

用于空气流场绕流阻力研究的光纤传感系统

刘悦莹¹,荆振国^{2*},李昂¹,刘强²,彭伟²

1大连理工大学光电工程与仪器科学学院,辽宁大连116024;

²大连理工大学物理学院, 辽宁 大连 116024

摘要 针对复杂电磁环境下风洞实验中绕流阻力测量和飞行器空速监测的需求,利用自主研制的基于白光干涉测量技术的压差式光纤气流传感系统开展了相关实验研究。该系统由压差式光纤气流传感探头和小型化白光干涉测量传感解调仪组成,可以实现同步高速、高精度的压差测量。传感探头可实现单通道的压差传感,通过获取待测对象表面受压与流场中静压之间的压差来进行阻力探测,或与皮托管耦合进行流速测量。传感解调仪主要由波长扫描激光器、现场可编程门阵列控制与采集模块、光电探测器组成。该系统对风洞实验中以圆柱绕流阻力为代表的经典绕流模型进行了测量与分析,所得结果和标准多通道电子压力测量仪的结果相近。该光纤传感系统仅利用光纤来感知和传输信号,可有效对抗电磁干扰,为强电磁干扰环境下利用光学方法对空气流场绕流阻力进行精确分析提供一种新的选择,在未来空气动力学研究和飞行器监测领域具有潜在的应用价值。 关键词 光纤光学;光纤传感;绕流阻力;法布里-珀罗;白光干涉;波长扫描激光器

中图分类号 O439 文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1306022

Fiber-Optic Sensing System for Investigating Flow Drag in Airflow Field

Liu Yueying¹, Jing Zhenguo^{2*}, Li Ang¹, Liu Qiang², Peng Wei²

¹ School of Optoelectronic Engineering and Instrumentation Science, Dalian University of Technology,

Dalian, Liaoning 116024, China;

² School of Physics, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China

Abstract To satisfy the requirements of flow drag measurement in a wind tunnel experiment and airspeed monitoring of aircrafts in a complex electromagnetic environment, a differential-pressure fiber-optic airflow sensing system based on white-light interferometric technology was developed to perform relevant experimental investigations. The proposed system comprises a differential-pressure fiber-optic airflow sensing probe and a miniaturized white-light interferometric interrogator, which realizes synchronous high-speed, high-precision differential-pressure measurement. The sensing probe realizes single-channel differential-pressure sensing and can detect flow drag by obtaining the difference between the surface pressure of the target measurement object and the static pressure in the flow field. In addition, the sensing probe can be coupled with a pitot tube to measure flow velocity. The white-light interferometric interrogator comprises a wavelength scanning laser, a field-programmable gate array module for control and acquisition, and a photoelectric detector. The proposed system was used to measure and analyze the classical model of flow around a circular cylinder in wind tunnel testing. The results are similar to those obtained using a standard multichannel electronic pressure transducer. The proposed fiber-optic sensing system uses only optical fiber as the medium to sense and transmit signals, which can effectively resist electromagnetic interference. Thus, the proposed system enables using the optical method to accurately analyze the flow drag in an airflow field in a strong electromagnetic interference environment and has a practical potential

收稿日期: 2020-09-27;修回日期: 2020-11-19;录用日期: 2020-12-02 基金项目:国家自然科学基金(61727816,61520106013)、中央高校基本科研业务费(DUT18ZD215)

通信作者:*jingzg@dlut.edu.cn

application in future aerodynamics research and in-flight monitoring.

Key words fiber optics; fiber-optic sensing; flow drag; Fabry-Perot; white light interferometry; wavelength scanning laser

OCIS codes 060.2370; 280.2490; 120.2230; 140.3600

1 引 言

自路德维希•普朗特提出流体边界层的存在并 在古代水力学基础上创立了现代流体力学起,有关 绕流阻力的研究一直是风洞中空气流场实验研究的 重要课题,这对于飞行器飞行过程中机翼所受阻力 的降低、气动布局的保持和热防护的设计具有重要 意义[1-2]。随着空气流场实验研究的不断深入与发 展,越来越多的电子测控装置被应用于风洞中,如大 功率变频器、电磁阀门等,内部的电磁环境日趋复 杂[3-4]。风洞内绕流阳力的检测多采用多诵道电子 压力测量仪来确定待测对象表面压差,但其产生的 电子测量信号常在毫伏级别,难以克服恶劣电磁环 境下的干扰,降低了测量数据的可靠性和精确 性[2-4]。除此之外,飞行器和航空航天动力系统也十 分依赖电子监测系统。多年来,即使存在成熟有效 的电磁屏蔽技术,电磁干扰引起的航空事故仍然层 出不穷[5-6]。飞行过程中,电磁干扰的产生形式可能 是雷击、静电放电、核电磁脉冲、雷达和广播发射机 等[7-9]。极强的电磁干扰,尤其是雷电和雷达高强度 辐射场,会导致电子或机电传感器核心元件和电缆 的故障[8],造成飞机内部重要传感器的失灵,如全球 定位系统(GPS)、空中交通管制(ATC)应答器、温 度或压力监测仪的指示错误,严重威胁飞行安全^[7]。 因此,无论是在风洞实验研究或航空航天领域,除降 低应用环境内的电磁辐射干扰外,提高传感系统的 电磁兼容性也是保障实验质量和飞行安全的关键 之一。

光纤传感作为自20世纪70年代兴起的新型技术,因具有采集速度快、测量精度高、灵敏度高、抗电磁干扰等多种优势,在传感领域备受关注^[10-12]。特别是在飞行器检测要求不断提高和航天应用环境日益严酷复杂的今天,传统的电子和机电传感器渐渐无法满足实际的测量需求^[13]。作为一种集传输和传感于一体,以光波为载体,光纤为媒介的方案,光纤传感系统或许能够弥补电磁屏蔽技术的不足,成为未来航空航天监测领域的更好选择。多年来,光纤传感器及系统在空气流场测量方面的研究大多为对风速的检测。以光纤光栅热线式传感器为代表的风速计一直是研究热点^[14-16],然而,不均匀热效应导

致的啁啾现象和间接的风速测量机制限制了其应用 范围^[17]。近年来出现了一系列基于光纤法布里-珀 罗(FP)干涉仪的压差式传感器。Cipullo等^[18]利用 皮秒激光器制作了一种悬臂梁式光纤压差传感器, 实现了 0~8 m • s⁻¹ 范围内的风速测量。王超 等^[19-20]设计了一种由双 FP 型风速传感器和偏振低 相干干涉解调单元组成的传感系统,实现了双通道 压差测量。虽然上述光纤压差式传感器可更为直接 精准地获取风速信息,但依然存在传感探头制作工 艺及解调系统复杂,或无法单通道探测压差等缺点。 而能够同时应用于流速和绕流阻力探测等风洞实验 模型的小型化高速光纤传感系统却鲜有报道。

本文针对风洞中绕流阻力的分析和飞行器飞行 监测过程中抗电磁干扰、高速采集、高精度测量的应 用需求,利用自主研制的基于白光干涉测量技术的 压差式光纤气流传感系统[21]开展了相关实验研究, 同时这也是对前期开展的工作的进一步深入探索。 该系统主要包括自主研制的小型化高速白光干涉测 量传感解调仪和一支压差式 FP 型光纤气流传感探 头。传感探头可直接测量气流场中全压与静压之 差,实现单通道的压差传感。结构简单的小型化高 速解调仪由调制光栅 Y 分支(MG-Y)激光器、现场 可编程门阵列(FPGA)控制与采集模块、光电探测 器组成。利用该光纤传感系统,进一步开展了除风 速测量外以圆柱绕流模型为代表的绕流阻力的实际 测量与分析,验证了该光纤传感系统在风洞内部空 气流场监测方面的应用可行性,为强电磁干扰环境 下利用光学方法对空气流场绕流阻力进行精确分析 提供一种新的可能。

2 传感系统构成与原理

自主研制的压差式光纤气流传感系统主要由 1 支可直接感知压差变化的光纤传感探头和高速白光 干涉测量传感解调仪组成,如图 1 所示。该系统中 的压差式光纤气流传感探头由普通单模光纤 (SMF)、3 支可互相嵌套的熔融石英玻璃管(内径为 3.4/1.81/0.126 mm,外径为 4.3/2.7/1.8 mm,长 度为 5/7/7 mm,爱迪高科技有限公司)、熔融石英 圆膜片(直径为 5 mm,厚度为 30 µm)、腔内内置的 塑料导压管(内径为 0.3 mm,外径为 0.6 mm,爱迪

高科技有限公司)组成。SMF 端面和膜片的内表面 构成了一个低精细度双光束 FP 干涉仪。该传感探 头结构的所有固定位置均采用紫外固化胶粘合与填 充,来保证 FP 腔的密封性。腔内内置的塑料导压 管使该 FP 干涉仪内外导通,如图 1 所示。在传感 探头运行过程中,气流场中的全压(P_o)会从 FP 腔 体外部导致传感膜片形变,而静压(P_s)则会沿着塑 料导压管进入 FP 腔体,这会从 FP 腔体内部导致传 感膜片形变,工作原理与飞机空速指示器中的压差 膜盒相似。由此,石英传感膜片的总形变量由全压 和静压之差决定,直接反映出气流场中的绝对压差,

第 41 卷 第 13 期/2021 年 7 月/光学学报

该压差常被称为动压^[1]。石英膜片的总形变量最终 会转化为 FP 腔长的变化量,成为压差的函数。在 忽略低速气流黏性和压缩性的情况下,根据理想流 体伯努利方程,可通过传感探头测量到的压差直接 推导出流速^[1]:

$$u = \sqrt{\frac{2(P_0 - P_s)}{\rho}}, \qquad (1)$$

式中:u 为流速; ρ 为实验环境中的流体密度,气体 密度服从 $\rho = P/(RT)$;P 为环境压力;T 为环境温 度;R 为理想气体常数,干燥空气下,R =287.058 J/(kg•K)。





Fig. 1 Schematic of differential-pressure fiber-optic airflow sensing system based on white light interferometric technology

光纤传感探头的 FP 腔长信息的采集与分析由 自主研制的白光干涉测量传感解调仪来完成。该解 调仪内置波长调谐范围为 1527~1567 nm 的 MG-Y激光器,FPGA 控制与采集模块和单光电探测器。 MG-Y 激光器的工作原理基于游标效应,通过两个 调制光栅反射器来扩大调谐范围。输出波长由三个 部分的注入电流决定:右反射部分、左反射部分和相 位部分[22-24]。半导体光放大器段的注入电流可实现 输出功率的微调。如图1所示,从 MG-Y 激光器发 出的光经环形器传输到传感探头中,采用 FPGA 控 制进行间隔为 8 pm 的全谱扫描,得到的干涉光谱 信号由光电探测器接收,再通过 FPGA 实现 100 Hz 的同步数据采集并上传至计算机。最终,在计算机 上利用交叉相关信号处理算法,通过干涉光谱信号 解调出传感探头 FP 腔的绝对腔长^[25-26],实现绝对 压差测量。

3 风洞实验分析与讨论

3.1 低速风洞中气流速度的测量

首先,需要对风洞中的流速进行检测来验证该 光纤传感系统的压差测量准确性。利用微压泵

(113A,ConST 公司)模拟压差测量环境,对传感探 头进行标定,可得到 FP 腔长对应于压差变化的灵 敏度为 825.98 nm/kPa, 腔长分辨率为 0.74 nm。 在风洞中利用该光纤传感系统对气流速度进行测量 的实验装置如图 2 所示。风洞总长 2 m,风洞内部 的实验区域尺寸为 32 cm×32 cm×100 cm,稳定的 气流来源于风洞前部放置的由变频器控制的鼓风 机。通过橡胶管将传感探头与皮托管的总压孔相 连,通过另一根橡胶管将 FP 腔中内置的导压管与 皮托管的静压孔相连,以直接测量气流场中的压差, 从而通过(1)式求得风洞内的流速。同时皮托管也 通过气管三通与标准电子压力测量仪(DSA3217, Scanivalve 公司,0.05% F.S.)的两个通道相连,作 为测量参考。该标准电子压力测量仪的两个通道可 分别测量气流中的全压和静压,实现双通道压差 检测。

在 3.97~37.84 m • s⁻¹ 的流速范围内,通过交 叉相关信号处理方法对传感探头返回的干涉光谱进 行解调。随着速度不断变化,FP 腔长也不断发生变 化,如图 3(a)所示。当气流场在某一流速下稳定 后,FP腔长也变得稳定,记录约 1 min之内的腔长



图 2 风洞内气流速度测量装置示意图

Fig. 2 Experimental setup for airflow velocity measurement in a wind tunnel

变化值。FP 腔长的变化值与传感探头的压差灵敏 度相除,可得到气流场中的压差变化。当实验环境 中的大气压力为 102.1 kPa,温度为 23.0 ℃时,可 得气流密度为 1.20 kg/m³。由(1)式可以实时计算 出该环境下的气流速度,如图 3(b)所示。测试结束 后,关闭风洞,FP 腔长可以恢复到初始状态。对测 量到的平均流速与标准电子压力测量仪的平均参考 结果进行对比,该光纤传感系统的测量误差不超过 $0.22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,如图 3(c)所示。受限于低速风洞的 气流产生装置,该压差式光纤传感系统的最高气流 测速为 37.84 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。



图 3 压差式光纤气流传感系统在 3.97~37.84 m • s⁻¹ 流速范围内的实时响应。(a)传感探头 FP 腔长随速度变化情况; (b)由(1)式计算出的实时速度;(c)传感系统测量速度与参考速度的对比

Fig. 3 Real-time response of differential-pressure fiber-optic airflow sensing system in the range of 3.97-37.84 m • s⁻¹.
(a) Changes of the FP cavity length of sensing probe with velocity; (b) real-time velocity calculated by Eq. (1);
(c) comparison between the measured airflow velocity by the proposed system and the reference velocity

3.2 圆柱绕流阻力分析

在实际气流绕圆柱流动时,由于黏性力的存在, 气流会在圆柱表面产生阻力。这种阻力是流体绕圆 柱所引起的压强差和摩擦应力造成的,其中压强差 造成的压差阻力起主导作用^[2]。为了进行圆柱绕流 压差阻力的分析,首先利用 3D 打印机(3 Extended, Ultimaker 公司)制作一个表面带有圆形测压孔的 空心圆柱体。该空心圆柱由丙烯腈-丁二烯-苯乙烯 (ABS)塑料制成,高度为 120 mm,直径为 60 mm, 其表面的圆形测压孔直径为 0.6 mm,距离圆柱底 部 100 mm。将圆柱放置在风洞实验区域内,使测压 孔面向来流。测压孔可通过一个细针管接出,利用橡

第 41 卷 第 13 期/2021 年 7 月/光学学报

胶管与压差式光纤气流传感探头相连。该圆柱可绕 中轴旋转,下方放有角度盘。当转动圆柱时,其转角 可通过角度盘指针的读数来获得,如图4所示。随着 测压孔位置的改变,可测出绕圆柱体整个壁面上的压 强分布。压强分布通常用压强系数(C_P)来表示^[2]:

式中: P_n 为圆柱表面的压强; $P_n - P_s$ 为圆柱表面 的压强与来流静压之间的压差:P。一P。为未受圆 柱扰动前的来流的全压与静压之间的压差。理想情 况下,气流可以完全附着在圆柱表面流动,无绕流阻 力产生。此时,理想压强系数表示为 $C_{P}=1 4 \sin^2 \theta$,其中 θ 是圆柱表面上各点偏离流线方向的 角度。



(2)

图 4 风洞内圆柱绕流阻力测试过程示意图。(a)外流区压差测量;(b)圆柱表面压差测量

Fig. 4 Test process of flow drag around a circular cylinder in a wind tunnel. (a) Measurement of differential-pressure in outer flow; (b) measurement of differential-pressure around a circular cylinder

为了检测外流区内的压差(P。-P。),即未受到 圆柱影响的来流的压差,将皮托管与传感探头相连, 连接方法如图 4(a) 所示, 并放置在圆柱正上方约 50 mm 处。开启风洞,根据光纤传感系统的测量结 果可知,外流区平均压差为 120.92 Pa,由(1)式可 计算出来流平均速度为 14.20 m \cdot s⁻¹,如图 5(a)所 示。同时,标准电子压力测量仪的两个通道也通过

气管三通与皮托管相连,测得的平均参考压差和速 度分别为122.42 Pa 和14.28 m • s⁻¹。然后使压差 式光纤气流传感探头脱离皮托管,将该传感探头通 过橡胶管与空心圆柱表面的测压孔相连,而传感探 头 FP 腔内置的导压管仍与皮托管的静压孔相连, 以检测圆柱表面压差情况,如图 4(b)所示。由此, 传感探头可以得到圆柱表面的受压和气流场中的静



图 5 气流场中传感探头 FP 腔长与压差的变化情况。(a)外流区;(b)圆柱壁面

Fig. 5 Variations of the FP cavity length and the differential-pressure in the airflow field. (a) In the outer flow; (b) around the circular cylinder

压之间的压差(P_n-P_s)。在测试过程中,圆柱测压 孔每隔 5°绕中轴顺时针旋转,直到旋转一周后结束 (0°~360°),从而测量圆柱整个壁面上的压差分布, 并在每个测量位置保持约1 min,记录 FP 腔长的变 化。图 5(b)中虚线表示圆柱旋转一周的过程中 FP 腔长的变化情况,实线表示根据 FP 腔长变化值计 算出的压差。同时,也利用气管三通将橡胶管连接 至标准电子压力测量仪的两个通道作为测量参考。

将光纤传感系统测得的外流区中的平均压差 (P₀-P_s)和圆柱表面各测量点的平均压差(P_n-P_s)代入(2)式,可得圆柱表面各点的压强系数,如 图 6 中圆点曲线所示,它与标准电子压力测量仪的 测量参考值(方块曲线)相近,与理想值(实线)相差 较大。这表明在该实验条件下,圆柱周围的气流不 处于理想状态。根据外流区气流流速,可以计算其 雷诺数来确定圆柱周围气流状态,表达式^[2]为

$$Re = \frac{U_0 d}{\nu}, \qquad (3)$$

式中:U。为受到圆柱的扰动前来流相对于物体的流速,即外流区速度;d 为迎流面投影面积的特征长度,即圆柱的直径;v 为黏性系数,常温下约为

第 41 卷 第 13 期/2021 年 7 月/光学学报

1.57×10⁻⁵ m²/s。根据压差式光纤传感系统的测量结果,可以计算出气流场中的雷诺数为5.43×10⁴,证明圆柱周围的气流不处于理想状态(1 \leq $Re \leq 100^{[2]}$),而是处于亚临界状态(3×10² \leq $Re \leq$ $3\times 10^{5[2,27-28]}$)。由标准电子压力测量仪计算出的参考雷诺数为5.46×10⁴,也证明圆柱周围气流处于亚临界状态。

如图 6 所示, 压差式光纤传感系统所测得的压 强系数首先随着旋转角度的增大而减小, 并在 65° 附近达到最小值; 之后略有回升, 直到 80°附近接近 极大值; 在 80°~180°之间, 压强系数几乎保持不变; 在 180°~360°范围内, 压强系数与 0°~180°范围内 的压强系数几乎完全对称, 这表示圆柱相对于流线 两侧的压强分布是对称的, 圆柱两侧合力为 0。值 得一提的是, 压强系数在 0~40°范围内为正值, 45°~180°范围内为负值, 说明在这两个区域内, 作 用在圆柱体表面的压力方向不同, 合力不为 0。同 样, 由于圆柱两侧对称, 压强系数在 320°~360°范围 内为正值, 在 180°~315°范围内为负值, 合力也不为 0。由此, 在来流方向会产生绕流阻力。关于圆柱表 面压强分布的简单示意如图 6 所示。





Fig. 6 Distribution of pressure coefficient around the circular cylinder

绕流阻力系数 $(C_{\rm D})$ 和压强系数有关^[2],可表示为

$$C_{\rm D} = \int_{0}^{2\pi} C_{\rm P} \cos \theta \, \mathrm{d}\theta \,. \tag{4}$$

而绕流阻力大小又与绕流阻力系数有关^[2],计 算公式为

$$F_{\rm D} = C_{\rm D} A \, \frac{\rho U_0^2}{2}, \tag{5}$$

式中:A 为迎流面垂直于来流的平面上的投影面 积。根据(4)式,对压差式光纤传感系统测得的压强 系数进行积分,可以得到阻力系数为1.34。将其代 入(5)式,可计算出绕流阻力为1.17 N。经计算,由 标准电子压力测量仪测得的阻力系数和绕流阻力分 别为1.30 N和1.15 N。该压差式光纤传感系统取得 的实验值与标准电子压力测量仪的参考结果相近。

4 结 论

利用自主研制的基于白光干涉测量技术的压差 式光纤气流传感系统,开展了针对绕流阻力分析和 流速监测的相关实验研究。该系统可直接获得空气 流场中的绝对压差,并进行实时采集与同步分析。 经实验验证,在气流速度为 3.97~37.84 m·s⁻¹ 的 范围内,该系统的流速测量误差不超过 0.22 m·s⁻¹。 此外,风洞内关于圆柱绕流阻力的测量结果与标准电 子压力测量仪的测量结果相近。该压差式光纤气流 传感系统有望取代传统技术成为强电磁干扰环境下 风洞实验研究和飞行器监测领域的更优选择。

第 41 卷 第 13 期/2021 年 7 月/光学学报

研究论文

参考文献

- White F M. Fluid mechanics [M]. 7th ed. New York: McGraw-Hill, 2011: 5-40.
- [2] Zdravkovich M M. Flow around circular cylinders, vol. 1. fundamentals [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1997, 350: 377-378.
- [3] Han J, Tang X S, Zhou P, et al. The research of intelligent wireless sensor network (WSN) and wireless measurement technology for wind tunnel[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2009, 23 (1): 94-98.

韩杰, 唐小珊, 周平, 等. 风洞无线智能传感器网络 及无线测量技术研究[J]. 实验流体力学, 2009, 23 (1): 94-98.

- [4] Li G, Zhao Y F, Wang M Q. Analysis of electromagnetic interference (EMI) measurement in wind tunnel [J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2012, 24(4): 33-37.
 李刚,赵月飞,王民全.风洞现场电磁干扰测量研究 [J]. 军械工程学院学报, 2012, 24(4): 33-37.
- [5] Tong X C. Advanced materials and design for electromagnetic interference shielding [M]. Boston: CRC Press, 2016.
- [6] Bureau of Aircraft Accidents Archives [EB/OL]. [2020-09-25]. https://www.baaa-acro.com/.
- [7] Ely J. Electromagnetic interference to flight navigation and communication systems: new strategies in the age of wireless[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, August 15-18, 2005, San Francisco, California. Virginia: AIAA, 2005.
- [8] Vogel M H. Impact of lightning and high-intensity radiated fields on cables in aircraft [J]. IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, 2014, 3 (2): 56-61.
- [9] Fisher F A, Plumer J A, Perala R A. Aircraft lightning protection handbook [M]. Washington, D C: TRB, 1989: 1-99.
- [10] Gage B, Greenwell R, Summerlin M, et al. Fiber optic aircraft systems electromagnetic pulse (EMP) survivability[J]. Proceedings of SPIE, 1984, 0506: 108-115.
- [11] Yuan L B. Overview and forecast of fiber optic white-light interfreometry [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900137.
 苑立波.光纤白光干涉技术的回顾与展望[J].光学 学报, 2011, 31(9): 0900137.
- [12] Song P, Jing Z G, Li A, et al. Refractive index measurement of liquid based on open fiber Fabry-Perot interferometer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(12): 1204007.

宋鹏, 荆振国, 李昂, 等. 基于光纤开放式法布里-珀 罗干涉仪的液体折射率测量[J]. 中国激光, 2017, 44(12): 1204007.

- [13] Tong X L, He W, Zhang C, et al. Research and application progress of fiber Bragg grating and Fabry-Perot sensors in the field of aeronautics and astronautics[J]. Laser Journal, 2018, 39(7): 1-7. 童杏林,何为,张翠,等.光纤光栅与光纤法珀传感 器在航空航天领域的研究与应用进展[J].激光杂志,2018,39(7): 1-7.
- [14] Wang X H, Dong X Y, Zhou Y, et al. Optical fiber anemometer using silver-coated fiber Bragg grating and bitaper[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2014, 214: 230-233.
- [15] Liu Z G, Wang F, Zhang Y, et al. Low-powerconsumption fiber-optic anemometer based on longperiod grating with SWCNT coating [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(7): 2592-2597.
- [16] Zhang Y, Wang F, Liu Z G, et al. Fiber-optic anemometer based on single-walled carbon nanotube coated tilted fiber Bragg grating[J]. Optics Express, 2017, 25(20): 24521-24530.
- [17] Zhao Y, Hu H F, Bi D J, et al. Research on the optical fiber gas flowmeters based on intermodal interference[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 82: 122-126.
- [18] Cipullo A, Gruca G, Heeck K, et al. Numerical study of a ferrule-top cantilever optical fiber sensor for wind-tunnel applications and comparison with experimental results [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2012, 178: 17-25.
- [19] Wang C, Zhang X Z, Jiang J F, et al. High-speed airflow measurement system based on optical fiber Fabry-Perot sensing [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(12): 1206005.
 王超,张学智,江俊峰,等.基于光纤法布里-珀罗传 感的高速气流测量系统[J].光学学报, 2020, 40 (12): 1206005.
- [20] 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.
- [21] Liu Y Y, Jing Z G, Liu Q, et al. Differentialpressure fiber-optic airflow sensor for wind tunnel testing[J]. Optics Express, 2020, 28(17): 25101-25113.
- [22] O'Connor S, Bernacil M A, Derickson D. Generation of high speed, linear wavelength sweeps using sampled grating distributed Bragg reflector lasers[C]//LEOS 2008-21st Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, November

9-13, 2008, Newport Beach, CA, USA. New York: IEEE Press, 2008: 147-148.

- [23] George B, Derickson D. High-speed concatenation of frequency ramps using sampled grating distributed Bragg reflector laser diode sources for OCT resolution enhancement[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7554: 75542O.
- [24] Poliak J, Heininger H, Mohr F, et al. Modelling of MG-Y laser tuning characteristics[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8868: 88680N.
- [25] Jing Z G. Study on white light extrinsic Fabry-Perot interferometric optical fiber sensor and its applications [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006: 58-88.

荆振国. 白光非本征法布里-珀罗干涉光纤传感器及

第 41 卷 第 13 期/2021 年 7 月/光学学报

其应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006: 58-88.

- [26] Jing Z G, Yu Q X. White light optical fiber EFPI sensor based on cross-correlation signal processing method [C] // The 6th International Symposium on Test and Measurement, June 1-3, 2005, Dalian, Liaoning, China. Beijing: Wanfang Data, 2005: 3509-3511.
- [27] Catalano P, Wang M, Iaccarino G, et al. Numerical simulation of the flow around a circular cylinder at high Reynolds numbers [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2003, 24(4): 463-469.
- [28] Franke J, Frank W. Large eddy simulation of the flow past a circular cylinder at $Re_{\rm D} = 3900$ [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90(10): 1191-1206.