

文章编号 1004-924X(2015)02-0395-07

红外双波段双视场共光路光学系统

张 葆^{1*}, 崔恩坤^{1,2}, 洪永丰¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 考虑红外多波段双视场共光路系统多谱段色差严重且能量透过率低, 本文设计了结构简单的红外中波/长波双波段双视场折射系统, 实现了成像系统的功能多样性。该系统采用了 320 pixel×240 pixel 红外中波和长波双色焦平面阵列探测器, 通过引入非球面元件提高了系统校正像差的能力, 实现了镜片组的结构性调整。系统包括变焦和二次成像两个子系统, 其中变焦系统短焦距为 50 mm, 长焦距为 200 mm, 满足 100% 冷阑匹配。像质评价结果表明: 在 17 lp/mm 处, 调制传递函数(MTF)在中波处大于 0.5, 在长波处两个视场下都接近衍射极限; 另外 80% 左右的能量都能被集中在一个像元上, 光谱透过率均匀, 且无严重的冷反射现象。优化后的光学系统具有适用范围广, 结构紧凑以及成像效果好等优点, 在机载光电侦察跟踪设备上有较好的应用前景。

关键词: 光学设计; 红外系统; 双视场系统; 双波段系统; 共光路系统

中图分类号: TN216 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152302.0395

Infrared MWIR/LWIR dual-FOV common-path optical system

ZHANG Bao^{1*}, CUI En-kun^{1,2}, HONG Yong-feng¹

(1. *Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)
* *Corresponding author, E-mail: clesky@vip.sina.com*

Abstract: In consideration of the serious chromatic aberration and lower energy transmittance of a multi-band infrared MWIR/LWIR (Medium Wave Infrared/Long Wave Infrared) dual-FOV (Field of View) common-path optical system, a dual-FOV and dual-band common-path refraction optical system is designed to implement the multi functions of the imaging system. The system is based on a cold 320 pixel×240 pixel MWIR/LWIR dual-band staring focal plane array detector and introduces aspherical optical components to improve its aberration correction ability to adjust the align structure of lenses. The optical system is made up of a zoom subsystem and a secondary imaging subsystem with a 50 mm focal length and a 200 mm focal length and satisfies 100% cold shield efficiency. The image evolution shows that the Modulation Transfer Function(MTF) of LWIR and MWIR is almost reaching the limit

收稿日期: 2014-03-03; 修订日期: 2014-03-27.

基金项目: 国家 973 重点基础研究发展计划资助项目 (No. 2009CB2400603B); 中国科学院航空光学成像与测量重点实验室研究基金资助项目 (No. Y2HCISR126, Y2HCISR123)

of diffraction and greater than 0.5 respectively at the spatial frequency of 17 lp/mm, and almost 80% of the energy is concentrated at one pixel. In addition, there is no obvious cold reflect phenomena observed, and the optical system has a preferable application foreground in military and civilian opto-electronic detective fields for its wide scopes of application, compact structure, small volume and good imaging.

Key words: optical design; infrared system; dual-FOV system; dual-band system; common-path system

1 引言

当今世界科学技术的发展日新月异,各国竞相增强自己的科技实力,特别是军事武器领域更是受到了格外重视。红外军事武器作为其中的一个分支,在近年来得到了长足的发展。红外军事武器的优劣主要取决于红外光学系统。双视场红外光学系统结构简单、功能齐全并且兼具短焦距和长焦距两视场,因而得到人们的重视。短焦距视场的覆盖率广,长焦距视场的分辨率高,两者协同可实现对目标的大视场搜索以及小视场瞄准和跟踪,从而提高武器性能^[1]。在大气环境中,红外辐射透过窗口主要有 $1\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 、 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 以及 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 3 个波段。火箭发射、飞机飞行、生物体辐射以及坦克火炮射击分别在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 或 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 两个波段有较强的辐射,因此红外长波和中波在军事上有着非常重要的价值。

传统红外折射式光学系统的色差比较严重,衍射光学元件虽然在一定程度可以有效地校正色差,但无法较好地协调解决色差、光能通过率以及系统成本三者之间的矛盾。非球面光学元件不但可以有效地解决由折射谱带宽造成的色差问题,而且不会影响能量在光学系统的传输。本文针对折射式光学系统,设计了双波段双视场光学系统和红外长波/中波共光路,采用移动组元间隔的方式实现视场变换。该系统使用了 7 片透镜,其中 4 个非球面,具有视场大、结构简单、易于装调、像质好、制作成本低,光能透过率稳定等优点。

2 设计理念

对于焦距不大,视场较大的应用要求,采用折射式光学系统比较合理^[2],但该光学系统的色差比较严重,在一定程度上限制了其应用范围。因

此,很多研究者在系统中引入衍射光学元件,用以校正色差^[3-7]。衍射光学元件虽然在一定程度可以有效地校正色差,但该元件自身也存在缺陷,如通过波段短、衍射效率低等,不利于提高能量透过率和像面衬度。而谐衍射光学元件虽然具有更好的特性,但其过高的系统成本以及加工难度使得谐衍射光学元件的应用难以普及。因此本文考虑到系统的光能透过率不能太低,通过引入非球面来实现双波段折射系统的设计。

2.1 变倍方法选择

双视场的实现方法有多种,目前最常用的有以下两种:一种是通过切换透镜的方法来切换视场。这种方法对系统结构的要求较高且容易造成镜片的闲置和机械结构尺寸的增加;另一种方法是通过透镜组的移动改变镜组间的距离以实现变焦,进而达到视场切换的目的,这种方式结构简单、稳定性好、成本低^[8]。因此,本文选择第二种方法来实现双视场,其光学结构由前固定组,变倍组以及后固定组组成,如图 1 所示。变焦过程中前固定组和后固定组的位置不发生变化,通过变化变倍组的轴向位置来实现调焦。

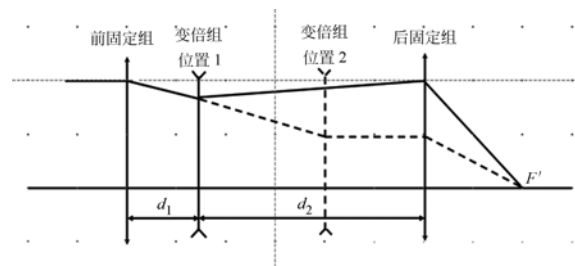


图 1 双视场光学系统基本结构图

Fig. 1 Structure of zoom system with dual-FOVs

2.2 初始结构求解

本文应用 PW 法来求解变焦光学系统的初始结构。由于红外玻璃的种类很少,使用 PW 法检验和选择玻璃比较快捷。每个镜片的光焦度分

配应满足总光焦度和消色差条件;因此需要对红外双波段系统进行消色差,但在满足消色差的条件下,系统校正单色像差的能力非常有限,而非球面镜可以弥补这一不足。非球面的级数展开式为:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + a_2r^2 + a_4r^4 + a_6r^6 + \dots, \quad (1)$$

式中: $c = 1/r_0$, 为非球面镜基准面的曲率, $k = -e^2$, 为锥面度。考虑到非球面的加工精度和消像差的作用,级数精确到八阶。非球面初始结构的求解是近似计算近轴薄透镜非球面,计算中可以暂时忽略高级项带来的像差增量,仅计算初级量,相应的初级像差系数增量为:

$$\Delta S_I = -\frac{(n' - n)e^2}{r_0^3}h^4 = \Delta S_{II} / (h_z/h) = \Delta S_{III} / (h_z/h)^2 = \Delta S_V / (h_z/h)^3, \quad (2)$$

$$\Delta S_{IV} = 0.$$

由式(2)可以看出,非球面对色差和场曲没有影响,虽然不能直接矫正光学系统的色差;但是能够增加系统校正单色像差的能力及自由度,进而增加各透镜光焦度分配的自由度,而色差的校正主要通过光焦度的分配来实现。通过非球面来校正由于消宽波段消色差所带来的附加单色像差,不用增加透镜的数量,从而不会降低系统的光能透过率。

每块透镜的色差贡献除与光焦度和阿贝常数有关外,还和透镜在系统中的位置,即入射高度有关。因此需要合理地分配光焦度,控制光线的入射高度。

将非球面初级像差增量方程与常规球面消像差方程结合即可用来设计带有非球面的光学系统,公式如下:

$$\sum_{i=1}^n S_I = \sum_{i=1}^m \Delta S_I \text{ (消球差)}, \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n S_{II} = \sum_{i=1}^m \Delta S_{II} \text{ (消彗差)}, \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n S_{III} = \sum_{i=1}^m \Delta S_{III} \text{ (消像差)}, \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n S_{IV} = 0 \text{ (消场差)}, \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n S_V = \sum_{i=1}^m \Delta S_V \text{ (消畸差)}, \quad (7)$$

式中: n 为透镜组数, m 为非球面个数。设透镜组的入射角为 u , 对每个透镜组的 PW 的归化表达式为:

$$P^\infty = P + u(4W + 1) + u^2(5 + 2\mu), \quad (8)$$

$$W^\infty = W + u(2 + \mu), \quad (9)$$

式中: $\mu = \frac{1}{\phi} \sum \frac{\phi}{n}$, P^∞, W^∞ 是在归化条件下 ($u = 0, h = 1, f' = 1, u' = 1$) 薄透镜组的基本像差参量。 P^∞, W^∞ 只和光组内部参数有关,和外部参量无直接关系。变焦系统在变焦过程中,每组透镜的自身不发生变化,只是光线入射角度和入射高度及变倍组位置发生变化。在短焦位置和长焦位置分别用消像差方程和消色差方程,进行归一化后将两个位置的消像差方程组成方程组,解方程即可得到每组的 P^∞ 和 W^∞ 。将光学系统看成 n 组透镜组,则有 $2n$ 个自由度,每个视场可用 n 个变量控制,因此可根据透镜组的数量选择消像差方程。

每个透镜组镜片的组合是密接双胶合型或多片型,光线入射到每个透镜的高度近似相等,归一化条件下每个透镜的 P^∞, W^∞ 的计算公式为:

$$\varphi_1^3 P_1^\infty + \varphi_2^3 P_2^\infty + \dots + \varphi_k P_k^\infty = P^\infty, \quad (10)$$

$$\varphi_1^2 W_1^\infty + \varphi_2^2 W_2^\infty + \dots + \varphi_k W_k^\infty = W^\infty, \quad (11)$$

其中: φ_k, W_k, P_k 分别为该镜组中第 k 个镜片的光焦度、 W 值以及 P 值。求出每个透镜的光焦度、 W 值和 P 值,便可以求出透镜的结构参数 P^∞, W^∞ , 得到双视场光学系统的初始结构。

3 设计实例

3.1 设计结果

红外光学系统的参数主要包括焦距、相对孔径以及视场等。受衍射极限的限制,光学系统的最小分辨率通常取决于其相对孔径的大小。这里,中波和长波的主波长分别为 $4 \mu\text{m}$ 和 $10 \mu\text{m}$, 选择像元尺寸 $d = 30 \mu\text{m}$ 。由光学系统等效分辨长度与光学分辨长度和探测器分辨长度之间的关系可知,当红外中波 F 数为 4, 长波 F 数为 2 时,光学分辨率和像素分辨率基本平衡。综合考虑,这里选择 F 数都为 2。光学系统参数如表 1 所示。

表 1 光学设计参数

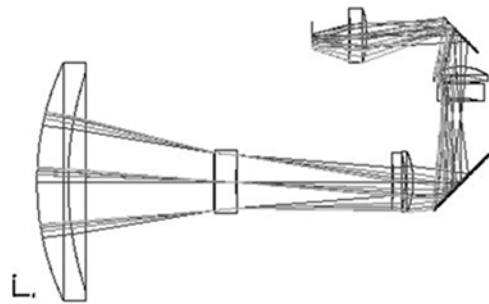
Tab.1 Optical design parameters

Parameter	Value
Wavelength band/ μm	3.7~4.8
	8~12
Focal length/ mm	200 WFOV
	50 NFOV
F#	2
FOV/ $^\circ$	6.224 WFOV
	27.778 NFOV
Transmittance/%	>75
Structure dimension/mm	220×150×130

注: WFOV:宽视场 NFOV:窄视场

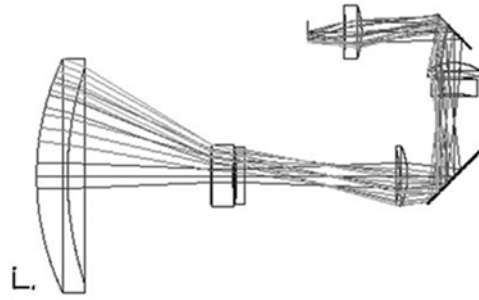
中波的 F# 与长波的相同,在充分利用能量的同时简化了结构。光学系统由变焦系统和二次成像系统两个子系统组成,具体结构如图 2 所示。光学系统采用 Ge,GaAs 两种玻璃,其中,第 1,4,6,8 这四片透镜用锗玻璃。第 1 片透镜的口径较大,轴外像差大,在第 1,2 片透镜的后表面引入非球面。第 4,5 片透镜的光焦度较大,引入非球面。系统的第 1,2 片透镜为前固定组,选择两片透镜,减小每片透镜的光焦度,校正由于大视场大口径带来的轴外像差,同时缩短系统长度;第 3 片为变焦组,实现焦距变化;第 4 片为后固定组;最后 3 片是二次成像系统,将系统的入射光阑成像在离第 1 片透镜较近的位置,减小镜片的口径。此外,在光学系统内部有一个实像面,可以设置视场光阑,阻止视场以外的杂散光进入探测器,提高系统灵敏度^[9-10]。变焦系统的透镜较少,很难消除宽光谱带来的色差,因此二次成像系统的透镜数量选择 3 片,用以配合消像差和色差及增大视场。

相比于同类型的带有衍射元件的光学系统,本文设计的光学系统在透镜数量上没有增加,能量透过率却提高了 8%,各波段能量均匀,协调解决了光能量与像质的问题。



(a) 短焦

(a) Short Effective Focal Length(EFL)



(b) 长焦

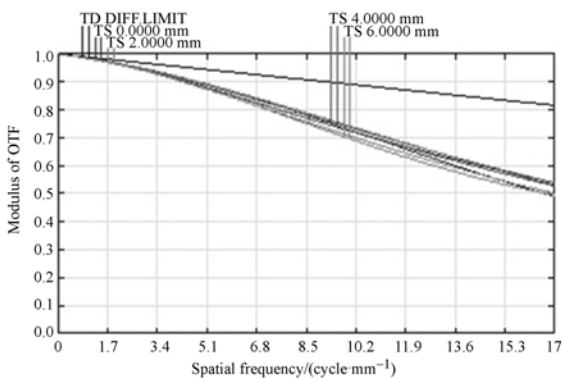
(b) Long Effective Focal Length(EFL)

图 2 光学系统外形结构图

Fig. 2 Schematic of optical system structure

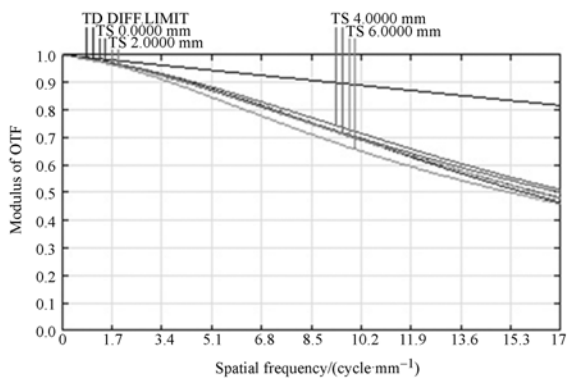
3.2 像质分析

在 Nyquist 频率 17 lp/mm 处,中波红外(MWIR)的 MTF 值在短焦和长焦两个视场都超过了 0.5,长波红外(LWIR)在两个视场的 MTF 值都超过了 0.4,接近衍射极限,如图 3 所示。两



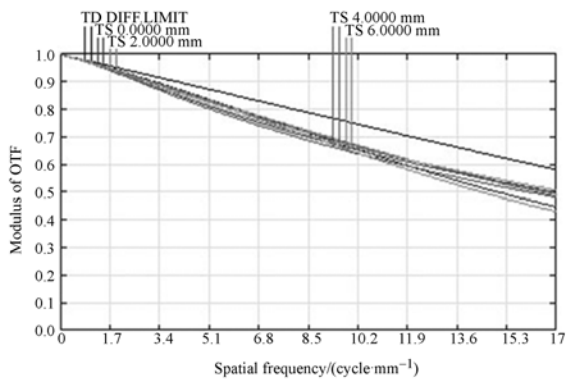
(a) 中波宽视场

(a) MWIR-WFOV

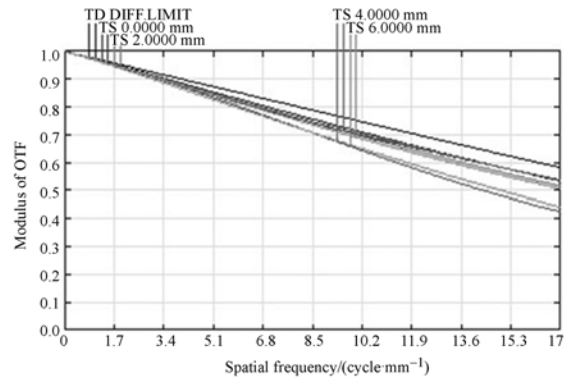


(b) 中波窄视场

(b) MWIR-NFOV

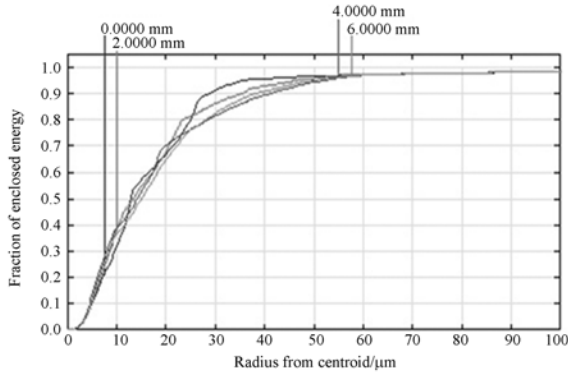


(c) 长波宽视场
(c) LWIR-WFOV

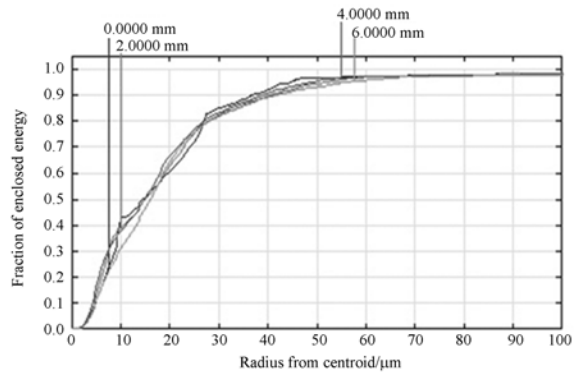


(d) 长波窄视场
(d) LWIR-NFOV

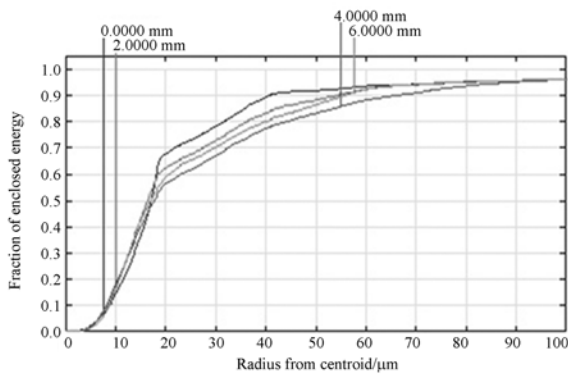
图 3 双视场共路光学系统的调制传递函数
Fig. 3 MTF curves of dual-FOV common path optical system



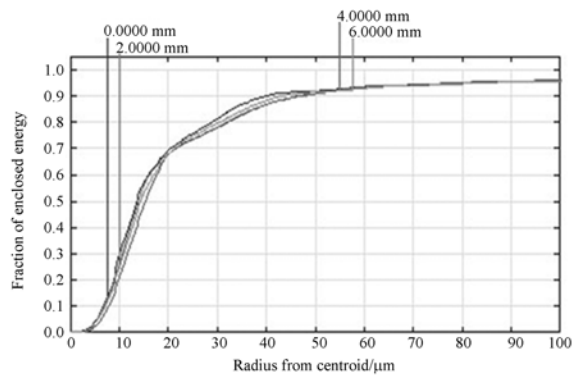
(a) 中波宽视场
(a) MWIR-WFOV



(b) 中波窄视场
(b) MWIR-NFOV



(c) 长波宽视场
(c) LWIR-WFOV



(d) 长波窄视场
(d) LWIR-NFOV

图 4 双视场共路光学系统的能量分布
Fig. 4 Energy curves of dual-FOV common path optical system

种波长的能量集中度都在 80% 左右,其能量分布曲线如图 4 所示。两种波长的两个视场的畸变都小于 5%,可以满足红外成像要求。

红外系统中冷反射对成像有很大的影响。通过 YNI 和 I/I bar 两个参量^[11-12]控制光学系统的冷反射,测得窄视场中第 7, 9, 11, 13, 14 面的 YNI 和 I/I bar 值都小于 1,对这 5 面进行反向光线追迹,反向光线追迹如图 5 所示。光线追迹结果表明:这几个面的反向光线焦点位置离探测器较远,其冷反射不会影响光学系统的成像质量。

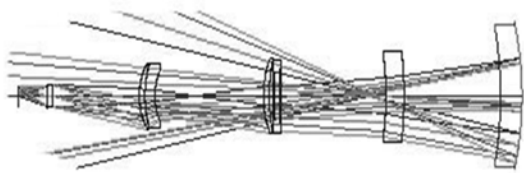


图 5 反向光线追迹示意图

Fig. 5 Schematic of cold reflection ray-tracing

参考文献:

- [1] 李仕. 气象测云红外成像系统的设计与分析[J]. 光学精密工程, 2008, 17(12): 2429-2434.
LI SH. The design and analysis of the infrared imaging system for cloud meteorological observation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 17(12): 2429-2434. (in Chinese)
- [2] POLLICA N J, ALEXAY C C. Wide-angle catadioptric optics for broadband application [J]. *SPIE*, 2013, 8704: 2A-1
- [3] 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): 489-493.
WANG H T, GENG A B. Unified infrared imaging optical system of dual spectral [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(3): 489-493. (in Chinese)
- [4] 董科研, 潘玉龙, 王学进, 等. 谐衍射红外双波段双焦光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2008, 16(5): 764-770.
DONG K Y, PAN Y L, WANG X J, *et al.*. Optical design of a HDE infrared dual-band step-zoom system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(5): 764-770. (in Chinese)

4 结 论

本文基于 320 pixel × 240 pixel 双波段红外探测器,通过调整成像系统镜片组的结构以及引入非球面元件,实现了红外中/长波双波段双视场光路光学系统的优化设计。通过分析非球面的像差特性,利用非球面间接实现了色差的校正,并通过实验得到了预期的效果。通过二次成像系统实现了整个系统的 100% 冷阑匹配,提高了信噪比,减小了透镜的横向尺寸。冷反射现象得到了有效抑制,保证了成像质量。对优化后的红外中/长波双波段双视场共光路光学系统进行了像质评价,结果表明该系统适用的红外波段范围广,具有分辨率高、结构简单、易于装调以及成像质量高等优势,在机载光电侦察跟踪设备上有较好的应用前景。

- [5] 刘英, 王学进, 潘玉龙. 谐衍射中、长波红外超光谱成像系统设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(3): 579-585.
Liu Y, WANG X J, PAN Y L, *et al.*. Design of hyper-spectral imaging with harmonic diffractive element in medium and long infrared [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(3): 579-585. (in Chinese)
- [6] 骆守俊, 何伍斌, 李文虎. 大面阵中波红外连续变焦光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2012, 20(10): 2117-2122.
LUO SH J, HE W B, LI W H. Design of middle infrared continuous zoom optical system with a large FPA [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(10): 2117-2122. (in Chinese)
- [7] 孙婷, 张宣智, 常伟军, 等. 红外宽波段双层谐衍射光学系统的设计[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(4): 951-954.
SUN T, ZHANG X ZH, CHANG W J, *et al.*. Design of infrared wide waveband double-layer harmonic diffractive optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(4): 951-954. (in Chinese)
- [8] 李刚, 杨晓许, 张恒金, 等. 基于卡塞格林系统的红外制冷型长焦分档变倍光学系统的设计[J]. 中国

- 光学,2014,7(2):293-300.
- LI G, YANG X X, ZHANG H J, *et al.*. Design of cooled infrared switch-zoom optical system with long effective focal length based on R-C system [J]. *Chinese Optics*, 2014,7(2):293-300. (in Chinese)
- [9] 董科研,王健,孙强,等. 机载双视场中波红外光学系统优化设计 [J]. 中国光学,2012,5(6):596-601.
- DONG K Y, WANG J, SUN Q, *et al.*. Design of an airborne dual field-of-view middle wave infrared optical system [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5 (6): 596-601. (in Chinese)
- [10] LEE K H. First-order optical computation for re-imaging IR optical systems [J]. *SPIE*, 5076: 123-129.
- [11] 刘洋,安晓强. 制冷型红外热成像冷反射现象的分析与控制[J]. 光学学报,2012,32(2): 274-280.
- LIU Y, AN X Q. Analysis and control of narcissus effect of cooling IR focal plane system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 274-280. (in Chinese)
- [12] 李岩,张葆,洪永丰. 大变倍比中波红外变焦光学系统设计[J]. 光学学报,2013,33(4):042205.
- LI Y, ZHANG B, HONG Y F. Design of zoom ratio middle wavelength infrared zoom optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33 (4): 042205. (in Chinese)

作者简介:



张 葆(1966—),男,吉林磐石人,博士,研究员,博士生导师,1989年于长春光机学院获得学士学位,1994年,2004年于长春光机所分别获得硕士、博士学位,主要从事航空光电成像技术的研究。E-mail: cleresky@vip.sina.com



崔恩坤(1988—),男,山东临沂人,硕士研究生,2012年于兰州大学获得学士学位,主要从事机载红外光学系统设计方面的研究。E-mail: cuiek08@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)