

文章编号: 0258-7025(2004)07-0861-04

# 移相器类进动现象对干涉测量的影响

吴 栋<sup>1,2</sup>, 朱日宏<sup>1</sup>, 陈 磊<sup>1</sup>, 王 青<sup>1</sup>, 何 勇<sup>1</sup>, 高志山<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 南京理工大学光电学院, 江苏 南京 210094; <sup>2</sup> 解放军镇江船艇学院教研部, 江苏 镇江 212003)

**摘要** 压电晶体(PZT)光学移相器作为移相干涉仪(PSI)的关键部件,其移相误差直接影响被测波面的相位复原精度。分析了压电晶体移相器在移相过程中导致干涉图旋转的原因——类进动,其本质是移相器在伸长的同时其参考镜端面法线方向绕着伸长方向产生旋转。利用典型的 Hariharan 五步移相算法,得出了类进动现象所导致的波面相位复原误差计算公式,给出了在测试孔径上的误差分布图。对影响误差大小的主要因素如干涉条纹的宽度、旋转的角度和测试口径等进行了具体分析,由此推导出在移相干涉仪光学调整过程中控制干涉图旋转误差的准则。

**关键词** 光学技术与仪器;干涉测量;移相干涉仪;移相器;类进动;误差

**中图分类号** TH 744.3 **文献标识码** A

## Effect of Phase Shifter's Sub-Processional Motion on Interferometry

WU Dong<sup>1,2</sup>, ZHU Ri-hong<sup>1</sup>, CHEN Lei<sup>1</sup>, WANG Qing<sup>1</sup>, HE Yong<sup>1</sup>, GAO Zhi-shan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Electronic Engineering and Photoelectric Technology,  
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China  
<sup>2</sup> Zhenjiang Watercraft Institute of PLA, Zhenjiang, Jiangsu 212003, China

**Abstract** In modern digital phase-shifting interferometry (PSI), the phase-shifting error of piezoelectric transducer (PZT) optical phase shifter, which is the basic device of phase-shifting interferometer, directly effects measurement accuracy during wavefront phase unwrapping with phase-shifting interferograms. A phenomenon named sub-processional motion that can result in fringes' rotation in the processing of phase shift is described. This phenomenon is derived from the normal-line rotation of standard reference surface revolving around the elongate direction of PZT phase shifter. In terms of the classic phase-shifting algorithm-Hariharan 5-Bucket algorithm, the error formula of phase unwrapping is given due to sub-processional motion, and the error distribution on aperture is also derived. Based on error factor analysis, criterions to control the error are presented at such aspects: width of fringes, rotation angle and tested aperture.

**Key words** optics technique and instrument; interferometry; phase-shifting interferometer; phase shifter; sub-processional motion; error

## 1 引 言

在移相干涉仪中,一般用压电晶体(PZT)作为微位移驱动器,压电晶体与相应的机械固定和导向装置组成移相器。移相器和它的驱动电源、控制信号源、标准参考镜一起构成了干涉仪的移相系统。

干涉仪在测量时,移相系统在计算机的控制下,逐步驱动标准参考镜作等间隔平移,实现移相调制。移相器影响测量精度的因素主要有两个:一是移相器的非线性。根据基本的移相干涉技术算法,要求移相器随步进数成线性位移,但由于移相器自身的特性,它随电压增加而伸长的特性曲线总是有一定的

收稿日期:2003-03-28

基金项目:国防军工计量“十五”重点项目(编号:60803134)资助课题。

作者简介:吴 栋(1971—),男,南京理工大学光学工程专业博士研究生,解放军镇江船艇学院讲师,主要从事光干涉测量研究工作。E-mail:wudong1000@yahoo.com.cn

非线性,针对此问题,一般的做法是利用干涉仪及移相系统自身来标定、校正移相器的非线性,这方面已有成熟的方法<sup>[1~3]</sup>。其二,在实验中通常会发现移相器在动作过程中除了能使干涉条纹平移,也会导致条纹干涉图的旋转,这显然与移相干涉算法的要求不一致,以前的国内外文献均未对这种现象和它的影响进行讨论。本文阐述了这一现象产生的原因——类进动(Sub-processional motion),讨论了类进动给移相干涉典型算法带来的误差,提出了移相过程中干涉图旋转的允许范围。

### 2 移相器的类进动现象

压电晶体移相器通常是由多片压电陶瓷材料,经叠层工艺制作的压电叠堆微位移器件,移相干涉仪的标准参考镜由机械装置与其端面紧密联结。然

而在移相器制作过程中,很难保证每片压电陶瓷在材料特性、几何特性上的一致,比如压电应变常数、厚度、平行度、同轴性、粘接层、电极焊层等的不一致。当移相器在加上步进电压时,每片晶片的伸长量和伸长方向在微观形貌上都会有所不同,从整体上就表现为:移相器在伸长的同时其参考镜端面法线方向围绕着伸长方向旋转,但移相器的端面并不会绕着伸长方向旋转,作者把移相器的这种运动称为类进动,以区别于运动学上陀螺的旋转进动。图1显示了移相器在移相时使波面产生类进动的过程。图1上半部分为五步法移相过程,步进相移为 $\pi/2$ ,图中没有画出 $\pi/2$ 的波面相移(端面的轴向运动),只画出了端面法线方向的旋转。图1下半部分为条纹干涉图的示意,图中示出了条纹的平移和旋转。

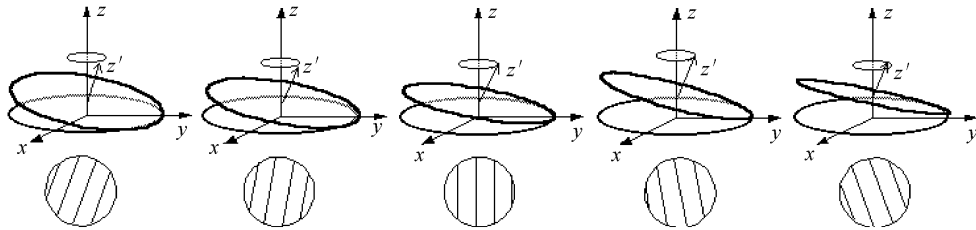


图1 类进动导致干涉条纹旋转示意图

Fig.1 Fringes' rotation caused by the sub-processional motion

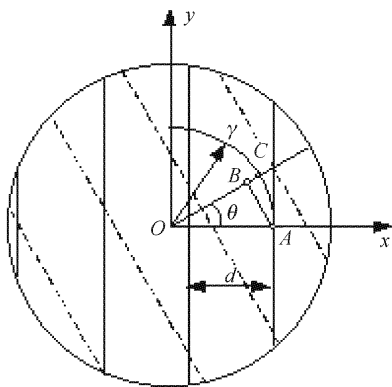


图2 条纹旋转引起相位误差的几何表示

Fig.2 Phase error caused by fringes' rotation

### 3 类进动对移相算法的影响

根据移相算法的要求,移相器应该作平移运动,但由于类进动的存在,使得实际的移相干涉图与理想情况有所不同,为了方便分析干涉图旋转所带来的误差,图2对旋转过程作了放大处理,并且不引入波像差,干涉条纹呈直线型。图中实线表示某一时刻

的干涉条纹(载频条纹),虚线表示相移 $\pi/2$ 后的干涉条纹。在光瞳中任取一点A,移相后,其相位应该和C点的相位相等,但由于干涉图的旋转,其实际测量得到的相位和B点相等,所以,干涉图旋转所造成的相位测量误差为B,C两点之间的相位差 $\xi$ (不考虑B,C两点的波像差)

$$\xi = 2\pi \frac{|BC|}{d} = 2\pi \frac{r(1 - \cos\theta)}{d} \quad (1)$$

小角度旋转情况下,(1)式可近似为

$$\xi = 2\pi \frac{r\theta^2}{2d} = \frac{\pi r\theta^2}{d} \quad (2)$$

式中, $d$ 为干涉条纹的宽度, $r$ 为A点到光瞳中心的距离, $\theta$ 为对应于相移 $\pi/2$ 的干涉条纹旋转角。

以典型的五步移相算法——Hariharan算法<sup>[4]</sup>为例,分析类进动对相位解包的影响。Hariharan算法可由下式描述

$$\tan\varphi = \frac{2(I_2 - I_4)}{2I_3 - I_5 - I_1} \sin\alpha \quad (3)$$

$I_1, I_2, I_3, I_4$ 和 $I_5$ 分别对应于相移为 $-2\alpha, -\alpha, 0, \alpha, 2\alpha$ 的五次光强值。 $\alpha$ 为步进移相常数,其名义值为

$\pi/2$ 。由于波面法线的旋转，每步移相偏离一个较小的数值  $\xi$  (这里假设类进动是规则的)，因此实际的五步相移为： $-2(\alpha-\xi)$ ， $-(\alpha-\xi)$ ， $0$ ， $\alpha-\xi$ ， $2(\alpha-\xi)$ ，即由于波面旋转导致的步进移相误差为： $\Delta\alpha = \xi$ 。

则由(3)式可以得到

$$\tan\varphi' = \frac{\tan\varphi \sin(\alpha - \xi)}{\sin\alpha} = (1 - \xi^2/2)\tan\varphi \quad (4)$$

(4) 式中  $\alpha = \pi/2$  (即不引入移相器电压与其伸长量之间线性的或非线性的误差)。忽略高阶无穷小量，由(4)式可以得到相应的相位计算误差为

$$\Delta\varphi = \varphi' - \varphi = -(\xi^2/4)\sin 2\varphi \quad (5)$$

结合(2)式，得到类进动给典型移相算法带来的相位误差为

$$\Delta\varphi = -\frac{\pi^2 r^2 \theta^4}{4d^2} \sin 2\varphi \quad (6)$$

### 4 误差分析与误差控制

将 80 mm 口径的标准镜面作为被测件，不考虑被测件面形误差的影响。视场中干涉条纹的宽度调整为  $d = 20$  mm，每步移相后条纹干涉图的旋转角度  $\theta = 10^\circ$ ，则整个被测表面的相位解包误差可由(6)式计算得出，结果如图 3 的三维误差分布图所示。

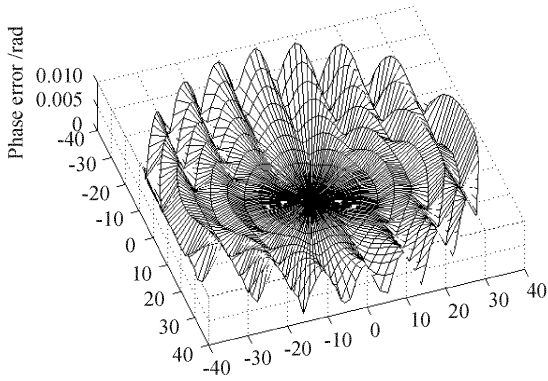


图 3 测试孔径上的相位误差分布  
Fig. 3 Error distribution on aperture  
(radius: 40 mm, fringes' width: 20 mm)

由图 3 可以看出，最大误差出现的位置在被测件的边缘，轴上误差最小。因此，对于口径为 80 mm 的被测件，当干涉条纹宽度调整为 20 mm，每步类进动角度为  $10^\circ$  时，其边缘最大相位误差为： $\Delta\varphi_{\max} = 0.0092$  rad，对应的光程差为  $\lambda/343$ ，这个误差是很小的。误差除了与被测件的口径有关外，还与干涉条纹的宽度调整有关，从(6)式可知，误差与

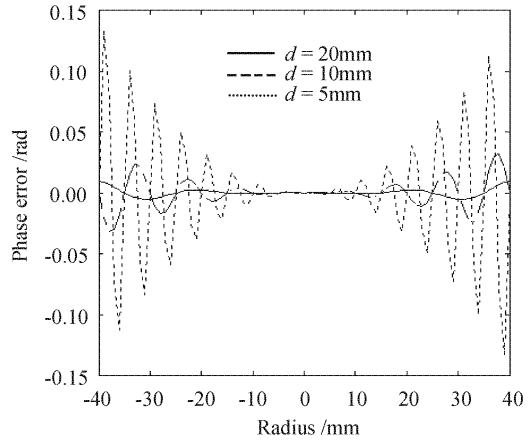


图 4 相位误差与干涉条纹宽度之间的关系  
Fig. 4 Error versus fringes' width

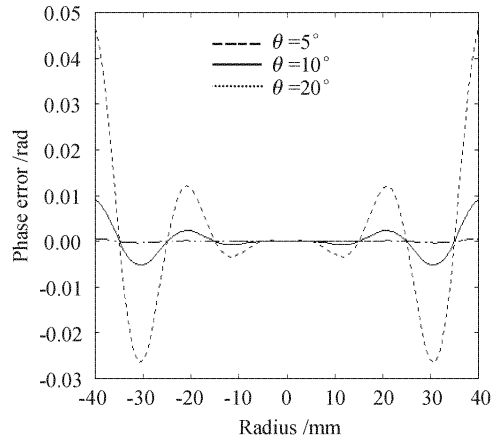


图 5 相位误差与干涉条纹旋转角度之间的关系  
Fig. 5 Error versus fringes' rotation angle

条纹的宽度的平方成反比。图 4 画出了两干涉光束主截面上的相位解包误差与条纹宽度之间的关系，横坐标为光瞳与主截面的交线，纵坐标为类进动相位误差。另外，类进动误差还与进动角度有关，两者之间的关系如图 5 所示。从图 5 以及公式(6)可以得到这样的原则

$$\frac{\pi^2 r^2 \theta^4}{4d^2} < \tau \quad (7)$$

式中， $\tau$  为干涉仪需要控制的相位精度。当精度在  $\lambda/200$  (对应的相位精度为 0.0314 rad) 时，对于 80 mm 口径的被测件，当视场中有 4~5 个条纹 ( $d = 20$  mm) 时，可允许的旋转角约为 1.9 rad，实验中很少会出现这么大的旋转角度，这种情况下完全可以忽略干涉图旋转所导致的误差；当视场中有 15~16 个条纹 ( $d = 5$  mm) 时，每步移相后干涉图的旋转角度应该小于 0.12 rad (约为  $7^\circ$ )；当干涉条纹比较密、被测件口径比较大时，所允许的旋转角则更小。因

此,一般而言,移相器存在类进动时应该尽量做到将条纹调宽;如果干涉图的旋转角过大且测试口径较大,则不能保证精度,此时应考虑对移相器进行优选或改进其机械结构。

## 5 结 论

在移相干涉仪中,压电晶体移相器的类进动现象导致条纹干涉图的旋转,这给干涉图的相位解包带来了误差。本文研究了类进动现象以及它对典型移相算法的影响,给出了相位解包后的误差公式,分析了引起误差的因素,提出了控制误差的原则:因为被测口径越大、条纹越密所引起的相位解包误差越大,所以在测试时应尽可能将条纹调疏;对于必须采用较密的干涉条纹进行测试的场合,如果存在较大

的干涉图旋转,则应通过改进移相器来减小误差。

## 参 考 文 献

- 1 Y.-Y. Cheng, J. C. Wyant. Phase shifter calibration in phase-shifting interferometry [J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(18):3049~3052
- 2 Fan Hua, Zhang Chi, Ren Yaping *et al.*. Study of a high precision phase shifter employed in phase shifting metrology [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(1):21~25  
范 华,张 弛,任亚萍等. 相移干涉计量中高精度相移器的研究[J]. *中国激光*, 1999, **A26**(1):21~25
- 3 Zhu Rihong, Wang Qing, Chen Lei *et al.*. A self-correcting method of phase shifter in phase shifting interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(7):932~937  
朱日宏,王 青,陈 磊等. 移相干涉技术中移相器的自校正方法[J]. *光学学报*, 1998, **18**(7):932~937
- 4 P. Hariharan, B. F. Oreb, T. Eiju. Digital phase-shifting interferometry; a simple error-compensating phase calculation algorithm [J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(13):2504~2506

\*\*\*\*\*  
(上接封四)

**7. 图表** 图要设计美观,大小适中,尺寸一般为 8cm×10cm 以内,线条均匀,主辅线分明,粗线一般为 0.25~0.5mm,细线一般为粗线的 1/2,图中主线用粗线,如函数曲线等,辅线用细线,如坐标轴线、指示线等;照片要求对比度高,层次清晰。推荐使用三线表。**图表文字:**图题、表题须中英文对照,图面、表面一律用英文。

**8. 参考文献** 应引用公开出版物,并仔细核对;欢迎作者充分引用本刊上同行的文献。每条文献应作相应的文献类型标识(见方括号内)。参考文献的原文为英文,请用英文表示,如原文为其他语种,请译成英文,在该文献最后用括号注明,如原为日文,则用(in Japanese),如原文为中文,则给出中文和相应的英文译文。每条文献的顺序和标点如下:

专著[M]、学位论文[D]、报告[R]——著者(三名). 文献题名. 版本(专著用),出版地:出版者,出版年. 起止页码;

期刊[J]——作者(三名). 论文题目[J]. 刊名,出版年,卷(期):起止页码;

专利[P]——专利申请者. 专利题目[P]. 专利国别,专利文献种类,专利号,出版日期;

文集[C]——作者(三名). 论文题目[C]. 编者,论文集名,出版地:出版者,年. 起止页码。

详细的论文排版格式请参见近期的《中国激光》。

**9. 基金资助** 论文如获省、部级以上的基金资助,须在首页的脚注位置注明基金资助单位全称及批准号。

**10. 版面费** 遵照中国科协和中国科学院有关文件精神,向录用稿作者收取适量版面费以聊补本刊的高额亏损。

**11. 版权** 录用稿件一经刊出,论文版权(含各种介质)均归编辑部所有。本刊向作者酌付稿酬及赠送该期期刊 1 册,抽印本 10 份。

**12. 本刊已入编《中国学术期刊(光盘版)》和万方数据库,著作权使用费在奉寄作者稿酬中一次性支付。如有不同意将文章编入上述数据库者,请事先声明,本刊将作适当处理。**

**特别声明:**凡在国内外正式出版的刊物上登载过的稿件,本刊一律不予刊登。若发现一稿多投者,本刊三年内不接受其稿件,并追补对本刊造成的损失。

凡本刊投稿者,均视作接受上述各项规定,本刊不再另行声明。

《中国激光》编辑部

2004 年 7 月