

# 基于多光束的自由曲面干涉检测法的仿真研究

王军<sup>1</sup> 吴泉英<sup>1\*</sup> 唐运海<sup>1</sup> 钱霖<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 苏州科技学院数理学院, 江苏 苏州 215009  
<sup>2</sup> 苏州大学物理科学与技术学院, 江苏 苏州 215006)

**摘要** 利用干涉法测量自由曲面的面形时,针对曲面曲率梯度较大的局部区域,由于干涉条纹的密度过大,无法通过干涉图获取对应的面形信息。针对这一问题提出一种基于多光束的自由曲面干涉检测方法。在干涉测试臂中,采用不同角度的多光束作为测试光,当测试光的入射角与局部被测曲面的曲率相匹配时,该区域形成的干涉条纹密度降低。通过将不同入射角度的光束照射至曲面,实现对被测曲面全口径面形的测量。该方法不需要补偿元件,也不需要机械装置调节自由曲面的位置。对测量过程中形成的干涉图进行仿真,为系统的设计和构建提供基础。

**关键词** 干涉测量;自由曲面;多测量光束

中图分类号 O436.3; TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP48.121201

## Simulation of Interferograms of Multiple-Beam Interferometric Measurement for Free Surfaces

Wang Jun<sup>1</sup> Wu Quanying<sup>1</sup> Tang Yunhai<sup>1</sup> Qian Lin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Mathematics and Physics, Suzhou University of Science and Technology,  
Suzhou, Jiangsu 215009, China

<sup>2</sup> School of Physics Science and Technology, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China

**Abstract** When the test wavefront is strongly aspheric, the minimum fringe spacing is too small to acquire the phase value for interferometry. A technique for the measurement of free surfaces based on multiple test beams is presented. Multiple test beams under different incident angles illuminate the free surface. When the incident angle matches with the curvature of an area under test, the fringe density in this area is reduced. In this way, the full-aperture measurement of free surfaces can be performed. The advantage of the method is that no null and no mechanical movements of the test surface are needed. In order to support the system design, the interferogram of the system is simulated and analyzed.

**Key words** interferometry; free surface; multiple test beams

**OCIS codes** 120.3940; 120.4640; 120.3180

## 1 引言

自由曲面光学元件以其面形结构空间布局灵活、对光线具有很强的调制作用而被广泛应用,其应用场合包括飞行器光学窗、光学自由曲面离轴三反望远镜和光学晶体复眼结构器件等。由于自由曲面的曲率变化大,传统的干涉检测形成的干涉条纹密度大,传感器不易分辨,使得自由曲面检测难度增大<sup>[1]</sup>。因此,快速、高精度的自由曲面检测成为当今光学检测中最为关键的技术之一。

目前,自由曲面光学元件的检测方法主要有:1)反射光栅摄影测量法,利用两个探测器接收不同方位的投射光栅的像,并根据探测器、投射光栅和自由曲面表面之间的几何关系,即可计算出自由曲面面形。该方

收稿日期: 2011-07-21; 收到修改稿日期: 2011-08-30; 网络出版日期: 2011-10-23

基金项目: 浙江省眼视光学和视觉科学重点实验室——省部共建国家重点实验室培育基地和江苏省“六大人才高峰”项目资助课题。

作者简介: 王军(1981—),男,博士,讲师,主要从事光学干涉测量方面的研究。E-mail: wjk31@163.com

\*通信联系人。E-mail: wqcyh00@yahoo.com.cn

法不受被测面几何面形的限制,但测量精度只达到微米量级<sup>[2]</sup>。2)利用计算全息元件作为补偿器的测量方法。计算全息元件的制造精度会直接影响测量精度,此外,不同的被测面均需要设计并制造与之对应的补偿器,增加了测量周期和成本<sup>[3~8]</sup>。3)子孔径拼接测量法,将被测光学元件划分为多个子孔径区域,并旋转被测元件对其中各个子孔径分别进行零位检测。该方法对检测系统的机械性能和结构要求较高<sup>[9]</sup>。

本文采用不同入射角度的多束测试光,当测试光的入射角与局部被测曲面的曲率相匹配时,该区域形成的干涉条纹密度降低,从而避免了干涉条纹过密的问题。检测过程中不需要补偿元件,也不需要复杂的机械结构调节光学元件的位置。本文主要对测量过程中形成的干涉图进行仿真,以此研究测试光的入射角度与相应的局部干涉图之间的对应关系,为系统的设计和构建提供基础。

## 2 测试原理

在利用传统的干涉法测量自由曲面面形时,对应被测面形曲率较大的区域,被测波面与参考波面夹角较大,该区域形成的干涉条纹密度大,如图 1 所示。当探测器对干涉条纹的采样率低于奈奎斯特采样率时,就无法利用该干涉图恢复出待测波面的相位信息。

为了解决测试时出现的条纹过密的问题,保持参考光路不变,改变测试光路,使测试光斜入射到被测面上。该情况下参考波面和测试波面的情况如图 2 所示,其中被测面右侧区域与参考面的夹角变小,对应区域的干涉条纹也变得稀疏。因此,改变测试光的入射角度,就可减小不同区域的条纹密度,从而解决因为条纹过密而无法提取相位信息的问题。

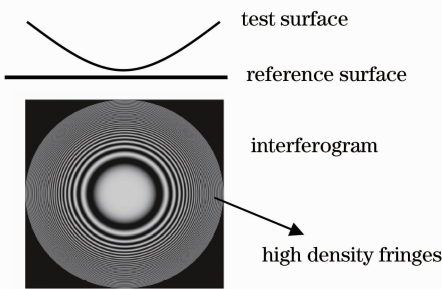


图 1 干涉法测量时的条纹过密情况

Fig. 1 High density fringes when using interferometry

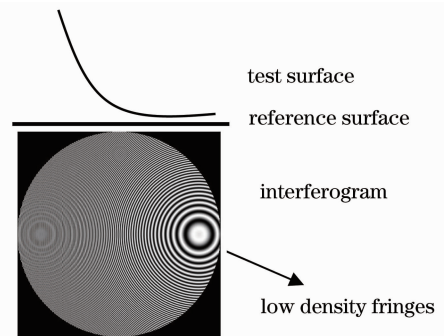


图 2 测试光斜入射的情况

Fig. 2 Interferogram when the test light is obliquely incident onto the surface

根据该思路,设计了多光束自由曲面光学检测系统。测试光路由不同入射角的多光束照射被测自由曲面,从而解决面形曲率较大区域条纹过密的问题。反射的测试光束与参考光束干涉,并由 CCD 记录干涉图。不同入射角的多光束同时照射到被测自由曲面上,在同一时间获得多幅干涉图。在整个检测过程中,被测自由曲面位置保持不变,无需任何机械运动。

## 3 干涉图仿真

根据测试原理,仿真测量一个非球面时系统得到的干涉图,其中设定准直透镜焦距  $f=35$  mm。设被测面形为

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{i=1}^N A_i r^i,$$

式中  $c$  为顶点曲率, $k$  为二次曲线常用数, $A_i (i=1, \dots, N)$  为非球面高次项系数。被测曲面口径为 62 mm,  $k=0.2, c=0.0036, N=3, A_1=0.002, A_2=0.0009, A_3=-0.000032$ 。

根据以上参数,利用 Matlab 软件仿真得到的干涉图如图 3 所示。图 3(a)~(d) 分别对应不同入射角光束入射至非球面 4 次得到的干涉图。这 4 幅干涉图中的条纹密度都未超出 CCD 的分辨率,利用干涉条纹提取对应区域的相位信息(例如移相法),获得面形信息,再拼接就可获得全口径的面形。

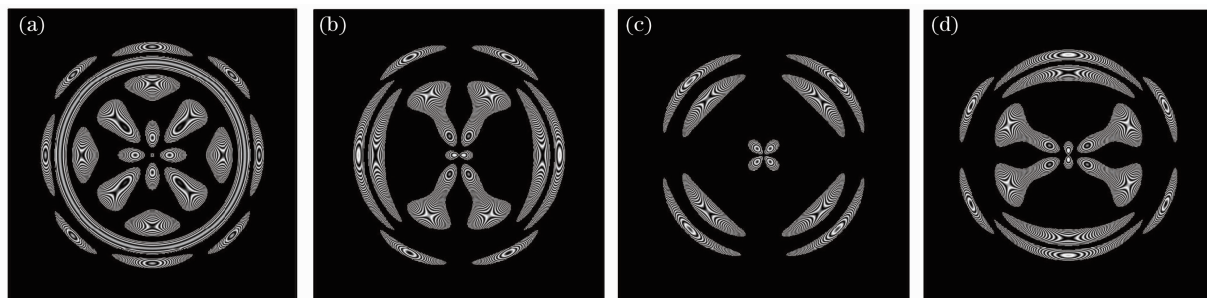


图3 测量过程中形成的4幅干涉图

Fig. 3 Four interferograms obtained in the measurement

## 4 结 论

将多束测试光以不同的角度同时入射到被测自由曲面,解决了干涉法测量曲率较大的面形时产生的条纹过密的问题。测量不需要补偿器件,不需要复杂的机械结构转动被测曲面,利用改变测试光的入射方向即可实现被测曲面全口径的测量。通过干涉图仿真可知,在准直透镜焦距为  $f=35\text{ mm}$  的情况下,各子干涉图中的条纹密度都未超出 CCD 的分辨率。

## 参 考 文 献

- 1 D. Malacara, *Optical Shop Testing* (3rd ed) [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2007. 716~718
- 2 Zhang Xin, Xu Yingchao. Study on free form optical testing[J]. *Chinese J. Optics and Applied Optics*, 2008, **1**(1): 92~99
- 3 张 新,许英朝. 光学自由曲面检测方法[J]. *中国光学与应用光学*, 2008, **1**(1): 92~99
- 4 J. C. Wyant. Testing aspherics using two-wavelength holography[J]. *Appl. Opt.*, 1971, **10**(9): 2113~2118
- 4 Bernd Doerband, Hans J. Tiziani. Testing aspheric surfaces with computer-generated holograms analysis of adjustment and shape errors[J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(16): 2604~2611
- 5 Stephan Reichelt, Christof Pruss, Hans J. Tiziani. Absolute interferometric test of aspheres by use of twin computer-generated holograms[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(22): 4468~4479
- 6 Xie Yi, Chen Qiang, Wu Fan *et al.*. Concave aspherical surface testing with twin computer-generated holograms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1313~1317
- 7 谢 意,陈 强,伍 凡等. 用双计算全息图检测凹非球面[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1313~1317
- 7 Liu Hua, Lu Zhenwu, Li Fengyou. CGH testing system for large aspheric surface[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(2): 177~182
- 8 刘 华,卢振武,李凤有. 大口径非球面计算全息图检测系统[J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(2): 177~182
- 8 Zhao Wenchuan, Su Xianyu, Liu Yuankun *et al.*. Testing an aspheric mirror based on phase measuring deflectometry[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1338~1341
- 9 赵文川,苏显渝,刘元坤等. 基于相位偏折术的非球面镜检测方法[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1338~1341
- 9 M. Tricard, P. E. Murphy. Subaperture Stitching for Large Aspheric Surfaces [R]. Talk for NASA Tech. Day, 2004