

日盲紫外探测系统研究

王保华 李妥妥 郑国宪

北京空间机电研究所, 北京 100094

摘要 日盲紫外探测系统因工作在日盲区而具有独特的探测优势,在民用和军事领域得到了广泛的关注,尤其在导弹告警领域的应用显示了无与伦比的优越性。研究了紫外导弹告警的原理及优势,分析了紫外告警成像系统的关键技术;针对紫外导弹告警系统的应用需求,制定了日盲紫外光学系统的设计指标,分析了光学系统初始结构的选取方法,根据像差理论合理分配光学系统的光焦度,运用光学设计软件Zemax进行了系统的优化设计和像质评价,最后设计完成了一款焦距 $f=150\text{ mm}$,相对孔径 $1:3$,视场 $2\omega=\pm 4^\circ$ 的日盲紫外光学系统。系统共用了5片透镜,总长 160 mm ,各视场能量集中度在增强型电荷耦合器件(ICCD)的像素尺寸($25\text{ }\mu\text{m}$)内均大于90%,光学传递函数在奈奎斯特频率(20 lp/mm)处高于0.7,具有成像质量优异、结构简单紧凑的特点和很高的实际应用价值。

关键词 光学设计;日盲紫外;紫外探测;紫外告警;光学系统

中图分类号 TN760 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.022202

Research of Solar Blind Ultraviolet Detection System

Wang Baohua Li Tuotuo Zheng Guoxian

Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing 100094, China

Abstract Solar blind ultraviolet (UV) detection system has attracted widespread attention in both civil and military fields because of its unique advantages in detection, especially its incomparable superiority in missile warning field. The principle and advantages of UV warning system and the key technology of UV detection system are analyzed. The design indices of solar blind UV optical system are determined according to the application requirement of UV warning system. Based on the analysis of selection method of initial structure, the optical power is assigned according to the aberration theory. Then the optical design software Zemax is used to optimize the initial structure and evaluate the image quality. A solar blind UV optical system with the focal length of 150 mm , relative aperture of $1:3$ and field of view of $\pm 4^\circ$ is finally designed. The result shows that the encircled energy is higher than 90% in a pixel size ($25\text{ }\mu\text{m}$) of intensified charge-coupled device (ICCD), and the modulation transfer function (MTF) is higher than 0.7 at the Nyquist frequency (20 lp/mm). All of the data satisfy the design requirement. The system is highly valuable because of its characteristics of excellent imaging quality, compact configuration and light weight.

Key Words optical design; solar blind ultraviolet; ultraviolet detection; ultraviolet alarm; optical system

OCIS Codes 220.3620; 220.4830; 080.3620; 080.2740; 040.7190

1 引言

近年来,紫外(UV)探测技术快速发展,尤其以中波紫外波段探测发展最为迅猛、应用也最为成功。太阳辐射通过地球大气层时,240~280 nm的中波紫外辐射会受到臭氧层的强烈吸收,形成该波段的截止区,因此,该波段也被称为日盲紫外区。也就是说地面不存在太阳光的日盲紫外干扰,同时也不会有日盲紫外由地面传输到地球大气层外,正是由于这些独有的特点,使得日盲紫外波段探测技术显示了无与伦比的优越性,在民用和军事方面得到了大量的应用。例如,通过探测电晕放电产生的日盲紫外辐射,可以及时准确地检测出电晕放电的位置和强弱^[1];通过探测导弹尾焰的日盲紫外辐射,可进行飞机等平台的导弹逼近自卫告

收稿日期: 2013-08-02; 收到修改稿日期: 2013-09-17; 网络出版日期: 2014-01-10

作者简介: 王保华(1988—),男,硕士,工程师,主要从事光学遥感和光学系统设计等方面的研究。

E-mail: wangbaohua-125@163.com

警^[2];利用大气层外日盲紫外波段背景微弱且平滑的特性,通过探测导弹火箭发动机尾焰产生的大量日盲紫外辐射,可以进行天基紫外预警^[3-4]。

自20世纪80年代起,美国、俄罗斯等发达国家开始利用日盲紫外波段进行导弹告警的研究工作。经过30多年的发展,紫外导弹告警系统发展了两代产品,十余种型号,在欧美国家的大量先进战机上得到了广泛的应用,验证了紫外成像系统的可行性。紫外探测系统是整个紫外探测技术的核心,直接决定了紫外探测技术的性能。我国在紫外探测成像方面正处于起步阶段,因此,研究紫外探测成像系统的关键技术,研制高性能的紫外光学系统具有重要的意义。

本文分析了紫外导弹告警系统的原理和优点,总结了紫外告警成像系统的关键技术,并设计了一款可用于紫外导弹告警的日盲紫外光学系统,系统焦距150 mm, F 数为3,视场(FOV)为 $\pm 4^\circ$,具有成像质量好、结构简单紧凑的特点,有很高的应用价值。

2 紫外导弹告警技术

作战飞机、预警机等空中平台在现代战争中面临地空、空空导弹的严重威胁,为确保作战平台的安全,导弹逼近告警系统(MAWS)受到各国的广泛关注。20世纪80年代末,美国推出了世界上第一台紫外型导弹告警系统,从此紫外导弹告警探测技术进入到实质性研究和应用开发阶段。

2.1 紫外导弹告警原理

紫外导弹告警技术是作战飞机等对来袭导弹进行逼近预警的一种光电探测手段,其原理如图1所示。紫外导弹告警技术通过探测来袭导弹发出的日盲紫外辐射,经光电转换后形成光电图像,并经计算机处理后形成威胁判断,将威胁以点源形式表征在图像上,通过解算图像得出威胁源的空间位置和距离,同时向平台实时发出警报信息,通过实施有效干扰、采取规避等措施,对抗敌方导弹的攻击。

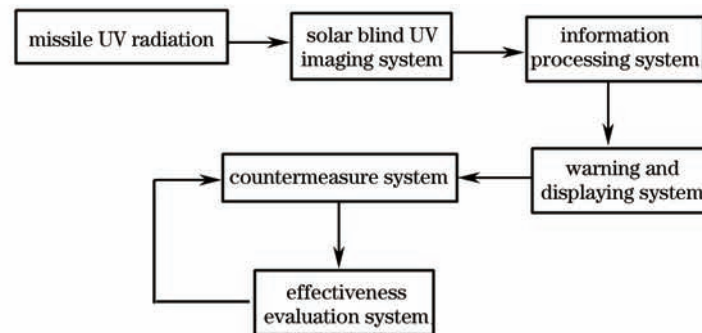


图1 紫外导弹告警原理

Fig.1 Principle diagram of UV missile warning

地空导弹、空空导弹等战术导弹在飞行过程中,燃料燃烧产生的尾焰以及其中的某些组分由于热辐射和化学荧光辐射会产生大量的近紫外和中波紫外辐射,另外在导弹飞行的主动段和巡航段,导弹前端会产生强烈的冲击波,在冲击波中也会产生大量的紫外辐射。而在低空大气中不存在太阳辐射的日盲紫外波段,这使得紫外导弹探测的紫外背景接近于零^[5],从而使导弹紫外辐射的信噪比大大提高,这为利用日盲紫外波段进行导弹的精确探测和预警提供了极大的便利。

2.2 日盲紫外导弹告警的优点

紫外导弹告警技术被誉为21世纪最具影响力的高新技术之一,在短短二十几年间,已经发展成为世界上型号最多、装备量最大的导弹告警设备,并逐渐成为一种标准配置而越来越多地出现在各类高价值平台上。同其他告警手段相比,日盲紫外导弹告警技术具有众多的优点^[6]:

1) 探测精度高。温度高于绝对零度的物体都具有可观测的红外特征,而并不是所有的物体都具有可辨别的紫外特征。换句话说,红外探测技术通常不能提供识别目标所需的独一无二的信息,而紫外特征光谱不容易引起混叠,更容易识别目标,有利于提高导弹告警精度。

2) 隐身性能好。紫外告警采用被动探测方式,不需要主动发射任何电磁波,提高了平台的隐身性能,适应现代战争的作战需要。

3)结构简单。紫外告警设备采用固定视场、凝视探测、多路探测、多路传输、多路信号综合处理的体制,不需要扫描和制冷,重量轻,体积小,与其他电子战设备具有很好的电磁兼容性,易于装备使用。

4)用途广泛。紫外告警可覆盖所有可能的攻击角,通过探测导弹尾焰的紫外辐射可以对短程空空导弹及地空导弹等便携式导弹进行全程探测,为飞机、舰艇和坦克等提供末级近程全方位防御。

美国、俄罗斯、以色列等国家已经对紫外导弹预警系统进行了深入的研究,相继研制出两代产品和十多种型号,先后装备了大量的先进直升机、运输机和战斗机。为了提高我国的导弹防御水平,发展先进的紫外导弹预警技术势在必行,因此,有必要加强对紫外告警系统关键技术的研究。

3 紫外告警系统关键技术

3.1 紫外光学系统

光学系统是日盲紫外探测系统核心部分,其优劣直接决定了紫外探测系统的性能好坏。由于紫外波长较短,容易引起散射效应而产生大量的杂散光,因此,需要慎重考虑紫外光学系统的结构形式和光学材料^[7]。

紫外光学系统采用反射式结构会对反射镜的面型精度和装调提出很高的要求,而采用透射式结构容易实现较大的视场、结构小型化和良好的像质,因此透射式结构成为紫外探测系统的主要光学形式。

普通光学玻璃透射波长一般在 350~2400 nm 之间,不能在紫外波段完全透射,因此,普通光学玻璃不能应用在日盲紫外光学系统中。在工程上,日盲紫外波段可选用的透射光学元件以光学晶体材料为主,考虑到材料的耐辐射性能、理化性能和加工性能,实际设计可用的材料仅有氟化钙、氟化镁和熔石英三种,其性能参数如表 1 所示。紫外光学材料的选择余地很小且材料色散系数差别较小,给紫外光学系统的色差校正带来了很大的困难。

表 1 日盲紫外材料特性

Table 1 Properties of solar blind UV material

Material	Silica	CaF ₂	MgF ₂
Density at 25 °C/(g/cm ³)	2.2	3.18	3.18
Refractivity at 300 nm	1.494	1.434	$n_o=1.378, n_e=1.390$
Dispersion ν_d	67.621	94.996	106.218
Expansion coefficient /K ⁻¹	0.5×10^{-6}	18.85×10^{-6}	13.7×10^{-6} (parallel to <i>c</i> axis), 8.9×10^{-6} (perpendicular to <i>c</i> axis)

3.2 紫外探测器

紫外探测器是紫外探测技术实现的基础,常用的紫外探测器件主要有光电倍增管(PMT)、第二代增强型电荷耦合器件(ICCD)和电子倍增电荷耦合器件(EMCCD)。其中,ICCD紫外探测器能精确接收紫外辐射,具有识别能力强、体积小、重量轻、探测灵敏度高的优点,在国内外紫外探测系统中得到了广泛的应用,其结构形式如图 2 所示^[8]。

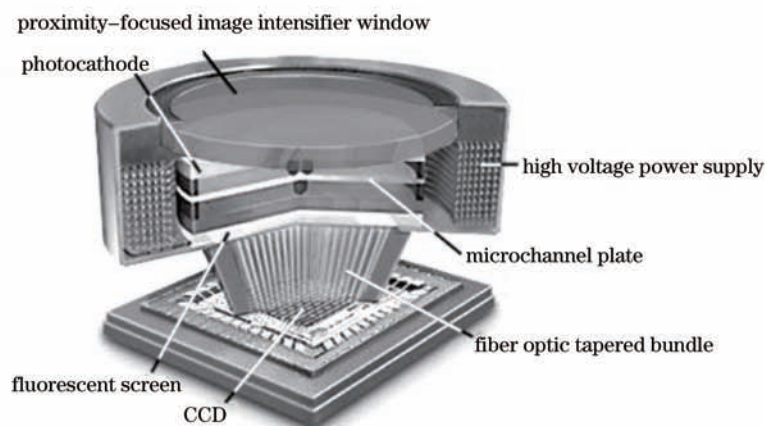


图 2 ICCD 结构示意图

Fig.2 Configuration of ICCD

3.3 日盲紫外滤光片

紫外滤光片是紫外探测系统的重要元件,可以有效屏蔽日盲紫外以外的波段对探测系统的影响。工作在日盲紫外波段的探测器,虽然其响应峰值在日盲紫外区,但其在长波紫外区仍然有较高的响应度,为确保探测器在日照环境下的正常工作,必须使用带内高通、带外深度截止的滤光片。目前常用的日盲紫外滤光片主要有干涉型、吸收型、声光型和组合型几种形式,其中干涉型滤光片性能最为优异,是日盲紫外波段最常用的滤光片形式^[9-10]。

4 实例设计与性能分析

近年来,随着紫外导弹告警技术的不断发展,用户对紫外导弹告警系统也提出了越来越高的要求。本文针对日盲紫外导弹预警的应用需求,设计了一款日盲紫外光学系统。

4.1 日盲紫外光学系统设计指标

紫外目标发出的日盲紫外辐射特征明显,但信号强度通常比较弱,为了提高紫外系统的探测灵敏度,应当尽量提高紫外光学系统的相对孔径,同时为了降低系统的信噪比,相对孔径又不宜取得过大;现代探测系统对目标的分辨率提出了更高的要求,光学系统的焦距应当选得长一些。基于以上几点考虑,并结合紫外透射元件的加工条件,最终确定了光学系统的设计指标,如表2所示。光学系统选择ICCD紫外探测器,探测灵敏度为 $7 \times 10^{-15} \text{ W/m}^2$;选用真空干涉镀膜型日盲紫外滤光片,其在光学系统工作波段内峰值透射率大于20%。

表2 光学系统设计指标

Table 2 Design parameters of optical system

Parameter	Value
Wavelength /nm	240~280
Focal length /mm	150
<i>F</i> number	3
FOV 2ω /($^\circ$)	± 4
Pixel dimension / μm	25
Pixel number of detector	1024 \times 1024

4.2 光学系统初步设计

由表2所示的光学系统设计指标可以看出,系统相对孔径 $D/f' = 1:3$,焦距比较长,属于长焦型光学系统。综合考虑相对孔径、焦距以及紫外滤光片的放置要求,光学系统选择透射式结构。同时为了避免薄膜峰值漂移,需要将入射到紫外滤光片上的光线角度严格控制在 8° 以内,这就要求光学系统接近像方远心光路。根据以上考虑,最终选择了柯克三片式系统作为初始结构。

对于日盲紫外光学系统,需要对光学系统的色差进行校正以保证系统具有良好的性能。校正光学系统色差的重要手段之一是利用光学材料的不同色散特性进行合理的光焦度分配,基本设计原则是正透镜选用阿贝数大的材料,负透镜选择阿贝数小的材料。根据表1所示的紫外材料的性能,负透镜比较适宜的材料是熔石英,正透镜可选用的材料有 CaF_2 和 MgF_2 ,而 CaF_2 的折射率较低,有利于高级像差的校正,因此,初始结构三片透镜分别选择 CaF_2 、熔石英和 CaF_2 材料。经初步设计后的光学系统结构如图3所示。

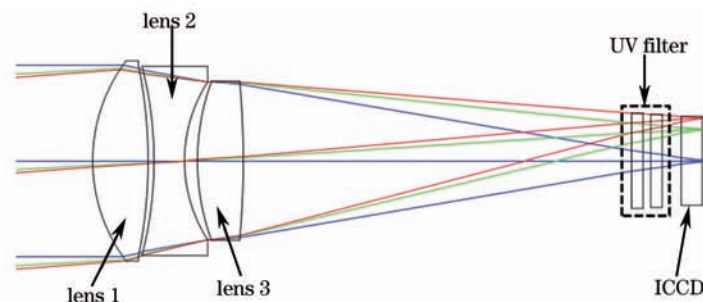


图3 紫外光学系统初始结构

Fig.3 Initial optical system configuration

4.3 光学系统优化设计和像质评价

图3所示的初始系统存在较大的球差和色差,调制传递函数(MTF)曲线很差,光线到滤光片的人射角度较大,不能满足使用要求。因此,需要对初始系统进行优化设计。给初始系统增加一组由两片正、负透镜组成的后透镜组,控制入射到滤光片的光线角度,同时合理分配前后组的光焦度,减小系统的球差和色差,实现系统的像差校正。经过优化后的光学系统结构参数如表3所示,其中Semi-diameter表示半口径,光学系统结构如图4所示,光学系统的MTF曲线和能量集中度曲线如图5、6所示。

表3 光学系统结构参数

Table 3 Optical system configuration parameters

Surface	Radius /mm	Thickness /mm	Material	Semi-diameter /mm
Objective	Infinity	Infinity		Infinity
1	67.07	14.45	CaF ₂	26.45
2	-71.31	1.50		25.73
3	-67.84	4.50	Silica	24.88
4	38.87	1.50		22.26
5	39.88	13.01	CaF ₂	23.40
6	551.97	1.77		21.46
Stop	Infinity	16.29		21.20
8	38.74	11.79	CaF ₂	20.49
9	91.02	1.60		17.81
10	38.11	7.68	Silica	17.94
11	22.69	52.26		15.14
12	Infinity	3.00	Silica	12.36
13	Infinity	2.00		12.24
14	Infinity	3.00	Silica	12.12
15	Infinity	20.75		12.00
16	Infinity	5.50	Silica	10.76
Image	Infinity			10.58

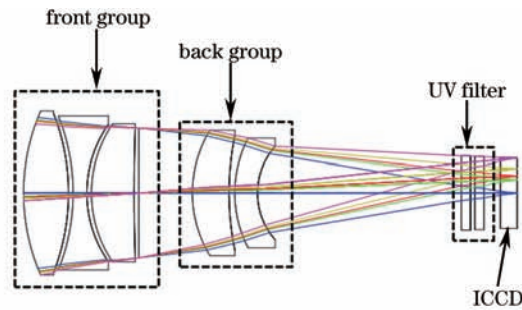


图4 紫外光学系统结构

Fig.4 UV optical system configuration

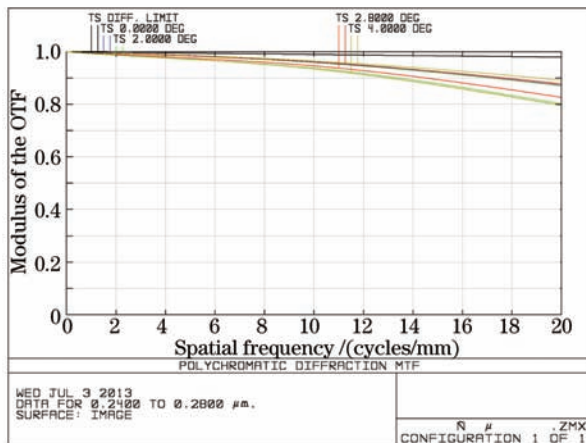


图5 紫外光学系统 MTF 曲线(20 lp/mm)

Fig.5 MTF curves of UV optical system (20 lp/mm)

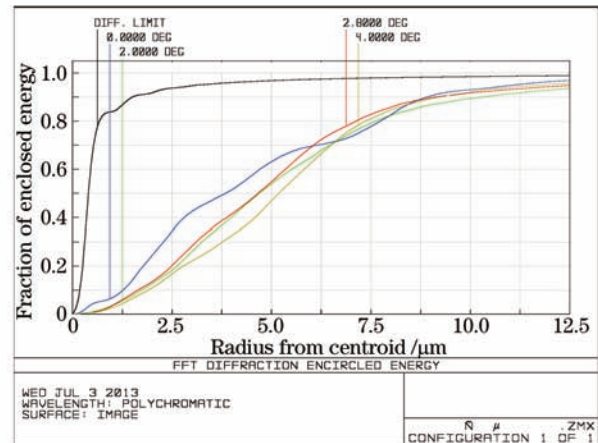


图6 紫外光学系统能量集中度曲线

Fig.6 Diffraction encircled energy curve of UV optical system

根据以上设计结果,可以看出光学系统共用了5片透镜,总长160 mm,结构简单紧凑;系统在奈奎斯特频率(20 lp/mm)处光学传递函数大于0.7,接近衍射极限,在ICCD单个像素内,能量集中度大于90%,成像质量优异;边缘光线在滤光片上的入射角度为 6.2° ,不会引起滤光片的薄膜峰值漂移。由此可见,该光学系统各项指标均满足设计要求,可用于日盲紫外导弹告警系统以及其他紫外光电探测设备,具有很高的应用价值。

5 结 论

日盲紫外探测技术具有探测精度高、隐身能力强、无需制冷等特点,在电晕检测、紫外导弹告警、天基紫外预警等方面具有重要的应用价值,逐渐成为光电探测技术发展的重要方向。本文探讨了紫外导弹告警系统的原理及其优势,总结了紫外导弹告警系统的关键技术,并针对紫外告警的应用需求,设计了一款日盲紫外光学系统,该系统工作波段240~280 nm,焦距 $f'=150$ mm,相对孔径1:3,视场 $2\omega=\pm 4^\circ$,具有结构简单紧凑、成像质量良好的特点,可以满足日盲紫外导弹告警系统的要求。

参 考 文 献

- 1 Wang Liping. Optical design for dual spectral panoramic imaging applied in corona detector [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(10): 1770-1774.
王丽萍. 双谱段全景电晕探测光学系统[J]. *光子学报*, 2010, 39(10): 1770-1774.
- 2 Li Bingjun, Liang Yonghui. Development of UV 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.
- 3 Tang Shaofan, Shen Hongbing. The demonstration of space-based UV missile precaution and the research of UV precaution detector [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2003, 24(4): 25-27.
唐绍凡, 沈洪兵. 天基导弹紫外预警及紫外预警探测仪 [J]. *航天返回与遥感*, 2003, 24(4): 25-27.
- 4 Zhou Feng, Zheng Guoxian, Yan Feng, *et al.*. Development status and thoughts of space-based UV warning technology [J]. *Spacecraft recovery & Remote sensing*, 2012, 33(6): 39-44.
周 峰, 郑国宪, 闫 锋, 等. 天基紫外预警技术发展现状及思考[J]. *航天返回与遥感*, 2012, 33(6): 39-44.
- 5 Wang Shurong, Song Kefei, Li Futian. Radiometric calibration on ground of satellite-borne solar ultraviolet spectral monitor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(12): 2256-2261.
王淑荣, 宋克非, 李福田. 星载太阳紫外光谱监视器的地面辐射定标[J]. *光学学报*, 2007, 27(12): 2256-2261.
- 6 Xu Qiang. *Detecting Technology and Application of Military Ultraviolet* [M]. Beijing: Beihang University Press, 2010.
许 强. *军用紫外探测技术及应用*[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010.
- 7 Liu Zhuang, Gong Yan. Design of optical system for solar extreme-ultraviolet imaging spectrometer using holographic varied line spacing grating [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(11): 1116001.
刘 壮, 巩 岩. 应用全息变间距光栅的极紫外成像光谱仪光学系统设计[J]. *中国激光*, 2012, 39(11): 1116001.
- 8 Yan Feng, Yu Zijiang, Yu Xiao, *et al.*. Noise analysis and processing of ultraviolet ICCD for corona detection [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2006, 14(4): 709-713.
闫 丰, 于子江, 于 晓, 等. 电晕探测紫外ICCD相机图像噪声分析与处理 [J]. *光学精密工程*, 2006, 14(4): 709-713.
- 8 Xu Zhihuang, Zhuang Xinxin, Su Genbo. Study on ultraviolet spectrum property of ultraviolet filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(7): 1918-1920.
许智煌, 庄欣欣, 苏根博. 有机紫外滤光材料的紫外光谱性质研究[J]. *光学学报*, 2009, 29(7): 1918-1920.
- 9 Fu Lianxiao, Wu Yonggang, Zheng Xiuping, *et al.*. Design and preparation of narrowband filter with central wavelength 121.6 nm in vacuum ultraviolet region [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(12): 2427-2430.
付联效, 吴永刚, 郑秀萍, 等. 中心波长121.6 nm的真空紫外窄带滤光片设计和制备[J]. *光学学报*, 2008, 28(12): 2427-2430.