

# 大视场大相对孔径日盲紫外告警光学系统设计

郑国宪<sup>1</sup>, 焦建超<sup>1</sup>, 俞越<sup>1</sup>, 苏云<sup>1</sup>, 唐义<sup>2</sup>, 粘伟<sup>1</sup>, 刘剑峰<sup>1</sup>

(1. 北京空间机电研究所, 北京 100094;  
2. 北京理工大学光电学院, 北京 100081)

**摘要:** 日盲紫外探测系统因其灵敏度极高、虚警率低、体积小、质量轻、结构简单、无需制冷等优点, 在紫外制导、紫外通信等多个领域, 尤其是导弹告警领域获得越来越多的应用。根据应用需求, 设计了一种大视场大相对孔径日盲紫外告警光学系统。首先根据探测距离等任务要求, 分析了告警系统光学口径等光学系统性能指标设计要求, 结合实际情况进行光学系统选型与难点分析, 综合采用三种方法解决了照度均匀性难题, 并给出大视场大相对孔径日盲紫外光学系统设计结果, 系统在工作谱段 0.255~0.275  $\mu\text{m}$  范围内具有优良的像质, 且仅采用熔石英一种材料, 所有镜面均为球面, 公差较松, 有利于加工和装调。

**关键词:** 光学设计; 大视场; 相对孔径; 日盲紫外; 导弹告警

**中图分类号:** TH744.1; O43 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200260

## Design of solar-blind ultraviolet warning optical system with large FOV and large relative aperture

Zheng Guoxian<sup>1</sup>, Jiao Jianchao<sup>1</sup>, Yu Yue<sup>1</sup>, Su Yun<sup>1</sup>, Tang Yi<sup>2</sup>, Nian Wei<sup>1</sup>, Liu Jianfeng<sup>1</sup>

(1. Beijing Institute of Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China;  
2. School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Due to its high sensitivity, low false alarm rate, small volume, light weight, simple configuration and without cooling system, solar-blind ultraviolet detecting system is widely used in guidance, communication etc., especially in missile warning. According to the application requirements, a solar-blind ultraviolet warning optical system with large field of view and large relative aperture was designed. Based on the requirements of working distance etc., optical system aperture and other parameters were analyzed. Combined with the actual situation, the optical system selection and difficulty analysis were carried out. Three methods were used to solve the problem of illumination uniformity, and the design results of solar blind ultraviolet optical system with large field of view and large relative aperture were given. It has fine image quality in working spectrum 0.255-0.275  $\mu\text{m}$ . All elements were designed with sphere and used fused silica only, thus have loose tolerance and are convenient for manufacturing and alignment.

**Key words:** optical design; large FOV; relative aperture; solar-blind ultraviolet; missile warning

## 0 引言

现代光电子技术正突破可见光与红外波段的限制,逐步向紫外光波段扩展。与可见光和红外光波段相比,紫外光波段的军事应用研究起步相对较晚,但因紫外光特有的优点,在导弹告警、紫外制导、紫外通信等军事应用上具有广阔的前景,已经成为各个军事强国研究的重点<sup>[1]</sup>。

紫外光是指波长在 0.01~0.4 μm 之间的电磁波,因为高空大气中的臭氧层对 0.24~0.28 μm 波段的紫外光存在着强烈的吸收,使得该波段的太阳辐射难以到达地面,形成对流层以下近地表几近完美的暗室,因此该谱段也被称为“日盲紫外”。当工作在该谱段的系统对导弹等目标进行探测时,可以有效避开最强大的自然光源,在极其简单的背景条件下获取目标信息<sup>[2]</sup>。

导弹紫外告警系统正是基于该特点获得了快速发展。除了背景简单、虚警率低之外,紫外系统还具有体积小、质量轻、结构简单、无需制冷等诸多优势,因此近年来紫外探测技术获得了飞速发展,紫外告警技术也逐渐取代了起步更早的红外告警与雷达告警成为导弹逼近告警的主要技术手段,在光电对抗领域发挥着越来越重要的作用<sup>[3]</sup>。

经过 30 多年的发展,紫外告警系统形成了两代产品,十余种型号,在欧美发达国家的先进战机上得到广泛应用<sup>[4]</sup>。第一代紫外告警系统以光电倍增管作为核心探测器,概略接收紫外辐射并放大,从而判断导弹大致方位,因此称为概略型紫外告警系统。第

一代紫外告警系统体积小、功耗低,但灵敏度较差、角分辨不高。典型代表有美国 AN/ARR-47、以色列 Guitar-300/320、南非 MAWS 等。第二代紫外告警系统为成像型紫外告警系统,其核心探测器为面阵成像器件,通过对探测器上目标图像进行解算,得到目标的空间位置坐标。第二代紫外告警系统接收视场很大,具有更强的探测能力和更高的角分辨率。典型代表有美国 AN/AAR-54(V)、以色列 Guitar-350、南非 MAW-200 等<sup>[5]</sup>。

紫外告警系统为提高系统覆盖性及探测灵敏度,一般要求光学系统具有大视场、大相对孔径。参考文献 [6] 中设计了一个相对孔径 1 : 2 的准像方远心系统,但视场角较小仅为 10°。参考文献 [4] 中的设计将视场角扩大到 43°,但相对孔径仅 1 : 4,且采用了非球面和二元衍射光学元件,增加了成本与实现难度。参考文献 [5] 中的系统视场进一步扩大到 60°,但同样采用了工程难以实现的非球面和二元衍射光学元件。参考文献 [7] 中设计的系统视场达到 120°,且采用了准像方远心光路设计,但该系统一共采用 11 片透镜,能量损失较大,相对孔径达到 1 : 2,镜头较长、镜片较多,成本仍然需要进一步控制。

文中设计了一个相对孔径为 1.5 : 1、视场为 130°、口径为 6 mm 的紫外光学系统。系统采用准像方远心设计,成像质量好,像面照度均匀。所有镜片均采用熔石英一种材料,结构紧凑,公差较松,较好地满足了成本控制和工程实现性要求。表 1 给出了设计结果与相关参考文献光学系统设计结果的指标对比情况。

表 1 与其他光学系统对比

Tab.1 Compared with other optical systems

Parameter	Proposed	Ref. [4]	Ref. [5]	Ref. [6]	Ref. [7]
Spectrum/nm	255-275	240-280	240-280	260-270	254-272
FOV/(°)	130	8	60	10	120
Focal lenth/mm	9	150	34	100	6.95
Relative aperture	1.5 : 1	1 : 3	1 : 3	1 : 2	1 : 2
Nyquist frequency	4	20	21.3	10	-
MTF	>0.36	>0.7	-	>0.4	-
Number of lenses	8	5	5	6	7
Material	Silica	Silica, CAF2	Silica, CAF2	Silica, CAF2	Silica, CAF2
Surface shape	Sphere	Sphere	2 asphere,1 binary	Sphere	-

## 1 系统设计要求分解

系统性能要求如下。

工作波长: 0.255~0.275 μm;

视场覆盖: 90°×90°;

探测距离: ≥5 km (平台高度 5 km, 目标辐射强度 0.2 W/sr);

探测概率: ≥0.98;

虚警时间: ≥10 h;

帧频: ≥20。

最远探测距离是系统的一个重要性能指标, 其影响因素包括目标辐射强度、大气传输特性和告警系统性能。从能量传递角度讲, 当目标作用于探测器靶面上的能量等于探测器的最小响应时, 目标与告警系统之间的距离即为告警系统最远探测距离。

通常, 满足探测要求的最低信噪比 (SNR) 由系统的性能参数探测概率和虚警率决定<sup>[8]</sup>。系统的虚警率是噪声电压超过门限电压引起的, 当只有噪声输入时, 考虑噪声服从瑞利分布, 虚警率  $P_{fa}$  表示为:

$$P_{fa} = P(T < V < \infty) = \int_T^{\infty} \frac{V}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{V}{\sigma}\right)^2\right] dV = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{T}{\sigma}\right)^2\right] \quad (1)$$

式中:  $T$  为门限电压;  $V$  为噪声幅值;  $\sigma$  为噪声电压均方根偏差;  $V/\sigma$  为门限信噪比。

当信号与噪声同时进入系统时, 探测概率为信号与噪声总幅值超过门限电压  $T$  的概率, SNR 增大时其分布逐渐趋向于高斯分布, 此时探测概率

$$P_d = \int_T^{\infty} P_d(\rho) d\rho = \int_T^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\rho-a}{\sigma}\right)^2\right] d\rho = \Phi\left(\frac{a-T}{\sigma}\right) \quad (2)$$

式中:  $\rho$  为信号与噪声总幅值;  $a$  为信号幅值。

可见, 可以根据系统的探测概率和虚警率确定系统所需的最低信噪比。

系统探测概率为 0.98, 虚警时间不小于 10 h, 则虚警率

$$P_{fa} = \frac{1}{Ft_{fa}} \quad (3)$$

式中:  $F$  为系统工作帧频;  $t_{fa}$  为虚警时间。

系统工作帧频为 20 Hz, 虚警时间 10 h, 则系统虚

警率为  $1.39 \times 10^{-6}$ 。

系统信噪比

$$SNR = \frac{a}{\sigma} = \frac{a-T}{\sigma} + \frac{V}{\sigma} = \Phi^{-1}(P_d) + \sqrt{-2 \ln P_{fa}} \quad (4)$$

经分析计算, 当系统信噪比达到 6.53 时, 即可满足探测概率与虚警率要求。而系统信噪比

$$SNR = \sqrt{I \frac{\pi D^2}{4R^2} \tau_A \tau_O \frac{\lambda}{hc} t Q} \quad (5)$$

式中:  $I$  为目标辐射强度 0.2 W/sr;  $D$  为光学系统有效口径;  $R$  为最远探测距离 5 km;  $\tau_A$  为大气透过率, 通过 PcModwin 软件仿真结果为 0.032;  $\tau_O$  为光学系统整体透过率 (含滤光片), 约为 0.2;  $\lambda$  为系统工作中心波长, 0.265 μm;  $h$  为普朗克常数,  $6.63 \times 10^{-34}$  J·s;  $c$  为光速,  $3 \times 10^8$  m/s;  $t$  为积分时间, 45 ms;  $Q$  为探测器量子效率, 0.2。

将以上数据代入公式, 经计算要满足最远探测距离等系统性能要求, 光学系统有效口径应不小于 6 mm。

## 2 光学系统设计

### 2.1 设计要求

为提高系统性能, 需要设计大视场、大相对孔径的光学系统。根据覆盖视场搭接、探测器选型、像质、接口与工程实现等要求, 总结光学系统设计指标要求如表 2 所示。

表 2 光学系统设计指标要求

Tab.2 Design requirements of optical system

Parameter	Design requirements
Spectrum/μm	0.255-0.275
Aperture/mm	≥6
FOV/(°)	≥130
Overall length/mm	≤110
BFL(including detector window)/mm	≥7.5
Transmittance (without filter)	≥0.92
MTF/lp·mm <sup>-1</sup>	≥0.3@4
Illumination uniformity	≤10%
RMS scattering radius/μm	<125

## 2.2 系统选型与难点分析

由设计指标可以看出,所设计的光学系统具有大相对口径、大视场等特点,此外还要求考虑满足机载工作环境。反射式系统虽然没有色差,但受视场角和体积的限制而无法选用。综合考虑光学系统的特点、工程实现性、成本等因素,光学系统选择透射式结构。

透射式系统色差校正是难点,而紫外透射材料折射率均较低,且紫外材料的温度特性较差,部分材料还吸湿,易受潮老化降低材料本身的透过率。因此,要考虑尽量选用同种强环境适应性材料,以降低环境温度、湿度、压强等变化对系统像质和寿命的影响,同时尽可能选择成本低廉的材料。因此,只能在有限的材料中进行选择,并进行温度适应性设计和像差校正,需要增加镜片数和镜片厚度,同时又要确保系统透过率和像面照度均匀性。上述问题成为系统设计需要解决的主要难点。综合考虑后,光学系统材料选用熔石英。

超广角镜头结构主要有反远距、鲁沙尔及托普岗等形式。其中,鲁沙尔及托普岗等结构形式关于孔径光阑对称,可以较好地校正轴外像差,但它们的像方视场角大,像面照度均匀性较差,后截距较短;而反远距型具有较长的后截距,可以设计成准像方远心形式,以保证像面照度的均匀性。系统要求具有一定的后截距,以便放置探测器组件,因此选用反远距型。

## 2.3 照度均匀性设计

光学系统像面照度的公式为:

$$E' = E_0 K_1 K_2 \cos^4 \omega' \quad (6)$$

式中:  $E'$  为像面轴外视场照度;  $E_0$  为视场中心照度;  $K_1$  为几何渐晕系数,  $K_1 \leq 1$ ;  $K_2$  为轴外光束截面积与轴上光束截面积之比,即像差渐晕系数,当存在光阑彗差时,  $K_2 > 1$ ;  $\omega'$  为像方半视场角。

由公式 (6) 可知,像面轴外视场照度与像方视场角余弦的四次方成正比。因此,为提高像面照度均匀性,综合采用以下三种方法进行设计:(1) 合理利用桶形畸变,使像方轴外视场变小,以提高边缘视场的照度值;(2) 合理利用渐晕,使轴外入瞳口径随视场的增大而增大,以保持各视场照度一致性;(3) 采用准像方

远心光路设计,以减小边缘视场在像面的入射角,减少因斜入射到探测器像面引起的能量损失。

## 3 设计结果与像质评价

### 3.1 设计结果

像方远心系统一般分为两组:前组为负光焦度,用于扩大视场角;后组为正光焦度,通常为三片式。为校正像差,两组均增加了片数,两组各四片镜片。光学系统设计结果如图 1 所示。

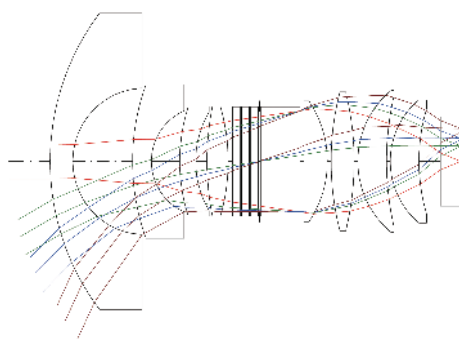


图 1 光学系统设计结果

Fig.1 Optical sytem design result

整个系统的八片镜片均采用物理化学性能优良的熔石英材料,单片透过率达 0.995/cm 以上,整体透过率达 0.96 以上(不含滤光片,中间的四片平板玻璃为滤光片组件)。系统口径为 6.00 mm,焦距为 9.00 mm,相对孔径为 1.5 : 1,视场角为 130°,系统总长度为 108.99 mm,后截距为 9.35 mm。以上结果均满足或优于设计指标要求。

### 3.2 像质评价

光学系统的 MTF 如图 2 所示,全视场 MTF 均大于 0.36。

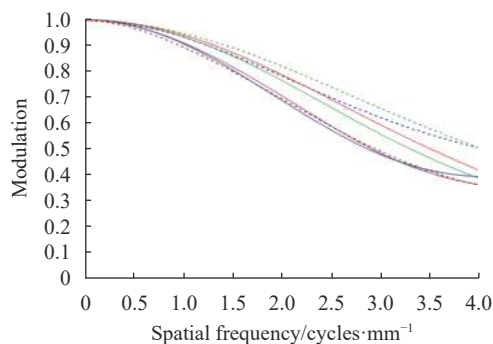


图 2 光学系统 MTF

Fig.2 MTF of optical system

光学系统点列图如图 3 和表 3 所示, 边缘视场最大弥散斑 RMS 值小于 108.3  $\mu\text{m}$ , 全视场弥散斑 RMS 均满足小于 125  $\mu\text{m}$  指标要求。

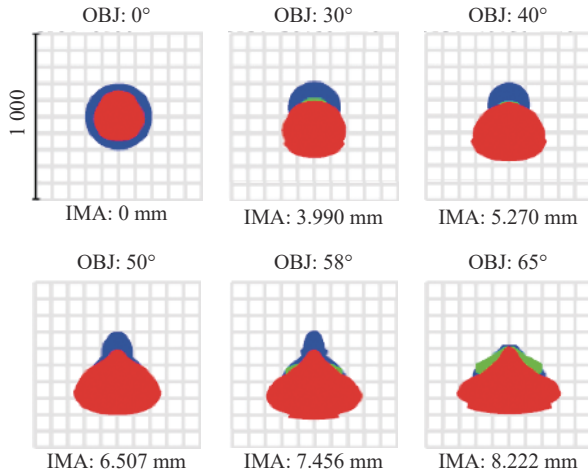


图 3 光学系统点列图

Fig.3 Spot diagram of optical system

表 3 光学系统弥散斑

Tab.3 Dispersion spot of optical system

Field/(°)	0	30	40	50	58	65
RMS radius/ $\mu\text{m}$	108.3	92.6	90.7	96.6	106.8	108.2

光学系统像面照度如图 4 所示, 最大照度差为 8%, 优于 10% 的设计要求。

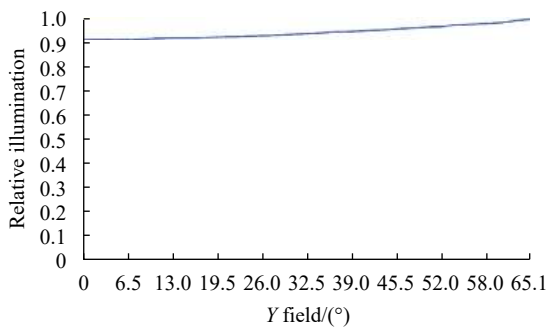


图 4 光学系统像面照度

Fig.4 Relative illumination of optical system

图 5 所示为加工、装调完成后的日盲紫外告警系统镜头。



图 5 日盲紫外告警镜头

Fig.5 Solar-blind ultraviolet warning lens

## 4 结 论

日盲紫外探测系统因其具有灵敏度极高、虚警率低、体积小、质量轻、结构简单、无需制冷等优点, 在导弹告警、紫外制导、紫外通信等多个领域得到广泛应用。根据系统性能要求, 对光学系统设计输入进行了解析, 并根据光学系统设计指标要求设计了一款相对孔径 1.5 : 1、视场 130°的紫外告警光学系统。系统采用准像方远心光路, 选用单一熔石英材料, 具有优良的像质和工程实现性, 且系统结构紧凑, 较好地控制了成本, 具有广阔的应用前景。

### 参考文献:

- [1] Wang Xi, Fang Xiaodong, Nie Jinsong. Military ultraviolet technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S1): 58-61. (in Chinese)  
王玺, 方晓东, 聂劲松. 军用紫外技术[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(S1): 58-61.
- [2] Yang Cheng, Zeng Qinyong, Zhu Dayong, et al. Measurement of max detection distance and azimuth in solar blind ultraviolet warning system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S): 116-119. (in Chinese)  
杨承, 曾钦勇, 朱大勇, 等. 日盲型紫外告警系统探测距离及方位角测量的研究[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(S): 116-119.
- [3] Chen Yu, Song Yulong, Huo Furong. Design of solar-blind UV optical system for missile approach warning [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 2965-2969. (in Chinese)  
陈宇, 宋玉龙, 霍富荣. 用于导弹逼近告警的“日盲”紫外光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(9): 2965-2969.
- [4] Wang Baohua, Li Tuotuo, Zheng Guoxian. Research of solar blind ultraviolet detection system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(2): 022202. (in Chinese)

- 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.
- [5] Fan Wenwen. Design of a large field solar-blind ultraviolet warning optical system [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- 范雯雯. 大视场日盲紫外告警光学系统设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2018.
- [6] 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. (in Chinese)
- 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.
- [7] Wang Hong. Optical system for ultraviolet warning camera with wide field of view and large relative aperture [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 43(12): 160-164. (in Chinese)
- 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, 43(12): 160-164.
- [8] Zhao Jianchuan, Chen Zhaobing, Guo Jin, et al. UV and IR complex warning system based on signal to noise [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, 2(3): 195-199. (in Chinese)
- 赵建川, 陈兆兵, 郭劲, 等. 基于信噪比的紫外红外复合告警系统模型[J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(3): 195-199.



第一作者简介: 郑国宪 (1982-), 男, 工学硕士, 毕业于哈尔滨工业大学光学工程专业, 高级工程师, 主要从事光学遥感器总体设计、紫外探测技术研究、空间光学遥感技术发展战略研究, 现任军、民多个渠道专家组专家和技术秘书。主持完成多个渠道项目, 申请专利十余项, 发表论文近 20 篇, 获省部级以上奖项 3 项。Email: 15910524812@163.com