

doi:10.3788/gzxb20144311.1122002

离轴全反射施密特系统设计

雷存栋^{1,2}, 郑列华¹, 车英²

(1 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

(2 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

摘 要:为满足紫外宽光谱大视场焦平面光学成像系统的设计要求,研究了全反射施密特光学系统.分析了球面反射镜曲率中心波前,推导了透射及反射施密特校正板方程.为避免光线被遮挡,设计了离轴全反射施密特光学系统.在宽光谱(240~950nm)大视场($\pm 5^\circ$)离轴全反射施密特系统中,当 $\lambda=0.24\ \mu\text{m}$, $u'_m=5^\circ$ 时, $\Delta f\leq 0.0315\ \text{mm}$,探测器控制在焦深范围内,光学系统成像质量达到了衍射极限.该施密特光学系统设计方法适用于宽波段高分辨率紫外成像系统.

关键词:光学设计;成像系统;波前;望远镜;紫外探测;非球面;宽光谱;大视场;施密特系统

中图分类号:TH743;TN23

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)11-1122002-5

Optical Design for Off-axis All-reflective Schmidt System

LEI Cun-dong^{1,2}, ZHEN Lie-hua¹, CHE Ying²

(1 Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

(2 School of Opto-Electronics Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to satisfy the optical imaging system of ultraviolet (UV) focal plane arrays with wide spectrum and large field of view design demands, all-reflective Schmidt system was studied. Based on wavefront analysis at the center of curvature of a spherical mirror, the equations of refractive and reflective Schmidt correctors were derived. For avoiding central obscuration, the off-axis all-reflective Schmidt system was established which was characterized by the 240 nm~950 nm wide spectrum and $\pm 5^\circ$ field of view, the design results show that when $\lambda=0.24\ \mu\text{m}$, $u'_m=5^\circ$, $\Delta f\leq 0.0315\ \text{mm}$, the detection is in the depth of focus and the image quality reaches the diffraction limit. The optical design method for Schmidt system can be applied to the UV imaging system with high resolution and wide spectrum.

Key words: Optical design; Imaging systems; Wavefronts; Telescopes; Ultraviolet detectors; Aspherics; Wide spectrum; Large field of view; Schmidt system

OCIS Codes: 220.2740; 220.4830; 110.6770; 040.7190; 220.1250

0 引言

紫外光在天文观测、军事领域以及民用上的应用价值越来越受到重视^[1-2],2002年,美国北卡罗来纳大学联合陆军夜视实验室率先研制了 128×128 和 320×256 规格的可见光盲和日盲紫外 AlGaIn-pin 焦平面并进行了成像演示^[3],实现了以半导体 AlGaIn 焦平面成像替代通过微通道(Microchannel Plate, MCP)和光电阴极进行光增强和光电转换再经 CCD 成像的模

式^[4],使整机的性价比获得大幅提高^[5].上海技术物理研究所在国内开展了 AlGaIn 基紫外焦平面研究^[6],已研制出高性能 320×256 日盲紫外 AlGaIn 基焦平面阵列以及 AlGaIn/PZT 材料紫外/红外双波段探测器^[7-8],为紫外探测技术的应用提供了坚实基础^[9].紫外探测具有背景干扰小、目标信号容易探测、不易产生虚警的优点,但作用距离较近^[10],使得紫外与可见光或红外光相结合的宽波段成像光学系统具有广阔的应用前景^[11].

基金项目:国家重点基础研究发展计划(No.2011CB013206)资助

第一作者:雷存栋(1971-),男,博士研究生,主要研究方向为科学仪器与技术. Email:leicd2012@foxmail.com

收稿日期:2014-04-29; **录用日期:**2014-07-24

<http://www.photon.ac.cn>

透射式紫外宽波段光学系统因受紫外透射材料的限制难以全波段消色差^[12],因而使用反射式光学系统^[13],但牛顿系统,格里高里系统和卡塞格林系统,彗差和像散都很大,视场很小^[14],而全反射施密特望远镜利用校正板消球差的同时将光阑与校正板重合,使其具有大视场、无色差、无彗差、无像散等优点^[15],光学系统结构也较为简单.因此全反射施密特光学系统在紫外宽波段大视场成像方面具有明显优势.

本文利用 ZEMAX 设计软件,设计了离轴全反射紫外宽光谱大视场光学成像系统,针对紫外宽光谱成像系统的设计实例,运用光学波前分析方法,建立了施密特校正板方程,并用几何光学原理推导了离轴全反射施密特光学系统的设计公式,避免了该反射系统对光线的遮挡.

1 施密特校正板方程

假定无穷远的物体经施密特望远镜成像于高斯焦点 S 点附近,如图 1,高斯焦点 G 位于 R/2 处,用无量纲参量 M 表示 S 点离焦倍率,使 SG=M×R/2,当 u=0 时,光线 l₂ 平行光轴 z,此时 r 所处位置称为中性带,用 r_n 表示,令 K=r_n²/R²,M=1/√(1-K)-1,K-M 关系曲线如图 2 所示.

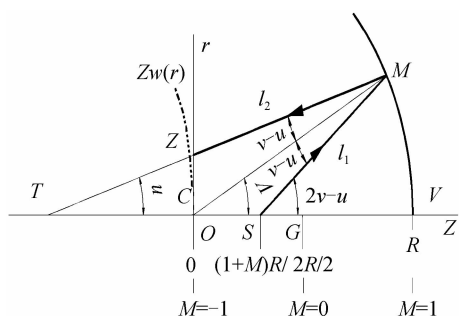


图 1 光源 S 经球面镜反射后的波前
Fig. 1 Wavefront from a source point S after reflection at a spherical mirror

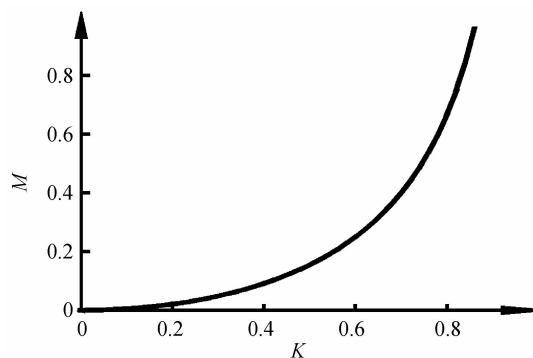


图 2 K-M 关系曲线
Fig. 2 Plot of K-M

由图 1 可得

$$l_1 + l_2 = (3-M)R/2 \quad (1)$$

$$Zw = R \cos v - l_2 \cos u \quad (2)$$

$$r = R \sin v - l_2 \sin u \quad (3)$$

$$l_1 \cos(2v-u) = R \cos v - l_2 \sin u \quad (4)$$

$$l_1^2 = (5 + 2M + M^2)R^2/4 - (1+M)R^2 \cos v \quad (5)$$

式中 Zw 表示 S 点发出的光线经球面镜反射后在球心处的波面,Zw 表示为

$$Zw = \sum_{n=2,4,6,\dots} A_n r^n / R^{n-1} \quad (6)$$

式中 A_n 为偶次项系数,r 为校正板高度,R 为球面半径.

令 ρ=r/R,对式(6)进行归一化,其中 Zw/R=∑A_nρⁿ=cos v-l₂cos u,进行马克劳林级数展开,得到 A_n 各项系数表达式

$$A_n = \frac{1}{n!} \left(\frac{d^n Zw}{d\rho^n} \right)_{\rho=0} \quad (7)$$

Lemaitre 对式(7)进行求解^[16],得到

$$Zw = \frac{M}{1+MR} r^2 - \left[\frac{1}{4} - \frac{M(1-M^3)}{(1-M)(1+M)^3} \right] \frac{r^4}{R^3} - \left[\frac{3}{8} - \frac{2M(1+M-M^3)}{(1+M)^5} - \frac{3M^2}{2(1+M)^2} \right] \frac{r^6}{R^5} - \left[\frac{45}{64} - 4M + \dots \right] \frac{r^8}{R^7} - \dots \quad (8)$$

其中前三项系数为

$$\begin{cases} A_2 = M/(1+M) \\ A_4 = 1/4 - M(1-M^3)/(1-M)(1+M)^3 \\ A_6 = 3/8 - 2M(1+M-M^3)/(1+M)^5 - 3M^2/2(1+M)^2 \end{cases}$$

施密特校正板对 S 点的波前 Zw(r) 进行校正,如图 3,设校正板中心厚度为 d₀,径向高度 r 处的厚度为 d_r,校正板折射率为 n,从图 3 可以看出,I₀ 和 I_r 两束平行光,经校正板透射后,在过球心处的波面上,I₀ 的波前为 nd₀,I_r 的波前用直线近似表示为:nd_r+PQ=nd_r+d₀-d_r.

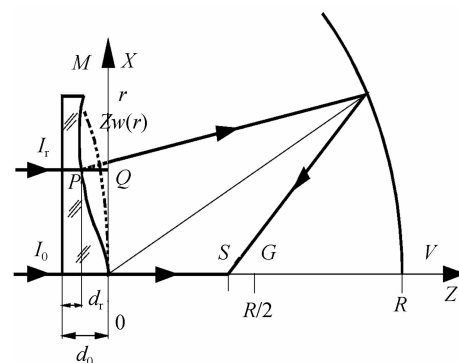


图 3 波前补偿示意图
Fig. 3 The diagram of wavefront compensation
根据波前差相抵消的关系建立等式

$$nd_0 - nd_r - (d_0 - d_r) = -Zw(r)$$

该式化简为

$$(n-1)(d_0 - d_r) = -Zw(r)$$

式中,(n-1)称为校正因子,d₀-d_r为校正板面型,可

用 Z_{Opt} 表示为

$$Z_{Opt} = -\frac{1}{n-1}Z_w = -\frac{1}{n-1}\sum_{n=2,4,6,\dots} A_n r^n / R^{n-1}$$

将系数展开为

$$Z_{Opt} = -\frac{1}{(n-1)}Z_w = -\frac{1}{(n-1)}\left\{ \frac{M}{1+MR} r^2 - \left[\frac{1}{4} - \frac{M(1-M^3)}{(1-M)(1+M)^3} \right] \frac{r^4}{R^3} - \left[\frac{3}{8} - \frac{2M(1+M-M^3)}{(1+M)^5} - \frac{3M^2}{2(1+M)^2} \right] \frac{r^6}{R^5} - \left[\frac{45}{64} - 4M + \dots \right] \frac{r^8}{R^7} - \dots \right\} \quad (9)$$

式(9)描述了透射式校正板的面型方程,对于反射式施密特校正板,只有倾斜一定的角度才能起作用,设倾角为 u ,则倾斜后的校正板关系为

$$Z_{tilt} = Z_{opt} \cos u, x_{tilt} = x \cos u, r_{tilt}^2 = x^2 \cos^2 u + y^2$$

将 Z_{tilt} , r_{tilt} 各项代入式(9),此时 $n = -1$,得到倾斜校正板方程为

$$Z_{Opt} = \frac{1}{2\cos u} \left[A_2 \frac{(\cos u)^2 x^2 + y^2}{R} - A_4 \frac{((\cos u)^2 x^2 + y^2)^2}{R^3} - A_6 \frac{((\cos u)^2 x^2 + y^2)^3}{R^5} - \dots \right] \quad (10)$$

由于反射校正板不存在色差,中性带可选用 0.707,此时加工性最好。

2 离轴全反射施密特系统

入射光线倾斜入射校正板中心时,光线原路返回,如图4(a),为了避免光线遮挡,入射光线必须离轴入

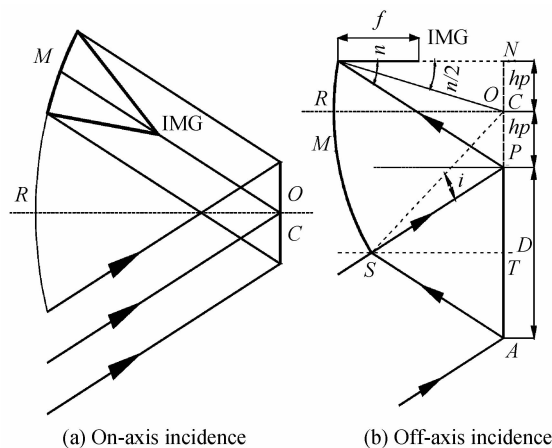


图4 全反射施密特望远镜结构

射,如图4(b),设光线入射角为 u ,像面距光轴距离为 hu ,校正板到光轴的距离 hp ,校正板离轴量 ht ,校正板孔径 D ,则

$$hu = R \sin(u/2) \quad (11)$$

$$hp = R \sin(u/2) / \cos u \quad (12)$$

$$i = \arcsin(hp \cos u / R) \quad (13)$$

$$ht = R \sin(i + u) \quad (14)$$

$$D \leq 2(R \sin(i + u) - hp) \quad (15)$$

当 u 很小时, $hp \approx hu$, $D \approx 4hu$, u 与 D/hu 的关系如图5。

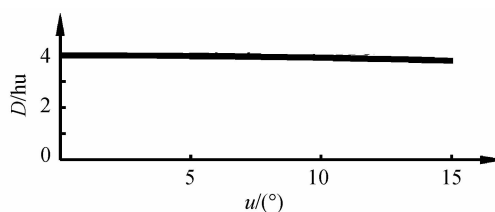


图5 入射角 u 与 D/hu 曲线
Fig. 5 Plot of u - D/hu

倾斜入射光线经圆形校正板反射后在球面主镜上形成椭圆形光斑,子午方向上 $\pm W_x$ 视场高度分别为: $D_{\pm} = D \cdot \cos(u \pm W_x)$,球差: $LA' = (D_{\pm}/2)^2 / 8f$,当校正板对零视场消球差时, $\pm W_x$ 视场依然存在球差,假设 $D = 200$ mm, $A = 1/5$, $R = 2000$ mm,利用式(10),可求出子午面的不同视场角的球差,如图6所示,子午方向随着视场增大,球差明显增大。

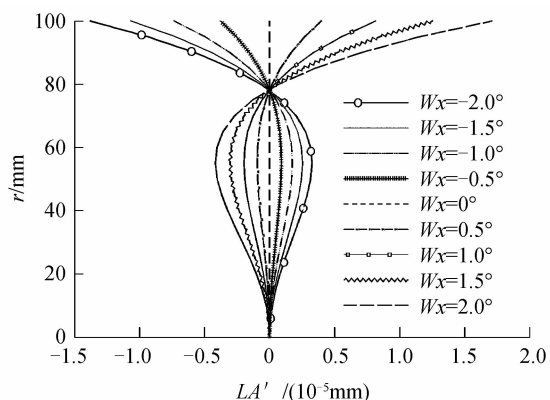


图6 子午面的视场角与球差曲线
Fig. 6 Plot of W_x - $LA'(r)$ at the meridian plane

3 紫外宽光谱施密特光学系统设计实例

天空背景紫外辐射光谱如图7,从中可以看出紫外光理想探测区域为 230~290 nm 之间,考虑到探测器截止波长 240 nm,将紫外波长定在 240 nm 以上,近红外截止波长取 950 nm 以满足实际需要。

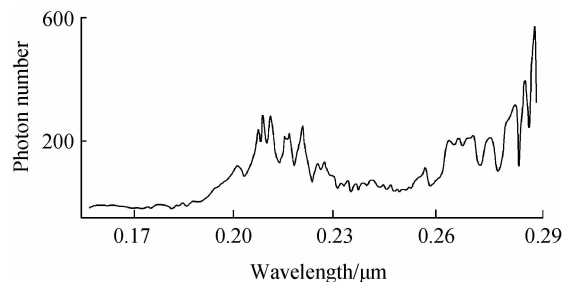


图7 天空背景的紫外辐射谱
Fig. 7 Ultraviolet radiant spectrum of the sky

紫外探测器选用上海技术物理研究所研制的“日盲”紫外 320×256 AlGaIn 焦平面探测器,像元中心距 $\leq 30 \mu\text{m}$,组件尺寸 $19.8 \times 15.9 \text{ mm}^2$,像面采用 2×8

组件阵列拼接而成,子午面半像高 $h \geq 15.9$ mm,若子午半视场取 1° ,则焦距 f 为 $f = h / \tan(\omega/2) = 15.9 / \tan(1^\circ) = 910.9$ mm, f 取整数 1 m,那么球面反射镜曲率半径 $R = 2f = 2000$ mm.

设计时,子午视场角留一定余量,取 $\pm 1.5^\circ$,同理,弧矢视场角取 $\pm 5^\circ$.考虑到后端分光元件的放置,像面边缘 hu_1 取 35 mm,校正板孔径 $D = 4hu_1 = 140$ mm,由式(11)求出此时校正板边缘光线入射角 u_1 ,即

$$u_1 = 2\arcsin(hu/R) = 2\arcsin(70/2000) = 2.0^\circ$$

中心视场光线倾斜角 $u_0 = u_1 + 1.5^\circ = 3.5^\circ$,设计留一定冗余取 4° .此时中心像高为

$$hu_0 = R\sin(4^\circ/2) = 70 \text{ mm},$$

$$i = \arcsin(hp\cos(u_0)/R) = 2^\circ$$

校正板离轴量为

$$ht = R\sin(i + u_0 - 1.5^\circ) = 157 \text{ mm}.$$

校正板中性带取 0.707 , $r_n = 0.707 \cdot D/2 = 49.49$ mm, $K = 6.123e-4$, $M = 3.063e-4$,利用式(10)分别求出校正板各项非球面系数初始值为 2^{th} : $\frac{1}{2\cos u} \frac{A_2}{R}$, 4^{th} : $-\frac{1}{2\cos u R^3}$, 6^{th} : $-\frac{1}{2\cos u R^5}$.

将计算结果输入到 ZEMAX 并进行设计优化,最终设计结果如表 1.

表 1 离轴全反射施密特光学系统设计参量
Table 1 Design parameters of off-axis all-reflective Schmidt optical system

| Surface | Type | Radius | Thickness | Glass | Semi-Diameter |
|---------|--------------|----------|-----------|--------|---------------|
| OBJ | Standard | Infinity | Infinity | - | Infinity |
| 1 | Standard | Infinity | 2000 | - | 252.647 |
| STO | Even Asphere | Infinity | -1999.83 | Mirror | 231.605 |
| 3 | Standard | 2000 | 994.446 | Mirror | 256.132 |
| IMA | Standard | 1008 | - | - | 129.975 |

校正板非球面系数 2^{th} : $-1.380957e-06$; 4^{th} : $1.540655e-011$; 6^{th} : $3.002951e-018$; 8^{th} : $-1.767704e-023$,校正板方程为

$$x = -1.380957 \times 10^{-6} y^2 + 1.540655 \times 10^{-11} y^4 + 3.002951 \times 10^{-18} y^6 + 1.767704 \times 10^{-23} y^8.$$

由表 1 可知像面场曲半径为 1008 mm,摆放在在曲面上的平面探测器不能共焦,其理论上最大离焦量为

$$\Delta f = r_{\text{img}} - \sqrt{r_{\text{img}}^2 - (l_{\text{sensor}}/2)^2} = 0.0486 \text{ mm}$$

调整探测器的位置,离焦量可以减少一半为 0.0243 mm,由焦深公式 $\Delta f \leq \lambda/n'u_m'^2$ 可知, $\lambda = 0.24 \mu\text{m}$, $u_m' = 5^\circ$ 时, $\Delta f \leq 0.0315$ mm,可见探测器可以控制在焦深范围内.

光学系统结构如图 8.图 9 是系统 MTF 图,表明设计结果达到了衍射限.

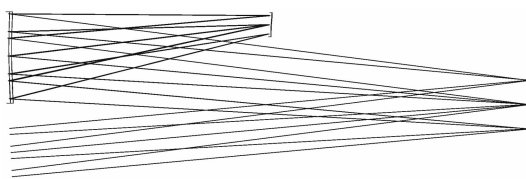


图 8 系统光路图

Fig. 8 Layout of optical system

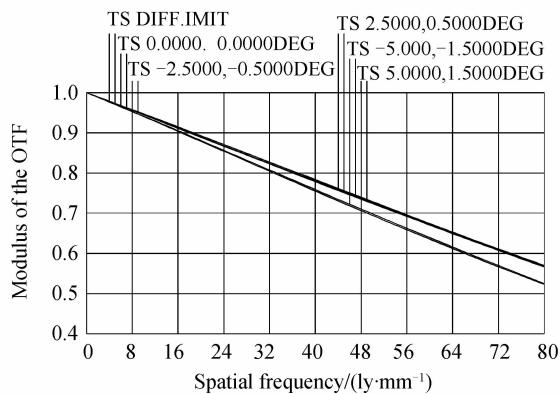


图 9 系统 MTF 图

Fig. 9 FFT MTF

4 结论

基于波前光程差相互抵消的关系推导了施密特反射校正板方程,提出了离轴全反射施密特系统设计的方法,给出了设计实例.离轴全反射施密特系统在对包括短波段的紫外光在内的宽光谱进行成像时,克服了紫外透射光学材料方面的限制,避免了其它光学系统在大视场下的多波段像差校正带来的色差问题并消除了光线遮挡,光学结构简单且成像质量高,因而具有其它光学系统无法取代的优势.由于施密特校正板无法对场曲进行补偿导致像面弯曲,加之光学系统镜筒过长,因此全反射施密特望远镜在校正场曲、系统小型化和宽波段分光方面还有待于进一步研究.

参考文献

- [1] ROBIN A, PIERRE E B, CHERVET P. UV missile plume signature model[C]. SPIE, 2002, **4718**: 344-355.
- [2] LIU Zhuang, GONG Yan. Design and analysis of optical system for solar extreme-ultraviolet imaging spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(7): 776-780. 刘壮, 巩岩. 太阳极紫外成像光谱仪光学系统设计与分析[J]. *光子学报*, 2012, **41**(7): 776-780.
- [3] MARTIN A, GREEN. Self-consistent optical parameters of intrinsic silicon at 300K including temperature coefficients[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2008, **92**(11): 1305-1310.
- [4] JIN Gui-ping, PANG Qi-chang. The key points of UV imaging and detecting system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(3): 294-297. 靳贵平, 庞其昌. 紫外成像检测技术[J]. *光子学报*, 2003, **32**(3): 294-297.
- [5] QUAN Li, WANG Ying, LONG Wei-gang, et al. Advances in UV image sensor technology [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2013, **34**(4): 537-541.

- 权利,王颖,龙维刚,等. 紫外图像传感器技术研究进展[J]. 半导体光电,2013,**34**(4):537-541.
- [6] LI Xiang-yang, XU Jin-tong, TANG Ying-wen, *et al.* GaN based ultraviolet detector s and its recent development [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(3): 276-280. 李向阳,许金通,汤英文,等. GaN 基紫外探测器及其研究进展[J]. 红外与激光工程,2006,**35**(3):276-280.
- [7] ZHANG Yan, WANG Ni-li, SUN Jing-lan, *et al.* New AlGa_N/PZT ultraviolet/infrared dual-band detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(2): 210-255. 张燕,王妮丽,孙璟兰,等. 新型的 AlGa_N/PZT 材料紫外/红外双波段探测器[J]. 红外与激光工程,2009,**38**(2):210-255.
- [8] LIU Xiu-juan, LI Chao, WANG Jian-lu, *et al.* Novel solar-blind photodetector using AlGa_N in combination with a PVDF film[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(11): 3035-3039. 刘秀娟,李超,王建禄,等. 结合 AlGa_N 和 PVDF 的新型日盲紫外探测器的研究[J]. 红外与激光工程,2013,**42**(11):3035-3039.
- [9] LIN Yan-cheng, XIAO Gong-hai, YUAN Li-ying, *et al.* Design of UV camera based on solar-blinded AlGa_N [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(7): 1879-1884. 林言成,肖功海,袁立银,等. 基于日盲型 AlGa_N 的紫外相机设计[J]. 红外与激光工程,2012,**41**(7):1879-1884.
- [10] WANG Yi-feng, YU Lian-jie, MA Yu. Development of solar blind single photon avalanche photodiode [J]. *Infrared Technology*, 2011, **33**(12): 715-720. 王忆锋,余连杰,马钰. 日盲单光子紫外探测器的发展[J]. 红外技术,2011,**33**(12):715-720.
- [11] GUO Bang-hui, WANG Jian, HUANG Jian-bo, *et al.* Design of tripleband optical imaging system and analysis of ghost image[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(1): 1-5. 郭帮辉,王健,黄剑波,等. 三波段光学成像系统设计及鬼像分析[J]. 光子学报,2014,**43**(1):1-5.
- [12] BAI Qing-lan, MIAO Xin-hua. Achromatized design of near UV- visible wide-angle objective[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(11): 1331-1335. 白清兰,苗兴华. 消色差的近紫外-可见光广角物镜设计[J]. 光子学报,2004,**33**(11):1331-1335.
- [13] YANG Liang, LI Zhao-hui, ZHANG Li-ping, *et al.* Design of reflector subassembly for lunar-based extreme ultraviolet camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(11): 1321-1326. 杨亮,李朝辉,张立平,等. 月基极紫外相机反射镜组件的设计[J]. 光子学报,2012,**41**(11):1321-1326.
- [14] CHEN Wei, XUE Chuang. Design of wide field-of-view off-axis three-mirror telescope for imaging spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(8): 950-955. 陈伟,薛闯. 用于成像光谱仪的宽视场离轴三反望远镜设计[J]. 光子学报,2013,**42**(8):950-955.
- [15] HAO Pei-ming, WANG Zheng-ting, YUAN Li-yin, *et al.* Design of reflecting Newton-Schmidt optical system [J]. *Optical Instruments*, 2008, **30**(4): 41-45. 郝沛明,王正亭,袁立银,等. 反射式牛顿-施密特光学系统设计[J]. 光学仪器,2008,**30**(4):41-45.
- [16] GARCHING G, BURKERT A. Astronomical optics and elasticity theory active optics methods[M]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009: 222-230.