

# 多步相移中被测件径向相移不均匀 引入误差比较及校正

高芬<sup>1,2</sup>, 倪晋平<sup>1</sup>, 李兵<sup>2</sup>, 田爱玲<sup>1</sup>

<sup>1</sup>西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710032;

<sup>2</sup>西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710049

**摘要** 不同步数相移算法下被测件径向相移不均匀引入的误差不同,对测量的影响也将不同。基于点衍射干涉测量光路,构建了误差分析模型,以 5、6、7 和 13 步相移算法为例,对不同相移算法下被测件径向相移不均匀引入的移相误差进行了分析,并将该移相误差的影响引入到实际干涉测量模型中,进一步分析比较了该误差对最终面形检测结果的影响,进而提出了一种基于误差预估计的多项式误差校正新方法。研究表明,相移算法步数越多,被测件径向相移不均匀引入的面形检测误差越大,误差均呈类抛物面分布;最终面形检测结果经 Zernike 多项式拟合消离焦项后已等同于进行了二次多项式校正,对于数值孔径为 0.3 以下的被测件,经二次多项式校正后该误差对测量的影响基本可以忽略。

**关键词** 测量;干涉测量;点衍射干涉仪;多步相移;径向相移不均匀;误差分析

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0412002

## Comparison and Correction of Errors Caused by Radial Phase-Shifting Nonuniformity of Test Optics in Multi-Step Phase-Shifting

Gao Fen<sup>1,2</sup>, Ni Jinping<sup>1</sup>, Li Bing<sup>2</sup>, Tian Ailing<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710032, China;

<sup>2</sup>State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University,  
Xi'an, Shaanxi 710049, China

**Abstract** Errors caused by radial phase-shifting nonuniformity of test optics are different when using different steps of phase-shifting algorithms to process interference fringes. Here, a error analysis model is established based on optical principle of point diffraction interferometry. Take 5, 6, 7 and 13 step phase-shifting algorithms as example, phase-shifting errors which are directly caused by radial phase-shifting nonuniformity are first analyzed, and then be introduced into the interferometry model. The influence of this phase-shifting error to final optical surface testing results are analyzed later and a new polynomial error correction method based on error preestimate is proposed. The analysis results show that the more the phase-shifting steps are, the larger the figure error caused by radial phase-shifting nonuniformity is. Each of these figure error shows a paraboloid like distribution. Also, removing the defocus item from Zernike polynomial of final optical surface testing results is equal to have had a quadratic polynomial correction of this error. If the numerical aperture of test optics are no more than 0.3, the error caused by radial phase-shifting nonuniformity can be ignored after the quadratic polynomial correction.

**Key words** measurement; interferometry; point diffraction interferometer; multi-step phase-shifting; radial phase-shifting nonuniformity; error analysis

**OCIS codes** 120.3180; 050.1940; 050.5080; 120.6650

收稿日期: 2017-10-03; 收到修改稿日期: 2017-11-08

基金项目: 国家自然科学基金(51275398)、陕西省科学技术研究发展计划(2014K05-4)

作者简介: 高芬(1980-),女,博士,副教授,硕士生导师,主要从事精密光学检测技术方面的研究。

E-mail: gaofen8128@163.com

## 1 引 言

球面和非球面光学元件在极紫外光刻、激光核聚变等高新技术领域中获得了越来越广泛的应用,人们对该类元件的面形也提出了纳米甚至亚纳米级的超精检测需求<sup>[1]</sup>。目前国内对于球面、非球面面形的高精度检测多依赖于商业化的菲索和泰曼格林型干涉仪,这类传统干涉仪受其自身标准镜头面形精度的限制,检测精度多数只能达到峰谷(PV)误差约几十纳米( $\lambda/10 \sim \lambda/20, \lambda = 632.8 \text{ nm}$ )的水平,已无法满足上述超精检测发展需求。相移点衍射干涉测量法<sup>[1-5]</sup>(PSPDI)为超精面形检测开辟了新途径,该方法通过微米尺寸小孔衍射产生近似理想的球面波作为参考面,理论上可达到亚纳米级检测精度<sup>[6-8]</sup>。PSPDI系统常通过压电陶瓷相移器(PZT)带动被测件移动引入相移。当PZT带动被测件沿轴向移动时,必然会使得由被测件反射回的光束的汇聚点相对初始位置发生偏离,导致沿被测件径向各高度上引入的相移量不同,即整个视场内相移不均匀,后续采用不同步数的相移算法进行相位提取时,该径向相移不均匀对测量结果的影响将不同。目前高精度的商业化干涉仪上广泛采用5步以上的多步相移算法进行相位提取,为达到点衍射所述亚纳米级超精面形检测需求,实际点衍射系统构建前必需对5步以上多步相移算法下该项误差的影响进行准确的评估,以便选取满足精度需求的最合适相移算法,并尽可能地减小或消除该项误差对测量结果的影响。

目前国内外学者针对被测件径向相移不均匀引入误差的分析及校正已开展了一些研究<sup>[9-11]</sup>。有关菲索型球面干涉仪中大数值孔径(NA)被测件的检测,Creath等<sup>[9]</sup>较早提出将球面参考面改为平面参考面的方法,即通过PZT带动位于准直光路的平面参考镜的移动来代替原来PZT带动球面参考镜头的移动,使得相移过程中整个视场内的相移量不发生变化,从而完全消除了径向相移不均匀性的影响;该方法不适用于PZT带动被测件作相移的光路。Moore等<sup>[10]</sup>提出每步移相不以轴上点为基准,而是选取一个能使轴上点的光程和最边缘光线的光程差相等的变化的相移值代替原定相移量的方法来减小相移不均匀性的影响;该方法对不同数值孔径的被测件必须事先计算出每步的相移量,再通过计算机控制PZT按预定值精确相移,实际操作过程复杂。黄深旺等<sup>[11]</sup>对菲索型球面干涉仪中被测件径向相

移不均匀引入的移相误差进行了理论推导和计算,并基于相移算法公式近似推导了3步和5步算法引起的波面复原误差。目前尚未有针对5步以上相移算法中被测件径向相移不均匀引入误差的综合性比较分析,所引入误差的特性及对最终面形检测结果的影响未知。

本文基于被测件作相移的小孔点衍射干涉测量光路,以5、6、7和13步相移算法为例,通过将被测件径向相移不均匀引入的移相误差引入到相移干涉图像光强分布模型中,仿真相移干涉测量过程并复原被测面形的方法,直观获得了该误差对最终面形检测结果的影响,进一步分析了误差特性及其实质,提出了一种基于误差预估计的误差校正新方法。拟通过本研究为不同步数算法下被测件径向相移不均匀引入误差的评估及校正提供可靠的参考数据及有效的分析手段。

## 2 PSPDI 检测原理

PSPDI是利用微米尺寸小孔衍射产生近似理想的衍射球面波作为参考面代替原有球面干涉仪中的标准实物镜头,无需标准镜头即组成超高精度的干涉测量系统,理论上可达到亚纳米级检测精度。PSPDI检测原理<sup>[1,4]</sup>如图1所示。He-Ne激光汇聚光束经微米尺寸小孔后发生衍射,小孔衍射产生的标准球面波被均分成两部分,一部分作为测试光 $W_1$ ,另一部分作为参考光 $W_2$ 。测试光 $W_1$ 经被测表面反射回的光束 $W'_1$ 再经小孔衍射基板表面反射后,出射的光束 $W''_1$ 与参考光 $W_2$ 进行干涉,在电荷耦合器件(CCD)上形成大小合适且清晰的干涉条纹。通过PZT带动被测件沿轴向移动,获得多幅相移干涉条纹图,再经多步相移算法进行相位提取,并经解包、拟合等系列相移干涉图像处理过程后即可

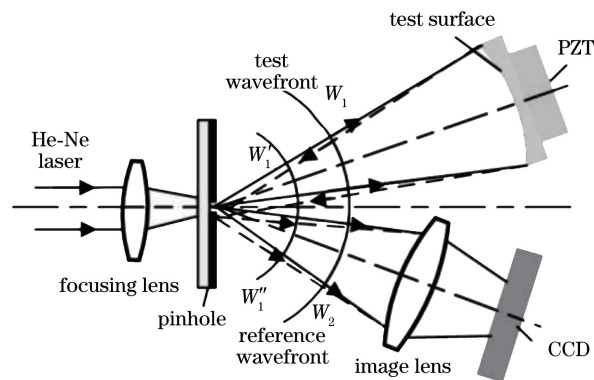


图1 PSPDI原理

Fig. 1 Principle of PSPDI

获得被测表面面形信息,并计算出 PV 误差和均方根(RMS)误差。

为满足 PSPDI 中纳米甚至亚纳米的超精检测要求,实际系统中常采用 5 步以上误差敏感度较低的多步相移算法。目前 Schmit 等<sup>[12]</sup>基于扩展平均法提出的 A 类和 B 类的 5~13 步相移算法在国外高精度的商业化干涉仪上得以广泛应用,本课题组在文献[13]中也已详细推导并给出了 A 类和 B 类的 5~13 步相移算法的具体公式。研究将直接引用文献[13]中各多步相移算法公式,并以 5A、6A、7A、13A 和 5B、6B、7B 和 13B 为例,仿真比较用不同相移算法进行相位提取时被测件径向相移不均匀对测量的影响。

### 3 误差理论建模

#### 3.1 径向相移不均匀引入的移相误差

为评估 PZT 相移中被测件径向相移不均匀引入误差的大小,现以凹面球面镜的点衍射检测光路为研究对象建立分析模型。如图 2 所示,设被测件口径为  $D$ ,顶点曲率半径为  $R$ ,由 PZT 带动被测件移动一小的距离  $s$ ,则反射光束的汇聚点由初始的参考镜焦点位置  $O$  移动至  $O'$  位置。设  $P'$  点为被测件口径上任意一点, $P'$  点到被测件中心的径向距离  $d_{P'} = \rho \cdot D/2$ ,其中  $\rho$  为被测件径向归一化距离,

$-1 \leq \rho \leq 1$ 。定义过  $P'$  点的入射光线  $OP'$  与光轴的夹角为  $\theta_1$ ,反射光线  $O'P'$  与光轴的夹角为  $\theta$ ,依据三角关系有:

$$\begin{cases} \cos \theta = \sqrt{R^2 - (\rho D/2)^2} / R \\ \cos \theta_1 = \frac{\sqrt{R^2 - (\rho D/2)^2} - s}{\sqrt{[\sqrt{R^2 - (\rho D/2)^2} - s]^2 + (\rho D/2)^2}} \end{cases} \quad (1)$$

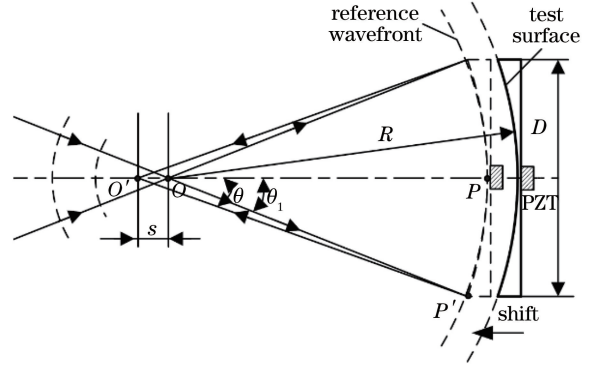


图 2 被测件径向相移不均匀引入误差示意图

Fig. 2 Schematic of error caused by radial phase-shifting nonuniformity of optical element to be tested

过  $O$  点入射至  $P$  点并返回至汇聚点  $O'$  的总光程为

$$\overline{OP} + \overline{PO'} = (R - s) + R. \quad (2)$$

过  $O$  点入射至  $P'$  点并返回至汇聚点  $O'$  的总光程为

$$\overline{OP'} + \overline{P'O'} = \sqrt{[\sqrt{R^2 - (\rho D/2)^2} - s]^2 + (\rho D/2)^2} + R. \quad (3)$$

则 PZT 带动被测件移动  $s$  导致被测件边缘点  $P'$  与中心点  $P$  的光程差为

$$D_{PP'} = (\overline{OP'} + \overline{P'O'}) - (\overline{OP} + \overline{PO'}) = \sqrt{[\sqrt{R^2 - (\rho D/2)^2} - s]^2 + (\rho D/2)^2} - (R - s), \quad (4)$$

对(4)式两边求偏导有:

$$dD_{PP'} = \left\{ \frac{2[\sqrt{R^2 - (\rho D/2)^2} - s] \cdot (-1)}{\sqrt{[\sqrt{R^2 - (\rho D/2)^2} - s]^2 + (\rho D/2)^2}} + 1 \right\} ds = (1 - \cos \theta_1) ds. \quad (5)$$

相移中移动距离  $s$  一般很小,可近似认为  $\theta \approx \theta_1$ 。因此,(5)式可简化为

$$dD_{PP'} = (1 - \cos \theta) ds \approx [1 - \sqrt{1 - (\rho D/2R)^2}] ds. \quad (6)$$

若 PZT 带动被测件间隔  $\pi/2$  相位作相移,第  $i$  步相移引入的相位  $\delta_i = (i-1)\pi/2$ ,则第  $i$  步相对初始相位因径向相移不均匀引入的移相误差为

$$\Delta \phi_{P_i} = \{1 - \sqrt{1 - [\rho D/(2R)]^2}\} \cdot \delta_i = \{1 - \sqrt{1 - [\rho D/(2R)]^2}\} \cdot (i-1)\pi/2, \quad (7)$$

由(7)式可知,在  $\delta_i$  确定、被测件参数  $D$  和  $R$  已知的情况下,因 PZT 相移而在干涉场中任意点  $(x, y)$  上引入的移相误差  $\Delta \phi_{P_i}(x, y)$  仅与该点相对被测件中心的径向归一化距离  $\rho(x, y)$  有关。

考虑到实际干涉光路的往返,PZT 相移一步实

际所需移动相位量为引入参考相位的一半,即  $\pi/4$  (对应 PZT 移动量  $s$  为  $\lambda/8$ ),第  $i$  步相移在被测相位上实际引入的误差为  $\Delta \phi_{P_i}/2$ 。图 3 为相移一步 ( $s = \lambda/8$ ), $R/D$  分别为 0.65、1.5、3.3、7.1 和 10.7 时因径向相移不均匀引入的移相误差随径向归一化距

离  $\rho$  的变化关系曲线。从图 3 可以看出:相移一步,引入的移相误差值随离被测件中心的径向归一化距离  $\rho$  的增大而增大;被测件  $R/D$  值越大,在同样相移量情况下,同一径向位置处因相移不均匀引入的移相误差越小。

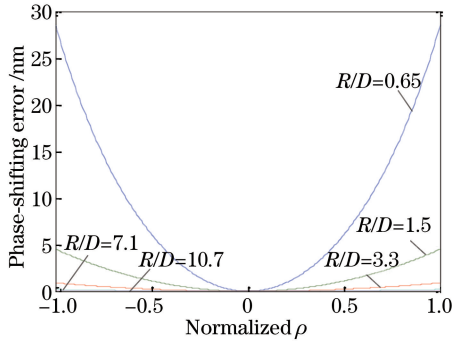


图 3 相移一步引入的移相误差随被测件径向归一化距离的变化关系

Fig. 3 Relation of phase-shifting error with normalized radial distance when shifting one step

### 3.2 最终引入的面形检测误差

因被测件作相移时引入的移相误差将影响系统最终的面形检测结果,这里将该不均匀移相误差的影响引入到实际相移干涉测量模型中进行分析。其基本分析思路<sup>[13]</sup>是:分别建立无误差和有误差影响下的干涉图像光强分布模型,用指定 36 项 Zernike

多项式系数拟合出来的波面作为理想待测面形,在此基础上利用 Matlab 仿真一组无误差的理想干涉条纹图和一组被测件径向相移不均匀误差影响下的干涉条纹图,用几种多步相移算法分别进行相位提取,并经相位解包及 Zernike 多项式拟合后复原出待测相位。若无误差影响下提取得到的理想相位值为  $\varphi$ ,有误差影响下提取得到的实际待测相位为  $\varphi'$ ,He-Ne 激光器波长  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ,则由该不均匀移相误差引起的面形检测误差为

$$\Delta W = (\varphi' - \varphi) \cdot \lambda / (2\pi) \quad (8)$$

依据时域相移干涉测量原理,理想情况下 CCD 采集的第  $i$  幅相移干涉图像的光强分布可以表示为

$$I_i(x, y) = I_0(x, y) \{1 + V(x, y) \cos[\varphi(x, y) + \delta_i]\}, \quad (9)$$

式中  $(x, y)$  为干涉场中任意点;  $I_0(x, y)$  表示平均(背景)光强;  $V(x, y)$  表示条纹对比度;  $\varphi(x, y)$  表示待提取相位;  $\delta_i$  为由第  $i$  步相移引入的参考相位,  $i = 1, 2, \dots, M, M$  为正整数,依据 PZT 相移方向的不同,常取  $\delta_i = -(i - 1)\pi/2$  (PZT 后移)或  $\delta_i = (i - 1)\pi/2$  (PZT 前移)。

结合(7)式可知,在被测件径向相移不均匀误差影响下,第  $i$  步相移对应的干涉图像的实际光强分布为

$$I_i'(x, y) = I_0(x, y) \{1 + V(x, y) \cos[\varphi(x, y) + \Delta\phi_{p_i}(x, y) + \delta_i]\} \\ = I_0(x, y) \left\{ 1 + V(x, y) \cos \left\{ \varphi(x, y) + \left[ 1 - \sqrt{1^2 - \left[ \frac{\rho(x, y)D}{2R} \right]^2} \right] \cdot \delta_i + \delta_i \right\} \right\}, \quad (10)$$

由(10)式可知,相移量  $\delta_i$  不同,引入的移相误差  $\Delta\phi_{p_i}(x, y)$  的值不同,采集的干涉光强  $I_i'(x, y)$  也不同。 $\Delta\phi_{p_i}(x, y)$  的引入相当于增加了一个与  $\delta_i$  相关的非线性移相误差。

## 4 误差分析及校正

$R/D$  取定值,仿真考虑有无  $\Delta\phi_{p_i}(x, y)$  误差

$\Delta\phi_{p_i}(x)$  时的 13 帧干涉图像,比较用不同算法进行相位提取时被测件径向相移不均匀引入的面形检测误差。图 4 为  $R/D = 3.3$  时各算法因被测件径向相移不均匀引入的面形检测误差比较曲线,表 1 列出了  $R/D$  分别取 0.65、1.5、3.3、7.1 和 10.7 时仿真计算的各算法引入的面形检测误差的 PV 值。

表 1 不同  $R/D$  值及算法下径向相移不均匀引入误差的 PV 值

Table 1 PV values of figure errors caused by radial phase-shifting nonuniformity with different  $R/D$  values and algorithms

$R/D$	PV value of figure error / nm							
	5A	5B	6A	6B	7A	7B	13A	13B
0.65	61.2908	58.2582	72.6365	71.6364	85.8930	85.6941	171.3445	171.3443
1.5	9.1342	9.0481	11.3065	11.3097	13.5714	13.5714	27.1428	27.1428
3.3	1.8283	1.8264	2.2830	2.2830	2.7396	2.7396	5.4793	5.4793
7.1	0.3928	0.3928	0.4910	0.4910	0.5892	0.5892	1.1783	1.1783
10.7	0.1728	0.1728	0.2160	0.2160	0.2592	0.2592	0.5185	0.5185

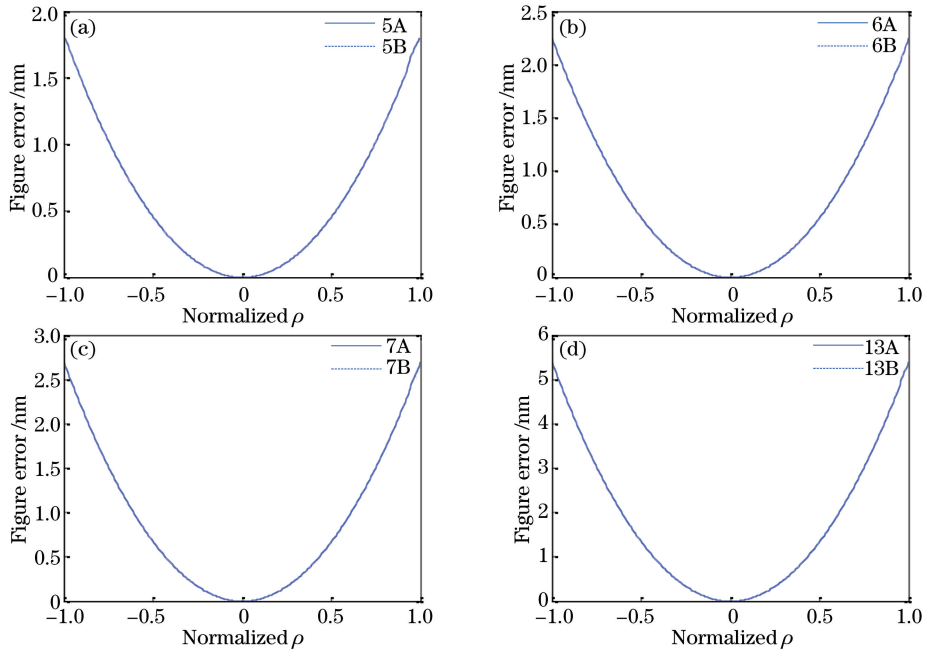


图 4  $R/D=3.3$  时各算法因径向相移不均匀引入的面形检测误差。

(a) 5A 和 5B; (b) 6A 和 6B; (c) 7A 和 7B; (d) 13A 和 13B

Fig. 4 Figure errors caused by radial phase-shifting nonuniformity of different algorithms when  $R/D=3.3$ .

(a) 5A and 5B; (b) 6A and 6B; (c) 7A and 7B; (d) 13A and 13B

比较图 4 中各曲线可知： $R/D$  一定的情况下，同步数的 A 类和 B 类相移算法引入的面形检测误差基本相同，且步数越多的算法引入的误差越大；相移中产生的该项误差是一个非周期函数，与条纹频率无关，只与到被测件中心的径向距离有关，误差值随着径向距离的增大而增大，在边缘处取极大值。

比较表 1 中不同  $R/D$  下各算法因相移不均匀引入误差的 PV 值可知， $R/D$  越大，同一算法引入的误差值越小，当  $R/D$  达到 10.7 以上时，对于 5~13 步算法，因相移不均匀引入的误差均已达到纳米以下量级，故对纳米以上精度的检测，该项误差可忽略。但对于数值孔径达到 0.3 (即  $R/D \geq 1.67$ ) 的被测件来说，5 步算法引入的误差已超过 7.2559 nm，13 步算法引入的误差已达到 21.7606 nm，若要达到纳米以下量级的检测精度需求，该项误差的影响不可忽略，还需探讨误差校正方法。

从图 4 可以看出，被测件径向相移不均匀引入误差的分布为类抛物线(面)形式。对该曲线进行最小二乘法拟合发现，用二次多项式拟合的曲线已与原曲线基本重合，且数值基本集中于  $\rho^2$  项；若用更多项数的多项式进行拟合， $\rho$  的偶数项系数也远大于奇数项系数。可见，对于已定的相移算法，可将不同  $R/D$  下的误差分布简化表述成多项式：

$$\Delta W(x, y) = a_1 \rho^2(x, y) + a_2 \rho^4(x, y) + a_3 \rho^6(x, y) + \dots \quad (11)$$

式中  $a_1, a_2, a_3$  为对应多项式的系数， $\rho$  为径向归一化距离。依据上述误差分布曲线特性，提出一种基于误差预估计的多项式误差校正方法，即在  $R/D$  及相移算法步数一定的情况下，通过仿真得到  $\Delta W(x, y)$  的分布，再利用最小二乘法求解如(11)式所示多项式的各系数，得到误差校正多项式。从复原面形中减去由该误差校正多项式计算出的  $\Delta W(x, y)$  的值，即可校正因被测件径向相移不均匀引入的误差。

因被测件径向相移不均匀引入的误差基本集中于二次项(即  $\rho^2$ )上，进行二次多项式误差校正应已具有极高的校正精度。当  $R/D$  分别取 0.65、1.5 和 3.3(也即数值孔径为 0.77、0.33 和 0.15)时，经二次多项式误差校正后，计算得各相移算法下对应的残余误差 PV 值如表 2 所示。比较表 1 和表 2 中对应数据可以看出，二次多项式校正可极大地减小径向相移不均匀引入的误差，且  $R/D$  越小，校正的效果越好。以 13 步相移算法为例，当  $R/D=0.65$  时，校正后引入的误差已由原来的 171.3443 nm 减小至 12.4888 nm，降低了一个数量级；当  $R/D=1.5$  时，误差由原来的 27.1428 nm 减小到了 0.2589 nm，已降至纳米以下量级。

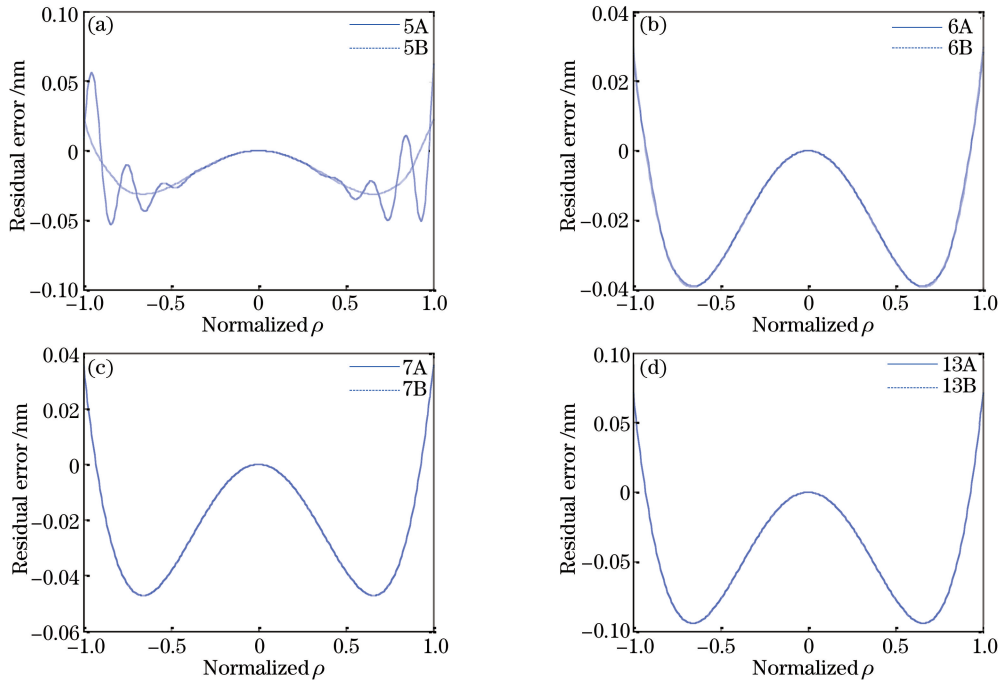
表 2 经二次多项式校正后的残余误差 PV 值

Table 2 PV values of residual errors after quadratic polynomial correction

$R/D$	PV value of residual error /nm							
	5A	5B	6A	6B	7A	7B	13A	13B
0.65	9.1145	3.6763	6.3819	4.9880	6.4465	6.2702	12.4890	12.4888
1.5	0.1842	0.0872	0.1051	0.1081	0.1295	0.1295	0.2589	0.2589
3.3	0.0067	0.0034	0.0043	0.0043	0.0051	0.0051	0.0103	0.0103

目前成型的相移点衍射干涉仪<sup>[1]</sup>的被测数值孔径一般不超过 0.3 (即  $R/D \geq 1.67$ )。如图 5 所示, 对于  $NA \leq 0.3$  的被测件来说, 经二次多项式误差校

正后, 各算法下引入的残余误差的 PV 值均在 0.1655 nm 以下, 均方根值均在 0.0393 nm 以下, 完全可满足纳米以下检测精度需求。

图 5  $R/D=1.67$  时不同算法经二次多项式误差校正后的残余误差分布。

(a) 5A 和 5B; (b) 6A 和 6B; (c) 7A 和 7B; (d) 13A 和 13B

Fig. 5 Residual error distribution after quadratic polynomial correction of different algorithms when  $R/D=1.67$ .

(a) 5A and 5B; (b) 6A and 6B; (c) 7A and 7B; (d) 13A and 13B

需要进一步指出是, 研究所述的被测件径向相移不均匀引入误差分析及校正方法不仅适用于点衍射干涉测量系统, 也适用于用被测件作相移的干涉测量系统。此外, 考虑到各类干涉仪面形检测中直接复原得到的面形数据还需经过 Zernike 多项式拟合并消除平移、倾斜、离焦项(前 4 项)才得到真实的面形检测结果。比较 Zernike 多项式和所提误差校正多项式的形式可知, 被测件面形检测结果经 Zernike 多项式拟合消离焦项( $\rho^2$  项)后已等同于对被测件径向相移不均匀引入的误差进行了二次多项式校正。因此, 对于  $NA \leq 0.3$  的被测件来说, 消离焦后被测件径向相移不均对测量的影响已基本可以忽略。对于  $NA > 0.3$  的被测件来说, 若要进一步减小该误差的影响, 达到 PV 误差在纳米以下的检测

精度要求, 可考虑对(11)式中的两项或更多项进行校正。

## 5 结 论

构建了被测件径向相移不均匀引入误差的分析模型, 以 A 类和 B 类的 5、6、7 和 13 步相移算法为例, 系统分析比较了不同相移算法下被测件径向相移不均匀对最终面形检测结果的影响, 并进一步探讨了该误差的校正问题, 得出如下结论:

1) 被测件径向相移不均匀相当于在移相时增加了一个非线性移相误差, 被测件的  $R/D$  值越大, 引入的移相误差越小, 该移相误差随到被测件中心的径向归一化距离  $\rho$  的增大而增大, 呈类抛物面分布。

2) 同步数的 A 类和 B 类相移算法因被测件径

向相移不均匀引入的面形检测误差基本相同,步数越多,引入的误差越大,该误差同样随到被测件中心的径向距离  $\rho$  的增大而增大,呈类抛物面分布。

3)被测件径向相移不均匀引入的面形检测误差经二次多项式( $\rho^2$ 项)校正后即可获得极高的精度,当被测件的  $NA \leq 0.3$ (即  $R/D \geq 1.67$ )时,校正后的残余误差 PV 值已在纳米量级以下。

4)被测件面形检测结果经 Zernike 多项式拟合消离焦项(即  $\rho^2$ 项)后,已等同于对被测件径向相移不均匀引入的误差进行了二次多项式校正。

本研究给出了详细误差分析过程及不同相移算法下被测件径向相移不均引入误差的系列仿真比较数据,研究结果可为该项误差的评估及校正提供有用参考。依据误差分布曲线特性,提出了一种基于误差预估计的误差校正方法,给出了理论分析结果。因目前构建的点衍射实验系统中被测件  $R/D$  值已达到 10,被测件径向相移不均匀所引入的面形检测误差 PV 值本身就在纳米量级以下,不便于对所提二次多项式校正方法进行实验论证,相关实验论证将在改进实验条件后另外进行探讨。

### 参 考 文 献

- [1] Ota K, Yamamoto T, Fukuda Y, *et al.* Advanced point diffraction interferometer for EUV aspherical mirrors[C]. SPIE, 2001, 4343: 543-550.
- [2] Otaki K, Ota K, Nishiyama I, *et al.* Development of the point diffraction interferometer for extreme ultraviolet lithography: design, fabrication, and evaluation[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 2002, 20 (6): 2449-2458.
- [3] Wang D D, Yang Y Y, Chen C, *et al.* Point diffraction interferometer with adjustable fringe contrast for testing spherical surfaces [J]. Applied Optics, 2011, 50(16): 2342-2348.
- [4] Gao F, Jiang Z D, Zhao Z X, *et al.* Measurement of aspheric surface combining point diffraction interferometry and annular subaperture stitching[J]. Optical Engineering, 2015, 54(1): 014102.
- [5] Huang L, Gao Z S, Yang Z M, *et al.* Lensless imaging method for pinhole type point diffraction interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(3): 0312002.
- [6] Otaki K, Zhu Y S, Ishii M, *et al.* Rigorous wavefront analysis of the visible-light point diffraction interferometer for EUVL [C]. SPIE, 2004, 5193: 182-190.
- [7] Chen C, Yang Y Y, Wang D D, *et al.* Analysis of point-diffraction wavefront error based on finite difference time domain method [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(9): 0908003.
- [8] Gao F, Jiang Z D, Li B. Analysis of diffraction wavefront error caused by alignment error of pinhole [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0812004.
- [9] Creath K, Hariharan P. Phase-shifting errors in interferometric tests with high-numerical-aperture reference surfaces[J]. Applied Optics, 1994, 33(1): 24-25.
- [10] Moore R C, Slaymaker F H. Direct measurement of phase in a spherical-wave Fizeau interferometer [J]. Applied Optics, 1980, 19(13): 2196-2200.
- [11] Wang S W, Cheng L, Cheng J B, *et al.* Phase-shifting errors in a spherical-wave Fizeau interferometer [J]. Acta Photonica Sinica, 1996, 25 (10): 883-888.
- [12] Schmit J, Creath K. Extended averaging technique for derivation of error-compensating algorithms in phase-shifting interferometry [J]. Applied Optics, 1995, 34 (19): 3610-3619.
- [13] Gao F, Jiang Z D, Li B, *et al.* Multi-step phase-shifting algorithm based on extended averaging technique and its error suppression characteristics comparison [J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(4): 0426001.