

文章编号: 1001-3806(2011)01-0109-03

一种便携式激光多普勒测速光学系统的设计

谢洪波¹, 官仁敏¹, 韩 凛¹, 于洪朗¹, 张振华²

(1. 天津大学 光电信息科学技术教育部重点实验室, 天津 300072; 2. 北京凯尔科技发展有限公司, 北京 100085)

摘要: 为了将激光多普勒测速技术应用于野外流体速度测量, 设计了一种基于双光束模式的激光多普勒测速光学系统, 采用光纤耦合半导体激光器作为光源, 通过保偏光纤耦合器、保偏光纤准直器以及非球面透镜来实现激光的分束、准直与聚焦, 形成干涉条纹, 并利用接收透镜、针孔光阑以及雪崩光电二极管检测多普勒信号光。结果表明, 所设计的光学系统的空间分辨率为 0.046mm^3 , 理论测量误差小于 0.59% 。系统体积小、装配方便、易携带, 适合于野外流体速度测量。

关键词: 激光技术; 光学设计; 激光多普勒效应; 流体

中图分类号: TH744.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.01.030

Optical system design of a portable laser Doppler velocimeter

XIE Hong-bo¹, GONG Ren-min¹, HAN Lin¹, YU Hong-lang¹, ZHANG Zhen-hua²

(1. Key Laboratory of Opto-Electronics Information Science & Technology of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Beijing Care Co. Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: An optical system of a laser Doppler velocimeter based on dual-beam mode was designed for flow velocity measurement in field, and error analysis was discussed with experimental results performed. In order to create interference fringe, the beam of a fiber-coupled laser diode was split by a polarization maintaining fiber coupler, then both the beams behind the fiber coupler were collimated by fiber collimator and focused by an aspheric lens. In order to detect Doppler signal, a collecting lens and pinhole was used to project the useful scattering light onto an avalanche photo diode. Resolution of the built optical system was 0.046mm^3 , and measurement error was less than 0.59% in theory. Because of its advantages such as small size, integration and convenience, the system is suitable for field measurement.

Key words: laser technique; optical design; laser Doppler effect; flow

引言

激光多普勒测速是利用激光多普勒效应, 通过测量流体中运动微粒散射光的多普勒信号频率来获得流体速度信息^[1]。激光多普勒测速是一种无接触测量, 对流体无干扰, 测量精度高, 可用于高温、有毒、有腐蚀性等流体的速度测量, 测量的空间分辨率可达到微米量级。另外, 表征流速的多普勒信号以光为载波, 测量动态响应快^[2]。

激光多普勒测速光学系统将被测流体的速度信息调制到光信号中, 并实现光电转换, 它是决定测量的空间分辨率、测速精度、测速范围以及信号信噪比的主要因素。野外测量一般要求仪器体积小、装配方便、易携带, 作者针对野外测量的需要, 设计了一种便携式的激

光多普勒测速光学系统。

1 光学系统的工作原理

激光多普勒测速光学系统可分为参考光模式、单光束模式、双光束模式等^[3]。双光束模式光学系统由光发射系统和光接收系统组成, 其原理图如图1所示。

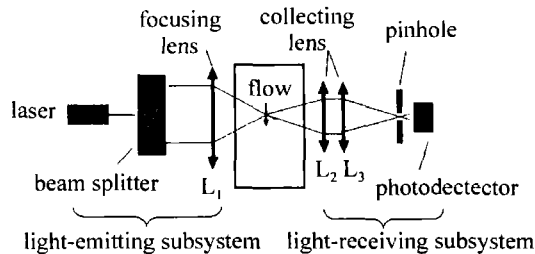


Fig. 1 The schematic of the optical system

光发射系统由激光光源、光分束器、聚焦透镜组成。激光光束经光分束器和聚焦透镜分束、聚焦后发生干涉, 在干涉场中出现干涉条纹。流体粒子穿过干涉条纹时, 会向空间发出明暗相间的光信号, 即多普勒信号^[4], 其频率为:

作者简介: 谢洪波(1969-), 男, 副教授, 博士, 主要从事光学成像与光电显示技术的研究。

E-mail: hbxie@tju.edu.cn

收稿日期: 2010-03-31; 收到修改稿日期: 2010-05-19

$$f_D = \frac{|v_y|}{d_r} = \frac{2\sin\kappa}{\lambda} |v_y| \quad (1)$$

式中, v_y 是粒子沿垂直于干涉条纹方向的分速度, d_r 是干涉条纹间距, λ 是激光波长, 2κ 是双光束会聚角。

当双光束半径相等时, 多普勒信号有限渡越时间导致的频率增宽, 所带来的测量误差可表示为^[5]:

$$\frac{\Delta v_y}{v_y} = \frac{\Delta f_D}{f_D} = \frac{\lambda}{2\pi w_0} \cot\kappa = \frac{D}{2d} \quad (2)$$

式中, d 和 D 分别为入射到透镜 L_1 上的双光束间距和单光束直径, w_0 是光束经透镜 L_1 变换后的束腰半径。

光学系统的空间分辨率(即干涉场的体积)为:

$$V = \frac{32\lambda^3 f_1'^3}{3\pi^2 D^3 \cos\kappa \sin\kappa} \quad (3)$$

式中, f_1' 是聚焦透镜 L_1 的焦距。

光接收系统由接收透镜、针孔光阑和光电探测器等组成, 接收透镜将多普勒信号光聚集到光电探测器上, 并由光电探测器实现光电转换, 经后继信号处理得到多普勒频率, 再由(1)式可计算得到流体速度。

2 光学系统设计

2.1 光发射系统设计

图 2 是作者设计的光发射系统。为了得到稳定的

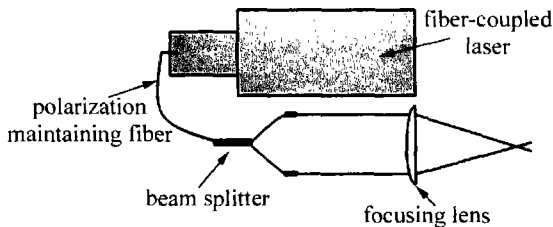


Fig. 2 The structure of the light-emitting system

干涉条纹, 保证多普勒频率和流体速度成线性关系, 光源常采用相干性较好的气体激光器, 但它的体积较大, 不易携带。本文中采用光纤耦合半导体激光器作为光源^[6], 它的体积小, 中心波长为 660nm, 与保偏光纤准直器连用后输出的光束直径为 0.5mm, 发散角小于 0.5mrad, 偏振消光比为 25dB。所需激光功率与流体粒子浓度、光接收效率等有关, 经试验验证, 在所设计系统的工作参量下, 当聚焦透镜与接收透镜的间距小于 300mm、流体粒子浓度适当时, 激光器的输出功率为 5mW 即可满足测量的需要。

光束分离器由保偏光纤耦合器和保偏光纤准直器构成, 它不仅可以使两束输出光的偏振态相同, 而且便于系统集成。两个保偏光纤准直器相互平行以保证输出光束经透镜后在其焦点处会聚。

为了提高测量精度, 由(2)式知, 聚焦透镜的孔径应尽可能大, 这会使透镜球差变大, 导致离轴平行光束经透镜后的会聚点偏离透镜焦点, 光束干涉场中的干

涉条纹出现畸变, 如图 3 所示。粒子以同样的速度穿

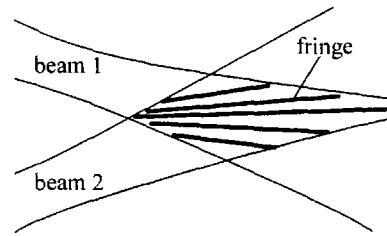


Fig. 3 Divergent beams leading to non-parallel fringe

越干涉场不同位置时多普勒频率不同, 造成测量误差^[7]。非球面透镜与球面透镜相比, 更利于减小像差^[8]。为此, 本文中采用非球面设计聚焦透镜。根据测量要求取聚焦透镜的焦距为 150mm, 通光口径为 60mm, 双光束间距为 56.80mm, 由(1)式和(3)式计算可得, 干涉条纹间距为 1.774 μ m, 空间分辨率为 0.046mm³。

2.2 光接收系统的设计

多普勒信号光强一般较弱, 并且伴随着较多的噪声光。为了提高信号光功率, 应增大接收透镜的相对孔径; 为了提高信噪比, 在接收透镜后使用针孔光阑, 并使针孔光阑与光束干涉场成物像关系。由于前向散射光一般比后向散射光强 100 倍以上^[1], 接收方式采用前向散射式。

接收透镜采用双透镜型式, 如图 1 所示, 透镜 L_2 和 L_3 间的光线平行于光轴。这种配置便于针孔光阑与干涉场相匹配, 并且通过选择焦距较小的透镜 L_3 可以缩小接收系统的长度。针孔光阑安装在透镜 L_3 的后焦平面上, 当光束干涉场位于透镜 L_2 的前焦点附近时, 光阑孔径值可表示为^[1]:

$$d_k = \frac{f_3'}{f_2'} d_m = \frac{4f_3' \lambda f_1'}{f_2' \pi D \cos\kappa} \quad (4)$$

式中, f_2' 和 f_3' 分别是接收透镜 L_2 和 L_3 的焦距, d_m 是干涉场的宽度。本文中选取的接收透镜 L_2, L_3 焦距分别为 150mm 和 75mm, 计算得 $d_k = 128\mu$ m。为了更有效地拦阻光束干涉场外的噪声光, 实际的针孔光阑孔径应小于理论值, 本系统中安装的针孔光阑的孔径为 100 μ m。

激光多普勒测速要求光电探测器具有增益倍数大、噪声低、量子效率高、频率响应带宽大等特点。根据不同的应用场合, 光电倍增管 (photomultiplier tube, PMT)、光电二极管 (positive intrinsic-negative, PIN) 和雪崩光电二极管 (avalanche photo diode, APD) 等器件常被采用。PMT 具有增益大、信噪比高、响应速度快等优点被广泛使用, 但它需要高压供电。PIN 无内部增益, 一般只用在强散射情况下。硅 APD 在可见光波段的量子效率高, 频率响应带宽可达数百兆赫兹, 内部增益能达到 10³, 能耗相对较小, 它较符合本文的测量要求。

3 误差分析与实验结果

由上述分析可知,流体速度是由信号处理器输出的多普勒频率经(1)式计算得到。信号处理器精度有限以及多普勒信号的有限渡越时间会使多普勒频率增宽,而半导体激光器波长抖动、高斯光束干涉等会使干涉条纹间距不均匀^[9],这些都会给流速测量带来误差。在本光学系统中,半导体激光器波长抖动、高斯光束干涉、多普勒信号有限渡越时间引起的测量误差在理论上是不可避免的,这里仅考虑这3种误差,即理论测量误差。

高斯光束干涉引起的干涉条纹间距变化量为^[9]:

$$\Delta d_i = (3n^2 - 3n + 1) \times \frac{\lambda^5}{16\pi^2 w_0^4 \sin^3 \kappa} \quad (6)$$

式中, n 为干涉条纹的级数,由工作电流和温度不稳定导致的半导体激光器波长抖动小于1nm,因此,干涉条纹间距的总变化量小于 2.72×10^{-6} mm,再由(1)式作微分计算可得,以上两种因素引起的测量误差小于0.15%。由(2)式可知,多普勒信号有限渡越时间引起的测量误差为0.44%。综上可得,本光学系统的理论测量误差小于0.59%。

为了验证本文中所设计的光学系统的测速性能,进行了如下的实验。选择空气加湿器出口稳流区内某处(离加湿器出口约10mm)作为测量体,利用精度为1%的粒子图像速度仪(particle image velocimetry, PIV)得到该处的流体平均速率为0.335m/s,再利用本文中所设计的光学系统与信号处理器组成实验系统对该处的流速进行测量,获得了如图4、图5所示的结果。图

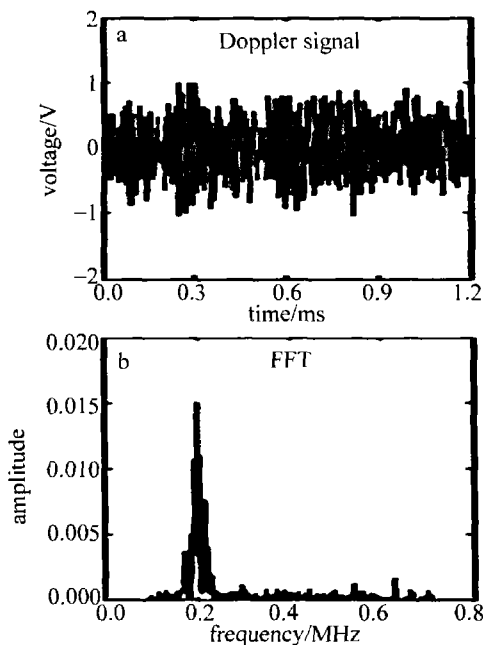


Fig. 4 Doppler signal and its FFT spectrum

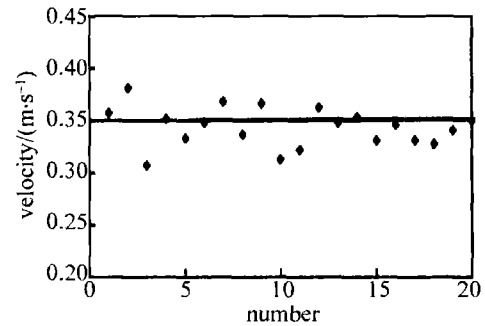


Fig. 5 Statistical results of flow velocity

4a是多普勒时域信号,图4b是多普勒信号经带通滤波(通带为100kHz至800kHz)后的快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)频谱。频谱图中最大波峰对应的频率(即多普勒频率) $f_D = 196.2$ kHz,由(1)式得流率为0.348m/s。图5是测量20次获得的统计结果,流体平均速率为0.344m/s,均方差为 1.85×10^{-2} 。可见,两种仪器测量的结果非常接近。流速测量值的波动主要由流体自身速度的不稳定和系统测量误差所致。

4 结论

作者设计的激光多普勒测速光学系统体积小、装配方便、易携带,适用于野外测量。系统的空间分辨率为 0.046mm^3 ,理论测量误差小于0.59%,测速范围主要由光电探测器和信号处理电路的频率响应带宽决定。

参 考 文 献

- [1] SHEN X. Principles and applications of laser doppler velocimeter [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 7-33 (in Chinese).
- [2] LI Z Z, CAI H, HONG X G, et al. Twin-beam laser Doppler velocity system [J]. Physics Experimentation, 2005, 25(3): 44-47 (in Chinese).
- [3] DURST F, MELLING A, WHITE LA W J H. Principles and practice of laser-doppler anemometry [M]. Beijing: Science Press, 1981: 97-145 (in Chinese).
- [4] RUDD M J. A new theoretical model for the laser Doppler [J]. Journal of Physics, 1969, E2(2): 55-59.
- [5] ZHANG Z H, WU J. On principal noise of the laser Doppler velocimeter [J]. Experiments in Fluids, 1987, 5(3): 193-196.
- [6] ZHANG J, FRANZ H. Coupling diode laser into a fiber [J]. Laser Technology, 1996, 20(3): 129-132 (in Chinese).
- [7] DRAIN L E. The laser Doppler technique [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1980: 135-142 (in Chinese).
- [8] ZHANG Y M. Applied optics [M]. 3th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 470-498 (in Chinese).
- [9] ZOU H, ZHAO Y. Error analysis in laser Doppler measurement [J]. Optical Technique, 2000, 26(3): 235-240 (in Chinese).