

基于日盲紫外像增强器的大孔径透射式紫外光学系统设计

王淼鑫^{1,2}, 程宏昌^{1,2}, 李进波¹

(1. 昆明物理研究所, 云南 昆明 650223; 2. 微光夜视技术重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘要: 以微光夜视技术重点实验室研制的 AlGaIn 光阴极日盲紫外像增强器为基础, 设计了一款匹配于日盲紫外像增强器的紫外光学系统, 以提升探测器的探测性能。光学系统的工作波段在 240~280 nm, 视场角 40°, 相对孔径为 1/2.5。系统由 5 块标准球面镜组成, 光学系统总长 50.74 mm; 光学传递函数在空间频率为 40 lp/mm 时, 轴上不小于 0.8, 轴外不小于 0.6; 成像质量良好, 结构紧凑, 满足设计要求。

关键词: 紫外告警系统; 日盲紫外; 紫外光学设计; 像质分析

中图分类号: TN23 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2021)02-0127-04

Design of Large Aperture Transmission Ultraviolet Optical System Based on Solar-blind Ultraviolet Image Intensifier

WANG Miaoxin^{1,2}, CHENG Hongchang^{1,2}, LI Jinbo¹

(1. Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China;

2. Science and Technology on Low-Light-Level Night Vision Laboratory, Xi'an 710065, China)

Abstract: Based on the AlGaIn photocathode solar-blind UV image intensifier developed by the Science and Technology on Low-Light-Level Night Vision Laboratory, this study designs a UV optical system that matches the solar-blind UV image intensifier to improve the detection performance of the detector. The working wavelength of the optical system is 240–280 nm, the field of view is 40°, and the relative aperture is 1/2.5. The system consists of five lenses that are all spherical mirrors, and the total length of the optical system is 50.74 mm. When the optical transfer function is 40 lp/mm, the on- and off-axes are greater than or equal to 0.8 and 0.6, respectively. The imaging quality is good, and the structure is compact to meet the design requirements.

Key words: ultraviolet warning system, solar blind ultraviolet, optical design, image quality analysis

0 引言

在太阳辐射波段中, 受到大气衰减的影响, 200~300 nm 紫外辐射被臭氧层吸收而无法到达地球表面, 被称为“日盲区”。由于导弹尾部燃料的燃烧, 产生的辐射范围从短波紫外到可见光谱, 为紫外告警提供可能。紫外告警技术正是通过对导弹尾焰中“日盲”紫外波段的探测, 对目标进行判断及定位, 从而采取有效的规避及拦截手段。紫外告警系统对目标的探测优势在于: 紫外背景辐射较少、被动式探测、结构简单化、可靠性高且兼容性强^[1]。

国内的紫外告警技术研究起步较晚, 目前国内紫外告警系统的告警距离与国外告警距离存在差距, 而光学系统相对孔径的提高与系统透过率的增大可提

高告警系统的告警距离, 达到国外告警的距离水平。

紫外告警技术针对光学系统而言, 要求光学系统具有大视场与大相对孔径、结构简单、光能损失较小等特点。国内已有的紫外光学系统的设计中, 文献[2]中, 光学系统由 6 片透镜组成, 视场 8°, 系统的相对孔径为 1/3.5, 采用标准球面镜进行设计。文献[3]中, 光学系统由 5 片透镜组成, 系统的视场为 40°, 相对孔径为 1/3, 系统采用一个衍射元件和两个非球面校正像差, 非标准球面镜的使用增加了系统加工的难度与成本。文献[4]中, 光学系统由 6 片透镜组成, 相对孔径达到 1/2, 采用标准球面镜, 但是系统视场角较小, 仅有 10°, 满足长焦距的特点但不满足大视场要求。同样在文献[5]中, 光学系统采用了卡塞格林系统, 应用于对日盲紫外太阳跟踪预警系统的研究, 视场角

收稿日期: 2020-12-24; 修订日期: 2021-01-19.

作者简介: 王淼鑫 (1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事紫外探测方面研究。E-mail: wmxin24@163.com。

通信作者: 程宏昌 (1974-), 男, 研究员级高工, 主要从事微光夜视器件、紫外成像器件等研究。E-mail: chh600@163.com。

只有1°,但满足长焦距的特点。

本文主要工作是设计工作波段与 AlGaIn 光阴极日盲紫外像增强器光谱响应范围相匹配的光学系统。与上述已有的光学系统相比,具有大视场,大相对孔径的特点,对于紫外辐射的会聚能力更强,且系统由5片透镜构成,减少了光能损失。光学系统的传递函数满足探测器需求,成像质量良好且系统均采用标准球面结构进行设计,更有利于加工,避免了使用非球面与衍射元件为加工带来的难度。

1 日盲紫外告警系统

日盲紫外告警系统是由光学系统、光电转换系统、接收系统组成。日盲紫外告警系统工作原理(如图1所示)是探测导弹尾焰辐射在200~300nm的波段并对其所观测的空间区域进行成像。由于在太阳辐射波段中,200~300nm的紫外辐射被臭氧层吸收而无法到达地球表面,因此200~300nm的紫外光谱区被称为“日盲区”,为紫外告警系统提供良好的背景条件^[6]。日盲紫外告警系统工作方式是光学系统将所接收到的辐射进行过滤保证进入光学系统的辐射在工作波段内,进入光阴极引起光谱响应将光子转换成电子,后经微通道板在高压加速的情况下倍增的电子轰击荧光屏后,穿过反射铝膜激发荧光粉进行发光成像在荧光屏上,并通过光锥耦合将所成的像照射在高灵敏 CCD 成像传感器上,目标将以一个点源的形式表征于图像上,经数字化后根据时间及空间特性进行信号处理,实时探测并判断精确方向得出位置并进行距离的估算。本文采用日盲紫外像增强器进行成像,紫外告警系统是以紫外探测器件为核心,接受来自目标或者目标反射的紫外辐射信号,经过紫外探测成像器件进行光电转换,电子倍增,信号转换以后进行输出^[7]。

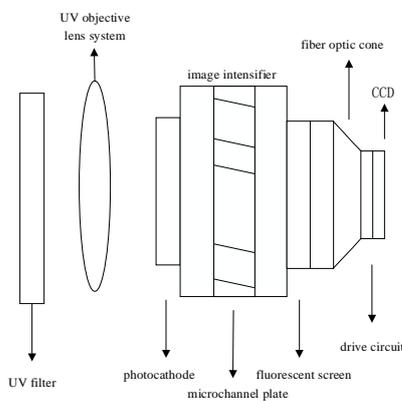


图1 紫外告警系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of ultraviolet warning system

2 光学系统设计

2.1 光学系统的设计指标

目前国内告警光学系统由6个以2×3组合形式排列的光学系统组成,整个告警系统的空间视场角为80°×120°,单个光学系统最大视场为40°。为满足国内告警系统的结构形式,本文在初始结构的基础上,不增加透镜数量或改变面型的情况下使用标准球面进行设计,将视场设置为40°,光学系统进行2×3的组合排列,以匹配 AlGaIn 像增强器的探测器。物体成像在像增强器像面上,像面大小约为18mm,焦距、像面以及视场角(2ω)之间关系,利用公式 $y' = f \cdot \tan \omega'$,可算出焦距的大小约为: $f = 21.22 \text{ mm}$ 。考虑到系统机械结构与径向尺寸的影响,系统的入瞳直径大小设为9mm,因此系统的相对孔径大小为 $\frac{D}{f'} \approx \frac{1}{2.36} \approx \frac{1}{2.5}$ 。综上所述,系统的设计指标如下:

工作波段: 240~280 nm

视场角: $2\omega = 40^\circ$

焦距: $f = 21.22 \text{ mm}$

相对孔径: $\frac{D}{f'} \approx \frac{1}{2.5}$

探测器像元尺寸为: $11.9 \mu\text{m} \times 11.9 \mu\text{m}$

2.2 光学系统的选型与初始结构的确定

紫外光学系统分为折射式光学系统、反射式光学系统和折返式光学系统。折射式光学系统具有大视场、透过率高等特点,但基本结构形式选择取决于多方面因素影响,且像差校正较难。由于本文设计的是大视场光学系统,反射式光学系统在实现大视场时,结构尺寸以及遮拦都比较大,系统的布局困难,成像质量较好但对杂散辐射较为敏感,有较大的能量损失。折返式系统可采用球面镜作为主镜减少加工难度,满足高分辨率及相对孔径大的要求,但是中心存在遮拦,检验装调比较复杂。由于探测波段在紫外的日盲波段,能量低,为保证能量尽可能被探测到,选择折射式光学系统。

在光组的设计中,初始结构的确定一般分为解析法(PW法)与缩放法两种情况,因此需要根据实际情况选择合适的方法,再利用相关软件进行分析。对于像差的校正与优化通常是通过透镜的厚度、透镜的曲率、透镜材料等相关因素的相互配合完成,通常也会采取其他方法如改变面形与增加多重结构等。根据设计要求,查阅相关文件,确定初始结构参数为:工作波长为240~280nm,视场角为10°,焦距为126.8mm,相对孔径为1/4的镜头作为本设计的初始结构。

2.3 光学系统的设计难点

紫外光学系统设计中需对系统的像差进行校正,对于紫外系统而言,影响系统最大像差是色差的影响。校正色差的方法是选择两种阿贝数差异较大的玻璃进行双胶合或者双分离透镜的设计。但在紫外波段中,光学玻璃材料的选择性不大且色散系数的差别较小,因此紫外光学系统的色差校正较为困难。而系统相对孔径较大,意味着光学材料的折射率更高,但是紫外玻璃选择十分有限,折射率小于1.46,因此在设计中会导致透镜数量的增加或者透镜厚度的变大,降低光学系统的透过率,增大设计难度。

2.4 光学系统的设计过程

因此,本文的设计思路是根据选择的初始结构,将其各尺寸乘以缩放比先进行缩放,得到所要求的结构。缩放后的结构,其视场角和相对孔径的大小不符合设计要求,因此在后期优化中不断提高视场角和相对孔径的大小,其中视场角的大小按照 10° 、 20° 、 30° 、 40° 递增,相对孔径的大小按照 $1/4$ 、 $1/3$ 、 $1/2.5$ 增加。对于缩放后的初始结构的优化按照塞得和数系数对光学系统的影响进行优化。进行缩放焦距后,控制曲率半径与透镜间隔进行优化,提高成像质量并避免透镜表面进行重叠失形,进而对镜片厚度进行控制,确保系统的合理性。增大视场时考虑边缘视场的像差影响,设置合理的渐晕拦截掉边缘不利于成像的光线。

为了保证进入系统的波长在工作波段范围内,需要在设计过程中在光学系统前端增加一个滤光片。又由于光学系统是基于AlGaIn光阴极日盲紫外像增强器的基础上进行设计的,因此光学系统成像的像面应该是日盲紫外像增强器的光电阴极表面,由于光电阴极存在一层窗口玻璃基底,因此需要成像在光电阴极窗口玻璃的后端。在光学系统结构设计合理后,加入窗口玻璃的模型,进而对系统继续优化,以保证成像质量。经过选型,扩大视场角与增大相对孔径,加入滤光片与光电阴极的窗口玻璃优化后,得到最终的光学系统。由5片透镜组成,其中第一片、第三片与第四片材料为 CaF_2 ,第二片和第五片的材料为紫外熔石英。完成设计后的光学系统二维结构如图2所示。

2.5 像质评价

紫外告警系统中的紫外光学系统不仅要目标辐射的能量进行收集探测,还需进行精确成像。因此不能仅仅只用传统评价光学系统成像质量的光学传递函数曲线作为绝对指标来评价,还需要结合光学系统的衍射能量分布曲线图等来共同评判其成像质量的优劣。本文采用了像点衍射能量分布图、点列图、点扩散函数图、光学系统的相对照度图及光学传递函

数曲线图(modulation transfer function, MTF)等共同作为紫外光学系统的评价标准。

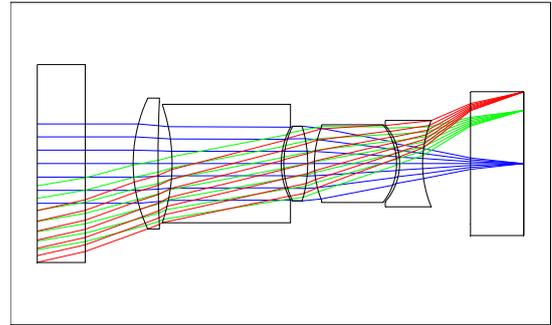


图2 优化后的光学系统二维结构图

Fig.2 Layout of the optimized optical system

图3为光学系统的衍射能量分布图,是以离主光线或物点的像的重心的距离为函数的包围能量圈占总能量的百分比。由图3可看出像素点大小在 $7\mu\text{m}$ 时,各个视场的衍射的包围能量圈能够达到80%;像素点大小在 $8\mu\text{m}$ 时,各个视场的衍射的包围能量圈能够达到90%; $10\mu\text{m}$ 时各个视场已逐渐接近衍射极限,说明此时光线基本成像的范围在 $10\mu\text{m}$,满足成像在一个像元大小内。

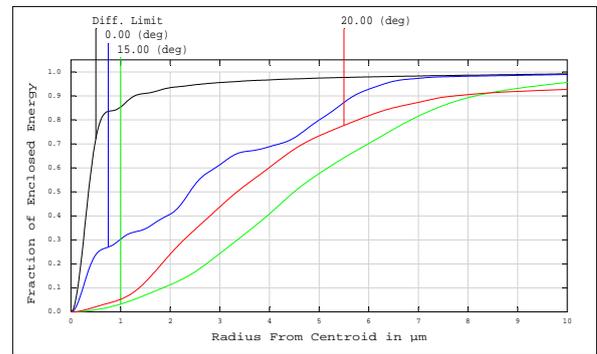


图3 衍射能量分布图

Fig.3 Radial energy distribution of the optical system

图4所示为光学系统的点列图。点列图形成原因是在光线成像的过程中,由一点发出的许多光线经过光学系统成像以后,由于像差存在导致光线与像面不会交于一点而是分布在一定范围内的弥散斑图形。由图4可知,弥散斑的半径约 $7.54\mu\text{m}$,实验室使用的CCD像元面积约 $11.9\mu\text{m}$,满足设计要求。

图5为光学系统的点扩散函数图,点扩散函数是指一个理想的几何物点,经过光学系统后其像点的能量展开情况。利用快速傅里叶变换的方法近似计算衍射的点扩散函数。由图5可知,对于经过光学系统会聚在像点的光强能量展开较少,能量集中度较好。

图6为光学系统的相对照度图,是像面单位面积的响度强度,是计算以径向视场坐标 y 为函数的相对照度。由图6可知,整个像面照度均匀,在 0.7 视场

即对应图中 14°时的能量达到 80%；边缘视场的照度值达到 50%。由于设置渐晕，边缘视场相对于中心视场的照度下降幅度较大，但整体比较均匀。

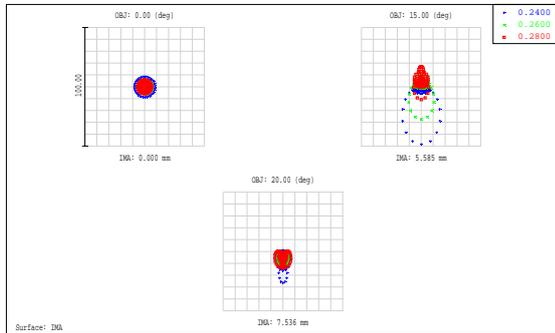


图 4 光学系统的点列图

Fig.4 Spot diagram of the optical system

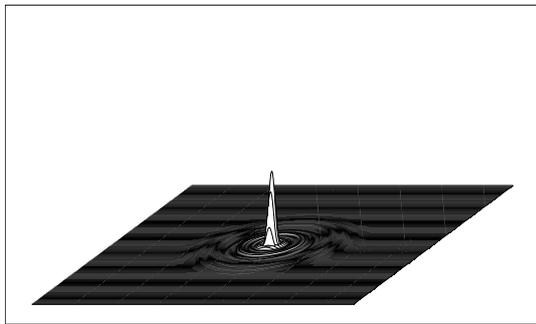


图 5 光学系统点扩散函数图

Fig.5 Point spread function of the optical system

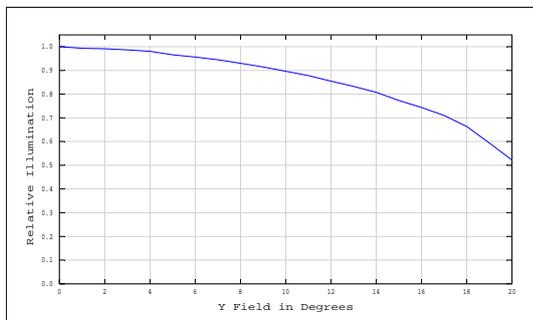


图 6 光学系统的相对照度图

Fig.6 Relative illumination curve of optical system

图 7 为光学系统的光学传递函数图 (MTF 图)，反映了光学系统对不同频率成分的传递能力。由光学传递函数图 (MTF 图) 可知系统内各个视场的 MTF 曲线平直，系统的 0.7 视场与边缘视场均具备良好的成像质量。在空间频率为 40 lp/mm 时，轴上不小于 0.8，轴外不小于 0.6，满足探测器需求，成像质量良好。

3 总结

本文根据日盲紫外告警系统的特点设计了满足探测要求的紫外光学系统。该系统的工作波段在 240~280 nm，采用 5 片透镜组成，且结构均为标准球面镜，透镜材料为氟化钙和紫外熔石英，成像在日

盲紫外像增强器的光电阴极的窗口玻璃后，具有大相对孔径的特点。焦距为 21.22 mm，视场角为 40°，相对孔径为 1/2.5。从系统的点列图、能量分布曲线图、MTF 曲线图分析可知，光学系统的成像质量好、结构简单紧凑、易于加工，具有很高的应用价值和实用性，满足导弹告警系统的使用要求。

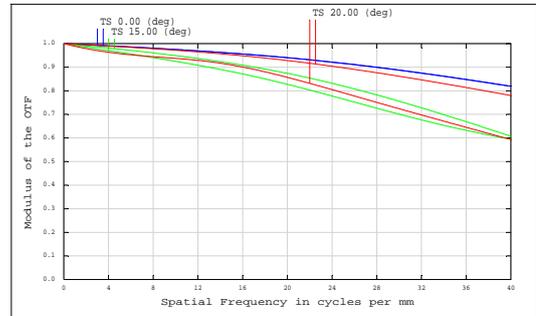


图 7 光学系统的光学传递函数图

Fig.7 MTF of optical system

参考文献:

- [1] 闫磊, 石峰, 单聪, 等. 铝镓氮光阴极像增强器极限分辨率影响因素研究[J]. 红外技术, 2020, 42(8): 729-734.
YAN Lei, SHI Feng, SHAN Cong, et al. Limiting resolution of AlGaN photocathode image intensifier tube[J]. *Infrared Technology*, 2020, 42(8): 729-734.
- [2] 徐苗, 梁秀玲. 中长焦透射式日盲紫外光学系统设计[J]. 光学仪器, 2017, 39(2): 43-47.
XU Miao, LIANG Xiuling. Optical design of long transmission type solar blind ultraviolet system[J]. *Optical Instrument*, 2017, 39(2): 43-47.
- [3] 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): 102203-1-7.
SONG Shanshan, LIN Lina, WANG Wensheng. Design of solar blind ultraviolet warning optical system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(10): 102203-1-7.
- [4] 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): 122203-1-4.
CAO Guili, LIU Fangfang, JIA Yongdan, et al. Design of ultraviolet warning optical system with large relative aperture and long focal length[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(12): 122203-1-4.
- [5] TANG Yi, ZHANG Lijun, BAI Tingzhu, et al. Research on sun-tracking warning systems in solar blind UV[C]//*SPIE*, 2008, 7156: 71560
- [6] 程宏昌, 石峰, 姚泽, 等. 铝镓氮光电阴极日盲紫外像增强器辐射增益研究[J]. 红外技术, 2020, 42(8): 709-714.
CHENG Hongchang, SHI Feng, YAO Ze, et al. Radiation gain of AlGaN photocathode solar blind UV image intensifier[J]. *Infrared Technology*, 2020, 42(8): 709-714.
- [7] 石峰, 程宏昌, 闫磊. 紫外探测器技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
SHI Feng, CHENG Hongchang, YAN Lei. *UV Detection Technique*[M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 2017.