

基于双芯光子晶体光纤的激光多普勒多点速度测量研究

黄雪峰¹ 赵冠军¹ 李盛姬² 郭 枫¹ 郑光华¹ 徐江荣¹

¹杭州电子科技大学理学院, 浙江 杭州 310018

²杭州电子科技大学材料与工程工程学院, 浙江 杭州 310018

摘要 为了实现微流体流场中多点速度测量, 提出基于双芯光子晶体光纤的激光多普勒速度计研究。理论分析基于双芯光子晶体光纤的相干特性和控制体特征。计算结果表明纤芯间距为 $7.4\ \mu\text{m}$, 在控制体内可产生 5 条干涉明纹, 与实验结果保持一致。但由于噪声的存在, 实验所得各级条纹的强度比值比理论计算结果小。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。从双芯光子晶体光纤出射的光斑至相干过程的成像结果表明, 速度计的工作距离约 $30\ \mu\text{m}$ 。分析基于双芯光子晶体光纤的激光多普勒多点速度测量原理, 并进行单点、两点和三点速度测试。单点测量时, 粒子平均速度为 $0.980\ \text{m/s}$, 相对不确定度为 0.5% ; 两点测量时, 粒子平均速度分别为 $1.761\ \text{m/s}$ 、 $1.769\ \text{m/s}$; 三点测量时, 粒子平均速度分别为 2.106 、 2.084 、 $2.097\ \text{m/s}$ 。实验结果表明, 基于双芯光子晶体光纤的激光多普勒速度计可进行多点速度测量, 而且具有探头微型化、系统简单的特点, 因此可嵌入微系统进行流场的多点速度测量。

关键词 测量; 激光多普勒速度计; 双芯光子晶体光纤; 相干特性; 多点测量

中图分类号 TN21/27

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1112003

Study on Multi-Point Velocity Measurements of Laser Doppler Velocimetry Based on Dual-Core Photonic Crystal Fiber

Huang Xuefeng¹ Zhao Guanjun¹ Li Shengji² Guo Feng¹

Zheng Guanghua¹ Xu Jiangrong¹

¹School of Science, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

²College of Materials and Environmental Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

Abstract To realize multi-point velocity measurements in micro fluid flow, this paper presents a study on laser Doppler velocimetry based on the dual-core photonic crystal fiber. The coherent characteristics and property of measurement volume based on the dual-core photonic crystal fiber are theoretically analyzed. Calculation results show that there are five bright interference fringes in measurement volume as the spacing between two fiber cores is about $7.4\ \mu\text{m}$, which is in agreement with the experiments. Due to the noise in experiment, intensity ratio of each fringe in experiment is lower than that based on the calculation. Enlarging the spacing between two fiber cores results in the increase of interference fringes, thus leads to increase the accuracy of measuring velocity. According to the images during the process from two separated faculae to their interference, the working distance for this velocimetry can be identified as about $30\ \mu\text{m}$. The principle of multi-point measurements of laser Doppler velocimetry based on the dual-core photonic crystal fiber is analyzed. The test based on the velocimetry is then executed to measure the single point velocity, two-point velocities and three-point velocities. For single point measurement, the averaged velocity of the particle is $0.980\ \text{m/s}$ with the relative uncertainty of 0.5% . For two-point

收稿日期: 2015-06-08; 收到修改稿日期: 2015-07-23

基金项目: 国家自然科学基金(51006029, 51276053)、浙江省自然科学基金(LY15E060006, LY14E060002)、浙江省中青年学科带头人学术攀登项目(pd2013158)

作者简介: 黄雪峰(1981—), 男, 博士, 副教授, 从事光纤传感、多相流测试技术的研究。E-mail: xuefenghuang@hdu.edu.cn

measurements, the averaged velocities of the particles are 1.761 m/s and 1.769 m/s, respectively. For three-point measurements, the averaged velocities of the particles are 2.106 m/s, 2.084 m/s and 2.097 m/s, respectively. Experimental results demonstrates that the laser Doppler velocimetry based on the dual-core photonic crystal fiber can realize multi-point velocity measurements. The velocimetry has the advantages with micro sensing head and simple systematic configuration over classical one. Therefore, the velocimetry can be embedded in the micro system for multi-point velocity measurements of micro fluid flow.

Key words measurement;laser Doppler velocimetry; dual-core photonic crystal fiber; coherent characteristics; multi-point measurements

OCIS codes 280.3340; 120.7250; 060.5295

1 引 言

自 Yeh 等^[1]利用多普勒效应测量流体速度以来,激光多普勒技术以其精度高、线性度好、动态响应快、测量范围广、非接触测量等优点,获得了广泛的应用,如流体速度场^[2-3]、雾化速度和粒径分布^[4]、湍流燃烧^[5]和振动特性^[6-7]等测量。随着光纤技术的发展,单模光纤^[8]、多模光纤^[9]、保偏光纤^[10]、光纤光栅^[11]等被引入到多普勒测速系统中,小型化、结构简单的光纤多普勒技术成为新的研究趋势。为了将光纤多普勒技术引入微系统中,需要进一步微型化光纤探头。Khotiaintsev 等^[12]采用包层直径 125 μm 、两纤芯间距 25 μm 的双芯光纤,实现毛细血管中血流量的测量。MacPherson 等^[13]采用包层直径 110 μm 、两纤芯间距 17.3 μm 的双芯光子晶体光纤,实现了高线性度的速度测量。相对于传统双芯光纤,双芯光子晶体光纤沿轴向方向周期性排列空气孔,端面呈二维周期性的光子晶体结构,具有无限截止波长的传输特性、相干性好和易于相位调制的优势。

由于控制体大小的限制,多普勒速度计通常仅能进行单点测量。为了进行多点测量,需要设计多个控制体,通过阵列组件和采用特殊信号处理方法^[14-16]来实现。Li 等^[17]采用分束和声光调制器(AOM)的衍射效应形成多个控制体,实现多点速度的同时测量。Maru 等^[18]利用多个激光器和阵列波导光栅(AWG)形成多个控制体,并进行了多点差分式速度测量。Kerherve 等^[19]通过分光形成两个控制体,对超声速喷气式发动机进行了测量。Adrian^[20]综述了在非定常流中的多点光学测量技术。Nakatani 等^[21]通过调制的相位衍射光栅和阵列 GRIN 透镜实现多点速度测量。Hachiga 等^[22]采用半导体激光器形成两路片光源及多通道快速傅里叶变换(FFT)信号处理方法,形成 96 通道体积约为 800 $\mu\text{m} \times 120 \mu\text{m} \times 10\pi \mu\text{m}$ 的控制体,但信号处理器仅有 16 个信道,因而完成了 16 点的速度测量。Ishida 等^[23]也通过设计交叉片光源形成 32 通道、控制体为 125 $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ 的多普勒测速系统,获得血液流动速度分布图像。Kato 等^[24]通过空分复用方式实现多点速度测量。上述的多点多普勒测速系统由于通过组件阵列存在测量装置复杂而庞大的缺点,测量系统和探头均难以微型化。因此亟需开发一种结构简单、应用范围广、成本低的多点多普勒测速技术。

本文提出采用双芯光子晶体光纤作为探头,接收多颗粒子在基于双芯光子晶体光纤形成的控制体内的散射光,通过 CCD 相机确定粒子与双芯光子晶体光纤出射端面的距离,识别各粒子的多普勒信号,实现多点差分式速度测量。

2 基本原理

2.1 双芯光子晶体光纤的相干原理

双芯光子晶体光纤具有两传输纤芯和多孔结构,能够在双芯间产生耦合效应,在端面出射后产生干涉效应。基于这两种效应开发了曲率、温度、压力、扭矩和速度传感器等^[13, 25-28]。

双芯光子晶体光纤的出射光相干示意图如图 1 所示。根据干涉理论,距离光纤出射端面 L 处观察屏 / CCD 上的光强分布为^[29]

$$I(r) = I_1(r) + I_2(r) + 2\sqrt{I_1(r)I_2(r)} \cos(\varphi_{10} - \varphi_{20} + \frac{2\pi dx}{\lambda L}), \quad (1)$$

式中 $I_1(r)$ 、 $I_2(r)$ 分别为两纤芯出射光光强, φ_{10} 、 φ_{20} 分别为两纤芯出射光初相位, d 为两纤芯间距, x 为 x 方向上的位置, λ 为入射光波长, L 为观察屏 / CCD 与光纤端面的距离。

由于光纤芯径很小,其出射光波不可避免地存在衍射效应。基于衍射理论,单个纤芯的远场场强分布为

$$E(x) = \frac{aE_0}{i\lambda L} \exp(i\varphi + ikL) \tilde{W}(r) \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} \tilde{W}(r) = & 2 \exp\left(i\frac{k}{2L}x^2\right) \frac{\sin\left(\frac{2\pi ax}{\lambda L}\right)}{\frac{2\pi ax}{\lambda L}} \left[1 - \left(\frac{1}{\omega^2} - \frac{ik}{2L}\right) 2a^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{L\lambda}{\pi x}\right)^2 \left(\frac{1}{\omega^2} - \frac{ik}{2L}\right) \right] - \\ & \exp\left(i\frac{k}{2L}x^2\right) \left(\frac{1}{\omega^2} - \frac{ik}{2L}\right) \left(\frac{L\lambda}{\pi x}\right)^2 \cos\left(\frac{2\pi ax}{\lambda L}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

式中 E_0 为常数, ω 为光纤出射端面处高斯光束的束腰半径, φ 为光纤出射端面高斯光束的相位, a 为纤芯的半径, k 为波矢大小。

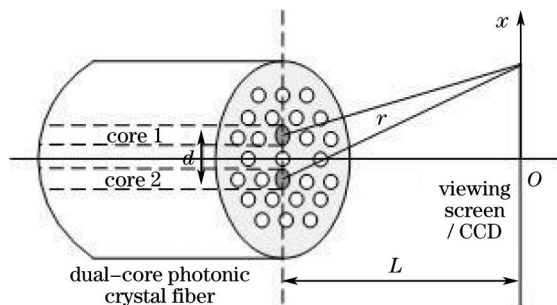


图1 基于双芯光子晶体光纤的相干光合成示意图

Fig.1 Schematic of interference based on dual-core photonic crystal fiber

结合(1)、(2)式, 距离端面 L 处的观察屏 / CCD 上的光强分布为

$$I(r) = \left(\frac{aE_0}{\lambda L}\right)^2 \left[I_1(r) + I_2(r) + 2\sqrt{I_1(r)I_2(r)} \cos(\Delta\varphi) \right] \tilde{W}^*(r) \tilde{W}(r) \quad (4)$$

式中 $\Delta\varphi$ 为光束在观察屏 / CCD 上 x 位置处的相位差。

2.2 双芯光子晶体光纤差分式多普勒测速原理

当入射光通过双芯光子晶体光纤后, 可形成两条相同频率的输出光束, 并产生带有干涉条纹的控制体。当运动粒子通过控制体, 导致来自两束相同频率不同方向的入射光在同一方向上散射, 而后会集到光电探测器中混频而产生多普勒频移。根据双光束-双散射模式的多普勒效应, 在光源和探测器静止、粒子运动的情况下, 经过两次频移后, 双芯光子晶体光纤纤芯 1 出射光产生的散射光信号频率与纤芯 2 出射光产生的散射光信号频率之间的差值, 即多普勒频移量 f_D 为

$$f_D = \frac{n}{\lambda} |v \cdot (e_{o1} - e_{o2})| = \frac{nv}{\lambda} \cdot 2 \sin \theta \quad (5)$$

式中 θ 为纤芯 1 和纤芯 2 出射光束夹角的半角, v 为微粒的运动速度, e_{o1} 、 e_{o2} 分别为纤芯 1 和纤芯 2 出射光束的单位矢量。

根据(5)式可知, 为了获得粒子运动速度, 需要确定光束夹角的半角 θ 以及多普勒频移量 f_D 。相比于大的光纤探头, 直接测量基于双芯光子晶体光纤的速度探头的半角 θ 误差较大, 因此可通过测量稳定干涉条纹间距的方法来实现。由干涉理论可知, 图 1 中从双芯光子晶体光纤两纤芯出射光相干后产生的条纹间距 $\Delta\tau$ 为

$$\Delta\tau = \frac{\lambda}{2n \sin \theta} \quad (6)$$

将(6)式代入(5)式, 则

$$v = f_D \times \Delta\tau \quad (7)$$

多普勒频移量 f_D 可根据两束散射光在光电探测器上的外差理论获得。散射光 1 的场强 $E_1(t) = A_1 \cos(f_1 t + \varphi_1)$ 与散射光 2 的场强 $E_2(t) = A_2 \cos(f_2 t + \varphi_2)$ 在光电探测器的合成光强为

$$\begin{aligned} I(t) = & [E_1(t) + E_2(t)]^2 = \\ & A_1^2 \cos^2(f_1 t + \varphi_1) + A_2^2 \cos^2(f_2 t + \varphi_2) + \\ & A_1 A_2 \cos[(f_1 + f_2)t + \varphi_1 + \varphi_2] + A_1 A_2 \cos[(f_1 - f_2)t + \varphi_1 - \varphi_2] \end{aligned} \quad (8)$$

受限于光电探测器的频率响应范围,高频 $f_1 + f_2$ 无法被响应,合成波对光电探测器的作用为波的平均值,其中 $\cos(f_1 t)$ 在一个周期中的平均值为0, $\cos^2(f_1 t)$ 在一个周期中的平均值为1/2。因此光电探测器的输出电流为

$$I'(t) \propto \frac{1}{2} A_1^2 + \frac{1}{2} A_2^2 + A_1 A_2 \cos[(f_1 - f_2)t + \varphi_1 - \varphi_2], \quad (9)$$

式中 $f_1 - f_2$ 为差频,即多普勒频移量 f_D 。光电探测器输出的信号经数据采集后,通过频谱分析便可获得多普勒频移量 f_D 。根据(7)式可求得粒子运动速度。

2.3 基于双芯光子晶体光纤的多点测速原理

基于双芯光子晶体光纤的激光多普勒速度计的多点测速原理图见图2。双芯光子晶体光纤的出射端没有聚焦透镜,因此在两纤芯出射光束交叠后形成无穷远的控制体,交叠的起始位置与光纤端面的距离为工作距离 L_0 。在控制体内沿 y 方向不同截面内的干涉条纹间距不同,当多个粒子通过不同截面干涉条纹,则光电探测器可接收到不同粒子的散射光信号。通过频谱分析可获得多个多普勒频率量,对应多点速度。

为了识别各个多普勒频移量对应粒子通过的控制体内的截面,获得不同的干涉条纹间距,因此需要采用CCD相机拍摄各个粒子在控制体的位置,确定粒子通过的截面与光纤端面的距离,计算出条纹间距。

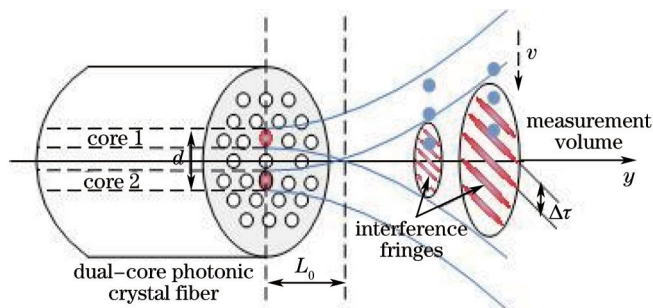


图2 基于双芯光子晶体光纤的激光多普勒测速原理示意图

Fig.2 Schematic of measuring principle of laser Doppler velocimetry based on dual-core photonic crystal fiber

3 实验系统装置

基于双芯光子晶体光纤的激光多普勒多点速度实验系统装置如图3所示。He-Ne激光器发出的激光,经扩束镜(3×)、精密光纤耦合器耦合进入双芯光子晶体光纤入射端。粒子通过基于双芯光子晶体光纤形成的控制体散射两纤芯的出射光,由多模光纤接收散射光并送至光电倍增管进行光电转换,最后通过数据采集卡采集信号,并利用LabVIEW软件进行信号滤波、降噪、频谱分析计算等处理和显示。

粒子的运动速度通过粒子控制器来进行控制。该粒子控制器可控制单颗或多颗粒子。粒子从控制器中自由下落,初速度为零。调整控制器的高度可有效控制粒子的运动速度。CCD相机用于拍摄粒子与双芯光子晶体光纤端面,确定粒子与端面之间的距离,进行干涉条纹间距的计算。

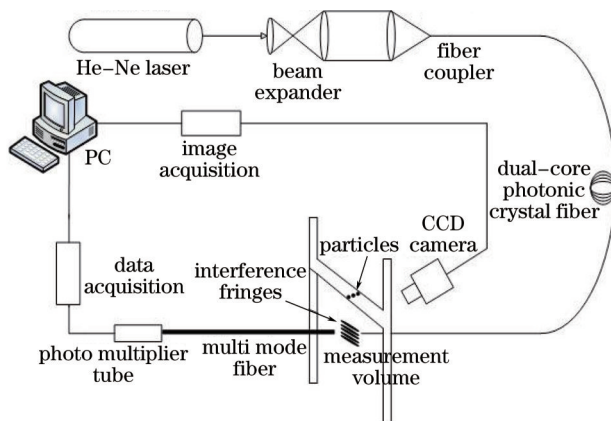


图3 基于双芯光子晶体光纤的激光多普勒多点速度测量装置示意图

Fig.3 Schematic of experimental setup of measuring multi-point velocities based on dual-core photonic crystal fiber laser Doppler velocimetry

本文使用的双芯光子晶体光纤的结构如图4所示。该双芯光子晶体光纤的包层约为 $125\ \mu\text{m}$, 纤芯直径约为 $3.8\ \mu\text{m}$, 纤芯距约为 $7.4\ \mu\text{m}$, 空气孔直径约为 $2.5\ \mu\text{m}$, 孔间距约为 $3.8\ \mu\text{m}$, 空气填充率约为 0.66。光纤的数值孔径(NA)约为 0.22。

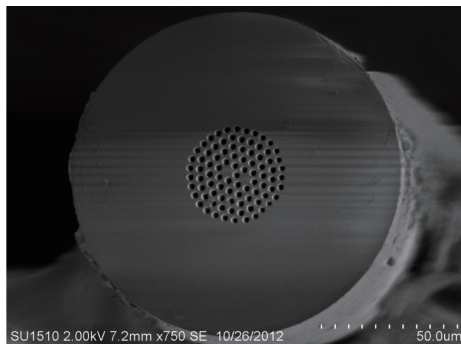


图4 双芯光子晶体光纤端面的扫描电镜图片

Fig.4 Scanning electron microscope photograph of physical structure of dual-core photonic crystal fiber

4 结果分析与讨论

4.1 双芯光子晶体光纤的相干模拟

选取入射激光波长 λ 为 $632.8\ \text{nm}$, 光纤出射端面与观察屏 / CCD 的距离 L 为 $2.0\ \text{cm}$, 光纤端面出射高斯光束振幅 E_0 为 1, CCD 探测范围 x 从 $-1.0\ \text{cm}$ 至 $1.0\ \text{cm}$, 纤芯半径 a 为 $1.9\ \mu\text{m}$ 。实验测量的模场直径约为 $5\ \mu\text{m}$, 因此束腰半径设定为 $2.5\ \mu\text{m}$ 。依据上述双芯光子晶体光纤相干理论, 模拟干涉条纹在观察屏 / CCD 上沿 x 轴方向上的光强分布如图5所示。可见, CCD 上共分布有五条明暗相间的干涉条纹, 强度分布不一, 0级亮条纹与 ± 2 级亮条纹的强度之比约为 4.5, 1级亮条纹与 ± 2 级亮条纹的强度之比约为 3.5。

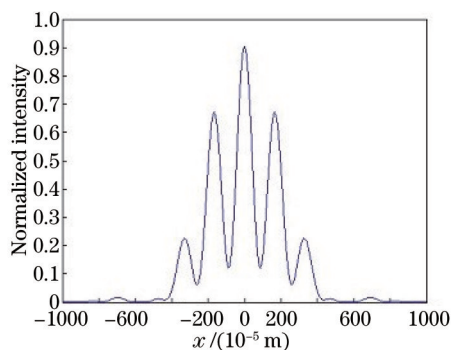


图5 双芯光子晶体光纤的相干条纹光强度分布模拟结果

Fig.5 Simulation results of interference fringes intensity distribution based on dual-core photonic crystal fiber

4.2 双芯光子晶体光纤的相干过程成像

从双芯光子晶体光纤的两个独立光斑至产生干涉条纹及干涉条纹变化的过程见图6。为了获得双芯光子

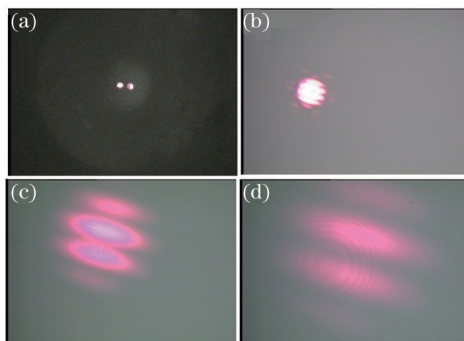


图6 双芯光子晶体光纤的出射光斑至相干过程的成像

Fig.6 Imaging of dependent facule and their interference based on dual-core photonic crystal fiber

晶体光纤端面处的出射光斑,采用显微成像方式对光斑放大进行观察。通过纳米电动位移平台对显微物镜进行平移控制,对光斑至相干过程进行清晰成像。从图6(a)中可清楚地看到两个独立的出射光斑,光斑强度成高斯分布。两光斑的强度比约为1:1,因此可形成对比度较高的干涉条纹。图6(b)~(d)为两光斑叠加后形成的远场干涉条纹,随着与光纤端面的距离越远,干涉条纹间距越大。从光纤端面的两个独立光斑至两光斑刚刚重叠并相干的距离约为30 μm ,即基于光纤光子晶体光纤的激光多普勒速度计的工作距离为30 μm 。

4.3 双芯光子晶体光纤的干涉条纹光强分布

为了与模拟结果进行对比分析,保持CCD与光纤端面的距离为2 cm,对干涉条纹进行成像并进行图像灰度分析,其干涉条纹光强分布如图7所示。可以看出,具有五条干涉明纹,0级亮条纹与 ± 2 级亮条纹的强度之比约为3.4,1级亮条纹与 ± 2 级亮条纹的强度之比约为2.4。与图5的模拟结果相比,干涉条纹数相同,但对于条纹清晰度和对比度,显然模拟结果高于实验结果。因为实验过程中,CCD探测器引入噪声,激光器和光路的稳定性问题也会引入噪声,所以图7中的噪声很大,信噪比较低,从而条纹清晰度和对比度较低,而图5中没有加入噪声。

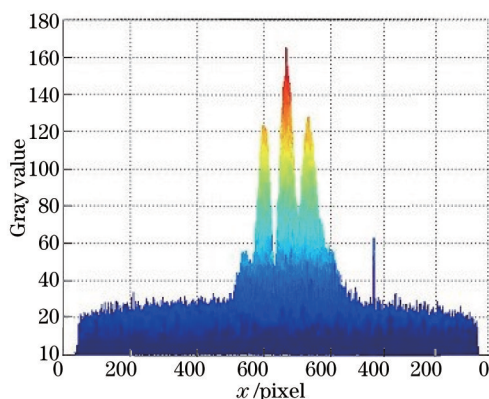


图7 双芯光子晶体光纤的相干条纹光强度分布实验结果

Fig.7 Experimental results of interference fringes intensity distribution based on dual-core photonic crystal fiber

4.4 单点及多点速度测试结果

单颗粒子通过控制体产生的多普勒信号见图8(a)。可以看出,在0.484~0.502 s时间段内,粒子通过控制体内的某一截面,散射光信号包括5个波峰和5个波谷,表明粒子穿越5条明暗相间的干涉条纹,与第2部分描述的干涉条纹模拟和实验结果一致。对图8(a)中的时域信号通过快速傅里叶变换(FFT)后的功率谱见图8(b)。对图8(b)中的频域信号作包络线,其峰值所对应的频率即为多普勒频移量 f_b ,为344.0 Hz。粒子通过控制体截面内干涉条纹的间距为2.85 mm,因此粒子的运动速度为0.980 m/s。粒子的自由下落高度为50.0 mm,因此粒

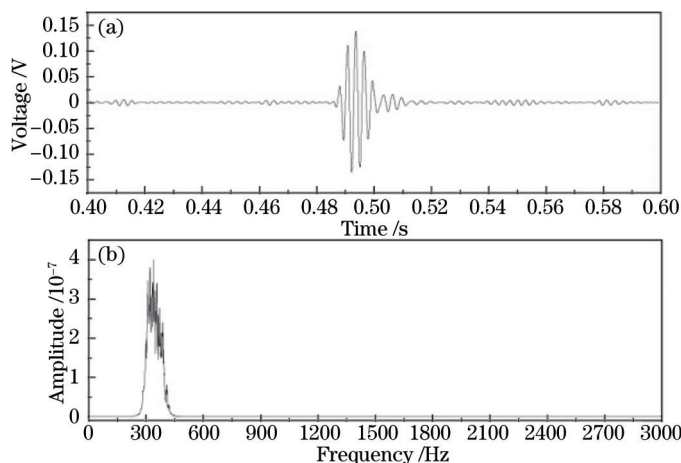


图8 基于双芯光子晶体光纤的激光多普勒单点速度测量结果。(a) 时域信号; (b) 功率谱

Fig.8 Measurement results of single point velocity based on dual-core photonic crystal fiber laser Doppler velocimetry.

(a)Time-domain signal; (b) power spectrum

子的速度为 0.990 m/s, 测量速度的相对误差为 1.0%。为了验证测试结果的重复性, 又进行了 4 次重复实验。速度测试结果分别为 0.976、0.983、0.980、0.981 m/s, 相对误差分别为 1.4%、0.7%、1.0%、0.9%。

相对误差范围从 0.7%~1.4%, 相差较大。其原因主要包括: 1) 粒子距离光纤端面较远, 控制体截面内的干涉条纹间距过大, 5 条明暗相间干涉条纹的总宽度可达 1.41 mm, 因此理论速度的计算存在偏差; 2) 干涉条纹数量较少, 因此降低了多普勒信号的分辨率和测量精度。对 5 次测量结果进行平均计算, 粒子的平均速度为 0.980 m/s, 相对误差为 1.0%, 不确定度为 0.005 m/s, 相对不确定度为 0.5%。

当两颗粒子通过控制体的不同截面, 其多普勒信号和功率谱如图 9 所示。在 0.732~0.756 s 时间段内, 两颗粒子先后通过控制体。通过 CCD 相机拍摄的图片可确定, 第一个多普勒信号为距离光纤端面更近的粒子散射所致, 第二个多普勒信号为另一颗粒子散射所致。通过快速傅里叶变换, 两个多普勒信号所对应的多普勒频移量分别为 403.0 Hz 和 333.0 Hz。对应的粒子通过控制体截面内干涉条纹的间距分别为 4.37 mm 和 5.31 mm, 因此, 两颗粒子在控制体内的运动速度分别为 1.761 m/s 和 1.769 m/s。由于两颗粒子的下落高度一致, 因此测量的粒子运动速度接近。

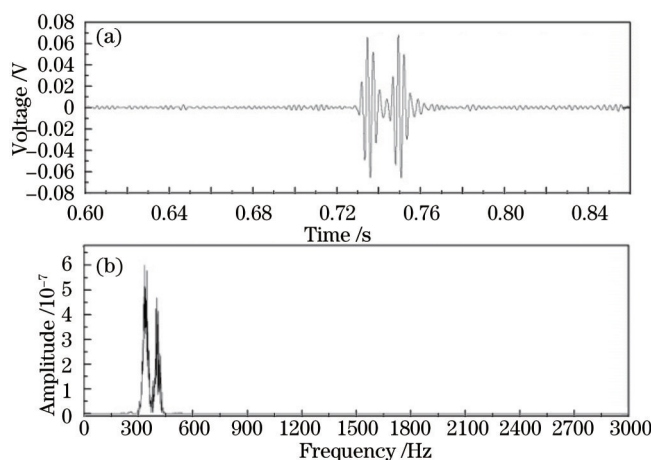


图 9 基于双芯光子晶体光纤的激光多普勒两点速度测量结果。(a) 时域信号; (b) 功率谱

Fig.9 Measurement results of two-point velocity based on dual-core photonic crystal fiber laser Doppler velocimetry.

(a) Time-domain signal; (b) power spectrum

与两点速度测试和分析方法类似, 三颗粒子通过控制体的多普勒信号以及对应的功率谱见图 10。在 0.405~0.435 s 时间段内, 三颗粒子先后通过控制体。三颗粒子的多普勒频移量分别为 798.0、708.0、618.0 Hz, 对应的干涉条纹间距分别为 2.64、2.94、3.39 mm, 因此三颗粒子在控制体内的运动速度分别为 2.106、2.084、2.097 m/s。

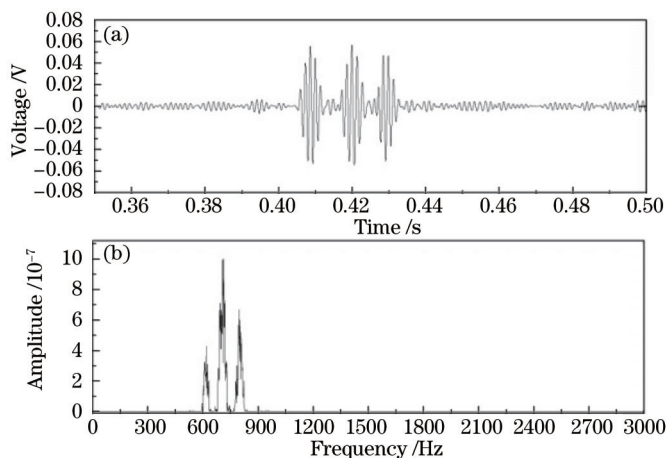


图 10 基于双芯光子晶体光纤的激光多普勒三点速度测量结果。(a) 时域信号; (b) 功率谱

Fig.10 Measurement results of three-point velocity based on dual-core photonic crystal fiber laser Doppler velocimetry.

(a) Time-domain signal; (b) power spectrum

如果多颗粒子同时进入控制体, 则难以从时间尺度的先后顺序上对各个粒子对应的多普勒频谱进行辨

别,但可根据粒子通过干涉条纹的渡越时间上进行识别。通常在小的控制体内,条纹间距越大,渡越时间越长,根据时域多普勒信号便可分辨。此外,还可采用调制的方式,移动控制体或改变控制体内的干涉条纹,进行多次速度校验来辨别。

5 结 论

通过分析和计算双芯光子晶体光纤的相干特性,可获得控制体的结构参数。由于双芯光子晶体光纤的纤芯小、间距短,因此必须同时考虑两光束的衍射和干涉效应。理论与实验结果保持一致,纤芯间距为 $7.4\ \mu\text{m}$ 时,可形成 5 条干涉明纹。由于实验中噪声的引入,使得各级条纹的强度比值比计算结果小。从双芯光子晶体光纤出射的光斑至相干的过程成像表明,该激光多普勒速度计的工作距离约为 $30\ \mu\text{m}$ 。基于双芯光子晶体光纤的激光多普勒速度计进行单点及多点速度测试表明相对误差小、不确定度小,通过多次测试证实了该速度计具有较好的重复性。为了提高速度测量精度,可采用纤芯距更大的双芯光子晶体光纤,在控制体内形成数量更多,且对比度更高的干涉条纹。

参 考 文 献

- 1 Yeh Y, Cummins H Z, Localized flow measurements with a He-Ne laser spectrometer[J]. Appl Phys Lett, 1964, 176 (4): 176-178.
- 2 Uehara K, Murakami S, Oikawa S. Wind tunnel experiments on how thermal stratification affects flow in and above urban street canyons [J]. Atmospheric Environment, 2000, 34 (10): 1553-1562.
- 3 Wang Yun, Liu Jifang, Lu Zhenzhong, *et al.*. Laser Doppler method for the detection of wake bubbles[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41 (8): 0813002.
王 贇, 刘继芳, 鲁振中, 等. 尾流气泡群的激光多普勒检测方法[J]. 中国激光, 2014, 41 (8): 0813002.
- 4 Aisa L, Garcia J A, Cerecedo L M. Particle concentration and local mass flux measurements in two-phase flows with PDA. Application to a study on the dispersion of spherical particles in a turbulent air jet [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2002, 28(2): 301-324.
- 5 Husted B P, Petersson P, Lund I. Comparison of PIV and PDA droplet velocity measurement techniques on two high-pressure water mist nozzles [J]. Fire Safety Journal, 2009, 44(8): 1030-1045.
- 6 Castellini P, Martarelli M, Tomasini E P. Laser Doppler vibrometry: development of advanced solutions answering to technology's needs [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20(6): 1265-1285.
- 7 Zhang Tao, Leng Changlin, Zhong Ying, *et al.*. MEMS dynamic testing technique based on differential laser Doppler effect[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27 (1): 63-67.
张 涛, 冷长林, 钟 莹, 等. 基于激光差动多普勒效应的微机电系统动态测试技术[J]. 光学学报, 2007, 27(1): 63-67.
- 8 Nosu K, Rashleigh S C, Taylor H F, *et al.*. Acousto-optic frequency shifter for single-mode fibres[J]. Electron Lett, 1983, 19(20): 816-818.
- 9 Büttner L, Czarske J. A multimode-fibre laser-Doppler anemometer for highly spatially resolved velocity measurements using low-coherence light[J]. Meas Sci & Technol, 2001, 12(11): 1891-1903.
- 10 Egan D A, James S W, Tatam R P. A polarization based optical fibre vibrometer[J]. Meas Sci & Technol, 1997, 8(3): 343-347.
- 11 Byrne G D, James S W, Tatam R P. A Bragg grating based fibre optic reference beam laser Doppler anemometer[J]. Meas Sci & Technol, 2001, 12(7): 909-913.
- 12 Khotiaintsev S N, Svirid V, Glebova L. Laser Doppler velocimeter miniature differential probe for biomedical applications[C]. SPIE, 1996, 2928: 158-164.
- 13 MacPherson W N, Jones D C, Mangan B J, *et al.*. Two-core photonic crystal fibre for Doppler difference velocimetry[J]. Opt Commun, 2003, 223(4-6): 375-380.
- 14 Li Jianzhong, Liu Shouxian, Liu Jun, *et al.*. Measuring multiple targets' velocities with just one probe of photonic Doppler velocimetry [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(11): 1105004.
李建中, 刘寿先, 刘 俊, 等. 光子多普勒测速仪的单探头多目标测速能力研究[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1105004.
- 15 Zhou Jian, Long Xingwu. Research on multipoint layer-type laser Doppler self-velocimeter[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(7): 1837-1844.
周 健, 龙兴武. 多点分层差动激光多普勒自身测速仪的研究[J]. 中国激光, 2010, 37(7): 1837-1844.
- 16 Bi Chonglian, Wang Jian, Xiang Hongliang, *et al.*. Two-point photonic Doppler velocimetry system based on bare fiber probe[J]. Acta

- Optica Sinica, 2012, 32 (8): 0812005.
- 毕重连, 王 健, 项红亮, 等. 基于裸光纤探头的双点光子多普勒测速系统[J]. 光学学报, 2012, 32 (8): 0812005.
- 17 Li E B, Xi J, Chicharo J F. Multi-point laser Doppler velocimeter[J]. Opt Commun, 2005, 245(1-6): 309-313.
- 18 Maru K, Kobayashi K, Fujii Y. Multi-point differential laser Doppler velocimeter using arrayed waveguide grating with small wavelength sensitivity[J]. Opt Express, 2010, 18 (1): 301-308.
- 19 Kerherve F, Jordan P, Gervais Y. Two-point laser Doppler velocimetry measurements in a Mach 1.2 cold supersonic jet for statistical aeroacoustic source model[J]. Experiments in Fluids, 2004, 37(3): 419-437.
- 20 Adrian R J. Multi-point optical measurements of simultaneous vectors in unsteady flow—a review[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 1986, 7(2): 127-145.
- 21 Nakatani N, Maegawa A, Izumi T, *et al.*. Advancing multi-point optical fiber LDV's—vorticity measurement and some new optical systems [C]. 3rd International Symposium on Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics Lisbon, 1986: 3-8.
- 22 Hachiga T, Furuichi N, Mimatsu J, *et al.*. Development of a multi-point LDV by using semiconductor laser with FFT-based multi-channel signal processing[J]. Experiments in Fluids, 1998, 24(1): 70-76.
- 23 Ishida H, Andoh T, Akiguchi S, *et al.*. Blood flow velocity imaging of malignant melanoma by micro multipoint laser Doppler velocimetry [J]. Appl Phys Lett, 2010, 97(10): 103702.
- 24 Kato S, Ichikaura T, Ito H. Multipoint sensing laser Doppler velocimetry based on laser diode frequency modulation[C]. 11th International Conference on Optical Fiber Sensors (OFS-11), 1996:606-609.
- 25 Chen D, Hu G, Liu X A, *et al.*. Bending analysis of a dual-core photonic crystal fiber[J]. Progress in Electromagnetics Research, 2011, 120: 293-307.
- 26 Du J B, Liu Y, Wang Z, *et al.*. Thermally tunable dual-core photonic bandgap fiber based on the infusion of a temperature-responsive liquid[J]. Opt Express, 2008, 16 (6): 4263-4269.
- 27 Liu Z, Tse M L V, Wu C, *et al.*. Intermodal coupling of supermodes in a twin core photonic crystal fiber and its application as a pressure sensor[J]. Opt Express, 2012, 20(19): 21749-21757.
- 28 Hu G, Chen D. Side-hole dual-core photonic crystal fiber for hydrostatic pressure sensing[J]. J Lightwave Technol, 2012, 30 (14): 2382-2387.
- 29 Zheng Guanghua. Interference Measurement Technology Based on Dual-Core Photonic Crystal Fiber[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2013: 12-14.
- 郑光华. 基于双芯光子晶体光纤的干涉测量技术研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2013: 12-14.

栏目编辑: 何卓铭