

doi:10.3788/gzxb20144312.1222004

大视场紫外告警相机光学系统研究与设计

王红

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 长春 130033)

摘 要: 为了提高紫外探测器系统的信噪比, 确保紫外告警相机的低虚警率, 分析与研究了大视场紫外光学系统的结构型式, 采用反远距、准像方远心光路, 实现了大视场光学系统的像差校正, 使系统具有优良的成像质量及均匀的像面照度. 设计了波段范围为 $0.254\sim 0.272\ \mu\text{m}$ 、视场角为 110° 、相对孔径为 $1/3$ 的光学系统. 系统成像质量良好, 畸变小, 像面照度均匀. 成像质量分析结果表明: 全视场最大弥散斑半径小于 $53.7\ \mu\text{m}$, 轴上、轴外视场像面照度均匀性小于 15% , 0.85 视场的相对畸变小于 20% , 满足紫外告警相机的使用要求.

关键词: 大视场; 大相对孔径; 光学设计; 紫外告警; 成像质量; 像面照度

中图分类号: O435

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)12-1222004-5

Optical System Study and Design Used for the Ultraviolet Warning Camera with Ultra-wide Field

WANG Hong

(Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to improve the signal to noise ratio of the system and reduce the false alarm rate, the structure type, correction of the image aberration and the image illumination uniformity were researched and analyzed. The telecentric and retrofocus structure was adopted. The system with the full field of view of 110° , the relative aperture of $1/3$, and spectral range from $0.254\ \mu\text{m}$ to $0.272\ \mu\text{m}$ was designed. The analysis results demonstrate that the dispersion spot diameter is smaller than $53.7\ \mu\text{m}$, the relative distortion is smaller than 20% at 0.85 field of view, and the relative illumination uniformity is smaller than 15% . The structure is compact and feasible for ultraviolet warning camera.

Key words: Wide angle and large relative aperture; Optical design; Ultraviolet warn; Image quality; Image illumination uniformity

OCIS Codes: 220.1000; 220.2945; 220.2740; 220.3620; 220.4830

0 引言

波长在 $200\sim 300\ \text{nm}$ 波段的太阳紫外辐射可被地球的臭氧层完全吸收, 大气层中的背景辐射几乎为零, 称为日盲光谱区. 战术导弹的飞行动力是燃料加助燃剂, 在低空飞行时, 燃烧形成处于日盲光谱区波段的紫外辐射源, 通过紫外探测器在微弱的背景下探测来袭导弹. 紫外告警是利用目标所发出的带有紫外的波谱进行预警, 采取规避或拦截反应的技术, 具有无需制

冷、虚警率低、质量轻和体积小等优点^[1].

紫外告警经过 20 多年的迅速发展, 已经成为国外装备量最大的导弹来袭告警系统之一, 在光电对抗领域发挥重要的作用. 国外典型的紫外告警相机有以色列拉菲尔公司研制的 Guitar-350 系统、欧盟(法国 MBDA 和德国 EADS 公司)研制的 AN/AAR-60MLDS 系统、美国诺格公司的 AN/AAR-54(V)告警系统和美国利顿(Litton)公司的 AMAWS 等. 国内东北电子技术研究所自主研发的导弹逼近紫外告警系统, 探测

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60507003)资助

第一作者: 王红(1968—), 研究员, 博士, 主要研究方向为空间遥感器光学系统设计. Email: wanghong@ciomp.ac.cn

收稿日期: 2014-11-04; 录用日期: 2014-12-05

<http://www.photon.ac.cn>

与识别能力都达到了较高的水平^[2]。

航天科工集团八三五八所的王建成等研究与分析了基于紫外增强型电荷耦合器件(Intensification Charge-Coupled Device, ICCD)的导弹逼近告警系统、紫外目标特性及大气传输研究、大视场窄带紫外光学系统及紫外图像处理等^[3];北京理工大学的娄颖等提出了紫外告警系统探测距离的估算方法及模型^[4];西安通信学院的王春阳以导弹尾焰所形成的紫外辐射源为目标,根据集合光学方法,通过视场角和探测距离计算分析得到系统的焦距、视场以及通光口径等参量要求,但缺少相关的设计结果^[5];西安光学精密机械研究所的靳贵平等提出了一种新型的紫外成像检测技术^[6];长春理工大学的于远航、宋姗姗等利用二元光学元件和非球面元件设计的紫外告警光学系统的视场角和相对孔径分别为 40° 、 $1/3.5$ ^[7]和 30° 、 $1/4$ ^[8]。

为了保证实战中紫外告警相机在日盲紫外区以低虚警率探测极微弱的信号目标,提高系统的接收灵敏度,需要采用大相对孔径、大视场的光学系统。系统设计选择折射率高的光学材料有利于像差校正,但紫外透射材料的折射率低,均小于1.46,为了满足成像质量的要求,需要增加透射的片数或透镜的厚度,这将导致光学系统透过率降低,无法提高像面照度。

紫外光谱波段范围只有少量的光学材料可以使用,如熔石英、氟化物(氟化钡、氟化钙和氟化锂等)、UBK7和蓝宝石等。这些光学材料的色散系数差别不大,增加了紫外光学系统色差校正的难度。大视场、大相对孔径的光学系统,轴外像差校正尤其困难^[9]。还需要考虑满足相对畸变和相对照度均匀性等要求。

本文针对紫外告警相机,分析与研究了大视场、大相对孔径光学系统的结构型式、像差校正及像面均匀性等。采用反远距的结构型式,通过准像方远心光路设计,解决了大视场、大相对孔径光学系统的像差校正和像面照度均匀性的矛盾。设计出一个相对孔径为 $1/3$ 、全视场为 110° 、焦距为7 mm的紫外光学系统,系统成像质量优良,全视场的点列图均方根半径在 $53.7 \mu\text{m}$ 以内,0.85视场内最大相对畸变小于20%,全视场像面照度均匀性小于15%。系统采用两种光学材料,全部为球面透镜,具有很好的工程可实现性。

1 光学系统分析

1.1 结构型式分析

大口径、大视场光学系统中,初级像差和高级像差得到适当的平衡,才能得到良好的成像质量。满足要求的校正结构型式主要有双高斯型(托普岗及鲁沙尔)和反远距型等。

托普岗结构型式由两块弯向光阑的正透镜组组成,光阑前后两组基本对称,各折射面弯向光阑,如图1。

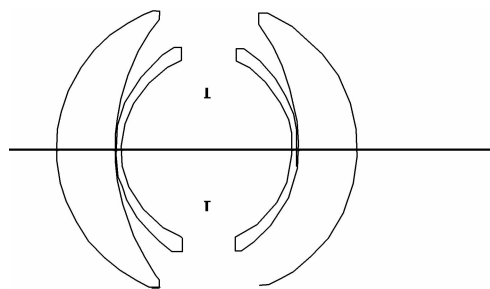


图1 托普岗型

Fig. 1 Type of topogon

由于结构对称,垂轴像差得以校正,透镜的弯曲利于轴外像差校正,光阑前后的间距变化可校正像散。该型式的缺点是具有较大的斜光束渐晕,同时由于轴外像点照度按 $\cos^4 \omega$ 的规律下降(ω 为像方视场角),边缘视场照度比中心低很多,导致像面照度严重不均匀。

鲁沙尔结构型式由对称于光阑的两个反远距镜组组成,如图2。最外面的两个负透镜为接近球壳的形状,两部分的光阑彗差大小相等,符号相反,使得通过入射光瞳和出射光瞳的光束截面相同。利用光阑彗差提高轴外视场像面照度的同时,增加了轴外光束的口径,影响成像质量。

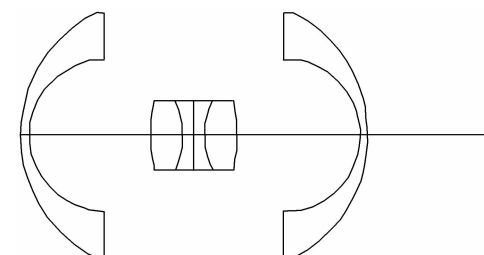


图2 鲁沙尔型

Fig. 2 Type of rushall

这两种结构型式均关于孔径光阑对称,能较好地校正轴外像差,但是像方视场角大,像面照度均匀性差,后工作距短。

反远距型由两个镜组组成,即靠近物方的前组(负透镜组)和后组(正透镜组),两组间隔一定的距离,如图3。其孔径光阑设于后组,前组承担较大的视场,后组承担较大的相对孔径。

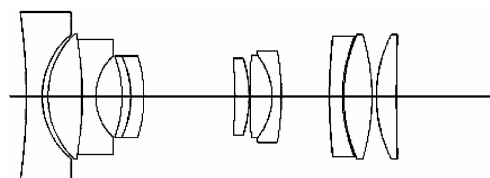


图3 反远距型

Fig. 3 Type of inverted telephoto

由此可见,反远距结构型式具有短焦距、大视场和长工作距离的特点,适合用于紫外告警相机。

1.2 像面照度均匀性分析

大视场、大相对孔径的紫外告警相机镜头,设计时

由于轴外像差大,需拦掉部分轴外视场的光线,才能满足成像质量的要求,这将导致并加重轴外视场的渐晕,像面照度分布的不均匀性更加显著,无法满足使用要求.可见,像面照度分布均匀性的分析是设计的关键.

像面照度的公式为^[9]

$$E' = E_0 K_1 K_2 \cos^4 \omega \quad (1)$$

式中, E' 为轴外视场的像面照度; E_0 为视场中心照度; K_1 为几何渐晕系数,其值小于或等于1; K_2 为轴外斜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 大于1.

轴外像点照度随像方视场角的增大呈四次方的关系下降.为了满足像面照度均匀性,采用以下方法:

1)利用桶形畸变提高边缘视场的像面照度,由于指标中对畸变的要求,不能采用桶形畸变改善边缘视场的像面照度;

2)利用像差渐晕改变视场像面照度,使得入瞳的尺寸随着视场角的增大而增大,增大 K_2 以提高边缘视场的像面照度,鲁沙尔镜头以光阑彗差设计来提高轴外视场的像面照度;

3)采用像方远心或准像方远心光路,减少像方视场角 ω ,改善边缘视场的像面照度,边缘视场和中心视场获得一致的像面照度.反远距镜头的焦距短、视场大、后工作距离长,当光阑位置设计合理、系统的光焦度分配合适时,可以设计成像方远心光路,保证光学系统轴上、轴外视场照度的一致性.

此外,可以考虑采用镀膜的方法改善像面照度,在滤光片上镀制不均匀的透光膜,使视场中心附近的像面照度分布按 $\cos^2 \omega$ 的规律变化,超过 90° 视场角时,像面照度分布呈 $\cos^3 \omega$ 的规律变化.

2 设计实例

光学系统的指标要求如表1.

表1 光学系统的指标要求

Table 1 Index requirements of optical

Index	Requirements
Field of view(FOV)/(°)	110
Relative aperture	1 : 3
Focal length/mm	7
Spectral range/ μm	0.254~0.272
Relative distortion@0.85FOV	<20%
Illumination uniformity	<10%
Dispersion spot radius/ μm	60
Transmittance	0.15

2.1 设计结果

反远距镜头分为前、后两组,前组具有负的光焦度,后组具有正的光焦度.第一片负透镜暴露在外,材料选择熔石英,因为它具有良好的理化性能及耐辐射性能,且厚度满足耐辐射及像差校正的要求;后组一般设计为

典型的三片式,为了满足大视场的指标要求,需要进一步复杂化,最终得到如图4所示的光学系统结构.

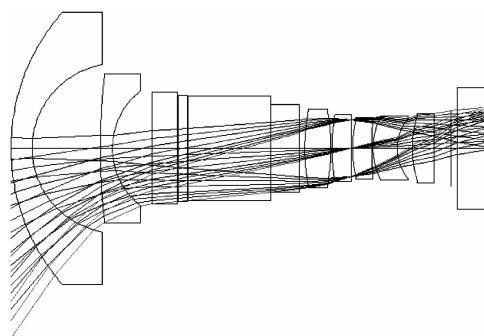


图4 光学系统结构

Fig. 4 Optical system configuration drawing

设计消色差的基本原则是正透镜选用阿贝常量 ν 值大的材料,负透镜选用 ν 值小的材料.综合考虑材料的理化性能,负透镜比较适宜的材料为熔石英.正透镜可选用的材料有 CaF_2 和 MgF_2 ,其中 CaF_2 的折射率略高,有利于像差高级量的校正,因此选择 CaF_2 .

影响像质的主要像差是场曲、球差和倍率色差,因此加入厚透镜来校正场曲,厚透镜材料选用熔石英以进一步补偿系统的轴向色差.

2.2 透过率计算

为了保证紫外告警相机在实战中以低虚警率探测极微弱的信号目标,提高系统的接收灵敏度,紫外光学系统的透过率需满足一定的要求.

光学系统透过率公式为

$$\Gamma = \tau_1 \tau_2^k (1 - \alpha)^{\sum d} \quad (2)$$

式中, τ_1 为日盲滤光片的透过率, τ_2 为透镜各折射面的透过率, k 为透镜的玻璃与空气接触的折射面总数, α 为吸收系数, d 为透过玻璃的总厚度(单位:cm).

根据设计结果,取 $\tau_2 = 0.993$, $k = 20$, $\alpha = 0.002$, $\sum d = 4.001$ cm.计算可得,光学系统透射面的总透过率为0.863,日盲滤光片的透过率 $\tau_1 = 0.20$,整个紫外告警相机光学系统的透过率为0.17,满足透过率大于0.15的指标要求.

2.3 成像质量分析

光学系统的点列图如图5,各视场点列图的均方根(Root Mean Square,RMS)半径如表2.

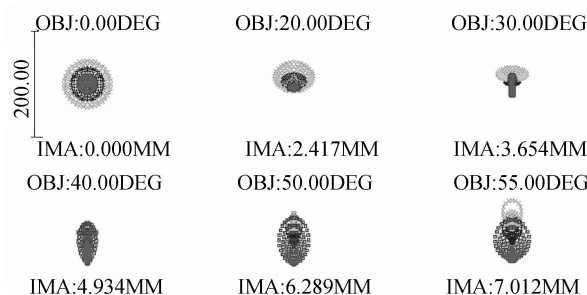


图5 光学系统点列图

Fig. 5 Spot diagram of the optical system

表2 各视场的点列图半径

Field	0°	20°	30°	40°	55°
RMS/ μm	46.9	39.8	36.8	42.0	53.7

最大视场处的点列图均方根半径为 53.7 μm , 光学系统成像质量良好。

光学系统的畸变如图 6, 0.85 视场的相对畸变 $< 20\%$, 满足设计指标要求。

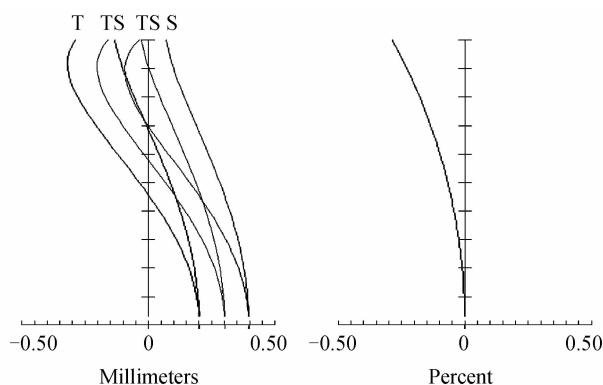


图6 光学系统的场曲和畸变曲线

Fig. 6 Field curvature and distortion curves

光学系统全视场的相对照度不均匀性 $< 15\%$, 如图 7。

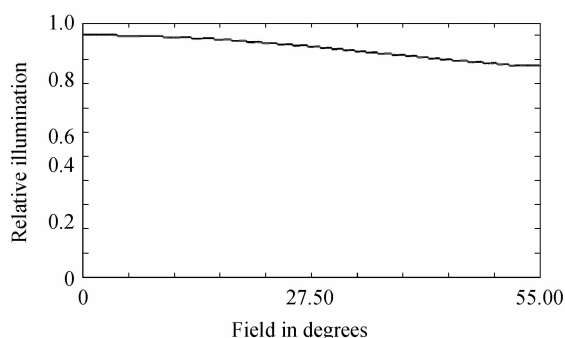


图7 光学系统相对照度曲线

Fig. 7 Relative illumination curve of the optical system

2.4 测试结果

光学系统装调完成后, 在像面处加装转换系统, 用高倍显微镜测量弥散斑半径。表 3 为紫外告警相机光学系统各视场弥散斑半径的测试结果。结果表明, 光学系统成像质量满足使用要求。

表3 各视场弥散斑半径测试结果

Field	0°	20°	30°	40°	55°
RMS/ μm	48.4	41.7	39.6	45.6	56.6

3 结论

紫外告警相机的超广角光学系统, 由于受到轴外像差、像面照度均匀性等限制, 像差校正较为困难。

通过对系统结构型式、轴上和轴外像差的平衡与

设计、像面照度一致性等的分析与研究, 提出采用反远距、准像方远心光路的光学系统, 实现了光学系统的像差校正。最大视场处的点列图均方根半径为 53.7 μm , 几何半径为 95.5 μm , 0.85 视场的相对畸变 $< 20\%$, 光学系统像面照度均匀, 全视场的相对照度不均匀性 $< 0.15\%$ 。光学系统成像质量良好, 在工程应用方面, 设计结果满足紫外告警相机的各项指标要求。

参考文献

- [1] FU Wei. Development of missile approaching ultraviolet warning technology[J]. *OME Information*, 2002, (8): 26-29.
付伟. 导弹逼近紫外告警技术的发展[J]. *光机电信息*, 2002, (8): 26-29.
- [2] LI Bing-jun, LIANG Yong-hui. 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.
- [3] WANG Jian-cheng, LIU Hui-tong, MU Jian. Study of missile approach warning system based on ultraviolet ICCD[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2010, **26**(1): 9-11.
王建成, 刘会通, 牟建. 基于紫外 ICCD 的导弹逼近告警系统的研究[J]. *航天电子对抗*, 2010, **26**(1): 9-11.
- [4] LOU Ying, BAI Ting-zhu, GAO Zhi-yun. Estimation of detectable distance for ultraviolet warning system[J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(3): 473-475.
娄颖, 白廷柱, 高雅允. 紫外告警系统探测距离的估算[J]. *光学技术*, 2005, **31**(3): 473-475.
- [5] WANG Chun-yang. Structure analysis and design of the ultraviolet alarm system[J]. *Communication & Information Technology*, 2007, **19**(258): 87-91.
王春阳. 紫外告警系统结构分析与设计[J]. *通信与信息技术*, 2007, **19**(258): 87-91.
- [6] JIN Gui-ping, PANG Qi-chang. The key points of UV imaging and detecting system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(3): 294-297.
靳贵平, 庞其昌. 紫外成像检测技术[J]. *光子学报*, 2003, **32**(3): 294-297.
- [7] YU Yuan-hang, WANG Wen-sheng. Optical design of diffractive hybrid ultraviolet warning systems[J]. *Laser Technology*, 2012, **36**(3): 421-427.
于远航, 王文生. 折衍混合紫外告警光学系统设计[J]. *激光技术*, 2012, **36**(3): 421-427.
- [8] SONG Shan-shan, LIN Li-na, WANG Wen-sheng. Design of solar blind ultraviolet warning optical system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, **50**(11): 102203.
宋姗姗, 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**(11): 102203.
- [9] LI Hong-zhuang, ZHANG Zhen-duo, LIU Xin-yue. Optical design of a wide spectral fish-eye lens[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(11): 1312-1316.
李宏壮, 张振铎, 刘欣悦. 一款宽光谱鱼眼镜头的设计[J]. *光子学报*, 2012, **41**(11): 1312-1316.
- [10] LI Wei-shan, CHEN Chen, SONG Tao, et al. Design of ultra wide-angle digital universal projection lens[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(8): 0822005.
李维善, 陈琛, 宋涛, 等. 超广角数字通用型投影镜头设计[J]. *光子学报*, 2014, **43**(8): 0822005.
- [11] WANG Jin-song, NIU Jin, MA Ying, et al. Wide-field of infrared transmissive collimator system design[J]. *Acta*

- Photonica Sinica*, 2014, **43**(10): 1022005.
- 王劲松, 牛津, 马英, 王明, 胡迈. 大视场透射式红外平行光管系统设计[J]. *光子学报*, 2014, **43**(10): 1022005.
- [12] NEELE F P, SCHLEIJPEN H M A. Electro optical missile plume detection[C]. SPIE, 2003, **5075**: 270-279.
- [13] NEELE F P, SCHLEIJPEN H M A. U V plume signatures [C]. SPIE, 2002, **4718**: 369-379.
- [14] 张以谟. 应用光学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [15] XIONG Yan-jian, LIN Wei, WU Han-ping. Design of UV optical system with 200mm diameter for optical communication receiver[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2011, **33**(8): 147-150.
- 熊衍建, 林伟, 吴晗平. 光通信接收用 200mm 口径紫外光学系统[J]. *武汉理工大学学报*, 2011, **33**(8): 147-150.
- [16] WANG Li-ping, LI Chun, JIN Chun-shui. Design of catadioptric omnidirectional imaging system in solar blind UV [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(7): 1503-1507.
- 王丽萍, 李春, 金春水. 日盲紫外折反射全景光学系统设计 [J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(7): 1503-1507.
- [17] CHEN Wei, ZHENG Yu-quan, XUE Qing-sheng. Optical system design of airborne wide field-of-view hyperspectral imager[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(10): 1022001.
- 陈伟, 郑玉权, 薛庆生. 宽视场航空高光谱成像仪光学系统设计[J]. *光子学报*, 2014, **43**(10): 1022001.
- [18] CHEN Wei, XUE Chuang. Design of wide field-of-view off-axis three-mirror telescope for imaging spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(8): 950-955.
- 陈伟, 薛闯. 用于成像光谱仪的宽视场离轴三反望远镜设计 [J]. *光子学报*, 2013, **42**(8): 950-955.
- [19] SMITH W J. Modern optical engineering; the design of the optical system [M]. Second Edition. McGraw-HILL, Inc, 1990.
- [20] FISCHER R E. Optical system design[M]. McGraw-HILL, Inc, 2000.