

# 频移分离型三维激光多普勒测速仪研究

李恩邦

(天津大学热能研究所, 天津 300072)

**摘 要** 研究一种采用频移分离方法的新型三维激光多普勒测速仪(3D LDV)。该仪器以单色 He-Ne 激光器和单只光电探测器并配合简单的光学发射和接收系统即实现了三维速度分量的同时测量。三个分量的速度信号由声光调制器引入的三种光学频移区分, 通过电子滤波器完成信号的相互分离。在光学发射系统设计中采用独特的单轴四光束结构, 通过光束组合形成三组双光束差动模式的激光多普勒测速仪光路。本文中给出了该仪器的系统设计参数并分析了轴向分量的测量精度。

**关键词** 激光多普勒测速仪, 三维速度测量, 光学频移, 声光调制器。

## 1 引 言

在许多基础和应用研究领域, 流场显示和测量技术的作用愈来愈重要。对于复杂流场的流速测量, 激光多普勒测速仪(LDV)<sup>[1,2]</sup>的优势不仅在于其高精度、高分辨率和非接触测量, 更重要的是它可以同时测量二维或三维流速分量。现有的三维激光多普勒测速仪大多以多普线输出的 Ar<sup>+</sup> 激光器为光源, 采用色分离或是色分离与偏振分离以及频移分离相结合的方法实现三维速度分量的同时测量<sup>[3~7]</sup>。由于在光学发射和散射光接收部分都需要相应的偏振分光或滤光光路, 所以这些三维激光多普勒测速仪的整体结构很复杂。虽然三维激光多普勒测速仪已商品化, 但价格昂贵, 在很大程度上限制了三维激光测速技术的应用。

本文将研究一种以光学频移分离信号的新型三维激光多普勒测速仪。该仪器采用单色 He-Ne 激光器和单一光电探测器并配合简单的光学发射和接收系统即实现了三维速度分量的同时测量。

## 2 仪器的原理与构成

该三维激光多普勒测速仪的基本工作原理是用三种不同的光学频移作为三个分量速度信号的载频, 通过电子滤波器实现信号的相互分离。

### 2.1 光学系统

图 1 为三维激光多普勒测速仪光学系统结构图, 光路为单轴四光束非对称结构。25 mW He-Ne 激光器作光源, 其输出光束被分束器(2)和(4)分为三束平行光。使用三只声光调制器

\* 本课题得到天津市 21 世纪青年科学基金的资助。

收稿日期: 1993 年 7 月 8 日; 收到修改稿日期: 1993 年 12 月 10 日

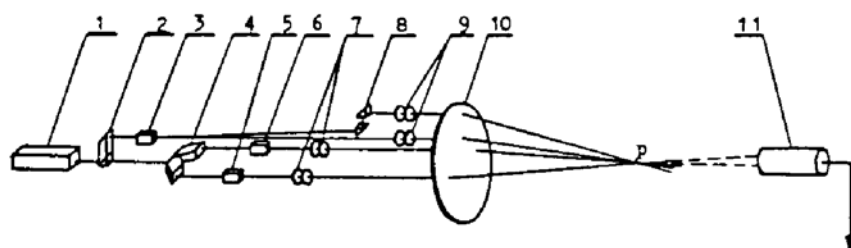
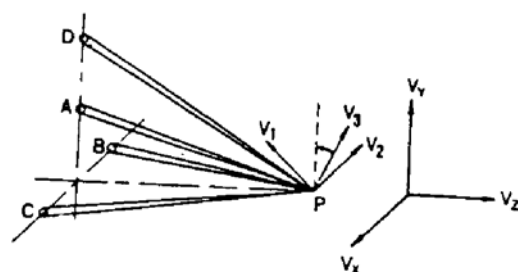


Fig. 1 Optics of the 3D LDV system

(1) He-Ne laser; (2), (4) beam splitter; (3), (5), (6) Bragg cells; (7), (9) wedges; (8) prism pair; (10) transmitting lens; (11) receiving optics and PMT

产生所需的光学频移. 声光调制器(3)由 55 MHz 的频率信号驱动, 其一级衍射光由棱镜组(8)选出, 零级光沿原方向入射到发射透镜(10). 另外两只调制器的驱动频率分别为 45 MHz 和 65 MHz, 只使用它们产生的一级衍射光. 光路中的四组光楔用于调整四束光的入射方向, 使它们相互平行. 四束入射光分别以 A、B、C、D 标识, 经发射透镜后交于一点, 形成测量点 P. 光束 A 未经频移, 分别与光束 B(频移 45 MHz)、光束 C(频移 65 MHz)、光束 D(频移 55 MHz)组合构成三组双光束差动模式的激光多普勒测速仪光路. 光束 B 与 A 组合用于测量位于垂直于光轴平面内的速度分量  $V_1$ ; 光束 C 与 A 组合测量另一与  $V_1$  位于同一平面且与  $V_1$  垂直的速度分量  $V_2$ . 第三个速度分量  $V_3$  由光束 D 与 A 测量, 速度分量  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$  与入射光束的对应关系如图 2 所示.

Fig. 2 Relations among  $V_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) and incident beams

## 2.2 信号检测与分离

在本文研究的三维激光多普勒测速仪中, 三维速度分量是由具有不同光学频移的三组双光束系统分别测量, 因此在光学发射和接收系统都可以省去颇为复杂的偏振分光或滤光光路, 使光学系统的结构大为简化. 不仅如此, 三个分量的速度信号的检测用同一光电探测器即可完成. 为获得大于 100 MHz 的频率响应和良好的信噪比, 实际系统中采用 RCA4526 光电倍增管作光电探测器.

光电探测器既可以布置成前向接收方式如图 1 所示, 也可以工作在后向接收模式. 当散射粒子以速度矢量  $V$  通过测量体时, 探测器将产生包含三个速度分量信息的复合信号, 其频谱示意图如图 3 所示. 位于 45 MHz、65 MHz 和 55 MHz 附近的频谱分量分别对应于速度分量  $V_1$ 、 $V_2$  和  $V_3$ . 出现在 10 MHz 和 20 MHz 附近的频谱分量是由所引入的三种光学频移的差频所产生, 本文不讨论这一点. 与速度分量  $V_1$ 、 $V_2$  和  $V_3$  对应的频谱成份由三个通道的带通滤波器将它们相互分离.

图 4 为信号分离单元的原理框图. 分离后的信号在送入相应的多普勒信号处理器之前与频率合成器产生的本振信号进行混频, 将各通道光学频移量的主要部分从该通道的信号频率中减掉, 只保留一部分作为实际用于区分速度正负方向的频移量. 图 5 为所记录的经分离和

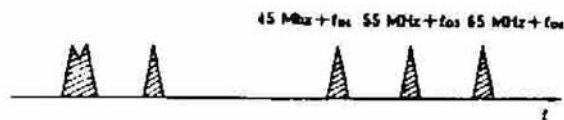


Fig. 3 Spectra of the photo-current signal

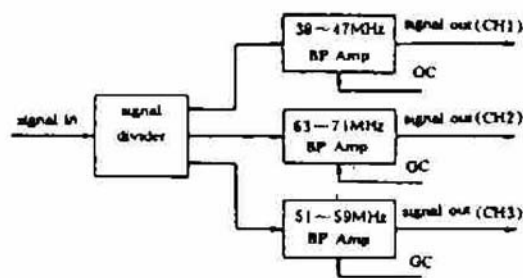


Fig. 4 Schematic diagram of the signal separation unit

BP Amp-band-pass amplifier; GC-gain control

混频处理后的实测信号波形，被测对象为未经人工播粒的水流，实验中每个通道的实际频移量均为 10 kHz.

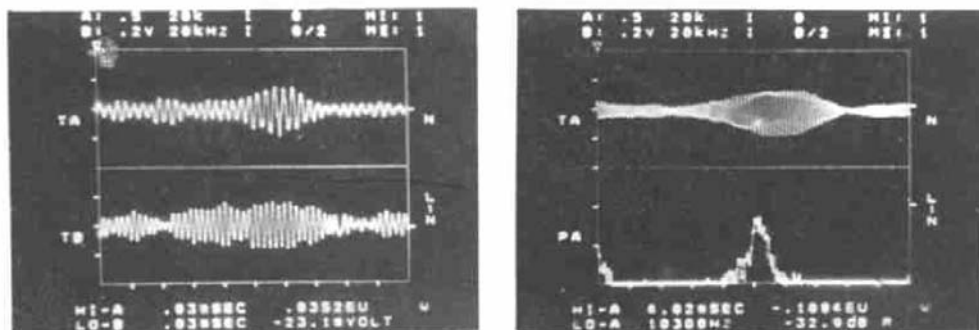


Fig. 5 Photographs of the pre-processed Doppler signals

(a) signals of CH1 (top) and CH2 (bottom), (b) CH3 signal (top) and its spectrum (bottom)

### 2.3 系统设计参数

频移分离型三维激光多普勒测速仪的光学及系统参数分别列于表 1 和表 2.

Table 1. Optical parameters of the 3D LDV system

| Transmitting optics    |          |
|------------------------|----------|
| laser wavelength       | 632.8 nm |
| focal length           | 300 mm   |
| beam spacing:          |          |
| from B to C            | 25 mm    |
| from A to axis         | 12.5 mm  |
| from D to axis         | 37.5 mm  |
| Receiving optics & PMT |          |
| focal length           | 50 mm    |
| aperture               | 200 μm   |
| bandwidth              | 100 MHz  |
| Measuring volume       |          |
| resolution X, Y        | ≤ 300 μm |
| Z                      | ≤ 2 mm   |
| fringe spacing:        |          |
| CH1, CH2               | 10.75 μm |
| CH3                    | 7.65 μm  |

Table 2. System specification

|                                   |                               |
|-----------------------------------|-------------------------------|
| Carrier frequencies i. e.         |                               |
| Bragg cell frequencies            | 45 MHz, 55 MHz, 65 MHz        |
| Frequency shifts:                 |                               |
| CH <sub>1</sub> , CH <sub>2</sub> | 10 kHz to 2 MHz (8 steps)     |
| CH <sub>3</sub>                   | ±10 kHz to ± 2 MHz (16 steps) |
| Dynamic range:                    |                               |
| V <sub>1</sub> , V <sub>2</sub>   | -20.50 m/s ~ +64.50 m/s       |
| V <sub>3</sub>                    | -30.60 m/s ~ +30.60 m/s       |

## 3 误差分析与测量精度

### 3.1 三维速度分量的坐标变换

被测速度分量  $V_1, V_2, V_3$  是由信号处理器输出的频率测量值  $f_1, f_2, f_3$  通过下面的关系式计算得到:

$$V_i = k_i(f_i - f_{s_i}), \quad k_i = \lambda/2 \sin(\theta_i/2), \quad (i = 1, 2, 3) \quad (1)$$

式中  $f_{s_i}(i = 1, 2, 3)$  为各通道实际的频移量是已知值； $\lambda$  为激光波长； $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  分别为光束 B 与 A、光束 C 与 A、光束 D 与 A 在测量点处的交角。由图 2 可以看到，速度分量  $V_1, V_2, V_3$  是非正交的，通过坐标变换可将它们转换直角坐标分量  $V_x, V_y, V_z$ ：

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} & 0 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 0 \\ \text{ctg } \varphi/\sqrt{2} & -\text{ctg } \varphi/\sqrt{2} & \text{csc } \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中  $\varphi$  是坐标轴  $V_z$  与  $V_3$  之间的夹角。将(1)式代入，得

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1/\sqrt{2} & -k_2/\sqrt{2} & 0 \\ k_1/\sqrt{2} & k_2/\sqrt{2} & 0 \\ -k_1 \text{ctg } \varphi/\sqrt{2} & -k_2 \text{ctg } \varphi/\sqrt{2} & k_3 \text{csc } \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 - f_{s1} \\ f_2 - f_{s2} \\ f_3 - f_{s3} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中所包含的变换矩阵元素值完全由光学系统的参数决定。由表 1 所给出的光学参数计算出变换矩阵如下

$$\begin{bmatrix} 7.60 & -7.60 & 0 \\ 7.60 & 7.60 & 0 \\ -91.36 & -91.36 & 90.24 \end{bmatrix} \text{ (m/s/MHz).}$$

### 3.2 误差分析与测量精度

对于单光轴三维激光多普勒测速仪，人们最关心的是沿光轴方向速度分量的测量精度。在本文研究的三维激光多普勒测速仪中，轴向速度分量  $V_z$  是由测得的速度分量  $V_1, V_2, V_3$  合成得出：

$$V_z = -V_1 \text{ctg } \varphi/\sqrt{2} - V_2 \text{ctg } \varphi/\sqrt{2} + V_3 \text{csc } \varphi \quad (4)$$

因此， $V_1, V_2$ ，和  $V_3$  的测量误差都会影响  $V_z$  的测量精度。如果设  $V_1, V_2, V_3$  的测量标准偏差分别为  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ，则轴向分量的测量标准偏差  $\sigma_z$  为

$$\sigma_z^2 = (\partial V_z/\partial V_1)^2 \sigma_1^2 + (\partial V_z/\partial V_2)^2 \sigma_2^2 + (\partial V_z/\partial V_3)^2 \sigma_3^2 \quad (5)$$

如果三个通道采用相同精度的信号处理器，可以认为  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma$ 。由(4)、(5)两式可推导出  $\sigma_z$  的表达式：

$$\sigma_z/\sigma = (1 + 2 \text{ctg}^2 \varphi)^{1/2}. \quad (6)$$

$\sigma_z/\sigma$  随  $\varphi$  的变化关系曲线如图 6 所示。很显然，轴向分量的测量标准差  $\sigma_z$  总是大于直接测量速度分量的标准差，而且受  $V_3$  与  $V_z$  之间夹角  $\varphi$  的影响很大。对于表 1 中的参数，计算出的  $\sigma_z$  比  $\sigma$  大十倍左右，这表明轴向分量  $V_z$  的测量精度比其它分量低很多。

提高轴向分量测量精度的直接方法是使用具有较高频率测量精度的多普勒信号处理器。另外一种有效的方法是加大  $V_3$  与  $V_z$  的夹角  $\varphi$ ，这可以由更换短焦距的发射透镜来实现。基于这种考虑，实际系统中另外设计

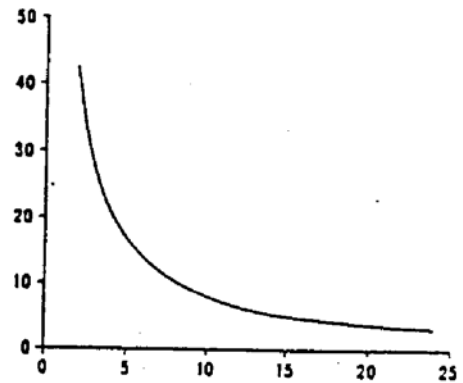


Fig. 6 Variation of the standard deviation of the on-axis velocity component with the angle between  $V_3$  and  $V_z$

了焦距为 150 mm 的发射透镜.

**结 论** 本文研究了一种利用频移分离方法构成的新型三维多普勒测速仪. 该仪器仅使用单色 He-Ne 激光器和单只光电探测器就实现了三维速度分量的同时测量. 系统中引入光学频移可以消除各速度分量的“方向模糊”. 分析表明, 该三维激光多普勒测速仪系统的轴向速度分量的测量精度与另两分量相比要低很多, 这可以通过改变光学参数, 比如发射透镜的焦距, 而使轴向分量的测量精度得以提高.

### 参 考 文 献

- [1] F. Durst, A. Melling, J. H. Whitelaw, *Principles and Practice of Laser Doppler Anemometry*. Academic press, New York (1981)
- [2] L. E. Drain, *The Laser Doppler Technique*. John Wiley & Sons, Chichester(1980)
- [3] J. Hallermeier, Design considerations for a 3-D laser Doppler velocimeter for studying gravity waves in shallow water. *Appl. Opt.*, 1973, 12 : 294~300
- [4] T. Sato, O. Sasaki, New 3-D laser Doppler velocimeter using cross-bispectral analysis. *Appl. Opt.*, 1978, 17 : 3890~3893
- [5] A. Boutier, Three dimensional laser velocimetry; A review. in *Proceeding of 2nd International Symposium on Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics*, Lisbon(1984)
- [6] P. Buchave, Three-component LDA measurements. *DISA Information*, 1984, 29 : 3~9
- [7] LDV System 9100-11, Brochure (1984), Thermo System Inc. ,

## Three-Dimensional Laser Doppler Velocimeter Using Frequency Shift Separation

Li En-bang

(Department of Thermal Energy Engineering Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(Received 1993; revised 1993)

**Abstract** A new three-dimensional laser Doppler velocimeter (3D LDV) by only using frequency shift separation method has been developed. Simultaneous measurements of three velocity components are realized by a single color He-Ne laser and one photo-detector with simple transmitting and receiving optics. The signals corresponding to different velocity components are distinguished by three different optical frequency shifts introduced by three Bragg cells, and separated by band-pass filters. A novel and simple four-beam transmitting optics which contains three sets of dual-beam LDV systems is proposed, and the design specification of the 3D LDV system is presented. The measuring accuracy of the on-axis component is also discussed in this paper.

**Key words** laser Doppler velocimetry, three-dimensional velocity measurement, optical frequency shift, acousto-optic (Bragg) cell.