

大相对孔径超紧凑型红外光学系统设计

顿 雄 金伟其 王 霞

(北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

摘要 针对目前低成本、小型化、长焦距非制冷热成像系统要求光学系统具有成像质量高、相对孔径大、结构尺寸小、温度适应性广的特点,在对多种实现超紧凑型光学系统结构的分析比较基础上,选用折反式结构,设计了一种大相对孔径超紧凑型红外光学系统。该光学系统的相对孔径达到了 $1/0.89$,远射比达到了 0.67 。结合该光学系统的结构特点,仅使用Ge材料即实现了一 $40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内的被动无热化设计。采用杂散光分析软件对系统进行了杂散光分析,提出了合理的杂散光抑制措施。设计分析结果表明:该光学系统在工作温度范围内像质优良(其在不同环境温度下的调制传递函数均接近衍射限)、体积结构紧凑,杂散光可控,可满足小型化、长焦距非制冷热成像系统的使用需求。

关键词 光学设计;大相对孔径;无热化;折反射式光学系统

中图分类号 TN219; O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0622002

Design of Large Relative Aperture Compact Infrared Optical System

Dun Xiong Jin Weiqi Wang Xia

(Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System of Ministry of Education of China, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract According to the requirements of high imaging quality, fast F -number, miniaturized dimension and wide environmental adaptability in the low cost, small size and long focal length uncooled thermal imaging systems presently, several compact optical configurations with fast F -number and small obscuration are given. Based on catadioptric structure, a fast F -number compact long infrared optical system with relative aperture of $1/0.89$ and telephoto ratio of 0.67 is designed. This optical system can be used for the low-cost uncooled compact infrared imaging system. Optical passive athermalization at $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperature range is realized by using athermalization design method. Stray light influence of the optical system is also analyzed. The result shows that the optical system works well through entire operating temperature range, and obtains the advantages of compact structure, small volume and so on. It can meet the requirements of the small size long focal length uncooled thermal imaging systems.

Key words optical design; large relative aperture; athermalization; catadioptric optical system

OCIS codes 220.3620; 080.3620; 080.4225

1 引 言

热成像技术在军事和民用方面有着广泛的应用^[1-3],随着应用领域的不断扩展,低成本、小型化的热成像系统成为重要的发展方向^[4-7],而高性能非制冷焦平面探测器为这一目标的实现奠定了重要

的基础,但由于非制冷探测器的灵敏度较制冷型探测器低,通常要求红外光学系统具有大相对孔径(小的 F 数),因此,为了实现长焦距非制冷焦平面热成像系统的小型化,需要开展大相对孔径超紧凑型红外光学系统的研究。

收稿日期: 2013-12-24; **收到修改稿日期**: 2014-01-21

基金项目: 北京市自然科学基金(4121002)

作者简介: 顿 雄(1986—),男,博士研究生,主要从事光学设计、光电图像处理方面的研究。

E-mail: dunxiong-0716@163.com

导师简介: 金伟其(1961—),男,教授,博士,主要从事光电图像处理、夜视与红外技术、光电检测与仪器等方面的研究。

E-mail: jinwq@bit.edu.cn

超紧凑型光学系统的结构形式主要有远摄 (Telephoto) 结构^[4]、折反式 (Special reflex) 结构^[5,6]和离轴反射式 (Catadioptric) 结构^[7]等。远摄结构采用正透镜在前、负透镜在后的组合形式, 具有较大的相对孔径, 但远摄比 (透镜总长与焦距之比)^[5]通常很难小于 0.8, 无法实现超紧凑结构; 离轴反射式结构通过多次折叠光路, 可以获得更小的远摄比, 但是其相对孔径和视场通常较小, 且加工装调困难, 难以满足相关应用背景的使用要求; 折反射式结构可实现远射比达 0.5 或更低的设计, 但是目前文献中已有的设计通常相对孔径都较小, 且存在较大的中心遮拦, 能量等效 F 数通常较大, 也难以满足应用要求。即便如此, 折反式结构仍是解决小型化设计问题中最具潜力的技术途径。为此, 本文拟通过对折反式结构特点的分析, 提出一种可实现大相对孔径超紧凑光学系统结构形式, 以适应相关应用的需求。

2 折反式结构分析

折反式结构虽然可获得小的远摄比, 但其主要问题是中心遮拦对调制传递函数 (MTF) 和能量等效 F 数存在很大影响。

2.1 遮拦对 MTF 的影响

由于焦平面探测器为离散采样, 一般要求其采样频率小于光学系统的截止频率^[8]。因此, 评价光学系统 MTF 时常以焦平面探测器采样频率—特征频率为标准。不同成像波段的探测器具有不同的特征频率, 为分析比较遮拦对 MTF 的影响, 引入归一化特征频率 f_{normal}

$$f_{\text{normal}} = \frac{f_{\text{cha}}}{f_{\text{cut}}} \quad (1)$$

表 1 总结了在可见光 (VIS)、中波红外 (MWIR)、长波红外 (LWIR) 波段典型系统的归一化特征频率, 可以看出: 使用制冷长波红外探测器的成像系统具有最大的 f_{normal} ; 在同一种波段下, 探测器尺寸越小, F 数越大, 则 f_{normal} 越大。

表 1 典型系统的归一化特征频率

Table 1 Normalized characteristic frequency of typical system

	VIS		MWIR		LWIR	
			Cooled	Cooled	Uncooled	
Pixel size / μm	7.5		15	15	25	17
F -number	6	1	2	2	1	
Wavelength / μm	0.56		4	8.5	10	
f_{normal}	0.23	0.04	0.26	0.64	0.2	0.3

考虑遮拦时光学系统 MTF 可以由其光瞳函数的归一化互相关得到^[9], 图 1 给出不同中心遮拦比下光学系统 MTF 与归一化频率 (即对光学系统截止频率归一化) 的关系, 可以看出, 以 $[0, f_{\text{normal}}]$ 处 MTF 为评价标准, 遮拦比对表 1 中典型系统的影响不尽相同, 为保证系统设计后的成像质量, 一般情况下, 使用制冷长波红外探测器的系统遮拦比不应大于 0.2, 使用制冷中波红外探测器的系统遮拦比不应大于 0.3, 使用 25 μm 非制冷型长波红外探测器的系统遮拦比不应大于 0.4, 而可见光系统可以容许较大遮拦比。

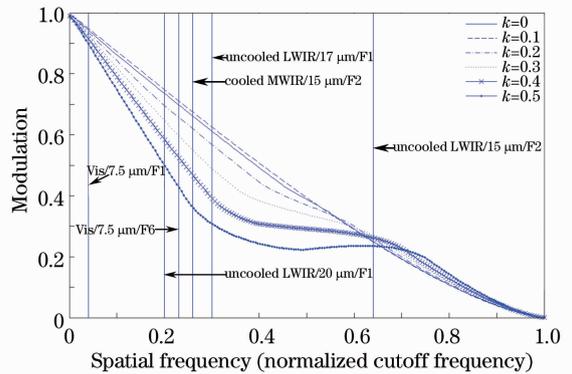


图 1 不同遮拦比对 MTF 的影响

Fig. 1 Effects of different obscuration ratios on MTF

针对 25 μm 非制冷型长波红外焦平面探测器 (像元规模 384×288), 从 MTF 要求的角度出发, 系统遮拦比不应大于 0.4。

2.2 遮拦对能量等效 F 数的影响

依据辐射传输理论, 光学系统像面照度与其 F 数密切相关。若光学系统存在中心遮拦, 必然导致实际像面照度低于无遮拦情况下的像面照度, 将实际像面照度按照经典辐照度公式^[10]计算时对应的 F 数称为能量等效 F 数 (F_e), 可表示为

$$F_e = \sqrt{\frac{16F^4 + 8F^2k^2 + k^2}{16F^2(1 - k^2)}} \quad (2)$$

式中 F 表示光学系统 F 数, k 表示中心遮拦比。

图 2 给出 F_e 随 k 的变化趋势曲线, 可以看出, 在固定的系统 F 数下, 随着 k 增大, F_e 越来越大。在光学系统设计时, 为了保证系统 F_e 满足要求, 系统 F 数应小于 F_e 。

设计要求 F_e 接近 1, 假设系统遮拦比为 0.4, 则由 (2) 式和图 3 可得系统 F 数应不小于 0.865。但在实际优化过程中, 可根据系统遮拦比的实际情况, 综合考虑像质等因素, 适当地改变系统 F 数。

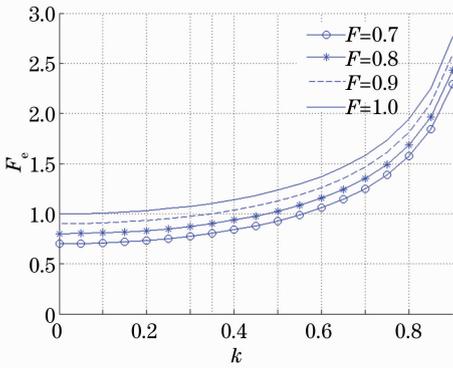


图 2 能量等效 F 数与遮拦比的关系

Fig. 2 Relationship between equivalent F -number and obscuration ratio

2.3 设计思想

折反射系统中具有大相对孔径、小远摄比的最典型的模式为斯密特折反式结构^[8],该结构通过在主反射镜前和次反射镜后各增加一个校正镜(分别为前校正镜和后校正镜),增加了系统可容许设计的视场角和 F 数,但是其实现的 F 数仍难以满足设计的要求(F 数为 0.865)。参考其实现增大相对孔径和视场的方法,在前校正镜和主镜之间再增加一个负校正透镜,同时该负校正透镜也位于次反射镜和后校正镜之间(见图 3)。为了减小遮拦比和降低系统加工装调难度,将负校正镜的前表面与次反射镜共用(即将负校正镜前表面中心作为次反射镜使用)。

该结构最大限度地压缩了光学系统轴向长度,

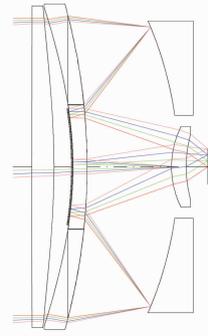


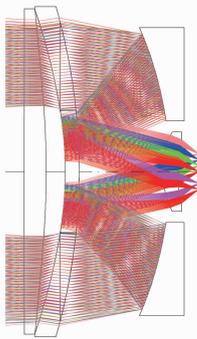
图 3 超紧凑折反式结构

Fig. 3 Compact catadioptric structure

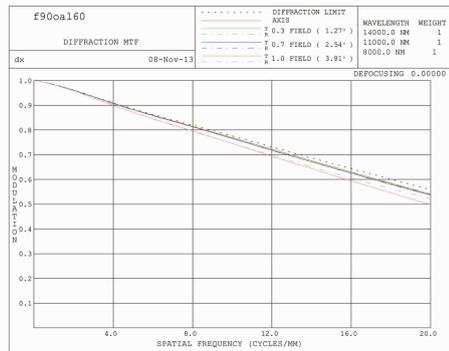
同时由于增加了负校正透镜,有效提升了相对孔径,并减小了次反射镜的尺寸,得到小遮拦比,将次反射镜与次校正透镜后表面作为一体,进一步减小了系统遮拦比。

3 设计结果

设计的大相对孔径超紧凑型折反式光学系统如图 4(a)所示,焦距为 90 mm,远摄比为 0.67,相对孔径为 $1/0.89$,中心遮拦比为 0.38,工作波段为 $8 \sim 14 \mu\text{m}$,能量等效 F 数为 1(不考虑消杂光引入遮拦情况下),全视场角为 7.6° ,该系统由 1 片反射镜和 3 片透镜组成,其中第二片透镜的前表面中心区域镀介质反射膜,作为次反射镜使用。系统共使用了 3 个非球面,总透射率大于 0.868。光学系统在特征频率处的 MTF 满足全视场 $\text{MTF}@20 \text{ lp/mm} \geq 0.5$ [见图 4(b)],接近考虑遮拦后的衍射极限。



(a) design layout



(b) MTF curve

图 4 光学系统设计结果

Fig. 4 Design result of the optical system

4 分析与讨论

折反射式红外系统在使用过程中常面临环境温度变化和视场外杂散光的影响。

4.1 无热化分析

使用光学设计软件分析该光学系统受环境温度变化影响的结果如图 5 所示,从图中可以看出:当环

境温度变化时(−40 °C 或 60 °C),系统性能下降严重。为了减小环境温度变化对光学系统性能的影响,采用了基于多重结构的光学被动无热化设计方

法进行设计^[11],即通过建立不同温度下的光学系统结构、辅以合适的光学材料组合并采取联合优化的方法确保各温度下的成像质量。

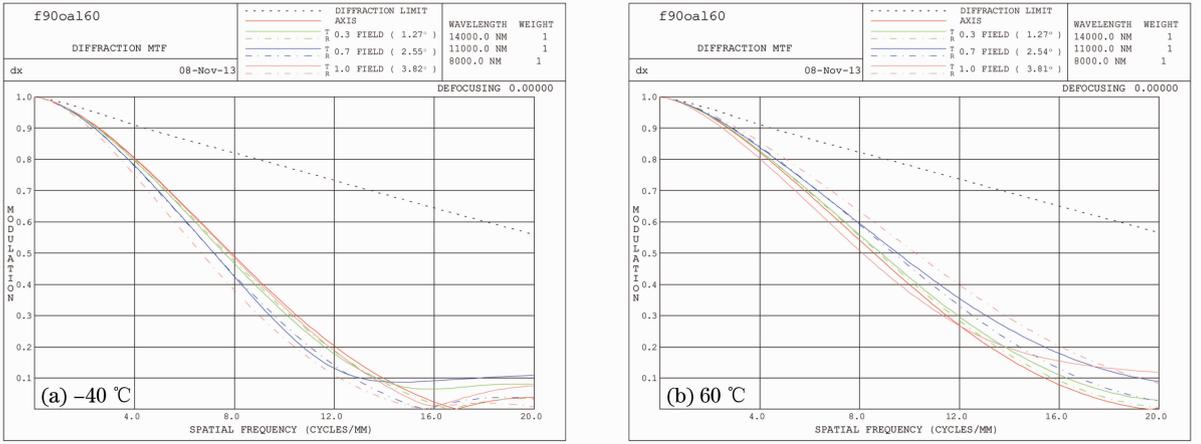


图 5 不采取无热化设计时不同温度下 MTF 曲线

Fig. 5 MTF curves of the optical system without athermalization design at different temperatures

通常在长波红外波段实现光学被动无热化至少需要三种材料相互匹配^[12],但对所提出的结构,由于其存在一个大光焦度的负校正 Ge 透镜,且采用了折反射式体系,使得仅使用 Ge 材料即可实现光学被动无热化设计。为减低系统成本,主反射镜采用铝材料。为了获得最佳的无热化效果,外镜筒结

构材料选用了低膨胀系数的钛合金材料。基于多重结构的无热化设计后各温度下的传递函数性能如图 6 所示。可以看出:在−40 °C~60 °C 温度范围内、全视场 MTF@20 lp/mm≥0.45。无热化设计后光学系统结构参数如表 2 所示。

表 2 光学系统结构参数

Table 2 Parameters of the optical system structure

Lens	Radius of curvature /mm	Lens thickness /mm	Lens separation /mm	Material
1	1376 ASP1	7.70	5.61	Ge
2	ASP2 −133.273	4.8	31.9	Ge
3	ASP3 (stop) −133.273	—	−31.9	Reflective surface Ge
2	ASP2	4.8	28.56	Reflective surface
4	32.019 46.144	5.00	8.34	Ge

Note: 1. Aspheric equation used in the design can be expressed as

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + Ar^2 + Br^4 + Cr^6 + Dr^8$$

- The aspheric coefficients of ASP1 are $c = -0.003874$, $A = 2.586707 \times 10^{-7}$, $B = -2.018318 \times 10^{-11}$, $C = 4.831489 \times 10^{-16}$, $D = 1.413712 \times 10^{-18}$, $k = 0$.
- The aspheric coefficients of ASP2 are $c = -0.007503$, $A = 4.275118 \times 10^{-7}$, $B = -6.561027 \times 10^{-11}$, $C = 1.022106 \times 10^{-14}$, $D = 1.270250 \times 10^{-19}$, $k = 0$.
- The aspheric coefficients of ASP3 are $c = -0.008187$, $A = 9.621565 \times 10^{-8}$, $B = -1.419432 \times 10^{-11}$, $C = 1.362594 \times 10^{-15}$, $D = -5.564492 \times 10^{-19}$, $k = 0$.
- The thermal expansion coefficient of Ge is $6.1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, the thermal expansion coefficient of Ti is $8.1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, the thermal expansion coefficient of Al is $22.7 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

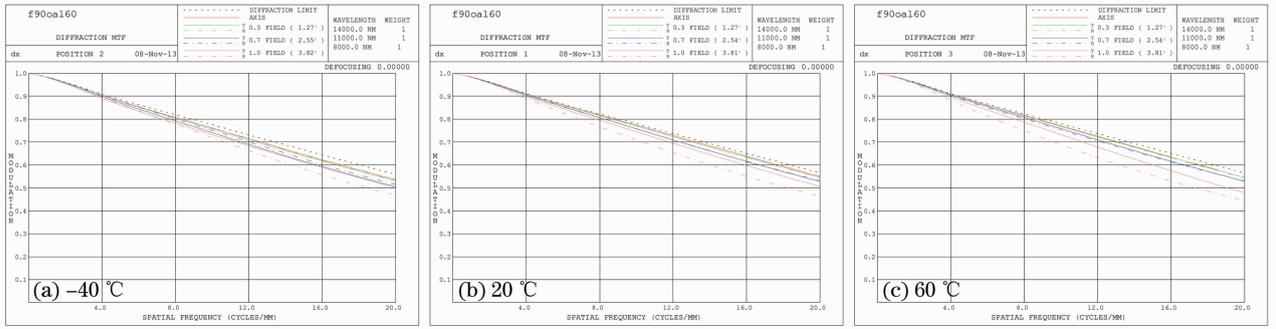


图 6 无热化设计后在不同温度下 MTF 曲线

Fig. 6 MTF curves with athermalization design at different temperatures

外镜筒采用的钛合金材料的导热性能不佳,可能导致外界镜筒温度与内部透镜温度存在一定差异,从而影响到光学系统无热化设计效果。但是系统的无热化离焦补偿主要来自于其中的负校正透镜,而且由于系统总长小,钛合金热膨胀效应导致的长度变化约为 $2.75 \times 10^{-4} \text{ mm}/^\circ\text{C}$,对应的像面位置变化为 $6.325 \times 10^{-4} \text{ mm}/^\circ\text{C}$ 。即使温度差异到达 10°C 对系统像面的离焦影响也仅为 $6.325 \times 10^{-3} \text{ mm}$,远小于光学系统的焦深 0.02 mm 。因此,可以忽略钛合金材料导热性能不佳对系统无热化的影响。

4.2 杂散光分析

视场外杂散光分为视场外直射杂散光和视场外二次反射或散射杂散光,其中视场外直射杂散光的影响程度最大。

使用杂散光分析软件分析了所设计的无热化光学系统视场外直射杂散光分布情况,结果如图 7 所

示,可以看出:由于系统结构紧凑、遮拦比小且无杂散光抑制结构,导致在 $\pm 15^\circ \sim \pm 30^\circ$ 之间光学系统存在直射杂散光直接照射到像面上。经分析该杂散光主要产生于不经主反射镜和次反射镜,由物空间经前校正镜组直接照射到后校正镜并折射到像面上。

通过对后校正镜筒形状、长度尺寸和口径的优化设计,并采用诸如涂消光漆、车削消光螺纹等措施^[13-14],可有效消除视场外直射杂散光,同时也可以减小视场外二次反射或散射杂散光。在保证遮拦比 0.38 的条件下,该结构的一次杂散辐射不能完全消除(导致使用环境受到一定限制),但若适当增加后校正镜筒长度尺寸和负校正透镜的反射区面积,使得遮拦比提高到 0.5 (对应的 F_ν 为 1.12 ,衍射限 $\text{MTF}@20 \text{ lp/mm} \geq 0.50$; MTF 仍满足成像需求),则可完全消除视场外直射杂散光。完全消除视场外直射杂散光辐射后的光机结构及分析结果如图 8 所示。

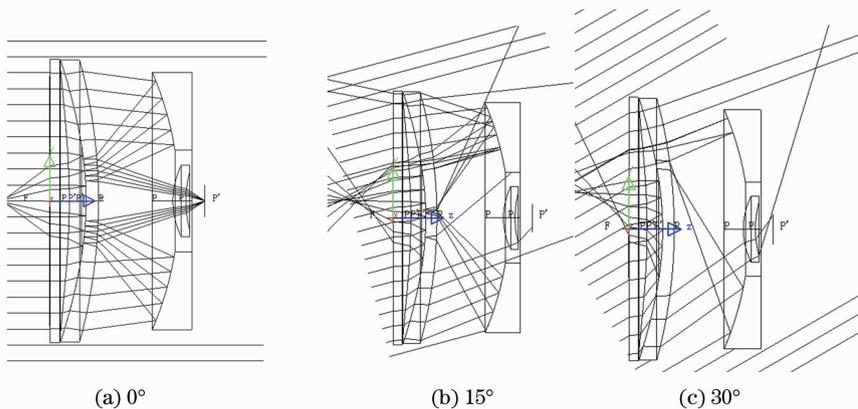


图 7 杂散光分析结果

Fig. 7 Analysis result of stray light

在图 8 结构下,采用点源透射比分析了视场外二次反射或散射杂散光的影响。点源透射比(PST)的定义为^[14]:光学系统视场外离轴角为 θ 的光源,经光学系统后在像面产生的辐照度 $E_d(\theta)$ 与垂直于该点源的输入孔径上的辐照度 $E_i(\theta)$ 的比值为

$$P_{\text{ST}} = E_d(\theta)/E_i(\theta). \quad (3)$$

使用杂散光分析软件分别考察了视场角为 $5^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 35^\circ, 55^\circ$ 时像面最大辐照度,并依据(3)式计算了对应的 PST 大小,如表 3 所示。可以看出,随着视场角的增大 PST 逐渐减小。分析结果说明视

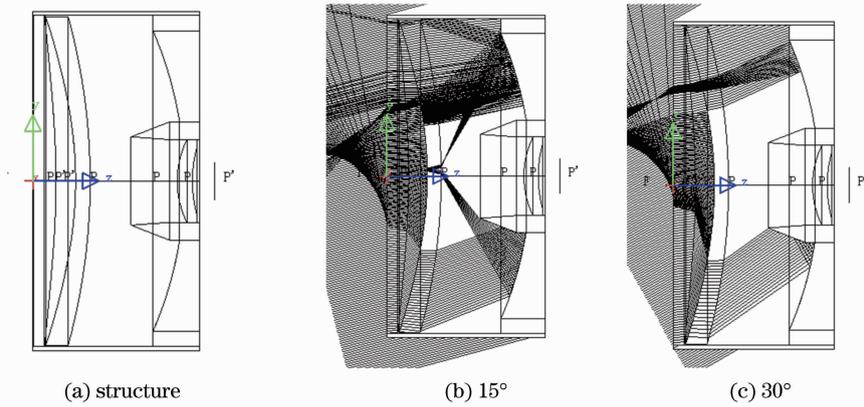


图 8 完全消除一次杂散辐射后的光机结构和分析结果

Fig. 8 Design layout and analysis result of stray radiation eliminated completely once

表 3 光学系统在不同视场角条件下的 PST 值

Table 3 PST values of optical system at different field of views

	5°	10°	20°	35°	55°
PST	1.07×10^{-6}	4.6×10^{-8}	3.71×10^{-8}	1.57×10^{-8}	1.07×10^{-8}

场外二次反射或散射杂散光得到了很好的抑制。

5 结 论

提出了一种适合非制冷探测器的大相对孔径超紧凑型折反式光学结构,实现了远摄比为 0.67,工作波段为 8~14 μm,相对孔径为 1/0.89 的光学系统设计。该结构仅用 Ge 材料即可实现光学系统在 -40 °C~60 °C 温度范围内被动消热差设计;同时也可获得小的能量等效 F 数,在不考虑杂散光影响下所设计的光学系统能量等效 F 数为 1,虽然在完全消除视场外直射杂散光影响后,光学系统能量等效 F 数略有下降(约为 1.12),但仍然可以满足高性能非制冷热成像的需求。因此该光学结构和设计在低成本、小型化、长焦距红外成像系统中有着重要应用前景,同时该结构对可见光波段成像系统小型化也有一定的借鉴意义。

参 考 文 献

- 1 Fan Jinxiang, Yang Jianyu. Development trends of infrared imaging detecting technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3145-3153.
范晋祥, 杨建宇. 红外成像探测技术发展趋势分析[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(12): 3145-3153.
- 2 E F J Ring, K Ammer. Infrared thermal imaging in medicine [J]. *Physiological Measurement*, 2012, 33(3): R33-R46.
- 3 Gong Fang, Zhang Xuewu, Sun Hao. Detection system for solar module surface defects based on constrained ICA model and PSO method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0415002.
龚芳, 张学武, 孙浩. 基于独立分量分析和粒子群算法的太阳能电池表面缺陷红外热成像检测[J]. *光学学报*, 2012, 32(4): 0415002.

- 4 Gao Zhishan. Design of a compact objective with inner-focusing for a total station [J]. *J Nanjing University of Science and Technology (Natural Science)*, 2004, 28(5): 502-506.
高志山. 紧凑型内调焦全站仪物镜设计[J]. *南京理工大学学报(自然科学版)*, 2004, 28(5): 502-506.
- 5 Qu Hemeng, Zhang Xin, Wang Lingjie, et al.. Design of a low F -number compact athermalizing infrared optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0322003.
曲贺盟, 张新, 王灵杰, 等. 大相对孔径紧凑型无热化红外光学系统设计[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0322003.
- 6 Zhang Ruirui, Shen Weimin. Ultrathin lenses using annular folded optics [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(5): 1306-1310.
张蕊蕊, 沈为民. 环型孔径折叠型超薄镜头[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(5): 1306-1310.
- 7 Xue Donglin, Zheng Ligong, Zhang Feng. Off-axis three-mirror system based on freeform mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(12): 2813-2820.
薛栋林, 郑立功, 张峰. 基于光学自由曲面的离轴三反光学系统[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(12): 2813-2820.
- 8 M J Kidger. *Fundamental Optical Design* [M]. Washington DC: SPIE Press, 2002. 271-272.
- 9 J W Goodman. *Introduction to Fourier Optics* [M]. Qing Kecheng, Liu Peisen, Chen Jiabi, et al.. Transl. Beijing: Electronics Industry Press, 2006. 127-128.
古德曼. 傅里叶光学导论[M]. 秦克诚, 刘培森, 陈家壁等译. 北京: 电子工业出版社, 2006. 127-128.
- 10 Bai Tingzhu, Jin Weiqi. *Principle and Technology of Optoelectronic Imaging* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006. 63-64.
白廷柱, 金伟其. 光电成像原理与技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006. 63-64.
- 11 Wu Xiaojing, Sun Chiquan, Meng Junhe. Relationship between athermalizing infrared optical system and zoom lens [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, 31(3): 249-252.
吴晓靖, 孙赤全, 孟军和. 红外光学系统无热化设计与变焦距镜头的关系[J]. *红外与激光工程*, 2002, 31(3): 249-252.
- 12 Dun Xiong, Meng Junhe, Zhang Zhen. Athermalised dual FOV LWIR telescope [J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(4):

767-772.

顿 雄, 孟军合, 张 振. 被动无热化切换式长波红外双视场望远镜[J]. 应用光学, 2011, 32(4): 767-772.

- 13 Li Yan, Liu Jianfeng. Research on integrative suppression of internal and external stray light in infrared optical remote sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0928002.

李 岩, 刘剑峰. 红外光学遥感器内杂散光和外杂散光的综合抑

制研究[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0928002.

- 14 Meng Weihua, Xiang Jiansheng, Ni Guoqiang. Suppression of stray light in a catadioptric and re-imaging LWIR system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(4): 966-970.
- 孟卫华, 项建胜, 倪国强. 一种折反二次成像式长波光学系统的杂散光抑制[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(4): 966-970.

栏目编辑: 韩 峰