

# 应用 SSPDA 单频激光干涉仪

薛实福 李庆祥 王伯雄 徐毓娴 于水

(清华大学精密仪器与机械学系,北京 100084)

**摘要** 本文介绍一种采用自扫描光电二极管阵列(SSPDA)作为激光干涉条纹接收器的新型单频激光干涉仪。

**关键词:** SSPDA;单频激光器;干涉仪

## 1 引言

激光干涉仪作为精密测量和精密定位的测量系统在国内外已获广泛应用。通带单频激光干涉仪的干涉条纹是采用光敏二极管或光敏三极管作为接器件的,在被测物相对干涉仪静止时,接收信号为一直流信号,因而存在直流放大零点漂移问题,影响仪器的精度。双频激光干涉仪具有独特的特点,当被测物相对干涉仪静止时仍然保留了一个 1.5MHz 左右频差的交流信号,当被测物运动时产生多普勒频差的增加或减少,因而采用交流放大电路,避免了直流漂移的问题,提高了仪器的精度<sup>[1]</sup>。本仪器是在单频激光干涉仪中采用了自扫描光电二极管阵列(Self-Scanning Linear Photodiode Array 缩写 SSPDA)作为接收激光干涉条纹的器件,由于该仪器将空间的光强分布转换为按时序串分布信号,用光电调制的方法,人为地实现了“双频”的功能,在被测物相对干涉仪静止时,仍保留一个固定的频差,可用交流放大电路,因而使该仪器具有比双频干涉仪结构简单,成本低、又比普通单频激光干涉仪精度高的优点。

## 2 仪器的组成与测量原理

### 2.1 仪器组成

本仪器由四部分组成如图 1

(1)激光头部和激光稳频器;包括一个迈克尔逊干涉仪,激光器,SSPDA 接收器件及其驱动电路,激光稳频器等。

(2)显示仪部分;包括前置处理电路,倍频,脉冲减法,判向计数电路,单片机处理电路以及显示电路,键盘等。

(3)电源部分;包括激光器的电源和显示仪的电源。

(4)附件;包括温度,湿度,气压传感器和测量镜等。

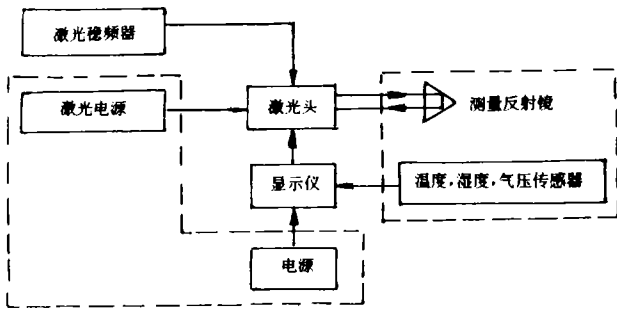


图 1

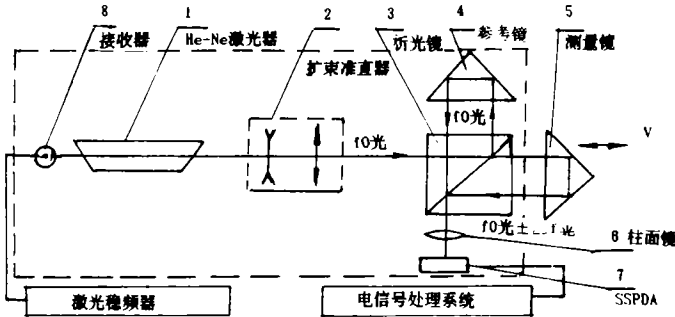


图 2 光路原理图

$c$  —— 光在真空中的速度  
 $V$  —— 测量镜的速度

由于激光在真空中的波长  $\lambda$ ,  $C$ ,  $f_{0光}$  与光在介质中的折射率  $n$  存在下列关系。

$$\lambda\nu/n = C/f_{0光}$$

故(1)式可以写成:

$$\Delta f_{光} = \pm 2n/\lambda\nu \cdot V \quad \text{或} \quad V = \lambda\nu/2n \cdot \Delta f_{光} \quad (2)$$

测量镜运动的位移量为  $S$ , 它等于运动速度的积分:

$$S = \int_0^1 v dt = \pm \int_0^1 \lambda\nu/2n \cdot \Delta f_{光} dt \quad (3)$$

由(3)式可知,若能检测到  $\Delta f_{光}$  的值,便可以求得位移量  $S$  值。

本测量系统利用 SSPDA 器件,将光波的多普勒频移转变为电信号上的多普勒频移  $\Delta f_{电}$  (简写成  $\Delta f$ )。

可见证明<sup>[3]</sup>

$$\Delta f = V \cdot 2n/\lambda\nu \quad (\text{或} \quad V = \lambda\nu/2n \cdot \Delta f) \quad (4)$$

与(2)式比较得:

$$\Delta f_{光} = \Delta f$$

代入(3)式得

$$S = \int_0^t V dt = \pm \int_0^t \lambda\nu/2n \cdot \Delta f \cdot dt \quad (5)$$

## 2.2 干涉仪的光路原理

如图 2 虚线框内部分为激光头,其干涉光路为一迈克尔逊干涉仪。He-Ne 激光器 1 发出的激光束经扩束准直器 2 后变成行光束,经过折光镜 3,分成两路,一路射向参考直角立方棱镜 4 然后返回,另一路射向测量直角立方棱镜 5 然后返回。两路光在折光镜 3 上发生了干涉,干涉条纹经柱面镜 6 聚焦后由自扫描光电二极管阵列 7 所接收。测量镜 5 以速度  $v$  运动时,发生多普勒效应使  $f_{0光}$  光的频率有一个增量  $\pm \Delta f_{光}$ , (“-”号表示测量镜 5 远离折光镜 3 运动,“+”表示测量镜 5 接近折光镜 3 运动)。频率的变化量  $\Delta f_{光}$  由下式决定。

$$\Delta f_{光} = \pm 2V/C \cdot f_{0光} \quad (1)$$

式中  $f_{0光}$  —— 激光频率

从(5)式可见,求出  $\Delta f$  对时间的积分,即求得测量镜移动的距离。本仪器由测量系统的处理电路部分完成求  $\Delta f$  和积分工作。

### 2.3 测量系统的处理电路(框图如图3)

光电二极管阵列由  $N$  个尺寸和间距相等排列成一直线的光电二极管组成。照射在  $1-N$  位二极管上按空间分布的光强信息转变按时序分布串行输出的相应的电信号。

激光头部分完成反映位移的干涉条纹接收光电转换,形成视频信号  $V01^{[2]}$ 。由于光源采用激光,因此干涉条纹光强信号为一高斯分布,另外 SSPDA 器件每扫描一次都有一回扫,因而使视频输出信号  $V01$  有断点,所以必须对  $V01$  信号进行处理。

前置处理电路是将视频信号  $V01$  放大,滤波平滑,去掉载频信号,得到与干涉条纹对应的方波信号  $V02$ 。若直接用此方波计数,测仪器分辨率很低,为此要对测量信号进行细分。

倍频电路完成细分,本仪器使分辨率为  $0.02\mu\text{m}$ 。同时产生双路差动信号  $CP_0$  和  $CP_s$ ,人为产生“双频”功能。倍频电路有两路;一路是对测量信号  $V02$  的  $Q$  倍频得  $CP_0 = Qf_0$ ,另一路是勃起始脉冲  $S$  进行  $mQ$  信频得  $CP_s, CP_s - mQf_s = Qf_0 (f_0 - \text{干涉条纹的频率}; m - \text{SSPDA 器件同时接收的干涉条纹数}; f_s - \text{起始脉冲频率}; f_0 = m f_s)$  由于  $Q, m$  数较大,在本系统中采用硬件分频的方法实现。

当被测物件静止时,  $CP_0$  与  $CP_s$  相等  $f_{cp_0} = Qf_0 = Qm f_s = f_{cp_s}$

当被测物体运动时,  $f_{cp_0}$  与  $f_{cp_s}$  不再相等;此时  $f_{cp_s}$  为:  $f_{cp_s} = Qf_0' = Q(f_0 \pm \Delta f)$

因  $f_0 = 1/Q \cdot f_{cp_0}$ , 则  $\Delta f = \pm 1/Q \cdot (f_{cp_0} - f_{cp_s})$

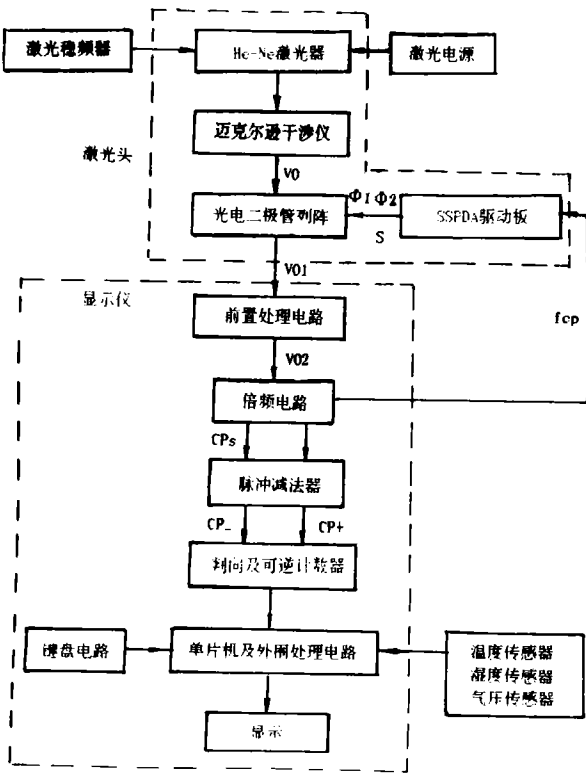


图3 测量系统框图

因(5)可写成:

$$S = \pm \int_0^1 \lambda \nu / 2n \cdot \Delta f dt = \pm \lambda \nu / 2Qn \cdot \int_0^1 (f_{cp_0} - f_{cp_s}) dt \quad (7)$$

由于本系统中脉冲减法有一个二倍频作用,因此(7)式可写成:

$$S = \pm \lambda \nu / 4Qn \cdot \int_0^1 (f_{cp_0} - f_{cp_s}) dt \quad (8)$$

可见通过倍频电路,分辨率得以提高。而  $f_{cp_0} - f_{cp_s}$  由脉冲减法器来完成。  $f_{cp}$  - 自扫描光电二极管阵列扫描频率,由  $8\text{MHz}$  晶体振荡器经  $16$  分频产生  $f_{cp} = 500\text{KHz}$ ,送至 SSPDA 工作。脉冲减法器电路是将通过倍频电路产生的两路信号  $CP_0$  和  $CP_s$  在保证  $CP_s$  和  $CP_0$  保证

$CP_0 - CP_s$  差值不变的条件下,降低两路信号的频率,使送入可逆计数器的频率变为较低频率的  $CP_+, CP_-$ 。故式(8)为:

$$S = \pm \lambda\nu/4Qn \cdot \int_0^1 (CP_+ - CP_-) dt \quad (9)$$

判向及可逆计数器电路,完成被测物体运动方向的判断,并将  $CP_+, CP_-$  转换成两路脉冲信号  $\delta_+, \delta_-$ ,再送入可逆计数器。设  $I$  为0到  $t$  时间内总的脉冲个数差值,  $\mu$  为分辨率,则(9)式可写成:

$$\begin{aligned} S &= \pm \lambda\nu/4Qn \cdot \int_0^1 (CP_+ - CP_-) dt = \pm \lambda\nu/4Qn \cdot \int_0^1 (\delta_+ - \delta_-) dt \\ &= \pm \lambda\nu/4Qn \cdot I = \mu I \end{aligned} \quad (10)$$

单片机电路,显示及键盘电路;

由(10)式可知测量系统的分辨率为  $\mu = \lambda\nu/4Qn$

这是一个无理数,因此需要进行有理化,波长要进行修正,另外在不同的温度,湿度,气压下激光的波长不同,因此需对波长进行补偿。在本系统中采用单片机 MCS-8098来完成,计算出来的位移量  $S$  在显示器上显示出来。键盘是提供手动补偿时分辨率的键入和各种命令的键入。

单片机及其外围电路的原理框图如图4所示:

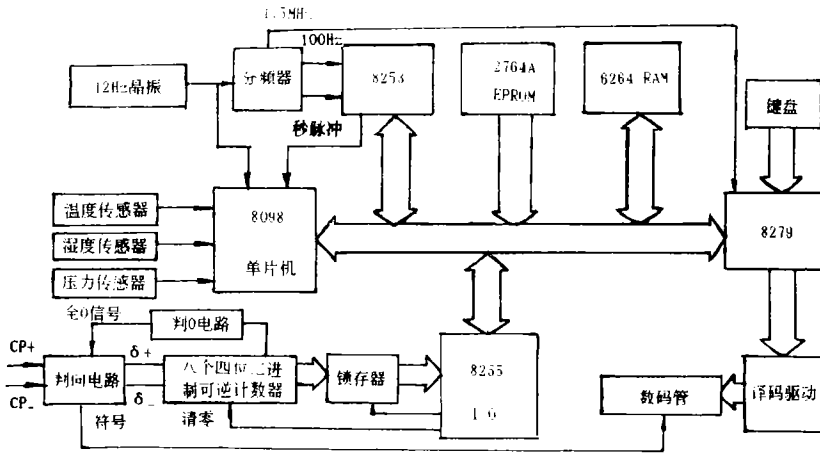


图4 单片机及外围处理电路原理框图

判向电路在测量开始时为原点(由清零号确定),正向运动时判向信号是高电平,反向运动时判向电路输出的判向信号为低电平,以完成运动方向的判别。另外还要完成脉冲减法器输出的  $CP_+$  和  $CP_-$  转换成  $\delta_+, \delta_-$ 。判向电路由双 D 触发器,四二输入与非门,六反相器及双二路2-2输入与或非门,四二输入或门所组成。

计数电路起积分器作用,采用八个四位二进制可逆计数器74LS193组成。零信号是当可逆计数器为零时判零电路输出的信号。

为了计数器的输出与单片机联接,采用4个锁存器74CS373作接口,锁存器接单片处理机通过并行输入输出接口8255,6264静态 RAM 是由8098单片机机内 RAM 容量不够而加以扩展随机存贮器,2764是 EPROM,8253为可编程定时器/计数器扩展接口,每个计数器的工作方式及计数常数分别由软件编程选择;计数器1选用方式0,用于频率为1Hz 的脉冲计数,显示时

间值;计数器2选用方式2用来产生秒脉冲,作温度测量的基准信号。8279键盘,显式接口芯片,完成键盘输入和LED显式控制两种功能。8279与单片处理机的连接采用中断方式。分频电路将12MHz晶振分频得到各种频率信号;有送8279的1.5MHz,有秒脉冲,1Hz脉冲等。

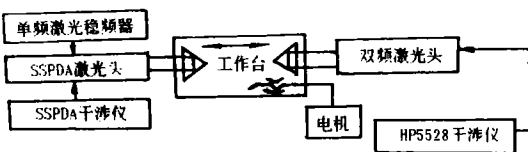
本仪器的测量系统可以完成下列功能:

- (1)温度;湿度,气压的变化激光波长 $\lambda$ 的自动补偿。
- (2)激光波长 $\lambda$ 的手动补偿,通过键盘直接键入分辨率来实现。
- (3)运动位移值的显示。
- (4)运动速度的测量。
- (5)温度,湿度,气压的实时测量。
- (6)显示从开机后工作的时间。

为了实现以上测量功能设计8098单片机处理机的程序,程序包括主程序,中断服务程序,数据表格程序和子程序等。

### 3 精度对比实验

为了检测本仪器的精度与稳定性,进行了长时间的考验与对比实验,使用了经过中国计量科学院鉴定的HP5528双频激光干涉仪进行的。实验原理如图5。



把SSPDA新型单频干涉仪与HP5528双频激光干涉仪相对放置,其各自测量镜分别放在工作台上,并位于同一测量线上。电机带动工作台做直线运动,下面为对比实验一组数据,该组数据为对比

图5 对比实验原理图

实验中重复精度最差的一组。实验的环境条件;温度24.1℃,湿度50.3%,气压为102.11KPa。每次测量前两干涉仪先清零,工作台往复两个方向运动,正向表示向激光头运动方向,起点和终点每测量一次调换一次,即这次终点作为下次测量的起点。从实验数据计算得均值 $\Delta S=0.13\mu\text{m}$ ;  $\sigma=0.09\mu\text{m}$ ,测量过程系统稳定工作,在多次4小时中数显漂移值为 $\pm 0.00008\text{mm}$ 以内。

表1

次数	SSPDA干涉仪 S1mm	HP5528干涉仪 S2mm	$\Delta s=(S1-S2)\mu\text{m}$	工作台方向
1	90.46992	90.46995	-0.03	反向
2	90.76800	90.76805	-0.05	正向
3	90.29580	90.29582	-0.02	反向
4	90.12748	90.12766	-0.18	正向
5	90.32154	90.32155	-0.01	反向
6	90.27628	90.27657	-0.29	正向
7	90.22122	90.22124	-0.02	反向
8	90.32428	90.43799	-0.13	正向
9	90.32441	90.43799	-0.13	反向
10	90.31406	90.31424	-0.18	正向

## 4 结 束 语

通过对比实验证明该测量系统的原理是正确的,方案是可行的。

由于采用 SSPDA 作为接收器件的新型单频激光干涉仪实现了“双频”的功能,在被测物静止时仍能保持一交流信号,因而处理电路可以用交流信号处理,因此减少了通常单频激光干涉仪的直流信号漂移等问题,从而使测量仪具有较高的精度,系统工作稳定,它具有一般单频干涉仪的结构简单,成本低优点,又有双频激光干涉仪抗干扰能力强的特点,可以用于精密长度测量中。

### 参 考 文 献

- [1]清华大学, SJD-Ⅱ 双频激光对功能干涉仪说明书. 1977, 12
- [2]重庆大学, 自扫描光电二极管阵列研制报告. 1984, 2
- [3]黄东晓, 应用自扫描光电二极管阵列(SSPDA)的单频激光干涉仪的研究学位论文. 1991, 6

### **Mono-frequency Laser Interferometer Using a SSPDA Device**

Xue Shifu, Li Qingxiang, Wang Boxiong, Xu Yuxian and Yu Shui

*(Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University,  
Beijing 100084)*

### **Abstract**

This paper describes a new mono-frequency laser interferometer using a self-scanning photoelectric diode array (SSPDA) as the receiving device of laser interference fringes.

**Key words:** SSPDA, Mono-frequency laser, Interferometer