

快焦比长焦距日盲紫外光学系统设计

丁家奎, 王振鹏, 宋真真, 叶井飞*

南京信息工程大学物理与光电工程学院, 江苏 南京 210044

摘要 设计了一个具有快焦比长焦距的日盲紫外光学系统。其 F 数为 2.0, 焦距为 100 mm, 总长与焦距之比为 1.5。该系统由全球面透镜构成, 未采用非球面或衍射光学元件, 便于加工和检测。其中, 正透镜采用氟化钙材料, 负透镜采用熔石英材料, 有效地校正了系统色差, 最大垂轴色差不超过一个像素大小。设计结果表明, 该系统成像性能优良、分辨率高, 兼容了快焦比和长焦距的特点, 满足设计要求, 并且通过公差分析验证了该系统的工程可实现性。

关键词 光学设计; 紫外镜头; 日盲紫外光谱; 快焦比; 长焦距

中图分类号 TN23

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.192201

Design of Solar Blind Ultraviolet Optical System with Fast Focal Ratio and Long Focal Length

Ding Jiakui, Wang Zhenpeng, Song Zhenzhen, Ye Jingfei*

School of Physics and Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China

Abstract In this study, a solar blind ultraviolet optical system with a fast focal ratio and long focal length is presented. Its F number is 2.0, and its focal length is 100 mm. The ratio of the total length to its focal length is approximately 1.5. The proposed system comprises all spherical lenses without using aspherical or diffractive optical elements, which is convenient for manufacturing and testing. The positive lenses are made of calcium fluoride, and the negative lenses are made of fused quartz, which are used to effectively correct the color aberration. The maximum lateral color aberration is less than one pixel in size. Design results show that the proposed system exhibits excellent imaging performance, high resolution, and is compatible with the characteristics of fast focal ratio and long focal length, which satisfies the design requirements. Furthermore, the tolerance analysis demonstrates that the proposed system can be realized in the practical engineering.

Key words optical design; ultraviolet lens; solar blind ultraviolet spectrum; fast focal ratio; long focal length

OCIS codes 220.3620; 120.4820; 040.7190

1 引言

在现代光电探测技术中, 可见光波段与红外光波段的探测技术发展非常迅速, 在工业与航空航天等领域具有广泛的应用。近些年, 紫外光波段以独特的天然窗口优势, 越来越受到科研人员的关注, 并逐步发展为一种非常重要的光电探测窗口^[1-3]。紫外光波段探测技术在民用、工业及军事等方面的作

用愈发突出, 尤其在日盲紫外光谱区。通常将波长为 200~300 nm 的紫外辐射称为日盲紫外光谱。该波段的太阳光辐射几乎被地球臭氧层全部吸收, 从而在大气层中该波段的背景辐射几乎为 0, 因此日盲紫外探测系统具有低背景噪声的优势。

日盲紫外探测系统在刑事现场侦查^[4]、高压电力电网设备的电晕放电检测^[5-8]、利用导弹羽烟或尾焰进行导弹位置告警^[9-11]等方面具有重要作用。为

收稿日期: 2019-12-10; 修回日期: 2020-01-29; 录用日期: 2020-02-20

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20180787)、江苏省高等学校自然科学研究项目(18KJB140007)

* E-mail: yjfei1988@gmail.com

了准确定位高压电网设备的电晕放电位置,避免电晕放电对电网系统造成危害,张鸿佳等^[6]设计了一个两倍变焦的日盲紫外电晕检测光学系统,该系统可对电晕目标进行大范围搜索和小区域定位,但该系统采用了两个非球面,在一定程度上增加了加工难度。在导弹告警探测应用中,紫外告警系统具有灵敏度高、虚警率低等优点,并要求紫外告警光学系统具有大相对孔径,以提高目标的分辨率。宋姗姗等^[9]利用二元光学元件与非球面设计了一个结构相对简单的日盲紫外告警系统,该系统相对孔径较小、焦距较短,且非球面与二元光学元件的增加提高了研制成本。王红^[10]采用反向摄远型结构设计了一个具有大相对孔径、大视场的紫外告警相机,其各个视场的像点弥散斑半径方均根值(RMS)均大于 $40\ \mu\text{m}$,这仅适用于具有大像元的紫外探测器。曹桂丽等^[11]采用准像方远心光路设计了一个具有大相对孔径、长焦距的紫外告警光学系统,其最大视场的像点半径方均根值不超过 $50\ \mu\text{m}$,这同样仅适用于具有大像元的紫外探测器。

本文基于全球面透镜设计了一款具有快焦比、长焦距的日盲紫外光学系统,该系统可应用于电晕检测与紫外告警等方面。该日盲紫外光学系统含有8片球面透镜,总长约为 $150\ \text{mm}$ 。系统的焦距为 $100\ \text{mm}$, F 数为 2.0 ,全视场角为 11.3° 。在全视场范围内,像点半径方均根值均优于 $13\ \mu\text{m}$;在奈奎斯特空间频率为 $40\ \text{lp/mm}$ 处,各个视场的调制传递函数(MTF)值均优于 0.6 。该日盲紫外光学系统结构简单、成像质量优良、分辨率高,且未采用非球面或二元光学元件,降低了加工和测量难度,便于工程实现。

2 日盲紫外光学系统设计

2.1 系统设计要求

针对日盲紫外光学系统的应用场合需求及其快焦比、长焦距的特点,设计的技术参数如表1所示。该紫外光学系统的 F 数较小,属于快焦比光学系统,并且系统的总长与焦距之比不超过 1.5 ,具有一定的设计难度;另一方面,该系统所匹配的探测器像元尺寸为 $13\ \mu\text{m}$,半像高约为 $10\ \text{mm}$ 。

2.2 系统设计结构选型及其难点分析

通常用于光电成像系统的镜头主要分为三种,分别是折射式、反射式、折反射式。反射式与折反射式系统中都含有反射镜,用于折叠光路,可以提高系统的结构紧凑性。尽管所设计系统的全视场

表1 日盲紫外光学系统的设计参数

Table 1 Design parameters of solar blind ultraviolet optical system

Parameter	Value
Working wavelength /nm	240-280
Focal length /mm	100
$F/\#$	2.0
Full field of view /($^\circ$)	11.0
Total length /mm	≤ 150
Back focal length /mm	≥ 25
Radius RMS of spot diagram / μm	< 13
MTF	> 0.6
Lateral color aberration / μm	< 13
Maximum distortion /%	< 5
Relative illumination /%	> 90

角属于中等视场,但是系统的相对孔径较大,并且系统总长与焦距之比较小,因此反射式与折反射式光路结构不适用。针对本设计的要求,采用折射式光路结构,其相对简单,便于实现具有快焦比、长焦距的系统。

光学系统的初始结构确定方法主要有PW法和缩放大法。PW法是一种基于像差理论求解满足系统成像质量要求的初始结构的方法,效率相对较低。缩放大法是一种将现有文献资料中的光学参数与设计要求相接近的结构作为初始结构,利用现代高性能计算机与优化软件进行高效率优化的方法。因而在本设计中,采用简单高效的缩放大法构建系统的初始结构。另一方面,针对应用场合及设计要求,本系统属于一种具有快焦比、长焦距、中等视场的系统,并且工作波段为日盲紫外波段,具有一定的特殊性。该系统的设计难点主要有几个方面。系统的工作波段为日盲光谱区($240\sim 280\ \text{nm}$),在该波段中常用的紫外光学材料主要有三种,分别是熔石英、氟化钙及氟化镁,正是由于可选择的光学材料较少,因此在该日盲紫外波段的色差校正需要重视;该系统具有较大的相对孔径,需要注意球差的校正。根据基本的像差理论,这类具有大相对孔径的光学系统可以采用双高斯型或类双高斯型的类对称式结构,才能对彗差、垂轴色差及畸变等像差进行有效校正。

2.3 系统的材料选择及色差校正分析

可用于日盲紫外波段的常见材料主要有熔石英、氟化钙及氟化镁。当系统在外场或特殊环境下使用时,不可避免地会遇到雨水天气。氟化镁材料具有相对较强的吸湿性,不宜使用,因而主要采用熔石英与氟化钙材料。另一方面,系统的第一片透镜

通常暴露在空气中,熔石英材料具有良好的机械性能、理化性能与耐辐射性,故第一片透镜材料采用熔石英材料。

为了校正系统的色差,一般采用不同色散系数的光学材料构成的正透镜与负透镜组合进行色差校正。在本设计中,所使用的材料仅为熔石英和氟化钙两种。相比于熔石英材料的色散系数,氟化钙材料的色散系数较大。结合消色差的基本理论,正透镜选用色散系数较大的材料,即氟化钙材料;负透镜选用色散系数较小的材料,即熔石英材料。

3 日盲紫外光学系统设计结果及像质评价

根据对具有快焦比、长焦距的日盲紫外光学系统的设计参数的分析,及日盲紫外光学系统所具有的特殊性,经过系统结构选型和优化,基于类双高斯对称型的快焦比长焦距日盲紫外光学系统的设计结果如图1所示。该系统由8片球面透镜构成,易于加工和检测^[12-13]。系统的半像高为10 mm,总长为150 mm,后截距为26.52 mm,满足系统的物理尺寸设计要求。系统的焦距为100 mm, F 数为2.0,全视场角为 11.3° ,满足系统的光学参数设计要求。此外,第1片透镜材料为熔石英材料,具有最大口径,接近60 mm。正透镜的材料均为氟化钙,负透镜的材料均为熔石英。

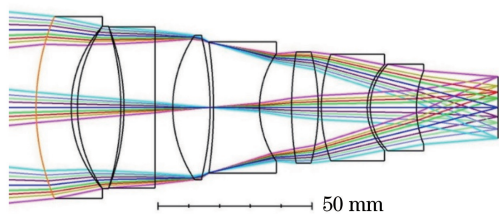


图1 快焦比长焦距日盲紫外光学系统结构

Fig. 1 Structure of solar blind ultraviolet optical system with fast focal ratio and long focal length

进一步分析该日盲紫外光学系统的成像性能。所用紫外探测器的像元尺寸为 $13\ \mu\text{m}$,相应的奈奎斯特空间频率约为 $38.5\ \text{lp/mm}$,对空间频率为 $40\ \text{lp/mm}$ 的MTF值进行分析,结果如图2所示,在全视场范围内的MTF值均优于0.6。各个视场的点列图如图3所示,其像点半径方均根值均优于 $13\ \mu\text{m}$ 。整体上该系统具有很好的成像质量。

图4为该日盲紫外光学系统的垂轴色差曲线图。通过熔石英和氟化钙两种具有不同色散系数的光学材料,实现了日盲紫外波段(240~280 nm)的

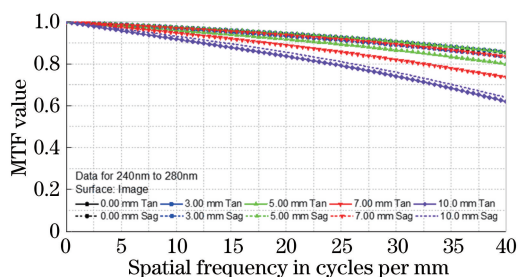


图2 日盲紫外光学系统的MTF曲线

Fig. 2 MTF curves of solar blind ultraviolet optical system

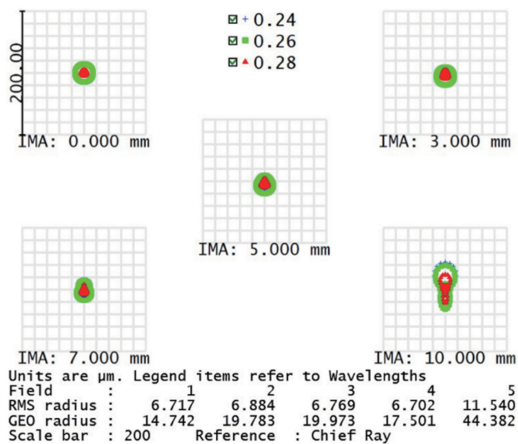


图3 日盲紫外光学系统的点列图

Fig. 3 Spot diagrams of solar blind ultraviolet optical system

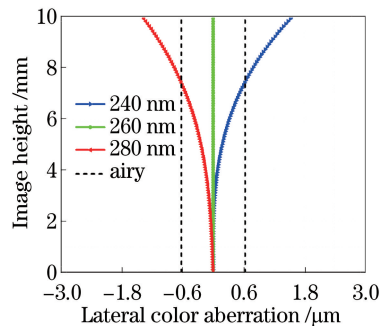


图4 日盲紫外光学系统的垂轴色差图

Fig. 4 Lateral color aberration map of solar blind ultraviolet optical system

系统色差校正。在0.7视场范围(像高为0~7 mm),垂轴色差分布在艾里斑尺寸范围内;靠近边缘视场(像高7~10 mm)的垂轴色差值最大不超过 $6\ \mu\text{m}$,优于设计要求。

系统的畸变曲线如图5(a)所示,以中心波长260 nm为参考波长,在全视场范围内整个畸变曲线顺滑,且单调增加,其最大畸变值不超过1%,优于设计要求。系统在整个视场范围内的相对照度如图5(b)所示,同样以中心波长260 nm为参考波长,其

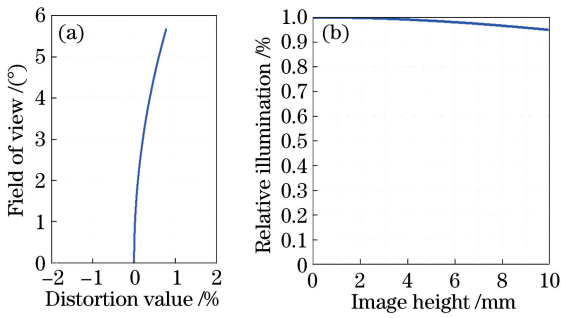


图5 日盲紫外光学系统的畸变图和相对照度图。

(a)畸变;(b)相对照度

Fig. 5 Distortion and relative illumination of solar blind ultraviolet optical system. (a) Distortion; (b) relative illumination

相对照度值均优于90%。系统整体成像性能优良,满足设计要求。

4 系统公差分析

在该快焦比长焦距日盲紫外光学系统中,未采用非球面或二元光学元件,全部为球面元件,降低了系统的加工难度。另一方面,系统中各个球面元件的加工与装调误差会影响系统的成像性能,为了分析本设计的工程可实现性,进行了公差分析。公差设置如表2所示。

表2 元件的公差设置

Table 2 Tolerance setting of components

Parameter	Value
Radius/mm	± 0.01
Thickness/mm	± 0.02
Surface irregularity /fringes	3
Decenter along X-axis /mm	± 0.02
Decenter along Y-axis /mm	± 0.02
Tilt angle along X-axis /($^{\circ}$)	± 0.02
Tilt angle along Y-axis /($^{\circ}$)	± 0.02

主要分析了透镜的曲率半径、厚度、面形偏差、透镜元件的偏心偏差、倾斜角度偏差对系统的影响。以衍射极限下的MTF均值作为评价函数,空间频率设为40 lp/mm,并采用蒙特卡罗分析方法对系统的公差敏感度进行分析,在表2的公差设置下,运行次数设置为1000。对比在空间频率为40 lp/mm处的MTF值0.735,在第899次有最优结果,其MTF值为0.721;在第821次有最差结果,其MTF值为0.201,MTF平均值为0.480。整体上与设计结果相比,该数值下降了约20%,与实际加工工艺的预期相吻合,所设计系统具有较好的工程可实现性。另一方面,得到了对系统成像性能影响最大的元件

偏差,如表3所示,分别为第1片透镜的倾斜与偏心,第4片透镜的偏心。表3中,Type栏中序号1和2表示第1片透镜的前后表面序号;7和8表示第4片透镜的前后表面序号;TEDX表示光学元件沿X方向的偏心,TEDY表示沿Y方向的偏心;TETY表示光学元件沿Y方向的倾斜。在实际工程应用中,根据该快焦比长焦距日盲紫外光学系统的公差分析,可有效地指导系统装调,在装配过程中,尤其需要重点关注第1片与第4片透镜的装调。

表3 最敏感元件的公差分析结果

Table 3 Tolerance analysis results of the most sensitive components

Type	Tolerance	MTF criterion	MTF change
TEDY 1 2	-0.02	0.54720867	-0.18745649
TEDY 1 2	0.02	0.54720867	-0.18745649
TEDX 1 2	-0.02	0.54720867	-0.18745649
TEDX 1 2	0.02	0.54720867	-0.18745649
TEDX 7 8	-0.02	0.57640024	-0.15826492
TEDX 7 8	0.02	0.57640024	-0.15826492
TEDY 7 8	-0.02	0.57640024	-0.15826492
TEDY 7 8	0.02	0.57640024	-0.15826492
TETY 1 2	-0.02	0.58981061	-0.14485456
TETY 1 2	0.02	0.58981061	-0.14485456

5 结论

现有的具有大相对孔径、长焦距紫外镜头的成像性能较低,且部分紫外镜头采用了非球面或二元光学元件。基于此,采用类双高斯型对称式的光学结构,并利用全球面透镜设计了一款具有快焦比、长焦距的日盲紫外光学系统。该系统具有成像性能优良、分辨率高的优点, F 数为2.0,焦距为100 mm,总长为150 mm。全视场范围内在空间频率为40 lp/mm处的MTF值优于0.6,并且各个视场的像点弥散圆半径方均根值优于 $13 \mu\text{m}$ 。尽管常用的紫外波段材料较少,该系统采用的熔石英和氟化钙材料组合对系统色差进行了有效校正,最大垂轴色差不超过 $6 \mu\text{m}$,优于设计要求。该系统的设计结果满足要求,并且通过公差分析验证了该系统的工程可实现性,可应用于电晕检测和紫外告警等方面。

参考文献

- [1] Li B J, Liang Y H. Development of ultraviolet warning technology[J]. Laser & Infrared, 2007, 37(10): 1033-1035.
李炳军, 梁永辉. 紫外告警技术发展现状[J]. 激光与红外, 2007, 37(10): 1033-1035.

- [2] Wang B H, Li T T, Zheng G X. Research of solar blind ultraviolet detection system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(2): 022202.
王保华, 李妥妥, 郑国宪. 日盲紫外探测系统研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(2): 022202.
- [3] Zheng H J, Bai T Z. Development analysis and state of ultraviolet warning technology [J]. *Infrared Technology*, 2017, 39(9): 773-779.
郑海晶, 白廷柱. 紫外告警技术现状及发展分析[J]. *红外技术*, 2017, 39(9): 773-779.
- [4] Zhu H Y, Ma J, Zhang H J, et al. Design of solar blind ultraviolet refractive/diffractive zoom lens used in criminal investigation [J]. *Laser Technology*, 2015, 39(2): 242-246.
朱海宇, 马军, 张鸿佳, 等. 刑侦日盲紫外折衍混合变焦光学系统设计[J]. *激光技术*, 2015, 39(2): 242-246.
- [5] Wang L P. Optical design for dual spectral panoramic imaging system applied in corona detector [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(10): 1770-1774.
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.
- [6] Zhang H J, Ma J, Zhu H Y, et al. Design of "solar blind" ultraviolet zoom optical system used in corona detection [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(10): 102201.
张鸿佳, 马军, 朱海宇, 等. "日盲"紫外电晕检测变焦光学系统设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(10): 102201.
- [7] Ma L X, Huang D H. Ultraviolet imaging system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, 42(7): 1-6.
马立新, 黄大海. 紫外成像系统[J]. *光电工程*, 2015, 42(7): 1-6.
- [8] Cui M H, Tian Z H, Zhou Y, et al. Design of large aperture ultraviolet optical system for ultraviolet camera [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2018, 11(2): 212-218.
崔穆涵, 田志辉, 周跃, 等. 大相对孔径紫外成像仪光学系统设计[J]. *中国光学*, 2018, 11(2): 212-218.
- [9] Song S S, Lin L N, Wang W S. Design of solar blind ultraviolet warning optical system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(10): 102203.
宋珊珊, 林丽娜, 王文生. 日盲紫外告警光学系统设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(10): 102203.
- [10] Wang H. Optical system for ultraviolet warning camera with wide field of view and large relative aperture [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(12): 3212-3216.
王红. 大相对孔径大视场紫外告警相机光学系统[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(12): 3212-3216.
- [11] Cao G L, Liu F F, Jia Y D, et al. Design of ultraviolet warning optical system with large relative aperture and long focal length [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(12): 122203.
曹桂丽, 刘芳芳, 贾永丹, 等. 大相对孔径、长焦距的紫外告警光学系统设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(12): 122203.
- [12] Li X X, Zhang Z H, Zhang X Y, et al. Non-contact thickness measurement of optical elements based on astigmatism [J]. *Laser Technology*, 2019, 43(6): 741-746.
李潇潇, 张志恒, 张效宇, 等. 基于像散的光学元件厚度非接触测量研究[J]. *激光技术*, 2019, 43(6): 741-746.
- [13] Mantravadi M V, Malacara D. *Newton, Fizeau, and Haidinger interferometers* [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007: 32-33.