

双纵模 He-Ne 激光器的多普勒测速系统

刘长青¹, 聂晓明², 傅杨颖², 周 健²

- (1. 湖南文理学院 物理与电子科学学院, 湖南 常德 415000;
2. 国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 为了进行高速及超高速测量, 提出了一种基于双纵模 He-Ne 激光器的多普勒测速结构。阐述了双纵模激光多普勒测速的基本原理, 设计了系统的光路结构, 并运用数字滤波、数字自相关技术对多普勒信号进行处理。理论分析与实验结果表明: 双纵模激光多普勒测速系统利用相邻两个纵模的拍频作为基频大大减小了比例因子, 解决了系统进行高速及超高速测量的难题; 数字滤波去除直流基底和部分噪声; 自相关技术进一步抑制噪声, 提高了信噪比, 便于精确提取多普勒频率。测量了高速转盘上待测点切向运动的速度, 测量结果的重复性精度优于 0.8%。

关键词: 激光多普勒测速仪; 双纵模; 高速; 比例因子; 数字自相关

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)04-0921-04

Laser Doppler velocimeter based on dual-longitudinal-mode He-Ne laser

Liu Changqing¹, Nie Xiaoming², Fu Yangying², Zhou Jian²

- (1. College of Physics and Electronic Science, Hunan College of Arts and Science, Changde 415000, China;
2. College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to make the measurement for high speed and super speed, a novel structure of Doppler velocimeter based on the dual-longitudinal-mode He-Ne laser was proposed. The principle of the dual-longitudinal-mode laser Doppler velocimeter was expounded while the optical schematic of the system was designed. And the Doppler signal was processed using the digital filtering and autocorrelation. Results of the theory analysis and experiment show that the dual-longitudinal-mode laser Doppler velocimeter reduced the scale factor highly using the beat frequency of the adjacent two longitudinal-modes as the basic frequency and solved the problem of high speed and super speed measurement; basement and part of noise are get rid of with the help of the digital filter; noise is restrained further with the method of digital autocorrelation so that the signal-to-noise ratio is raised and the Doppler frequency is extracted easily. The tangential velocity of the measured point in the rotating disc was obtained and the repeatability of the results was good to 0.8%.

Key words: laser Doppler velocimeter; dual-longitudinal-mode; high speed; scale factor; digital autocorrelation

收稿日期: 2012-08-16; 修订日期: 2012-09-20

基金项目: 湖南省科技厅科技计划项目(2010FJ4141); 湖南文理学院科研基金(53400001)

作者简介: 刘长青(1976-), 男, 讲师, 硕士, 主要从事图像处理、模式识别方面的研究。Email: cqliu1976@163.com

0 引言

自从 1964 年 Yeh Y 和 Cummings H Z 成功利用激光多普勒效应测量出管道内流体的流速后^[1],激光多普勒技术就以测量精度高、响应时间短、空间分辨率高、测量范围宽及非接触测量等优点广泛应用于水利、医学、航空、动力等领域^[2-8]。

激光多普勒测速仪是利用多普勒频率与速度的线性关系,通过探测多普勒频率来测量物体运行速度的。通常,无论是双光束差动模式还是参考光模式,传统的激光多普勒测速仪都无法对高速或超高速运动物体进行测量,从而大大限制了其在航空航天等领域中的应用。这是因为当待测速度为 1 m/s 时,多普勒频率为兆赫兹量级,所以当物体运动的速度为 100 m/s 或 1000 m/s 时,多普勒信号已变成中高频甚至是高频信号(多普勒频率高达 $10^8 \sim 10^9$ Hz 量级),信号处理变得非常困难。

针对高速及超高速测量,先前国内外已有学者做了相关研究,总体而言有两种方案:一是基于直接光谱技术,利用法布里-珀罗干涉仪进行直接测量谱线的频移^[9-10];二是利用主、辅两只激光器产生双频激光构建多普勒测速系统,以双频激光的差频为基频降低比例因子,从而降低多普勒信号的频率^[11]。显然,这两种方案都有各自明显的缺点。前者,谱线的分辨率有限决定了系统的测量精度不够高;后者,系统光路的准直与调整非常严格,不利于光路搭建。另外,这种方案产生双频激光的频差仍然较大(几十千兆赫兹),比例因子减小的程度有限。因此,为了解决高速及超高速测量的问题,文中提出基于双纵模 He-Ne 激光器构建激光多普勒测速系统并对其进行理论和实验研究。

1 基本原理

以参考光模式为例,传统激光多普勒测速系统中多普勒频率的表达式为^[12]:

$$f_D = \frac{2v \cos \theta}{\lambda} \quad (1)$$

式中: v 为待测速度; λ 为激光的波长; θ 为入射光与待测物体运动速度的夹角。通常将 $2 \cos \theta / \lambda$ 称为比例因子。显然对于普通的单频激光器而言,比例因子约为 10^6 量级,所以当待测物体高速运动时,多普勒信号的频率高达 $10^8 \sim 10^9$ Hz 量级,无法进行处理。

为了解决高速及超高速测量的问题,文中提出了双纵模激光多普勒测速结构,其光路如图 1 所示。双纵模 He-Ne 激光器的输出功率约为 1.5 mW,它输出的激光束中包含偏振方向相互垂直的两个模式,偏振片的偏振方向与两个模式的偏振方向各成 45° 。光束通过偏振片后被分束器分成强度相等的两束光,一束经棱镜反射直接入射到其中一个雪崩二极管的光敏面上,为参考光;另一束入射到转动圆盘的侧面,各个方向都有散射光,其中沿原方向返回的散射光经过分束器后入射到另一个雪崩二极管的光敏面上,为信号光。两个雪崩二极管输出的两路信号由混频器进行混频后由数据采集卡采集并送至 PC 机处理。

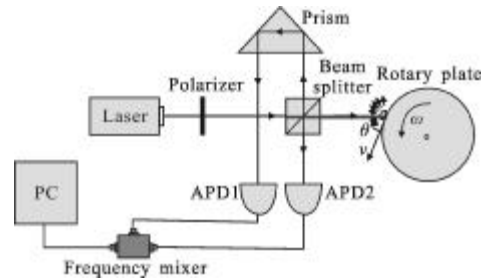


图 1 双纵模激光多普勒测速系统的光路结构

Fig.1 Optical schematic of dual-longitudinal-mode laser Doppler system

由于双纵模激光器出射一对偏振方向相互垂直的线偏振光,参考光束的电场可表示为:

$$\mathbf{E}_r(t) = \mathbf{E}_1 e^{-i[2\pi\nu_1 t - \phi_1(t)]} + \mathbf{E}_2 e^{-i[2\pi\nu_2 t - \phi_2(t)]} \quad (2)$$

式中: ν_1 和 ν_2 为相邻两个纵模的频率; \mathbf{E}_1 和 \mathbf{E}_2 分别为两个频率成分电场的振幅; $\phi_1(t)$ 和 $\phi_2(t)$ 分别为两个频率成分电场的初始随机相位。因此,探测器 1 输出的参考电流为:

$$\begin{aligned} I_r(t) &= G_r \overline{\mathbf{E}_r(t) \cdot \mathbf{E}_r(t)} = G_r \{ \mathbf{E}_1 e^{-i[2\pi\nu_1 t - \phi_1(t)]} + \mathbf{E}_2 e^{-i[2\pi\nu_2 t - \phi_2(t)]} \} \cdot \\ & \{ \mathbf{E}_1 e^{i[2\pi\nu_1 t - \phi_1(t)]} + \mathbf{E}_2 e^{i[2\pi\nu_2 t - \phi_2(t)]} \} = \\ & G_r \{ \mathbf{E}_1^2 + \mathbf{E}_2^2 + \mathbf{E}_1 \mathbf{E}_2 e^{i[2\pi(\nu_2 - \nu_1)t + \phi_1(t) - \phi_2(t)]} + \\ & \mathbf{E}_1 \mathbf{E}_2 e^{-i[2\pi(\nu_2 - \nu_1)t + \phi_1(t) - \phi_2(t)]} \} = \\ & G_r \{ \mathbf{E}_1^2 + \mathbf{E}_2^2 + 2\mathbf{E}_1 \mathbf{E}_2 \cos[2\pi(\nu_2 - \nu_1)t + \phi] \} \quad (3) \end{aligned}$$

式中: $\phi = \phi_1(t) - \phi_2(t)$; G_r 为与探测器 1 量子效率有关的常数。

基于多普勒效应,信号光的电场可表示为:

$$\mathbf{E}_s(t) = \mathbf{E}_1 e^{-i[2\pi(\nu_1 + f_{D1})t - \phi_1(t) + \Delta\phi_1]} + \mathbf{E}_2 e^{-i[2\pi(\nu_2 + f_{D2})t - \phi_2(t) + \Delta\phi_2]} \quad (4)$$

式中: $f_{D1} = \frac{2v \cos \theta}{\lambda_1}$ 和 $f_{D2} = \frac{2v \cos \theta}{\lambda_2}$ 分别为两个频率成分

各自的多普勒频移; $\Delta\phi_1$ 和 $\Delta\phi_2$ 分别为两个频率成分各自随机相位的变化量。则探测器 2 输出的信号电流为:

$$I_s(t) = G_s E_s(t) \cdot \overline{E_s(t)} = G_s \{ E_1 e^{-i[2\pi(v_1 + f_{D1})t - \phi_1(t) + \Delta\phi_1]} + E_2 e^{-i[2\pi(v_2 + f_{D2})t - \phi_2(t) + \Delta\phi_2]} \} \cdot \{ E_1 e^{i[2\pi(v_1 + f_{D1})t - \phi_1(t) + \Delta\phi_1]} + E_2 e^{i[2\pi(v_2 + f_{D2})t - \phi_2(t) + \Delta\phi_2]} \} = G_s \{ E_1^2 + E_2^2 + 2E_1 E_2 \cos[2\pi(v_2 - v_1 + f_{D2} - f_{D1})t + \phi'] \} \quad (5)$$

式中: $\phi' = \phi_1(t) - \phi_2(t) - \Delta\phi_1(t) + \Delta\phi_2(t)$; G_s 为与探测器 2 量子效率有关的常数。

两路信号送入混频器进行混频,混频器无法响应高频信号,因此去除直流信号后混频器的输出信号为:

$$I_{mix}(t) = 2A \cos(2\pi f_D' t + \Delta\phi) \quad (6)$$

其中

$$\begin{cases} A = G_1 G_s E_1^2 E_2^2 \\ f_D' = f_{D2} - f_{D1} = \frac{2v \cos\theta}{\lambda_1} - \frac{2v \cos\theta}{\lambda_2} - \frac{2v \cos\theta \Delta v}{c} \\ \Delta\phi = \phi' - \phi \\ \Delta v = v_2 - v_1 \end{cases} \quad (7)$$

由公式(7)中多普勒频率的表达式可知,双纵模系统的多普勒频率与传统多普勒频率相类似,它依然与待测的运动速度成正比。所不同的是,纵模间隔 Δv 比光频要小得多,比例因子 $\frac{2\cos\theta\Delta v}{c}$ 较小,当待测物体高速运动时多普勒信号的频率仍然在千赫兹以下量级,便于多普勒信号的进一步处理。在双纵模激光多普勒测速系统中,通过探测多普勒频率即可求出待测物体的运动速度:

$$v = \frac{c f_D'}{2 \cos\theta \Delta v} \quad (8)$$

考虑到激光器的纵模间隔为:

$$\Delta v = \frac{c}{2L} \quad (9)$$

式中: L 为激光器谐振腔的长度。结合公式(8)和(9)可得,待测速度与多普勒频率的关系式为:

$$v = \frac{L f_D'}{\cos\theta} \quad (10)$$

2 实验结果与分析

根据图 1 所示的光路结构,利用双纵模 He-Ne 激光器构建激光多普勒测速系统,测量高速转动转盘侧面上待测点切向运动的速度。实验中使用的是 632.8 nm 双纵模 He-Ne 激光器,腔体材料为热膨胀系数较小的微晶玻璃,腔长 160 mm,由压电陶瓷

PZT 控制腔长来稳频,其拍频稳定度为 3.3×10^{-6} 。由公式(9)计算可得纵模间隔为 937 MHz。图 2 为相邻两个纵模的拍频信号及其频谱,可以看出,一方面拍频信号是一个稳定的近似理想的正弦信号;另一方面其频谱中峰值谱对应的频率为 937 MHz,这与上述理论计算的结果完全吻合。

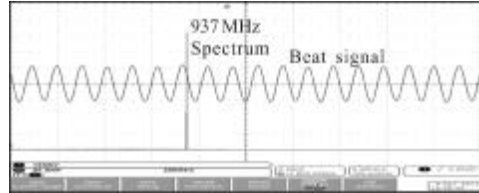


图 2 两纵模的拍频信号及其频谱

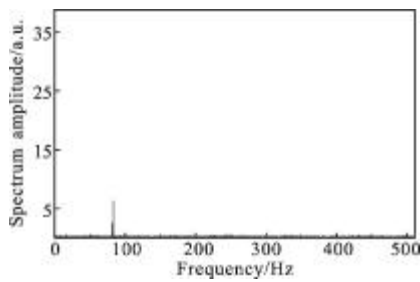
Fig.2 Beat signal of two longitudinal modes and its Fourier spectrum

图 3 为转盘高速转动时测得的一组实验结果。可以看出,原始的多普勒信号中除了包含多普勒频率项,还包含直流信号,并且直流信号的幅度比多普勒信号还要强。为了便于提取多普勒频率,对原始的多普勒信号进行了高通滤波,高通滤波后直流信号被滤除(如图 3(b)所示),多普勒信号的频率为 81.5 Hz。为了进一步减小噪声的影响,提高多普勒信号的信噪比,文中采用了数字自相关技术^[13],对高通滤波后的多普勒信号进行自相关处理,结果如图 4 所示。可以看出,自相关后信号的频谱中噪声被进一步的抑制,数字自相关技术大大提高了多普勒信号的信噪比,而多普勒信号的频率没有发生改变,仍然是 81.5 Hz。另外,根据公式(10)计算可得待测点的运动速度为:

$$v = \frac{L f_D'}{\cos\theta} = \frac{0.16 \times 81.7}{\cos 65.7^\circ} = 31.68 \text{ m/s}$$

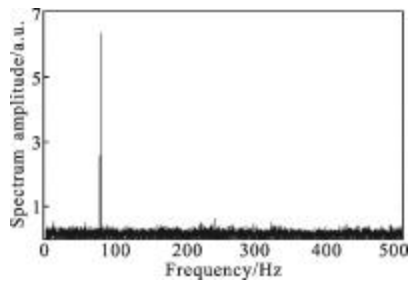
这里信号光与待测点切向运动速度的夹角为 65.7° 。对于传统的激光多普勒测速仪而言,如此高的速度对应的多普勒频率为几十兆赫兹甚至上百兆赫兹,而双纵模系统中对应的多普勒频率仅为几十赫兹。这一结果充分证实了双纵模激光多普勒测速系统大大减小了比例因子,使得高速甚至是超高速测量成为可能。

当转盘以一恒定速度旋转时,待测点切向运动的速度是不变的,采用此系统对其速度连续进行 10 次测量,结果如图 5 所示。不难看出,系统具有较高的稳定性,重复性精度优于 0.8%。因为系统中转盘的转速已经达到上限,所以转盘上待测点切向运动的速度也已经达到最大值。下一步需要选用速度上限更大的速度源进行实验,进一步检验双纵模测量系统的可行性、测量精度及稳定性。



(a) 原始多普勒信号的频谱

(a) Spectrum of original Doppler signal



(b) 高通滤波后信号的频率

(b) Spectrum of signal after high-pass filtering

图 3 滤波前后的实验结果

Fig.3 Results of experiment before and after filtering

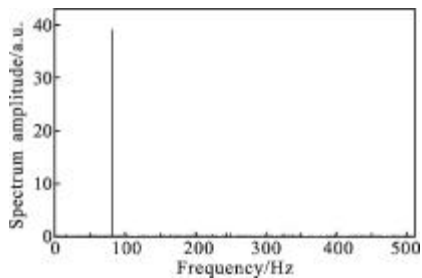


图 4 自相关后信号的频谱

Fig.4 Spectrum of signal after autocorrelation

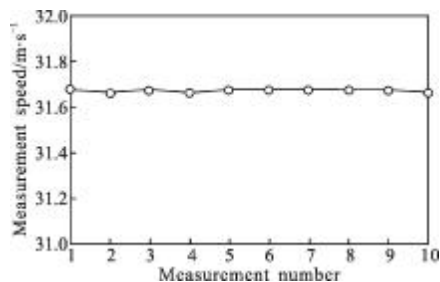


图 5 双纵模系统多次测量的结果

Fig.5 Results of the two longitudinal modes system for several times

3 结论

针对传统激光多普勒测速仪不能进行高速及超高速测量的问题,文中提出了一种双纵模激光多普勒

测量结构,它基于双纵模 He-Ne 激光器,利用相邻两个纵模的拍频作为基频构建测量系统,大大减小了系统的比例因子,使高速及超高速测量成为可能。实验结果表明这种方法切实可行,为激光多普勒技术在航空航天等领域中的应用奠定了坚实的基础。

参考文献:

- [1] Yeh Y, Cummings H Z. Localized flow measurements with a He-Ne laser spectrometer[J]. *Appl Phys Lett*, 1964, 176(4): 176-8.
- [2] René Skov Hansen, Christian Pedersen. All semiconductor laser Doppler anemometer at 1.55 μm [J]. *Optics Express*, 2008, 16(22): 18288-18295.
- [3] Rajan V, Varghese B, Leeuwen T G van. Effect of speckles on the depth sensitivity of laser Doppler perfusion imaging [J]. *Optics Express*, 2007, 15(17): 10911-10919.
- [4] Connelly M J, Szcówka P M, Jallapuram R, et al. Multipoint laser Doppler vibrometry using holographic optical elements and a CMOS digital camera [J]. *Optics letters*, 2008, 33(4): 330-332.
- [5] Zhong Ying, Zhang Guoxiong, Leng Changlin, et al. A differential laser Doppler system for one-dimensional in-plane motion measurement of MEMS [J]. *Measurement*, 2007, 40: 623-627.
- [6] Vuye C, Vanlanduit S, Guillaume P. Accurate estimation of normal incidence absorption coefficients with confidence intervals using a scanning laser Doppler vibrometer [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, 47: 644-650.
- [7] Zhou Jian, Yao Baoju, Long Xingwu. Research on transit broadening of laser Doppler signal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(5): 826-829. (in Chinese)
- [8] Zhou Jian, Wei Guo, Long Xingwu. Research on direction discrimination and low-speed measurement for laser Doppler velocimeter[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 632-638. (in Chinese)
- [9] Jin Guofan, Li Jingzhen. *Laser Measurement* [M]. Beijing: Press of Science, 1998: 512-513. (in Chinese)
- [10] Born M, Wolf E. *Principles of Optics*[M]. Beijing: Press of Science, 1978: 434.
- [11] Rosemary Diaz, Szechun Chan, Jiaming Liu. Lidar detection using a dual-frequency source [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(24): 3600-3602.
- [12] Zhou Jian, Long Xingwu. Research on laser Doppler velocimeter for vehicle self-contained inertial navigation system [J]. *Optics & Laser Technology*, 2010, 42(3): 477-483.
- [13] Zhou Jian, Long Xingwu, Wei Guo, et al. The application of digital correlation technology in laser Doppler velocimeter [J]. *Laser Journal*, 2009, 30(3): 28-29. (in Chinese)