

# 相移干涉计量中相移器的 原路相干相位检测标定

范 华 陈文艺 谭玉山

(西安交通大学激光红外研究所 西安 710049)

**提要** 介绍一种原路相干相位检测的标定方法,该方法具有很高的精度,对相移器的线性没有特别要求,相移器的标定与使用是同一光路,消除了标定光路与使用光路不同所带来的误差。

**关键词** 相移器,干涉计量,相干相位检测,标定

## 1 引 言

80 年代初期对干涉条纹图的自动分析通常是直接对干涉条纹进行滤波、二值化、抽骨架等简单的数学图像处理,然后计数条纹级数<sup>[1]</sup>,这种方法精度低,对条纹图噪声敏感,无法判断条纹凹凸,需人工参与。近年来干涉条纹的自动分析技术已有很大发展,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°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>[2]</sup>,将干涉条纹图逐行作傅里叶变换,经频域带通滤波,并取出其中一级谱作反变换,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>[3]</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,从干涉场中某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算法,但最关键的技术是相移器的设计,要求它要有高的精度、重复性及稳定性,此外相移器的标定也是非常重要的一个过程,直接影响相移技术的测量精度,关系到相移的成败。Y. Y. Cheng<sup>[4]</sup>等报道过对线性相移器的标定方法,本文介绍一种精度很高的原路相干相位检测标定法。

## 2 相干相位检测原理

两相干波面形成平行等间距正弦干涉条纹,该条纹可表示为

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

式中  $I_0(x, y)$  为背景光强,  $\gamma(x, y)$  为条纹对比度,  $\omega$  为角频率,  $\varphi(x, y)$  为相位因子。

将角频率为  $\omega$  的正弦函数乘以(1) 式得

$$I_1(x, y) = I_0(x, y) \left[ \sin\omega x + \frac{\psi(x, y)}{2} \sin[2\omega x + \varphi(x, y)] - \frac{\psi(x, y)}{2} \sin\varphi(x, y) \right] \quad (2)$$

进行低通滤波后, 则

$$I_1(x, y) = I_0(x, y) \frac{\psi(x, y)}{2} \sin\varphi(x, y) \quad (3)$$

同理(1) 式乘以  $\cos\omega x$  并低通滤波, 得

$$I_2(x, y) = I_0(x, y) \frac{\psi(x, y)}{2} \cos\varphi(x, y) \quad (4)$$

由(3), (4) 式得

$$\varphi(x, y) = \arctg \left[ \frac{I_1}{I_2} \right] \quad (5)$$

由(5) 式可求得相位。上述解调相位的方法类似于通信中的相干解调, 且用到两个正交的三角函数, 所以称为正交相干相位检测。

### 3 面内相移 DSPI 及标定

将本文介绍的相移器标定方法用于相移数字散斑测量系统中的相移器标定。实验装置如

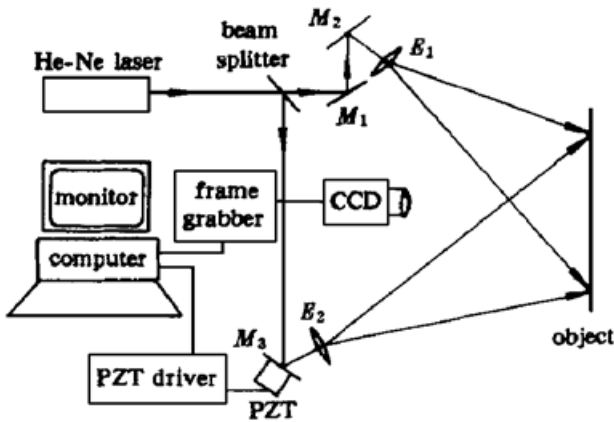


图 1 相移数字散斑原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of phase shifting DSPI

图 1 所示, 该实验光路是典型的对面内位移敏感的数字散斑光路。He-Ne 激光器发出功率为 4 mW, 波长为 630 nm 的激光, 经分束器分成两部分, 分光比为 1:1, 透射光经全反镜  $M_1$  和  $M_2$  反射, 经扩束镜  $E_1$  扩束后照明被测物体, 反射光经 PZT 晶体与全反镜  $M_3$  构成的相移器后, 被扩束镜  $E_2$  扩束后照明被测物体。被测物体由成像透镜成像到 CCD 摄像机靶面, 在 CCD 靶面两散斑场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化并由计算机进行处理, 得到物体面内变形信息。图像板为基于 PCI 总线的 MPE1000 黑白

图像板, 图像传送速度高达 25 Mbytes/s, 可实现摄像机图像实时传送到计算机内存, 图像分辨率为  $512 \times 512 \times 8$  bit。计算机使用 Pentium 微机, 整套系统具有较高的处理速度。由于数字散斑测量精度较高, 因此整套光路系统要放在气垫隔振光学平台上。为防止空气流动的影响, 用金属罩壳罩住光路, 尽可能减小外界环境的影响。

将平面反射镜固定在压电陶瓷(PZT) 晶体上, PZT 晶体具有压电效应和电致伸缩效应, 在外加电场的作用下将伸长和收缩, 带动平面反射镜移动, 从而在光路中引入相位值, 达到相移的目的。相移技术需要通过相移器引入已知相移值, 典型情况下有第二步相移法, 第二步相移值分别为  $120^\circ$  和  $240^\circ$ ; 三步相移法, 三步相移值分别为  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  和  $270^\circ$ 。计算机通过 12 位 D/A 转换电路控制 PZT 移动, D/A 输出电压范围为 0~ 10 V, 对 PZT 的标定实际上是对 PZT 和平面反射镜所构成的相移器的标定, 通过标定得到产生所需相移值时计算机应向 D/A 口输出的数

字量大小, 数字量大小决定了 D/A 输出的电压值大小, 这些数据是今后相移技术所必需的。具体标定方法是: 图 1 光路中, 在初始状态取一幅散斑图  $A_0$  存于计算机内, 然后调节平面全反镜  $M_2$ , 使该路入射光入射角有一微小变化, 这时两光场相对相位将发生变化, 计算机通过 D/A 板在 0~10 V 范围内输出不同的电压值  $V_i$ , 驱动 PZT 变形。每输出一个电压值  $V_i$ , 计算机摄取一幅散斑图  $A_i$ 。设  $I_i = |A_i - A_0|$ , 由于改变了照明光场的相对相位, 变化前后的两幅散斑场相减将产生平行的散斑直条纹图, 即  $I_i$  为对应不同 D/A 电压值的散斑直条纹图, 用数字图像处理的方法直接求出条纹图的大概频率, 以此频率作为条纹载波频率按上述正交相干相位检测原理对相位进行解调, 可求出其相位值  $\psi_i$ , 由于初相位不为零, 因此  $\psi_i - \psi_{i-1}$  是对应于 D/A 电压  $V_i$  的相位变化量。实验中先以电压变化量 0.2 V 的增量对相移器进行 50 个点的粗标定, 然后再在相移技术所需要的典型相位点, 如二步相移时的  $120^\circ$  和  $240^\circ$  以及三步相移时的  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  和  $270^\circ$  进行精确标定, 以节省标定时间。由于采用 12 位 D/A 转换电路, 因此由计算机控制最多可给出 4096 种不同的输出电压值, 足以满足高精度相移器的要求。

相移干涉计量中相移的次数是有限的, 如通常采用的相移算法有二步(每步  $120^\circ$ ) 相移算法、三步(每步  $90^\circ$ ) 相移算法和四步(每步  $90^\circ$ ) 相移算法等, 因此在这些点处对相移器要进行精确标定, 对相移器的线性无特殊要求, 但要求相移器要有较好的重复性。

## 4 实验结果

图 1 是一种典型的对面内位移敏感的相移数字散斑光路, 我们首先按本文所述方法对该光路中的 PZT 相移器进行了标定, 然后用该光路进行面内位移测量实验, 测量对象为一金属平板, 对平板绕垂直中心轴线刚体转动时的面内位移情况进行测量, 实验中被测工件转轴与 CCD 摄像机观察方向一致。采用二步相移技术, 图 2 为测量结果, 图 2 (a) 为散斑条纹图, (b) 为包裹相位图, (c) 为去包裹相位图, 它反映了物体移动情况。

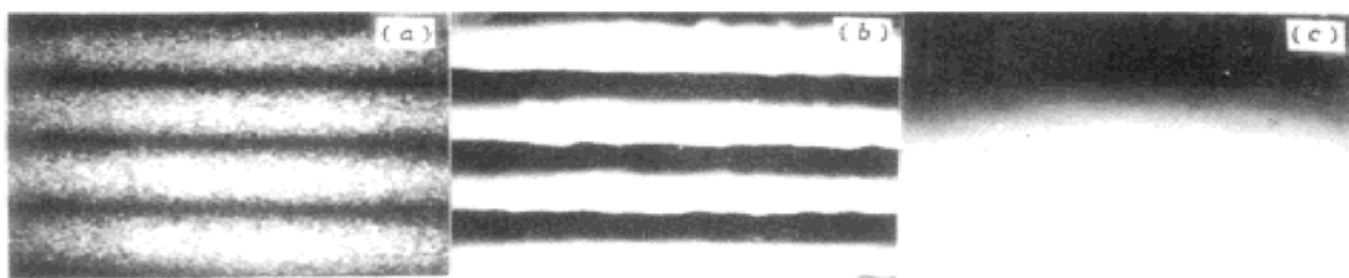


图 2 测量结果

Fig. 2 Measured results

由图 2 中去包裹图可看到相位均匀变化。从显示被测平面的灰度值数据可以看到灰度值是均匀变化的。因此用本文所述的原路正交相干相位检测标定方法标定的相移器用于散斑干涉计量中, 可以得到令人满意的去包裹相位图。

## 参 考 文 献

- 1 W. R. J. Funnell. Image processing applied to the interactive analysis of interferometric fringes. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(18): 3245~ 3250
- 2 M. Takeda, H. Ina, S. Kobayashi. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topog-

- raphy and interferometry. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **72**(1): 156~ 160
- 3 K. Creath. Phase-shifting speckle interferometry. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(18): 3053~ 3058
- 4 Y. Y. Cheng, J. C. Wyant. Phase shifter calibration in phase-shifting interferometry. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(18): 3049~ 3052

## Calibration of a Phase Shifter with the Coherent Phase Detecting Method in Phase Shifting Interferometry

Fan Hua   Chen Wenyi   Tan Yushan

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

**Abstract** The phase shifter is a key element in phase shifting interference metrology. Its calibration is an important process that cannot be neglected. The accuracy of calibration has a great influence on the measuring precision. It determines the success or failure of a phase shifting technique. A calibration method of a phase shifter is presented in this paper. It owns the features of high precision and has no special requirement for the linearity of the phase shifter. The calibration is performed with the same optical set-up as it is actually used. The errors owing to the different optical paths for calibration and for actual use are thus deleted.

**Key words** phase shifter, interference metrology, coherent phase detecting, calibration