

文章编号: 0258-7025(2001)04-0375-04

固体散射体二维位移传感器的研究*

洪 昕 贺顺忠 蒋诚志 陈林才

(天津大学测试计量技术及仪器国家重点实验室 天津 300072)

提要 应用激光多普勒效应,设计了用两声光调制器获得三束测量光的声光调制、双光束差动、大口径接收的光学结构,提出了计算机实时跟踪丢失信号的位移补偿方法,实现了对普通纸张表面和前苏联生产的各种加工方法(车、铣、刨、磨)的粗糙度样板的二维面内位移的远距离测量,测量距离为 10 m,测量精度为 $\pm 0.5\%$ 。

关键词 激光多普勒效应,声光调制,位移遥测,位移补偿

中图分类号 TP 212.14 文献标识码 A

Study on 2D Displacement Remote Measurement Sensor

HONG Xin HE Shun-zhong JIANG Cheng-zhi CHEN Lin-cai

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

Abstract A novel displacement remoter measurement utilizing Doppler effect was proposed in this paper. The Doppler shift of differential structure was analyzed theoretically. The double-beam differential optical system with a optical-acoustic modulating structure, big aperture collecting backward scattering light, and compensating the losing signal by computer tracking software was designed. The displacement measurement of paper and rough mental surface at a distance of 10 meters has been achieved with an accuracy of $\pm 0.5\%$.

Key words laser Doppler effect, optical-acoustic modulate, displacement remote measurement, displacement compensating measurement

1 引 言

自 1964 年以来,激光多普勒效应已在流体流速测量方面取得了令人满意的效果。近年来,国内外也在探索将其用于固体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^[1];意大利研制光导纤维式激光多普勒振动计^[2];俄罗斯在研究振动计以及粗糙表面散射体散射相干辐射多普勒频移谱的统计特性等^[3];清华大学利用激光多普勒技术分析磁头的运行姿态。

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,位移

测量要求信号在时域范围内连续,但是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以实现位移测量,特别是用于远距离固体表面的面内位移测量尚未见报道。

本文设计了双声光调制、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,利用激光多普勒效应实现了远距离固体表面的面内位移测量,测量距离为 10 m,测量精度为 $\pm 0.5\%$ 。本系统对于车间等民用测量具有重要实用价值。

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^[4],在双光束差动结构中,在接收的每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

* 国家教委博士点基金资助项目。

收稿日期:1999-10-25;收到修改稿日期:2000-03-06

表面上,被测物以速度 v 平动。对于光束 I, II 假设其中一条散射光线与运动方向成 α 角,则沿着该散射光线接收所得的多普勒频移分别为 f_1, f_2 ,则每条散射光线中的 f_1 与 f_2 之频差为

$$|f_1 - f_2| = 2f_0 \frac{v}{c} \sin \frac{\theta}{2} \quad (1)$$

因为光速 c 与光频 f_0 有关系式 $\lambda = c/f_0$ 其中 λ 为光波长,则式(1)为

$$|f_1 - f_2| = 2 \frac{v}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2} \quad (2)$$

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。由于这个频差与接收方向无关,可以大口径接收。

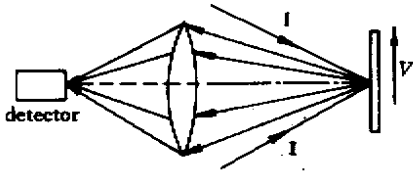


图1 双光束差动多普勒频移

Fig.1 Schematic diagram of double-beam differential optical system

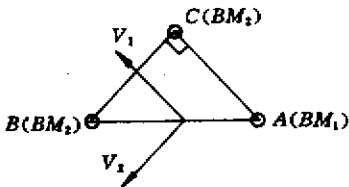


图2 二维测量原理

Fig.2 Principle of 2D displacement measurement

2.2 三光束二维测量原理

两束光相交于粗糙运动体表面上,对于同一光路不是沿着任意方向运动都具有多普勒频移。如图2所示,He-Ne 激光器输出的光经二维分束系统分为相互平行的三束光,彼此之间光强近似相等。其中 BM_1 和 BM_2 构成的平面平行于水平面。 A, B 和 C 构成一直角三角形,即 $BC \perp AC$ 。从散斑的理论可知,当沿着 v_2 或垂直于纸面方向运动时,光程对于两束光的改变量相同,因此不会产生干涉条纹,也就不会引起光强的波动。故由 BM_1 和 BM_3 构成的双光束差动结构可用于测量速度分量 v_1 ,并且 v_1 的方向平行于 AC 的连线,同样,由 BM_3 和 BM_2 构成的双光束差动结构用于测量速度分量 v_2, v_2 的方向平行于 BC

的连线,且垂直于 v_1 。因此,由三束测量光 BM_1, BM_2 和 BM_3 组成的两组双光束差动系统可实现二维速度的测量。

2.3 位移测量原理

2.3.1 连续信号的位移测量

由2.1可知,在光电接收器上得到的多普勒频移为

$$f_D = 2 \frac{v}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2} \quad (3)$$

则位移测量为

$$S = \int_0^t v dt = \int_0^t \frac{\lambda f_D}{2 \sin \frac{\theta}{2}} dt = \frac{\lambda}{2 \sin \frac{\theta}{2}} \int_0^t f_D dt \quad (4)$$

根据位移的计频测量原理,将连续信号整形为脉冲量,对脉冲进行计数为 $N, k = \lambda \lambda (2 \sin \theta / 2)$ 为脉冲当量,则位移 S

$$S = kN \quad (5)$$

2.3.2 重构丢失信号的位移补偿测量

激光多普勒信号主要有如图3所示的三种情况。(a)为连续等幅信号,(b)为连续随机振幅信号,(c)为间断信号。光栅的多普勒信号属于(a)这种类型。固体运动散射面的多普勒信号受表面纹理结构的影响,信号会出现淹没甚至丢失的现象。固体表面的信号丢失是一种随机现象,即使散射光强足够强,丢失现象也是不能避免的,为此在实验中采用计算机软件进行实时跟踪重构丢失信号实现位移的补偿测量。

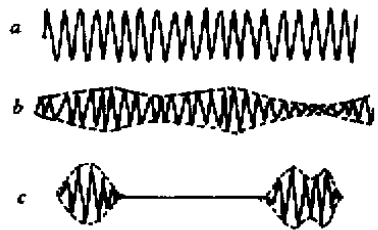


图3 激光多普勒信号的类型

Fig.3 Forms of laser Doppler signal

利用计频测量位移,保持信号的连续性无疑是十分重要的。关于信号的淹没与丢失,系统中通过 A/D 采样进行信号监控。将整形电路中的比较电压 R_{ref} 作为信号丢失的门限阈值,直接对经过预处理的模拟交变信号进行 A/D 采样并与门限进行比较,当连续在三个采样间隔内得到小于门限的采样点,则认为信号发生丢失,需对其进行补偿。

设计中采用三点迭代的频率计算方法,保存下信号丢失前与丢失后的信号频率。在信号判定丢失之后,分别提取信号丢失之前寄存器 1 中记录的信号频率 f_1 和信号丢失之后寄存器 2 中记录的信号频率 f_2 ,利用均值插值的方法重构丢失信号 $f = (f_1 + f_2)/2$,以采样间隔 $3t$ 内的位移 $3tkf$ 进行补偿, k 是脉冲当量。

3 远距离固体散射体面内位移的激光多普勒测量系统

根据 2.2 中的分析,本文设计了声光器件分光,单通道大口径接收的二维测量系统,具体结构如图 4 所示。He-Ne 激光器输出的激光束以布喇格角入

射到声光器件 1 上,发生布喇格衍射,光强集中在 0 级和 1 级衍射光中,其中 0 级保持原入射光频 f_0 不变,+1 级衍射光的频率为 $f_0 + f_{T_x}$ (f_{T_x} 为声光器件 1 的驱动频率);并且 0 级与 1 级的偏振态正交。经两焦距分别为 F_1, F_2 的透镜 3 之后,会聚到声光器件 2 上。调整器件与入射光的交角,使两束光以布喇格角入射,则频率为 f_0 的入射光经声光晶体产生 0 级和 1 级衍射,频率分别为 f_0 和 $f_0 + f_{T_y}$ (f_{T_y} 为声光器件 2 的驱动频率);频率为 $f_0 + f_{T_x}$ 的入射光经声光器件 2 衍射之后同样产生 0 级和 1 级衍射光,频率分别为 $f_0 + f_{T_x}$, $f_0 + f_{T_x} + f_{T_y}$ 。则由光束 1 和 2 构成的双光束差动结构可用于测量垂直方向的速度分量,同时引进频移 f_{T_y} ;由光束 2 和光束 3 构成的双光束差动结构可用于测量水平方向的速度分量,并引进频移 f_{T_x} 。

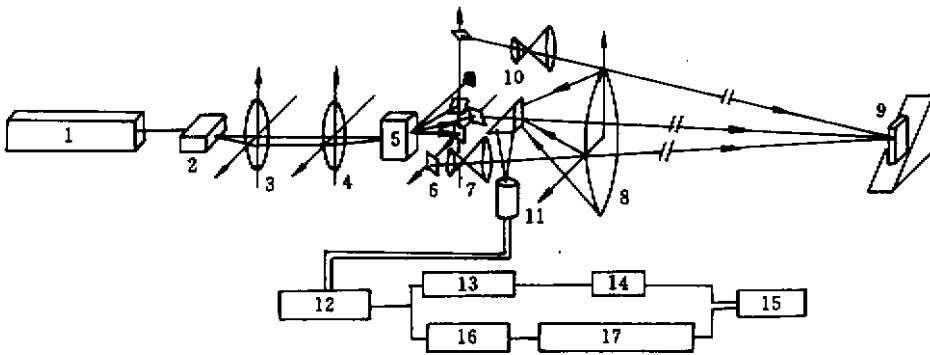


图 4 二维测量系统光路原理图

1: He-Ne 激光器; 2, 5: 声光器件; 2, 3, 4: 透镜; 6: 反射镜; 7: 准直透镜; 8: 大口径接收透镜; 9: 被测运动固体表面; 10: 角锥棱镜; 11: PIN 光电接收器; 12: 信号提取; 13: 脉冲转换; 14: 8253 计数器; 15: 计算机; 16: A/D 转换; 17: 丢失判定与补偿

Fig.4 Schematic diagram of optical measuring system

1: He-Ne laser; 2, 5: acoustic-optical modulator; 2, 3, 4: lens; 6: mirror; 7: collimating system; 8: lens with big aperture; 9: moving object; 10: prism; 11: PIN detector; 12: signal extracting system; 13: pulse transducing circuit; 14: 8253 counter; 15: computer; 16: A/D transducer; 17: signal losing compensating system

声光器件的 0 级和 1 级衍射光的夹角很小,为此采用反射镜法扩展夹角(5°),并通过调节反射角将三束测量光束会聚于被测体中,实现远距离测量。接收系统采用大口径接收系统。

信号处理框图见图 5。声光器件的驱动频率分别为 30MHz 和 40MHz。由 2.1 和 2.2 的分析可知,水平方向的信号频率为 $40\text{MHz} \pm f_D$,垂直方向的信号频率为 $30\text{MHz} \pm f_D$ 。PIN 光电接收管输出的信号经 25 ~ 45 MHz 的滤波器、前置放大器,分别经两个带通滤波器将水平方向的信号和垂直方向的信号分离开来,两路信号分别与各自的电源驱动信号混频,提取出水平方向和垂直方向的多普勒信号频率。

实验技术参数见表 1。

表 1 实验技术参数

Table 1 Experimental parameters

Laser	15 mW
AO modulator 1	30 MHz
AO modulator 2	40 MHz
Collecting lens	ϕ 160 mm
PIN detector	Giameter of photosensitive face ϕ 0.5 mm
Working bandwidth 0.05 ~ 50 MHz	

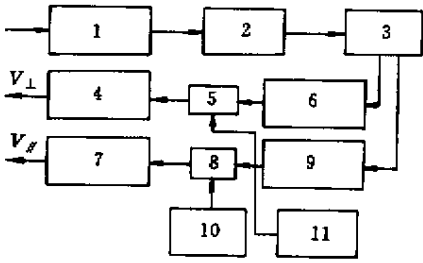


图 5 二维测量系统信号预处理

1 : 25 ~ 45 MHz 滤波器 ; 2 : 前置放大器 ; 3 : 信号分离 ; 4 , 7 : 低通滤波器 DC-1000 Hz ; 5 , 8 : 混频器 ; 6 : 25 ~ 32 MHz 带通滤波器 ; 9 : 38 ~ 45 MHz 滤波器 ; 10 : 40 MHz 驱动频率 ; 11 : 30 MHz 驱动频率

Fig.5 Signal pre-processing system

1 : 25 ~ 45 MHz filter ; 2 : Preamplifier ; 3 : signal splitter ; 4 , 7 : low-pass filter DC-1000 Hz ; 5 , 8 : frequency mixing ; 6 : 25 ~ 32 MHz band-pass filter ; 9 : 38 ~ 45 MHz filter ; 10 : 40 MHz acoustic-optical modulator driving frequency ; 11 : 30 MHz acoustic-optical modulator driving frequency

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 $1 \mu\text{m}$ 。采用微机系统进行数据处理。本系统分别对纸张表面和前苏联制造的各种加工方法(车、钳、铣、刨、磨)的粗糙度样板进行实际测量,测量数据见表 2。测量精度为 $\pm 0.5\%$ 。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 ~ 50 m。

表 2 二维位移测量结果(工作距离 10 m)

Table 2 Measured values of 2D displacement (at the distance of 10 m)

Nubmer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Vertical measured value/mm	10.460	10.634	10.544	10.690	10.579	10.732	13.947	13.954	14.128	14.135
Horizontal measured value/mm	28.430	28.634	28.225	28.423	28.161	28.735	37.795	37.555	37.865	37.534
$(x^2 + y^2)^{1/2} / \text{mm}$	30.293	30.553	30.130	30.367	30.083	30.674	40.286	40.064	40.415	40.107
Reference/mm	30.157	30.449	30.075	30.369	29.984	30.425	40.090	40.134	40.738	40.529
Number	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Vertical measured value/mm	14.114	13.975	14.233	17.337	17.344	17.406	17.803	17.984	17.699	17.539
Horizontal measured value/mm	38.274	37.534	38.246	46.346	46.276	46.720	46.360	46.692	47.122	46.889
$(x^2 + y^2)^{1/2} / \text{mm}$	40.793	40.051	40.809	49.483	49.411	49.851	49.661	50.036	50.236	50.062
Reference/mm	40.532	40.452	40.774	49.437	49.421	49.890	50.060	50.136	50.274	50.332

参 考 文 献

- Jonathan D. Blotter. Experiment and analytical energy and power flow using a scanning laser Doppler vibrometer. *SPIE*, 1994, **2358** 266 ~ 275
- Giulio D. Emilia. Evaluation of measurement characteristics of a laser Doppler vibrometer with fiber optic components. *SPIE*, 1994, **2358** 240 ~ 246
- Ivan A. Popov. Statistical properties of Doppler shift spectrum of coherent radiation scattered from rough vibrating body. *SPIE*, 1994, **2358** 254 ~ 265
- L. E. Drain. *The Laser Doppler Technique*. New York : John Wiley, 1980. 1 ~ 25