

文章编号: 1001-3806(2003)01-0073-03

## 基于 CCD 的激光微位移测量系统研究

赵育良 许兆林 李开端

(海军航空工程学院青岛分院, 青岛, 266041)

**摘要:** 介绍了一种基于多普勒效应的可进行动态微位移测量的激光微位移测量系统。该系统以 He-Ne 激光器为光源, 配以干涉系统移动方向判别及分频系统、CCD 视频信号的高速动态采集系统、微机处理系统及干涉图处理软件包等。与传统测量方法相比, 其精度、灵敏度及稳定性都有较大提高, 并实现了微位移的全自动测量。

**关键词:** 线阵 CCD; 多普勒效应; 激光; 微位移; 干涉

中图分类号: TH744.5 文献标识码: A

## Laser micro displacement measurement system based on CCD

Zhao Yuliang Xu Zhaolin Li Kaiduan

(Qingdao Branch of NAEA, Qingdao, 266041)

**Abstract:** A dynamic micro displacement measurement system based on Doppler effect is introduced. The system includes He-Ne laser source, frequency conversion and direction discrimination, the high speed CCD video signal gather system, the processing system of computer and interference fringes handling software wraps. The precision, sensitivity and stability in this system have been improved compared with traditional measurement technique, the full automatic measurement of micro displacement is realized.

**Key words:** linear CCD; Doppler effect; laser; micro displacement; interference

### 引言

高精度的位移测量系统是机械、仪表、工具、兵器、宇航等产业获得位置精度的基础, 也是上述产业产品及技术不断进步的制约因素。而这些方面光干涉计量以其能够精确到波长级的优势成为位移测量系统的主要代表。这里介绍一种以 He-Ne 激光器为光源基于多普勒效应的以 CCD 为条纹拾取装置的新型微位移测量系统, 与传统的一些微位移干涉测量方法相比, 该系统采用单色性及波长稳定性更好的 He-Ne 激光器作为光源<sup>[1, 2]</sup>, 以 CCD 代替传统的光电探测器作为条纹拾取工具, 与驱动电路和单片机相结合, 配以条纹判向分频系统, 实现了对条纹的细分及对微位移的自动精确测量, 较大地提高了系统的测量精度和系统的稳定性并基本消除了人为的计数误差。

### 1 系统测量原理及组成

作者简介: 赵育良, 男, 1976 年出生。教员。从事激光方面的教学工作。

收稿日期: 2002-01-11; 收到修改稿日期: 2002-03-21

#### 1.1 系统测量原理

任何形式的波传播, 由于波源、接收器、传播介质或中间反射器或散射体的运动, 会使频率发生变化, 这种频率变化称作多普勒频移。由被测物运动所散射的光的频移应当作为一个双重多普勒频移来考虑。运动物体相对于光源来说, 相当于接受器, 按多普勒效应原理, 接受到的频率会随运动体增加(如图 1):

$$f_m = f_0 \left( 1 + \frac{u \cos \theta_1}{c} \right) \quad (1)$$

式中,  $f_0$  为光源辐射频率,  $u$  为运动物体表面速度,  $\theta_1$  为入射光和运动方向夹角,  $c$  为真空中光速。

而运动物体又相当于一个发射天线, 把接收到的辐射波发射出来, 在  $\theta_2$  为方向的接收器也因多普勒效应, 收到频率增高的光源信号。由(1)

式得:  $df = f - f_0 = \frac{u}{c} f_0 (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) =$

$$\frac{u}{\lambda_0} (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \quad (2)$$

令光线垂直入射, 则  $df = 2u / \lambda_0 \quad (3)$

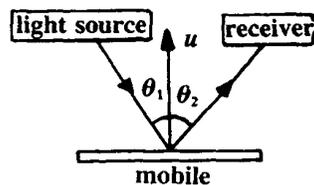


Fig. 1 Frequency shift sketch of Doppler effect

上式两端时间积分： $S(t) = \lambda F(t) / 2$  (4)  
 式中， $S(t)$  为被测物体位移量，而  $F(t)$  为干涉条纹移动数。该系统以 CCD 为条纹拾取工具，来检测条纹移动数。

### 1.2 系统组成及原理

系统的整个测量过程最终是通过线阵 CCD 拾取干涉信号并经后续处理实现的，系统的基本光路如图 2 所示。HeNe 激光器发出的激光束经起偏器、1/4 波片到达分光镜后分成两光束，其中光束 1 经前置透镜到达参考反射镜回到分光镜，光束 2 经前置透镜到达被测物体，由前节所述，当被测物体产生移动时，光束会产生多普勒频移，由(4)式返回的光与光束 1 的干涉条纹也会产生相应的移动。最后干涉条纹送入线阵 CCD。

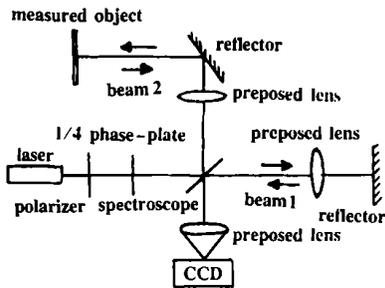


Fig. 2 The basic optic path of system

置透镜到达参考反射镜回到分光镜，光束 2 经前置透镜到达被测物体，由前节所述，当被测物体产生移动时，光束会产生多普勒频移，由(4)式返回的光与光束 1 的干涉条纹也会产生相应的移动。最后干涉条纹送入线阵 CCD。以线阵 CCD 及其驱动系统取代传统的人眼或光电探测器作为干涉条纹拾取工具，CCD 的光谱响应范围在 0.4~ 1.2 $\mu$ m 之间(属可见光及近红外光范围) 具有 2048 个像元，光敏元在空间上和电气上彼此独立，其输出的电荷包空间分布与光强的空间分布成比例关系。干涉条纹的 CCD 视频信号通过后续数据采集、滤波放大、门限比较器、计数器、送入计算机自动处理并输出结果。CCD 是在时钟脉冲控制下利用移位寄存器的功能实现电荷包的读取与输出，形成一系列幅值不等的时钟脉冲序列。从 CCD 出来的信号经放大滤波后为图 3 中  $y_1$ ，再经比较器进行二值化处理，得到矩

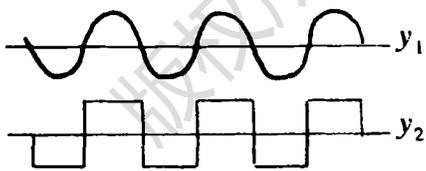


Fig. 3 Signal handling process

形信号图 3 中  $y_2$ ，其电平同 TTL 电平兼容。由于被测物体移动导致条纹相应移动，首先确定某标定像素  $i$  在  $y_2$  为下降沿，然后跟踪  $i$  像素，为上升沿时计数器计数一次，这样经计数器得到干涉条纹的个数  $K$ 。由于采集过程为动态采集，因此，可随时取出第 1 幅静态图像经后续处理计算像素  $i$  所在明暗条纹所占像元个数，设为  $M$ ，像素  $i$  距上一下降

沿像素数  $N$ 。这样就实现了对移动条纹个数的细分，总的条纹移动数为：

$$F(t) = K + N/M \quad (5)$$

据(4)式得到被测目标位移量为：

$$S(t) = \frac{\lambda}{2} \left[ K + \frac{N}{M} \right] \quad (6)$$

### 1.3 条纹判向及分频装置

在微位移实际测量过程中，由于实际需要或外界振动等干扰，可能会使被测物体产生正、反两个方

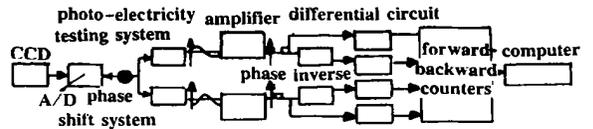


Fig. 4 Discriminate direction and count principle

向的位移移动，这样如果不采取相应的措施就会使计数器产生误计数，因此，必须对被测物体位移方向进行判别以实现干涉信号的可逆计数。为了消除计数误差，该系统采用了如图 4 的判向计数系统，图 5

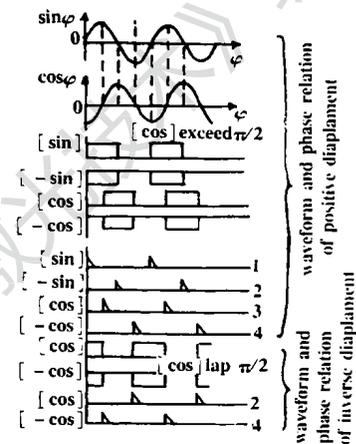


Fig. 5 Waveform of direction discrimination and counting

为电路波形图。CCD 拾取的干涉信号通过移相的方法，可以获得两路相差  $\pi/2$  的干涉条纹的光强的信号，该信号由两只光电检测器接收，便可获得干涉信号相对应的两路相差  $\pi/2$  的正弦信号和余弦信号，经放大、整形、

倒向及微分处理等，可以获得 4 个相位依次相差  $\pi/2$  的脉冲信号，若将脉冲排列的相位顺序在反射镜正向移动时定为 1, 2, 3, 4，反向移动时定为 1, 4, 2, 3，由此，后续的逻辑电路就可以根据脉冲 1 后面的相位是 2 还是 4，便可判断是正向脉冲还是反向脉冲，并分别送入是加脉冲的“门”或减脉冲的“门”，这样便可实现判向的目的消除误计数，也可达到抗干扰、提高测量的稳定性的精度。同时，经判向后，将一个周期的干涉信号变成 4 个脉冲输出信号，使一个计数脉冲代表 1/4 干涉条纹的变化，从而表示被测物体移动量为  $N/8$ ，实现了干涉条纹的四倍频计数，相应的位移测量公式变为：

$$S(t) = \lambda (K + N/M) / 8 \quad (7)$$

## 2 系统硬件及软件的实现

该系统是基于多普勒效应的一个动态微位移测量系统,因此,对干涉条纹的动态检测是本系统的核心问题,为了使在保证精度的前提下实现动态跟踪,必须找到一种能够实现线阵 CCD 视频信号的高速动态采集的采集方式。该系统选用帧存方式实现线阵 CCD 视频信号的高速动态数据采集器<sup>[3-5]</sup>,首先,硬件电路以很快的速度将 CCD 视频信号采集到一个外部的存贮器里暂存,待全部数据采集完成后,由 8031 单片机取走数据再做处理。数据的采集是靠硬件电路完成的,所以,采集速度的极限由存贮器的读周期所决定。用 6264 静态存贮器(8K × 8)构成的外部存贮区,该芯片的最小读周期是 100ns,由这种芯片组成的帧存贮数据工作最高速率可达 10MHz。帧存贮方式数据采集系统主要由 3 个部分组成:第 1 部分是系统的采样时序控制电路,第 2 部分是外存贮器及其地址和读、写逻辑信号时序发生器,第 3 部分是地址译码器和微机接口,其高速度、大容量符合系统要求。

该系统采集后,系统数据由 8031 单片机取出后做上述后续处理<sup>[6]</sup>,软件流程框图略。

## 3 系统精度分析

系统采用波长  $\lambda = 0.63299\mu\text{m}$  的 He-Ne 激光器作为光源,像元尺寸为  $7.0\mu\text{m}$  光谱响应范围在  $0.4 \sim 1.2\mu\text{m}$  之间(属可见光及近红外光范围)具有 2048 个像元的线阵 CCD 作为条纹识别元件,并选用帧存方式实现线阵 CCD 视频信号的高速动态数据采集器,配以相应的驱动、计数及接口电路。系统理论分辨率约为  $0.0032\mu\text{m}$ ,经实验测定,实测精度  $\pm 0.0002\mu\text{m}$ ,表 1 是一组对某微位移的实测数据。

Table 1 The contrast of true value and measure value/ $10^{-3}\mu\text{m}$

true value	0.0	12.1	24.8	40.5	54.3	71.7
measure value	0.0	12.1	24.9	40.4	54.1	71.5
error	0.0	0.0	0.1	-0.1	-0.2	-0.2

影响系统精度的因素主要有 4 点:其一是干涉条纹的拾取。该系统采用线阵 CCD 为条纹自动拾取工具<sup>[7]</sup>,提高了系统的测量精度并基本消除了人为的计数误差,传统的测量系统大都以人眼通过示波器读取,这样一对明暗条纹相对应被测物体移动

$\lambda/2$  的位移,而人眼通过示波器大都只能分辨 10~20 幅度值,故其精度只能达到  $\lambda/20 \sim \lambda/40$  的精度,而使用线阵 CCD 就大大提高了条纹分辨能力,使系统可探测干涉条纹的最小移动为一个像元,由(5)式看出,调整条纹间距  $M$ ,可以改变测量的最小位移。系统采用波长  $\lambda = 0.63299\mu\text{m}$  的 He-Ne 激光器,同时又在 CCD 前面加了前置放大镜,对条纹进行放大,使条纹最大间距  $M$  为 100 个像素,系统理论上能分辨的最小位移为  $0.0032\mu\text{m}$ 。其二是 He-Ne 激光器的频率稳定性。为了防止被测物体和参考光路返回激光器干扰激光器的输出,反过来又使激光信号不稳定,所以,在激光器前面加了一个光学隔离器,此隔离器由起偏器和  $1/4$  波片组成,两者光轴夹角  $45^\circ$ ,激光经  $1/4$  波片后输出圆偏振光,返回再次经过时成为与初始激光偏振方向下次的线偏振光,不能透过起偏器进入激光,因而排除了它的干扰。其三是将信号进行分频,以提高测量精度,该系统在判向的同时,对一个周期的干涉信号变成 4 个脉冲输出信号,实现了四分频,使测量精度提高了 4 倍,如果需要,还可以对信号进行更高次分频,以提高测量精度。其四是空气扰动、外界振动引起条纹移动,从而对测量产生较大影响。利用笔者自己设计的紧凑的干涉系统,将系统放在减震台上,能很好地解决这一问题。

## 4 结束语

经测试,该微位移测量系统与传统位移测量方法相比,灵敏度、精度及稳定度等方面都有了显著的提高,具有较高的实用价值和发展前景。

### 参 考 文 献

- [1] 胡绍楼. 激光干涉测速技术. 北京:国防工业出版社, 2001: 6~20.
- [2] 万德安. 激光基准高精度测量技术. 北京:国防工业出版社, 1999: 141~174.
- [3] 王永仲, 据新军, 胡心. 智能光电系统. 北京:科学出版社, 1999: 76~79.
- [4] 吕海宝. 激光光电检测. 长沙:国防科技大学出版社, 1999: 131~154.
- [5] 侯国章. 测试与传感技术. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 1998: 141~154.
- [6] 孙涵芳. INT EL16 位单片机. 北京:北京航空航天大学出版社, 1995: 30~47.
- [7] 王庆有, 孙学株. CCD 应用技术. 天津:天津大学出版社, 1993: 40~53.