

光学学报

一种非完善成像离轴三反装调补偿系统研究

李昭阳^{1,2}, 胡明勇^{1,2*}, 白茜^{1,2}, 封志伟^{1,2}, 刘晨凯^{1,2}, 蔡晓波^{1,2}, 孙东起^{1,2}

¹合肥工业大学光电技术研究院, 安徽 合肥 230009;

²特种显示与成像技术安徽省技术创新中心, 安徽 合肥 230009

摘要 为了实现非完善成像离轴三反系统的高质量装调, 提出了一种置于三反系统焦点前的像差补偿系统的设计方法。基于高斯光学, 推导了补偿系统参数与像点空间位置的关系, 并根据三级像差理论, 设计出补偿系统的初始结构。利用有效口径为 400 mm、 F 数为 3.9 的离轴三反系统, 对所提方法进行了分析, 验证了方法的可行性。所提方法有效提高了优化效率, 适用于多种类型的反射系统。最终设计结果以相对较小的口径实现了非完善成像离轴三反系统的高质量装调, 有效降低了装调成本, 提高了装调效率。

关键词 光学设计; 三级像差理论; 高斯光学; 离轴三反系统; 像差补偿系统

中图分类号 O435.2

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0422001

Assembly-Alignment and Compensation of Imperfect Imaging Off-Axis Three Mirror System

Li Zhaoyang^{1,2}, Hu Mingyong^{1,2*}, Bai Qian^{1,2}, Feng Zhiwei^{1,2},

Liu Chenkai^{1,2}, Cai Xiaobo^{1,2}, Sun Dongqi^{1,2}

¹Academy of Opto-Electric Technology, Hefei University of Technology, HeFei, AnHui 230009, China;

²Special Display and Imaging Technology Innovation Center of Anhui Province, HeFei, AnHui 230009, China

Abstract In order to achieve the high quality alignment of an imperfect imaging off-axis three mirror system, a design method of aberration compensation system placed in front of the focus of the three mirror system is proposed. Based on Gaussian optics, the relationship between the parameters of the compensation system and the spatial position of the image points is derived. In addition, the initial structure of the compensation system is designed according to the third-order aberration theory. An off-axis three mirror system with an effective aperture of 400 mm and an F number of 3.9 is adopted to test the proposed method and the feasibility of this method is verified. The proposed method can effectively improve the optimization efficiency and is suitable for various types of reflection systems. The final design results can achieve the high-quality alignment of an imperfect imaging off-axis three mirror system with a relatively small aperture, effectively reduce the assembly-alignment cost, and improve the assembly-alignment efficiency.

Key words optical design; third-order aberration theory; Gaussian optics; off-axis three-mirror system; aberration compensation system

OCIS codes 220.1000; 220.4830; 220.2740

1 引言

随着空间光学的不断深化发展, 反射系统因无色差、易于制成大口径等优点获得了广泛的应用。

欧洲太空局的高分辨率成像光谱仪(HRIS)、美军卫星上的近海成像光谱仪(COIS)等均采用反射系统作为其前置成像系统^[1]。在国内, 多家单位亦对反射系统展开了研究^[2-5], 由此可见, 反射系统的镜面

收稿日期: 2020-08-19; 修回日期: 2020-09-15; 录用日期: 2020-09-25

* E-mail: humy8@126.com

检测和质量装调研究具有重要意义^[6-8]。某些反射系统因非单独校正像差、波段不可见等而不满足干涉仪检测的条件,给装调检测带来了困难^[9-10]。此类反射系统主要采用的装调方式有后续镜组联调和补偿系统装调^[11]。其中,后续镜组联调法将反射镜组和后续镜组结合装调,其装调变量多、自由度高,尤其是当后续镜组存在折转分光光路时,不易确定误差来源,不可见光波段系统及非成像系统无法使用该方式,具有一定的局限性。

本文分析了不同补偿方式的优缺点及补偿系统和离轴三反系统的几何关系,推导出使用补偿系统前后像点位置的变化,进而提出了一种针对非完善成像反射系统的装调补偿系统的设计方法,并验证了该方法的有效性。该方法实现了非完善成像离轴三反系统的单独装调,简化了复杂光学系统的装调过程,为非完善成像离轴三反系统提供了新的装调方式,适用于多种类型的反射系统。

2 检测光路结构及补偿系统设计

2.1 补偿光路的选择

离轴三反系统的补偿方式主要有:1)补偿系统置于主镜之前;2)主镜和焦点前分别放置透镜组,实现共同补偿;3)在焦点前放置补偿系统。本系统口径为 400 mm,在主镜前放置补偿系统时需使用大口径透镜,这对像差校正造成了困难,同时增加了成本,因此选择在焦点前放置补偿系统的方式。补偿系统光路示意图如图 1 所示,干涉仪发出的光线经补偿系统、三反系统后垂直射入反射镜,经反射镜反射后沿原光路返回干涉仪,形成干涉图像。

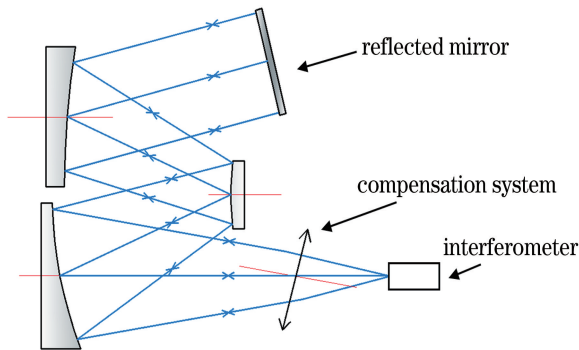


图 1 补偿系统光路示意图

Fig. 1 Optical path diagram of compensation system

2.2 补偿系统的结构解算

补偿系统是焦距为 f' 的薄透镜,以同轴的三反系统光轴为主轴,补偿系统光轴相对主轴偏心 and 倾斜,设偏心量为 Δh ,倾斜量为 Δc ,符号规则由高斯

光学确定。第一近轴光线的各项参量相对于主轴和补偿系统光轴的几何关系如图 2 所示, A 为光线与补偿系统焦平面的交点, u' 、 h 分别为光线与补偿系统光轴的夹角及相对于补偿系统光轴的高度, u'_2 、 h_2 分别为使用补偿系统前光线与主轴的夹角及相对于主轴的高度。由几何关系可知

$$h = \frac{(h_2 - \Delta h) \sin\left(\frac{\pi}{2} + u'_2\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - u'_2 + \Delta c\right)} = \frac{-(h_2 - \Delta h) \cos(u'_2)}{\cos(u'_2 - \Delta c)}, \quad (1)$$

$$\theta = u'_2 - \Delta c, \quad (2)$$

$$f' = \frac{f' \tan \theta}{\tan u'} + \frac{h}{\tan u'}, \quad (3)$$

$$u' = \arctan \left[\frac{f' \tan(u'_2 - \Delta c) + h}{f'} \right], \quad (4)$$

式中: θ 为 u'_2 与 Δc 的角度差。

同理可得,第二近轴光线相对于补偿系统光轴的高度 h_z 与未使用补偿系统时光线相对于主轴的高度 h'_z 的关系为

$$h_z = \frac{-(h'_z - \Delta h) \cos(u'_{z2})}{\cos(u'_{z2} - \Delta c)}, \quad (5)$$

式中: u'_{z2} 为主光线与光轴的夹角。

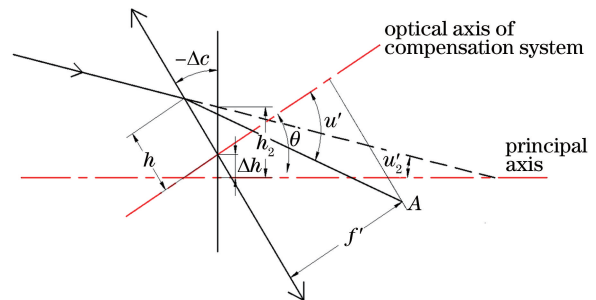


图 2 第一近轴光线的几何关系

Fig. 2 Geometric relationship of first paraxial ray

使用补偿系统后光轴上像高 y' 与使用前主轴上像高 y_2 关系如图 3 所示, B 、 C 分别为使用前后的

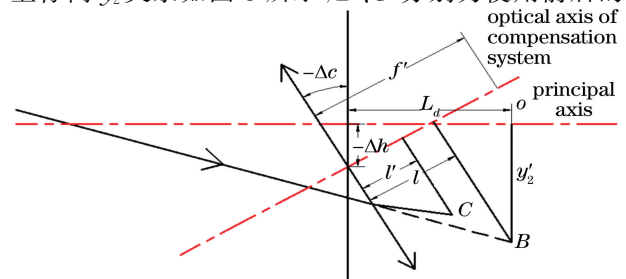


图 3 像点的几何位置变化

Fig. 3 Geometric position change of image point

像点位置, l, l' 分别为 B, C 在光轴上的距离, O 为 B 在主轴上的投影, L_d 为使用位置与 O 点的距离, y_2'' 为 B 在光轴上的高度, 由几何关系可得

$$y_2'' = [y_2' + L_d \tan(-\Delta c) + \Delta h] \cos(-\Delta c), \quad (6)$$

$$l = \frac{L_d}{\cos(-\Delta c)} -$$

$$[y_2' + L_d \tan(-\Delta c) + \Delta h] \sin(-\Delta c). \quad (7)$$

由高斯光学可知

$$y' = \beta y_2'' = \frac{f' [y_2' + L_d \tan(-\Delta c) + \Delta h] \cos(-\Delta c)}{f' + \frac{L_d}{\cos(-\Delta c)} - [y_2' + L_d \tan(-\Delta c) + \Delta h] \sin(-\Delta c)}, \quad (8)$$

式中: β 为垂轴放大倍率。由此可获得补偿系统的拉赫不变量 J 与变化后的像点位置。

三反系统的轴上点成像质量不能作为有效的装调依据^[12], 干涉仪检测无需考虑色差, 本系统对慧差和像散进行校正, 补偿系统选用三片式。像面上某一像点相对于补偿系统光轴的几何像差^[13]为

$$K_s' = K_s \cos \Delta c, \quad (9)$$

$$\delta y_z' = -\delta y_z \cos \Delta c, \quad (10)$$

式中: $K_s, \delta y_z$ 分别为像面上某一像点相对于主轴的初级慧差和初级像散; $K_s', \delta y_z'$ 分别为像面上某一像点相对于补偿系统光轴的初级慧差和初级像散。根

据 $K_s', \delta y_z'$ 求得三级像差系数和分配光焦度 φ 后, 对参数进行规化处理并代入三级像差公式:

$$\sum S_{II} = \sum h^3 h_z \Phi^3 \bar{P} + J \sum h^2 \Phi^2 \bar{W}, \quad (11)$$

$$\sum S_{III} = \sum h^2 h_z^2 \Phi^3 \bar{P} + 2J \sum h_z h \Phi^2 \bar{W} + J^2 \sum \Phi, \quad (12)$$

式中: S_{II} 为慧差系数; Φ 为光焦度; \bar{P}, \bar{W} 为规化后的有限远像差特性参量; S_{III} 为像散系数。

利用 PW 法求解补偿系统的初始结构, 将上述物距有限远的 \bar{P}, \bar{W} 规化到物距无穷远, 表示为三片透镜的 $\bar{P}_1^\infty, \bar{P}_2^\infty, \bar{P}_3^\infty, \bar{W}_1^\infty, \bar{W}_2^\infty, \bar{W}_3^\infty$:

$$0 = h_z h \varphi_1^3 \bar{P}_1^\infty + h_z h \varphi_2^3 \bar{P}_2^\infty + h_z h \varphi_3^3 \bar{P}_3^\infty + (J \varphi_1^2 - 4 \varphi_1^3 \bar{u}_1) \bar{W}_1^\infty + (J \varphi_2^2 - 4 \varphi_1 \varphi_2^2) \bar{W}_2^\infty + (J \varphi_3^2 - 4 \varphi_2 \varphi_3^2) \bar{W}_3^\infty + \left[\left(3 + \frac{2}{n_1} \right) \varphi_1^3 \bar{u}_1^2 + \left(3 + \frac{2}{n_2} \right) \varphi_1^2 \varphi_2 + \left(3 + \frac{2}{n_3} \right) \varphi_2^2 \varphi_3 - \varphi_1^3 \bar{u}_1 - \varphi_1 \varphi_2^2 - \varphi_2 \varphi_3^2 \right] - J \left[\left(2 + \frac{1}{n_1} \right) \varphi_1^2 \bar{u}_1 + \left(2 + \frac{1}{n_2} \right) \varphi_1 \varphi_2 + \left(2 + \frac{1}{n_3} \right) \varphi_2 \varphi_3 \right], \quad (13)$$

$$0 = h_z h \left[\varphi_1^2 \bar{W}_1^\infty + \varphi_2^2 \bar{W}_2^\infty + \varphi_3^2 \bar{W}_3^\infty - \left(2 + \frac{1}{n_1} \right) \varphi_1^2 \bar{u}_1 - \left(2 + \frac{1}{n_2} \right) \varphi_1 \varphi_2 - \left(2 + \frac{1}{n_3} \right) \varphi_2 \varphi_3 \right] + J^2 (\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3), \quad (14)$$

式中: $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ 为三片透镜的光焦度; \bar{u}_1 为入射角; n_1, n_2, n_3 为三片透镜的折射率。

将 $\bar{P}^\infty, \bar{W}^\infty$ 以弯曲系数 Q_1, Q_2, Q_3 替代, 求出弯曲系数, 在多组解中取弯曲系数绝对值小的解, 以减少高级像差。

$$\bar{W}^\infty = \frac{n+1}{n} Q + \frac{1}{n-1}, \quad (15)$$

$$\bar{P}^\infty = \frac{n+2}{n} Q^2 + \frac{3}{n-1} Q + \frac{n}{(n-1)^2}, \quad (16)$$

式中: n 为折射率; Q 为弯曲系数。

进而求解出半径:

$$r_1 = \frac{f_1'}{Q_1 + \frac{n_1}{n_1 - 1}}, \quad (17)$$

$$r_2 = \frac{f_1'}{Q_1 + 1}, \quad (18)$$

$$r_3 = \frac{f_2'}{Q_2 + \frac{n_2}{n_2 - 1}}, \quad (19)$$

$$r_4 = \frac{f_2'}{Q_2 + 1}, \quad (20)$$

$$r_5 = \frac{f_3'}{Q_3 + \frac{n_3}{n_3 - 1}}, \quad (21)$$

$$r_6 = \frac{f_3'}{Q_3 + 1}, \quad (22)$$

式中: $r_1 \sim r_6$ 分别为各透镜半径。

将薄透镜转换为厚透镜, 并转换半径。半径转换公式为

$$r_i^* = r_i \frac{h_i}{h_1}, \quad (23)$$

式中： h_i 为增加厚度后光线在第 i 个面上的投射高度。

3 实例分析

以有效口径为 400 mm, F 数为 3.9, 视场离轴, 入射光线和次镜光轴间的夹角为 14° 的离轴三反系统进行说明。系统参数如表 1 所示, 其中 Conic 为圆锥系数。泽尼克系数前九项及系统波前图分别如表 2 和图 4 所示, 系统波前峰谷 (PV) 值为 25.136λ (波长 $\lambda = 632.8$ nm, 全文同), 均方根 (RMS) 为 4.7113λ , 初级像散与初级慧差为其主要初级像差来源。由此可见, 系统口径较大, 结构紧凑, 波前像差大, 不满足直接使用干涉仪装调的条件, 给装调检测带来了困难。因此选择使用补偿系统进行检测, 要求波前 RMS 小于等于 $1/14\lambda$ 。

表 1 离轴三反系统的参数

Table 1 Parameters of off-axis three mirror system

Surface No.	Radius / mm	Thickness / mm	Conic	Off-axis distance / mm
1	3539.834	780.272	-2.934	360
2	1028.186	-750.195	0	0
3	1631.325	97.789	0.156	-326

表 2 离轴三反系统的泽尼克系数

Table 2 Zernike coefficients of off-axis three mirror system

Zernike coefficient	Value
Z_1	1.24736426
Z_2	0.00000001
Z_3	-2.76264936
Z_4	-0.07012538
Z_5	-10.98475152
Z_6	0
Z_7	0.00000001
Z_8	-1.12189271
Z_9	-1.31055951

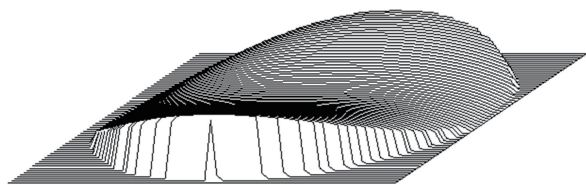


图 4 离轴三反系统的波前图

Fig. 4 Wavefront map of off-axis three mirror system

基于机械结构和工装要求, 补偿系统的位置定于距离三镜 788 mm 处, Δc 为 5° , Δh 为 -300 mm。

因后续装调需要, 像点位置的变化不应过大, 由 (8) 式可知, 补偿系统的焦距越大, 像点位置的变化越小。基于像差校正和像点位置确定补偿系统, 对离轴视场中心进行补偿, 采用 $f' = -8000$ mm 的分离三片式结构, 材料为石英。

对光焦度进行分配, 将 r_4 设为无穷大, 求出补偿系统的初始半径。将透镜中心厚度增加为 48 mm, 两片透镜之间的中心距增加为 6 mm, 补偿系统的参数如表 3 所示。

表 3 补偿系统的参数

Table 3 Parameters of compensation system

Radius / mm	Value
r_1	-773.25940
r_2	-712.01562
r_3	1822.65188
r_4	∞
r_5	216.36512
r_6	165.02877

校正像差后系统的泽尼克系数如表 4 所示, 系统波前图如图 5 所示, 可见补偿系统有效校正了像差, 提供了一个有效的初始结构。使用设计软件对初始结构进行优化, 最终光路图如图 6 所示, 波前图如图 7 所示, 可以看出, 初始结构系统波前 PV 值为 0.9092λ , 波前 RMS 为 0.1622λ , 优化后波前 RMS 等于 0.0531λ , 符合波前 RMS 小于等于 $\lambda/14$ 的检测要求。

表 4 补偿后系统的泽尼克系数

Table 4 Zernike coefficients of system after compensation

Zernike coefficient	Value
Z_1	0.07354147
Z_2	0
Z_3	0.26921479
Z_4	0.02506546
Z_5	0.10500902
Z_6	0
Z_7	0
Z_8	0.18203598
Z_9	-0.00251145

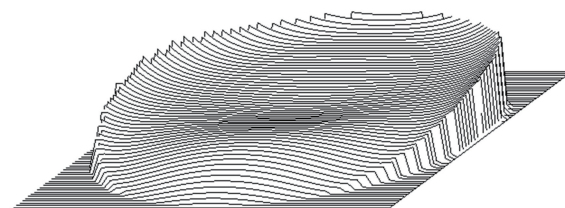


图 5 使用补偿系统后离轴三反系统的波前图

Fig. 5 Wavefront map of off-axis three mirror system with compensation system

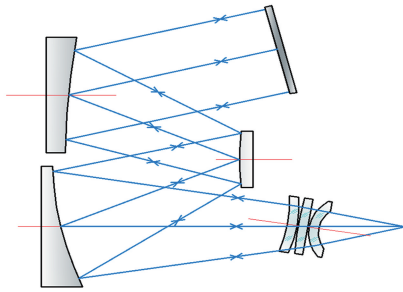


图 6 优化后的系统光路图

Fig. 6 Optical path diagram of optimized system

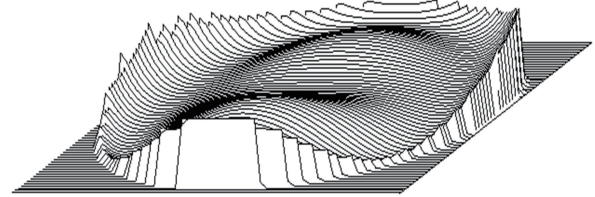


图 7 优化后的系统波前图

Fig. 7 Wavefront map of optimized system

对补偿系统进行公差分析,元件表面的公差参数如表 5 所示。

表 5 公差参数

Table 5 Tolerance parameters

Lens	Refractive index	Offsetting distance /mm	Angle of inclination /($^{\circ}$)	Thickness / mm	Radius of curvature /mm	RMS surface error / λ
First compensation lens	0.0005	± 0.01	± 0.001	± 0.02	0.1	1/30
Second compensation lens	0.0005	± 0.01	± 0.001	± 0.02	0.1	1/30
Third compensation lens	0.0005	± 0.01	± 0.001	± 0.02	0.1	1/30

在装调过程中,元件的中心间隔误差小于 ± 0.02 mm,偏心距离小于 ± 0.015 mm,倾斜角度小于 $\pm 0.005^{\circ}$,各项公差值在现有条件下均可检验。进行 5000 次蒙特卡罗分析,80%的分析结果的波前均方根优于 0.07029825λ ,满足检测精度波前 RMS 小于等于 $\lambda/14$ 的检测指标要求。

4 结 论

提出了一种非完善成像离轴三反补偿系统的设计方法,利用较小口径透镜,在几乎不改变像点位置的情况下,有效补偿了离轴三反系统的像差。通过推导出补偿系统与像点位置变化的关系,求解出补偿系统的初始结构,实现了非完善成像离轴三反系统的单独装调,降低了装调难度。所提方法可推广于多类反射系统的装调补偿系统设计。

参 考 文 献

- [1] Liu X M, Xiang Y. Design of telecentric off-axis three-mirror system of imaging spectrometer with wide field-of-view[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(6): 0622004.
刘晓梅, 向阳. 宽视场成像光谱仪前置远心离轴三反光学系统设计[J]. 光学学报, 2011, 31(6): 0622004.
- [2] Tang T J, Zheng G X. Design of fore telescope system for compact imaging spectrometer [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2015, 36(1): 43-48.
汤天瑾, 郑国宪. 轻小型高光谱成像仪前置望远系统
- [3] Yao B, Yuan L Y, Qi H X, et al. Optical design of a dual-channel imaging spectrometer sharing the off-axis TMA system [J]. Infrared Technology, 2013, 35(7): 419-424.
姚波, 袁立银, 亓洪兴, 等. 双通道成像光谱仪共用离轴三反反射光学系统的设计[J]. 红外技术, 2013, 35(7): 419-424.
- [4] Liu Q H. Optical design of fore optical system of imaging spectrometer with ultra wide field of view [D]. Suzhou: Soochow University, 2016: 8-15.
刘青函. 超宽视场成像光谱仪前置光学系统设计 [D]. 苏州: 苏州大学, 2016: 8-15.
- [5] Yan X T, Yang J F, Xue B, et al. Design of fore telescope system for Offner imaging spectrometer [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(10): 2712-2717.
闫兴涛, 杨建峰, 薛彬, 等. Offner 型成像光谱仪前置光学系统设计 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(10): 2712-2717.
- [6] Xu D H, Tang X H, Fang G M, et al. Method for calibration of optical axis parallelism based on interference fringes[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(17): 1712005.
徐丹慧, 唐霞辉, 方国明, 等. 基于干涉条纹的光轴平行性校准方法 [J]. 光学学报, 2020, 40(17): 1712005.
- [7] Zhao P W, Zhang J P, Ye L, et al. Catadioptric testing of large aperture convex hyperboloid surfaces [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(11): 1122003.
赵鹏玮, 张金平, 叶璐, 等. 折反射检验大口径凸双曲面的研究 [J]. 光学学报, 2019, 39(11): 1122003.

- [8] Guo P, Zhou J, Ding X Y, et al. Method to solve assembly misalignment of two-reverse system based on vector wave aberration theory [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(7): 0722002.
郭攀, 周军, 丁晓宇, 等. 基于矢量波像差理论的两反系统装配失调解算方法 [J]. *光学学报*, 2019, 39(7): 0722002.
- [9] Jiang X W, Cui Q F. Optical design of a cooled re-imaging off-axis three-mirror system [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2016, 39(2): 1-4.
姜晰文, 崔庆丰. 致冷型二次成像离轴三反射镜光学系统设计 [J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2016, 39(2): 1-4.
- [10] Ling M C, Song M X, Hong J, et al. Optical design for simultaneous polarization imager based on off-axis three-mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(5): 0518001.
凌明椿, 宋茂新, 洪津, 等. 离轴三反同时偏振成像仪光机设计 [J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(5): 0518001.
- [11] Hu B, Yang Z J, Chen J, et al. Assistant alignment lens design for catadioptric infrared optical system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, 36(6): 864-867.
胡博, 杨子建, 陈姣, 等. 用于折反式红外光学系统的辅助装调镜设计 [J]. *应用光学*, 2015, 36(6): 864-867.
- [12] Shi G W. Study of reflective telescopes alignment based on vector wavefront aberration [D]. Changchun: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2011: 83-95.
史广维. 基于矢量波像差理论的反射望远系统装调研究 [D]. 长春: 中国科学院研究生院, 2011: 83-95.
- [13] Mu Y J, Mao Y J, Hu M Y. Design of a kind of aberration corrector for off-axis paraboloid [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(6): 0622004.
穆永吉, 毛一江, 胡明勇. 一种离轴抛物面镜像差校正镜组的设计 [J]. *光学学报*, 2014, 34(6): 0622004.