

二维计数跟踪型激光多普勒测速研究*

刘昌文 刘 杰 孙其超 王仕康

(天津大学机械工程学院汽车工程系 天津 300072)

提要 二维计数跟踪型激光多普勒测速系统利用两个计数跟踪光电混合反馈环路来分离并测量速度的二维分量。采用计数跟踪方法后,光电信号的带宽被压缩了至少一个数量级,使得该系统不仅工作稳定可靠,而且结构简单、成本低廉。详细讨论该系统的工作原理、构成,并给出实验研究结果。

关键词 激光多普勒测速,二维激光测速,计数型信号处理,频率跟踪,计数跟踪技术

1 引 言

与采用分色^[1]、分偏振^[2]或固定频移分频段^[3]方案构成的二维激光多普勒测速仪(LDA)系统相比,采用了带宽压缩技术的光电混合反馈(OEHF)二维激光多普勒测速系统^[4]具有结构简单和制作工艺要求低等特点。但是 OEHF-LDA^[5]是一个广义的频率跟踪器,存在信号脱落问题^[6],特别是当压控振荡器的频率到达 60MHz 后^[4,5],脱落保护门切换时的微小电压变化将引起较大的光学频率变动,一方面影响仪器的精度,另一方面造成两路信号频率交混,仪器失锁,使得二维 OEHF-LDA 并不实用。

计数跟踪技术兼有传统 LDA 计数型信号处理方法的工作稳定和频率跟踪方法的噪声滤除能力强等优点^[7],是一种实用的 LDA 带宽压缩技术,应用它构成二维计数跟踪型 LDA 系统既能保持二维 OEHF-LDA 结构简单成本低的优势,又兼备工作稳定和信噪比高的特点,具有良好的开发应用前景,可望满足国内对二维 LDA 仪器的普遍需要。

2 二维计数跟踪型激光测速系统的构成原理

图 1 所示是二维计数跟踪型 LDA 系统的工作原理图。频移分束器 0 由声光偏转器承担,He-Ne 激光束经过它后被分成+1 级和 0 级衍射光。频率增加了 f_0 的+1 级衍射光经平移棱镜 1 分离后作为构成二维 LDA 系统的公共光束——光束 0。频率不变化的 0 级光经过由半反镜 BS, 平移棱镜 2, 全反镜 M 组成的分束装置后得到另外两束光;为了构成计数跟踪环路,同时也为了辨别速度的正反方向(二维 LDA 所必须的),这两束光还需经过频移器 1 和 2, 频率分别增加 f_1 和 f_2 后再作为组成二维 LDA 系统的另外两束激光——光束 1 和光束 2。光束 0, 1 和 2 由发射透镜聚焦形成二维 LDA 的测量点。光束 0 和 1 组成的差动 LDA 光路反映速度

* 天津市青年科学基金资助项目(963701211)。

V 在测量方向 1 上的投影 $V_1^{[6]}$, 与由固定带宽计数器 1, 频移控制器 1 和二维差分频移驱动源构成的计数跟踪环路 1^[7] 结合, 可测量出 V_1 的大小和正负; 光束 0 和 2 反映 V 在测量方向 2 上的投影 $V_2^{[6]}$, 与由固定带宽计数器 2, 频移控制器 2 和二维多功能驱动源构成的计数跟踪环路 2 结合, 可测量 V_2 的大小和正负。

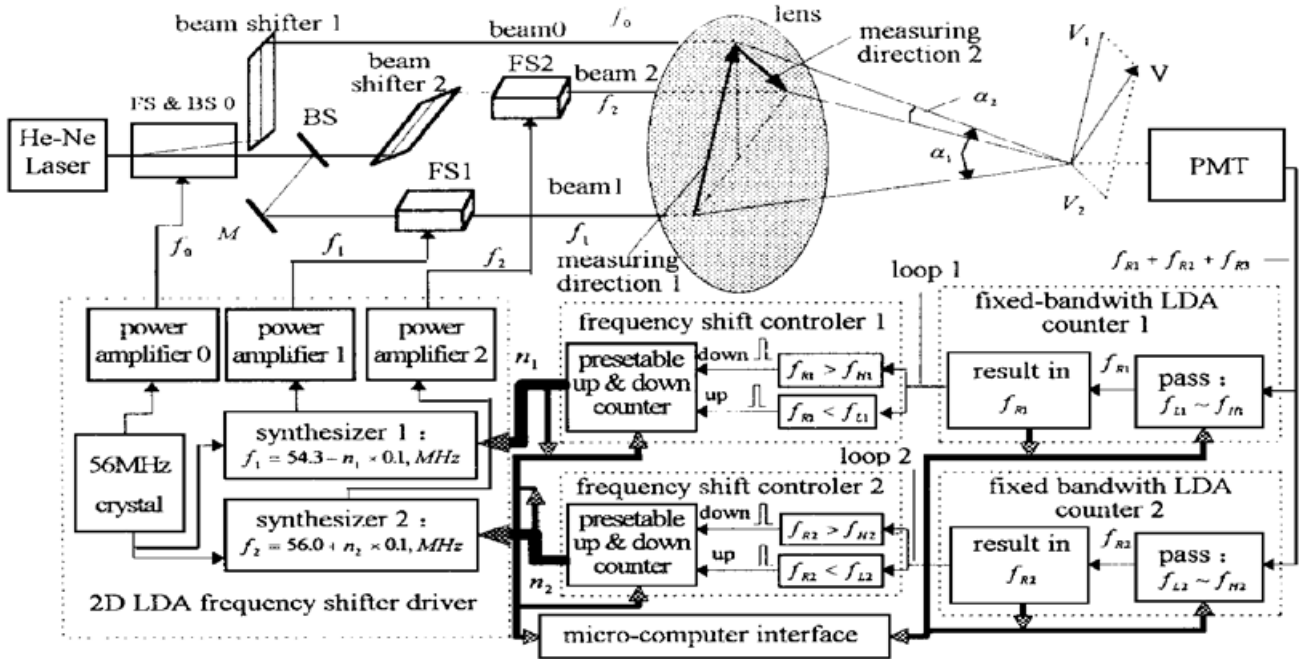


图 1 二维计数跟踪型 LDA 系统原理图

Fig. 1 Schematic of two-dimensional counting and tracking laser Doppler anemometry

BS: beam splitter; FS: frequency shifter

根据光学差拍原理^[6], 图 1 所示的 LDA 系统, 光电转换器输出信号将包含三个主要频率成分, 它们分别是

$$f_{R1} = (f_1 - f_0) - 2V_1 \sin \frac{\alpha_1}{2} / \lambda = f_{S1} - f_{D1} \tag{1}$$

$$f_{R2} = (f_0 - f_2) - 2V_2 \sin \frac{\alpha_2}{2} / \lambda = f_{S2} - f_{D2} \tag{2}$$

$$f_{R3} = (f_1 - f_2) - 2V_1 \sin \frac{\alpha_1}{2} / \lambda - 2V_2 \sin \frac{\alpha_2}{2} / \lambda = f_{S1} + f_{S2} - f_{D1} - f_{D2} = f_{R1} + f_{R2} \tag{3}$$

其中, $f_{S1} = f_1 - f_0$ 为光束 1 相对于光束 0 的光学频移量; $f_{S2} = f_0 - f_2$ 为光束 0 相对于光束 2 的光学频移量; $f_{D1} = 2V_1 \sin \frac{\alpha_1}{2} / \lambda$ 为被测速度 V 在测量方向 1 上的多普勒频率; $f_{D2} = 2V_2 \sin \frac{\alpha_2}{2} / \lambda$ 为被测速度 V 在测量方向 2 上的多普勒频率。

计数跟踪型二维 LDA 中, 有效的频率成分 f_{R1} 和 f_{R2} 分别由计数型 LDA 信号处理器 1 和 2 中的固定带宽滤波器选出, 其数值由频率分析单元精确测得。 f_{R1} 和 f_{R2} 值送入光学频移控制器 1 和 2 进行分析判别: 当高于所设上限频率 f_{1H} 或 f_{2H} 时光学频移档次 n_1 或 n_2 减小 1, 而当低于下限频率 f_{1L} 或 f_{2L} 时频移档次增加 1。 n_1 和 n_2 作用到由混频锁相原理构成的二维差分频移驱动源, 控制驱动三只光学频移器的三路功率信号, 得到与 n_1, n_2 对应的光学频移量 f_{S1} 和 f_{S2} , 其中 $f_{S1} = n_1 \times 0.1$ (MHz), $f_{S2} = 1.7 + n_2 \times 0.1$ (MHz)。光学频移与散射粒子运动引起的多普勒频率混合后由光电探测器转换成电信号, 再作用到固定带宽计数器, 从而形成两个

闭合的计数跟踪控制环路。闭环控制的结果使光学频移量 f_{s1} 和 f_{s2} 随被测速度变化, 而维持光电信号频率 f_{R1} 和 f_{R2} 只在设计者选定的带宽内变化, 反映速度二维分量值的 f_{D1} 或 f_{D2} 由 f_{s1} 或 f_{s2} 及对应的 f_{R1} 或 f_{R2} 计算得到, 如图 2 所示。可见光电信号的带宽与被测速度变化范围相比被大大压缩了, 压缩的倍数等于光学频移的取值档数。我们现在设计的二维计数跟踪型 LDA, 光学频移档次有 16 个, 光电信号的带宽就可压缩 16 倍, 再适当地改进频移驱动源结构, 光学频移档次可高达几十个, 几百个, 甚至更多, 那样光电信号的频率将被压缩更多。

实验系统中, 计数跟踪环路 1 和 2 的参数选取为: $f_{L1} = 940 \text{ kHz}$, $f_{H1} = 1120 \text{ kHz}$, $f_{L2} = 2140 \text{ kHz}$, $f_{H2} = 2320 \text{ kHz}$ 。

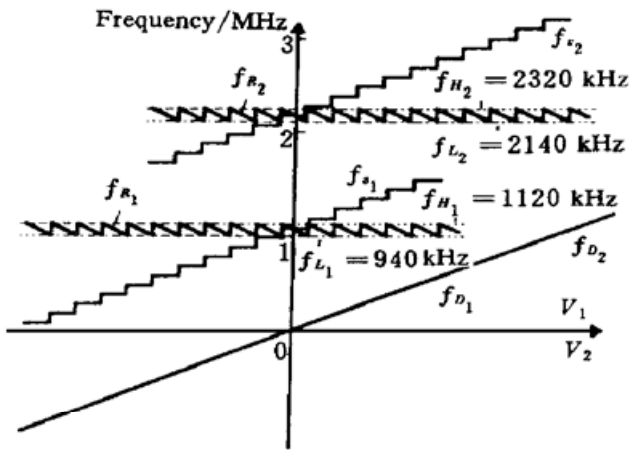


图 2 二维计数跟踪型 LDA 中频率随速度的变化

Fig. 2 Frequency vs velocity diagram of 2D counting and tracking LDA

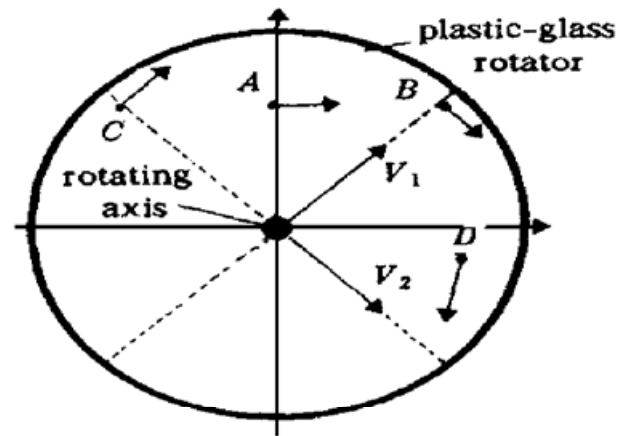


图 3 二维速度参考正方向 V_1 和 V_2 及各测量点在转盘表面上的分布

Fig. 3 The positive direction of V_1 & V_2 , and the measurement positions on the rotating surface

3 二维计数跟踪型 LDA 的实验研究

为考查二维计数跟踪型 LDA 的性能我们特设计了一套原理性实验: 以直流电机带动的有机玻璃转盘表面的切向运动速度为被测对象。因转盘表面不同区域内切向速度的大小和方向均不相同, 人为地较大幅度改变转速, 可很好地考查二维计数跟踪型 LDA 的性能。图 3 所示是二维计数跟踪型 LDA 的二维速度测量参考正方向和各测量点在转盘表面上的分布。

图 4 所示为大范围改变转速时用二维计数跟踪型 LDA 实测得到的各测量点处的二维速度变化曲线 f_{D1} , f_{D2} , 以及对应的两环路光学频移量 n_1 , n_2 和光电信号频率 f_{R1} , f_{R2} 曲线。

实验中, 测量不同点时速度的变化规律不同(人为随机改变), 各个曲线的变化规律各异, 但是, 都表现出一个共同的特点, 那就是两个环路的光学频移量跟随速度大范围变化, 而光电信号的频率分别在各自对应的较窄的固定带宽内变化, 这正是该测速系统设计所期望的。

再仔细观察图 3 与图 4。A 点: 速度方向基本水平, 略偏右上(偏 V_1 方向), 实测的速度在 V_1 和 V_2 方向的投影基本相等, 变化同步, 只是 V_1 略大于 V_2 ——只有速度值较大时才能从图 4(a) 中分辨出。B 点: 速度方向基本平行于 V_2 (垂直于 V_1), 略偏 V_1 负方向; 实测的 V_2 变化很大, 而 V_1 变化很小(在 0 值附近), 且与 V_2 变化趋势相反。C 点: 速度方向与 B 点不同, 它几乎平行于 V_1 (垂直于 V_2), 稍微偏 V_2 负方向, 实测的 V_1 变化很大, 而 V_2 基本为 0, 曲线中很难看出它

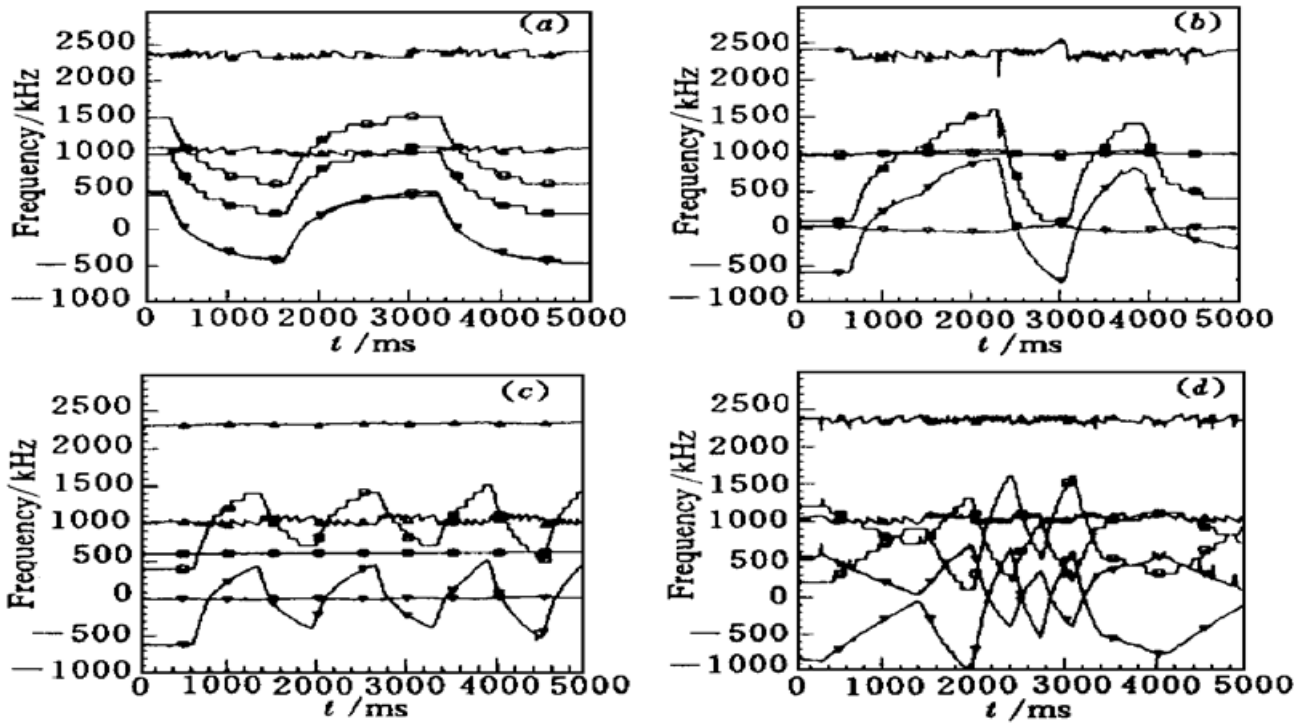


图4 二维计数跟踪型 LDA 实测得到的转盘表面不同位置处的速度变化规律曲线

(a), (b), (c), (d) 分别对应图3中 A, B, C, D 各点的情况

Fig.4 Velocity curves at different positions got by using 2D counting and tracking LDA

(a), (b), (c), (d) correspond to the positions A, B, C, D shown in Fig.3, respectively

□: $n_1 \times 100$, \triangle : f_{R1} , ∇ : f_{D1} ; ■: $n_2 \times 100$, \blacktriangle : f_{R2} , \blacktriangledown : f_{D2}

的变化及与 V_1 相反的变化趋势。 D 点: 速度方向靠近垂直方向(向下), 略偏左(偏 V_1 方向); 实测的速度在 V_1 方向上的投影大于在 V_2 方向的投影, 两者的变化趋势相反。由此可见, 二维计数跟踪型 LDA 的测量结果与实际完全相符, 证实二维计数跟踪型 LDA 的研究是成功的。

4 关于测量精度、误差及稳定性的讨论

影响二维计数跟踪型 LDA 测量精度的主要因素有三个: (1) 光学频移改变时可能引起的 LDA 光路参数 α 的变化, (2) 光学频移量的稳定性, (3) 光电信号测量误差。关于(1), 文献 [5] 进行了分析, 我们也做过计算, 它的影响小于 1%。光学频移驱动源中采用了频率合成技术, 不是直接稳定高频信号 f_0, f_1, f_2 , 而是利用锁相原理控制 f_{s1}, f_{s2} , 使之与所需频移档次对应, 经实测 f_{s1}, f_{s2} 的偏差在 0.1 kHz 数量级, 由它带来的测量误差低于 1 mm/s。LDA 计数型信号处理器中高频时钟频率暂取 100 MHz, 在高速时被测量的多普勒信号脉冲周数^[6] N 取 32, 当 $f_{R2} = 2320$ kHz 时的测量误差为 ± 0.8 kHz; 在低速时 N 可取 128, 光电信号频率测量误差 ± 0.2 kHz。由以上分析可知, 二维计数跟踪型 LDA 系统的测量精度完全能达到一般 LDA 的精度要求——满量程的 1%。

二维计数跟踪型 LDA 工作时可分为三种不同的状态: 初始光学频移档次的获取、频移档次固定时的稳定测量和频移档次切换的过渡状态。为了得到正确的初始光学频移档次, 我们采用了微机智能控制技术。频移档次固定时, 等同于开环 LDA, 不存在稳定性问题。频移档次切换时, 频移驱动源需要一个稳定时间, 此时禁止计数型信号处理器, 等待约 0.1 ms。影响稳定性的真正因素是噪声, 它的干扰可能使计数型得到的光电信号频率高于或低于所设上限频率或低于

下限频率,造成误换档。二维计数跟踪型 LDA 中光电信号的带宽较窄,信号处理器中可以使用窄带滤波器,能大大提高噪声滤除能力,这就是计数跟踪型 LDA 噪声适应能力强的原因。即便这样,我们还是在频移控制器中增设了附加的判别功能,以进一步抵抗噪声的干扰,如光电信号的频率超出所设范围不大于频移间隔(本系统为 100 kHz)的二倍时才识为有效的换档信号;还可增设只有有效换档信号连续出现两次或三次,才产生换档脉冲等更严格的判据。另外,二维计数跟踪型 LDA 的光电信号有一定的宽度,二路信号间距较大,一次误换档不会导致环路瘫痪;即使环路瘫痪了,微机自动控制单元检测到后,还能重新调节整个仪器,使之正常工作。对凸扩水槽^[2,4]和化工搅拌设备流场进行的实测考察,表明二维计数跟踪型 LDA 的工作稳定性很好。

参 考 文 献

- 1 George R. Grant, Kenneth L. Orloff. Two-color dual-beam backscatter laser Doppler velocimeter. *Appl. Opt.*, 1973, **12**(12): 2913~ 2916
- 2 Shen Xiong, Zhang Jiayi, Yu Hesheng *et al.*. Two component LDV system with dual-differential acousto-optical frequency shifting and its applications. *Acta Mechanical Sinica* (力学学报), 1986, **18**(5): 414~ 420 (in Chinese)
- 3 W. M. Farmer, J. O. Hornkohl. Two-component, self-aligning laser vector velocimeter. *Appl. Opt.*, 1973, **12**(11): 2636~ 2640
- 4 Li Enbang. Two component LDA with optic-electro-hybrid feedback. *Chinese Journal of Scientific Instrument* (仪器仪表学报), 1994, **15**(4): 373~ 377 (in Chinese)
- 5 Xiaoming Guo, Shikang Wang, Changwen Liu *et al.*. A new LDA system utilizing the optic-electro-hybrid feedback technique. *J. Phys. E (Meas. Sci. Technol.)*, 1990, **1**(3): 265~ 271
- 6 L. E. Drain. *The Laser Doppler Technique*. John Wiley & Son, 1980
- 7 Li Enbang, Liu Changwen, Liu Jie *et al.*. Investigation on intanegen counting and tracking laser Doppler anemometry. *Chinese Journal of Scientific Instrument* (仪器仪表学报), 1995, **16**(2): 198~ 200 (in Chinese)

Investigation on Two-dimensional Counting and Tracking Laser Doppler Anemometry

Liu Changwen Liu Jie Sun Qichao Wang Shikang

(Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract In this paper, a newly developed two-dimensional Laser Doppler anemometry (2D-LDA) is reported, in which two components of the velocity are distinguished and measured by two closed optic-electro-hybrid-feedback loops containing the counting and tracking technique. As the bandwidth of photocurrent is compressed more than one order, the new 2D LDA system is simplified and lower cost besides the stable and reliable operation. Experimental study has been carried out to confirm the working principle of the system.

Key words laser Doppler anemometry, two-dimensional laser Doppler anemometry, burst counting signal processor, frequency tracking, counting-tracking technique