

大口径批量化离轴非球面镜的检测光路设计

徐秋云^{1,2} 徐 晨^{1,2} 李 博^{1,2} 李新南^{1,2}

¹中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042

²中国科学院天文光学技术重点实验室, 江苏 南京 210042

摘要 为了检测极大口径望远镜非球面离轴子镜的面形精度,设计一种通用的干涉检测光路。综合利用透射式和衍射式补偿器的优点,设计消球差单透镜和计算全息片共同对非球面度进行补偿。对于大口径、批量化的离轴非球面镜,搭建一个检验光路,检测不同离轴量的子镜时只需更换计算全息片,最大程度节约成本。设计结果表明对于顶点曲率半径60 m、二次常数 $K=-1.000954$ 、母镜口径 $\Phi 30$ m、子镜口径 $\Phi 1.5$ m、离轴量分别为2.5、8、14.5 m的子镜,均可以在一种光路结构中实现高精度零位检测。

关键词 光学设计; 面形; 离轴子镜; 补偿器; 干涉仪

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1012005

Optical Testing Design for Plenty of Large Off-Axis Aspherical Mirrors

Xu Qiuyun^{1,2} Xu Chen^{1,2} Li Bo^{1,2} Li Xinnan^{1,2}

¹National Astronomical Observatories / Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology,
Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China

²Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical
Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China

Abstract In order to test optical figure of aspheric off-axis segments of extremely large telescope, we present a new optical testing method. Take advantages of transmission and diffraction nulls, the aspheric departure is accommodated by both aplanatic lens and computer generated holograms. For plenty of large off-axis aspherical mirrors, only one optical path needs to be built. Different segments will be measured by replacing computer generated hologram (CGH). Design results show that, for different off-axis magnitudes as 2.5 m, 8 m and 14.5 m of a primary mirror with 60 m vertex curvature radius, conic constant $K=-1.000954$, parent mirror diameter $\Phi 30$ m, segment diameter $\Phi 1.5$ m, all can achieve self-collimation null tests in one light path structure.

Key words optical design; figure; off-axis segment; compensator; interferometer

OCIS codes 120.3180; 120.4630; 120.4820; 220.1000; 220.3630

1 引 言

天文望远镜的设计正在经历一种新的模式转变。为了大幅增加望远镜主镜的有效口径,把主镜设计成由子镜阵列拼接而成以取代传统的单块镜片模式。所有子镜共同作用形成一个光学连续的表面。把非球面主镜分割成许多小的子镜,一方面使得极大望远镜的加工、检验和运输变为可能;另一方面,主镜拼接方案对于建造和使用望远镜的不同方面都带来了新的技术难题和挑战^[1-3]。对于光学加工来说,拼接方案提高了每一块子镜的检测要求,比如所有子镜的曲率半径需精确匹配。如果这一要求不能满足,子镜残留的局部离焦会大大降低望远镜的整体性能。

正在筹建中的美国三十米望远镜(TMT)^[4]和欧洲极大望远镜(E-ELT)^[5]均由对角径1.44 m的六边形子镜

收稿日期: 2015-04-16; 收到修改稿日期: 2015-05-15

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11373050)、江苏省光谱成像与智能感知实验室开放基金(3092014012200405)

作者简介: 徐秋云(1983—),女,博士后,主要从事大口径非球面检测方面的研究。E-mail: qyxu@niaot.ac.cn

导师简介: 李新南(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事大口径天文光学非球面应用方面的研究。

E-mail: xnli@niaot.ac.cn

拼接而成,它们的子镜数量分别为492块和798块。中国提出的CFGT望远镜主镜口径为30 m,由17种不同形式、1020块扇形子镜拼接而成^[6]。子镜具有以下特征:口径大、非旋转对称、非球面度大(尤其是外环子镜)、数量多、面形种类多。

20世纪70年代,计算全息(CGH)因其独特的波前变换能力,以及结构简便、装调简单等突出优点被引入到非球面干涉检测领域^[7]。光学检测中使用CGH的基本思想是用其替代或补充传统的光学补偿器。与透镜或反射镜相比,CGH更易于产生非球面波前并且不局限于圆对称。近年来中国科学院长春光学精密机械与物理研究所^[8-9]、南京理工大学^[10]、中国科学院光电技术研究所^[11]等单位开展了CGH检测光学非球面的研究,取得了一定的应用进展。

对于TMT和E-ELT离轴子镜的面形检测,美国亚利桑那大学光学中心提出自行搭建Fizeau型干涉光路检验方法,标准镜的凸参考球面与待检凹非球面相距数毫米,CGH用于补偿子镜相对参考球面的非球面偏差^[12]。对于大量的非球面子镜建立一个光路,检测不同光学参数的子镜时只需更换小口径的计算全息片。这种方法的主要优点是:1)测试波前和参考波前是准共光路结构,它们基本通过相同的光学元件和空气间隔,所以对振动和空气扰动的控制要求不高;2)两波前均通过标准镜,因此标准镜另外一个面的面形精度及材料折射率的非均匀性不会引起测量误差;3)标准镜和子镜间距不确定度是曲率半径的主要误差源,0.1 mm的间距变化仅造成子镜离焦1 nm[均方根(RMS)值]。但是他们采用压电陶瓷(PZT)驱动标准镜的移相方式。PZT是机电式装置,比较适用于中小口径的干涉仪。上述标准镜口径与待检镜面相同,重量达200 kg以上,目前国内尚未见对米级光学镜面实现PZT移相的报道。

2012~2014年,本课题组采用预应力环抛技术为TMT加工了两块口径 $\Phi 1.1$ m的实验镜^[13]。加工过程中使用二维位移传感器阵列(LVDT)检测装置,抛光精度峰谷(PV)值优于2 μm ,目前已通过TMT项目组验收。但是LVDT方法只能达到微米量级的测量精度,并且因其较低的采样率难以获得被测面形的高频信息,因此仅适用于细磨抛光阶段的面形检测。对于面形精修和最终镜面面形验收则需要研究更高精度的干涉检测方法。本文提出一种利用商用干涉仪的检测方案,把离轴子镜作为轴上自由曲面进行检测。设计消球差单透镜有效缩短检测光路并补偿大部分的像差,使用计算全息片补偿剩余的像差。相比于国外同类型研究,该方法可在最大程度上节约成本,并且光路调整相对简单,提高了可行性。

2 检测方案

TMT主镜参数如表1所示。最内环子镜的离轴量为2.5 m,最外环为14.5 m。表2给出三块离轴子镜的主要技术参数。

表1 TMT主镜参数

Table 1 Parameters of TMT primary mirror

Parameters	Values
Vertex curvature radius	60m
Conic constant	-1.000954
Parent primary diameter	$\Phi 30$ m
Segment diameter	$\Phi 1.5$ m
Segment numbers	492
Segment categories	82

表2 三块离轴子镜的参数

Table 2 Parameters of three segments

Parameters	Values		
Off-axis magnitude /m	2.5	8	14.5
$\frac{\text{Off-axis angle}}{2}/(^{\circ})$	2.3859	7.5946	13.5860
Vertex sag/mm	52.0833	533.3311	1752.059
Radius of the best fit sphere /mm	60056.8	60536	61733

图 1 是检测光路示意图,对于不同离轴量的子镜,需优化设计消球差单透镜到离轴子镜的距离并设计相应的计算全息片。

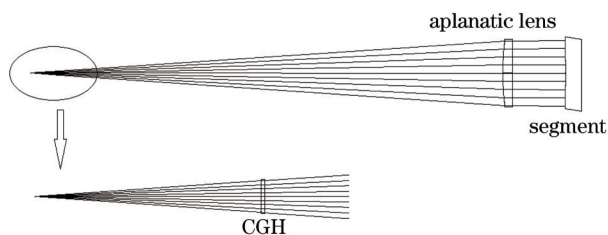


图 1 检测光路示意图

Fig.1 Schematic diagram of the optical test layout

2.1 消球差单透镜

设计对有限距离点(O, O')共轭的单透镜^[14],一个面为偶次非球面以消除球差(图 2)目的是把干涉仪出射的球面波($F/6.67$)变成焦比更慢的球面波($F/39.4$)。TMT子镜焦比是 $F/40$ 。偶次非球面的表达式为

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K)c^2 r^2}} + \alpha_2 r^4 + \alpha_3 r^6 + \alpha_4 r^8 + \dots \quad (1)$$

在球面的基础上叠加高次项,所以二次常数 $K=0$ 。偶次多项式的系数见表 3。

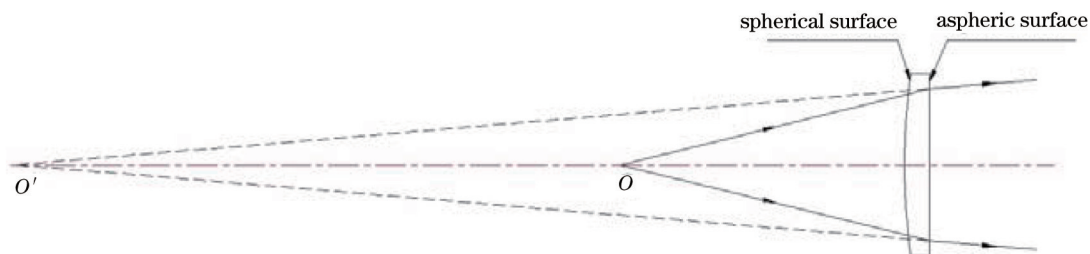


图 2 消球差单透镜成像示意图

Fig.2 Schematic diagram of the aplanatic lens imaging

表 3 偶次非球面的系数

Table 3 Coefficients of the even asphere

α_2	α_3	α_4
1.723×10^{-12}	4.357×10^{-21}	3.052×10^{-27}

加工过程中使用曲率半径 60 m 的标准球面镜对消球差单透镜进行定标,如图 3 所示。

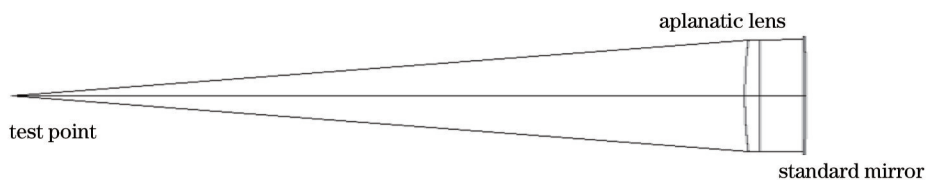


图 3 消球差单透镜定标光路

Fig.3 Optical calibration layout for the aplanatic lens

2.2 离轴子镜作为轴上自由曲面

把子镜顶点平移至干涉仪出射光束的光轴上,然后进行旋转,使入射到子镜顶点的光线沿该点法线方向。旋转的角度是离轴角的一半。这里需要特别注意的是必须绕子镜顶点旋转,而不是绕母镜顶点旋转。

为了实现绕子镜顶点旋转,首先计算顶点的矢高,以 8 m 离轴量子镜为例进行说明。子镜顶点的矢高为 533.3311 mm。由图 4(b)可以看出,入射到离轴镜顶点的光线沿原路返回,即光线的入射方向与法线重合。此时需要补偿的非球面度最小。为了便于显示,图 4(b)增大了子镜口径。

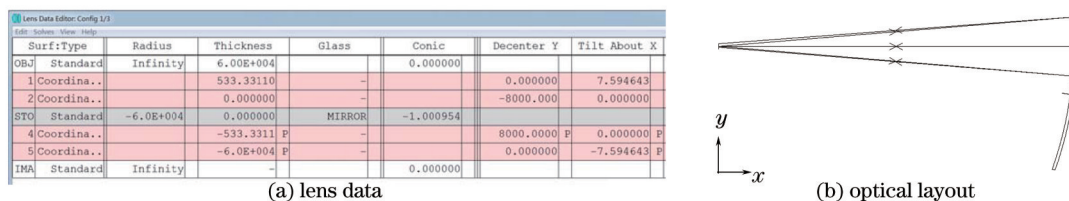


图 4 离轴子镜的最佳放置状态

Fig. 4 Best status of segment

2.3 补偿检测光路设计

下面以 8 m 离轴量子镜为例详述设计步骤。

- 1) 在 Zemax 中输入初始结构,CGH 的表面类型采用 Zernike Fringe Phase;
- 2) 以消球差单透镜到待检离轴子镜的距离为变量进行优化,为了使返回的光线会聚到检测点,在优化函数中使用操作数 CENX 和 CENY;
- 3) 把 Zernike 相位面的前 37 项设为变量进行优化;
- 4) 根据 Zernike 系数编程计算 CGH 的相位分布 $\varphi(x, y)$ (图 5),CGH 局部空间频率 (v_x, v_y) 为^[15]

$$v_x = \frac{m}{2\pi} \frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial x}, v_y = \frac{m}{2\pi} \frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial y}, \quad (2)$$

式中 m 是衍射级次。

5) 杂散光分析^[16]。除了工作衍射级次(1,1)以外,其他衍射级次的光均称为杂散光。把像面设置成通光孔径为 $\Phi 1$ mm 的光阑,用多重结构观察非工作衍射级次的光是否被遮挡住,主要分析的衍射级次是(-1,3)和(3,-1)。

由图 5(a)可以看出离轴镜最主要的像差是像散,另外有少量的彗差。虽然此时需要补偿的非球面度最小,对应 CGH 条纹最疏,但是非工作衍射级次的光能通过小孔光阑进入干涉仪,对测量结果造成干扰。改变待检镜面的旋转角度,即故意引入倾斜使返回的各衍射级次光斑沿垂直于光轴的方向分开。CGH 加入倾斜载频,待检离轴子镜需沿 y 轴(Zemax 坐标系)进行相应的平移对镜面全口径进行检测。

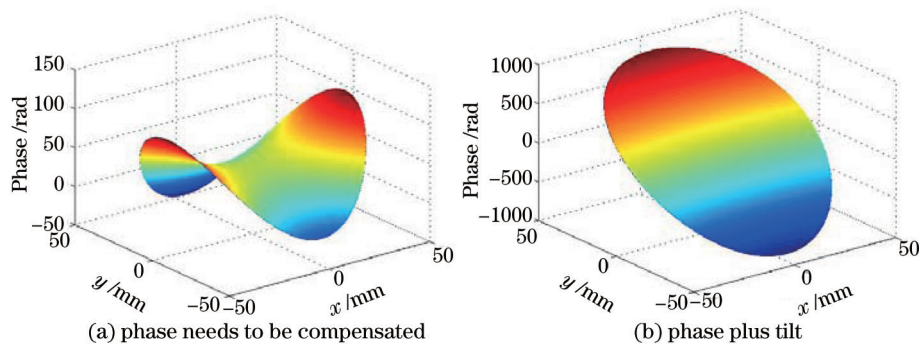
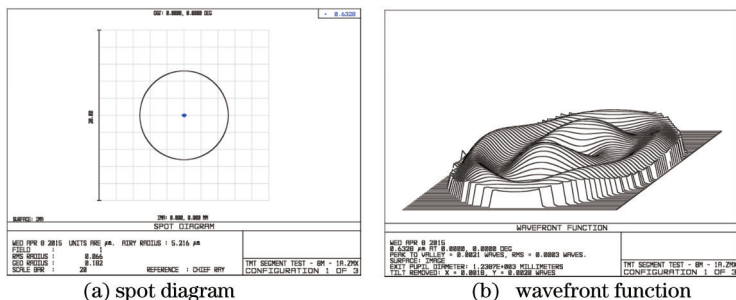


图 5 CGH 相位分布

Fig.5 CGH phase functions

消球差单透镜和 CGH 共同对离轴子镜的非球面度进行补偿,实现高精度零位检测,图 6 给出 8 m 离轴量



(a) spot diagram

(b) wavefront function

图 6 8 m 离轴镜检测设计结果

Fig.6 Segment test design results

子镜的设计结果,设计残差可以忽略不计,达到理论衍射极限。

图7给出CGH的图样分布。为了便于显示,计算空间频率时相位函数除以100。CGH的尺寸大约为 Φ 90 mm,最小刻线周期为10 μ m左右。

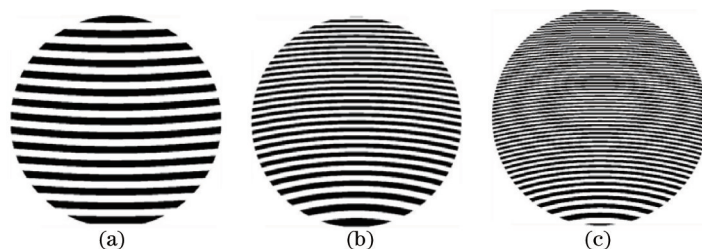


图7 CGH图样分布(一个条纹代表实际的100条)。离轴量为(a) 2.5 m; (b) 8 m; (c) 14.5 m
Fig.7 CGH patterns (1 line per 100 fringe). Off-axis magnitude is: (a) 2.5 m; (b) 8 m; (c) 14.5 m

3 结 论

针对天文学领域大口径、批量化的离轴子镜,提出一种新的利用激光干涉仪、消球差单透镜和CGH的检测光路。只需搭建一个光路通过更换CGH对不同离轴量的非球面子镜进行高精度干涉检测。设计的CGH符合现有加工工艺,最大程度上降低经济成本和调整光路所需的时间,保证了检测方案的可行性。

在实际应用过程中还需考虑以下几个问题:1) CGH补偿的相位与其在光路中所处的位置相对应,在同一块玻璃基片上设计加工对准全息用于干涉仪与CGH相对位置的确定;2) 设计基准全息,投射十字丝到消球差单透镜上,用于消球差单透镜位置的调整;3) CGH基片误差是最大的不确定度来源,可利用0级衍射光对基片的透射波前误差进行定标^[17]。

致谢 感谢美国 Arizona Optical Metrology LLC 赵春宇博士给予在CGH设计方面热情帮助。

参 考 文 献

- 1 Pan F Y, Burge J. Efficient testing of segmented aspherical mirrors by use of reference plate and computer-generated holograms. I. theory and system optimization[J]. *Appl Opt*, 2004, 43(28): 5303-5312.
- 2 Pan F Y, Burge J, Anderson D, *et al.*. Efficient testing of segmented aspherical mirrors by use of a reference plate and computer-generated holograms. II. case study, error analysis, and experimental validation[J]. *Appl Opt*, 2004, 43(28): 5313-5322.
- 3 James H Burge. Efficient testing of off-axis aspheres with test plates and computer-generated holograms[C]. SPIE, 1999, 3782: 348-357.
- 4 J Nelson, G H Sanders. The status of the thirty meter telescope project[C]. SPIE, 2008, 7012: 70121A.
- 5 R Gilmozzi, J Spyromilio. The european extremely large telescope (E-ELT)[J]. *Messenger*, 2007, 127: 11-19.
- 6 Dingqiang Su, Xiangqun Cui, Yanan Wang, *et al.*. Configurations for an extremely large telescope with a spherical or aspherical primary mirror[C]. SPIE, 2000, 4004: 340-349.
- 7 Wyant J C, Bennett V B. Using computer generated holograms to test aspheric wavefronts[J]. *Appl Opt*, 1972, 11(12): 2833-2839.
- 8 Zeng Xuefeng, Yan Feng, Xue Donglin, *et al.*. Distortion correction in testing of off-axis asphere with computer-generated hologram[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(11): 1109003.
曾雪锋, 闫峰, 薛栋林, 等. 计算全息图补偿检测离轴非球面中的投影畸变校正技术[J]. *中国激光*, 2013, 40(11): 1109003.
- 9 Gao Songtao, Sui Yongxin, Yang Huaijiang. High precise testing of asphere with computer-generated hologram and error evaluation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0612003.
高松涛, 隋永新, 杨怀江. 用计算全息图对非球面的高精度检测与误差评估[J]. *光学学报*, 2013, 33(6): 0612003.
- 10 Shen Hua, Li Jia, Zhu Rihong, *et al.*. Design of non-null interferometer based on point source array for testing freeform surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1222003.
沈华, 李嘉, 朱日宏, 等. 基于点源阵列的自由曲面非零位干涉检测系统设计方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(12): 1222003.
- 11 Feng Jie, Deng Chao, Xing Tingwen. Design and error analysis of the computer-generated hologram used for concave aspheric surface testing[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(11): 110902.
冯婕, 邓超, 邢廷文. 用于凹非球面的计算全息设计及其误差分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(11): 110902.

- 12 Burge J H, Zhao C, Dubin M. Measurement of aspheric mirror segments using Fizeau interferometry with CGH correction[C]. SPIE, 2010, 7739: 773902.
- 13 Jiangzi Bo, Lixin Nan, Yubin Bin, *et al.*. Influence and control of spherical aberration in polishing off-axis aspherical mirrors by the stressed method[J]. Appl Opt, 2015, 54(2): 291–298.
- 14 Pan Junhua. The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces [M]. Suzhou: Suzhou University Press, 2004.
潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验 [M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004.
- 15 Yu Zuliang, Jin Guofan. Computer -Generated Hologram [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1984.
虞祖良, 金国藩. 计算机全息图 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1984.
- 16 Yu-Chun Chang. Diffraction Wavefront Analysis of Computer-Generated Holograms[M]. Tucson :University of Arizona, 1999.
- 17 Chunyu Zhao, James H Burge. Optical testing with computer generated holograms: comprehensive error analysis[C]. SPIE 2013, 8838: 88380H.

栏目编辑: 何卓铭