

文章编号: 0253-2239(2009)09-2441-06

龙基光栅在大口径非球面定量测量中的应用

雷柏平^{1,2} 伍 凡¹ 周晨波³

(¹ 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)
³ 烟台大学光电学院, 山东 烟台 264005)

摘要 为了实现对大口径非球面在细磨和初抛光的加工过程中出现的较大误差的测量, 提出了将龙基(Ronchi)光栅、图像采集以及数字图像处理技术相结合的一种较大误差的定量测试方法。介绍了该方法的基本原理、建立了数学模型、编制了相应的数字处理软件。利用该方法对一直径为 140 mm, F 数为 2 的凹形抛物面镜进行了测试实验。通过该测试方法以及数据处理软件, 得到了准确的非球面形分布图, 检测结果与经典的干涉仪检测结果想比较, 二者是相一致的。将为大口径非球面精磨和初抛光阶段提供一种有效、可靠的定量检测方法。

关键词 衍射与光栅; 龙基(Ronchi)光栅; 定量检测; 图像处理; 非球面

中图分类号 O434 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092909.2441

Application of Ronchi Grating to the Quantitative Measurement of Large-aperture Aspheric Surfaces

Lei Baiping^{1,2} Wu Fan¹ Zhou Chenbo³

(¹ Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China
³ College of Photo-electricity, Yantai University, Yantai, Shandong 264005, China)

Abstract The Ronchi grating is used to test the large error of aspheric surfaces during the grinding and advance polishing combining with the technology of photo sensors and the technology of digital image processing in the quantitative way. This paper discusses the basic principle of this method, sets up the mathematical model and works out the corresponding software. A concave parabolic mirror with the diameter of 140 mm and the F number is 2 is tested by using this method. The result of the quantitative measurement fits well with the one of the interferometer. This analysis software and test method provide a valid and credible quantitative measurement way for the exact-grinding and advance polishing aspheric surfaces.

Key words diffraction and gratings; Ronchi grating; quantitative measurement; image processing; aspheric surface

1 引 言

由于光学非球面具有良好的光学性能的同时又能够简化系统结构, 而正在广泛的运用于热核聚变、强激光武器发射系统、空间通讯、天体观察等诸多领域中。不仅如此, 这些光学系统中的非球面口径也是越来越大。现在, 欧洲南方航天局已经着手计划在 2015 年至 2025 年建立口径在 30 米左右的天文望远镜。在这些大口径非球面光学元件被广泛应用

的同时, 其加工技术却制约着它的运用和发展。而加工技术的发展关键在于检测技术的发展。大口径非球面的检测技术已经成为国内外光学加工行业研究的重点和热点。

在大型光学非球面精磨和初抛光过程中由于残差达几百个微米, 使检测变得非常困难。现在常用的检测方式主要有三坐标测量仪、红外干涉仪^[1]等。三坐标测量仪是用测头对被测面进行接触式测量,

收稿日期: 2008-10-27; 收到修改稿日期: 2008-12-03

基金项目: 国家 863 计划资助课题。

作者简介: 雷柏平(1976—), 男, 博士, 主要从事光机系统及大口径非球面检测技术等方面的研究。

E-mail: laser168@sohu.com

导师简介: 伍 凡(1957—), 男, 研究员, 主要从事大口径非球面检测技术方面的研究。E-mail: wufan@ioe.ac.cn

这种测量方法非常费事、费时,并且精度受测头、运动机构影响特别大,测量的口径也受到限制,对大于使用范围的镜面就无法使用。红外干涉仪不仅制造费用很高,而且需要使用补偿器,同时由于光线不可见而使得检测过程非常困难。而龙基(Ronchi)光栅检测自从1923年问世以后就一直被用于进行定性的检测^[2]。研究表明,改变龙基(Ronchi)光栅的频率将可以实现大误差的测量^[3]。

本文利用龙基(Ronchi)光栅的检测原理以及自行编制的图像采集和数据处理软件,实现了对大口径非球面的定量测量。不仅为大口径非球面在精磨和初抛光阶段大误差的定量测量提供一种方法^[4~14],同时也为三坐标测量仪和红外干涉仪提供对比的依据。后期的数据处理结果可以提供给数控加工机床作为原始数据而大大缩短大口径非球面的加工周期。

2 基本工作原理

将一个 Ronchi 光栅放置在被检反射镜面的曲

率中心附近,光源经光栅后由被检反射镜反射,光栅的像又回落在光栅上,产生叠栅条纹。而这些条纹的形状取决于被检反射镜面的像差。可以根据反射后的条纹与理想的标准条纹的变形来计算出被检测镜面的面形误差。Ronchi 检验法实质上是直接测量横向像差(TA)的方法,其空间检测光路如图1所示。根据图1,把光轴标定为 z 轴,镜面顶点与 $x-y$ 平面相切,点光源置于坐标 $(0,0,L)$ 处, L 为镜面的曲率半径,Ronchi光栅处于 $z=D$ 平面。假设一束光线经镜面反射后与Ronchi光栅相交于点 (α,y_0,D) ,根据Malacara推导的公式可以得到^[2]

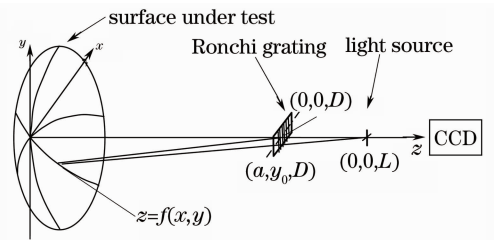


图1 Ronchi光栅测量系统示意图

Fig. 1 Sketch of Ronchi grating testing system

$$\frac{x}{\alpha} = \frac{(L-f)[1-(df/dR)^2]+2R(df/dR)}{(D+L+2f)[1-(df/dR)^2]+2(df/dR)[R-(D-f)(L-f)/R]} \quad (1)$$

在极坐标下,由(1)式可以得到关于镜面半径的横向像差

$$T_A(R) = \frac{\alpha}{\cos\theta} = \frac{(D+L+2f)[1-(df/dR)^2]+2(df/dR)[R-(D-f)(L-f)/R]}{[(L-f)/R][1-(df/dR)^2]+2(df/dR)} \quad (2)$$

式中 R 为通光口径, f 为镜子的非球面函数。不同入射高度的光(不同 R),则横向相差不同。

Ronchi光栅的绘制及刻划可以分成两步走。第一计算Ronchi光栅线条,根据被加工的镜面方程以及检测时的光路安排来计算Ronchi光栅方程或者绘制光栅图。根据计算算法可知,对于大口径球面镜的检验,用直条纹的光栅板得到的理想反射条纹也是直线的,很容易识别。但如果用来检验非球面,得到的Ronchi条纹就不再是直线的,而是弯曲的。对于技术人员来说,根据直线比根据曲线更容易检测出形状偏差。另外,在条纹是弯曲的时候,衍射效应容易造成条纹的扩散,从而使测量更加困难。因此,需要使用特殊的补偿光栅的刻线曲率补偿表面的非球面性,从而产生固定宽度的直条纹。第二是光栅板的制作,根据上面的计算结果刻划出Ronchi光栅。然后将按上述步骤刻划好的Ronchi光栅放置于检测光路中进行镜面的检测。为了方便

光路的调整,在设计光栅板时可经设计一个定位标记,光栅板安装在一个可以径向转动 90° 的旋转台上,可以实现待测镜面的二维测量。接着是图形的采集与数据处理。利用CCD图像采集装置将产生的Ronchi条纹采集到计算机中,通过采集软件可以将条纹转化为灰度矩阵,实现条纹的数据化。通过与计算机中储存的理想条纹的比较,得出条纹的形变,进而通过数据处理计算出被检测面的面形误差。

3 数学建模和数据算法

Ronchi光栅检测的数据处理模型如图2所示。假定一个Ronchi光栅的刻线间隔为 d ,刻线与 y 轴的夹角为 φ ,波面的曲率半径为 r ,则可以用下式表示第 m 个条纹上的点 (x,y) ^[2]

$$\frac{\partial W}{\partial x} \cos\varphi - \frac{\partial W}{\partial y} \sin\varphi = -\frac{md}{r} \quad (3)$$

如果是完全不对称的表面,而表面是连续变化的,则可以用第 k 级的二维多项式来进行表面拟合

$$W(x, y) = \sum_{i=0}^{k-1} \sum_{j=0}^i B_{ij} x^j y^{i-j}. \quad (4)$$

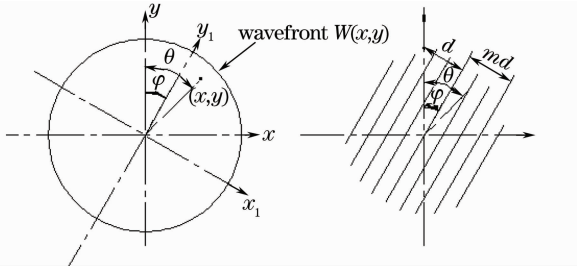


图 2 波面与光栅的位置关系

Fig. 2 Wavefront and grating orientation

(4)式对 x 和 y 的偏导数分别为

$$\frac{\partial W}{\partial x} = \sum_{i=0}^{k-1} \sum_{j=0}^i (j+1) B_{i+1,j+1} x^j y^{i-j}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial W}{\partial y} = \sum_{i=0}^{k-1} \sum_{j=0}^i (i-j+1) B_{i+1,j} x^j y^{i-j}. \quad (6)$$

根据(3)式中 Ronchi 检验法的基本关系,有

$$\frac{\partial W}{\partial x} \cos \varphi - \frac{\partial W}{\partial y} \sin \varphi = -\frac{[m(x, y) - m_0(x, y)]}{r} d, \quad (7)$$

式中 $m(x, y)$ 是实际 Ronchi 图中某点 (x, y) 上 m 的测定值, $m_0(x, y)$ 是在完善的 Ronchi 图中同一点 (x, y) 所计算出来的值. 现在分别用 $m_x(x, y)$ 和 $m_y(x, y)$ 来表示光栅刻线取向为 $\varphi = 0$ 和 $\varphi = 90^\circ$ 时两个 $m(x, y)$ 的值, 将其代入(7)式可得

$$\frac{\partial W}{\partial x} = -\frac{[m_x(x, y) - m_0(x, y)]}{r} d \quad (\varphi = 0), \quad (8)$$

$$\frac{\partial W}{\partial y} = \frac{[m_y(x, y) - m_0(x, y)]}{r} d \quad (\varphi = 90^\circ). \quad (9)$$

利用最小二乘方法能够使差分函数 $(m_y - m_0)$ 拟合第 $(k-1)$ 级次的二维多项式, 得出

$$\frac{\partial W}{\partial x} = \sum_{i=0}^{k-1} \sum_{j=0}^i C_{ij} x^j y^{i-j} \quad (10)$$

以及

$$\frac{\partial W}{\partial y} = \sum_{i=0}^{k-1} \sum_{j=0}^i D_{ij} x^j y^{i-j} \quad (11)$$

将(5)和(6)式同上面两个关系式进行比较, 通过计算可以得出

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{C_{i-1,j-1}}{j} + \frac{D_{i-1,j-1}}{i-j} \right), \quad \begin{cases} i = 2, 3, \dots, k \\ j = 1, 2, 3, \dots, (i-1) \end{cases} \quad (12)$$

为了提高准确度, 可以取两个数值的平均值. 一旦

确定系数 B_{ij} 后, 就能够用(7)式计算出波面偏差 $W(x, y)$. 假设 $Z(x, y)$ 表示非球面, $Z_0(x, y)$ 表示密接球面, 于是有

$$Z(x, y) - Z_0(x, y) = 2W(x, y). \quad (13)$$

利用(13)式可计算任何非球面的理想 Ronchi 图, 从而求出所检测镜面面型的偏差.

4 检测实验

我们对一个直径为 140 mm、 F 数为 2 的非球面进行检测实验, 利用 MATLAB 编制了图像采集和数据分析处理软件. 整个检测过程可以分为两个部分.

1) 搭建实验装置以及图像采集. 整个实验是在一个气浮实验平台上进行的, 如图 3 所示, 图中 1 为待测抛物面, 2 为光栅, 3 为光源, 4 为 CCD, 5 是计算机. 根据设计光栅的光路设计安排, 由计算机采集 CCD 探测到的图像. 采集一个位置的 Ronchi 图之后, 转动光栅, 分别采集下光栅狭缝与 y 轴(垂直方向)的不同夹角为 φ 的 Ronchi 图像, 如图 4 所示. 图 4(a, b, c, d) 四幅图像分别对应夹角为 $0, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 的 Ronchi 图像. 在实验中所用的光栅为补偿光栅, 光栅直径为 4.877 mm, 9 线对. 光栅位于光源和抛物面镜之间, 到光源的距离为 20 mm.

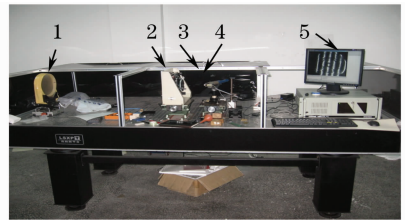


图 3 Ronchi 检测系统图

Fig. 3 The system of Ronchi testing

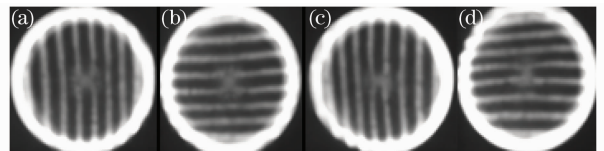


图 4 从 CCD 采集到的 Ronchi 图

Fig. 4 The Ronchi grams taken by the camera

2) 数据分析处理. 通过采集软件可以将条纹转化为灰度矩阵, 实现条纹的数据化. 通过与计算机中储存的理想条纹的比较, 得出条纹的形变, 进而通过数据处理计算出被检测面的面形误差. 具体处理流程为: 首先对实验检测 CCD 摄像系统采集的 Ronchi 原图进行数字灰度变换, 由编制的图像处理软件进行数字图像处理并得到所采集图像的等高图以及沿峰谷值方向的一维截面图, 分别如图 5 和图 6 所示.

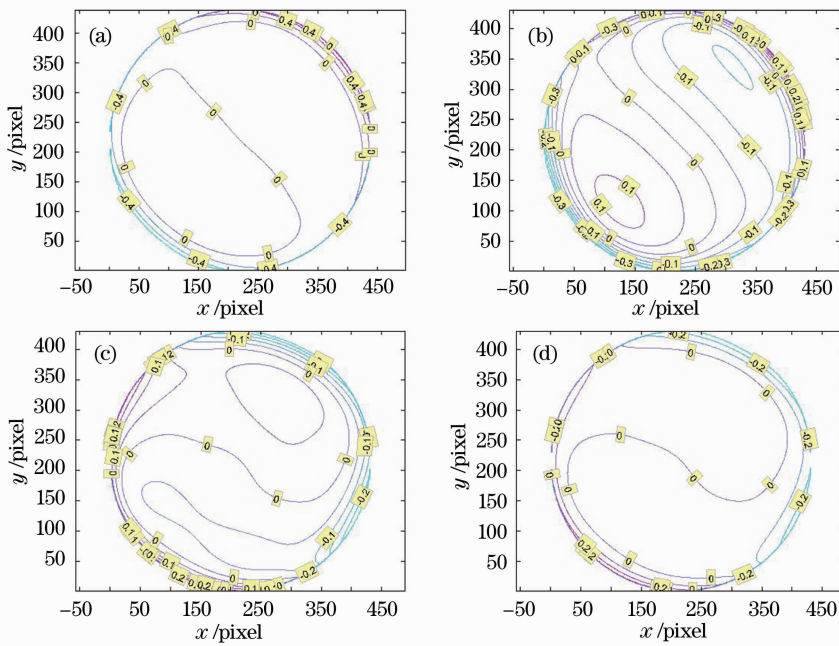


图 5 Ronchi 图的等高图

Fig. 5 The counter lines of the Ronchi gratings

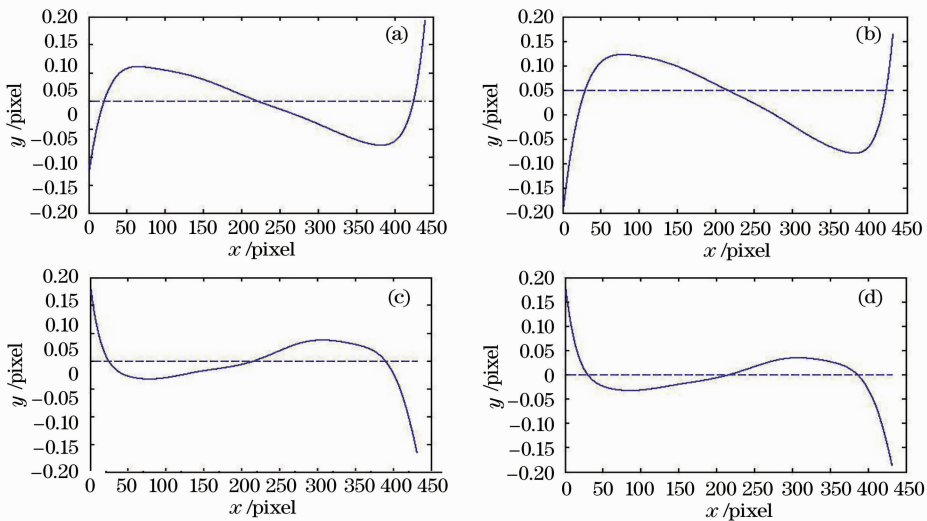


图 6 Ronchi 图的一维图

Fig. 6 The planar cures of the Ronchi gratings

最后,基于前面分析的算法所编制的波前重构软件进行波前恢复,并计算整个波前的峰谷值和均方根值。重建波前处理结果如图 7 所示。

为了验证整个检测系统的可靠性,我们又将这个抛物面镜采用传统的干涉仪方法进行了面形检测。其用自准直法 ZYGO 干涉仪检测的结果如图 8 所示。用 Ronchi 光栅检验法中,系统测试结果的平均峰-谷(PV)值为 1.269λ ($\lambda = 0.6328\ \mu\text{m}$),平均均方根误差(RMS)值为 0.14175λ 。在干涉仪检验中,ZYGO 干涉仪检验结果显示,该抛物面的面形 PV 值为 1.322λ ,RMS 值为 0.191λ 。与之相比

较,系统检测 PV 值误差为 0.053λ ,RMS 值误差为 0.04925λ 。之所以存在这样的误差,一方面是因为在自准直干涉仪测量中,使用了平面反射镜。由于该反射镜面形存在着误差,使得使用该方法测量的结果偏大。另外,由于在 Ronchi 检验中存在系统误差,而这个系统没有修正。如果在用于高精度的测量时,可以用一标准球面反射镜来校正系统误差。从现在看来,整个系统误差大约是 $\lambda/20$,而这个测试系统是为了测量非球面在精磨及初抛光阶段的大误差而设计的,在这个阶段的误差大约是几十至几百个波长,因此 $\lambda/20$ 的系统误差是可以不考虑的。

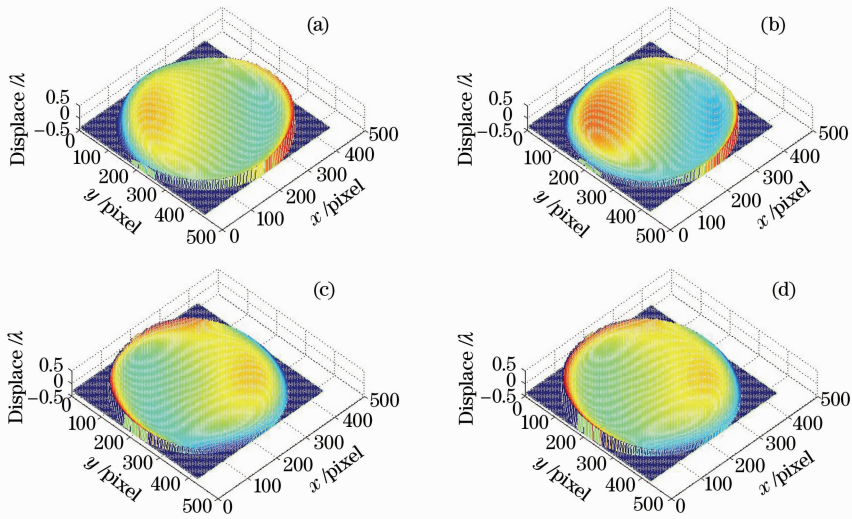


图 7 龙基图的重建波前图

Fig. 7 The rebuilt maps of wave front for the Ronchi grams

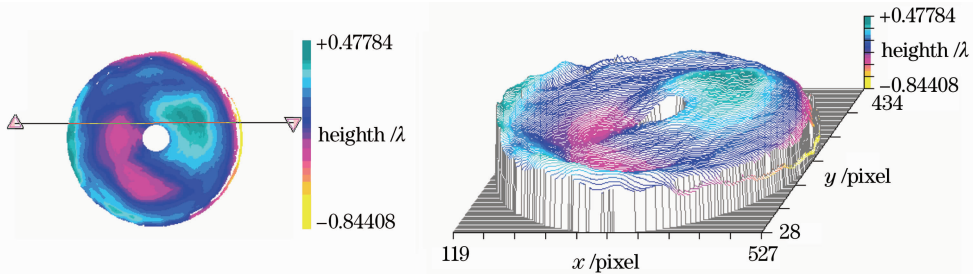


图 8 干涉仪的检测结果

Fig. 8 The result of the interferometer

5 结 论

由于 Ronchi 光栅检测法比较简单, 检验结果也比较容易识别, 所以非常适合工艺过程中的检测。而它的灵敏度可以随着光栅周期的不同而改变, 能够实现不同加工阶段的检测需求, 是一种非常实用有效的大口径球面、非球面车间检测方法。随着计算机技术的发展, Ronchi 光栅检测法突破了过去只能定性检测的局限性, 通过自行编制的计算机图像采集、数据处理软件, 实现了加工过程中的定量检测。特别是对于加工初期误差比较大时, 显示了它的独特作用。作为一种大口径非球面精磨和初抛光阶段的定量检测方法, 它拓展了常规干涉仪的测量范围, 同时也为红外干涉仪等其他检测手段提供相互验证的一个工具, 提高检验的可靠性。目前, 该系统的软、硬件集成工作正在进行当中。在不久的将来, 整个系统作为一个实用化的检测平台出现在光学车间里。

参 考 文 献

- 1 He Yong, Chen Lei, Wang Qing *et al.*. Twyman-Green infrared phase-shifting interferometer and application [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, **32**(4): 335~338
何 勇, 陈 磊, 王 青 等. 移相式泰曼-格林红外干涉仪及应用 [J]. *红外与激光*, 2003, **32**(4): 335~338
- 2 Daniel Malacara. *Optical Shop Testing* [M]. New York: John Wiley & Sons, 1978, 283~317
- 3 Lei Baiping, Wu fan, Chen qiang. Measurement of large-aperture aspheric surfaces with Ronchi grating test method [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **34**(4): 140~144
雷柏平, 伍 凡, 陈 强. 大口径非球面 Ronchi 光栅测量方法 [J]. *光电工程*, 2004, **34**(4): 140~144
- 4 Daniel Malacara. Geometrical ronchi test of aspheric mirrors [J]. *Applied Optics*, 1965, **4**(11): 1371~1374
- 5 Wu Fan, Chen Yanming. The surface shape of large optical mirror testing by using knife-edge ronchi [J]. *Opt. Engin.*, 1988, (1): 27~33
伍 凡, 陈艳明. 用刀口-朗奇光栅法检验大型光学镜面面形 [J]. *光学工程*, 1988, (1): 27~33
- 6 A. Cornejo, D. Malacara. Ronchi test of aspherical surface, analysis and accuracy [J]. *Appl. Opt.*, 1970, **9**(8): 1897~1901
- 7 Zhou Chenbo. Theoretical computation of testing large aspheric surface mirror with ronchi curved bars method [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **18**(5): 8~12

- 周晨波. Ronchi 线条法检验大非球面镜的理论计算[J]. 应用光学, 1997, **18**(5): 8~12
- 8 X. Hou, F. Wu, Y. Li *et al.*. Stitching algorithm for annular sub-aperture interferometry [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(4): 211~214
- 9 Liu Bin, Wang Qiuping, Fu Shaojun. Investigation of lon trace profiler for aspherical optics [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(2): 46~53
- 刘 斌,王秋平,傅绍军. 长程大型非球面轮廓测量仪的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2006, **43**(2): 46~53
- 10 Xu Qiao, Gu Yuangyuan, Chai Lin *et al.*. Measurement of wavefront power spectral density of large optical components[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(3): 344~347
- 许 乔,顾元元,柴 林等. 大口径光学元件波前功率谱密度检测[J]. 光学学报, 2001, **21**(3): 344~347
- 11 Wang Haiming. A novel method for measuring aspheric optics [J]. *Chinese J. Lasers*, 1992, **A19**(10): 765~769
- 王海明. 一种测量非球面面形的新方法[J]. 中国激光, 1992, **A19**(10): 765~769
- 12 Zhang Rongzhou, Yang Chunlin, Shi Qikai *et al.*. Sub-aperture splicing interference examination and precision analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1241~1244
- 张蓉竹,杨春林,石奇凯等. 子孔径拼接干涉检验及其精度分析[J]. 光学学报, 2003, **23**(10): 1241~1244
- 13 Wang Xiaochong, Wang Lihui, Yin Longhai *et al.*. Measurement of large aspherie surfaces by annular sub-aperture stitching interferometry[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(11): 645~647
- 14 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
- 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