C}$,共 9 个温度点,每个温度下稳定 60 min 后对连续等间隔压力下的信号进行采集;压力设定为 $98 \sim 110\text{ kPa}$,间隔为 0.4 kPa ,共 31 个压力点,每个压力下稳定 1 min 。

利用多项式曲面拟合方法,两支传感器在不同

温度和压力下的拟合曲面和绝对误差如图 3 所示。滞止传感器在 98~110 kPa 内的压力绝对误差小于 0.018 kPa,如图 3(c)所示;参考传感器在 20~40 °C 内的温度绝对误差小于 0.08 °C,如图 3(d)所示。与前期工作采用的基于绝对相位的解调方法相比^[15](压力为 100~107 kPa,误差小于 0.037 kPa),所提解调方法的精度有明显提高。这是因为基于绝对相位

的解调方法需要预先选择用于相位展开的基准空间频率,而在某一温度下选择的基准频率并不适用于其他全部温度,所以在温度发生变化的外界条件下误差增大;而所提基于干涉条纹峰位置的解调方法只作用于空间域而不涉及空间频率域,无需改变参数,所以在不同温度下误差保持稳定,这使得所提方法适用于温度和压力均变化的气流流场测量。

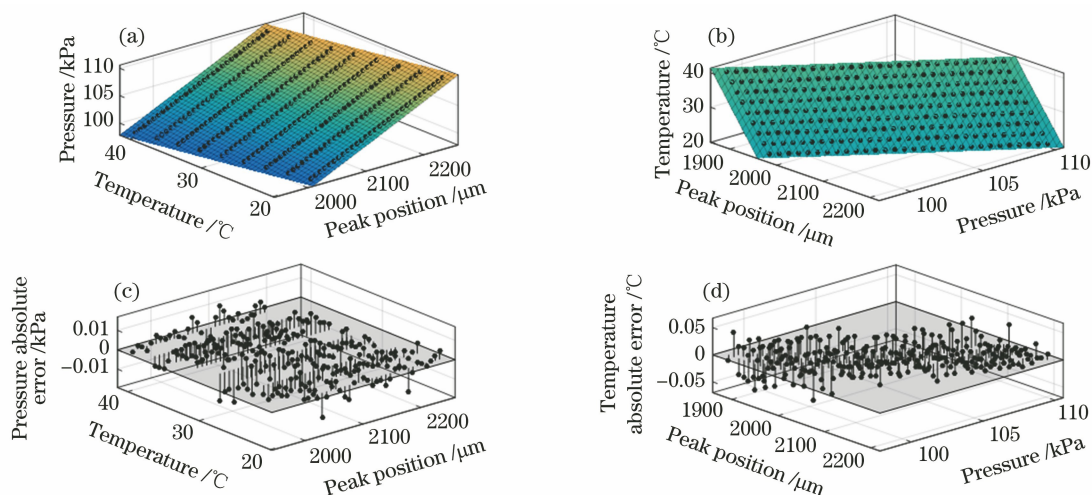


图 3 两支 F-P 传感器的拟合曲面图与误差图。(a)滞止传感器的拟合曲面;(b)参考传感器的拟合曲面;(c)滞止传感器的压力绝对误差;(d)参考传感器的温度绝对误差

Fig. 3 Fitting surfaces and errors of two F-P sensors. (a) Fitting surface of stagnation sensor; (b) fitting surface of reference sensor; (c) pressure absolute error of stagnation sensor; (d) temperature absolute error of reference sensor

3.2 风速测量实验

利用气流发生装置和风速测量系统进行风速测量实验。气流产生器为漩涡气泵,通过变频器实现流速的连续调节。将实验产生的风速与皮托管风速计进行比对。皮托管风速计的最大量程是 81 m/s,所以高于 81 m/s 的风速可通过流量计算获得,实验中风速为 9.3~93 m/s。

将两支传感器的初始信号联立求解了实验的初始环境参数:环境气压为 102.807 kPa,温度为 24.1 °C。开启风机后,通过变频器调节漩涡气泵工作频率产生特定风速的气流,置于流场中的风

速测量探头受气流影响,两支传感器的信号发生变化,如图 4 所示。以速度为 93 m/s 和 54.5 m/s 的气流实验为例,当气流作用于探头时,前表面测量滞止压力的传感器的信号发生了阶跃,表示气流开始作用于传感器并且其受到的压力增大;参考传感器的信号没有发生阶跃现象而是缓慢发生改变,说明其感应到的压力没有产生变化,其信号的变化是由温度升高导致的。两支传感器的条纹位置信号随温度的升高而逐渐减小直至稳定表征了气流作用于传感器使其温度逐渐升高直至稳定的过程。

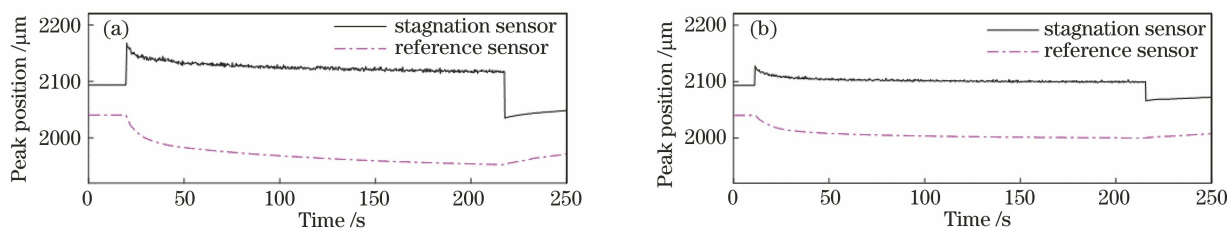


图 4 在不同气流流速下,两支传感器的峰位置变化。(a) 93 m/s;(b) 54.5 m/s

Fig. 4 Peak positions of two sensors at different airflow velocities. (a) 93 m/s; (b) 54.5 m/s

压力增大和温度升高同时作用引起了前表面滞止传感器的信号变化;顶面的参考传感器压力不变,其信号改变是由流场中的温度升高引起的,所以根据其拟合曲面可计算流场温度;在两支传感器信号稳定后,利用参考传感器测得流场温度,将其代入滞止传感器的拟合曲面公式,可以计算滞止传感器的滞止压力。滞止传感器与参考传感器的压差(DP)与风速的关系如图5所示,图5(a)是风速-压差关系曲线,其中黑点是实验中得到的数据点。仿真结果中风速 v 与压差 D_P 满足二次曲线函数 $D_P = 0.51v^2 + 0.14v - 0.80$,拟合度 $R^2 = 1.0000$,这与伯

努利原理相符合。从图5(a)可以看出,实验得到的数据点与仿真数据基本匹配,但也存在差异。造成这种差异的主要原因是实际的实验会受到环境气压与温度、气流流向等因素的影响,从而与仿真的条件不完全相同,并且在较高风速的情况下气体的压缩性不可忽略,因此随着流速的增加,其压强的变化率逐渐减小。在后期计算中,为了获得更高的精度,采用四次多项式拟合来计算风速,如图5(a)中实线所示。图5(b)是风速测量的绝对误差,在9.3~93 m/s风速内,最大误差绝对值小于0.49 m/s。

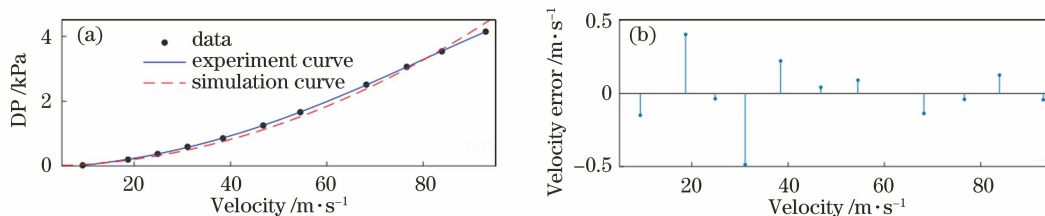


图5 风速的测量结果。(a)风速与压差的关系;(b)风速误差

Fig. 5 Measurement results of airflow velocity. (a) Relationship between airflow velocity and pressure difference; (b) error of airflow velocity

以风速为54.5 m/s的实验为例,解调气流流速的步骤如图6所示。先利用条纹峰位置追踪算法分别求出滞止传感器和参考传感器的条纹峰位置,分别为2093.128 μm 和2040.109 μm ,此时两支传感器的环境压力与温度相同,因此将二者的拟合曲面关系(图3)联立可求出环境温度为24.1 $^{\circ}\text{C}$,气压为102.772 kPa。在气流作用于风速测量探头使两支传感器的信号发生变化并稳定后,滞止传感器的条纹峰位置变为2099.242 μm ,参考传感器的条纹峰

位置变为1999.875 μm ,由于参考传感器感应到的压力不变,因此可求得此时流场温度为32.8 $^{\circ}\text{C}$ 。将这一结果代入滞止传感器的拟合曲面,可求得滞止传感器的压力为104.434 kPa,因此压差是1.662 kPa,再利用图5(a)中压差与气流流速的拟合曲线,求得此时的风速为54.47 m/s。利用该系统,对速度为54.5 m/s的气流进行了三次风速测量,结果分别为54.39,54.60,54.49 m/s,表明系统的稳定性较好。

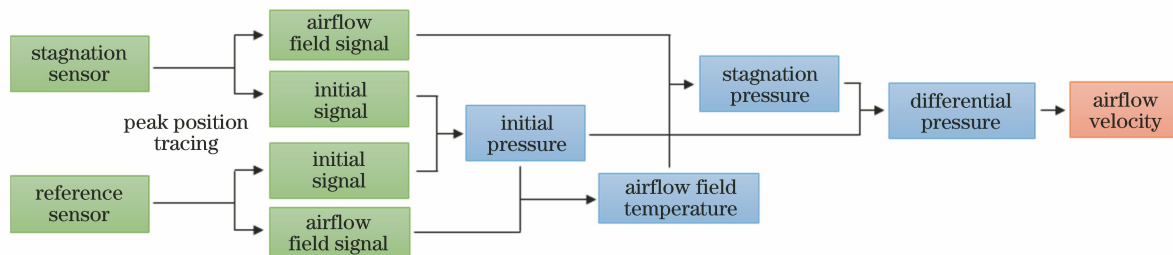


图6 风速解调流程图

Fig. 6 Flowchart of airflow velocity demodulation

4 结 论

提出了一种用于高速气流流速测量的光纤 F-P 传感系统,该系统可实现 9.3~93 m/s 的风速测量,最大误差小于 0.49 m/s。该系统利用安装了两支对压力和温度敏感的 F-P 传感器的风速测量探头

对信号进行采集,并利用基于单条纹峰位置并结合相移算法的低成本空间偏振低相干干涉装置实现了信号解调。实验中的气流发生装置最高产生了 93 m/s 的风速,该风速可以满足水利枢纽补气洞的风速测量要求,从理论上该系统可以测量更高速的气流,但风速更高时需要考虑空气压缩性。下一步

工作是减小硅膜片的尺寸,以进一步减小风速测量探头尺寸,并在高湿度环境下进行气流流速测量。

参 考 文 献

- [1] Leoni A, Stornelli V, Pantoli L. A low-cost portable spherical directional anemometer for fixed points measurement [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 280: 543-551.
- [2] Morton C E, Hutchings I M, Baker R C. Theoretical analysis of the oscillating circular piston positive displacement flowmeter: II numerical solution of equations of motion and comparison with experimental data [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2018, 63: 47-61.
- [3] Wang W R. Research of high precision heat wind transmitter based on hot-wire sensor[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2016(12): 169-172, 188.
王文蓉. 基于热线式传感器的高精度热流风量变送器的研究[J]. *仪表技术与传感器*, 2016(12): 169-172, 188.
- [4] Zhang T, Zhao W G, Zhang S Y. The self-adaptive threshold method of echo signal for gas ultrasonic flowmeter [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2018, 31(12): 1853-1857.
章涛, 赵伟国, 章圣意. 气体超声流量计回波信号的自适应阈值法研究 [J]. *传感技术学报*, 2018, 31(12): 1853-1857.
- [5] Li A, Xu K J, Xiong W. Anti-pipeline vibration method combining frequency variance and amplitude for vortex flowmeter [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2019, 33(9): 161-169.
黎翱, 徐科军, 熊伟. 频率方差与幅值相结合的涡街流量计抗振方法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2019, 33(9): 161-169.
- [6] Gu Y F, Zhao Y, Lü R Q, et al. Theory and structure of a modified optical fiber turbine flowmeter [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2016, 50: 178-184.
- [7] Huang X F, Zhao G J, Li S J, et al. Study on multi-point velocity measurements of laser Doppler velocimetry based on dual-core photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(11): 1112003.
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): 1112003.
- [8] Lü 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.
- [9] Zamarreno C R, Martelli C, Baroncini V H V, et al. Single and multiphase flow characterization by means of an optical fiber Bragg grating grid [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(9): 1857-1862.
- [10] Li Z, Wang J Q, Liu T Y, et al. High-sensitivity "hot-wire"-based gas velocity sensor for safe monitoring in mining applications [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(24): 10192-10198.
- [11] Zounemat-Kermani M, Scholz M. Computing air demand using the Takagi-Sugeno model for dam outlets [J]. *Water*, 2013, 5(3): 1441-1456.
- [12] Yang H, Wang J M, Liu Z. Problems from energy dissipation for erosion-control and aeration for cavitation alleviation of spillway tunnel of Jinping I Hydropower Station [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2018, 49(7): 115-121.
杨弘, 王继敏, 刘卓. 锦屏一级水电站泄洪洞的掺气减蚀及消能防冲问题 [J]. *水利水电技术*, 2018, 49(7): 115-121.
- [13] Dändliker R, Zimmermann E, Frosio G. Electronically scanned white-light interferometry: a novel noise-resistant signal processing [J]. *Optics Letters*, 1992, 17(9): 679-681.
- [14] Wang X, Wang S, Jiang J F, et al. Non-destructive residual pressure self-measurement method for the sensing chip of optical Fabry-Perot pressure sensor [J]. *Optics Express*, 2017, 25(25): 31937-31947.
- [15] Wang C, Zhang X Z, Jiang J F, et al. Fiber optical temperature compensated anemometer based on dual Fabry-Perot sensors with sealed cavity [J]. *Optics Express*, 2019, 27(13): 18157-18168.
- [16] Wang S H, Jiang J F, Liu T G, et al. A simple and effective demodulation method for polarized low-coherence interferometry [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(16): 1390-1392.
- [17] Sandoz P, Devillers R, Plata A. Unambiguous profilometry by fringe-order identification in white-light phase-shifting interferometry [J]. *Journal of Modern Optics*, 1997, 44(3): 519-534.
- [18] Wang S, Liu T G, Jiang J F, et al. Zero-fringe demodulation method based on location-dependent birefringence dispersion in polarized low-coherence interferometry [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(7): 1827-1830.