

文章编号 1674-2915(2010)05-0616-07

# 基于光学设计软件的相移点衍射干涉仪建模

张海涛

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 为了模拟用于球面面形高精度检测的相移点衍射干涉仪的测试过程, 介绍了点衍射干涉仪的基本工作原理, 分析了相移点衍射干涉仪的测量误差。利用光学设计软件和自行编制的软件建立了点衍射干涉仪的检测模型, 利用该模型分别推导了参考光束和测试光束在干涉场的复振幅分布, 模拟了测量过程。根据光的相干理论, 通过改变被测镜的位置, 实现移相, 得到移相干涉图。最后对一设定的被检镜进行实验模拟, 生成了两组对称倾斜的13步移相干涉图, 对干涉图处理后计算得到了被检镜的检测面形。结果表明, 在不引入硬件误差时, 由相位提取和波面反演造成的检测面形与设定面形偏差为 RMS 值 0.0783 nm, PV 值 0.5656 nm。

**关键词:** 点衍射干涉仪; 相移干涉图; 建模; 光学测量

中图分类号: O436.1; TH744.3 文献标识码: A

## Modeling for phase shifting point diffraction interferometer based on lens design software

ZHANG Hai-Tao

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** To simulate the testing procedure of a Phase Shifting Point Diffraction Interferometer (PSPDI), the working principle of the PSPDI was introduced and its measuring errors were analyzed. On the basis of the lens design software and a inhome software, a test model for the PSPDI was established. By using the test model, the complex amplitudes of the reference beam and test beam were captured in an interference field, furthermore, the testing procedure was simulated. Depending on the optical coherent theory, the phase shifting was realized by changing the positions of testing mirror, and the phase shifting interferograms were acquired. Finally, for a given mirror, the model was used to generate two groups of 13-step phase intergrams with a symmetrical tilt. After processing the interferograms, it is shown that the accuracies of testing spherical mirror are 0.0783 nm (RMS) and 0.5656 nm (PV).

**Key words:** point diffraction interferometer; phase shifting interferogram; modeling; optical measurement

## 1 引言

点衍射干涉仪是1972年由Raymond N. Smartt和J. Strong提出来的共光路干涉仪<sup>[1]</sup>,它的主要特点为参考光由针孔衍射获得。与传统Fizeau或Twyman-Green干涉仪相比,它摆脱了参考面精度的限制,理论上能够达到极高的检测精度。1987年,Kadono等人采用一组偏振元件,实现了点衍射干涉仪的相移<sup>[2]</sup>。1996年,Lowrance实验室提出光纤点衍射方案,并将其应用在极紫外光刻(EUVL)光学元件和系统的检测中<sup>[3]</sup>。国内长春光机所张学军等人研制了双光纤形式的点衍射干涉仪用于凹球面的测量<sup>[4]</sup>;北京理工大学沙定国等人研制了点衍射干涉仪用于光学元件和光学系统的测量<sup>[5]</sup>;李艳秋等人研制了相移点衍射干涉仪用于投影光刻物镜系统波相差的检测<sup>[6]</sup>。点衍射干涉仪检测元件面形时,一般是将针孔置于被检球面的球心处。由小孔衍射而出的近理想球面波分成两部分,一部分作为测试光经被检球面反射后,附带了被检球面的面形信息,经针孔板反射后,由中继光学系统传到光电探测器上;另一部分作为参考光经中继光学系统直接传到光电探测器上。两路光干涉得到干涉图,采用移相技术,对采集到的干涉图进行处理即可获得被检球面的面形信息。

光学设计软件广泛应用于传统光学成像系统的设计中。干涉仪虽然是基于光的波动本质的测量仪器,但是干涉仪测量的是光程差,传统光学设计软件也可用于干涉仪的建模。近年来,Bryan D. Stone等人将光学设计软件用于构建干涉仪模型,已成功构建了基于光线追迹的干涉仪模型<sup>[7]</sup>和基于光束传播的干涉仪模型<sup>[8]</sup>。Gong和Geary也利用衍射分析软件,构建了点衍射干涉仪的模型<sup>[9]</sup>。本文介绍了点衍射干涉仪的物理模型,论述了如何用光学设计软件和自行编制的软件构建相移点衍射干涉仪的模型,该模型可用于模拟生成移相干涉图,仿真测量过程,并模拟干涉仪装调误差、移相不准误差等。

## 2 建模分析

点衍射干涉仪检测球面面形的物理模型如图1所示。

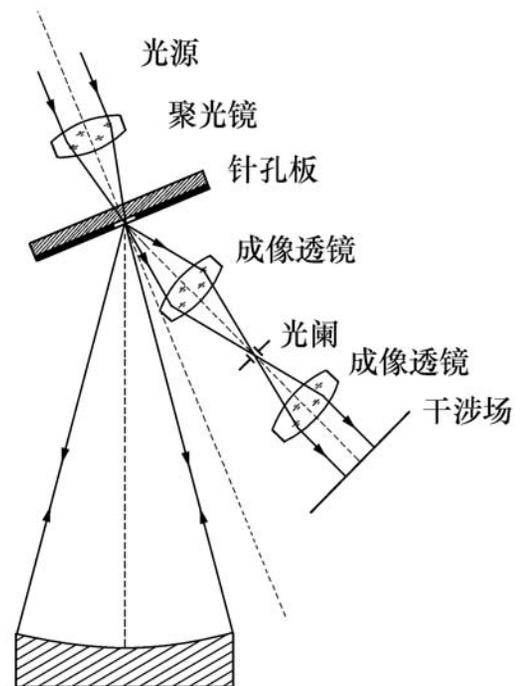


图1 点衍射干涉仪示意图

Fig 1 Schematics for PDI

点衍射干涉仪的建模分析包括三个部分,第一为小孔衍射的严格数值计算模型,第二为检测光路模型,第三为干涉图数据采集及处理模型。

本文所建立的模型主要是检测光路的模型。该模型用于检测小孔衍射的分析结果,并将检测数据传到数据采集与处理模型,其关系如图2所示。

入射光波信息包括入射光波的波长,光束的数值孔径,像差以及入射光束相对于小孔的位置信息(包括入射角度,焦点和小孔的相对位移,离焦等);小孔的信息包括小孔的形状以及小孔的基底材料等。由这些信息,经过严格的电磁场计算,能够得到小孔衍射球面波的远场波面信息,并输入到检测光路模型。检测光路的误差源1主要包括被检元件的对准误差,成像系统中的非共光路引入的误差和移相误差等。由检测光路得到的干涉图附加误差源2的信息被传送到数据采集及处理模型。误差源2主要包括CCD的响应不均

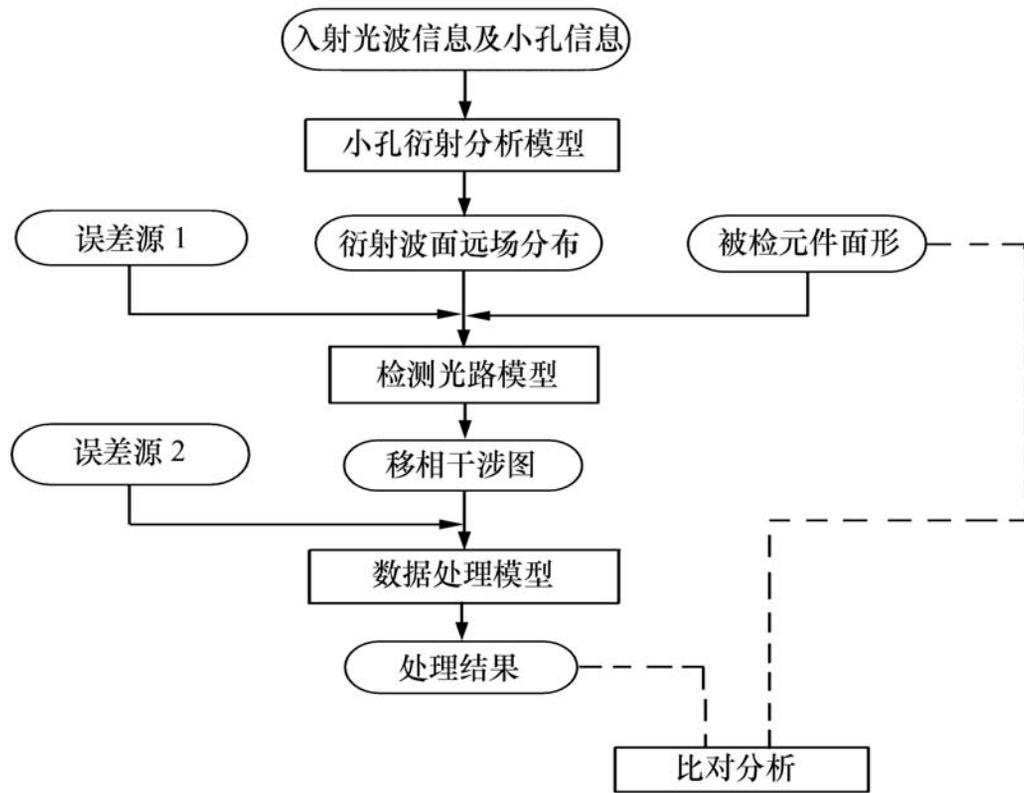


图2 点衍射干涉仪建模分析

Fig. 2 Modeling analysis of PDI

匀性, 响应非线性, 量化误差等。数据处理模型对干涉图进行相位提取, 相位解包裹, 波面拟合及反演获得被检镜的面形。通过对设定的被检镜面形与模型求解出的被检镜面形进行比对, 分析各因素对检测精度的影响。

### 3 模型建立

#### 3.1 检测光路建模与分析

据文献[10, 11]报道, 小孔的远场衍射波面

与理想球面的偏差要小于  $10^{-4}$ , 在建立本模型时, 暂时不考虑波面与理想球面的偏差。下面建立的模型中, 假设被检镜的口径为  $D = 300 \text{ mm}$ , 被检镜的曲率半径  $R = 500 \text{ mm}$ 。被检镜的面形由泽尼克系数给出, 通过改变泽尼克系数来模拟不同的镜子面形。

利用光学设计软件构建了移相点衍射干涉仪模型的光路图(见图3), 实线表示实际检测时的照明光路, 虚线表示成像光路。该模型能够模拟整个检测光路。

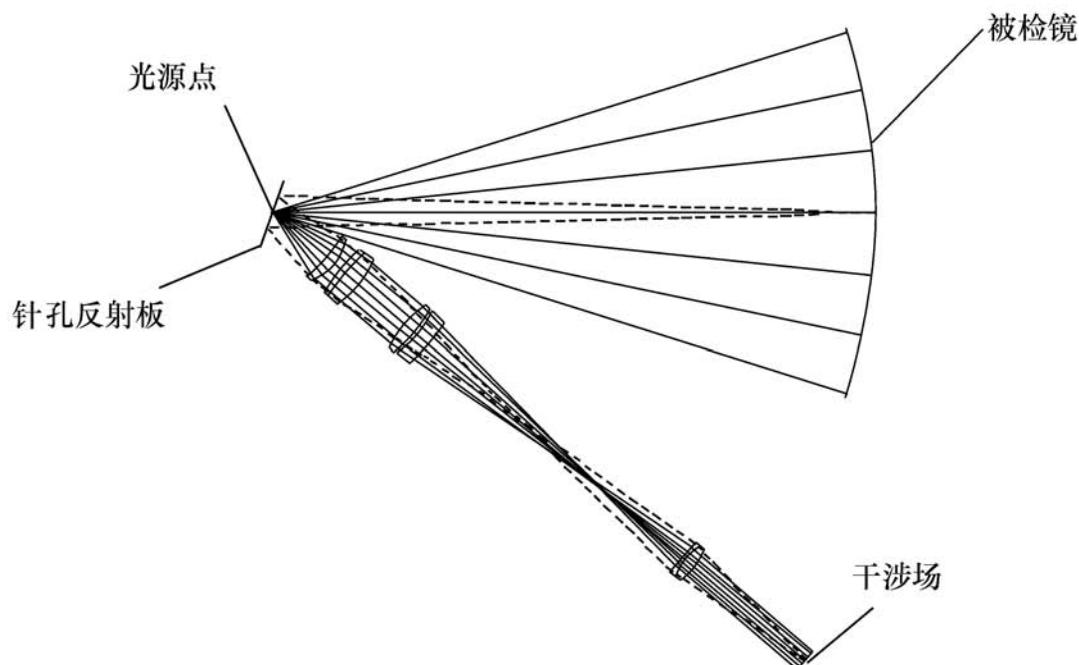


图3 点衍射干涉仪检测光路模型

Fig. 3 Testing optical model of PDI

### 3.2 生成单幅干涉图

生成单幅干涉图步骤如下:第一步由光源点  $O$  点发出的光波经成像透镜系统传到干涉场  $D$ , 记录干涉场的复振幅  $U_{\text{ref}}$ , 此值包含了参考光在干涉场处的振幅和相位。第二步由点光源发出的球面波首先传到被检镜子  $T$ , 经过被检镜  $T$  反射后再经过针孔反射板  $B$  反射, 经成像透镜系统传到干涉场  $D$ , 记录干涉场的振幅和相位  $U_{\text{test}}$ , 此值包含了测试光的振幅和相位。第三步计算干涉场处参考光和测试光的叠加的复振幅  $U = U_{\text{ref}} + U_{\text{test}}$ , 干涉场处的光强  $I$  即可由下式得到:

$$I = U \cdot U^*, \quad (1)$$

式(1)中  $U^*$  表示复振幅  $U$  的共轭。

干涉图的生成方式同样可以经过下面的途径得到。由参考光在干涉场处的复振幅  $U_{\text{ref}}$  计算得到参考光在干涉场处的光强  $I_{\text{ref}}$  和相位  $\varphi_{\text{ref}}$ , 同样的方法计算出测试光在干涉场处的光强  $I_{\text{test}}$  和相位  $\varphi_{\text{test}}$ 。由下式得到干涉场处的光强分布:

$$I = I_{\text{ref}} + I_{\text{test}} + 2 \sqrt{I_{\text{ref}} I_{\text{test}}} \cos(\varphi_{\text{ref}} - \varphi_{\text{test}}). \quad (2)$$

此外,模拟了理想镜面在离焦和倾斜时的干涉图,以及包含不同类型像差的镜面干涉图,如图4所示。

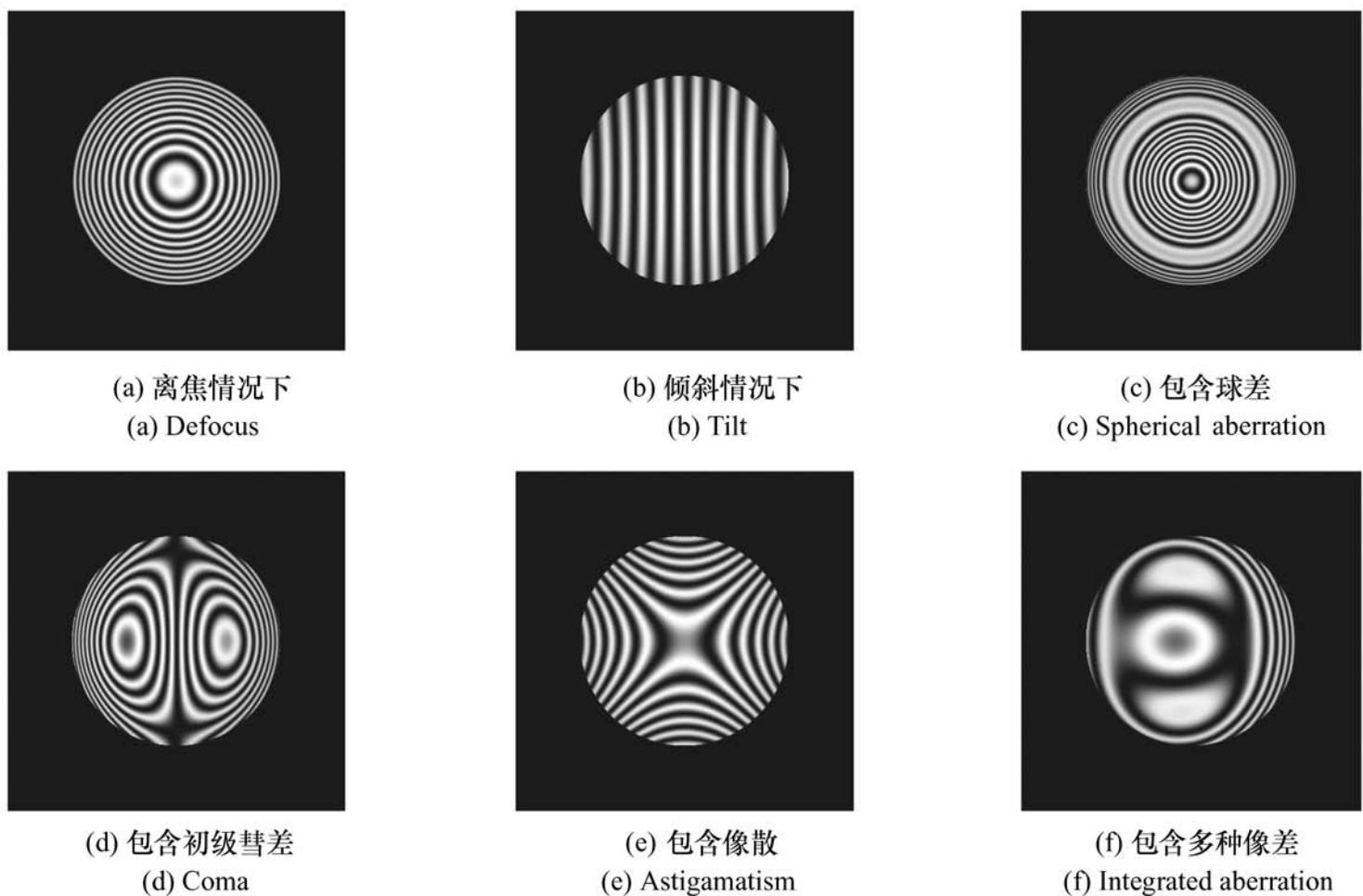


图4 不同情形下的干涉图

Fig. 4 Interferograms relate to different conditions

### 3.3 生成移相干涉图

利用点衍射干涉仪测量球面光学元件时,可以通过移动被检镜来实现相移,该模型是通过改变被检镜和点源之间的距离来模拟点衍射干涉仪的移相过程。基于干涉仪的基本原理,测试结果中参考光和测试光之间的常量相位差是无意义的。由模型到移相时干涉场测试光的复振幅,求解出干涉场处的相位后,设定不同移相位置时干

涉场中心的相位差为移相间隔量,由模型可以得到其他位置与中心位置的相对相位,这样便可获得移相时干涉场测试光的光强和相位。移相过程中参考光是不变的,由式(2)可以得到移相干涉图。

由上述方法得到的一组被检镜倾斜的13步移相干涉图,如图5所示。

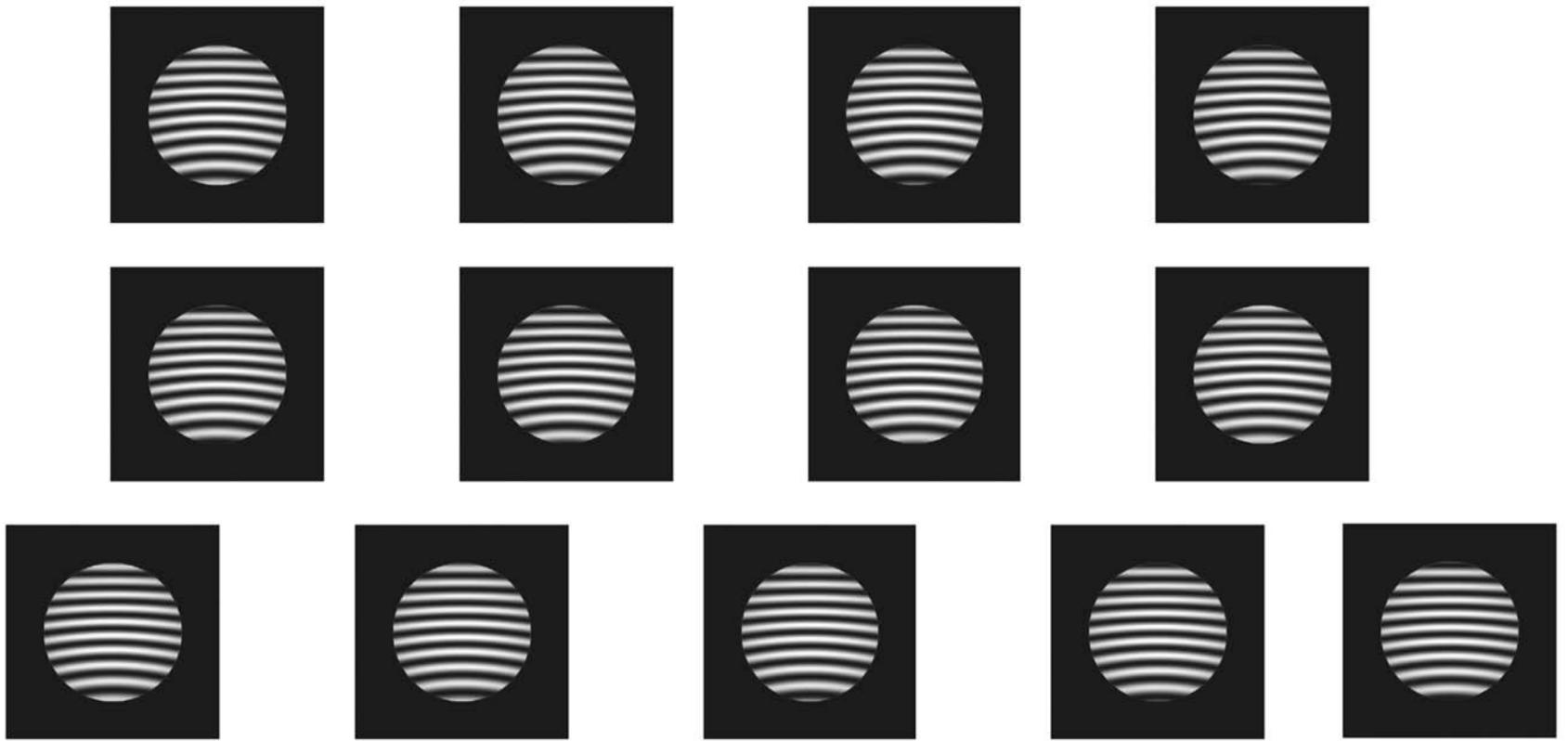


图5 13步移相干涉图

Fig.5 Thirteen-step phase-shifting interferograms

#### 4 模拟测试过程

在用点衍射干涉仪检测球面面形时,为了避免小孔对被检镜反射回来的光波的影响,通常是将被检镜置于一定的倾斜角,通过两次对称倾斜放置测量,消除被检镜倾斜对测量结果的影响<sup>[12]</sup>。在模拟测试过程中,设定的被检镜二维面形如图6(a)所示。

设定的被检镜面形 PV 值为 7.4035 nm, RMS 值为 1.0358 nm; 利用本模型生成对称倾斜情况下的两组 13 步移相干涉图,如图 7 所示。

经过干涉图处理后计算得到的镜子面形二维图如图 6(b) 所示, PV 值为 7.6309 nm, RMS 值为 1.0972 nm; 面形计算误差的二维图如图 6(c) 所示, 计算误差的 PV 值为 0.5656 nm, RMS 值为 0.0783 nm。

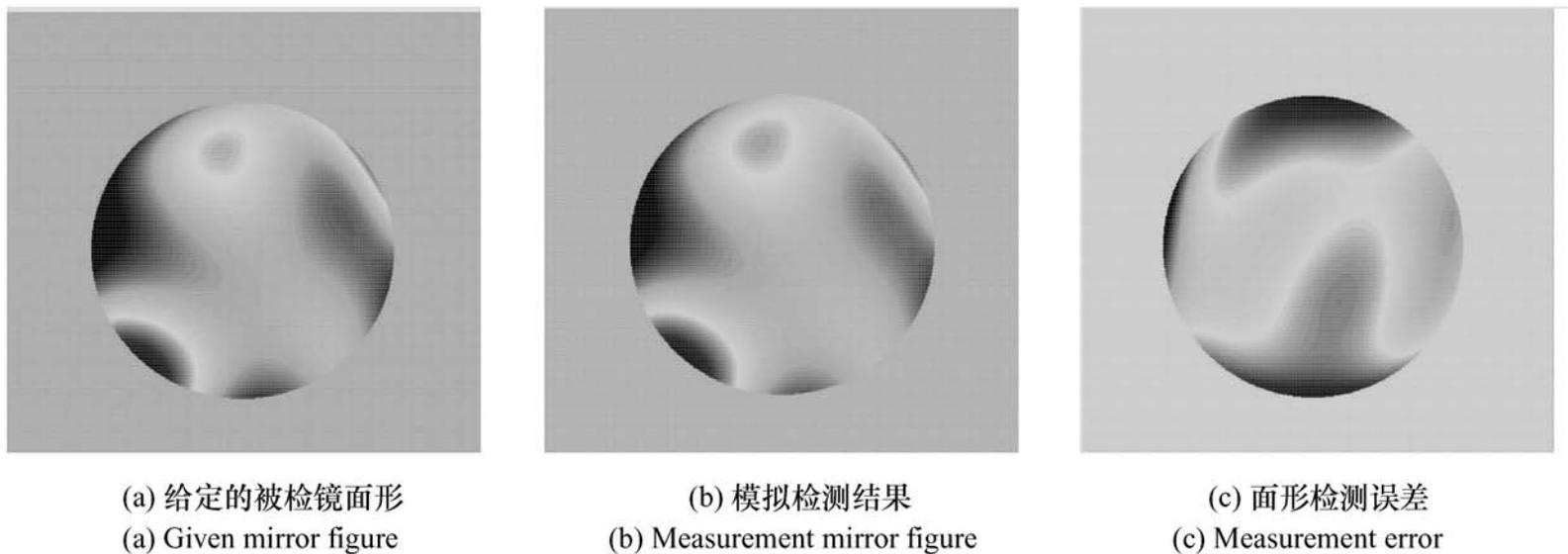


图6 给定的被检面形和模拟检测结果误差

Fig.6 Given mirror figure and measurement error

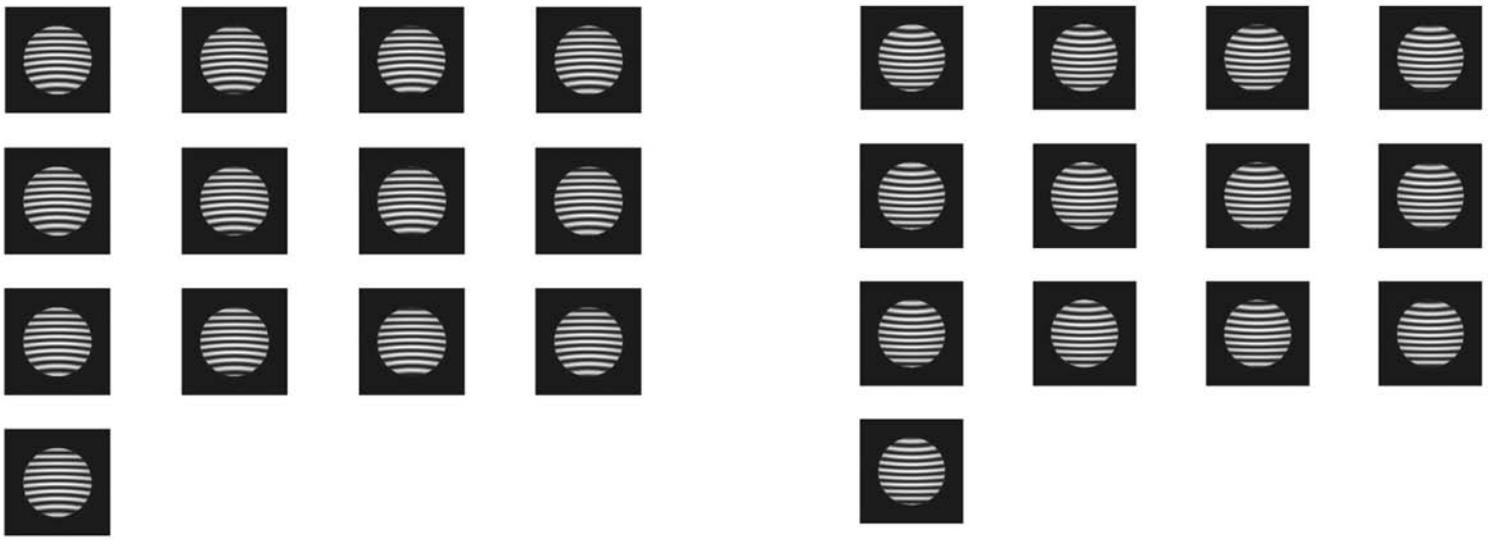


图7 对称倾斜的两组13步移相干涉图

Fig. 7 Two sets of 13 step phase-shifting interferograms tilted symmetrically

## 5 结 论

本文介绍了点衍射干涉仪的基本原理, 分析了如何构建点衍射干涉仪的模型; 利用光学设计软件构建了点衍射干涉仪测量光路模型, 基于该

模型, 可以分析点衍射干涉仪的测量误差, 亦可生成多步移相干涉图。针对某一设定检镜仿真检测过程, 结果表明, 检测精度 PV 值为 0.5656 nm, RMS 值为 0.0783 nm。本模型的建立为点衍射干涉仪的研制提供了相关技术支持。

### 参考文献:

- [1] SMARTT R N, STRONG J. Point-diffraction interferometer[ J]. *J. Opt. Soc. Amer.*, 1972, 62: 734-737.
- [2] KADONO H, TAKAI N, ASAKURA T. New common-path phase shifting interferometer using a polarization technique[ J]. *Appl. Opt.*, 1987, 26( 5): 898-904.
- [3] NEAL M J. Polarization phase-shifting point-diffraction interferometry for measure extreme ultraviolet optics[ J]. *OSA Trends Opt. Photonics* 1999, 4: 108-112.
- [4] 刘国淦, 张学军, 王权陡, 等. 光纤点衍射干涉仪的技术研究[ J]. *光学精密工程*, 2001, 9( 2): 142-145.  
LIU G G, ZHANG X J, WANG Q D, *et al.*. Fiber point diffraction interferometer[ J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9( 2): 142-145. ( in Chinese)
- [5] CHEN L F, NIE L, ZHOU T G, *et al.*. Research on the fiber point diffraction interferometer for spherical figure measurement[ J]. *SPIE*, 2008, 6357: 63574J.
- [6] 李艳秋, 刘克. 相移点衍射干涉仪的关键技术研究[ J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47( 1): 011201.  
LI Y Q, LIU K. Core techniques of phase-shifting point diffraction interferometer[ J]. *Laser Optoelectronics Progress*, 2010, 47( 1): 011201. ( in Chinese)
- [7] STONE B D. Modeling interferometers with lens design software[ J]. *Opt. Eng.*, 2000, 39( 7): 1748-1759.
- [8] STONE B, THOMPSON K P. Modeling interferometers with lens design software: beyond ray-based approaches[ J]. *SPIE*, 2009, 7427: 74270A.
- [9] GONG Q, GEARY J M. Modeling point diffraction interferometers[ J]. *Opt. Eng.*, 1996, 35( 2) 351-356.
- [10] OTAKI K, ZHU Y, ISHII M, *et al.*. Rigorous wavefront analysis of the visible-light point diffraction interferometer for EUVL[ J]. *SPIE*, 2004, 5193: 182-190.
- [11] OTAKI K, BONNEAU F, ICHIHARA Y. Absolute measurement of spherical surface by point diffraction interferometer [ J]. *SPIE*, 1999, 3740: 602-605.

- [12] JOHNSON M A, PHILLION D W, SOMMARGREN G E, *et. al.*. Construction and testing of wavefront reference sources for interferometry of ultra-precise imaging systems[ J] . *SPIE*, 2005, 5869: 58690P.

作者简介: 张海涛(1987—), 男, 山东菏泽人, 硕士, 研究实习员, 主要从事光学检测方面的研究。

E-mail: heisencheung@ gmail. com

## 向您推荐《液晶与显示》期刊

中文核心期刊

中国最早创办的液晶学科专业期刊之一

中国液晶学科和显示技术领域综合性学术期刊

中国物理学会液晶分会会刊, 中国光学光电子行业协会液晶分会会刊

英国《科学文摘》(SA)、美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》(P)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)、“中国科技论文统计源期刊”等20余种国内外著名检索刊物和文献数据库来源期刊

《液晶与显示》由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国物理学会液晶分会和中国光学光电子行业协会液晶专业分会主办, 科学出版社出版。

《液晶与显示》以研究报告、研究快报和综合评述等栏目集中报道国内外液晶学科和显示技术领域最新理论研究、科研成果和创新技术, 及时反映国内外本学科领域及产业信息动态, 内容丰富, 涵盖面广, 信息量大, 可读性强, 是我国专业期刊发行量最大的刊物之一。

《液晶与显示》为双月刊, 国内定价40.00元。国内邮发代号: 12-203; 国外发行代号: 4868BM。

地址: 长春市东南湖大路3888号

《液晶与显示》编辑部

邮编: 130033

E-mail: yjxs@ ciomp. ac. cn

国内统一刊号: CN 22-1259/O4

国际标准刊号: ISSN 1007-2780

电话: (0431) 6176059

网址: www. yjyxs. com