

# 相移干涉计量中高精度相移器的研究

范 华 张 弛 任亚萍 谭玉山

(西安交通大学激光红外研究所 西安 710049)

**提要** 相移器是相移干涉计量中的关键技术,对测量精度有很大的影响,关系到相移技术的成败。介绍了一种闭环控制的高精度相移器,输出电压精度为 0.1%,相移器重复误差小于  $3^\circ$ ,用该相移器的电子散斑干涉计量系统测量精度可达  $\lambda/100$ 。

**关键词** 电子散斑,相移器,干涉计量

## 1 引 言

近年来干涉条纹图的自动分析技术有了很大的发展,已经从计数条纹级数发展为计算条纹相位,由于 1 根条纹等于  $360^\circ$  相位,从而使测量精度大大提高,且测量过程完全自动化,即可以由计算机直接给出最后结果,如所测物体各点位移、应变值、缺陷大小等,从而大大提高了干涉计量技术的使用性能和效率。目前普遍采用的求解相位的方法主要有两类:一类是傅里叶变换法<sup>[1]</sup>,它是将干涉条纹图逐行作傅里叶变换,并取出一级谱作反变换,从而求解出相位分布,该法只需一幅条纹图即可算出相位,但计算量较大;另一类方法是相移技术<sup>[2]</sup>,它是通过相移器在参考光或物光中引进已知相移量,人为地改变两相干波面的相对相位,比较干涉场中同一点在不同相移量下的光强值来求解该点相位。该方法需要相移器和多幅相移图,根据相移次数的不同目前有二步、三步和四步等不同相移计算方法,但最关键的技术是相移器的设计,它的精度、重复性以及稳定性都直接影响着相移技术的测量精度,关系到相移技术的成败。

实现相移的方法很多,主要有压电陶瓷(PZT)晶体法,液晶相移器<sup>[3]</sup>,偏振相移器<sup>[4]</sup>等。本文介绍一种高精度相移器,该相移器由计算机通过 D/A 接口板自动控制输出电压幅度,其电路设计为闭环控制电路,采用压电陶瓷晶体产生位移,具有很高的电压稳定度(0.1%)和较小的相移误差( $< 3^\circ$ )。

## 2 相移干涉计量基本原理

相移干涉计量技术能直接计算出物体的位相信息,其基本思想是通过引入已知的相移量,人为地改变任意一个产生干涉条纹的光场的位相,比较干涉场中的某一点在不同相移量下的光强变化来求解相位。

相干计量中干涉条纹图可表示为

$$I(x, y) = I_0(x, y) [1 + \gamma \cos \varphi(x, y)] \tag{1}$$

式中  $I_0(x, y)$  为背景光强,  $\gamma(x, y)$  为条纹对比度,  $\varphi(x, y)$  为含有物体变形信息的位相因子。

用相移技术可得到含有物体变形信息的位相因子  $\varphi(x, y)$ 。用相移器引入相移量  $\delta$ , 这时

$$I(x, y) = I_0(x, y) \{1 + \gamma(x, y) \cos[\varphi(x, y) + \delta]\} \tag{2}$$

为求解相位  $\varphi(x, y)$ , 至少需要三个方程。采用两步相移, 取  $\delta = 0, 2\pi/3, 4\pi/3$ , 可求得相位为<sup>[5]</sup>

$$\varphi(x, y) = \arctg \frac{\sqrt{3}(I_3 - I_2)}{2I_1 - I_2 - I_3} \tag{3}$$

由(3) 式可计算出相位值  $\varphi(x, y)$ , 其值在  $-\pi \sim +\pi$  之间, 因此相位图中在  $\varphi = \pm\pi$  处存在间断点, 通过判断间断点的值对相位进行去包裹处理, 便可得到连续相位图, 该连续相位图反映了物体的真实变形情况。

### 3 相移器设计

选用压电陶瓷晶体作移动元件实现相移, 具有结构简单、体积小、使用方便、响应速度快和性能稳定等优点, 图 1 为计算机控制的相移器示意图, 计算机输出的数字量由 D/A 转换器变为模拟电压, 控制 PZT 驱动电源, 利用压电陶瓷的逆压电效应和电致伸缩效应移动反射镜  $M$ , 改变两相干波面的光程差来实现光波的相位移动。

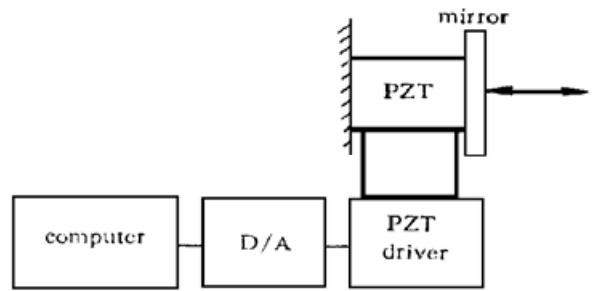


图 1 相移器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the phase shifter

#### 3.1 压电陶瓷晶体选择

压电陶瓷晶体的两极施加电压  $V$  后, 在外加电场的作用下将产生逆压电效应和电致伸缩效应, 引起陶瓷晶体的变形, 变形量与电压  $V$  的关系为

$$S = d_{33}V + \frac{M_3}{l}V^2 \tag{4}$$

其中  $S$  为纵向移动量,  $d_{33}$  为纵向压电常数,  $M_3$  为电致伸缩系数,  $l$  为两电极间的距离(即厚度)。逆压电效应产生的移动量与电压成线性关系, 且与电场方向有关, 电致伸缩效应产生的形变与外加电场方向相关, 成平方关系, 若要求 PZT 有很好的线性, 则可选择  $d_{33}$  很大,  $M_3$  很小的压电晶体。

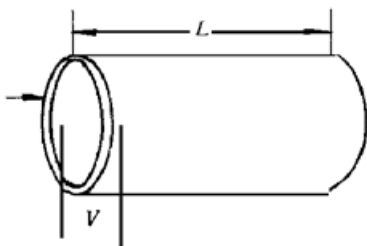


图 2 PZT 圆筒

Fig. 2 PZT cylinder

通常单片压电晶体需上千伏的高压驱动, 使用不方便, 为降低 PZT 驱动源电压, 可采用圆筒状结构, 如图 2 所示, 其轴向位移为

$$S = d_{31}V \frac{L}{l} + \frac{M_1}{l}LV^2 \tag{5}$$

式中  $d_{31}$  为横向压电常数,  $M_1$  为电致伸缩系数,  $L$  为 PZT 圆筒长度, 由于  $L \gg l$ , 因此较低的电压(100~ 200 V) 即可得到所需的位移值。

### 3.2 驱动源工作原理

我们设计的 PZT 驱动源工作原理框图如图 3 所示, 脉冲发生器产生一频率可调的脉冲信号, 此信号触发脉宽调制电路, 产生脉宽可调的脉冲信号, 驱动开关功率管工作在开关状态, 初级信号经高频变压器升到 PZT 所需的电压值, 经整流滤波电路后输出直流电压, 脉冲占空比越大输出电压越高, 因此可以通过调制脉冲占空比来实现对输出直流电压的控制, 另一方面, 通过采样电路实现闭环控制, 当计算机控制输入端电压改变时, 采样电路从输出端取样, 与输入端电压比较并放大误差信号, 用此信号控制脉宽调制电路输出脉冲占空比, 实现输出电压的自动控制。当计算机控制输入端电压不变, 输出电压由于某种原因发生变化时, 闭环控制电路将起作用实现输出电压的稳压控制。

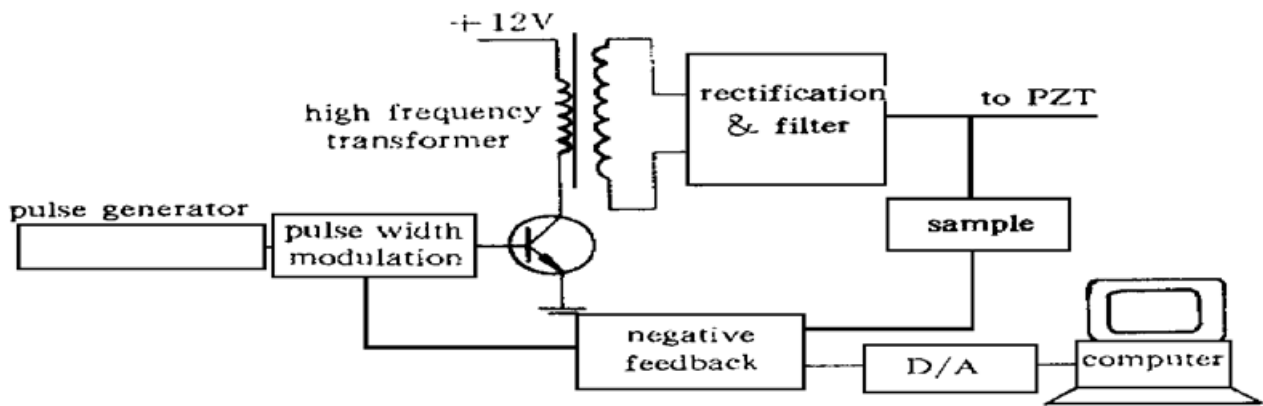


图 3 PZT 驱动源工作原理框图

Fig. 3 The schematic diagram of the PZT driver

## 4 相移器标定

相移器在使用前必须进行严格的标定, Y. Y. Cheng<sup>[6]</sup>等报道过对线性相移器的标定方法, 本文介绍一种类似于相干相位检测的标定方法<sup>[7-9]</sup>, 该方法具有很高的精度, 对相移器的线性没有特别要求, 标定光路采用泰曼-格林干涉仪光路, 如图 4 所示。

观察屏上两平滑相干波面产生垂直平行等间距干涉直条纹, 这时  $x$  相同的各点的相位相同, 与  $y$  无关

$$I(x) = I_0(x) [1 + \gamma \cos(\omega x + \varphi + \varphi_0)] \quad (6)$$

式中  $I_0(x)$  为背景光强,  $\gamma$  为条纹对比度,  $\omega$  为角频率,  $\varphi$  为位相因子,  $\varphi_0$  为常数初始相位。设

$$A = \int_{-1/2}^{1/2} I(x) \cos(\omega x) dx \quad (7)$$

$$B = \int_{-1/2}^{1/2} I(x) \sin(\omega x) dx \quad (8)$$

则

$$\varphi + \varphi_0 = \arctg(B/A) \quad (9)$$

我们对相移器的输出电压进行了反复测量, 其电压稳定度及重复性变化都小于 0.1%, 说明闭环控制驱动电路工作可以满足要求。驱动电压加到压电陶瓷相移器上, 根据上述标定原理进行了对不同输出电压下的相移量进行了标定, 表 1 为测量的电压与相移量关系。标定实验中

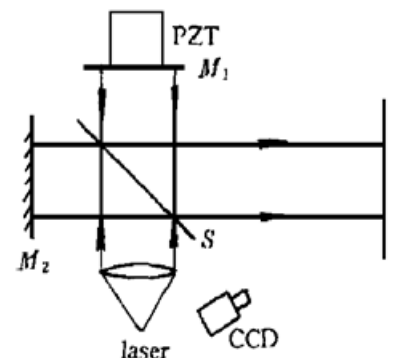


图 4 标定光路

Fig. 4 Calibration set-up

发现: (1) 所采用的压电陶瓷晶体有约 80 V 的阈值电压; (2) 环境和激光器漂移会引入一些误差, 且这种误差具有随机性; (3) 测量时间间隔对测量的准确性有较大的影响, 因此在引入相移后应尽快摄取图像, 以最大限度减少环境及激光器等外界因素的干扰。驱动电路及压电陶瓷晶体都有非线性, 但这不影响相移器的准确性, 因为我们所需的相移值是有限的和固定的几个值, 如对二步相移, 两次相位引入都是  $2\pi/3$ , 对三步相移, 三次相位引入都是  $\pi/2$ , 对这些点要进行精确标定。

表 1 相移驱动器电压与相移量关系实验数据

Table 1 Experimental data of the relationship between the voltage applied to phase shifter and shift value

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
voltage/V	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210
shift value/( $^{\circ}$ )	0	25	50	85	120	145	180	215	240	275	310	335	365	395

### 5 实验装置

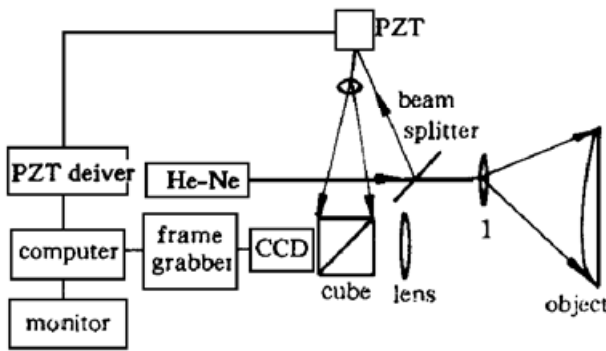


图 5 相移电子散斑原理图

Fig. 5 Schematic diagram of phase shifting ESPI

将本文介绍的相移器用于相移电子散斑干涉计量系统中, 实验装置如图 5 所示, He-Ne 激光器发出功率为 4 mW, 波长为 630 nm 的激光, 经分束器分成物光和参考光两部分, 分光比为物光 : 参考光 = 10 : 1。物光照明被测物体, 被测物体由成像透镜成像经分光棱镜到达 CCD 摄像机靶面, 参考光由分光棱镜 cube 反射进入 CCD 靶面, 在 CCD 靶面物光散斑场与光滑参考光干涉形成干涉散斑场, 该干涉散斑场由 CCD 摄像机转换为视频图像信号, 视频信号由图像板数字量化并由计算机进行处理, 得到物体变形信息。

我们对金属平板绕面内中心线刚体转动情况进行了测量, 图 6 为测量结果, 图 6 (a) 为散斑条纹图, 图 6 (b) 为包裹相位图, 图 6 (c) 为去包裹相位图, 它反映了物体的移动情况。

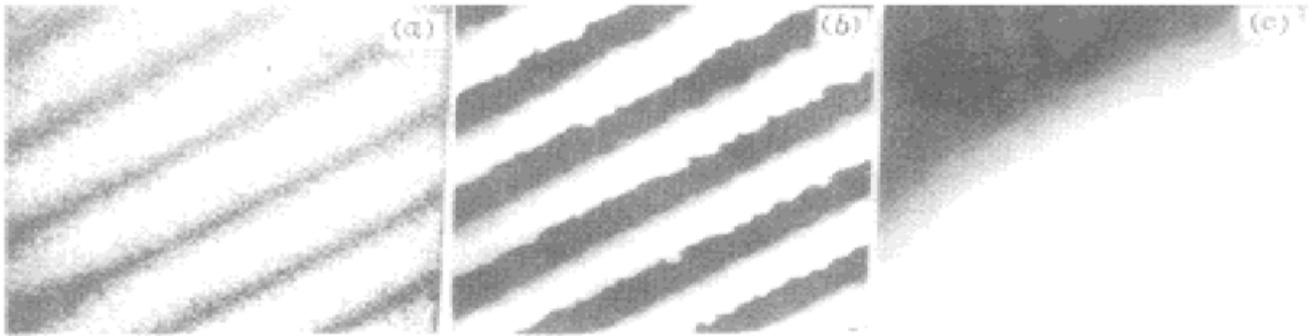


图 6 测量结果

Fig. 6 Measured results

由于相移电子散斑测量精度很高, 要进行绝对标定很困难, 我们用实验的方法对本文所介绍的相移电子散斑的测量精度进行了考察, 测量对象为  $100\text{ mm} \times 200\text{ mm}$  的标准金属平面, 如果物体静止不动即物体位移为零, 则理想情况下被测物体表面各点的相位值应为相等的常数, 求出物体静止不动时各点相位的差异, 可以在一定程度上反映测量精度, 我们进行反复多次测量, 误差小于  $3^\circ$ , 因此测量精度可达  $\lambda/120$ 。

### 参 考 文 献

- 1 M. Takeda, H. Ina, S. Kobayashi. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **72**(1): 156~ 160
- 2 K. Creath. Phase-shifting speckle interferometry. *App. Opt.*, 1985, **24**(18): 3053~ 3058
- 3 Jiang Lijun, Liu Wei, Tan Yushan. A study of PALC phase-shifting shearing ESPI. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1996, **16**(2): 244~ 247 (in Chinese)
- 4 H. Kadono, N. Takai, T. Asakura. New common-path phase shifting interferometer using a polarization technique. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(5): 898~ 904
- 5 C. Y. Ai, J. C. Wyant. Effect of piezoelectric transducer nonlinearity on phase shift interferometry. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(6): 1112~ 1116
- 6 Y. Y. Cheng. Phase shifter calibration in phase-shifting interferometry. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(18): 3049~ 3052
- 7 Suezou Nakadate. Phase detection of equidistant fringes for highly sensitive optical sensing. Ⅰ. Principle and error analyses. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1988, **5**(8): 1258~ 1264
- 8 Suezou Nakadate. Phase detection of equidistant fringes for highly sensitive optical sensing. Ⅱ. Experiments. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1988, **5**(8): 1265~ 1269
- 9 Suezou Nakadate. High precision retardation measurement using phase detection of Young's fringes. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(2): 242~ 246

## Study of a High Precision Phase Shifter Employed in Phase Shifting Metrology

Fan Hua Zhang Chi Ren Yaping Tan Yushan

(Institute of Laser & IR Applications, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

**Abstract** Phase shifting is the key technique in phase shifting interference metrology and it greatly effects the measuring precision even results in a failure. A high precision phase shifter is presented in this paper. The error of the output voltage is less than 0.1% and the error of the phase shifter is less than 3 degrees. The ESPI measuring system with the phase shifter described in this paper can reach a precision of  $\lambda/100$ .

**Key words** electronic speckle pattern interferometry (ESPI), phase shifter, interference metrology