

文章编号: 0253-2239(2010)07-2022-05

子孔径拼接干涉检测凸非球面的研究

王孝坤 郑立功 张学军

(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 在总结各种检测凸非球面方法优缺点的基础上, 提出了利用子孔径拼接干涉检测凸非球面的新方法。利用标准球面波前作为参考波面, 用干涉法逐次测量非球面各区域的相位分布, 去除参考波面偏差以及调整误差后, 通过子孔径拼接算法就可以重构凸非球面全口径的面形分布。研究和分析了该方法的基本原理和基础理论, 开发了综合优化和误差均化的子孔径拼接算法。设计和研制了子孔径拼接干涉检测装置, 并结合实例对口径为 140 mm 的碳化硅凸非球面进行了子孔径拼接测量, 得到了精确的全口径面形分布, 其面形分布的峰值(PV)和均方根(RMS)值偏差分别为 0.274λ 和 0.024λ ($\lambda=632.8$ nm), 且对该非球面进行零位补偿测量, 其全口径面形与拼接全口径面形是一致的, 面形分布的 PV 和 RMS 值的偏差仅为 0.064λ 和 0.002λ , 从而提供了又一种定量测试凸非球面的手段。

关键词 测量; 子孔径拼接干涉(SSI); 凸非球面; 零位补偿测试

中图分类号 TQ171.65; O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103007.2022

Testing Convex Aspheres by Subaperture Stitching Interferometry

Wang Xiaokun Zheng Ligong Zhang Xuejun

(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 On the basis of summing up conventional testing methods for convex aspheric surfaces, a novel method for testing convex aspheres by subaperture stitching interferometry (SSI) is proposed. A sphere mirror is used as the reference surface, and the phase distribution of each subaperture can be measured by the digital wavefront interferometer. The full surface map is obtained by stitching five subapertures which have been subtracted the theory wavefront error from phase datum and eliminated the translation errors. The basic principle and theory of SSI are researched, and the stitching software and prototype for testing of convex aspheres are devised and developed. A convex SiC asphere with the aperture of 140 mm is tested by this method. As results, the PV and RMS of the surface error after stitching are 0.274λ and 0.024λ ($\lambda=632.8$ nm), respectively. For the validation, the asphere is also tested by null compensation, the synthesized surface map is consistent to the entire surface map from the null test, and the difference of PV and RMS error between them is 0.064λ and 0.002λ , respectively. So it provides another quantitative measurement for testing convex aspheric surfaces.

Key words measurement; subaperture stitching interferometry (SSI); convex asphere; null compensation testing

1 引 言

在光学系统中使用非球面元件能够在不增加独立像差数的前提下, 增加自变量个数, 有利于改善像质。同时, 在同等约束条件下, 减少了光学元件数量, 从而减小了光学系统的尺寸和重量^[1~5]。因此

非球面元件正越来越多地被用于航空、航天、军事国防和高科技民用等领域。

在众多应用领域中, 凸非球面元件是较为常用的核心部件。但凸非球面面形的测量一直是光学检测中的难点, 以往一般采用无像差点法对其进行测

收稿日期: 2009-09-13; 收到修改稿日期: 2009-10-22

基金项目: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所创新三期基金资助课题。

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

E-mail: jimwxx@sohu.com

量,但这种方法只能检验二次曲面凸面,其优点是设计理论误差为零,缺点是需要大尺寸的辅助镜,且存在中心遮拦。目前,设计补偿透镜利用零位补偿法可以实现对凸非球面的测量,但是其补偿器的设计要比凹非球面补偿器的设计要复杂得多,有时补偿器本身可能还含有非球面元件,因此又给加工和装调带来了很多的困难。通过计算全息(CGH)补偿可以较好地实现对非球面的检测,但是针对某个非球面的测量,必须需要特制的 CGH^[6~8]。

利用补偿法能够高精度地检测大口径的非球面。但补偿元件本身就像一把标尺,其自身的精度直接决定着加工元件的精度。而光学补偿器的设计、加工与装调都比较复杂和困难,同时并不能单独测量补偿器的补偿效果,Hubble 望远镜就是因为其主镜补偿器的安装位置偏差了 1.3 mm 而导致主镜的边缘多研磨了 $2.2 \mu\text{m}$,产生了严重的球差,从而造成了巨大的损失^[9]。此外,由于检测凸非球面需要汇聚波前作为参考波面,这就需要所使用的干涉仪的口径和补偿透镜或 CGH 的口径大于待测凸非球面的口径,大口径的补偿透镜和 CGH 的制作和装调在目前仍然存在很多的困难。

而利用子孔径拼接技术可以很好地实现对凸非球面的检测。本文通过干涉仪分别测量非球面各区域的相位分布,经过子孔径拼接算法可以获得非球面全口径的面形信息。从而无需其它辅助光学元件就能够完成对凸非球面面形的检测,这不仅节省了时间,而且降低了成本。

2 基本原理

非球面的子孔径拼接干涉检测技术是一种将子孔径拼接技术与干涉计量技术相结合进行非球面面形检验的新方法。该技术利用干涉仪产生的标准球面波前,对大口径非球面各局部区域的相位分布进行逐次测量,去除非球面与参考波面的偏差和调整误差后,通过拼接算法获得非球面全口径的面形误差分布。

子孔径拼接检测凸非球面的实验装置示意图如图 1 所示,它由干涉仪、待测非球面以及调整结构等组成。待测非球面安置在六维精密转台上,可以精确调整非球面的俯仰、扭摆和旋转以及沿 X 方向,Y 方向和沿 Z 方向(光轴方向)的平动。

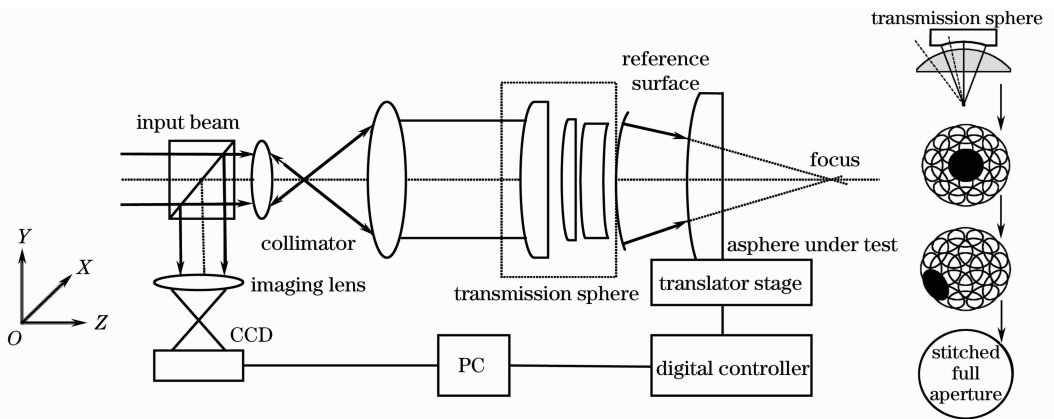


图 1 子孔径拼接检测凸非球面的装置和模型示意图

Fig. 1 Sketchmap of the setup and model for testing convex asphere by SSI

根据待测非球面的口径和顶点曲率半径选取合适的标准镜头并决定子孔径的大小及数目。调整干涉仪,使干涉仪出射的参考球面波前的曲率中心与被测非球面的顶点曲率中心重合。此时得到的干涉图中心部分的条纹较稀,干涉仪很容易分辨,记录下中心区域的相位信息。通过精确调整干涉仪和被检非球面的相对位置,选取非球面上的离轴圆形区域进行测量,干涉仪光轴与被检测离轴圆形区域最佳拟合球面的法线重合,球面波焦点与该区域最佳拟

合球面的球心重合。在获取各子孔径的测量结果后,将这些测量结果拼接并进行数据处理以获得整个非球面的面形误差分布。

子孔径拼接算法主要包括四个部分^[10~12]:子孔径划分和各区域最接近球面半径求解、各子孔径相位数据测定和处理、多个子孔径的综合优化拼接和测试精度分析。拼接算法流程如图 2 所示。

子孔径大小及划分有三个原则:1)所有拟检验的子孔径均在干涉仪量程范围内;2)相邻子孔径有

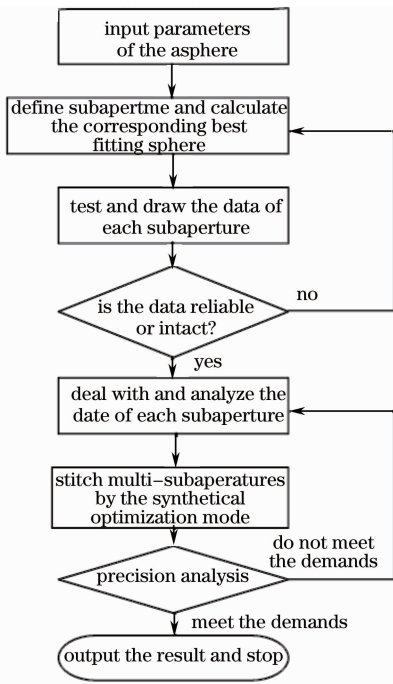


图2 子孔径拼接算法流程图

Fig. 2 Flow chart of SSI algorithm

一定的重叠区域;3)完成全口径检验所需的子孔径数量最少。

对于中心基准子孔径的最接近球面半径可以用其顶点曲率半径近似代替或者利用经典的三点法求解;对于轴外子孔径将采用迭带优化的方法求解其最接近球面半径。

各子孔径相位数据处理包括:标准球面波与非球面理论偏差的消除、投影畸变的标定和坐标变换等三个步骤^[12~14]。

通过校正相邻两个子孔径间的调整误差,多次利用两个子孔径的拼接原理就可以实现多个子孔径的拼接。但是这样往往会造成误差传递和累积,从而降低了整个孔径的检测精度。因此,本文将采用综合优化的拼接方式,使得所有重叠区域相位残差的平方和为最小,可以有效地扼制误差传递和累积^[10~12]。在完成以上处理后经过全口径拼接可以获得准确的非球面面形分布。

3 检测实验

为了验证拼接原理和数学模型的准确性,结合实例对一凸非球面 SiC 反射镜进行了拼接测量。待测非球面的通光口径为 $\Phi=140$ mm,顶点曲率半径 $R=1227.64928$ mm,二次曲面系数 $K=-1.812847$ 。经分析和计算选用口径为 150 mm 的干涉仪, F 数为 11 的标准镜,利用 5 个子孔径即可完成对其拼接测量,

子孔径分布如图 3 所示,其中阴影区域为非球面元件。

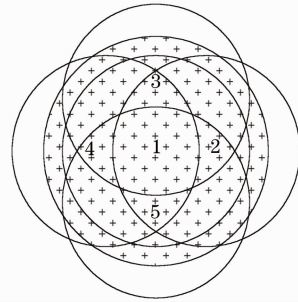


图3 子孔径分布图

Fig. 3 Distribution of subapertures

为了实现子孔径检验,除子孔径理论规划计算外,我们设计并研制了精密六维调整装置。该机构可以同时实现待测非球面在 X, Y, Z 和 α (扭摆), β (俯仰), γ (旋转) 方向的精密调整和定位,采用六轴联动技术对该检测调整装置进行控制。各轴行程及控制精度如下:

X 轴:行程 500 mm,定位精度优于 $5 \mu\text{m}$,重复精度优于 $2 \mu\text{m}$,直线度误差小于 $2 \mu\text{m}$;

Y 轴:行程 500 mm,定位精度优于 $5 \mu\text{m}$,重复精度优于 $2 \mu\text{m}$,直线度误差小于 $2 \mu\text{m}$;

Z 轴:行程 200 mm,定位精度优于 $5 \mu\text{m}$,重复精度优于 $1 \mu\text{m}$,直线度误差小于 $2 \mu\text{m}$;

α 轴:行程 $\pm 15^\circ$,定位精度优于 $10''$,重复精度优于 $3''$;

β 轴:行程 $\pm 45^\circ$,定位精度优于 $10''$,重复精度优于 $3''$;

γ 轴:行程 360° ,定位精度优于 $10''$,重复精度优于 $3''$ 。

六轴联动精密调整装置,可以满足子孔径拼接的技术要求,适用于凹、凸非球面和离轴非球面的检验,并且对干涉仪的调整机构没有特殊要求,可以实现按照理论规划的各种子孔径检验。设计并组建了一套子孔径拼接检测装置,它由 Zygo 数字干涉仪、待测非球面和精密调整机构等组成,所有组件都安装在防振气浮平台上。

调节好干涉仪,使干涉仪出射的参考球面波前的曲率中心与待测非球面的顶点曲率中心重合,干涉测量该区域的相位分布图和干涉图如图 4 所示。调整待测非球面,使非球面沿 X 轴横向移动 30 mm,计算可得该子孔径中心的切向角为 1.3995° ,因此再调整非球面扭摆 1.3995° ,从而可测定该子孔径的干涉图和相位分布如图 5(a) 所示。

通过依次旋转待测非球面(每次间隔 90°)，测定非球面其他 3 个子孔径的干涉图和相位分布如图 5(b)~5(d)所示。

从各子孔径相位数据中剔除非共路误差，并利用 Fuducial 标定投影畸变将各子孔径的电荷耦合器件(CCD)像素坐标统一到镜面坐标上，对重叠区域的数据进行分析和求解，求得各子孔径相对中心基准子孔径的调整误差，通过综合优化和误差均化的拼接算法求得拼接后归一化的全口径面形分布如

图 6 所示，其 PV 和 RMS 值分别为 0.274λ 和 0.024λ ($\lambda=632.8\text{ nm}$)。

为了验证该方法的准确性和可靠性。为该非球面专门设计并制作了光学补偿器，利用零位补偿法对该凸非球面进行了检测，测量结果如图 7 所示，其 PV 和 RMS 值分别为 0.210λ 和 0.022λ 。比较可得：这两种方法测量所得的面形分布是一致的，其 PV 和 RMS 值的偏差仅为 0.064λ 和 0.002λ 。

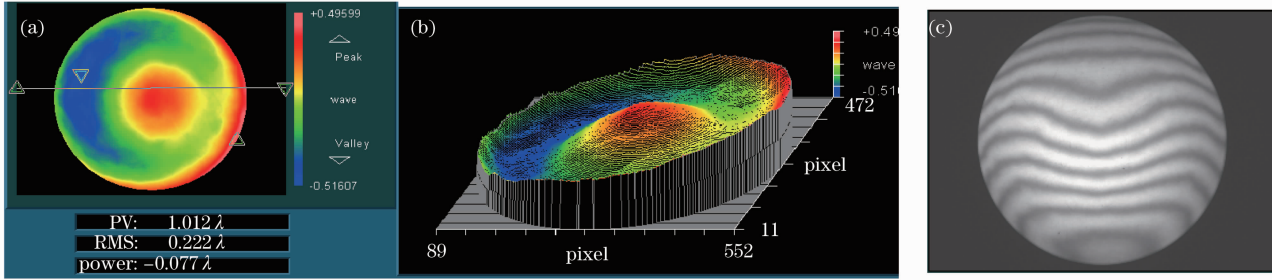


图 4 中心子孔径相位分布图和干涉图

Fig. 4 Phase map and interferogram of middle subaperture

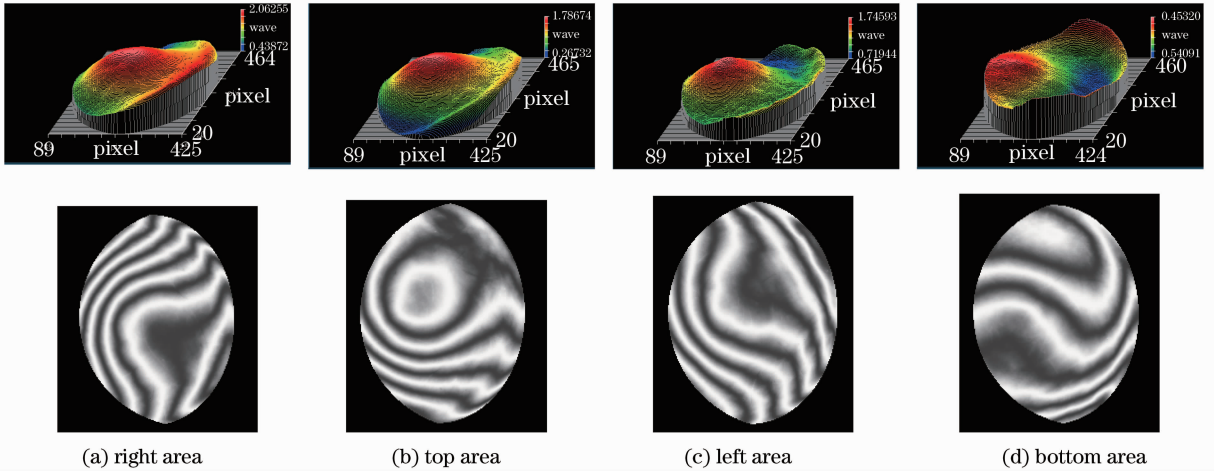


图 5 其他 4 个子孔径相位分布图和干涉图

Fig. 5 Phase map and interferogram of four other subapertures

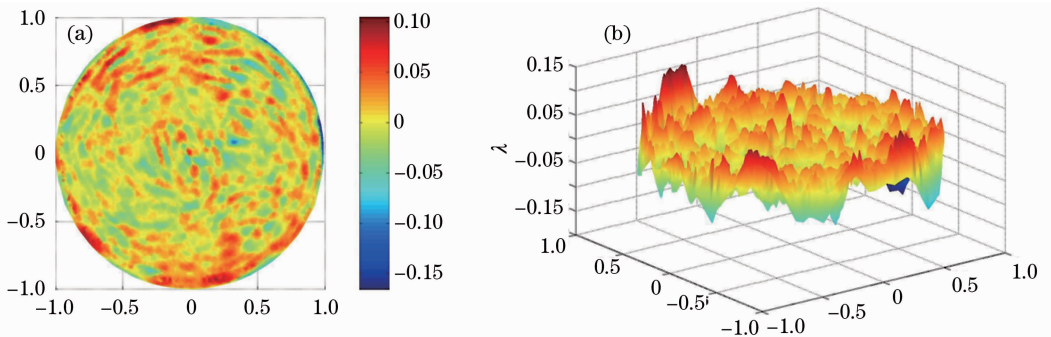


图 6 拼接后全口径面形分布图

Fig. 6 Normalized surface map of the whole aperture after stitching

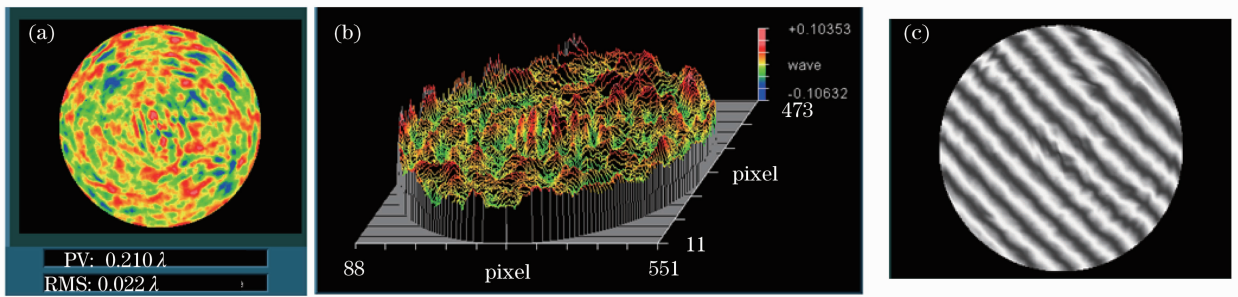


图 7 零位补偿测量面形分布图和干涉图

Fig. 7 Phase map and interferogram from null-compensation test

4 结 论

利用子孔径拼接法,可以拓宽干涉仪测试的横向和纵向的动态范围,无需其它辅助光学元件就能够实现对凸非球面的测量,这不仅提高了分辨率,降低了成本,而且缩短了工期、节省了时间。本文对该技术的基本原理进行了分析,建立了合理的拼接算法模型,设计和研制了一套子孔径拼接检测装置,并结合实例对一凸非球面进行了拼接检测,获得了准确的全口径面形分布。该方法不仅适用于凸非球面的检测,对于大口径的凹非球面以及离轴非球面仍然适用^[15,16]。但是子孔径拼接检测非球面技术的精度受很多因素的影响。如子孔径大小和数目、重叠区域大小、拼接模式、系统误差和随机误差等,这有待于进一步分析和研究。

参 考 文 献

- 1 D. Malacara. *Optical Shop Testing*[M]. New York: J. Wiley & Sons, 1992
- 2 Zhang Xuejun, Zhang Zhongyu, Li zhilai. Manufacturing and testing of 1-m class SiC aspheric mirror[C]. *SPIE*, 2007, **6721**: 672109
- 3 D. D. Walker, A. T. H. Beaucamp, R. G. Bingham *et al.*. The precessions process for efficient production of aspheric optics for large telescopes and their instrumentation[C]. *SPIE*, 2003, **4842**: 73~84
- 4 Fu Lianxiao, Wu Yonggang, Li Xinglong *et al.*. Manufacture and test of cassegrain system's primary mirror with large relative diameter and lightweight [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 764~767
付联效, 吴永刚, 李兴隆等. 大相对口径轻量化卡塞格林系统主镜的加工检验 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 764~767
- 5 Zhang Fengsheng. Numerical computation for propagation of Gaussian beam through aspheric system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 179~183
张凤生. 非球面系统中高斯光束传输的数值计算 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 179~183

- 6 Xie Yi, Chen Qiang, Wu Fan *et al.*. Concave aspheric 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
- 7 J. H. Burge, D. S. Anderson. Full-aperture interferometric test of convex secondary mirrors using holographic test plates [C]. *SPIE*, 1994, **2199**: 181~190
- 8 Qi Yuejing, Wang Ping, Xie Jinghui *et al.*. A novel method of measuring convex aspheric lens using hologram optical elements [C]. *SPIE*, 2005, **6024**: 60241F
- 9 <http://hubblesite.org/>
- 10 X. K. Wang, L. H. Wang, L. H. Yin *et al.*. Measurement of large aspheric surfaces byannular subaperture stitching interferometry[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(11): 645~647
- 11 Wang Xiaokun, Zhang Xuejun, Wang Lihui *et al.*. Mathematical model and simulation for testing aspheric surface by annular subaperture stitching interferometry [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(4): 527~532
王孝坤, 张学军, 王丽辉等. 环形子孔径拼接干涉检测非球面的数学模型和仿真研究 [J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(4): 527~532
- 12 Wang Xiaokun, Wang Lihui, Zhang Xuejun *et al.*. Testing asphere by subaperture stitching interferometric method [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(2): 192~198
王孝坤, 王丽辉, 张学军等. 子孔径拼接法检测非球面 [J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(2): 192~198
- 13 Li Ruigang, Zheng Ligong, Xue Donglin *et al.*. Calibration method for projection distortion in interferometric testing high order and off-axis aspheric surface with big aperture[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(8): 347~352
李锐刚, 郑立功, 薛栋林等. 大口径高次、离轴非球面干涉测量中投影畸变的标定方法 [J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(8): 347~352
- 14 Wang Xiaokun, Zhang Xuejun. Data processing and calibration for testing aspheric surfaces by annular subaperture stitching interferometry [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(1): 51~55
王孝坤, 张学军. 环形子孔径拼接检测非球面中的数据处理和标定 [J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(1): 51~55
- 15 X. K. Wang, L. G. Zheng, B. Z. Zhang *et al.*. Subaperture stitching interferometry for testing of a large hyperboloid [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(1): 88~93
- 16 Wang Xiaokun, Zheng Ligong, Zhang Binzhi *et al.*. Test of an off-axis asphere by subaperture stitching interferometry [C]. *SPIE*, 2009, **7283**: 72832J