

双波段红外光学系统设计与像质评价

李培茂, 王霞, 金伟其, 李家琨, 顿雄

(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: 双波段/多波段成像技术受到普遍重视, 使得双波段光学系统特别是中、长波红外成像系统成为研究的热门之一。设计了折反射式光学系统、离轴三反射式光学系统和全折射式光学系统, 分析了 3 种不同类型光学系统及其成像性能。采用了能同时响应中、长波红外的探测组件, 系统的主要技术指标为: 工作波段 3~5 μm 、8~12 μm , $F/\#=2$, $2\omega=5.74^\circ$, $f'=100\text{ mm}$, 全视场畸变 $<2\%$, 空间频率 16.7 lp/mm 处的 $\text{MTF}>0.4$ 。对 3 种不同类型系统的特点进行分析和研究, 给出了各种像差曲线和光学传递函数曲线, 总结了 3 种不同类型光学系统的优缺点。

关键词: 光学设计; 像质评价; 双波段; 红外光学系统

中图分类号: O43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)11-2882-07

Dual-band infrared optical system design and image quality evaluation

Li Peimao, Wang Xia, Jin Weiqi, Li Jiakun, Dun Xiong

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

Abstract: The dual-band/multi-band imaging technology get more and more attention. As a key part, the dual-band optical systems, especially medium-wave infrared/long-wave infrared (MWIR/LWIR) imaging systems, becomes one of hot issues research subjects. Catadioptric optical system, off-axis three-reflection optical system and all-refractive optical system were designed, three dual-band imaging optical systems and their imaging performance were analyzed. The sensor which can response MWIR and LWIR at the same time was adopted. The main technical indicators are as follows: working waveband are 3-5 μm (MWIR) and 8-12 μm (LWIR), $F/\#=2$, $2\omega=5.74^\circ$, $f'=100\text{ mm}$, distortion of the whole field of view is less than 2%, MTF is higher than 0.4 at 16.7 lp/mm in the all field of view. The construction features of the three dual-band imaging optical systems were analyzed and researched, the aberration curves and MTF curves of this three optical systems were presented, the advantages and disadvantages of this three optical systems were summarized.

Key words: optical design; image quality evaluation; dual-band; infrared optical system

收稿日期: 2013-03-14; 修订日期: 2013-03-28

基金项目: 北京市自然科学基金重点项目(4121002)

作者简介: 李培茂(1989-), 男, 硕士生, 主要从事夜视与红外技术方面的研究工作。Email: peamlpm@126.com

导师简介: 王霞(1972-), 女, 副教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光电检测、光电成像技术方面的研究。Email: angelniuniu@bit.edu.cn

0 引言

随着伪装技术的发展,探测识别目标的难度也不断增大,单一波段的探测已经很难满足各种各样的需求。单波段成像技术从单元到线阵及焦平面的发展已经相当完善,但由于目标在不同光谱波段表现的光学特征有较大差异,比如常温下地物轮廓长波红外效果比中波红外效果清晰,红外警戒多用中波红外来看目标热源。因此,结合各个波段的成像特点,工作于多个波段的红外光学系统能够获取充分有用的信息,能够有效地把目标物从大量的图像中识别出来,在军事作战中能够发挥举足轻重的地位^[1-2]。

常见双波段红外光学系统由两种方式构成:一是由两个分别响应不同波段的探测器组件共光路或部分共光路系统构成;二是用一个能够响应双波段红外的探测组件共光路系统构成。文中所设计的双波段红外光学系统均采用第二种构成方式。

充分发挥中波红外、长波红外各自的优点,同时又能够符合实际应用需要,双波段系统是最好的解决办法之一^[3]。文中介绍了 3 种类型的双波段红外光学系统及其原理,并对这 3 种类型系统的特点进行分析和研究,在此基础上设计了满足指定性能指标的 3 种双波段红外光学系统。

1 光学系统性能指标

工作波段 3~5 μm、8~12 μm;相对孔径 $D/f=1/2$;视场 $2\omega=5.74^\circ$;焦距 $f'=100\text{mm}$;视场畸变 $<2\%$ 。

像质评价指标为调制传递函数(MTF),对于中、长波红外波段,在奈奎斯特频率处,MTF 大于 0.4。

探测器采用能同时响应中、长波红外的红外 320×240 型探测器,其像元尺寸为 30 μm。

2 光学系统类型

2.1 折反射式光学系统

经典的卡塞格林光学系统主镜为抛物面,次镜为双曲面,通过主镜和次镜的配合,仅能校正系统的球差,只有在很小视场范围内才能得到优良的像质,通常需要通过转动光学系统的方向来获取更大的观

测范围。如果将主镜换成双曲面,则可以校正系统的球差和彗差,且系统视场也会增大。但随着系统视场的增大,则需要校正系统的象散、场曲和彗差等。这就需要在主镜后加一组至少由两片透镜组成的透镜组,可称之为校正镜组。校正镜组的光焦度与主镜、次镜的光焦度匹配以校正场曲,利用透镜弯曲可校正两种像差,主要是像散和畸变^[3]。但校正镜组太复杂,体积较大,且校正镜组的复杂程度与系统 $F/\#$ 有很大关系,系统 $F/\#$ 越小,校正镜组的设计难度越大,因此,共轴双反射系统的视场均小于 3° ,而系统设计视场为 5° ,因此,需要对卡塞格林系统结构进行调整。随着近年来光学制造和加工技术的飞速发展,加之高次非球面和二元光学表面加工技术已经很成熟,加工精度能够达到系统设计公差要求,制造成本越来越低,高次非球面校正像差在光学设计中得到了普遍的应用。高次非球面或二元光学表面形系数是多个自由变量决定的,为光学系统设计提供了更多的自由度^[4]。

系统的曲面形状可用公式(1)表示。

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2 r^2}} + a_1 r^2 + a_2 r^4 + a_3 r^6 + a_4 r^8 \quad (1)$$

式中: c 为球面曲率; a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 均为非球面系数; k 为二次曲面系数。公式(1)可以普遍表示标准球面、二次曲面和高次非球面。当 a_1, a_2, \dots, k 均为零时是标准球面^[5];当 k 不等于零且 a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 均为零时是二次曲面;当 k 不等于零且 a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 不全为零时是高次非球面。

中、长波红外光线通过同一通光孔径入射到 R-C 系统,主镜为双曲面,二次曲面系数为 $k=-1.585$;次镜为一个 8 阶非球面,二次曲面系数为 $k=-3.958$,高次非球面系数分别为: $a_2=2.383 \times 10^{-6}$ 、 $a_3=-1.238 \times 10^{-9}$ 、 $a_4=-3.224 \times 10^{-12}$ 。通过 1 片锗透镜和 2 片硫化锌透镜校正双波段像差。通过适当改变 R-C 系统的结构参数,成功地把 R-C 系统的视场提高到 5° ,得到大视场、大相对孔径的双波段 R-C 系统,如图 1 所示;由图 2 可看出,系统的畸变最大值为 0.48%,远小于指标规定的 2%;光学系统的波像差如图 3 所示,波像差的均方根为 0.036λ ,小于 $1/4\lambda$,满足瑞利判据的要求;调制传递函数如图 4 所示,从图中可看出,光学系统的 MTF 在奈奎斯特频率处大于 0.4,满

足像质指标要求;光学系统的点列图如图 5 所示,可以看出各视场光线成像的光斑半径的均方根均小于 $14\ \mu\text{m}$; 光学系统的尺寸为 (长 \times 宽 \times 高): $55.8\ \text{mm}\times 56.4\ \text{mm}\times 56.4\ \text{mm}$ 。

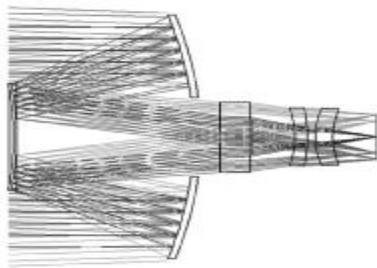


图 1 折反式光学系统

Fig.1 Catadioptric optical system

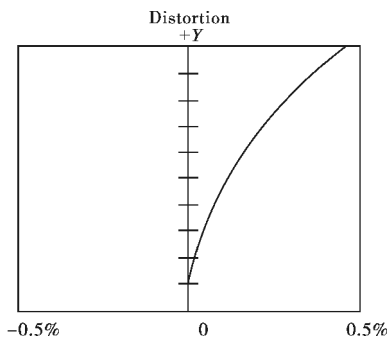


图 2 畸变曲线

Fig.2 Distortion curves

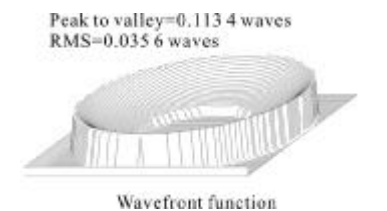


图 3 波像差

Fig.3 Wavefront aberration

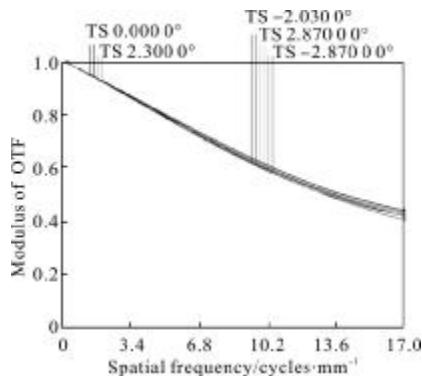


图 4 调制传递函数曲线

Fig.4 Modulation transfer function curves

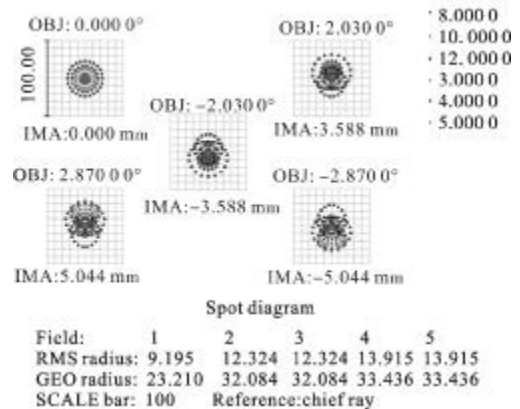


图 5 点列图

Fig.5 Spot diagram

2.2 离轴三反射式光学系统

离轴三反射光学系统具备与共轴全反射光学系统相同的优点,如无色差、无二级光谱、使用波段范围宽,容易做到大孔径、抗热性能好、结构简单等,并且成功解决了系统中心有遮拦问题,且其系统优化变量多,在提高系统视场大小的同时改善了系统的成像质量,因此,成为研究的热点^[6]。

离轴三反射系统的设计一般先设计同轴三反射系统,然后添加适当的离轴量,从而避免中心遮拦,最后再用软件进行优化,得到满足像质要求的系统。同轴三反射系统如图 6 所示,光线从左边进入系统,

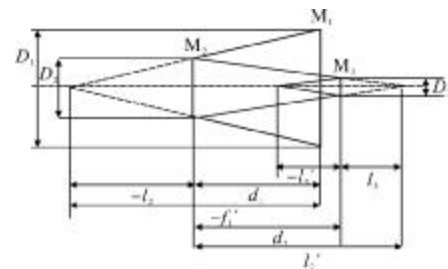


图 6 同轴三反射系统初始结构

Fig.6 Initial configuration of coaxial three-mirror system

依次经过主镜 M_1 、次镜 M_2 和三镜 M_3 ,最后成像在像面上。对于此系统,基本的结构参数有:三个反射镜的曲率半径 r_1 、 r_2 、 r_3 ;主镜到次镜的距离 d_1 ,次镜到三镜的距离 d_2 ,三镜到像面的距离 d_3 ;三个反射镜的口径分别为: D_1 、 D_2 、 D_3 ;三个反射面的非球面系数分别为: e_1^2 、 e_2^2 、 e_3^3 ;次镜相对主镜的遮拦比 α_1 ,三镜相对次镜的遮拦比 α_2 ;次镜的放大率 β_1 ,三镜的放大率 β_2 。由图 6 的几何关系可得:

$$\alpha_1 = \frac{l_2}{f_1} \approx \frac{D_2}{D_1} \quad \alpha_2 = \frac{l_3}{l_2} \approx \frac{D_3}{D_2}$$

$$\beta_1 = \frac{l'_2}{f_1} \quad \beta_1 = \frac{l'_3}{l_3} \quad (2)$$

三反射系统由三片反射镜组成,有两个间距、三个半径和三个圆锥系数共八个变量,除了满足系统焦距、球差、彗差、像散、场曲等系统性能和像质要求外,还有足够的变量进行系统布局和结构的优化设计。根据系统要求的球差 S_I 、彗差 S_{II} 、像散 S_{III} 可求出三个反射面的非球面系数 e_1^2 、 e_2^2 、 e_3^3 [7]。在确定了系统的 α_1 、 α_2 、 β_1 、 β_2 和焦距 f' 之后,就可以确定同轴

三反射系统的初始结构的有关参数,如 r_1 、 r_2 、 r_3 、 d_1 、 d_2 、 d_3 。

针对需要设计光学系统的性能指标,拟设计无中间像的离轴三反射系统,其初始结构为: $\alpha_1=0.4$, $\alpha_2=2$, $\beta_1=1.5$, $\beta_2=0.4$, $f'=-100$ mm, 系统 $F/\#=2$, 工作波段: $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 、 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 。值得注意的是,由于视场离轴,三反系统采用的是无中间像的原始同轴结构,在计算时,系统焦距应取负值。要求校正球差、彗差和像散,即令 $S_I=S_{II}=S_{III}=0$, 根据以上初始结构,得到同轴三反射系统和优化后的离轴三反射系统参数如表 1 所示。

表 1 同轴三反射系统和离轴优化后系统的参数

Tab.1 Parameters of coaxial three-mirror system and off-axis optimized system

	Coaxial three-mirror system			Off-axis three-mirror system		
	Primary mirror	Secondary mirror	Third mirror	Primary mirror	Secondary mirror	Third mirror
Radius/mm	-333.33	-80	-114.29	-427.24	-145.29	-125.94
Separation/mm	-100	100	-80	-100	100	-80
Conic	-38.63	-9.85	2.28	14.64	-1.23	-0.92
Decenter Y/mm	-	-	-	14.67	42.67	50
Tilt X/(°)	-	-	-	8.24	3.38	-1.89

经过对同轴三反射系统进行离轴化处理,最终得到离轴三反射双波段红外光学系统结构如图 7 所示;由图 8 可看出,系统的畸变最大值为 1.8%,小于指标规定的 2%;光学系统的波像差如图 9 所示,波像差的均方根为 0.049λ , 小于 $1/4\lambda$, 满足瑞利判据的要求;图 10 为系统的调制传递函数曲线,由图可知系统的 MTF 在奈奎斯特频率处大于 0.5, 满足像质指标要求;系统的点列图如图 11 所示,可看出各视场光线成像的光斑半径的均方根最大值为 $28\ \mu\text{m}$, 小于像

元尺寸 $30\ \mu\text{m}$, 满足实际使用的要求;离轴后光学系统的尺寸(长×宽×高): $110\ \text{mm}\times 122.3\ \text{mm}\times 140.3\ \text{mm}$ 。

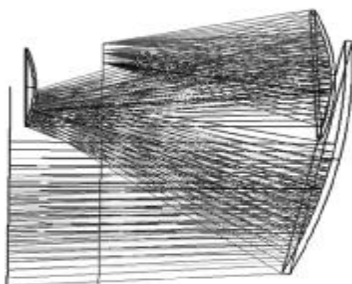


图 7 折反式光学系统

Fig.7 Catadioptric optical system

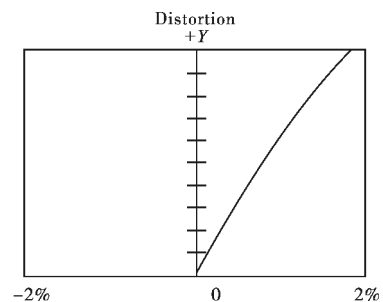


图 8 畸变曲线

Fig.8 Distortion curves

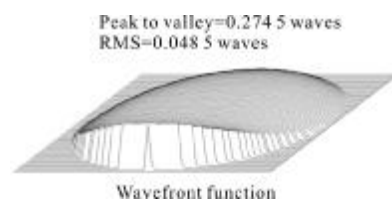


图 9 波像差

Fig.9 Wavefront aberration

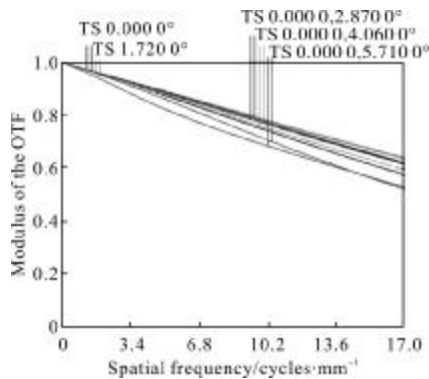


图 10 调制传递函数曲线

Fig.10 Modulation transfer function curves

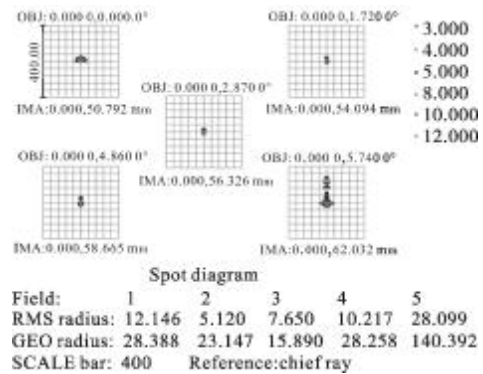


图 11 点列图

Fig.11 Spot diagram

2.3 全折射式光学系统

能同时透过中、长波红外光线的材料很少,常用的能透射双波段的材料有 Ge、ZnSe、多光谱 ZnS、GaAs、AMTIR1 等,由于双波段红外系统的响应波段往往很宽,波长变化很大,因此校正色差比较困难。在选用透镜材料的时候,首先要考虑材料的透射波段,其次要选用合理的材料相匹配,以尽可能地减小

像差。

在初始结构选取过程中,首先考虑到光学系统需满足光焦度、消热差和消色差要求,又考虑到材料的可用性及成本,选用 Ge、ZnSe 和多光谱 ZnS 三种材料^[6]。系统初始结构参数和优化后的结构参数如表 2 所示。

第一透镜的后表面和第三透镜的前表面使用非

表 2 系统初始结构和优化后结构参数

Tab.2 Parameters of initial configuration and optimized configuration

	Initial configuration				Optimized configuration			
	1st	2nd	3rd	4th	1st	2nd	3rd	4th
Material	ZnSe	Ge	ZnS	ZnSe	ZnSe	Ge	ZnS	ZnSe
R ₁ surface type			Standard spherical		Spherical	Spherical	Aspherical	Spherical
R ₂ surface type			Standard spherical		Aspherical	Spherical	Spherical	Spherical
Focal length/mm	-167	55	-63	75	-167	55	-63	75

球面,其中第一透镜的后表面为 6 阶非球面,二次曲面系数为 $k=0.134$, 高次非球面系数分别为: $a_2=3.862 \times 10^{-8}$ 、 $a_3=7.020 \times 10^{-12}$; 第三透镜的前表面也是 6 阶非球面,二次曲面系数为 $k=-15.825$,高次非球面系数分别为: $a_2=2.057 \times 10^{-7}$ 、 $a_3=-5.013 \times 10^{-11}$ 。

经过优化设计得到全折射式双波段红外光学系统结构如图 12 所示;由图 13 可看出,系统的畸变最大值为 0.55%, 小于指标规定的 2%; 光学系统的波像差如图 14 所示,波像差的均方根为 0.108λ , 小于 $1/4\lambda$, 满足瑞利判据的要求;图 15 为系统的调制传递函数曲线,由图可知系统的 MTF 在奈奎斯特频率处大于 0.42, 满足像质指标要求;系统的点列图如图 16 所示,可看出各视场光线成

像的光斑半径的均方根最大值为 $20 \mu\text{m}$, 小于像元尺寸 $30 \mu\text{m}$, 满足实际使用的要求;光学系统的尺寸为(长×宽×高): $148.9 \text{ mm} \times 81.1 \text{ mm} \times 81.1 \text{ mm}$ 。

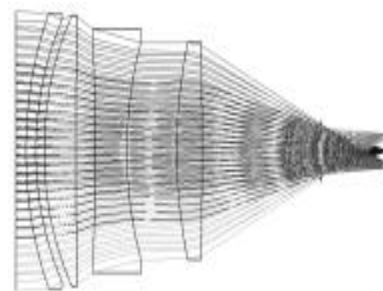


图 12 折反式光学系统

Fig.12 Catadioptric optical system

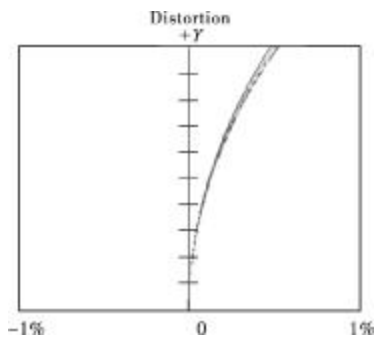


图 13 畸变曲线

Fig.13 Distortion curves

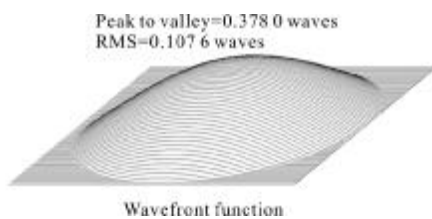


图 14 波像差

Fig.14 Wavefront aberration

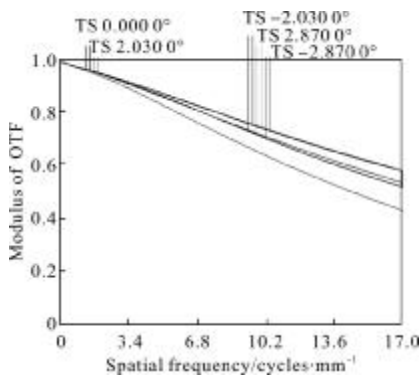


图 15 调制传递函数曲线

Fig.15 Modulation transfer function curves

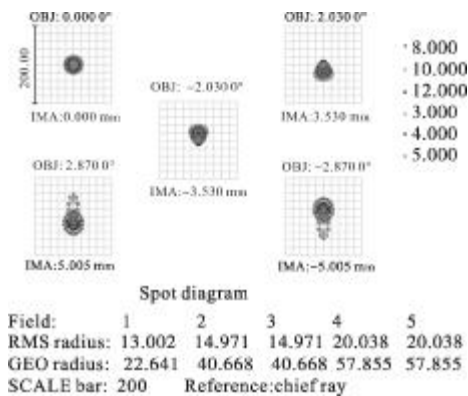


图 16 点列图

Fig.16 Spot diagram

3 结 论

采用折反射、离轴三反射和全折射方式设计双波段红外光学系统时,各有其优劣。折反射式光学系统采用 R-C 系统结构,使得整个系统结构紧凑,达到系统小型化、轻量化的要求,但 R-C 系统视场较小,且系统中心有遮拦,影响了光学系统的分辨率和进入系统的能量;离轴三反射式光学系统很好地避免了系统中心有遮拦的问题,由于系统全部由反射镜构成,不引进色差、二级光谱等,因此在宽波段成像过程中性能较好,但多元件离轴系统的精确装调在实践中较难实现;全折射式光学系统容易实现大视场、大相对孔径,但能同时透过中、长波红外光线的玻璃材料很少,且材料受温度的影响较大,为了能很好地校正像差,系统往往需要较多镜片,导致系统体积大、质量大,很难实现系统小型化、轻量化的要求。

对于折反射式光学系统,如何调整系统结构以达到视场最大化,同时又能保证成像效果,是随着反射、折射系统漫长的完善、发展进步过程中非常值得讨论的课题;离轴三反射式光学系统的装调难度较大,在实际装调过程中,往往无法将系统装调到接近设计的成像质量,而采用计算机辅助装调,可以达到手工装调无法达到的效果,因此,计算机辅助装调技术将是未来研究的重要方向之一;为了校正像差,全折射式光学系统需要使用较多镜片,造成光能损失较大,且增加了系统的体积、重量,设计过程中可利用衍射元件的负色散、负热差特性,配合折射元件补偿色差和热差,减轻系统体积、重量,实现红外双波段光学系统消色差、消热差设计。

参考文献:

[1] Wang Haitao, Geng Anbing. Unified infrared imaging optical system of dual spectral [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(3): 489-492. (in Chinese)
王海涛, 耿安兵. 一体化红外双波段成像光学系统 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(3): 489-492.

[2] Wang Ping, Zhang Guoyu, Gao Yujun, et al. Optics and machine design of visible light and infrared dual spectral aerial reconnaissance camera [J]. Journal of Mechanical

- Engineering, 2012, 48(14): 11-16. (in Chinese)
王平, 张国玉, 高玉军, 等. 可见与红外双波段航空侦察相机光机设计[J]. 机械工程学报, 2012, 48(14): 11-16.
- [3] Fan Xuewu, Ma Zhen, Chen Rongli, et al. The design of Cassegrain optic system for double infrared wavebands [J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(4): 463-465. (in Chinese)
樊学武, 马臻, 陈荣利, 等. 红外双波段卡塞格林光学系统设计[J]. 光子学报, 2003, 32(4): 463-465.
- [4] Cai Zhanen, Liu Zhaohui, Huang Jing, et al. Dual band night vision R-C system with wide field of view and large relative aperture[J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(4): 525-528. (in Chinese)
蔡占恩, 刘朝晖, 黄静, 等. 大视场大相对孔径双波段夜视 R-C 系统设计[J]. 应用光学, 2010, 31(4): 525-528.
- [5] Wang Zhijiang. Practical Optical Technical Manual [M]. Beijing: China Machine Press, 2006. (in Chinese)
王之江. 实用光学技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [6] Song Yanfeng, Shao Xiaopeng, Xu Jun. Off-axis three-mirror reflective optical system [J]. Infrared and Laser Engineering. 2008, 37(4): 706-709. (in Chinese)
宋岩峰, 邵晓鹏, 徐军. 离轴三反射镜光学系统研究[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(4): 706-709.
- [7] Ding Xuezhuan, Liu Yinnian, Wang Xin, et al. Design of reflective optic system used in aerospace remote sensing [J]. Infrared Technology, 2007, 29(5): 253-256. (in Chinese)
丁学专, 刘银年, 王欣, 等. 航天遥感反射式光学系统设计[J]. 红外技术, 2007, 29(5): 253-256.
- [8] Zhang Chunyan. Design of an athermalized MWIR and LWIR dual-band optical system [D]. Suzhou: Suzhou University, 2011. (in Chinese)
张春艳. 中波和长波红外双波段消热差光学系统设计[D]. 苏州: 苏州大学, 2011.