

大相对孔径、长焦距的紫外告警光学系统设计

曹桂丽*, 刘芳芳, 贾永丹, 张倩, 徐崇斌

北京空间机电研究所, 北京 100049

摘要 利用 ZEMAX 软件设计了一款大相对口径、长焦距的远心紫外告警光学系统。光学系统包含 6 片球面透镜, 总长约为 154 mm。其中光学系统焦距为 100 mm, 相对孔径为 1:2, 视场角为 10°。采用具有负折射率温度系数的 CaF₂ 作为负透镜进行热补偿。结果表明: 在 -10~40 °C 内各视场平均光学调制传递函数在 10 lp/mm 处高于 0.4, 最大点列图方均根半径小于 50 μm。该系统具有成像质量好、结构紧凑、温度适应范围广的特点, 适用于紫外告警相机。

关键词 光学设计; 大相对口径; 无热化; 紫外告警

中图分类号 TN23

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.122203

Design of Ultraviolet Warning Optical System with Large Relative Aperture and Long Focal Length

Cao Guili*, Liu Fangfang, Jia Yongdan, Zhang Qian, Xu Chongbin

Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing 100049, China

Abstract A telecentric ultraviolet warning optical system with a large relative aperture and a long focal length is designed using ZEMAX. This optical system contains six pieces of spherical lenses and has a total length of 154 mm. The system has a focal length of 100 mm, a relative aperture of 1:2, and a field of view angle of 10°. CaF₂ with a negative temperature coefficient of the refractive index is used as a concave lens for thermal compensation. The result shows that the average light modulation transfer function of each field of view is >0.4 at 10 lp/mm. Further, the biggest root-mean-square radius of the spot diagrams is smaller than 50 μm. With the advantages of excellent imaging quality, compact configuration, and wide temperature adaptability, the system is suitable for ultraviolet warning cameras.

Key words optical design; large relative aperture; athermalization; ultraviolet warning

OCIS codes 220.3620; 080.2740; 040.7190

1 引言

近年来, 紫外波段因其天然的屏障优势越来越多地受到的国内外关注, 以紫外波段探测技术发展最为迅速^[1-2]。紫外探测技术利用“日盲区”来探测目标的紫外辐射, 不存在太阳光的紫外干扰, 被广泛应用于天基紫外预警^[3]、紫外告警、紫外侦察、紫外搜救、紫外成像辅助导航等领域, 其中紫外告警系统的应用最为成功, 它利用导弹羽烟在日盲区的紫外辐射对导弹进行告警^[4]。紫外告警相比其他探测方

式具有虚警率低、灵敏度高、隐蔽性好、结构简单等优点。紫外告警系统为提高系统探测灵敏度及目标分辨率, 一般要求光学系统具有大相对口径及长焦距, 同时光学系统也应具有大视场角。查找现有的少数紫外告警文献对光学系统的报道, 进行分析与比较。文献[5]中设计的光学系统采用了卡塞格林系统, 该光学系统结构简单, 焦距长, 但视场角仅为 1°, 不能满足大视场的需求。文献[6]中设计的光学系统采用了一个非球面和一个衍射光学元件, 视场角得到了提高, 相对孔径为 1:3, 但焦距仅为

收稿日期: 2019-01-08; 修回日期: 2019-01-25; 录用日期: 2019-02-26

基金项目: 国家自然科学基金(11874087)

* E-mail: bitlitan@163.com

35 mm。上述设计的紫外告警光学系统均未采用准像方远心设计,从而无法避免因入射到紫外滤光片的角度过大而引起的光谱漂移现象。

本文设计了一款可用于导弹告警的准像方远心紫外光学系统,该系统成像质量良好,具有很好的工程可实现性。

2 光学系统设计

2.1 光学系统设计指标

考虑到紫外告警系统的探测能力及分辨率,光学系统选择增强电荷耦合器件 (ICCD) 紫外探测器,滤光片选用真空干涉镀膜型日盲紫外滤光片,光学系统设计指标如表 1 所示,表中 2ω 为视场角, q 其中 FOV 为视场角的英文简称。

表 1 光学系统设计指标

Table 1 Design parameters of optical system

Parameter	Value
Wavelength /nm	260-270
Focal length /mm	100
F number	2
FOV 2ω /($^\circ$)	10
Root-mean-square radius of spot diagram / μm	≤ 50
Modulation transfer function (MTF) at 10 lp/mm	≥ 0.4

2.2 光学系统选型及设计难点

由设计指标可以看出,所设计的光学系统具有长焦距、大相对口径、大视场等特点。反射式系统虽然没有任何色差,可实现大口径、长焦距,但受视场角和体积的限制,未选用。综合考虑光学系统的特点、滤光片的放置要求、光谱漂移等,光学系统选择透射式结构。

透射式系统会引起色差,一般可利用由不同色散的光学玻璃做成的正透镜和负透镜组合来消除色差。但目前可用的紫外材料^[7]色散系数差别不大,紫外材料的折射率均较低(<1.46),且种类很少,因此光学系统的色差校正具有一定的难度。同时紫外材料的温度特性较差,温度变化会导致系统成像质量变差,无法满足系统成像质量的要求,影响系统探测能力。由于光学系统只能在有限的紫外材料中进行材料的温度匹配设计及色差校正设计,故不利于大相对孔径的光学系统进行像差的校正,增大了设计难度。上述矛盾是该紫外光学系统设计所要解决的主要问题。

2.3 光学系统的色差校正及无热化设计

校正紫外光学系统色差的重要手段之一就是利

用不同色散的光学材料进行合理的光焦度分配,正透镜选用阿贝数大的材料,负透镜选用阿贝数小的材料。大部分透过紫外的材料为晶体材料,并不适用于光学镜片。目前熔石英和 CaF_2 可作为紫外透镜元件材料。为校正紫外光学系统色差,正透镜选用 CaF_2 ,负透镜选用熔石英。

根据光机系统被动消热设计理论,当系统处于均匀温度场时,系统的位置热差、倍率色差均由光学材料热差系数和机械材料热差系数决定。因此,实现透射式光学系统无热化设计的关键点在于光学材料和结构材料的合理匹配。

在考虑消色差的同时,光学系统的无热化设计也应满足

$$\frac{1}{h_i} \sum_i h_i \phi_i = \phi, \quad (1)$$

$$\frac{1}{h_i^2} \sum_i h_i \frac{\Delta \phi_i}{\Delta T} =$$

$$\frac{1}{h_i^2} \sum_i h_i p_i \phi_i = \frac{1}{h_i^2} \sum_i h_i \left[\alpha_i - \frac{1}{(n-1)} \frac{\Delta n}{\Delta T} \right] \phi_i = 0, \quad (2)$$

式中: h_i 为第一近轴光线在薄透镜的高度; ϕ 为光学系统总光焦度; ϕ_i 为薄透镜组的光焦度; p_i 为薄透镜的热差系数; α_i 为材料的热膨胀系数; $\Delta n/\Delta T$ 为材料的折射率温度系数; i 代表第 i 个薄透镜。

光学系统在选择消热差玻璃时,正透镜应尽量选择折射率温度系数小的材料,负透镜尽量选择折射率系数小或为负值的材料。由于 CaF_2 的热差系数较大,为 $266 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}$,作为正透镜时非常不利于无热化设计。因此本文考虑采用 CaF_2 作为正透镜消色差的同时,最后 1 片透镜选用负折射率温度系数的 CaF_2 作为负透镜进行热补偿设计,最终取得了比较好的无热化设计结果。

3 设计结果及像质评价

光学系统选用透射式系统,滤光片放置在焦面前,考虑光谱漂移现象,光学系统设计成准像方远心光路。经过选型及优化,得到最终的光学系统结构如图 1 所示。镜头的结构材料选择铝合金,光学系统不同均匀温度场的 MTF 曲线如图 2 所示,不同均匀温度场下的各视场点列图半径如表 2 所示。

以上设计中光学系统共用了 6 片透镜,总长为 154 mm,正透镜选用阿贝数大的材料 CaF_2 ,负透镜选用阿贝数小的材料熔石英,最后一片

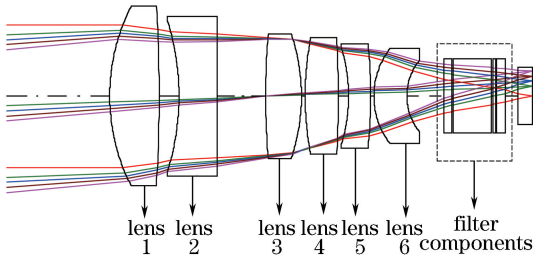


图 1 光学系统结构图

Fig. 1 Structural diagram of optical system

负透镜选用负折射率温度系数的 CaF_2 实现热补偿, 光学系统在 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 至 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 内各视场平均

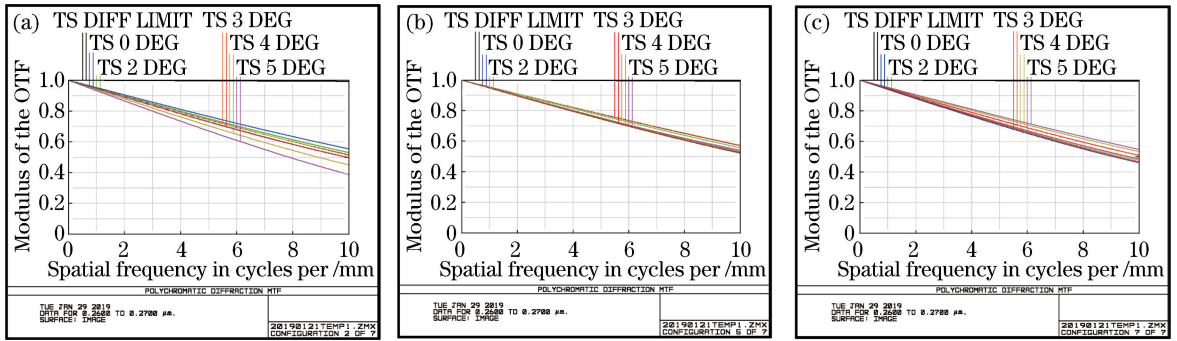


图 2 不同温度下的紫外光学系统 MTF 曲线。(a) $-10\text{ }^\circ\text{C}$; (b) $20\text{ }^\circ\text{C}$; (c) $40\text{ }^\circ\text{C}$

Fig. 2 MTF curves of UV optical system at different temperatures. (a) $-10\text{ }^\circ\text{C}$; (b) $20\text{ }^\circ\text{C}$; (c) $40\text{ }^\circ\text{C}$

表 2 不同温度条件下各视场点列图方均根半径

Table 2 Root-mean-square radius of spot diagram of each field of view at different temperatures

Field of view / ($^\circ$)	Root-mean-square radius of spot diagram at different temperatures / μm		
	$-10\text{ }^\circ\text{C}$	$20\text{ }^\circ\text{C}$	$40\text{ }^\circ\text{C}$
	0	36.481	25.292
2	39.342	27.128	39.125
3	42.099	28.085	38.265
4	45.077	28.349	36.178
5	48.526	28.320	32.886

表 3 加工公差

Table 3 Manufacturing tolerances

Lens	N	ΔN	Δn	Δt /mm	C /mm
Lens 1	4	0.5	0.0005	± 0.05	0.02
Lens 2	4	0.5	0.0005	± 0.05	0.02
Lens 3	4	0.5	0.0005	± 0.05	0.02
Lens 4	4	0.5	0.0005	± 0.05	0.05
Lens 5	4	0.5	0.0005	± 0.05	0.02
Lens 6	4	0.5	0.0005	± 0.05	0.02

在上述公差条件下, 采用蒙特卡罗统计模拟法对公差进行敏感度分析, 分析过程中采用第 6 透镜后表面与滤光片前表面之间的距离作为补偿器, 系统 MTF 作为评价标准。在上述公差范围内, $20\text{ }^\circ\text{C}$

MTF 在 10 lp/mm 处高于 0.4, 最大弥散斑半径小于 $50\text{ }\mu\text{m}$, 光学系统的成像质量良好, 无热化设计取得比较好的结果。由此可见, 该光学系统各项指标均满足设计要求。

4 光学系统公差

光学系统中元件的加工误差和装调误差会影响系统成像性能, 给定的光学元件的加工及装调误差如表 3 和表 4 所示。表中, N 为光圈数, ΔN 为局部光圈, Δn 为折射率误差, Δt 为厚度误差, C 为偏心误差, Δd 镜间距误差。

表 4 装调公差

Table 4 Alignment tolerances

Lens	Δd /mm	Decentering /mm	Tilt / ($'$)
Lens 1	± 0.05	0.02	1
Lens 2	± 0.05	0.02	1
Lens 3	± 0.05	0.02	1
Lens 4	± 0.05	0.02	1
Lens 5	± 0.05	0.02	2
Lens 6	± 0.05	0.02	2

温度条件下, 有 80% 的镜头各视场平均 MTF 在 10 lp/mm 大于 0.58, 满足使用需求。最终加工装调完成的紫外光学系统实物如图 3 所示。

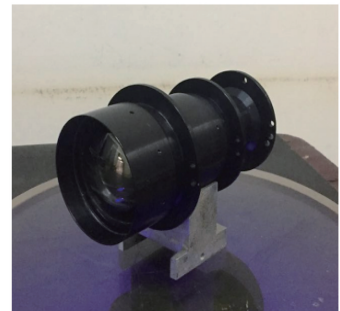


图 3 紫外镜头

Fig. 3 Ultraviolet lens

5 结 论

根据紫外告警光学系统特点设计了一款相对孔径为 $1/2$, 全视场为 10° , 焦距为 100 mm 的大相对孔径长焦距的紫外告警光学系统。该系统采用准像方远心设计, 减小了滤光片对入射光谱的影响。采用负折射率温度系数的 CaF_2 作为负透镜进行热补偿, 实现了在 -10°C 至 40°C 内无热化设计。该系统结构紧凑, 成像质量良好, 满足紫外告警系统的成像要求, 具有很好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Fu W. Development of missile approach 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.
- [3] Tang S F, Shen H B. The demonstrate of space-based ultraviolet (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] 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.
- [5] Tang Y, Zhang L J, Bai T Z, *et al.* Research on sun-tracking warning systems in solar blind UV[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7156: 71560N.
- [6] Song S S. Design of solar blind ultraviolet warning optical system [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014: 24-38.
宋珊珊. 日盲紫外告警光学系统设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2014: 24-38.
- [7] Xu Z H, Zhuang X X, Su G B. 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. 有机紫外滤波材料的紫外光谱性质研究[J]. *光学学报*, 2009, 29(7): 1918-1920.