

一种非对称双面离轴非球面反射镜检测补偿变焦光路设计方法

冯帅 常军 牛亚军 穆郁 刘鑫

A method of designing asymmetric double-sided off-axis aspheric mirror detection compensation zoom light path

Feng Shuai Chang Jun Niu Ya-Jun Mu Yu Liu Xin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 114201 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20182253

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182253>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

新型离轴反射变焦距光学系统的多视场检测方法

Novel multiple field of view detection method for the off-axis reflection zoom optical system

物理学报. 2016, 65(8): 084208 <https://doi.org/10.7498/aps.65.084208>

基于成像清晰度函数的非球面反射镜位置校正实验研究

Experimental research of alignment error correction by aspheric mirror based on the function of imaging quality

物理学报. 2016, 65(13): 139501 <https://doi.org/10.7498/aps.65.139501>

电磁力滤波与快速反射镜光学补偿在潜航器光轴稳定控制中的应用

Lorentz force filtering and fast steering mirror optical compensation in optical axis stability control for photoelectric mast

物理学报. 2017, 66(8): 084704 <https://doi.org/10.7498/aps.66.084704>

离轴椭圆矢量光场传输中的光斑演变

Propagation evolution of the off-axis ellipse vector beam

物理学报. 2015, 64(2): 024204 <https://doi.org/10.7498/aps.64.024204>

一种有效解决离轴数字全息相图倾斜畸变的数字参考平面方法

Numerical reference plane algorithm for effectively solving tilt distortion of a phase image in digital off-axis holography

物理学报. 2018, 67(9): 094202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172528>

基于色散干涉图像的拼接望远镜共相零位标定方法研究

Zero co-phasing reference calibration method based on dispersed interferogram for segmented mirror telescope

物理学报. 2016, 65(19): 199501 <https://doi.org/10.7498/aps.65.199501>

一种非对称双面离轴非球面反射镜检测 补偿变焦光路设计方法*

冯帅¹⁾ 常军^{1)†} 牛亚军¹⁾ 穆郁²⁾ 刘鑫¹⁾

1) (北京理工大学光电学院, 北京 100081)

2) (天津航技术物理研究所, 天津 300192)

(2018年12月22日收到; 2019年3月31日收到修改稿)

随着多波段共孔径高精度探测技术的发展, 非对称双面离轴非球面反射镜因具备突出特点而发挥着越来越重要的作用, 但高精度检测是限制其使用的关键步骤, 而针对非对称双面离轴非球面反射镜检测一般还是分别使用两套补偿器单独完成, 效率较低且切换补偿器会降低检测精度. 针对这个问题, 本文以干涉检验法中的折射式 Offner 补偿法为基础, 按照离轴孔径光阑使光线离轴并分光、共用透镜组前后移动变焦及反射镜折叠光路的思路, 提出一种变焦零位补偿装置光路设计的方法, 并针对实例使用光学设计软件进行仿真设计实验, 实现使用一套变焦零位补偿装置完成对非对称双面离轴非球面反射镜正反两个面的高精度检测光路设计. 针对设计结果进行公差分析, 分析表明设计满足制造装配精度要求, 验证了该方法的可行性, 为非对称双面离轴非球面反射镜高精度检测提供了一种新思路.

关键词: 双面离轴非球面, 反射镜检测, 零位补偿, 光学设计**PACS:** 42.15.Eq, 42.15.-i**DOI:** 10.7498/aps.68.20182253

1 引言

随着多波段共孔径高精度探测技术的发展, 非对称双面离轴非球面反射镜因其校正相差、提高系统相对口径、扩大视场角度、简化系统结构、减轻重量、缩小体积等特点, 发挥着越来越重要的作用^[1-4]. 但在非球面反射镜加工技术发展的同时, 高精度非球面反射镜检测仍然还存在难题, 因此高精度检测成为限制其使用的一个关键步骤^[5].

目前离轴非球面反射镜检测方法主要有轮廓检验法、几何光线检验法和干涉检验法^[6,7]. 轮廓检验法精度受限、效率较低, 适用于元件研磨期精度检测^[8-10]; 几何光线检验法受诸多限制, 适用于元件细磨及粗抛光期精度检测^[11-13]; 干涉检验法技

术成熟, 适用于元件精抛光至最终检测期精度检测, 是离轴非球面反射镜检测的主要方法^[14-16], 而干涉检验法中补偿器法具备结构简单、补偿范围大、元件数量少、易于控制等特点, 是离轴非球面检测最有效的手段之一^[17-19].

而非对称双面离轴非球面反射镜高精度检测一般是使用两套独立的补偿器、分别对反射镜的两个面运用补偿器法来完成, 效率较低且切换补偿器会降低检测精度. 针对上述问题, 本文以干涉检验法中的折射式 Offner 补偿法为基础, 按照设置离轴孔径光阑使光线离轴并分光、共用透镜组前后移动变焦及反射镜折叠光路的思路, 提出一种变焦零位补偿装置光路设计的方法, 并结合实例运用光学设计软件进行仿真设计实验, 实现使用一套变焦零位补偿装置完成对非对称双面离轴非球面反射镜

* 国家自然科学基金 (批准号: 61471039) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: bitchang@bit.edu.cn

正反两个面的高精度检测光路设计, 并进行公差分析, 验证了该设计方法的可行性.

2 检测方法

Offner 补偿法是所有补偿法中补偿精度较高且常用的一种方法, Offner 补偿器一般由补偿镜和场镜两部分组成, 其中补偿镜主要用于校正初级球差, 场镜主要用于校正高级球差. Offner 补偿器分为反射式和折射式两种, 其中折射式易于设计和加工 [20,21], 本文将使用折射式的结构. 要完成只使用一套补偿器检测双面非球面, 则需该补偿器可以分别完成对不同波像差的补偿, 这可以通过移动补偿器中各个透镜位置变焦所构成的多重结构来实现; 离轴非球面的检测可以在完成轴上全口径非球面检测的基础上, 对待检镜进行离轴处理来实现 [22], 这里将采取设置上下两个离轴孔径光阑实现光线离轴并分光的方式; 双面离轴非球面反射镜的外形结构对检测光路角度有特定限制, 这里采用在光路中添加平面反射镜折叠光路的方式来解决. 汇总前述, 整套检测系统应由干涉仪、孔径光阑、补偿镜组和 2 面反射镜组成, 示意图如图 1 所示, 通过孔径光阑处设置上下两个离轴孔径分光、补偿镜组移动位置变焦构成两种结构、反射镜 1 及反射镜 2 分别折叠光路, 从而实现只使用一套变焦零位补偿装置完成对非对称双面离轴非球面反射镜正反两个待检面的高精度检测.

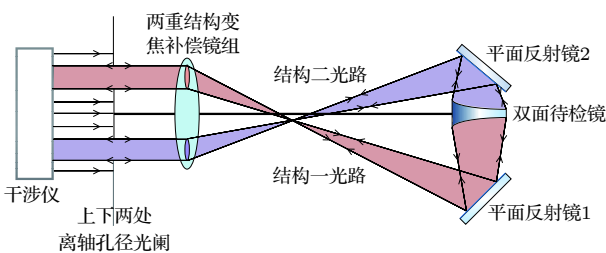


图 1 非对称双面离轴非球面反射镜高精度检测系统示意图

Fig. 1. Schematic diagram of high precision detection system for asymmetric double off-axis aspheric mirror.

3 仿真设计实例

按照前述方法, 以检测一个非对称双面离轴非球面反射镜 (双面分别用 A 面、B 面表示) 为例进行验证, 待检镜面型系数见表 1, 本文将使用光学

设计软件进行变焦零位补偿装置仿真设计, 而最终双面检测要求精度为剩余波像差均小于 $1/(30\lambda)$ RMS (RMS 为均方根, λ 为单位波长).

表 1 非对称双面离轴非球面反射镜面型参数

Table 1. Parameter of asymmetric double-sided off-axis aspheric mirror.

表面	A面	B面
表达式	$x = \frac{cy^2}{1 + \sqrt{1 - (k+1)c^2y^2}} + Ay^4 + By^6 + Cy^8 + \dots$	
曲率半径/mm	-1000	-650
偏心量/mm	82.427	57.948
待检面口径/mm	56	39
二次曲面常数 (K)	-1.5	-3.0
4阶系数(A面)	8.39516×10^{-11}	-9.24425×10^{-10}
6阶系数(B面)	9.36208×10^{-17}	8.12843×10^{-16}

所设计变焦零位补偿装置光路图如图 2, 由于干涉仪发射波长为 632.8 nm、口径为 40 mm 平行光至光阑, 在光阑处设置上下 (口径为 10 mm、偏心分别为 15 和 -15 mm) 两处孔径光阑, 以实现整体光路离轴并分光. 变焦补偿镜组设计为两重结构系统, 由四片透镜组成, 这四片透镜分为三组, 前两片为第一组, 第三片为第二组, 第四片为第三组 (这里的分组组合方式并不固定, 应以满足检测精度要求为前提, 尽量减少分组数量); 当第一组与二、三组分开时, 为两重结构的结构一, 用于检测非对称双面离轴非球面反射镜的 A 面; 当第一组与二、三组靠近时, 为两重结构的结构二, 用于检测非对称双面离轴非球面反射镜的 B 面. 这里三组透镜的驱动方式可以采用直线电机的方式驱动, 三组透镜分别使用三个直线驱动电机, 这样通过第一、二、三组透镜之间位置的调节, 即可在两重结构的光路中实现变焦. 在待检双面镜的待检面前各放置一面平面反射镜来偏折光路, 来满足待检面处入射光线的角度要求. 这样整个检测系统中, 检测光线由干涉仪发出, 经上部离轴孔径光阑, 再经结构一变焦补偿镜组补偿、平面反射镜 1 折叠, 入射至待检反射镜 A 面, 之后光线被反射并沿原光路返回至干涉仪, 返回光线在干涉仪中与参考光线发生干涉并生成干涉条纹图, 进而可分析得出待检镜 A 面的面型精度; 同理, 入射光线经下部离轴孔径光阑、结构二变焦补偿镜组、平面反射镜 2、待检镜 B 面后原路返回, 最后通过干涉条纹图将分析

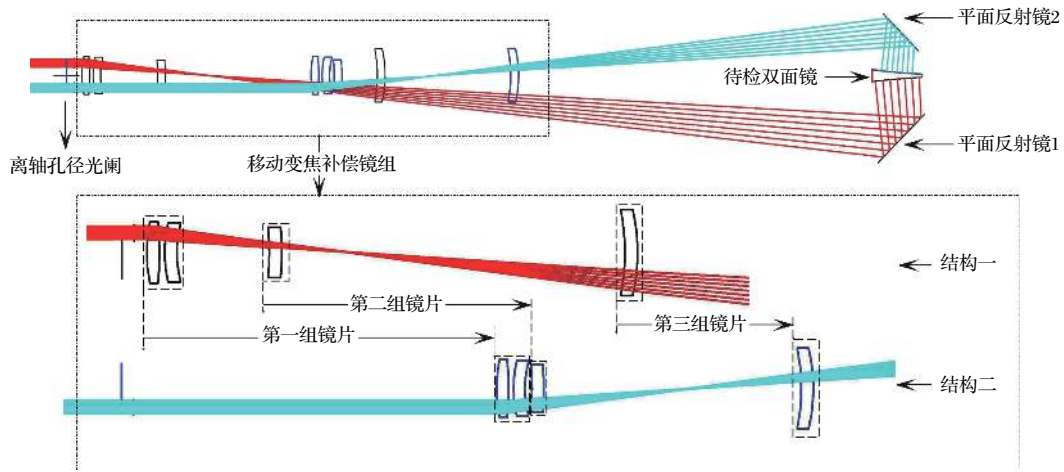


图 2 变焦零位补偿装置结构光路图

Fig. 2. Optical path figure of zoom null compensation device structure.

得出待检镜 B 面的面型精度, 整个设计光路构成一个无焦系统, 这样就可完成对非对称双面离轴非球面反射镜两个待检面的高精度检测。

4 设计结果

使用光学设计软件对上述结构进行设计优化得最终结果, 其中补偿器透镜材料分别使用成都光明玻璃库的 H-K5, D-ZPK1A, H-QK3L 和 ZF1, 生成的剩余波像差图和光程差曲线如图 3, 其中结构一一经变焦零位补偿装置补偿后, 最终剩余波像差为 0.0003λ RMS 和 0.001λ P-V; 结构二经变焦零位补偿装置补偿后, 最终剩余波像差为 0.0001λ RMS 和 0.0004λ P-V, 满足零位补偿检测精度要求。

将设计结果的制造、装配和材料公差同时加载

到变焦零位补偿装置, 其中按目前可达到的加工、测量精度, 补偿装置设置公差精度如表 2 所列。

表 2 补偿装置公差精度

Table 2. Tolerance precision of compensation device.

公差项	公差最小值	公差项	公差最小值
曲率半径公差	0.025 mm	安装偏心公差	0.1 mm
厚度公差	0.15 mm	安装倾斜公差	20"
表面不规则度公差	0.05 λ	折射率公差	0.002
空气间隔公差	0.15 mm		

将上述精度数值设定完成后进行波前误差公差分析, 分析所得结果如图 4 所示, 由结果可知, 结构一的零位检测剩余波像差在 97.7% 概率下为 0.0326λ RMS, 而结构二的零位检测剩余波像差在 97.7% 概率下为 0.0316λ RMS, 满足检测系统

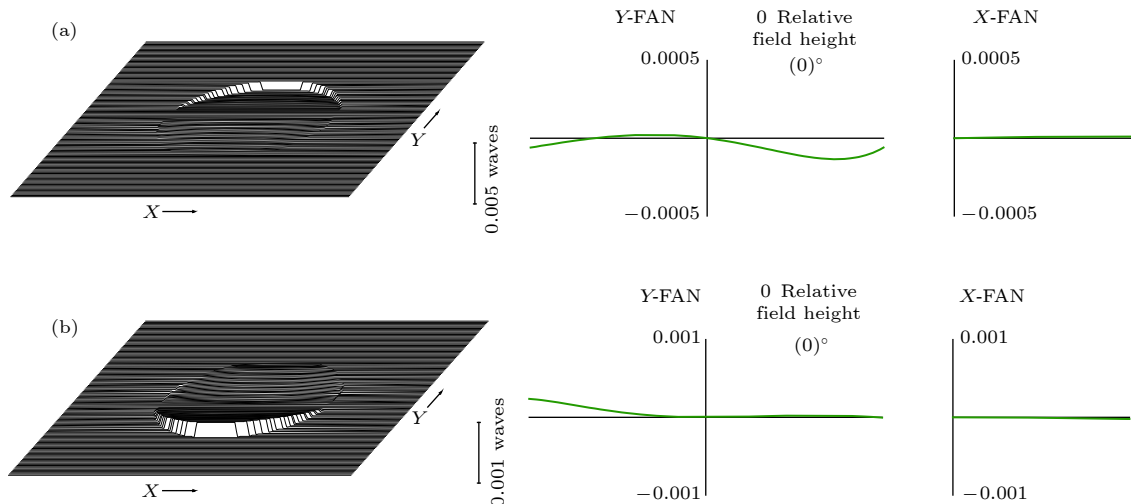


图 3 剩余波像差图和光程差曲线 (a) 结构一; (b) 结构二

Fig. 3. Residual wave aberration map and optical path difference (OPD) aberration curves: (a) Zoom 1; (b) zoom 2.

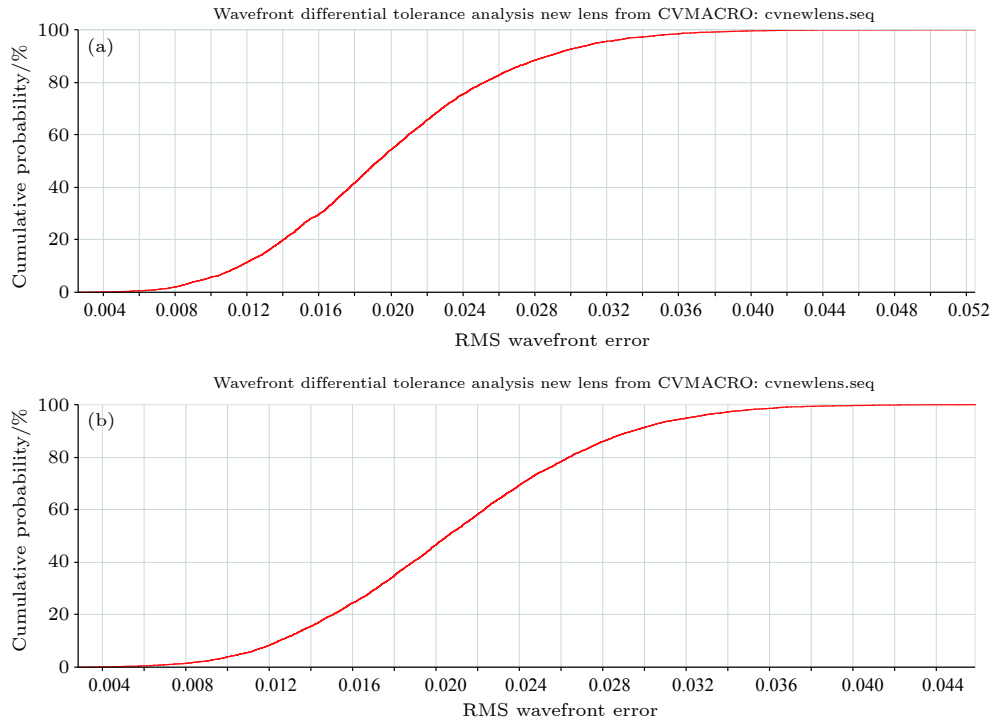


图 4 零位补偿检测波像差公差分析结果图 (a) 结构一; (b) 结构二

Fig. 4. Tolerance analysis results of null compensation detection RMS wave aberration: (a) Zoom 1; (b) zoom 2.

剩余波像差均小于 $1/(30\lambda)$ RMS 的精度要求。

通过上述设计分析可知, 系统经变焦零位补偿装置补偿后, 设计剩余波像差分别为 0.0003λ RMS 和 0.0001λ RMS, 满足检测要求; 而在现有公差范围内, 系统实际剩余波像差分别为 0.0326λ RMS 和 0.0316λ RMS, 满足制造装配精度要求, 从而验证了该方法的可行性。

5 总 结

非对称双面离轴非球面反射镜广泛应用于多波段共孔径高精度探测系统中, 而针对其表面的高精度检测一般仍需要使用两套独立补偿器分别检测. 本文提出只使用一套变焦零位补偿装置完成对此类反射镜双面检测的方法, 按照设置两处离轴孔径光阑实现光线离轴并分光、共用透镜组前后移动变焦及反射镜折叠光路的思路, 结合实例完成系统光路设计和公差分析. 设计结果表明, 系统设计剩余波像差分别为 0.0003λ RMS 和 0.0001λ RMS, 满足检测要求; 公差分析结果表明, 在现有公差范围内, 系统实际剩余波像差为 0.0326λ RMS 和 0.0316λ RMS, 满足制造装配精度要求, 则验证了该设计方法的可行性. 该方法为非对称双面离轴非

球面反射镜高精度检测提供了一种新思路. 但是, 本文中检测光束的质量是按照理想光束来完成仿真工作的, 在下一步研究工作中将考虑光束质量的问题。

参考文献

- [1] Pan J H 2000 *Eng. Sci.* **2** 32 (in Chinese) [潘君骅 2000 中国工程科学 **2** 32]
- [2] Forbes G W 2007 *Opt. Express* **15** 5218
- [3] Gong D P 2015 *Ph. D. Dissertation* (Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [龚大鹏 2015 博士学位论文 (长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所)]
- [4] Fappani D, Ducollet H 2007 *Proc. SPIE* **6687** 66870T
- [5] Zhang P Y 2015 *M.S. Thesis* (Xi'an: Xidian University) (in Chinese) [张佩钰 2015 硕士学位论文 (西安: 西安电子科技大学)]
- [6] Shi T, Yang Y Y, Zhang L, Liu D 2014 *Chin. Opt.* **7** 26 (in Chinese) [师途, 杨雨英, 张磊, 刘东 2014 中国光学 **7** 26]
- [7] Wang X K 2014 *Infrared Laser Eng.* **43** 2959 (in Chinese) [王孝坤 2014 红外与激光工程 **43** 2959]
- [8] Kim S W, Walker D, Brooks D 2003 *Mechatronics* **13** 295
- [9] Weckenmann A, Estler T, Peggs G, McMurtry D 2004 *CIRP Ann.* **53** 657
- [10] Yellowhair J, Burge J H 2008 *Opt. Eng.* **47** 023604
- [11] Smith W J (translated by Zhou H X, Cheng Y F) 2011 *Modern Optical Engineering* (Beijing: Chemical Industry Press) pp 536–541 (in Chinese) [沃伦J. 史密斯 著 (周海宪, 程云芳 译) 2011 现代光学工程 (北京: 化学工业出版社) 第

- 536—541页]
- [12] Nuñez-Alfonso J M, Cordero-Dávila A, Vergara-Limon S, Cuautle-Cortes J 2001 *Appl. Opt.* **40** 501
- [13] Jiang W H, Xian H, Yang Z P, Jiang L T, Rao X J, Xu B 1988 *Chin. J. Quantum Electron.* **15** 228 (in Chinese) [姜文汉, 鲜浩, 杨泽平, 姜凌涛, 饶学军, 许冰 1988 量子电子学报 **15** 228]
- [14] Wang X K 2012 *Acta Photonics Sin.* **41** 379 (in Chinese) [王孝坤 2012 光子学报 **41** 379]
- [15] Burge J H 1993 *Ph. D. Dissertation* (Tucson: University of Arizona)
- [16] Burge J H, Kot L B, Martin H M, Zhao C, Zobrist T 2006 *Proc. SPIE* **6273** 62732T
- [17] Pan J H 2004 *Opt. Optoelectronics Technol.* **2** 1 (in Chinese) [潘君骅 2004 光学与光电技术 **2** 1]
- [18] Chen Q F 2011 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) (in Chinese) [陈钦芳 2011 博士学位论文 (西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所)]
- [19] Chang J, Zhang Z H, Wang R R 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 034218 (in Chinese) [常军, 张正慧, 王蕊瑞 2011 物理学报 **60** 034218]
- [20] Su D Q, Yi M L 1985 *Acta Astrophysics Sin.* **5** 158 (in Chinese) (in Chinese) [苏定强, 羿美良 1985 天体物理学报 **5** 158]
- [21] Zhang J P 2012 *Ph. D. Dissertation* (Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physic, Chinese Academy of Sciences)(in Chinese) [张金平 2012 博士学位论文 (长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所)]
- [22] Cai L 2006 *Optical Parts Processing Technology* (Beijing: Weapon Industry Press) pp234–299 (in Chinese) [蔡立 2006 光学零件加工技术 (北京: 兵器工业出版社) 第234—299页]

A method of designing asymmetric double-sided off-axis aspheric mirror detection compensation zoom light path*

Feng Shuai¹⁾ Chang Jun^{1)†} Niu Ya-Jun¹⁾ Mu Yu²⁾ Liu Xin¹⁾

1) (*School of Opto-Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*)

2) (*Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300192, China*)

(Received 22 December 2018; revised manuscript received 31 March 2019)

Abstract

With the development of multispectral common-aperture high-precision detection technology, the asymmetric double-sided off-axis aspheric mirror is playing an increasingly important role in characterizing the correcting phase difference, increasing the relative caliber of system, expanding the view angle of field, simplifying system structure, and reducing weight and volume. But high-precision detection is a key step restricting the applications of these mirrors. At present, the compensation method of the interference test is the most effective mean of off-axis aspheric surface detection which has a simple structure, large compensation range, small number of components and is easy to control. However for the detection of asymmetric double-sided off-axis aspheric mirrors, two sets of alone compensators are still used, in which the efficiency is low and the switching compensator will reduce the accuracy of detection. Aiming at this problem, in this paper we propose a zoom null compensation method which is based on the Offner refracting compensation method. In this method, the off-axis aperture stop causes the light to be off-axis and split, the common lens group is moved to zoom, and the mirror folds the light path. There are two off-axis apertures are provided for off-axis and splitting, four lenses which form three lens groups are used to move positions for zooming, two mirrors are used to fold light. An optical design software is used to simulate the experiment, and implements the design for the high-precision detection of optical path for the asymmetric double-sided off-axis aspherical mirror by using this set of null compensation method. The simulation result shows that the theoretical residual wave aberration increases up to 0.0003λ root-mean-square (RMS) and 0.0001λ RMS with the designed system compensation, which meet the requirement for detection. At the same time, the tolerance analysis is carried out according to the design result, the actual residual wave aberrations within the existing tolerance range are 0.0326λ RMS and 0.0316λ RMS, which meet the requirements for manufacturing and assembly. The present work provides a new idea for the high-precision detection of asymmetric double-sided off-axis aspheric mirror. At the same time, the quality of the detected beam in this paper is achieved under ideal conditions, and the quality of beam will be considered in the next research work.

Keywords: asymmetric double-sided off-axis aspheric surface, mirror detection, null compensation, optical design

PACS: 42.15.Eq, 42.15.-i

DOI: [10.7498/aps.68.20182253](https://doi.org/10.7498/aps.68.20182253)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61471039).

† Corresponding author. E-mail: bitchang@bit.edu.cn