

文章编号: 0253-2239(2001)01-0118-04

用激光多普勒效应远距离测量固体散射表面的位移*

洪 昕 贺顺忠 蒋诚志 陈林才

(天津大学精仪与光电子工程学院, 精密测试计量技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 利用激光多普勒效应实现了远距离固体表面的横向位移测量。从理论上分析了双光束差动结构的多普勒频移, 设计了声光调制、双光束差动、大口径接收的光路系统和计算机实时跟踪补偿的位移测量系统。分别对普通纸张表面和金属表面进行实际测量, 测量距离为 10 m, 测量精度为 ±0.4%。

关键词: 激光多普勒效应; 声光调制; 大口径接收; 跟踪补偿; 远距离位移测量

中图分类号: TB96 文献标识码: A

1 引 言

自 1964 年 Yeh 和 Cummins^[1]首次观察了水流中粒子的散射光频移, 证实了可利用激光多普勒频移技术来确定流动速度以来, 激光多普勒测量技术以它精度高、线性度好、动态响应快、测量范围大、非接触测量等特点得到了长足的发展, 尤其在流体流速测量方面取得了令人满意的效果。随着实际工程、机械测试的需要, 固体表面的激光多普勒技术也越来越受到重视。近年来, 国内外也在发展其用于固体的运动速度或振动的测量。例如, 美国研究扫描式多普勒振动计, 用于测量二维速度和分析能流^[2]; 意大利研制光导纤维式激光多普勒振动计^[3]; 俄罗斯在研究振动计以及粗糙表面振动体散射相干辐射多普勒频移谱的统计特性等^[4]; 清华大学利用激光多普勒技术分析磁头的飞行姿态^[5]。

将激光多普勒技术应用于远距离固体散射表面横向位移测量是一项高难度的研究课题, 主要存在着两方面的问题: 第一, 固体散射表面的激光多普勒信号是从后向散射光中提取的, 具有信号弱、信噪比低的缺点, 因而要解决微弱信号处理技术; 第二, 固体表面的纹理结构会引起信号波动, 有时甚至出现信号淹没和不连续现象。因而, 通常认为激光多普勒技术难于实现位移测量, 特别是远距离固体表面的横向位移测量未见报导。

本文研究了双光束差动的激光多普勒效应。设计了声光调制、双光束差动、大口径接收的光学系统, 采用计算机实时跟踪补偿的位移测量方法, 实现

了远距离固体表面的横向位移测量, 测量距离为 10 m, 测量精度为 ±0.4%。

2 测量原理

2.1 双光束差动、大口径接收结构的多普勒频移

激光多普勒测量的光学模式很多^[1], 在双光束差动结构中, 在接收的第一条光线中都有两束各经过两次多普勒频移的光相干涉。如图 1 所示, 由激光器发出频率为 f_0 的激光束, 经分束器分为两平行光束 I 和 II, 其频率均为 f_0 , 经透镜会聚在被测物表面上, 被测物以速度 v 平动。任选一条散射光线, 假设其与运动方向成 α 角, 对于沿束 I 入射的光线 (入射角为 $\theta/2$), 经运动物体散射后, 沿该散射方向接收到的多普勒频移 f_1 为

$$f_1 = f_0 [1 - (v/c) \cos \alpha + (v/c) \sin(\theta/2)]; \quad (1)$$

对于沿光束 II 入射光, 沿着该散射方向散射后, 接收到的多普勒频移 f_2 为

$$f_2 = f_0 [1 - (v/c) \cos \alpha - (v/c) \sin(\theta/2)]. \quad (2)$$

由此可见, 在接收器上接收到的每条光线中都有两个频率的光, 在满足相干条件下进行干涉。每条散射光线中的 f_1 与 f_2 频差为

$$|f_1 - f_2| = \left| f_0 \left[1 - \frac{v}{c} \cos \alpha + \frac{v}{c} \sin \frac{\theta}{2} \right] - f_0 \left[1 - \frac{v}{c} \cos \alpha - \frac{v}{c} \sin \frac{\theta}{2} \right] \right| = 2f_0 \frac{v}{c} \sin \frac{\theta}{2}, \quad (3)$$

因为光束 c 与光频 f_0 有关系式: $\lambda = c/f_0$, 其中 λ 为光波长, 则(3) 式为

$$|f_1 - f_2| = 2 \left[\frac{v}{\lambda} \right] \sin \left[\frac{\theta}{2} \right]. \quad (4)$$

* 国家教委博士点基金项目。

收稿日期: 1998-05-10; 收到修改稿日期: 1999-11-15

可见, 虽然散射光的频移是接收方向的函数, 即不同接收方向上的 f_1 或 f_2 都不同, 但是每条光线中的

f_1 与 f_2 之频差都是相同的, 且该频差与接收方向无关, 为此, 可以采用大口径接收。

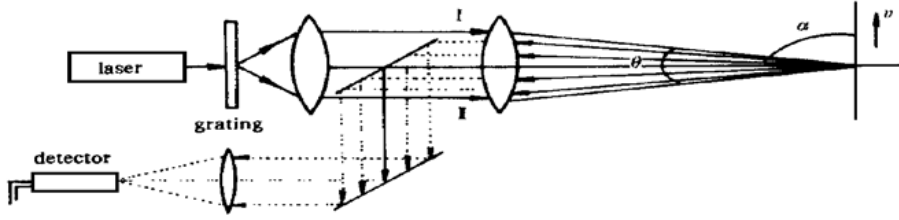


Fig. 1 Schematic diagram of double beam differential optical structure

2.2 声光器件

声光效应通过改变晶体折射率椭球来控制激光束强度或方向。声光相互作用是将具有某一频率和功率的驱动电信号加到换能器上, 激发相同频率的超声波进入声光晶体内而实现的。当声光器件的方位调整到入射光波矢、超声波波矢、衍射光波矢恰好构成一个封闭的三角形时, 衍射光强达到最大, 此时满足了动量匹配条件。在超声媒质(如玻璃或晶体)中

通过超声波, 就会引起介质折射率的周期性变化, 若此时激光束入射到超声媒质中, 它就产生类似于运动衍射光栅的效应, 其光栅常数为超声波波长。

如图 2 所示, 设入射光波长为 λ , 频率为 f_0 , 超声波频率为 Ω , 波长为 Λ , 则 m 级光束的衍射角 θ_m 和频率 f_m 为

$$\sin \theta_m = \frac{m\lambda}{\Lambda}, \quad f_m = f_0 + m\Omega. \quad (5)$$

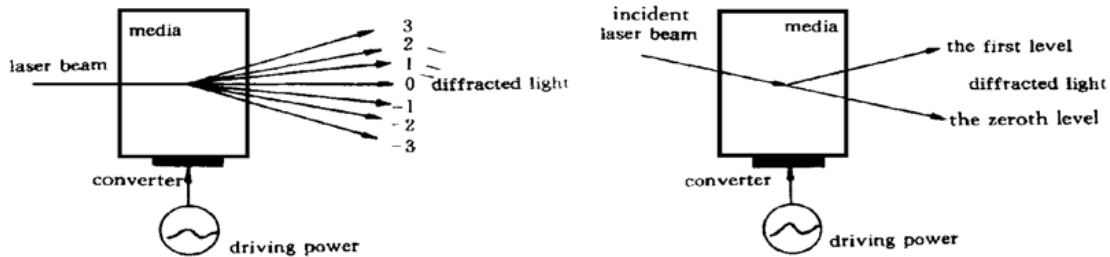


Fig. 2 Schematic diagram of diffraction in acousto optical crystal

2.3 信号提取

如图 4 所示, 激光束以布拉格角入射到声光器件上(声光器件的驱动频率即超声波频率 $\Omega = 40 \text{ MHz}$), 分成光强近似相等的 0 级和 1 级衍射光, 由公式(5)可知两束光的频差为 40 MHz 。由 2.1 节的分析可知, 光电接收器接收到的信号是中心频率为 40 MHz 的高频信号。本系统采用电学混频的方法将接收器的输出信号与声光电源的驱动信号 (40 MHz) 进行电混频。

$$V_1 = A \cos(2\pi \Omega t), \quad (6)$$

$$V_2 = B \cos[2\pi(\Omega \pm f_D)t]. \quad (7)$$

两路信号同时送入由乘法器构成的混频电路, 输出信号为

$$V_{out} = kV_1V_2 = kA \cos(2\pi \Omega t) B \cos[2\pi(\Omega \pm f_D)t] = kAB \{ \cos(2\pi f_D t) + \cos[2\pi(2\Omega \pm f_D)t] \}. \quad (8)$$

分析(8)式, 式中的第一项为期望得到的多普勒频移, 第二项为高频部分。这样的结果对于信号处理是有利的, 选择合适的低通滤波器就可以提取出被测信号。信号提取框图如图 3 所示。

设声光电源的驱动频率为 Ω , 多普勒频移为 f_0 , 则参加混频的两路信号的频率分别为 Ω 和 $\Omega \pm f_D$, 它们可分别写成:

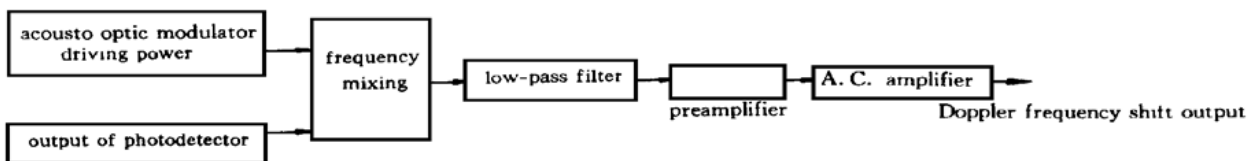


Fig. 3 Block diagram of signal processing

3 远距离固体散射体横向位移测量系统

图 4 所示是声光调制、双光束差动、大口径接收

的远距离固体表面横向位移系统结构。激光束以布拉格角入射到声光器件上, 分成光强近似相等、频差

为 40 MHz 的两束光, 经反射镜进一步扩展夹角后会聚到运动被测表面上, 由大口径收信透镜接收后向散射光, 经反射镜转向后, 由 PIN 管接收。

由 2.1 可知, 在光电接收器上得到的多普勒频移为

$$f_D = 2 \left[\frac{v}{\lambda} \right] \sin \left[\frac{\theta}{2} \right], \quad (9)$$

则位移测量为

$$s = \int_0^t v dt = \frac{\lambda}{2 \sin(\theta/2)} \int_0^t f_D dt. \quad (10)$$

根据位移的脉冲计数的测量原理 $N = \lambda / [2 \sin(\theta/2)]$ 为定标因子。位移测量系统如图 4 所示。8253 定时 / 计数器对连续信号进行脉冲计数, 同时计算机实时跟踪判断丢失信号, 并由软件对丢失信号进行信号重构处理完成位移补偿测量。

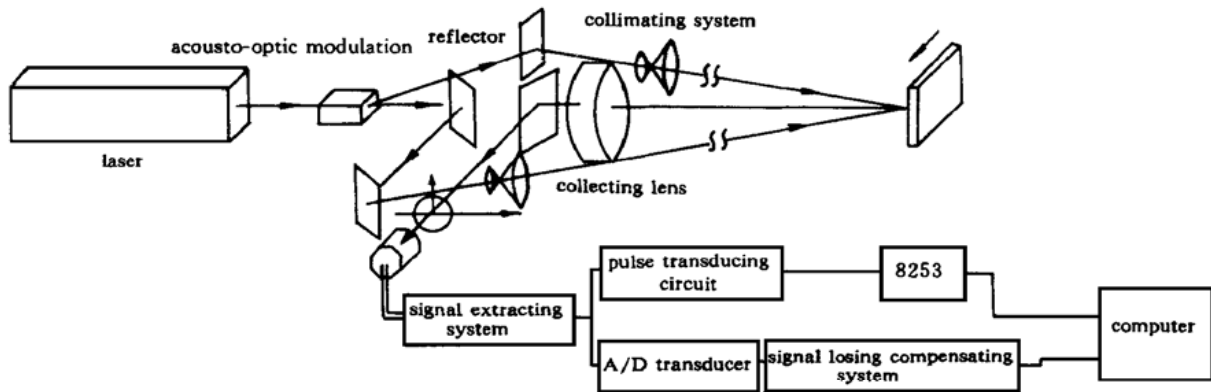


Fig. 4 Schematic diagram of optical measuring system

4 实验结果和结论

本测量系统使用氦氖激光器, 功率约 15 mW。实验表明, 在距离目标 10 m 处, 被测物在轴向偏离 ±160 mm 范围内, 能实现固体散射体横向位移的准确测量; 且随着被测目标距离的加大, 景深增加, 因此光学系统很容易对准被测目标。本系统经光路和 4 倍电路细分, 计数脉冲当量为 1 μm, 采用微机系统进行数据处理, 对纸张表面和前苏联制造的各

种加工方法(车、钳、铣、刨、磨)的粗糙度样板进行了实际测量。测量数据见表 1、表 2 和表 3, 误差曲线如图 5、图 6 所示。测量精度为 ±0.4%。影响测量结果的因素较多, 主要由角度测不准带来的脉冲当量误差决定。

本测量系统采用 PIN 管作为光电接收器件, 选择更高性能的光电接收器件, 测量距离可以提高到 20 m~ 50 m。

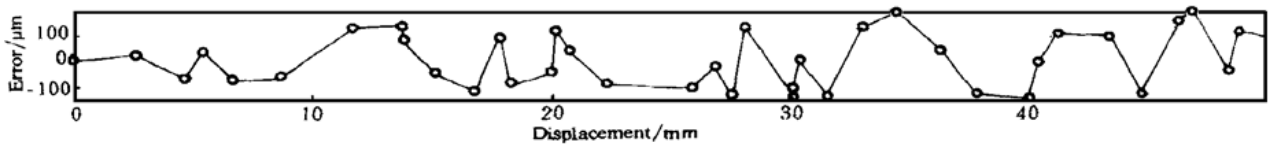


Fig. 5 Error curve 1

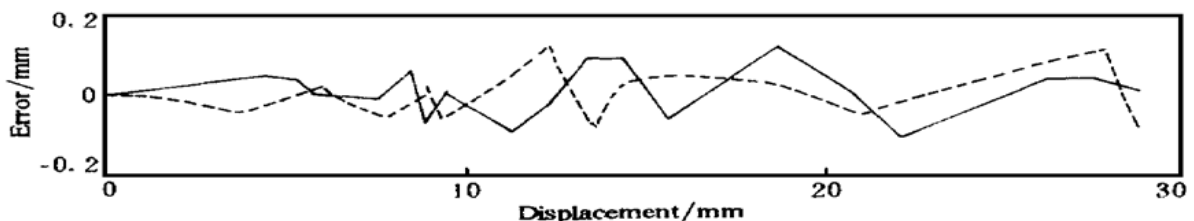


Fig. 6 Error curve 2

Table 1 Measured result of paper

measured value	2.739	4.590	5.511	6.652	8.674	11.901	13.973	14.065	15.072	16.579
reference	2.718	4.666	5.482	6.726	8.739	11.778	13.835	13.982	15.126	16.700
measured value	18.014	19.127	19.892	20.261	20.816	22.301	25.777	26.847	27.506	28.231
reference	17.929	19.219	19.946	20.148	20.775	22.397	25.879	26.876	27.648	28.101
measured value	30.138	30.033	29.987	30.441	31.409	33.215	34.726	36.448	37.766	35.646
reference	29.995	30.179	30.100	30.445	31.625	33.078	34.538	36.410	37.899	35.680
measured value	39.919	40.565	41.425	43.642	44.749	46.561	47.246	48.535	49.060	50.607
reference	40.062	40.578	41.319	43.549	44.878	46.408	47.051	48.582	48.942	50.510

Table 2 Measured result of lathing surface with roughness $R_a=0.80\ \mu\text{m}$

measured value	2.554	3.445	4.472	5.395	5.580	7.643	8.633	8.836	9.422	11.225
reference	2.530	3.413	4.431	5.361	5.846	7.657	8.572	8.912	9.420	11.320
measured value	12.339	13.532	14.533	15.633	18.815	20.740	21.991	26.186	27.762	28.795
reference	12.364	13.445	14.446	15.695	18.700	20.738	22.100	26.152	22.725	28.783

Table 3 Measurement result of milling surface with roughness $R_a=6.3\ \mu\text{m}$

measured value	2.744	3.904	4.007	5.458	5.876	6.419	7.270	8.450	10.195	12.419
reference	2.761	3.951	4.040	5.459	5.852	6.475	7.291	8.429	10.248	12.377
measured value	14.097	14.160	16.402	18.263	20.893	21.297	23.339	24.760	26.541	29.483
reference	13.984	14.236	16.380	18.216	20.861	21.338	23.359	24.682	26.435	29.572

参 考 文 献

- [1] Drain L E. The laser Doppler technique. New York: John Wiley, 1980. 1~ 20
- [2] Blotter J. Experiment and analytical energy and power flow using a scanning laser Doppler vibrometer. *Proc. SPIE*, 1994, **2358**: 2276~ 2280
- [3] Emilia G D. Evaluation of measurement characteristics of a laser Doppler vibrometer with fiber optic components. *Proc. SPIE*, 1994, **2358**: 2281~ 2286
- [4] Popov I A. Statistical properties of Doppler shift spectrum of coherent radiation scattered from rough vibrating body. *Proc. SPIE*, 1994, **2358**: 2287~ 2295
- [5] 宋云峰. 激光双焦点多功能磁头飞行姿态测试系统的研究. [博士论文], 北京: 清华大学, 1991

Remote Displacement Measurement of Solid Scattering Surface Utilizing Laser Doppler Effect

Hong Xin He Shunzhong Jiang Chengzhi Chen Lincai

(College of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering of Tianjin University, Tianjin 300072)

(Received 10 May 1999; revised 15 November 1999)

Abstract: The remote displacement measurement was realized utilizing laser Doppler effect. The Doppler shift of differential structure was analyzed theoretically. The displacement measurement system of double-beam differential acoustooptic modulating structure, large aperture collection of backward scattering light and real-time compensation of the losing signal by computer tracking software was designed. The displacement measurement of paper and metal at a distance of 10 meters was made with an accuracy of $\pm 0.4\%$.

Key words: laser Doppler effect; acoustooptic modulation; collection with large aperture; tracking compensation; remote displacement measurement