

文章编号: 0253-2239(2001)04-468-04

# 由三个压电陶瓷堆组成的干涉仪移相器的 校正与标定

朱煜<sup>1)</sup> 陈进榜<sup>2)</sup> 朱日宏<sup>2)</sup> 高志山<sup>2)</sup>

1), 华东理工大学信息学院信息工程系, 上海 200237  
2), 南京理工大学电光学院, 南京 210094

**摘要:** 根据傅里叶变换原理, 提出了一种对由三个压电陶瓷堆(PZT)组成的干涉仪移相器进行非线性及平行性校正与标定的方法。在对各个压电陶瓷堆进行非线性校正的基础上, 利用干涉图像自动分析系统, 综合分析各个压电陶瓷堆之间的牵制作用, 从而得到对整体干涉仪移相器平行性校正的补偿依据。组建了一套卧式数字平面干涉仪, 在干涉仪移相器承重 6 kg 的情况下进行实验, 非线性误差由 12% 校正至 0.3%。由于干涉仪移相器承重而引起的移相过程中的条纹旋转降至 2°, 条纹间距变化小于 2%。

**关键词:** 干涉仪移相器; 压电陶瓷堆; 校正

中图分类号: TH741.1<sup>+</sup>3 文献标识码: A

## 1 引 言

移相干涉术<sup>[1,2]</sup>经过近 20 年的发展, 以其优良的测试精度而被广泛用于各种现代干涉仪器中。移相器是移相干涉仪中的主要部件, 移相器移相误差是影响移相干涉仪复原波面的精度的重要因素之一。因而对移相器进行误差校正具有实际意义。一般的移相器是以一个压电陶瓷堆作为微位移驱动器, 我们曾对它的非线性校正的原理作过详细探讨<sup>[3]</sup>。而对于孔径较大的卧式水平光路的斐索干涉仪, 压电陶瓷要驱动参考反射镜尤其是重量较大的球面标准透镜时, 由一个压电陶瓷堆构成的微位移驱动器的作用范围有限, 难以满足驱动要求。此时常用由三个压电陶瓷堆均匀分布在一个圆周上的移相器结构, 以保证驱动要求。由三个压电陶瓷堆组成的干涉仪移相器在移相时由于各个压电陶瓷堆的伸展量不一致, 而使干涉仪移相器每一步移相的干涉图条纹发生旋转及条纹数目发生变化, 这种不一致性称为干涉仪移相器的不平行性。通常, 干涉仪移相步长为  $M\lambda$  (相位移  $\pi/2$ ), 而干涉仪移相器即使在平行移动的情况下, 每一步移相的步长不一定能达到  $M\lambda$ , 这称为干涉仪移相器的移相不准确性。不平行性及移相不准确性的好坏对实际干涉测量工作的影响很大。

要保证移相器移相时平行移动, 就需要对三个压电陶瓷堆同时校正。本文利用组建的卧式平面干涉仪进行实验分析, 用快速傅里叶变换及非线性拟合方法对单个压电陶瓷堆进行非线性自校正, 在此基础上根据干涉条纹处理的方法对由于三个压电陶瓷堆移相时伸长不一致而引起的条纹旋转及间距变化进行修正, 再对整体干涉仪移相器微位移进行移相校正及标定, 使其每次移相相位变化  $\pi/2$ 。

## 2 移相器非线性校正原理

### 2.1 干涉仪移相器微位移测试原理

对干涉仪移相器进行校正之前必须先测出其微位移随电压的特性曲线关系。

根据光干涉原理, 两个波面发生干涉时, 其干涉条纹的光强分布<sup>[4,5]</sup>为

$$i(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \times \cos[2\pi f_x x + \phi_0(x, y) + \varphi(k)], \quad (1)$$

其中  $a(x, y)$  及  $b(x, y)$  分别表示干涉图背景光强和调制度,  $f_x$  表示条纹在  $x$  方向的斜率,  $\phi_0(x, y)$  为表征参考与测试相干光束的相位差,  $\varphi(k)$  为由压电晶体驱动参考反射镜电压变化  $V(k)$  引入的相位变化量, 压电晶体驱动电压随步进数  $k$  而变, 所以  $\varphi(k)$  可看作为电压变化序数  $k$  的函数。(1) 式的复数形式为

$$I(x, y, k) = a(x, y) + c(x, y) \exp(2\pi j f_x x) + c^*(x, y) \exp(-2\pi j f_x x), \quad (2)$$

其中

$$c(x, y) = \frac{1}{2} b(x, y) \exp\{j[\phi_0(x, y) + \varphi(k)]\}. \quad (3)$$

对(3)式作傅里叶变换, 可得频率域表达式为

$$\mathcal{F}\{I(x, y)\} = I'(u, v) = A(u, v) + C(u - f_x) + C^*(u + f_x), \quad (4)$$

式中后两项表示正、负一级频谱。用余弦滤波窗提取出一个一级频谱, 并将其中心移至坐标原点, 就可以将载频滤除, 得到  $C(u)$ , 然后作傅里叶变换

$$\mathcal{F}^{-1}\{C(u, y)\} = c(x, y) = \frac{1}{2} b(x, y) \exp\{j[\phi_0(x, y) + \varphi(k)]\}. \quad (5)$$

于是可得到相位值

$$\phi_0(x, y) + \varphi(k) = \arctan \frac{\text{Im}\{c(x, y)\}}{\text{Re}\{c(x, y)\}}. \quad (6)$$

$\phi_0(x, y)$  表示了被测面的面形, 它对步进数  $k$  来说是一个常量。移相相位  $\varphi(k)$  相应参考镜的微位移量  $S(k)$  可以通过下式计算:

$$S(k) = \frac{\lambda}{2\pi} \varphi(k), \quad (7)$$

其中  $\lambda$  是入射光波长。

图 1 为对实测干涉条纹进行傅里叶变换后的频谱图, 采样点数为 256。

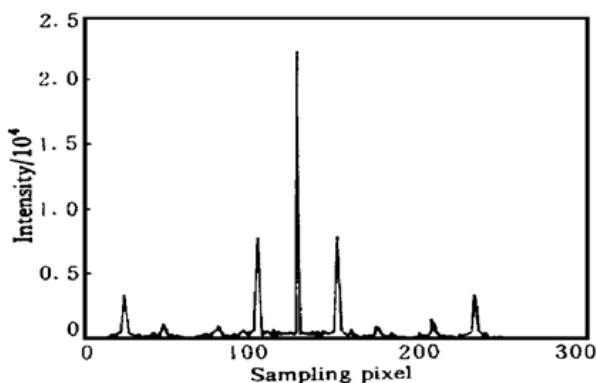


Fig. 1 Frequency spectrum of fringe pattern

为了消除随机误差, 需要对压电陶瓷每移动一步的 256 个采样点进行平均, 再求出第一步之间的相位差值。这样就消去了(6)式中波面  $\phi_0(x, y)$  的影响, 再由(7)式得到微位移量值。

## 2.2 非线性校正

按照以上方法得到位移与步进数的关系曲线。非线性的表示如图 2 所示, 即被测位移与理想位移差异最大值与总位移量之比为:

$$\Delta S = h_{\max}/S \times 100\%. \quad (8)$$

由于压电陶瓷固有的非线性会给干涉法带来移相误差。因此采用干涉仪移相器非等间距的电压步进数来产生等间距变化的位移。非线性校正采用最小二乘拟合方法。

对测量得到的非线性位移与干涉仪移相器输入电压进行二阶最小二乘拟合, 得到曲线关系

$$A V^2 + B V + C = S(V), \quad (9)$$

其中  $A$ 、 $B$ 、 $C$  为曲线方程的系数。根据该关系产生等间距变化的位移量  $S'(V)$ , 从而对应非等间隔变化的电压  $V$ 。对压电陶瓷堆进行重复测试, 直到非线性变化在 0.3% 以内为止。

用上述方法测得每个压电陶瓷堆的微位移与施加电压的关系, 为下一步干涉仪移相器的平行性校正提供依据。

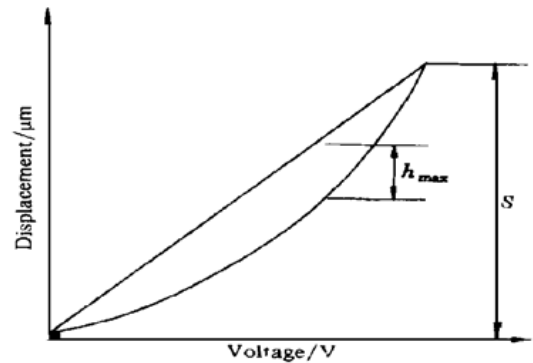


Fig. 2 Expression of nonlinear of displacement

## 3 干涉仪移相器移相平行性校正

当组成干涉仪移相器的三个压电陶瓷堆同时发生微位移时, 由于三者之间的差异及承重的影响使移相的每一步之间产生条纹旋转及条纹数目的变化, 它将给实际测试带来严重的误差。本文提出的干涉仪移相器平行性测试及校正流程图如图 3 所示。

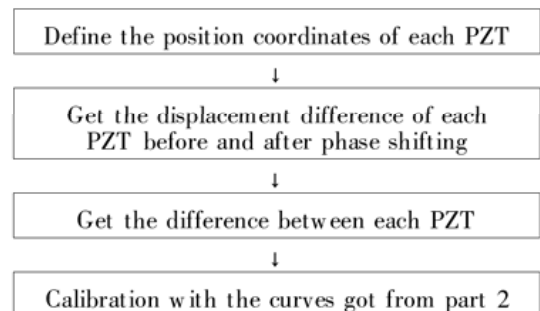


Fig. 3 Progress for calibration of nonparallelism

根据干涉条纹处理方法, 首先确定三个压电陶瓷堆(a b c)在干涉图中的位置坐标, 再得到干涉仪

移相器移相前后的平面方程:

$$A_1x + b_1y + C_1z = 0, \quad (10)$$

$$A_2x + b_2y + C_2z + D_2 = 0, \quad (11)$$

式中  $A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2, D$  为平面方程的系数,  $x, y, z$  为空间位置坐标, 移相前、后分别用下标 1、2 表示。

通过条纹处理分析, 三者移相前后微位移量  $Z_a, Z_b, Z_c$  可表示为(12)式、(13)式、(14)式。条纹旋转角度及条纹数目变化与三个压电陶瓷堆之间微位移的差异有关。

$$Z_a = \left[ \frac{A_1}{C_1} - \frac{A_2}{C_2} \right] x_a + \left[ \frac{B_1}{C_1} - \frac{B_2}{C_2} \right] y_a - \frac{D_2}{C_2}, \quad (12)$$

$$Z_b = \left[ \frac{A_1}{C_1} - \frac{A_2}{C_2} \right] x_b + \left[ \frac{B_1}{C_1} - \frac{B_2}{C_2} \right] y_b - \frac{D_2}{C_2}, \quad (13)$$

$$Z_c = \left[ \frac{A_1}{C_1} - \frac{A_2}{C_2} \right] x_c + \left[ \frac{B_1}{C_1} - \frac{B_2}{C_2} \right] y_c - \frac{D_2}{C_2}, \quad (14)$$

式中  $(x_a, y_a), (x_b, y_b), (x_c, y_c)$  分别表示 a、b、c 三

个压电陶瓷堆的位置坐标。由上式得到的三个压电陶瓷堆位移差  $(Z_a - Z_b)$ , 及  $(Z_a - Z_c)$  是校正干涉仪移相器平行性的依据。再根据分别测得的三个压电陶瓷堆微位移数据, 来进行平行性补偿校正, 使位移差达到最小。

这时再用上述的方法进行微位移标定, 使干涉仪移相器每移相一步, 相位变化为  $\pi/2$ 。

### 4 实验及测试结果

在卧式水平光路斐索干涉仪上的移相器中, 三个压电陶瓷堆承重不均匀, 实际应用中引起的条纹旋转及间距变化非常严重。为此我们组建了如图 4 所示的卧式平面干涉仪, 其中干涉移相器承载 6 kg。计算机控制 D/A 转换板输出 0~10 V 电压, 经过三个放大源将电压放大到 0~100 V, 分别控制三个压电陶瓷堆发生微位移, 使干涉仪移相器移相。首先在承载状态下对每个压电陶瓷堆进行非线性测试, 得到单个压电陶瓷堆的微位移与步进数的关系曲线。

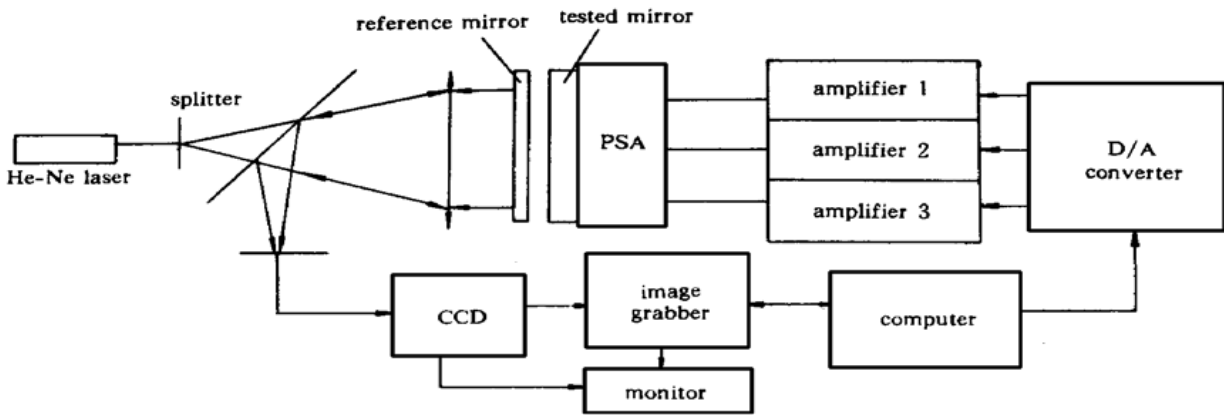


Fig. 4 Scheme of experimental device

图 5 中实线和虚线分别表示非线性校正前后的微位移曲线关系。由于压电陶瓷堆本身的非线性, 使曲线在起始及终止的部分非线性较差, 因此经过多次试验比较, 在满足伸长量的要求的情况下, 以某一电压值为起始点, 选取曲线中间较平坦的一段作为干涉仪移相器的位移曲线。再根据得到的三条曲线关系及上述计算干涉仪移相器平行性的方法, 进行平行性校正, 在 100 mm 口径、干涉场中有 5 条条纹的情况下, 条纹旋转控制在  $2^\circ$ , 条纹间距变化控制在 2% 以下。

图 6 为平行性校正前后的对比, 图 6(a)、图 6(b) 为校正前的干涉图, 图 6(c)、图 6(d) 为对其进行平行性校正后的干涉图。

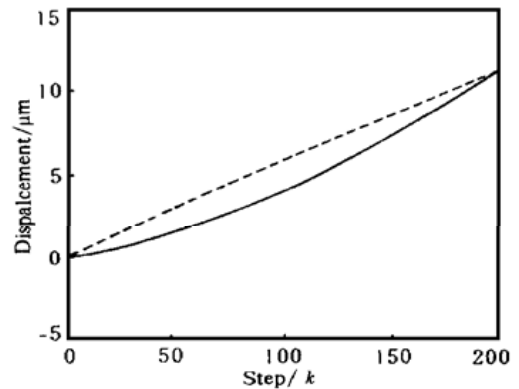


Fig. 5 Curve of displacement vs. step  $k$ . Dotted line: calibrated displacement; Solid line: nonlinear displacement

图 7 所示的干涉图为进行移相  $\pi/2$  标定后的移相干涉图。

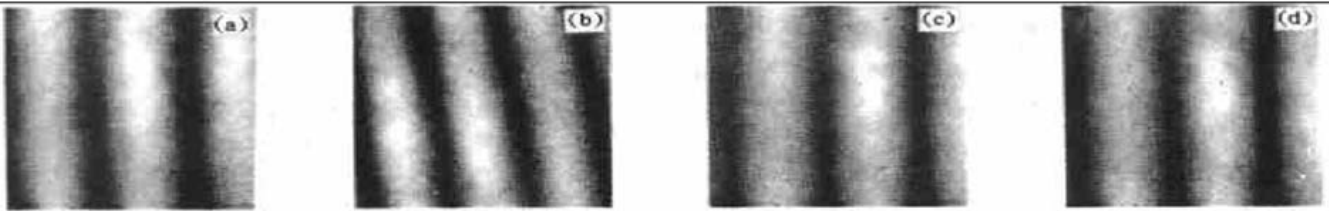


Fig. 6 Parallelism calibration of PSA. (a) and (b) before calibration, (c) and (d) after calibration

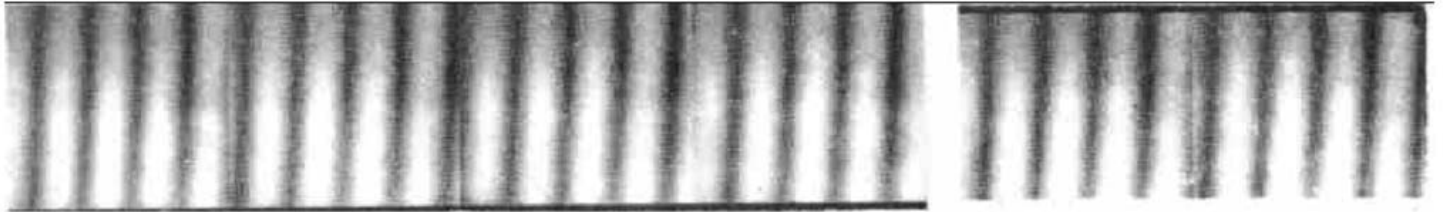


Fig. 7 Fringe patterns of phase shifting

### 参 考 文 献

- [1] Creath K. Phase measurement interferometry techniques. *Progress in Optics*, 1988, **16**: 349~ 393
- [2] Ochoa N A, Huntley J M. Convenient method for calibrating nonlinear phase modulators for use in phase shifting interferometry. *Opt. Engng.*, 1998, **37**(5): 2501~ 2505
- [3] 朱 煜, 陈进榜, 朱日宏等. 压电陶瓷微位移特性的电  
脑接触式干涉测量法. *压电与声光*, 1998, **20**(4): 283  
~ 286
- [4] Chen Jinbang, Zhu Rihong, Chen Lei *et al.*. Two dimensional Fourier transform algorithm analyzing the interferogram. *Proc. SPIE*, 1991, **1553**: 616~ 625
- [5] 朱家正. 空间扫描方法和 DFRT 由干涉图复原波面的实用化研讨. 南京: 华东工学院硕士学位论文, 1989. 22~ 32

## Self-Calibrating for Phase Shifting Adapter Consisting of Three PZT

Zhu Yu

(Department of Information Technology, School of Information, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237)

Chen Jingbang Zhu Rihong Gao Zhishan

(School of Electric-Optic, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094)

(Received 5 May 1999; revised 5 January 2000)

**Abstract:** A self-calibrating method was proposed to calibrate the nonlinear of phase shifting adapter (PSA) consisting of three piezoelectric ceramics. Fast Fourier transform and linear polynomial fitting algorithms were used to rectify the nonlinearity of PSA, and fringe processing method was used to decline the rotation to  $1^\circ$  and the change of fringe distance to 2%. Experiments give testing results and show the priority of the calibrating method.

**Key words:** phase shifting adapter; piezoelectric ceramics; calibration