

文章编号 1004-924X(2011)07-1503-07

“日盲”紫外折反射全景光学系统设计

王丽萍*, 李 春, 金春水

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:利用折反射全景成像系统的大视场和高噪声屏蔽特性,研制了一套视场角为 $360^\circ \times (45^\circ \sim 90^\circ)$, 相对孔径为 1:2 的“日盲”紫外折反射全景光学系统,用于紫外目标探测研究。综述了紫外探测技术要素,确定了紫外折反射全景光学系统设计参数。基于像差理论及紫外光学系统特性,从参数分配、初始结构求解入手,采用分裂透镜、加齐明镜等方法设计了光学系统。分析结果表明,“日盲”紫外折反射全景光学系统各视场能量集中度为 80% 的弥散圆直径均小于 $20 \mu\text{m}$, 低于紫外 ICCD 像元尺寸的 $30 \mu\text{m}$, 各视场 $\text{MTF} > 0.7 @ 17 \text{ lp/mm}$, 满足设计指标要求。实验验证了外折反射全景技术用于电晕探测的可行性,实验图像成像效果良好。

关键词:“日盲”紫外;折反射全景光学系统;光学设计

中图分类号: TN23; TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111907.1503

Design of catadioptric omnidirectional imaging system in solar blind UV

WANG Li-ping*, Li Chun, JIN Chun-shui

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: wlp8121@126.com

Abstract: According to the characteristics of a catadioptric omnidirectional imaging system in larger fields and higher noise shielding, the catadioptric omnidirectional optical system with a field of view in 360° horizontal azimuth and 45° to 90° elevation and operating in the region of Solar Blind UV was developed to detect UV targets. The key elements of the UV detection technology were overviewed and the design parameters for the catadioptric omnidirectional imaging system in Solar Blind UV (SBUV) were determined. Based on the aberration theory and characters of UV optical system, the processes of optical design including the allocation of parameters, solution of initial structure and the lens splitting were presented. The design results show that the diameter of 80% encircled energy of SBUV panoramic imaging system is $20 \mu\text{m}$, which is smaller than the pixel size of ICCD, and the MTF value of the system is higher than $0.7 @ 17 \text{ lp/mm}$ over all fields. These data satisfy the requirements of the system. Furthermore, experiments are carried out to verify the feasibility of panoramic imaging in corona detection, and the results indicate that the image obtained has good quality.

Key words: solar blind UV; catadioptric omnidirectional optical system; optical design

1 引言

折反射全景成像技术利用折反射光学元件结合数字图像处理来实时获得完整的全景环形图,近年来,该技术在空间目标探测,机器人导航,安全监控等领域得到了广泛应用^[1-4]。如美国军方以折反射全景镜头为核心研发了红外多目标探测跟踪设备^[5-10],从而将折反射全景成像研究拓展到军事应用领域。目前,该系统凭借其结构简单、光能损失低、视场大等优势成为多个领域的研究热点,尤其在可见光及红外波段目标监测技术中极受关注^[11-12]。但是,折反射全景成像技术至今尚未在紫外波段得到应用。紫外探测技术集中在 240~280 nm 紫外波段,这一波段的太阳辐射被臭氧层强烈吸收,在近地大气中几乎不存在,被称之为“日盲”紫外。在日盲区,火焰及高压放电电晕等目标产生的紫外辐射在微弱的辐射背景噪声下很容易显现出来,紫外探测技术正是通过探测这些光谱信号实现对危险目标的监测。

本文在总结紫外全景技术实现的难点及其对光学系统设计的特殊要求的基础上,提出了紫外折反射全景光学系统的设计方法,研制了用于探测电晕放电的“日盲”紫外折反射全景系统,该系统的研制可为探索紫外全景成像技术,及其在电晕放电、火险探测等领域的应用提供支持。

2 紫外探测技术要素

2.1 紫外探测器

紫外探测器件是紫外探测技术实现的基础,可分为光敏电真空器件、固体器件、组合器件 3 种类型。组合型器件主要包括增强型 CCD(Intensified CCD, ICCD) 和电子轰击 CCD(Electron Bombarded CCD, EBCCD)。这种紫外探测器能精确接收紫外辐射,并对所观测的空域进行成像探测,具有识别能力强、探测灵敏度高的优点。ICCD 紫外探测器件在微光探测和紫外探测中应用广泛。

2.2 日盲紫外带通滤光片

有效屏蔽紫外探测器对“日盲”紫外波段外太阳辐射的响应是实现“日盲”紫外波段目标探测的前提。“日盲”紫外探测器通常采用所谓“日盲”型

阴极,如铯碲化物或铷碲化物实现屏蔽。但实际上“日盲”型光电阴极在长波紫外区仍具有较高的灵敏度,即使采用前面提到的紫外加强型 UVIC-CD,在“日盲”区以外仍有较高的光谱响应,而太阳光谱在这一波段的辐射强度非常高,为确保探测器在日照环境下仍能正常工作,必须使用带内高通、带外深度截止的滤光片。

2.3 紫外光学系统

紫外光学系统是紫外探测技术的核心。目标探测系统的发展需要全向和实时探测能力,追求全空域的实时信息获取,这对紫外光学系统提出了大相对孔径、大视场的要求。但是,紫外光学材料色散大、折射率低,不利于紫外光学系统的像差校正。因此,大视场、大相对孔径的紫外光学系统设计是紫外探测技术的关键。

“日盲”紫外折反射全景光学系统采用镀有“日盲”紫外高反膜的反射元件,在扩大视场的同时提高系统屏蔽噪声的能力。同时,反射元件的引入也带来了严重影响系统成像质量的像差,必须通过合理的参数分配及像差平衡来保证光学系统的质量。

3 “日盲”紫外全景光学系统设计指标

紫外折反射全景系统是对目标信号进行能量探测的系统,系统相对孔径为 1:2;为实现大范围目标探测,系统视场定为 $360^\circ \times (45 \sim 90^\circ)$ 。“日盲”紫外全景光学系统通过引入反射及透射型干涉滤光片来确保探测器在日照环境下正常工作。为避免薄膜峰值漂移,紫外带通滤光片上入射光线角度应控制在 10° 以内。紫外探测器选用阴极尺寸为 $\Phi 20$ mm,最小像元为 $30 \mu\text{m}$ 的 ICCD 相机,系统各视场弥散斑直径应小于 $30 \mu\text{m}$ 。

4 设计过程

“日盲”紫外全景系统相对孔径大,分辨率要求相对低,因此反射镜组的 F 数是关键参数,它决定了反射镜组及中继镜的光学参数分配,并直接影响系统的结构尺寸及像差校正。这里反射镜组的 $F/\#_{\text{uv,ref}}$ 取值为 3.3。

4.1 反射镜组设计

反射镜组由壳型负透镜及凹面、凸面反射镜

组成,如图1所示,它提供适当的角放大倍率以扩大视场。设计时主要兼顾系统焦距和结构尺寸的要求,在各视场光路无遮拦的前提下进行像差校正。反射镜组没有进行独立校像差设计,而是允许系统保留一定量的正场曲,从而有利于整个全景系统的像差平衡。中继镜是一个大相对孔径,中等视场的光学系统,对光线会聚作用强烈,容易产生负场曲,可以与反射镜组残余的正场曲平衡。另外,要适当控制正场曲的残余量,同时,“日盲”紫外全景系统属于大像差系统,为减少各像差高级量,应尽量控制初级像差。设计初始结构时,为避免产生大量的像散、场曲,需使两反射面的曲率半径近似相等。壳型负透镜减小了主镜光线入射角度并有助于次镜安装,其引入的场曲和垂轴色差由中继镜组予以补偿。

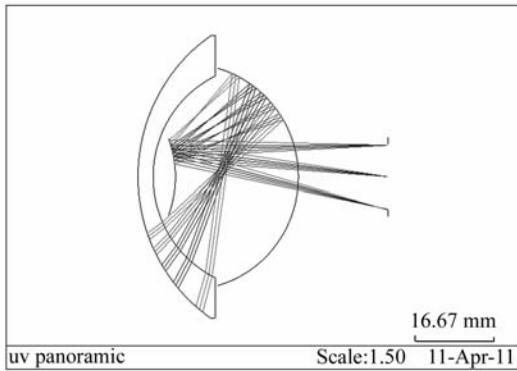


图1 反射镜组

Fig. 1 Layout of panoramic shell

4.2 中继镜组设计

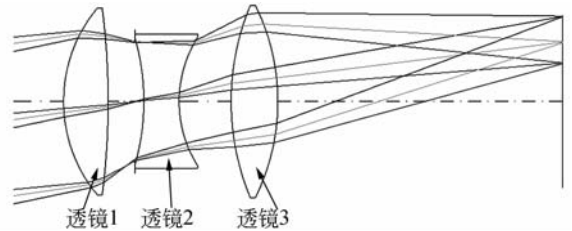
透射式中继镜的作用是将反射镜组所成的虚像以适当倍率成像到光电阴极上。设计中要保证光瞳匹配,并将光学系统像差校正到一定状态以便与反射镜组像差相互平衡。根据参数分配,中继镜 $F/\#$ 为 1.1,半视场角为 10.8°

4.2.1 初始结构求解

中继镜应校正初级球差、彗差、轴上色差和垂轴色差,并产生一定量的与反射镜组反号的初级像散及场曲,以此来实现像差补偿,与反射镜组拼接后再进一步平衡系统像差。满足上述要求的最简单光学系统需 3 片透镜,能提供 8 个自由度,分别是 3 个光焦度、3 个弯曲及 2 个透镜间隔。

首先求解能够满足光学系统总光焦度、场曲及色差要求的透镜光焦度和间隔,再通过透镜弯曲校正球差、彗差及像散。本文采用 2 组分离的

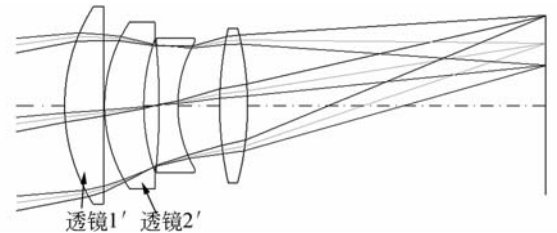
正透镜实现光线会聚,并在前组正透镜后加入一个负透镜以平衡场曲。由于较小的反射镜组出瞳距导致中继镜入瞳距较小,在初始结构求解中假设光阑位于负透镜上,求解及优化后得到的结构如图 2 所示。系统的 $F/\#$ 值为 2.9,而球差是阻止相对孔径增大的主要因素。减小球差的主要方法有是利用初级像差与高级像差平衡,或者分离光焦度即分裂透镜。

图2 $F/\#$ 为 2.9 的中继镜Fig. 2 Relay lens with $F/\#$ of 2.9

4.2.2 复杂化设计

(1) 加入齐明透镜

将原透镜 1 分为光焦度比为 2:1 的两个正透镜,如图 3 所示。新增的透镜 2' 的第一个面为第三类齐明点,第二个面为第二类齐明点,加入齐明镜后各透镜光焦度将减小,系统球差初级量和高级量都明显减小, $F/\#$ 提高至 2.2。

图3 $F/\#$ 为 2.2 的中继镜Fig. 3 Relay lens with $F/\#$ of 2.2

(2) 分裂正透镜

要想提高系统相对孔径必须进一步校正系统的球差、场曲及沿轴色差。校正像差的方法只有继续分裂透镜,所依据的薄透镜系统初级像差系数公式^[13]为

$$\begin{aligned} \Sigma S_{IV} &= J^2 \Sigma \frac{\varphi}{n} \\ \Sigma C_I &= \Sigma h^2 \frac{\varphi}{v}, \\ \Sigma C_{II} &= \Sigma h h_p \frac{\varphi}{v} \end{aligned} \quad (1)$$

式中, ΣS_{IV} 为初级场曲系数, ΣC_I 为初级位置色差系数, ΣC_{II} 为初级倍率色差系数, J 为拉氏不变量, φ 为光焦度, n 为折射率, v 为阿贝数, h 为光线高度, h_p 为主光线高度。

初级场曲, 沿轴色差和垂轴色差的校正主要依赖于透镜正负光焦度匹配, 而初级球差的校正也需借助光焦度分配。因此将正透镜 $1'$ 分裂为负透镜 $1''$ 和正透镜 $2''$ 以减小像差, 如图 4 所示。当正负透镜组合光焦度相等时, 正负透镜的排列顺序对系统像差校正有影响。当负透镜 $1''$ 在前时, 组合主面在负透镜 $1''$ 之前, 前片轴外主光线高度较低, 组合透镜前片口径小, 轴外视场的高级像散和高级彗差也可以降低。

中继镜后组中要加入诱导透射滤光片实现带外深度截止, 入射到滤光片上的光线角度要严格限制在 $\pm 10^\circ$ 之内。选用负正型组合有利于控制滤光片入射角, 由于减小了后续镜组视场角, 系统的像散和场曲降低, 像面照度得到提高。分裂透镜后, 对系统重新优化, 系统相对孔径提高到 $1/1.8$ 。

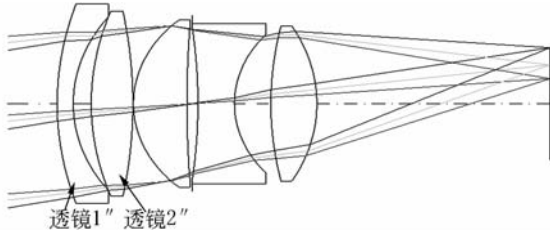


图 4. $F/\#$ 为 1.8 的中继镜

Fig. 4 Relay lens with $F/\#$ of 1.8

(3) 分裂负透镜

正透镜分裂后系统光焦度重新分配, 前组光焦度降低, 后组光焦度相应增大, 使得后组高级像差增大。随着相对孔径提高到 $1/1.1$, 系统球差和轴向色差也明显加大, 且球差、场曲及轴向色差都为负值, 该结果是由系统对光线会聚能力强、正光焦度较大造成的。

另外, 中继镜结构紧凑, 透镜间不宜分离过远。虽然前组光线高度略大, 但后组已承担部分光焦度, 受系统入瞳距限制, 前组不适合再引入负光焦度, 因此, 系统场曲的校正比较困难。

在总光焦度及系统结构基本不变的条件下, 轴向色差的校正要依靠正负透镜并使用色散差值大的光学材料。“日盲”紫外全景中继镜受到光学

材料限制负透镜只能选融石英, 而正透镜选用氟化钙。这两种材料色散差值小, 但在短波区色散大, 这两个因素制约了系统的色差校正。比较而言, 中继镜的球差校正相对容易, 继续进行透镜分裂就可实现。为兼顾场曲、色差的校正, 对后组复杂化, 即将负透镜分成负、正、负 3 个透镜。

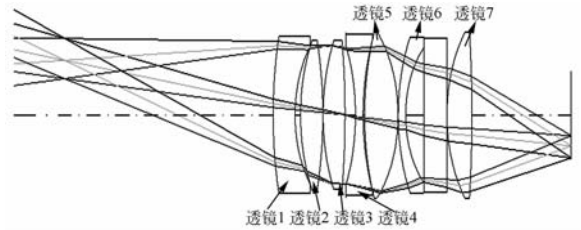


图 5 $F/\#$ 值为 1.1 的中继镜

Fig. 5 Relay lens with $F/\#$ of 1.1

负透镜分裂后, 系统光焦度重新调整, 各透镜光焦度下降, 像差高级量减小。由于产生正球差的透镜表面增加, 单面负担的球差量减小, 从而避免了大像差补偿。将负透镜分成负、正、负型除了校正正球差外还有两个原因: 其一有利于对系统分组进行色差校正, 新结构将系统分成了能够分别校正色差的 3 组, 如图 5 所示: 透镜 1 与透镜 2, 透镜 3、4、5 以及透镜 6 和 7。3 组透镜独立校正轴向色差, 垂轴色差便可自动校正。其二是为了控制光线角度, 以满足所有光线的入射角都控制在 $\pm 10^\circ$ 以内的滤光片要求。分析比较表明, 负、正、负型是最利入射角控制的结构型式, 优化后的系统像差都已控制在允许值之内, 并留有一定量的场曲、像散与反射镜组平衡。

4.3 像差平衡

中继镜与反射镜组连接后, 进行像差平衡, 得到了如图 6 所示的“日盲”紫外折反射全景系统。此系统最严重的像差是场曲和轴向色差, 其主要

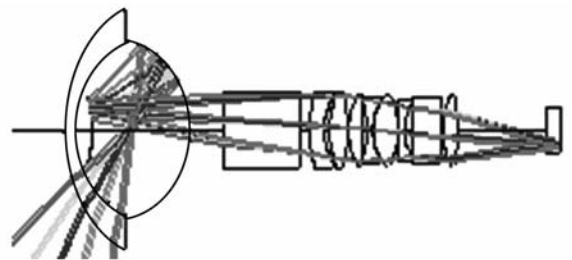


图 6 日盲紫外折反射全景光学系统

Fig. 6 Layout of catadioptric omnidirectional optical system in SBVU

来源于中继镜。另外,负场曲的残余量也很大,但为了避免大像差补偿,这里放松公差要求,同时注意设计反射镜组时不能保留过多的正场曲。系统场曲大的另一个原因是系统场曲与视场高级球差之间相互平衡。反射镜组产生的像散也是系统像差的主要原因,可通过将反射镜非球面化进行消除^[14]。

5 设计结果

根据上述方法,设计了可用于电晕探测装置的“日盲”紫外折反射全景系统,其适用波段为 245~285 nm,视场为 360°×(45~90°),相对孔径为 1:2。“日盲”紫外折反射全景系统是对目标信号进行能量探测的系统,能量集中度是评价系统成像质量的关键指标。如图 7 所示,各视场能量集中度为 80% 的弥散圆直径 < 20 μm,其值小于紫外 ICCD 像元尺寸 30 μm,同时各视场 MTF@17lp/mm > 0.7,如图 8 所示。系统利用光阑像差及桶形畸变提高像面照度均匀性,像面照度均匀性 > 99.8%。目前,如图 9 所示的“日盲”紫外折反射全景电晕探测装置已研制完成并进入实验阶段。图 10 和图 11 分别为碘钨灯在可见及紫外全景相机中所成的像,可见光全景成像系统的视场及焦距均与紫外全景系统一致^[15],双波段图像融合正在进行中。

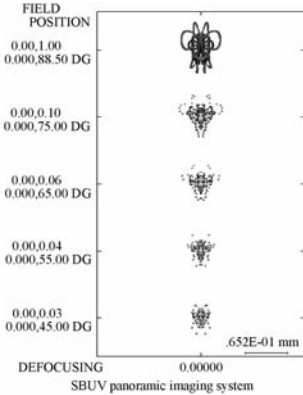


图 7 紫外折反射全景系统点列图

Fig. 7 Spot diagram of catadioptric omnidirectional optical system in SBUV

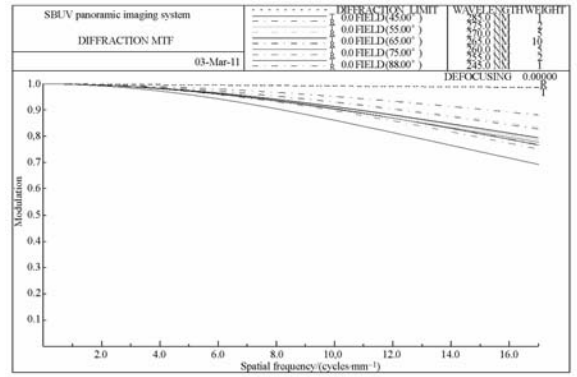


图 8 紫外折反射全景系统 MTF 曲线

Fig. 8 MTF curve of catadioptric omnidirectional optical system in SBUV



图 9 紫外折反射全景成像系统

Fig. 9 Catadioptric omnidirectional imaging system in SBUV

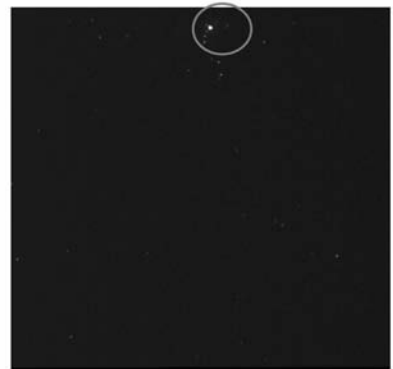


图 10 碘钨灯在紫外全景相机中所成像

Fig. 10 Image of tungsten iodine lamp taken by SBUV panoramic camera



图 11 碘钨灯在可见光全景相机中所成像

Fig. 11 Image of tungsten iodine lamp taken by a visible panoramic camera

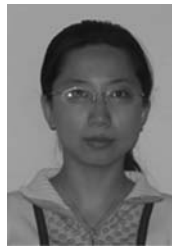
参考文献:

- [1] BJORK C, WAN W. Mid-wave Infrared (MWIR) panoramic sensor for various applications [J]. *SPIE*, 2010, 7660: 76600B-1-9.
- [2] JONATHAN M. NICHOLS, JAMES R. Modeling and analysis of a high-performance midwave infrared panoramic periscope [J]. *Optical Engineering*, 2010, 49(11): 113202-1-9.
- [3] SOLOMATINA V A. A panoramic video camera [J]. *Opt. Technol.*, 2007, 74(12): 815-817.
- [4] LIN S S, BAJCSY R. High resolution catadioptric omnidirectional stereo sensor for robot vision [C]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation IEEE*, 2003, 1694-1699.
- [5] MARTYNOV V N, JAKUSHENKOVA T I, URUSOVA M V. New constructions of panoramic annular lenses: design principle and output characteristics analysis [J]. *SPIE*, 2008, 7100: 71000O-1-12.
- [6] NIU SH, BAI J, HOU X Y, *et al.*. Design of a panoramic annular lens with a long focal length [J]. *Appl. Opt.*, 2007, 46, (32): 7850-7857.
- [7] ZENG J Y, SU X Y, JIN G F. Incorporating lens distortion into the design of undistorted catadioptric omnidirectional cameras [J]. *Appl. Opt.*, 2006, 45: 7778-7784.
- [8] KWEON G I, KIM K T, KIM G H, *et al.*. Folded catadioptric panoramic lens with an equidistance projection scheme [J]. *Appl. Opt.*, 2005, 44(14): 2759-2767.
- [9] ZHAO L F, FENG H J, BAI J. Panoramic optical annular staring inspection system for evaluating the inner surface of a pipe [J]. *SPIE*, 2007, 6838: 68381P-1-9.
- [10] LAN P. Design study of an infrared panoramic optical system [J]. *Appl. Opt.*, 1996, 35(31): 6190-6194.
- [11] WANG P S, MCMAHONA S T. Threat mediation via a real-time stereoscopic catadioptric omnivision system [J]. *SPIE*, 2006, 6231: 62310E-1-6.
- [12] GUTINA M, TSUIB E K, GUTIN O. Thermal infrared panoramic imaging sensor [J]. *SPIE*, 2006, 6206: 62062E-1-10.
- [13] 袁旭昌. 光学设计 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1988.
YUAN X CH. *Optical Design* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1988. (in Chinese)
- [14] 王丽萍, 张立超, 何锋赞, 等. 采用多种群遗传算法的全景成像系统非球面设计 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(5): 133-141.
WANG L P, ZHANG L CH, HE F Y, *et al.*. Design of mirror profile for panoramic imaging system using multi-populations genetic algorithms [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5): 133-141. (in Chinese)
- [15] 王丽萍. 双波段全景电晕探测光学系统 [J]. *光子学报*, 2010, 39(10): 1770-1774.

WANG L P. Optical design for dual spectral panoramic imaging system applied in corona detector

[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39 (10): 1770-1774. (in Chinese)

作者简介:



王丽萍(1981—),女,吉林长春人,助理研究员,博士,2004年于长春理工大学获得学士学位,2009年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光学系统设计的研究。E-mail:wlp8121@126.com



李 春(1965—),女,吉林人,副研究员,1987年于吉林大学获得学士学位,主要从事光学薄膜技术的研究。E-mail:lifshu@yahoo.com.cn



金春水(1964—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1987年于浙江大学获得学士学位,1990年、2003年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所分别获得硕士、博士学位,主要从事紫外、极紫外光学技术的研究。E-mail:jincs@sklao.ac.cn

● 下期预告

宽谱段改进的车尔尼-特纳光谱成像系统设计

薛庆生

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

为了满足宽谱段高光谱成像仪的要求,克服传统的车尔尼-特纳光谱仪像散较大的缺点,基于像差理论,提出了一种改进的车尔尼-特纳光谱成像系统,平面光栅处于发散光中,利用平面光栅产生的像散来补偿物镜产生的像散,并且推导出了宽谱像散同时校正条件,实现了宽谱像散同时校正。具体分析了像差校正的原理和方法,编制了初始结构快速计算程序,作为实例,设计了一个谱段范围为540~780 nm的宽谱段像散同时校正的车尔尼-特纳光谱成系统,利用光学设计软件ZEMAX-EE对该光谱成像系统进行了光线追迹和优化设计,并对设计结果进行分析,分析结果表明,在整个工作波段(540~780 nm)内,全视场调制传递函数均达到0.52以上,实现了宽谱段像散同时校正,在宽谱段内同时获得了良好的成像质量,满足设计指标要求,也表明所提出的改进方法是可行的。