

紫外宽幅离轴四反光学系统设计及其杂散光分析

朱 杨^{1,2} 张 新¹ 伍雁雄¹ 张继真¹ 史广维¹ 王灵杰¹

¹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

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为满足空间远紫外探测系统的超大视场、较大相对孔径、轻小型化、高消杂光比等要求, 提出利用反远距系统光焦度分配理论计算全球面反射系统的初始结构, 给出了一种焦距 $f'=12\text{ mm}$, F 数为3, 全视场 $70^\circ\times 10^\circ$ 的全球面离轴四反望远光学系统的设计方案。设计了系统内部的消杂光结构, 对系统进行杂光分析, 确定系统杂光主要来源, 并对相关结构优化, 给出了优化前后杂光定量对比结果。各视场光学传递函数在截止频率处大于0.7, 杂光规避角 10° 时点源透射比(PST)达到 4.2×10^{-7} , 远小于 5×10^{-5} 的指标要求。与其他系统相比, 该系统主要优点是可获得超大视场, 结构紧凑, 各反射镜均为球面且无倾斜, 有效降低了制造的周期与成本, 杂光规避角小且抑制比高。

关键词 光学设计; 离轴四反系统; 杂散光分析; 空间光学

中图分类号 V248.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0216001

Optical Design and Stray Light Analysis for Ultraviolet Broad Width Off-Axis Four Mirrors Optical System

Zhu Yang^{1,2} Zhang Xin¹ Wu Yanxiong¹ Zhang Jizhen¹ Shi Guangwei¹ Wang Lingjie¹

¹Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Chinese Academy of Sciences, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049 China

Abstract To satisfy the far ultraviolet space imaging system with super wide field, larger relative aperture, miniaturized size and good stray light suppression, a method based on the inverse focal power allocation theory is applied to calculate the structure of all spherical surface reflective system. The relevant technical parameters of all spherical off-axis optical system include focal length 12 mm, F number 3 and field of view $70^\circ\times 10^\circ$. Such a design will consider to eliminate stray light of optics and structure, analyze stray light and main sources. The modulation transfer functions (MTF) at the cutoff spatial frequency are larger than 0.7 at all fields and the point sources transmittance (PST) arrives to 4.2×10^{-7} which is far less than 5×10^{-5} when the evadable angle out of the field of view is 10° . Compared to other optical systems, the main advantage of this system is that it can achieve super wide field with compact structures, utilizes all spherical mirrors which largely decrease the cost of fabrication, and presents high level of stray light suppression.

Key words optical design; off-axis four mirrors system; stray light analysis; space optics

OCIS code 290.2648; 010.0280

1 引言

对透射式系统而言, 在紫外谱段下的光学玻璃材料很少, 折射率随波长变化剧烈, 难以有效地消除色差, 且光能在玻璃内部传播时能量损耗很大, 无法满足系统对光能量的要求, 并在具有折射率差的表面间因

收稿日期: 2014-08-12; 收到修改稿日期: 2014-09-09

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61007009)

作者简介: 朱 杨(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事光学系统设计和杂散光分析方面的研究。

E-mail: zhuyang_1989@126.com

导师简介: 张 新(1968—), 男, 博士, 研究员, 主要从事非常规复杂光学系统设计等方面的研究。E-mail: optlab@ciomp.ac.cn

菲涅耳损耗产生鬼像。而反射光学系统具有轻量化,结构紧凑,对温度变化不敏感,宽波段等诸多优势,被越来越多地应用在空间遥感探测领域。同轴卡塞格林系统由于像散和场曲的限制,其半视场一般在 1° 以内,且宽视场下中心遮过大,影响系统分辨率和光能利用率,因此为实现较大视场,一般采用离轴反射结构^[1-6]。传统的离轴三反消像散系统(TMA)一般为线阵成像,难以实现较大相对孔径的面阵成像,且为满足像质需求往往加入高次非球面甚至自由曲面,而在紫外波段下复杂面型反射镜的制造很难满足公差中对粗糙度均方根(RMS)半径的要求^[7-9]。

空间光学系统易受太阳、地球、月亮等视场外强杂光光源的影响,其辐射亮度往往比观测目标高出几个数量级^[10],为提高系统信噪比,保证在轨空间系统的成像质量和目标分辨能力不受杂光干扰,需对光学系统进行杂散光分析,避免低级次散射杂光到达探测器。目前离轴光学系统往往采用复杂非球面甚至自由曲面并伴随反射镜的倾斜,且杂光规避角往往大于 40° ,针对大视场、小规避角的离轴系统杂光分析尚不系统充分^[7-8,11-13],而离轴非球面不利于零件的加工检测与装调,价格昂贵,增加系统的制造周期与成本^[14-15]。本系统子午方向成像半视场为 5° ,要求该方向太阳规避角为 10° 时点源透射比(PST)迅速衰减至 10^{-6} 量级,由于系统视场很大,且规避角离视场很近,杂光抑制难度很大,由于避免使用非球面,反射镜共轴且无倾斜,系统制造成本和难度大大降低。

本文避免了传统的利用反射镜遮拦比和二阶非球面系数校正同轴系统像差的复杂的初始结构计算方法^[16-17],通过类比透射式反远距系统设计理论,提出一种基于光焦度分配原理计算系统的初始结构的简洁算法,并在计算求得的初始结构基础上,设计实现了一种参数为焦距 $f'=12\text{ mm}$ 、 F 数为3、全视场为 $70^\circ\times 10^\circ$ 的新型全球面离轴四反光学系统,系统结构紧凑像质良好。为有效消除系统杂散光,设计了外遮光罩和内部消杂光结构,并根据关键路径追迹结果对严重影响成像的杂光路径提出有效的抑制措施,使系统在大于外部杂光规避角 10° 时PST达到 10^{-7} 量级。

2 光学系统设计

2.1 设计思想及原理

离轴反射光学系统是以同轴反射系统为初始结构,通过偏光瞳或偏视场来优化得到的。为实现大视场、大相对孔径、长工作距,通过透射光学系统中反远距物镜的设计思想进行类比,并对系统各个光学元件进行光焦度分配。反远距物镜亦称广角长工作距物镜,可同时实现广角和长工作距的要求,采取负正光焦度分离,负光焦度镜组为前组,正光焦度镜组为后组。其高斯光学如图1所示,光线经前组发散进入后组,使整个系统后主面向后移出物镜之外,从而获得比焦距还长的后工作距。对于大视场的轴外光线,经前组发散后,相对于后组视场角变小,从而达到广角的目的。

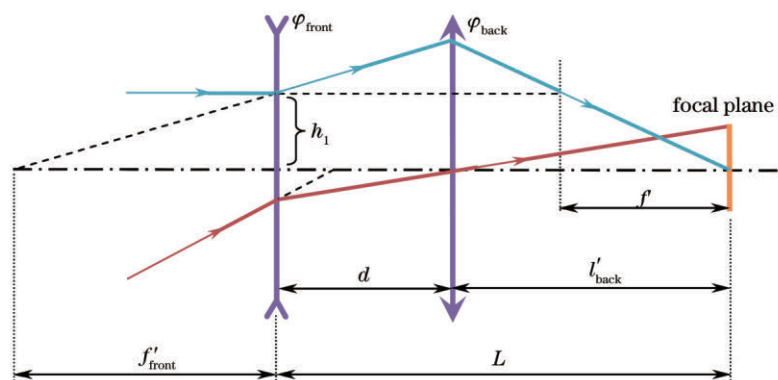


图1 反远距光学系统的高斯光学

Fig.1 Gaussian optics of inverted telephoto optical system

为便于公式的推导,取在归一化条件下,即系统总光焦度 φ 为1,光线入射高度 h_1 为1。对于反射系统,不受光学元件折射率和厚度的影响,可将各个光学元件当做理想薄透镜。设 φ_{front} 为前组光焦度, φ_{back} 为后组光焦度, f' 为总焦距, d 为前后组间距, l'_{back} 为后截距,前后组角放大率分别为 A_{front} 和 A_{back} ,则系统后截距 l'_{back} 为

$$l'_{\text{back}} = 1 - d\varphi_{\text{front}} = A_{\text{front}}. \quad (1)$$

前组 A_{front} 越大,系统的视场角越大,后截距也越长,大多数反远距系统力求使 A_{front} 尽量大些。对于单片球面反射镜作为前组的情形,在保证较大相对孔径下,其 A_{front} 难以满足要求,需对前组进行复杂化。在透射光学系统中,对于较小的 A_{front} 值,可采用单片弯月形负透镜作为前组;对于较大的 A_{front} 值,则需对前组进行复杂化,一般在前组前再加入无光焦度的套筒,负责分担 A_{front} 并校正像差。本系统采用无焦的反转伽利略望远结构作为附加组,分担单片负光焦度的前组 A_{front} 值。系统的前组、后组和附加组各个结构如图2所示前组由负正两片反射镜组成,光焦度分别为 φ_1 和 φ_2 。系统总角放大倍率 A 为

$$A = A_{\text{front}} \cdot A_{\text{add}}. \quad (2)$$

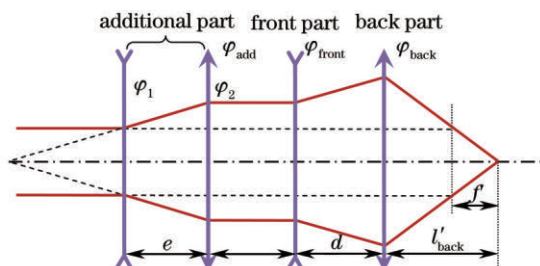


图2 复杂化后光学系统结构示意图

Fig.2 Sketch of optical system after complication

系统初始结构求解方程组为

$$\begin{cases} A_{\text{add}} = 1 - d\varphi_{\text{add}} + e(\varphi_{\text{add}} - \varphi_1) = 1 - e\varphi_1, \\ \varphi_1 + \varphi_2 - e\varphi_1\varphi_2 = 0, \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \varphi_{\text{front}} = \frac{f' \cdot A_{\text{add}}}{d} (1 - A_{\text{front}}), \\ \varphi_{\text{back}} = \frac{1 - \varphi_{\text{front}}}{A_{\text{front}}}. \end{cases} \quad (4)$$

若已知系统总焦距 f' 、 F 数和后截距,通过合理选择前组和附加组的角放大倍率,并根据上述公式完成系统各反射镜的光焦度分配,可获得较大相对孔径下的反远距初始结构参数,再通过适当的偏视场并适当调整反射镜间距和偏心量从而获得合理的离轴系统初始结构。

2.2 光学系统设计参数

光学系统工作波段为 140~180 nm,焦距 $f'=12$ mm, F 数为 3,全视场 $70^\circ \times 10^\circ$,系统总体长度要求小于 30 mm,后截距大于 18 mm,探测器为像元尺寸 75 μm 的紫外光子计数器。

2.3 设计结果与像质评价

为满足系统后截距大于 18 mm 的指标,系统总角放大倍率 A 需大于 1.5,选取 $A_{\text{front}} = 1.154$, $A_{\text{add}} = 1.3$,将光阑设置在次镜和三镜中间,根据前文的光焦度分配理论公式,求解出系统的初始参数,其计算结果如表 1 所示, F 数分别为 3 和 6 时系统的初始结构如图 3 所示。

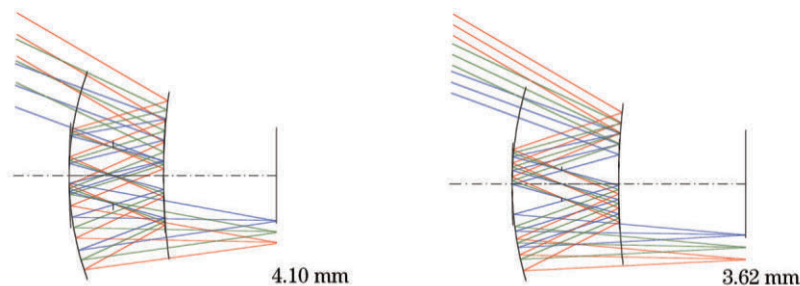


图3 四反光学系统的初始结构

Fig.3 Initial structure of the four mirrors system

表1 光学系统初始结构参数

Table 1 Original structure parameters of optical system

Surface	R/mm	d/mm
Primary mirror	58.8	-8.82
Secondary mirror	82.32	8.82
Tertiary mirror	90.43	-8.82
Forth mirror	27.98	19.35

在保证系统总长上限的前提下,尽可能拉开反射镜的间距,以便为消杂光结构提供更多空间。由于系统工作波段为远紫外,对反射镜表面的粗糙度均方根(RMS)有很高要求,采用球面代替高阶非球面能有效降低加工的难度和成本,然而也相应大大减少了设计与优化中的变量个数,增加了像差校正的难度。此外为便于离轴系统装调时基准的建立,将三镜设为方形光阑,四片反射镜共光轴,像面与光轴垂直。采用离轴偏视场设计,子午方向视场为 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$,弧矢方向视场为 $-35^{\circ}\sim +35^{\circ}$,系统最大畸变为 -9.7% 。优化后的光学参数如表2所示,最终光学结构的三维立体图如图4所示,系统总长为26.3 mm,结构较为紧凑,成像光路有较大的分离空间,有利于反射镜的遮蔽与消光挡板的设计。根据探测器的像元尺寸大小,确定系统截止频率为6.8 lp/mm,调制传递函数(MTF)曲线如图5所示,在截止频率处MTF值大于0.7,满足成像质量要求。

表2 优化后的光学系统结构参数

Table 2 Parameters of optical system after optimization

Surface	R/mm	d/mm
Primary mirror	35	-22
Secondary mirror	43	19.26
Tertiary mirror	36	-13
Forth mirror	30.6	20

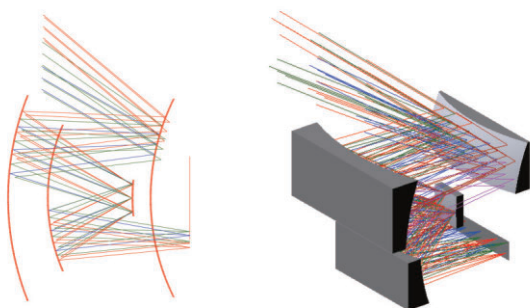


图4 最终光学系统结构图

Fig.4 Layout of the final optical system

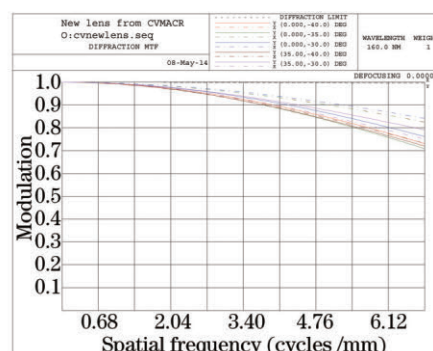


图5 调制传递函数曲线

Fig.5 Curves of modulate transfer function

3 系统杂光的分析与抑制

杂散光是指所有到达探测器上的非成像光线,主要包括太阳月亮地气等外部杂散辐射、光学系统内部自身杂散辐射和成像光线经非成像光路形成的鬼像。对于紫外波段反射式光学系统,第一部分杂光占主导。若不对杂光进行有效地抑制,很可能形成较强的杂散噪声,降低系统探测质量。

3.1 一次杂光分析与抑制

相同反射镜表面粗糙度下,紫外波段的杂光散射比可见和红外波段更为严重,不仅要避免一次杂光直接到达探测器,同时避免太阳等强杂光光源直接照射系统各个反射镜上,并尽量减小一次散射杂光到达反射镜上的比例。为保证后续光机组件的安装空间,需提供足够的后截距,后截距的增加会使像质显著下降,增加像差校正的难度,与此同时像面将不再被次镜直接照射,有利于杂光的抑制。由于系统反射镜数量较多,成像视场很大,成像光路包络占据大部分光学系统内部空间,必须对系统进行一次杂光分析与抑制。

对于反射系统一次杂光的抑制,主要是防止视场外杂光不经任何消光结构的朗伯散射衰减,直接或通过反射镜的纯反射到达像面^[18],这类杂光能量很强,往往湮没目标信号,甚至迅速使探测器局部像元过饱并烧毁探测器。如图6所示,消光设计优化前,部分规避角外的杂光会经三镜和四镜的纯反射直接到达像面,形成一次杂光,必须进行有效的抑制。可采用的方法有在反射镜周围增加消光挡板,并尽可能延长外遮光罩的长度。增加反射镜间的离轴量有利于延长内部消光挡板的尺寸,同时尽量减小各反射镜的尺寸,减小关键面面积,提高系统杂光抑制水平。

根据光学设计软件Code V的设计结果,结合反射镜位置和光线走向,设置优化消光挡板,消除局部漏光的蒙皮结构,适当延长外遮光罩尺寸,并利用SolidWorks软件建立系统三维结构模型如图7所示,为便于观察,隐去部分机械结构,优化后的光机结构能够完全消除系统一次杂光。

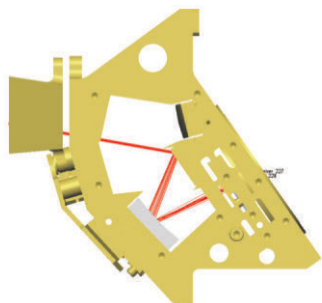


图6 优化前系统一次杂光示意图

Fig.6 First order stray light of system without optimization

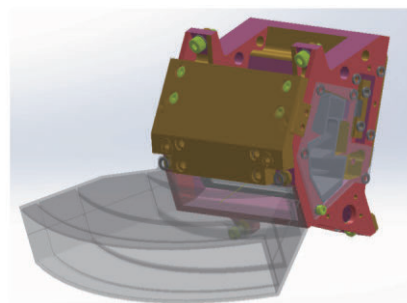


图7 优化后光机系统模型

Fig.7 Model of opto-mechanical structures after optimization

3.2 系统杂光仿真与评价

在杂光分析软件中建立相关光机模型,对主镜和三镜光阑附近挡板等局部敏感面进行蜂窝化处理,提高结构件表面的吸收率,并根据实际测量的双向反射分布函数(BRDF)值,对光机表面赋予相应的散射属性。对杂散光进行的计算,主要是基于随机模拟的蒙特卡罗统计法和基于光传播规律的光线追迹法。光学系统杂散光抑制水平主要由PST进行评价,其定义为光学系统视场外离轴角 θ 的光源经光学系统后,在像面处产生的辐照度 $E_d(\theta)$ 与垂直于该点源的入瞳处辐照度 $E_i(\theta)$ 的比值^[19-20]:

$$S_{\text{PST}} = \frac{E_d(\theta)}{E_i(\theta)} \quad (5)$$

PST比体现了光学系统本身对点源杂光光源的衰减能力,PST越小表示系统杂光抑制能力越强。

根据系统所需SNR的要求,确定PST需小于 5×10^{-5} ,通过大量随机光线追迹,消光结构优化前后系统各离轴角度下的PST仿真结果对比如图8、图9所示。由于离轴系统失对称,PST曲线在子午方向上不再对称,将朝向三镜一侧的入射方向规定为正方向。优化前系统PST在 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 量级,在子午方向 $+15^\circ \sim +25^\circ$ 左右,由于外部杂光直接打到三镜上,导致PST曲线上扬。设计优化后,系统子午方向在规避角 10° 处的PST为 10^{-7} 量级,弧矢方向在 45° 处的PST为 10^{-7} 量级。消光设计优化后,PST曲线衰减明显,规避角外的杂光抑制水平满足系统的使用需求。

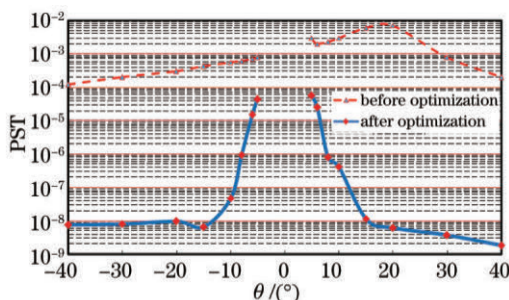


图8 子午方向点源透射比曲线

Fig.8 PST curves of tangential plane

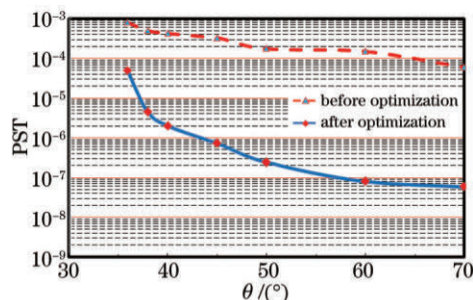


图9 弧矢方向点源透射比曲线

Fig.9 PST curves of sagittal plane

4 结 论

将光学设计与杂散光抑制相结合,通过类比透射式反远距系统设计理论,提出了利用光焦度分配,对大视场离轴反射系统初始结构进行求解,设计了工作波段为 140~180 nm,焦距 $f'=12$ mm, F 数为 3,全视场 $70^\circ\times 10^\circ$,后截距为焦距 1.5 倍的离轴系统,四片反射镜全部采用球面设计,大大降低了系统加工检测和装调的周期与成本。通过杂光路径的分析,改善杂光抑制措施,并对各离轴角度进行 PST 的计算。系统像质良好,结构紧凑,在规避角 10° 以外, PST 达到 4.2×10^{-7} ,满足空间紫外探测的使用要求。为低成本、轻小型化空间光学遥感器的设计及杂光仿真提供一定参考。

参 考 文 献

- 1 Yu Lei, Lin Guanyu, Yu Xiangyang. Optical system of far ultraviolet imaging spectrometer for space-based upper atmosphere remote sensing[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0122001.
于磊,林冠宇,于向阳.空间高层大气遥感远紫外成像光谱仪的光学系统[J].光学学报,2013,33(1): 0122001.
- 2 M Lampton, M Sholl. Comparison of on-axis three-mirror-anastigmat telescopes[C]. SPIE, 2007, 6687: 66870S.
- 3 Mehdi Bahrami, Alexander V Goncharov. All-spherical catadioptric telescope design for wide-field imaging[J]. Appl Opt, 2010, 49(30): 5705-5712.
- 4 Chang Jun, Weng Zhicheng, Jiang Huilin, *et al.*. Design on three-reflect-mirror system used in space[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(2): 216-219.
常军,翁志成,姜会林,等.用于空间的三反射镜光学系统设计[J].光学学报,2003,23(2): 216-219.
- 5 Guo Yongxiang, Li Yingcai, Liang Tianmei, *et al.*. Optical design of the uncoaxial three-mirror system with wide field of view[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2680-2683.
郭永祥,李英才,梁天梅,等.一种大视场离轴三反射光学系统研究[J].光学学报,2010,30(9): 2680-2683.
- 6 Wei Xiaoxiao, Xu Feng, Yu Jianjun. Design of space coaxial field-bias three mirror optical system with high resolution[J]. Chinese J Laser, 2012, 39(4): 0416002.
韦晓孝,许峰,余建军.高分辨率空间同轴偏视场三反光学系统设计[J].中国激光,2012,39(4): 0416002.
- 7 Wang Lingjie, Zhang Xin, Zhang Jianping, *et al.*. Free-form surface space optical system[J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(6): 1040-1046.
王灵杰,张新,张建萍,等.自由曲面空间光学系统设计研究[J].应用光学,2012,33(6): 1040-1046.
- 8 Zhang Xin, Zheng Ligong, He Xin, *et al.*. Design and fabrication of imaging optical systems with freeform surfaces[C]. SPIE, 2012, 8486: 848607.
- 9 Lin Jing, Cui Qingfeng, Zhu Hao. Research of board width off-axis three mirror optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0722022.
林晶,崔庆丰,朱浩.宽幅离轴三反光学系统研究[J].光学学报,2013,33(7): 0722022.
- 10 Lin Jianchun, Sun Liwei, Chen Boyang, *et al.*. Stray light analysis of a coaxial two reflect mirror system and optimized design of inner photomask[J]. Chinese J Laser, 2013, 40(1): 0116001.
林剑春,孙丽巍,陈博洋,等.同轴两反光学系统杂散光分析及内遮光罩优化设计[J].中国激光,2013,40(1): 0116001.
- 11 Yan Changxiang, Xu Jie, Peng Yan. Stray light suppression of three-mirror off-axis space optical telescope[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(2): 290-292.
颜昌翔,许杰,彭岩.离轴三反空间光学望远系统的杂散光抑制[J].光学精密工程,2010,18(2): 290-292.
- 12 Zhong Xing, Zhang Lei, Jin Guang. Stray light removing of reflective optical system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(2): 316-318.
钟兴,张雷,金光.反射光学系统杂散光的消除[J].红外与激光工程,2008,37(2): 316-318.
- 13 Zou Gangyi, Fan Xuewu. Baffle design and stray light analysis of the off-axis three-mirror telescope[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(3): 605-609.
邹刚毅,樊学武.离轴三反射望远镜遮光罩设计与杂光分析[J].光子学报,2009,38(3): 605-609.
- 14 Michael Bass. Handbook of Optics[M]. 3rd ed. New York: McGraw-Hill Companies, Inc, 2010. 2901-2938.
- 15 Zhang Feng. Fabrication and testing of precise off-axis convex aspheric mirror[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(12): 2557-2563.

- 张 峰. 高精度离轴凸非球面反射镜的加工及检测[J]. 光学精密工程, 2010, 18(12): 2557-2563.
- 16 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、加工与检测[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004.
- 17 Liu Xiaomei, Xiang Yang. Research and design of telecentric off-axis three-mirror system with real entrance pupil[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(11): 1122002.
- 刘晓梅, 向 阳. 具有实入瞳的远心离轴三反系统研究与设计[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1122002.
- 18 Yang Lin, Li Da, Cui Tiangang, *et al.*. Measurement and elimination of stray light from space solar telescopes for imaging test at UV band[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(7): 1456-1463.
- 杨 林, 李 达, 崔天刚, 等. 空间太阳望远镜在紫外波段成像检测中的杂散光测量和消除[J]. 光学精密工程, 2011, 19(7): 1456-1463.
- 19 Stauder J, Zollinger R. Stray light analysis of the SABER telescope[C]. SPIE, 1995, 2553: 264-270.
- 20 Yan Peipei, Fan Xuewu, Zou Gangyi, *et al.*. Stray light removing design and simulation of the three-mirror optical system used in field bias[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(10): 1997-2002.
- 闫佩佩, 樊学武, 邹刚毅, 等. 偏视场用三反系统消杂光设计及仿真[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(10): 1997-2002.

栏目编辑: 韩 峰