

激光多普勒超低速测量*

郭继华

(清华大学现代应用物理系, 北京 100084)

徐正奇 殷纯永

(清华大学精密仪器系, 北京 100084)

摘 要 报道激光多普勒超低速测量系统及实验结果, 其光学系统为四光路双焦点外差多普勒测速系统, 信号处理系统为动态模拟相位计, 可测速度范围为 1 nm/s 到 300 mm/s。

关键词 激光多普勒技术, 超低速测量。

1 引 言

超低速测量在工业应用和科学研究中都是一个重要课题。激光多普勒测速仪以其非接触、测点小、抗高温、耐腐蚀, 测量范围宽等优点倍受人们重视。但国内外市场上可买到的激光多普勒测速仪其速度分辨率都是在 30 $\mu\text{m/s}$ 左右, 很难突破。这和超低速测量要求的 0.01 $\mu\text{m/s}$ 至 1 mm/s 比相差甚远。1986年 Lenkvichus 等^[1]报道了用时间空间滤波器的方法实现了 0.01 $\mu\text{m/s}$ 的测量。但其最高可测速度只有 100 $\mu\text{m/s}$ 。研究发现其高速测量极限的改进很难取得突破性进展。

多普勒测速仪其测量低速的限制主要在其信号分析系统。因为使用鉴频系统, 通常频率的分辨率为 10 Hz, 由于光学系统的条纹宽度通常为 3 μm 。所以整个仪器的速度分辨率被限制在 30 $\mu\text{m/s}$ 左右。如果用鉴相系统进行信号处理, 频率分辨率的限制将被打破, 激光多普勒超低速测量可望取得突破性进展。

多普勒频移和横向运动速度的关系为:

$$\Delta\omega = K v_x, \quad (1)$$

其中, $K = (4\pi/\lambda) \sin(\theta/2)$, 或者对(1)式积分

$$\Delta\theta = K \Delta x. \quad (2)$$

同样一个光学系统, (1)式和(2)式的表示是等价的。但作为信号处理系统, (1)式用鉴频器处理。测量的是速度, (2)式用鉴相器处理, 测量的是位移。当用鉴频器测速度时, 如果多普勒信号中断, 再现后测得的速度仍有意义, 当用鉴相器测位移时, 多普勒信号中断, 再现后测得的位移不再有意义。因此要实现用鉴相器进行信号处理首先要求多普勒信号不能中断。另

* 自然科学基金资助课题。

收稿日期: 1994年5月3日; 收到修改稿日期: 1995年2月16日

外要求光学系统非常稳定, 漂移非常小, 否则鉴相系统无法工作。

2 多普勒信号中断实验

多普勒信号中断在横向多普勒测速系统中是普遍存在的, 当影响多普勒信号中断的因素不是时间而是位移, 多普勒信号仍能用鉴相器处理: 即当物体不运动时, 多普勒信号不中断 (尽管时间非常久), 当位移发生时, 在某一段位移内不中断, 这样就可以对这一段位移量进行测量。因为超低速运动速度非常低, 所以即使可测位移量不大, 也可以满足一定要求。

用图 1 所示的光学系统对多普勒信号中断问题进行了实验研究。实验表明:

- 1) 多普勒信号的中断与时间无关。
- 2) 多普勒信号的中断与位移有关, 和移动速度无关, 多次实验包括选用不同的散射表面表明, 多普勒信号不中断可测位移量约 0.3 mm。个别时可测到 0.7 mm。实验中光斑直径约为 0.3 mm。这是一种巧合还是必然无其他实验证实。

- 3) 由于是外差测量系统, 多普勒信号中断以接收的拍频信号不能使系统正常工作为准, 在多普勒信号中断时, 接收的散射光光强基本没有变。

实验证明可以用鉴相系统作信号处理来进行超低速测量。

3 光学系统

图 1 为光学系统, 它是一个四光束、双焦点的外差测量系统。5 mW 的 He-Ne 激光器输出被分光镜分成强度相等的两束光, 分别进入声光移频器, 移频 41 MHz 和 40 MHz, 每一束光分别通过渥拉斯顿棱镜分成强度相等、偏振面正交的两束线偏振光。这样得到四束强度相等的光, 频率差 1 MHz, 偏振相同的两束被聚焦于一点, 进行横向多普勒速度测量, 形成两个测量点。对两个测量点散射光的收集, 是利用其偏振方向不同再用偏振分光棱镜分开来完成的, 用 PIN 管进行接收。然后将电信号送入鉴相系统进行相位检测。

这样一个光学系统测量的实际是图中 P_1 点和 P_2 的相对位移。由于该光学系统是近共光路系统和具有高度对称性。声光移频器的频率漂移、测量装置对测量体的位移、振动、空气折射率的变化等外界因素的影响被消除或大大减弱。仪器从开机到进入稳定状态的半小时内, 相位漂移还不到 4π 。进入稳定状态后, 高频噪声峰值小于 3° 。相位慢漂移约为 $0.12^\circ/10 \text{ min}$ 。

4 相位测量系统

相位测量系统为动态模拟相位计, 它的框图由图 2 给出。测量信号和参考信号分别经过

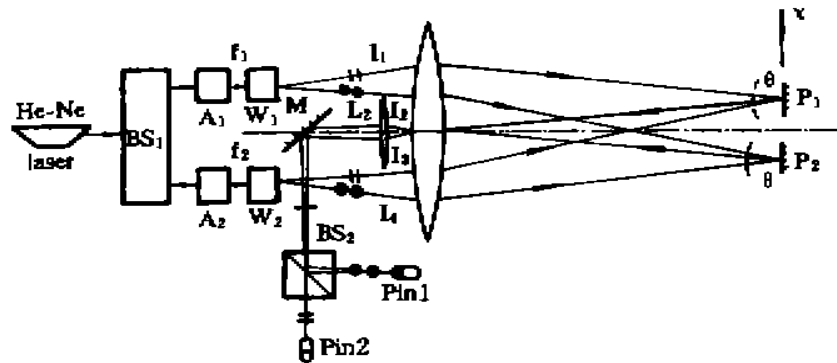


Fig. 1 Optical layout of the four-beam two-focus system

BS₁-beamsplitter, A₁, A₂-acousto-optical modulator, W₁, W₂-Wallaston prisms, L₁, L₂-lenses, P₁, P₂-focus points, BS₂-polarizing beam splitter, PIN₁, PIN₂-photodetectors; and M-mirror

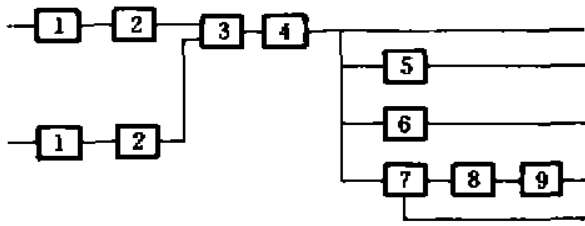


Fig. 2 Dynamic analogic phasemeter, 1-signal processing system, 2- frequency divider, 3- phase discriminator, 4- amplifier and 20-kHz lowpass filter, 5- 5 kHz lowpass filter, 6-3 kHz lowpass filter, 7-1.25 kHz lowpass filter, 8-1 Hz lowpass filter, and 9-diaplay unit

放大器和带通滤波器，带通滤波中心频率为 1 MHz，带宽为 100 kHz，然后整形为 1:1 方波进入分频器、分频器分别除 1、2、4...64、128，给出 8 个不同的可供选择的频率，这样做是由于鉴相器只能工作在 $\pm 2\pi$ 之间，经分频后可以把量程从 3 μm 扩大到 384 μm ，鉴相器是把测量信号和参考信号的相位差线性地、即时地转换成电压信号，然后经过四阶低通滤波器将载波高频信号滤去。由于分频后载波频率变低，所以设置了多个不同截止频率的低通滤波器。

模拟相位计的静态测量精度同数字相位计比，相关系数大于 0.9999，比例系数为 0.0087 V/deg。标准离散为 3.7×10^{-5} V/deg。载波频率可达 2 MHz，动态范围为 0~20 kHz。

5 实验装置和结果

超低速测量实验装置如图 3 所示。超低频信号发生器产生的正弦波或锯齿波推动压电陶瓷产生超低速运动。此运动被多普勒超低速测量系统和 Millitron 电感位移测量仪同时测量，测量结果在示波器上同时显示，或被计算机采样作以后的处理。

实验结果如图 4 所示。图中上面的曲线是电感位移测量仪模拟输出，下面的曲线是激光多普勒测速仪输出，锯齿波周期为 50 s，最大位移为 0.95 μm ，平均速度为 0.019 $\mu\text{m/s}$ 。实验时相位计从 20 kHz 低通滤波器输出口输出。

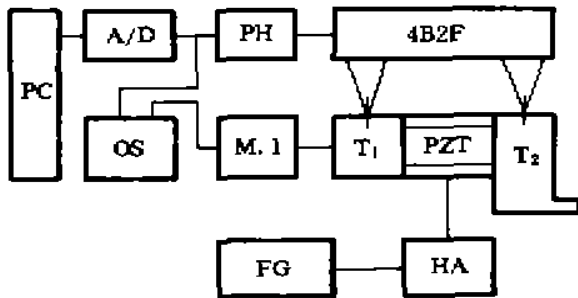


Fig. 3 Ultralow-velocity calibration assembly; FG-signal generator, HA- high voltage amplifier, PZT- piezoelectric element (Burleigh Corporation T₁, T₂-measuring points, 4B2F- four- beam 2- focus measuring system, PH- phasemeter, M. 1- Millitron indicator, DS- oscilloscope, A/D- A/D converter, PC-IBM-XT computer

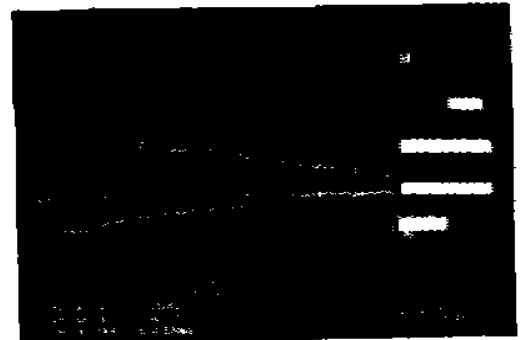


Fig. 4 Experimental result of 0.019 $\mu\text{m/s}$

因为示波器最长扫描时间为 50 s，长时间的实验用计算机采数完成。计算机测量位移及计算速度结果如图 5 所示。与标准正弦波比较，由噪声限制的超低速测量极限为 0.0054 $\mu\text{m/s}$ ，此结果包括压电陶瓷的非线性及 A/D 转换误差。实验时相位计从 20 kHz 低通滤波器输出口输出。

用准静态模拟相位计作信号分析系统, 动态范围为几赫兹, 测量结果如图 6 所示。上面的曲线是激光多普勒测速系统输出, 下面曲线是电感位移测量仪输出。扫描时间为 50 s。最大位移量为 $0.05 \mu\text{m}$, 平均速度为 1 nm/s 。这是目前作者测量过的最低速度。

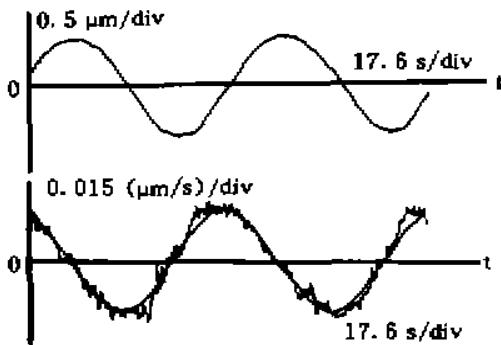


Fig. 5 Displacement and velocity determined by computer

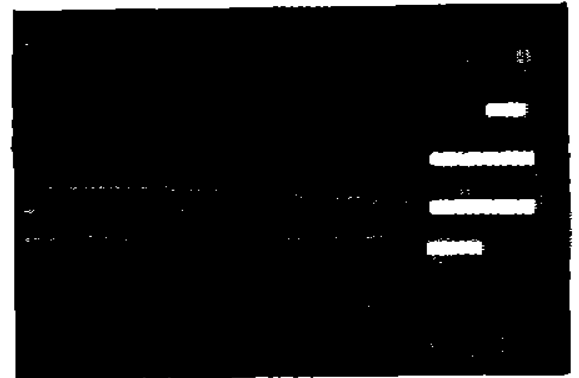


Fig. 6 Experimental result of $0.001 \mu\text{m/s}$

此外还做了动态测量。因所测位移量必须小于 0.3 mm 。所以动态测量以测振完成。实验用多普勒测速仪测量国家标准局的中频和低频振动基准, 测量结果见表 1。本实验是面外振动测量, 光学系统略有变化。

Table 1. Dynamic experiments

| standard amplitude frequency (kHz) | signal A | | | |
|---------------------------------------|----------|-----|------|--------|
| | 500 | 750 | 1000 | 2000 |
| 2 | | | 1040 | 1970 |
| 5 | | | 1040 | 1977 |
| 6 | | | 1011 | 1901 |
| 8 | | | 947 | 1881.6 |
| 10 | 497 | | 906 | |
| 14 | 506 | 730 | | |
| 18 | 473.6 | 730 | | |
| 20 | 530 | 779 | | |

6 结 论

横向多普勒测速系统可以用鉴相的方法进行信号处理。鉴相方法特别适用于低速运动的测量。四光束双焦点光学系统具有非常高的稳定性, 从而保证了信号处理的鉴相系统可以工作。多普勒测速系统不仅可以进行超低速测量, 而且可以进行一些动特性测量。如计算机磁头的起动过程, 因为从 20 kHz 低通滤波器输出可直接测量 5 nm/s 至 300 mm/s 速度变化过程。另外, 横向多普勒测速系统多普勒信号中断问题是一个非常重要的问题, 如果能从理论上搞清满足怎样的条件多普勒信号可以在位移很大的范围内不中断, 就有可能用激光多普勒技术进行大直径测量。这是一个非常有意义的课题, 期待理论工作能有所突破。

参 考 文 献

- [1] B. S. Lenkvichus, A. T. Toikachev, V. N. Sowtolshin et al., Laser Doppler anemometer for measuring ultra-low velocity. *Measurement Tech. (USSR)*, 1986, (5): 18~20

Ultralow Speed Measurement by Laser Doppler Velocimetry

Guo Jihua

(Department of Modern Applied Physics, Tsinghua University, Beijing 100084)

Xu Zhengqi Yin Chunyong

(Department of Precision Instrument & Mechenology, Tsinghua University, Beijing 100084)

(Received 3 May 1994; revised 16 February 1995)

Abstract A ultralow speed measurement system and the experimental results are reported. Its optical system is a four-beam two-focus differential laser Doppler velocimetry system (LDV) and the signal processing system uses a dynamic phasemeter. The measurement range can be from 1 nm/s to 300 mm/s.

Key words laser Doppler velocimetry, ultralow speed measurement