

# 大口径碳化硅反射镜面形子孔径拼接干涉检测

王孝坤

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室,吉林 长春 130033)

**摘要** 为了突破大口径反射镜面形检测的瓶颈,提出了子孔径拼接干涉检验方法。分析研究了子孔径拼接的基本原理与实现流程。基于三角剖分算法、最小二乘拟合和齐次坐标变换等建立了综合优化子孔径拼接数学模型。结合工程实际,规划7个子孔径完成了口径为800 mm的大口径碳化硅反射镜的拼接测量,获得了全口径面形分布。利用基准靶标并基于迭代算法实现了镜面物理坐标与拼接像素坐标之间的转换,从而为大口径反射镜后续数控精确加工提供了依据。

**关键词** 光学检测;大口径反射镜;碳化硅;子孔径拼接干涉术

**中图分类号** O439; O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.051202

## Testing Large SiC Mirror by Subaperture Stitching Interferometry

Wang Xiaokun

(Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

**Abstract** In order to overcome the difficulty of testing the surface shape of large mirror, the subaperture stitching interferometry (SSI) is introduced. The basic principle and flow chart of SSI are analyzed, the synthetical optimization stitching model and effective stitching algorithm are established based on triangulation algorithm, least-squares fitting and homogeneous coordinates transformation etc. With engineering examples, a large sic mirror with the aperture of 800 mm is tested by SSI with 7 subapertures. The coordinate transformation between digital controlled fine processing the mirror surface and pixel coordinate is fulfilled by bench mark and iterative algorithm, so it provide the basis for the subsequent the physical coordinate of the large mirror.

**Key words** optical testing; large mirror; SiC; subaperture stitching interferometry

**OCIS codes** 120.4610;120.2880;120.6650

## 1 引言

随着空间光学技术的不断发展,大口径反射镜正越来越多地用于各种光学系统中。为了保证空间反射镜在应用期间的稳定性和可靠性,要求反射镜的材料具有密度低、比刚度高、热膨胀系数小、导热性能良好以及抗辐照能力强等特性<sup>[1~3]</sup>。目前大口径反射镜镜体材料主要有 ULE、Zerodur、Be 和 SiC 等。与其他传统材料相比,SiC 的比刚度和热稳定性都相对较高,是一种非常理想的空天材料<sup>[4]</sup>。

大口径碳化硅反射镜的加工过程主要包括铣磨、研磨和抛光三个阶段。对于铣磨和研磨过程的反射镜可以利用三坐标测量仪或者轮廓仪对其面形进行接触式测量,通过数据分析可以获得光学面形的分布信息,从而为其进一步加工提供依据和保障<sup>[5]</sup>。对于反射镜抛光和最终阶段的面形测量,接触式测量将不再适用,因为其测量精度一般只能达到 0.2  $\mu\text{m}$ [均方根(RMS)值],而且在该阶段利用接触式测量将会给镜面带来一定的划痕。

由于干涉检验具有高分辨、高精度、高灵敏度、重复性好等优点,因此该技术已成为大口径反射镜抛光和

**收稿日期**: 2012-12-24; **收到修改稿日期**: 2013-01-29; **网络出版日期**: 2013-04-08

**基金项目**: 国家 863 计划(O8663NJ090)、国家 973 计划(2011CB0132005)和国家自然科学基金重点项目(61036015)资助课题。

**作者简介**: 王孝坤(1980—),男,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事光学超精加工和检测技术等方面的研究。

E-mail: jimwxk@sohu.com

最终阶段面形检测最为常用的方法<sup>[6]</sup>。以往一般利用瑞奇-康芒法实现对大口径平面反射镜的干涉检测,该方法的瑞奇角产生检测图像压缩,使得被测平面的面形误差与球面本身的像散混合在一起,影响检测结果的准确性;同时大口径反射镜在检测系统的光瞳面上发生变形,使镜面面形误差与系统出瞳光程差之间的对应关系变得复杂,随瑞奇角的不同而不同,导致检测结果的数据处理变得十分复杂<sup>[7~9]</sup>。此外,瑞奇-康芒法需要大口径的辅助球面镜,辅助球面镜的口径一般为待测大口径反射镜镜面尺寸的 1.2~1.3 倍,大口径、高精度的球面反射镜的制造相当困难,因此,大口径平面反射镜的瑞奇-康芒法检测很难实现。

本文利用子孔径拼接干涉(SSI)技术,拓宽了现有干涉仪的横向和纵向的测量范围,该方法利用小口径干涉仪逐次对大口径反射镜的各区域进行相位测量,经过数据分析和拼接计算可以获得大口径反射镜全口径的面形信息<sup>[10~12]</sup>。

## 2 拼接原理和流程

图 1 是利用子孔径拼接干涉检测大口径反射镜方法的流程图。其具体的步骤如下。

1) 规划子孔径。根据待测大口径反射镜的口径和干涉仪口径大小,划分子孔径区域并计算子孔径的大小。为了求解拼接系数,各子孔径应有一定的重叠区域,为了保证求解精度,重叠区域面积一般大于子孔径面积的  $1/4$ <sup>[13]</sup>。

2) 确定基准靶标位置。为了确定子孔径间的相互位置关系,并实现全口径像素坐标和镜面物理坐标之间的转换,在测试过程中将在镜面上贴置基准靶标,它是中心带十字叉线的圆心粘贴,根据子孔径规划,可将基准靶标贴置在重叠区域。

3) 子孔径相位数据的测量。通过调整机构精确调整待测大口径反射镜,使其各子孔径区域对准干涉仪,从而可以测定各区域的相位分布。

4) 各子孔径相位数据的处理。在测量每个子孔径面形的过程中,由于受测试环境、镜面粗糙度不均匀和测试仪器精度等因素的影响,使得子孔径数据必然存在缺失,将采用三角剖分算法求解和填补子孔径相位数据。

对于子孔径  $i$  的测量数据进行 Delaunay 三角剖分,即利用三点定义一个平面,平面方程为  $ax + by + z + c = 0$ ,利用下式求解出系数  $a, b, c$ :

$$\begin{pmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -z_1 \\ -z_2 \\ -z_3 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

得到这三个点所确定的平面方程  $w' = -ax - by - c$ ,将点  $(x, y)$  的坐标代入到该平面方程中,即可得到对于第  $i$  个子孔径,该插值点的面形值  $w'$ 。对于不在 Delaunay 三角形内部的点,采用最接近点插值处理,即该点的面形值  $w$  值取最接近点的  $w$  值。

通过 Delaunay 三角剖分与最接近点插值的方式得到每个子孔径内插值点的面形值,即得到了各自孔径重叠区域内数据点的相位值和各子孔径完整的相位数据分布  $w_i$ 。

5) 全口径综合优化拼接。为了降低误差传递和累积,精确地获得全口径面形误差分布,本文将采用误差均化的全局优化拼接算法。

当拼接区域大于两个时,假设共有  $M$  个子孔径拼接,可以先选定其中一个任意子孔径作为基准,为了便于定位和测量,一般选择大口径反射镜中心区域的子孔径作为参考标准,其他子孔径像素坐标分布与基准子

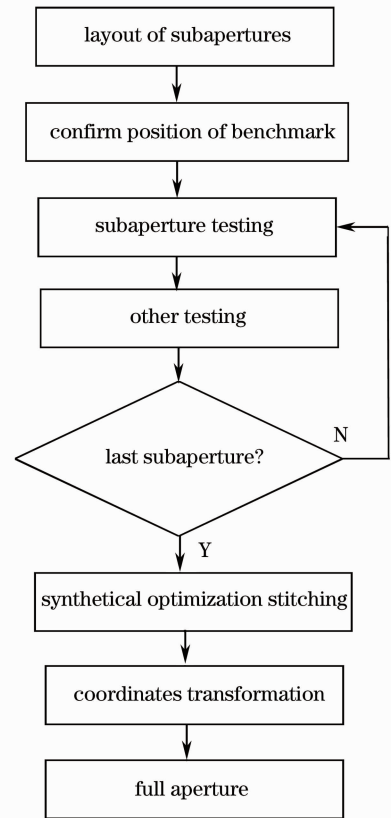


图 1 子孔径拼接干涉算法流程图  
Fig. 1 Flow chart of SSI algorithm

孔径像素坐标之间的关系可以通过基准靶标位置确定,从而可以获得统一像素坐标系下各子孔径的面形分布。大口径平面反射镜各子孔径间位置的相对失调量仅带来相对平移和倾斜。假设基准子孔径的相位分布为  $w_0$ , 则其他子孔径相位分布与基准子孔径相位分布的关系可以表述为

$$w_0 = w_1 + a_{11} + a_{21}x_1 + a_{31}y_1 = w_2 + a_{12} + a_{22}x_2 + a_{32}y_2 = \cdots = w_{M-1} + a_{1M-1} + a_{2M-1}x_{M-1} + a_{3M-1}y_{M-1}, \quad (2)$$

式中  $w_1, w_2, \dots, w_{M-1}$  是其他子孔径的相位分布,  $a_{1i}, a_{2i}$  和  $a_{3i}$  分别是其他子孔径相对基准子孔径沿  $x$  方向的倾斜系数、沿  $y$  方向的倾斜系数和相对平移系数。

利用最小二乘法,使得所有重叠区域相位差的平方和值为最小,可得

$$S = \sum_{j_1 \neq 0}^{N_1} \sum_{i_1 \in W_0, W_{j_1}}^n \{W_0(x_{1i_1}, y_{1i_1}) - [W_{j_1}(x_{j_1i_1}, y_{j_1i_1}) + a_{1j_1}x_{j_1i_1} + a_{2j_1}x_{j_1i_1} + a_{3j_1}y_{j_1i_1}]\}^2 + \sum_{j_2 \cap j_3 \neq 0}^{N_2} \sum_{i_2 \in W_{j_2}, W_{j_3}}^n \{W_{j_2}(x_{j_2i_2}, y_{j_2i_2}) + a_{1j_2}x_{j_2i_2} + a_{2j_2}x_{j_2i_2} + a_{3j_2}y_{j_2i_2} - [W_{j_3}(x_{j_3i_2}, y_{j_3i_2}) + a_{1j_3}x_{j_3i_2} + a_{2j_3}x_{j_3i_2} + a_{3j_3}y_{j_3i_2}]\}^2 = \min, \quad (3)$$

式中  $N_1$  是其他子孔径与基准子孔径的重叠区域数,  $N_2$  是其他子孔径间的重叠区域数,  $n$  是重叠区域内的采样点数。

利用最小二乘拟合,对各个系数分别求偏导并令其值为零可得

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial a_{1i}} = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial a_{2i}} = 0, \\ \frac{\partial S}{\partial a_{3i}} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中  $1 \leq i \leq M-1$ 。利用(4)式就可以得到各子孔径相对基准子孔径的最佳拼接系数,从而可以求解得到全口径像素坐标系下的面形分布。

以上利用所有重叠区域的数据点进行所有拼接因子的求解,是一种全局优化的拼接模式,可以很好地降低误差累积。

6) 加工坐标统一。拼接求解后的全口径面形分布实际是像素拼接分布,为了后续加工,必须求解得到镜面物理坐标下的全口径面形分布。镜体干涉测量完毕后,将利用三坐标测量仪的 ViScan 光学探头精确测定基准靶标各自中心十字叉点的物理坐标。通过全口径像素拼接,各基准靶标的像素坐标是确定的,利用齐次坐标变换关系和迭代算法可以求解得到全口径镜面物理坐标与像素坐标之间的关系。具体过程如下。

设定全局像素坐标下三个基准靶标各自中心十字叉点的坐标分别为  $w_{11}(x_{11}, y_{11}, z_{11}), w_{12}(x_{12}, y_{12}, z_{12}), w_{13}(x_{13}, y_{13}, z_{13})$ , 利用三坐标测量仪的 ViScan 光学探头测定对应三点的物理坐标分别为  $w_{21}(x_{21}, y_{21}, z_{21}), w_{22}(x_{22}, y_{22}, z_{22}), w_{23}(x_{23}, y_{23}, z_{23})$ 。

像素坐标与物理坐标两个坐标系之间存在  $x$  方向和  $y$  方向的平移以及绕  $z$  方向的转动。假定两个坐标系在  $x$  方向、 $y$  方向上的相对平移量分别为  $d_x, d_y$ , 绕  $z$  轴的转动角度量为  $\theta$ , 则根据齐次坐标变换理论,三个靶标中心点位置坐标有如下关系:

$$\begin{cases} (x_{11}, y_{11}, 1) = (x_{21}, y_{21}, 1) \cdot \mathbf{V} \\ (x_{12}, y_{12}, 1) = (x_{22}, y_{22}, 1) \cdot \mathbf{V}, \\ (x_{13}, y_{13}, 1) = (x_{23}, y_{23}, 1) \cdot \mathbf{V} \end{cases} \quad (5)$$

式中  $\mathbf{V}$  为两个坐标系之间的变换矩阵。推导可得

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ d_x & d_y & 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

通过(5),(6)式,利用迭代算法即可得到两个坐标系在  $x$  方向、 $y$  方向上的平移量  $d_x, d_y$  和绕  $z$  轴的转

动量  $\theta$ , 从而可以获得镜面物理坐标系下的全口径面形分布。

### 3 拼接实验

为了验证拼接模型和算法的可行性, 结合工程实际, 利用口径为 600 mm 的 Zygo 干涉仪对一口径为 800 mm 的大口径碳化硅反射镜进行了子孔径的拼接检测实验, 检测原理图如图 2 所示, 拼接检测设备如图 3 所示。待测大口径反射镜安装在四维精密调整机构上, 可以精确调整其两个方向上的平动以及俯仰和扭摆, 可以微调大口径干涉仪标准镜的俯仰和扭摆以现实干涉仪的自对准, 所有测试仪器和设备都安放在隔振气浮平台上。经规划计算仅需 7 个子孔径就可覆盖全口径测量, 子孔径分布如图 4 所示。首先, 调整待测大口径反射镜与干涉仪的相对位置, 使干涉仪对准中心基准子孔径, 通过干涉测量, 可以获得其相位分布如图 5 所示。然后通过精确控制调整机构, 使干涉仪对准其他子孔径区域, 通过干涉测量获得其他子孔径的相位分布如图 6 所示。

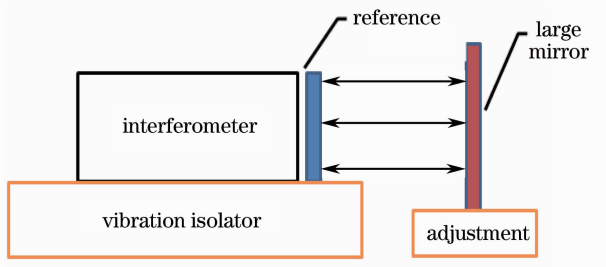


图 2 子孔径拼接检测大口径反射镜原理图

Fig. 2 Sketch of setup for testing large mirror by SSI

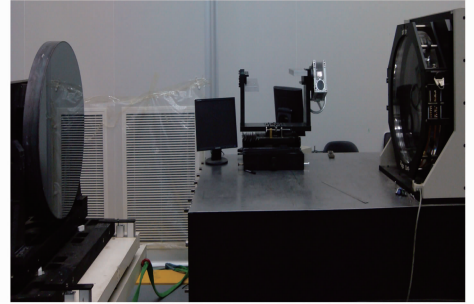


图 3 大口径反射镜子孔径拼接检测设备实物图

Fig. 3 Setup photo for testing large mirror by SSI

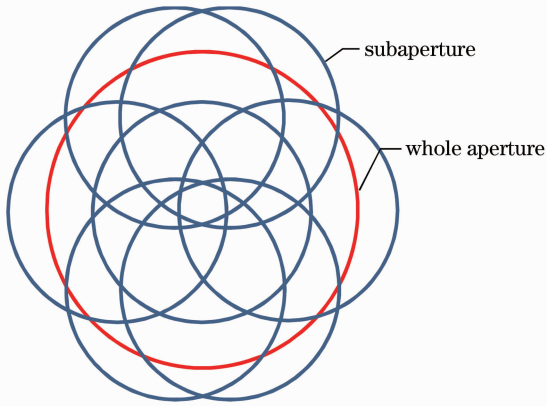


图 4 子孔径分布图

Fig. 4 Distribution of subapertures

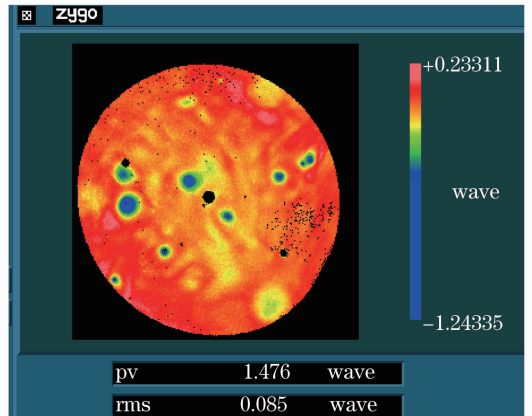


图 5 基准子孔径相位分布图

Fig. 5 Phase map of the fiducial subaperture

通过综合优化拼接计算获得像素坐标下全口径面形分布图如图 7 所示, 拼接结果光滑连续, 无明显拼痕, 其面形峰谷(PV)值和 RMS 值分别为  $1.497\lambda$  和  $0.090\lambda$  ( $\lambda=632.8\text{ nm}$ )。为方便后续加工, 通过基准靶标的像素坐标和镜面坐标求解得到两个坐标系之间的相对平移和旋转分别为  $-624.6250\text{ mm}$ ,  $-613.0674\text{ mm}$  和  $61.6388^\circ$ , 得到物理坐标系下的镜面有效口径面形分布如图 8 所示, 其面形 PV 值和 RMS 值分别为  $1.491\lambda$  和  $0.086\lambda$  (有效口径比全口径略小, 故面形值略小), 从而可以对大口径反射镜进行进一步精确研磨和抛光。

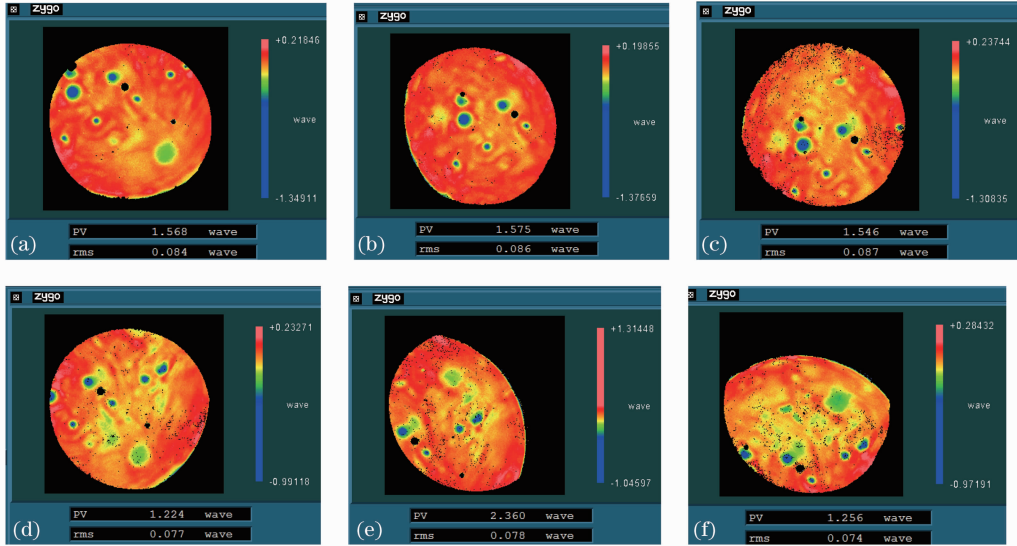


图 6 其他子孔径相位分布图

Fig. 6 Phase map of other subapertures

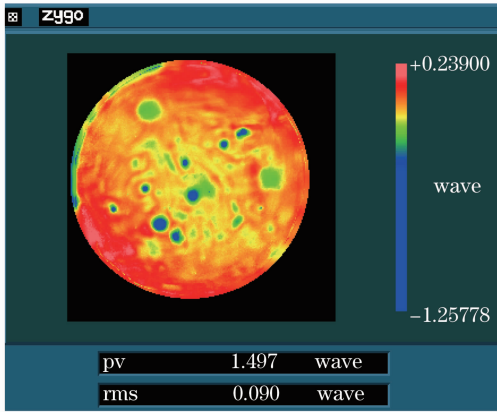


图 7 像素坐标全口径拼接面形分布图

Fig. 7 Map of full-aperture stitched surface shape with pixel coordinates

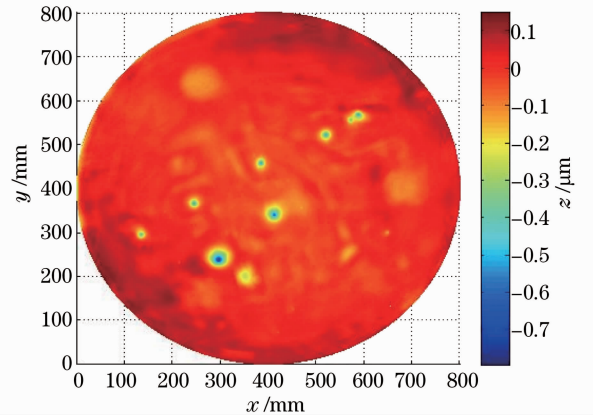


图 8 物理坐标系下有效口径面形分布图

Fig. 8 Surface-shape map of the effective aperture with physical coordinates

## 4 结 论

基于最小二乘拟合、三角剖分和齐次坐标变换建立了大口径反射镜综合优化子孔径拼接算法模型。在工程上实现了对口径为 800 mm 大口径的碳化硅反射镜的拼接测量,全口径拼接面形光滑连续。通过基准靶标并基于迭代算法实现了镜面坐标与像素坐标之间的转换,从而为镜面后续进一步加工提供依据和保障。由于利用靶标作为基准,该方法对调整机构要求不高,从而提供了一种简易、高效地测量大口径反射镜的方法。

## 参 考 文 献

- 1 J. Robichaud, J. Schwartz, D. Landry *et al.*. Recent advances in reaction bonded silicon carbide optics and optical systems [C]. *SPIE*, 2005, **5868**: 586802
- 2 S. Williams, P. Deny. Overview of the production of sintered SiC optics and optical sub-assemblies [C]. *SPIE*, 2005, **5868**: 586804
- 3 Zhang Ge. The Study on Fabrication Technique of Large-Scale Silicon Carbide Mirror Blank [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2008

- 张 舸. 大尺寸碳化硅质反射镜镜体制备技术研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2008
- 4 Michel Bougoin, Pierre Deny. The SiC technology is ready for the next generation of extremely large telescopes [C]. *SPIE*, 2004, **5494**: 9~18
- 5 David S. Anderson, James H. Burge. Swing-arm profilometry of aspherics [C]. *SPIE*, 1995, **2536**: 169~179
- 6 Raul R. Cordero, Ignacio Lira. Uncertainty analysis of displacements measured by phase-shifting moire interferometry [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **237**(1~3): 25~36
- 7 Tian Xiuyun, Wu Shibin, Wu Fan *et al.*. A data processing method in Ritchey-Common test [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(4): 23~31
- 田秀云, 吴时彬, 伍 凡 等. 瑞奇-康芒法中的一种数据处理方法[J]. 光电工程, 2004, **31**(4): 23~31
- 8 Kong Xiaohui, Fan Xuewu, Ma Zhen *et al.*. Computer added Ritchey-Common test for large flat mirror measurement [J]. *J. Applied Optics*, 2010, **31**(6): 984~988
- 孔小辉, 樊学武, 马 臻 等. 大口径平面镜的计算机辅助瑞奇-康芒检验[J]. 应用光学, 2010, **31**(6): 984~988
- 9 Yuan Lüjun, Xing Na. Study on the Ritchey-Common interferometry for large plano optics [J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(5): 737~744
- 袁吕军, 邢 娜. 大口径光学平面瑞奇-康芒检测技术的研究[J]. 光学技术, 2007, **33**(5): 737~744
- 10 Xiaokun Wang, Lihui Wang, Longhai Yin *et al.*. Measurement of large aspheric surfaces by annular subaperture stitching interferometry[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(11): 645~647
- 11 Paul Murphy, Jon Fleig, Greg Forbes. Subaperture stitching interferometry for testing mild aspheres [C]. *SPIE*, 2006, **6293**: 62930J
- 12 T. Marc, D. Paul, F. Greg. Sub-aperture approaches for asphere polishing and metrology [C]. *SPIE*, 2005, **5638**: 284~299
- 13 O. Masashi, O. Katsuyuki, T. Jumpei. Measurement of large plane surface shapes by connecting small-aperture interferograms [J]. *Opt. Engng.*, 1994, **33**(2): 608~613