

# 用正弦光栅的朗奇法检验大口径非球面面形

郭春风<sup>1</sup> 苏显渝<sup>1</sup> 窦蕴甫<sup>1</sup> 陈文静<sup>1</sup> 雷柏平<sup>2</sup> 伍凡<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 四川大学光电科学技术系, 四川 成都 610064)  
(<sup>2</sup> 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)

**摘要** 基于朗奇(Ronchi)检验法和同步相位探测技术,在点光源离轴情况下提出一种检验非球面反射镜的方法。该方法利用透射液晶显示器(LCD)显示垂直和水平两个方向的正弦光栅,由摄像机记录经被测镜面反射产生的光栅变形条纹图,通过四步相移法获得条纹图的相位分布。由变形条纹和光栅的同名相位点确定被测镜面每一点的横向像差,对应理想镜面的横向像差由几何关系算出,通过两镜面对应点的横向像差之差获得待测点面形偏差的梯度信息,对其积分恢复面形偏差,最后重建被测面形。检测中光栅由计算机产生,可实现精确的相移,使垂直和水平光栅严格达到90°。采用预设标记点来引导相位展开,有效地解决了变形条纹和光栅的相位对应问题。模拟和实验初步验证了这一方法的可行性。

**关键词** 光学测量;三维面形测量;朗奇检验法;非球面镜;四步相移

**中图分类号** O438 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0422001

## Large-Aperture Aspheric Surfaces Testing by Using Sinusoidal Grating Based on Ronchi Method

Guo Chunfeng<sup>1</sup> Su Xianyu<sup>1</sup> Dou Yunfu<sup>1</sup> Chen Wenjing<sup>1</sup> Lei Baiping<sup>2</sup> Wu Fan<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Opto-Electronics Department, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)  
(<sup>2</sup> Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)

**Abstract** A method based on Ronchi test and synchronous phase detection technology is presented to measure the aspheric mirror, where the point source is located beside the axis of the surface. A liquid crystal display screen displays the vertical and horizontal sinusoidal gratings and a camera captures the deformed fringe patterns generated by the reflection of the mirror. By four-step phase-shifting technique, the phase distributions are obtained. According to points with the same phase on the deformed fringes and grating, the transverse aberration of all tested points can be calculated, while that of the relevant ideal mirror can be worked out by geometry algorithms. Then the residual transverse aberration can be taken and thus the gradient of shape deviation can be determined. Tested mirror can be reconstructed after restoring shape deviations by integral processing. In experiment, the computer-generated fringe will bring a no-error phase shift and control the angle of two gratings to be 90°. A marked point is used to guide the phase unwrapping procedure. Computer simulations and preliminary experiment validate the feasibility of this method.

**Key words** optical measurement; three-dimensional shape measurement; Ronchi test; aspheric mirror; four-step phase-shifting

**OCIS codes** 220.4840; 220.1250; 120.2650

## 1 引言

相对于球面镜而言,大口径非球面镜在消色差、提高相对口径、扩大视场角和减少系统光学元件数

量方面具有优势,因而在空间光通信和天文观测等领域有着广泛的应用。然而,大口径非球面镜的制造要比球面镜困难得多,其中对于大口径非球面镜

收稿日期: 2010-11-08; 收到修改稿日期: 2010-12-15

基金项目: 国家自然科学基金(60838002)资助课题。

作者简介: 郭春风(1982—),女,博士研究生,主要从事光学三维传感技术方面的研究。E-mail: cfguocn@163.com

导师简介: 苏显渝(1944—),男,教授,博士生导师,主要从事光学三维传感与机器视觉技术等方面的研究。

E-mail: xysu @ scu.edu.cn

的高精度检测是一个重要课题<sup>[1,2]</sup>。目前,在大口径非球面加工的精磨阶段,主要的检测手段<sup>[3~5]</sup>是三坐标机测量仪和红外干涉仪。三坐标机测量仪是直接测量对被测面形进行接触式测量,所以费时,而且它限制了测量的口径;而红外干涉仪不仅制造费用很高,并且对使用环境的要求也较高,如应尽量避免机械振动和空气扰动等。而 V. Ronchi<sup>[6]</sup>最早于 1923 年提出的 Ronchi 检验法,当时仅作为定性的测量手段,后来一些光学工作者又在定量检测方面做了一些的工作<sup>[4,7~13]</sup>,使得 Ronchi 检测法具有结构简单、成本低和灵活性高等优点,它的灵敏度<sup>[14]</sup>可以通过改变光栅的频率来调节,误差大时可用线条较粗的光栅,误差小时改用较细一些的光栅,因此它既适用于精磨阶段的检测,也适用于初抛光阶段的检测。

本文基于 Ronchi 检验法和同步相位探测技术<sup>[8,9]</sup>,在点光源离轴情况下提出一种检测非球面反射镜的方法。该方法避免了同轴 Ronchi 检测法中叠栅条纹图对测量结果造成的误差,极大地提高了检测精度。在检测过程中,光栅图样是由计算机控制来产生的,因此光栅的周期和条纹方向可以灵活地改变,大大提高了检测的灵活性,并且可以实现精确的相移,使垂直和水平光栅严格达到  $90^\circ$ ,更提高了检测的精度。该方法通过被测和理想镜面对应点的横向像差之差获得被测点面形偏差的梯度信息,定量测量面形偏差,完成三维面形的重建。

## 2 检测原理

在离轴情况下,检测非球面的装置如图 1 所示。其中透射液晶显示屏分别显示垂直和水平两组正弦光栅,并与被测镜面光轴相垂直。检测时,光纤光源发出的光经光纤传输到被测镜面顶点的曲率中心一侧离轴附近,光从光纤端面出射,被待测镜面反射后经过正弦光栅,由电荷耦合器件(CCD)接收。检测

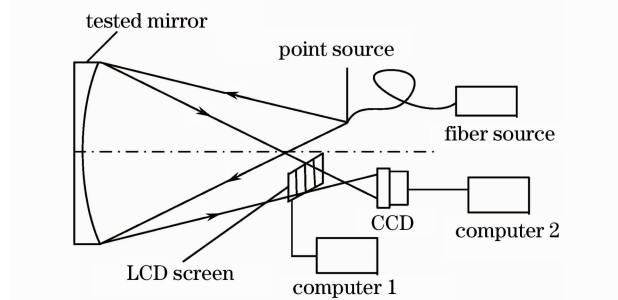


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup

原理如图 2 所示,以被测镜面顶点为坐标原点建立直角坐标系, $z$  轴垂直于被测镜面,点光源放置于镜面顶点曲率中心一侧离轴处,正弦光栅位于被测镜面和点光源散焦点之间,光经过正弦光栅被 CCD 接收,CCD 记录下由被测镜面反射产生的光栅的变形条纹图,而这些变形条纹的形状取决于被检反射镜的像差,因此可以比较实测条纹与理想条纹的变形来计算被测镜面的面形偏差。

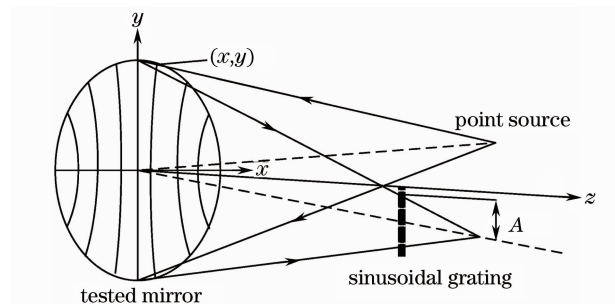


图 2 实验原理图

Fig. 2 Schematic of the measurement principle

为实现对被测镜面的精确测量,检测前需要标定测量系统。首先将 CCD 调焦在被测镜面表面,用相位标靶和傅里叶条纹分析技术标定 CCD 内参数<sup>[15]</sup>;然后,将棋盘格标定靶放在被测镜面的顶点处,从而确定 CCD 和标定靶之间的位置关系,即确定 CCD 坐标系与标定靶所在的世界坐标系之间的旋转和平移矩阵。由此可以获得在同一坐标系下,CCD 的投影映射矩阵以及 CCD 观察到待测镜面反射的变形条纹的空间点坐标。

完成检测系统的标定后,将透射 LCD 放入检测光路,显示栅线垂直于  $x$  轴的光栅,正弦光栅的光强分布为

$$I = a + b \cos(\varphi + \phi_0), \quad (1)$$

式中相位分布  $\varphi = 2\pi x/p$ ;  $a$  和  $b$  均为常数; $p$  为光栅周期; $\phi_0$  为光栅的初始相位。

实际上,Ronchi 检验法是直接测量横向像差  $A$  的,原理如图 2 所示。实验采用标准的四步相移算法以及相应的相位展开技术计算出相位分布  $\varphi_x$ ,利用插值找出变形条纹和光栅的同名相位点,即被测镜面  $x$  方向的横向像差  $A_x$ 。由于找同名相位点必须保证从变形条纹和光栅的同一位置开始进行相位展开,因此必须精确定相位位展开起始点。检测时,在计算机产生的光栅中预设标记点,在获取的图像中检测标记点的位置,以此标记点为起始点做相位展开,从而可以有效地解决条纹级次问题。如果将光栅线平行与  $x$  轴放置,按上述步骤可得被测镜面  $y$  方

向的横向像差  $A_y$ 。

由变形条纹的空间点坐标和对应的横向像差可以确定偏折光线,根据几何关系算出此偏折光线与理想镜面的交点以及交点所对应理想镜面的横向像差,那么被测与理想镜面对应的横向像差之差为  $\delta A = A_{\text{real}} - A_{\text{ideal}}$ ,进而计算出被测镜面和理想镜面的面形偏差。假设理想非球面的面形公式为  $f(r)$ ,  $r$  为非球面镜的入射高度,且  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ ,那么理想镜面的梯度为  $\tan \beta = df(r)/dr$ 。如果被测非球面表示为  $f(r) + \delta f(r)$ ,则其面形梯度为

$$\tan(\beta + \delta\beta) = \frac{d[f(r) + \delta f(r)]}{dr}. \quad (2)$$

对上式两边求偏微分,结合非球面沿法线方向的面形偏离表达式<sup>[7]</sup>  $g(r) = \delta f(r) \cos \beta$ ,则(2)式可简化为

$$\delta \tan \beta = \frac{dg(r)}{\cos \beta dr}. \quad (3)$$

点光源离轴情况下检测非球面,仅仅用面形的径向梯度无法准确地重建面形,因此理想镜面的梯度又可以表示为

$$\tan \beta = \sqrt{(\tan \beta_x)^2 + (\tan \beta_y)^2}, \quad (4)$$

式中  $\tan \beta_x, \tan \beta_y$  分别为理想镜面  $x, y$  方向的梯度。对(4)式两边偏微分有

$$\delta \tan \beta = \frac{\tan \beta_x}{\tan \beta \cos^2 \beta_x} \delta \beta_x + \frac{\tan \beta_y}{\tan \beta \cos^2 \beta_y} \delta \beta_y. \quad (5)$$

若  $\gamma_x, \gamma_y$  分别为理想反射光线  $x, y$  方向与光轴的夹角,  $\delta \gamma_x, \delta \gamma_y$  分别为理想反射光线与偏离光线在  $x, y$  方向的夹角,由一般的几何关系知  $\tan \gamma_x = (x - L_x - A_x)/(D - f)$ ,其中  $L_x$  为光栅中心的横坐标,对其两边偏微分有

$$\delta \gamma_x = -\cos^2 \gamma_x \frac{\delta A_x}{D - f}, \quad (6)$$

式中  $D$  为光栅到镜面之间的距离,且  $\delta \gamma_x = 2\delta \beta_x$ 。同理  $\delta \gamma_y = -\cos^2 \gamma_y \delta A_y/(D - f), \delta \gamma_y = 2\delta \beta_y$ 。

由(3),(5)以及(6)式可以推导出被测非球面镜的面形偏差  $g(r)$  的梯度为

$$\frac{dg(r)}{dr} = \frac{-(D-f)\cos \beta}{2\tan \beta} \times \left\{ \frac{\tan \beta_x \delta A_x}{\cos^2 \beta_x [(x - L_x - A_x)^2 + (D-f)^2]} + \frac{\tan \beta_y \delta A_y}{\cos^2 \beta_y [(y - L_y - A_y)^2 + (D-f)^2]} \right\}. \quad (7)$$

从(7)式可以推导出被测镜面  $x, y$  两个方向的面形偏差梯度,利用从梯度到高度的波前重建—区域波前重构法<sup>[16]</sup>,对两个方向的梯度进行积分来重

建面形偏差  $g(r)$ ,进而重建被测面形

$$F(r) = \frac{g(r)}{\cos \beta} + f(r). \quad (8)$$

区域波前重构法不但对高频噪声有较强的抑制作用,同时也可以处理复杂的连通区域和非等间距分布梯度数据的复杂情况,因此比较适用于基于条纹反射的高精度波面重建。

### 3 计算机模拟

为了验证本文所述方法的精确性,用计算机模拟检测一抛物面镜,假定被测镜面为理想抛物面,顶点曲率半径为 1000 mm,全孔径为 400 mm,如图 3 所示。在图 2 建立的空间直角坐标系中,点光源位于点(40,0,1000),正弦光栅位于点光源的散焦点和被测镜面之间,在  $z$  轴方向上距点光源 30 mm。考虑到在实际检测过程中,噪声的存在影响检测精度,模拟时在每幅变形图中加入了 5% 的随机噪声,重建面形和被测镜面的误差如图 4 所示,重建面形误差的峰谷(PV)值为  $6.7504 \times 10^{-5}$  mm,均方根(RMS)值为  $7.9161 \times 10^{-6}$  mm,从数值分析可以看出,本文方法可以较好地恢复焦距孔径比达 1.25 的大口径非球面面形,且该方法具有较好的抗噪性,在变形条纹图中添加 5% 的随机噪声后,检测误差仍保持在微米量级。

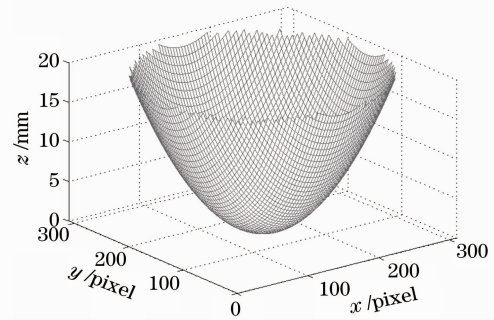


图 3 模拟抛物面面形

Fig. 3 Simulated parabolic surface

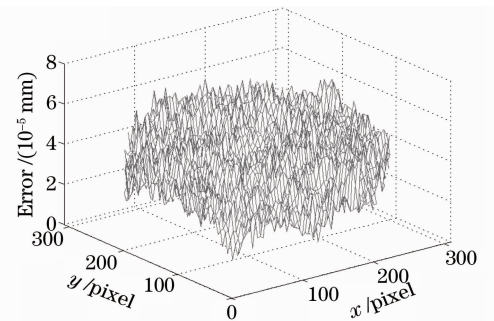


图 4 噪声下重建面形误差

Fig. 4 Error of the presented method with 5% noise

## 4 实验验证

本文方法既可用于精磨阶段的检验,也可用于初抛光阶段的检验,但要求被测镜面必须有反光,精磨阶段可以涂折射率液解决。对光源的要求比较严格,最好是点光源,检测时光源的相对口径必须大于等于被测非球面的相对口径,以实现被测非球面的全口径检测,光源的亮度需要根据点光源距离被测镜面的远近来调节。实验中,点光源为单模光纤光源,光纤的芯径为 0.01 mm,数值孔径为 0.37,光源亮度由北京大恒光电公司生产的直流调压光纤光源控制,亮度 0%~100%连续可调,其中光纤入口处的照度可以达到 500000 lux,实验中光源亮度调在

15%左右。

实验中所测镜面有很好的反射率,曲率半径  $R=1048.75$  mm,全口径为 300 mm;在图 2 建立的空间直角坐标系中,点光源位于点  $(47, 0, R)$ ;透射 LCD 显示屏分别显示周期为 64 pixel 的垂直和水平正弦条纹,像素点间距为 0.0179 mm,在  $z$  轴方向上显示屏距点光源 30 mm。图 5 为 CCD 采集到的光栅变形条纹图,根据检测原理可以得到被测镜面与理想镜面的横向像差之差  $\delta A$ ,从而重建出如图 6 所示的被测面形。为了检验测量结果,利用三坐标机测量被测镜面,结果如图 7 所示。

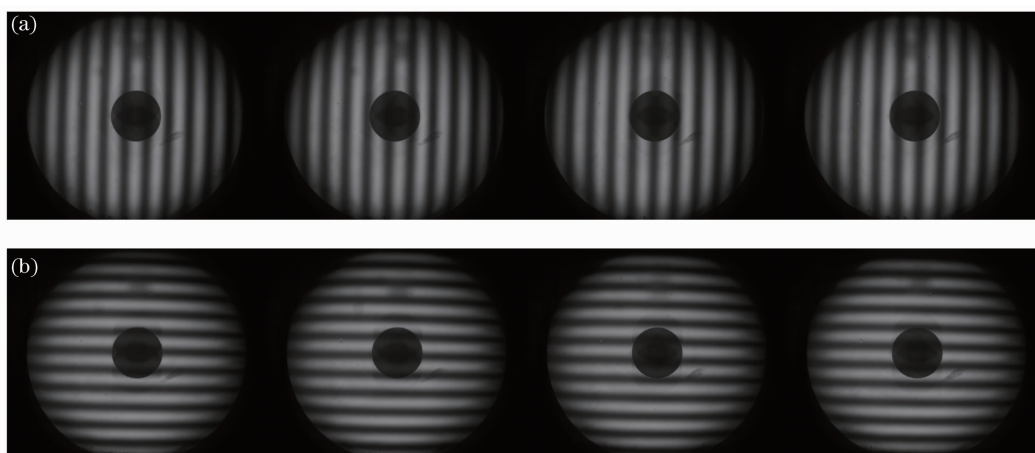


图 5 变形条纹图。(a)垂直光栅的四步相移变形条纹,(b)水平光栅的四步相移变形条纹

Fig. 5 Deformed fringe pattern. (a) four-step phase-shifting patterns of vertical gratings, (b) four-step phase-shifting patterns of horizontal gratings

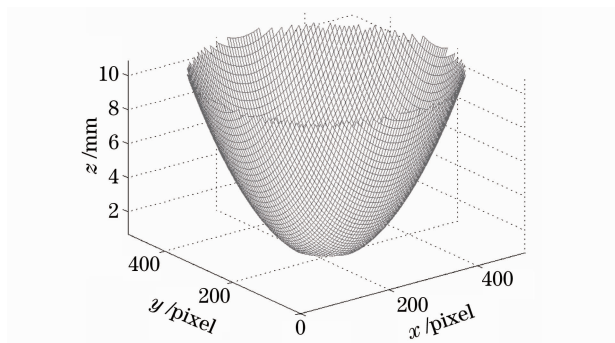


图 6 本文方法重建面形

Fig. 6 Reconstructed surface using the presented method

图 8 给出了本文方法重建的被测面形和三坐标机测量面形结果的比较,图中误差为两种测量结果之差与被测面形最大高度的比值,其 PV 值为 0.0027, RMS 值为  $5.4067 \times 10^{-4}$ ,而且三坐标机的测量精度在微米量级,因此采用本文方法可以较好地检测被测镜面面形。

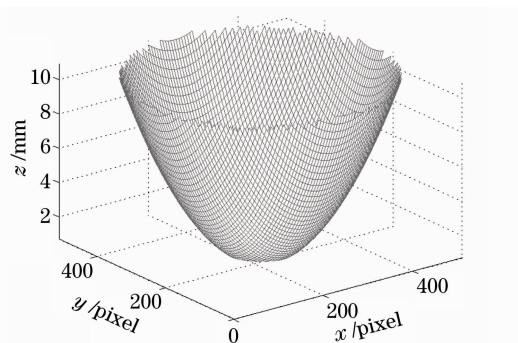


图 7 三坐标机测量面形

Fig. 7 Measurement results using the three-coordinate machine

检测过程中,透射液晶显示屏需要保持与被测镜面的光轴垂直,调整较为困难,而且被测镜面顶点、光轴和显示屏的位置测量误差,以及 CCD 的标定误差等,都会给最后的测量结果带来影响。在后续的工作中还需进一步讨论提高标定和测量精度的方法。



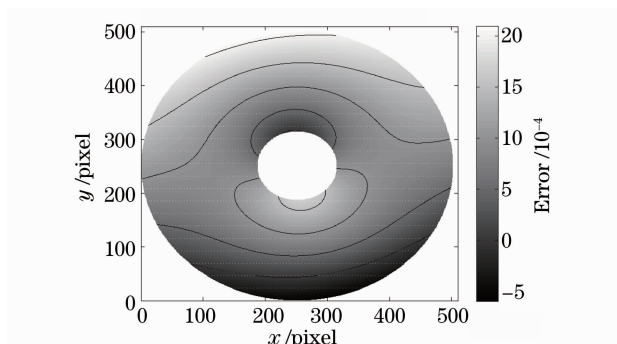


图8 本文方法和三坐标机测量结果的相对高度误差  
Fig. 8 Relative height error of the measurement results using the presented method and three-coordinate machine

## 5 结 论

基于 Ronchi 检验法和同步相位探测技术,在点光源离轴情况下提出了一种检测非球面反射镜的方法,采用计算机模拟和初步实验验证了这一方法的可行性。离轴 Ronchi 检测法避免了同轴检测方法中叠栅条纹图对测量结果产生的误差,极大地提高了检测精度。用透射 LCD 生成的正弦光栅代替普通光栅,实现了精确的相移,提高了检测的灵活性,避免了因转动角度使垂直和水平光栅不能严格达到  $90^\circ$  引起的误差,更提高了检测的精度。本文还在计算机产生的光栅中预设标记点,在获取的图像中检测标记点的位置,以此标记点为起始点做相位展开,从而有效地解决了条纹级次问题。该方法具有较好的抗噪声性能,在存在较大噪声的情况下,计算机模拟仍能得到很好的结果。

在实际检测过程中存在一些系统误差,面形中心、光轴、光源和光栅的定位误差,以及 CCD 标定误差等,有关误差校准的问题将在后续文章中讨论。虽然 Ronchi 检验法的精度无法与最终的干涉测量方法相比较,但在大镜的加工阶段,例如精磨阶段,仍然可以作为一种简单方便的定量检测手段。

## 参 考 文 献

- Pan Junhua. The Design, Manufacture and Test of The Aspherical Optical Surfaces[M]. Beijing: Science press, 2004. 10~89  
潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 北京: 科学出版社, 2004. 10~89
- Pan Junhua. Talk about the guidance thought of the optical testing[J]. *Optical and Opto-Electronic Technology*, 2004, **2**(6): 1~3  
潘君骅. 谈谈光学检测的指导思想[J]. 光学与光电技术, 2004, **2**(6): 1~3
- Tang Yan, Su Xianyu, Liu Yuankun *et al.*. Three-dimensional shape measurement of aspheric mirror based on fringe reflection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 965~969  
唐燕, 苏显渝, 刘元坤等. 基于条纹反射的非球面镜三维面形测量[J]. 光学学报, 2009, **29**(4): 965~969
- Lei Baiping, Wu Fan, Zhou Chenbo. Application of ronchi grating to the quantitative measurement of large-aperture aspheric surfaces[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2441~2446  
雷柏平, 伍凡, 周晨波. 龙基光栅在大口径非球面定量测量中的应用[J]. 光学学报, 2009, **29**(9): 2441~2446
- D. Malacara. Optical Shop Testing[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2007. 317~360
- V. Ronchi. Due nuovi metodi per lo studio delle superficie ede sistemiotici[J]. *Ann. Sc. Norm. Super Pisa*, 1923, **26**(1): 69~71
- D. Malacara. Geometrical Ronchi test of aspherical mirrors[J]. *Appl. Opt.*, 1965, **4**(11): 1371~1374
- T. Yatagai. Fringe scanning Ronchi test for aspherical surfaces[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(20): 3676~3679
- K. Omura, T. Yatagai. Phase measuring Ronchi test[J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(3): 523~528
- H. Lee, Seung-Woo Kim. Precision profile measurement of aspheric surfaces by improved Ronchi test[J]. *Opt. Eng.*, 1998, **38**(6): 1041~1047
- J. Arasa, S. Royo, N. Tomas. Simple method for improving the sampling in profile measurements by use of the Ronchi test[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(25): 4529~4534
- Wu Fan, Chen Yanming. The surface shape of large optical mirror testing by using knife-edge Ronchi[J]. *Opt. Engineering*, 1988, **15**(1): 27~33  
伍凡, 陈燕明. 用刀口-郎奇光栅法检验大型光学镜面面形[J]. 光电工程, 1988, **15**(1): 27~33
- Baiping Lei, Fan Wu, Chenbo Zhou. Quantitative measurement of  $\phi 630$  mm F/1.34 parabolic surfaces with Ronchi grating test method[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(7): 590~592
- A. Cornejo, D. Malacara. Ronchi test of aspherical surfaces, analysis, and accuracy [J]. *Appl. Opt.*, 1970, **9**(8): 1897~1901
- Liu Yuankun, Su Xianyu. A new camera calibration technique using FTP method [J]. *J. Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2007, **39**(6): 149~153  
刘元坤, 苏显渝. 基于傅里叶条纹分析的摄像机标定[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2007, **39**(6): 149~153
- Jing Hailong, Su Xianyu, Liu Yuankun *et al.*. Specular surface measurement based on fringe reflection and analysis of 3D shape reconstruction technique[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(10): 37~42  
荆海龙, 苏显渝, 刘元坤等. 基于条纹反射的镜面测量及三维重建算法分析[J]. 光电工程, 2008, **35**(10): 37~42