中国光学 Chinese Optics 核心期刊

制冷型长波红外光学系统设计

单秋莎 谢梅林 刘朝晖 陈荣利 段晶 刘凯 姜凯 周亮 闫佩佩

Design of cooled long-wavelength infrared imaging optical system

SHAN Qiu-sha, XIE Mei-lin, LIU Zhao-hui, CHEN Rong-li, DUAN Jing, LIU Kai, JIANG Kai, ZHOU Liang, YAN Pei-pei

引用本文:
单秋莎, 谢梅林, 刘朝晖, 陈荣利, 段晶, 刘凯, 姜凯, 周亮, 闫佩佩. 制冷型长波红外光学系统设计[J]. 中国光学, 2022, 15(1): 72–78. doi: 10.37188/CO.2021–0116
SHAN Qiu-sha, XIE Mei-lin, LIU Zhao-hui, CHEN Rong-li, DUAN Jing, LIU Kai, JIANG Kai, ZHOU Liang, YAN Pei-pei. Design of cooled long-wavelength infrared imaging optical system[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(1): 72-78. doi: 10.37188/CO.2021-0116

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2021–0116

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

二次成像型库德式激光通信终端粗跟踪技术
Coarse tracking technology of secondary imaging Coude–type laser communication terminal
中国光学. 2018, 11(4): 644 https://doi.org/10.3788/CO.20181104.0644

分孔径红外偏振成像仪光学系统设计
Design of decentered aperture–divided optical system of infrared polarization imager
中国光学. 2018, 11(1): 92 https://doi.org/10.3788/CO.20181101.0092

大视场高像质简单光学系统的光学–算法协同设计
Optical/algorithmic co–design of large–field high–quality simple optical system
中国光学. 2019, 12(5): 1090 https://doi.org/10.3788/CO.20191205.1090

激光位移传感器传感探头微小型光学系统设计
Design of micro–optical system for laser displacement sensor sensing probe
中国光学. 2018, 11(6): 1001 https://doi.org/10.3788/CO.20181106.1001

多角度耦合分幅相机光学系统设计
Optical system design of multi–angle coupled framing camera
中国光学. 2018, 11(4): 615 https://doi.org/10.3788/CO.20181104.0615

大相对孔径紫外成像仪光学系统设计
Design of large aperture ultraviolet optical system for ultraviolet camera
中国光学. 2018, 11(2): 212 https://doi.org/10.3788/CO.20181102.0212

文章编号　2095-1531(2022)01-0072-07

制冷型长波红外光学系统设计

单秋莎[1,2*], 谢梅林[1], 刘朝晖[1*], 陈荣利[1], 段　晶[1,2], 刘　凯[1], 姜　凯[1], 周　亮[1], 闫佩佩[1]
（1. 中国科学院 西安光学精密机械研究所，陕西 西安 710119；
2. 中国科学院大学，北京 100049）

摘要: 针对 640×512 长波红外制冷型探测器，设计了一种制冷型长波红外光学系统，用于对目标的红外跟踪探测。该光学系统采用二次成像结构以达到 100% 冷光阑效率，采用锗和硫化锌玻璃材料相结合，实现了像差校正和消色差设计，通过引入高次非球面，很好地校正了系统的高级像差，简化了系统结构。光学系统由 6 个镜片构成，焦距为 400 mm，工作波段为 7.7~9.3 μm，视场角为 1.37°×1.10°，*F* 数为 2。设计结果表明：在空间频率 33 lp/mm 处，轴外视场 MTF>0.24，接近衍射极限，具有较高的成像品质。在−35~+55 ℃ 工作温度范围内，通过内置调焦镜调焦来保证高温、低温环境下的成像质量，可用于宽温度范围内的红外跟踪探测。

关　键　词: 制冷型；二次成像；高次非球面；调焦镜
中图分类号: O435.1　　**文献标志码:** A　　**doi:** 10.37188/CO.2021-0116

Design of cooled long-wavelength infrared imaging optical system

SHAN Qiu-sha[1,2*], XIE Mei-lin[1], LIU Zhao-hui[1*], CHEN Rong-li[1], DUAN Jing[1,2], LIU Kai[1], JIANG Kai[1], ZHOU Liang[1], YAN Pei-pei[1]
(1. *Xi'an Institute of Optics and Pecision Mechanics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Xi'an* 710119, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*)
* *Corresponding author*, *E-mail*: *shqsh*.2007@163.*com*; *lzh@opt.ac.cn*

Abstract: Aiming at 640×512 long-wavelength infrared cooled detectors, a cooled long-wavelength infrared optical system was designed to track and detect an infrared target. The optical system adopts the secondary imaging structure to ensure 100% cold-shielding efficiency, and adopts a combination of optical material Ge and ZnS to achieve aberration correction and achromatic design. By introducing the high-order aspheric surface, the high aberration of the system is well-corrected, thus the system structure is simplified. The optical system is composed of 6 lenses. The focal length is 400 mm, the working bands are 7.7~9.3 μm, the field of view is 1.37°×1.10°, and the *F*-number is 2. The design results show that at a spatial frequency of 33 lp/mm, the MTF of off-axis field of view is more than 0.24, which approaches the diffraction limit and has high imaging quality. In the operating temperature range of −35~+55 ℃, the focusing lens is used to ensure the imaging quality under high and low temperature environments, which can be used for infrared tracking detection over a wide range of temperatures.

Key words: cooled; the secondary imaging; high order aspheric surface; focusing lens

---

收稿日期: 2021-05-29; **修订日期:** 2021-06-16
基金项目: 国家自然科学基金(No. 61805275)；中国科学院“西部之光”人才培养引进计划(No. XAB2017B27)
Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 61805275); CAS “Light of West China” Program (No. XAB2017B27)

1　引　言

红外成像系统主要探测目标的自身热辐射，利用目标与背景的温度差异提取目标，温度差异越大提取目标的能力越强。因此，红外成像系统进行目标探测时不受光照条件的限制，具有隐蔽性好、抗干扰能力强、作用距离远、可全天候工作等优点，广泛应用于红外探测和安防监控等军用和民用领域[1-3]。根据普朗克定律的物理意义可知，随着温度的升高，目标辐射的峰值波长降低。因此，中波红外系统对于探测温度较高的目标(如飞机、坦克和舰船等)有优势，而长波红外系统则主要用于常温/低温物体探测，以形成物体的轮廓影像。红外探测器可分为制冷型和非制冷型两大类，非制冷型红外探测器在接收目标辐射的红外信号的同时，探测器件的温度会随之升高，温度的变化将以电信号的形式被放大和显示处理，从而形成背景噪声，干扰目标信号，降低探测灵敏度。制冷型红外探测器工作在 77~80 K 的低温环境下，噪声等效温差极低，探测灵敏度很高，观测距离远，成像效果佳。因此，军用红外光学系统多采用制冷型红外探测器。制冷型探测器的光阑置于探测器冷屏处，在设计过程中保证光学系统的出瞳与探测器的冷阑相匹配，以获得 100% 的冷光阑效率，并且避免杂散辐射，即要求光学系统的 F 数要与探测器的冷屏 F 数相匹配。

近 10 年来，随着光学要求和加工水平的发展，非球面的加工能力[4]得到很大的提高，非球面的技术在红外光学系统中得到广泛的应用。非球面光学与球面光学相比，非球面中的多项式系数能够为光学系统的设计提供更多的自由度，可以在提高光束质量的同时，有效地减少透镜数量，达到简化镜头结构和减轻系统重量的目的；另外，非球面在校正系统像差方面具有较强的校正能力，从而可获得高质量的图像和高品质的光学特性。

以长波制冷型红外热像仪为研究对象，本文设计的长波红外光学系统采用二次成像结构，将系统孔径光阑后置于冷屏处，以获得 100% 冷光阑效率，由两种红外光学材料 Ge 和 ZnS 共 6 片透镜组成，利用光学材料 Ge 和 ZnS 的折射率/色散系统匹配校正系统单色像差和色差，并在优化过程中引入高次非球面以校正高级像差，同时减化镜片数量、优化系统结构。通过内置调焦镜对温度范围为−35~+55 ℃ 的高温、低温工况进行调焦，获得宽温范围下的红外清晰图像。该系统结构简单、紧凑，工作温度范围宽，具有良好的成像质量。

2　系统设计要求

该红外系统采用长波 640×512 制冷型焦平面阵列探测器，探测器像元尺寸为 15 μm×15 μm，红外光学系统设计指标如表 1 所示。

表 1　该红外系统的光学设计参数

Tab. 1　Design parameters of proposed infrared optical system

项目	参数
波段范围/μm	7.7~9.3
中心波段/μm	8.5
焦距/mm	400
F数	2
视场角(°)	1.37×1.10
靶面大小/mm	12.29
温度范围/℃	−35~+55
像元大小	15 μm×15 μm

3　设计思想

3.1　光学结构型式

从杂散光抑制能力和减小光学系统元件尺寸等角度考虑，采用二次成像结构[5]。二次成像包含两个镜组：物镜组和中继镜组。物镜组承担系统的主要光焦度，并将目标成像于一次像面处；中继镜组将一次中间像成像于红外焦平面处，主要用于校正物镜组的残余像差。同时将光学系统的出瞳匹配至探测器冷阑处，实现光瞳衔接，保证 100% 冷光阑效率[6]。光学系统初始结构如图 1 所示。

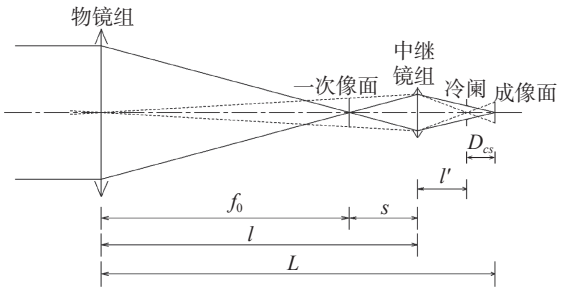


图 1　二次成像系统示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the secondary imaging system

物镜组和中继镜组的高斯成像关系为

$$\begin{cases}\dfrac{1}{s'}-\dfrac{1}{s}=\dfrac{1}{f_r'},\\ \dfrac{1}{l'}-\dfrac{1}{l}=\dfrac{1}{f_r'},\\ \beta=\dfrac{s'}{s},\\ L=l+l'+D_{cs}=f_0'+s+s',\\ f'=\beta f_0',\end{cases}\tag{1}$$

进而可得到物镜组、中继镜组的表达式

$$\begin{cases}\beta=\dfrac{f'^2-LD_{cs}}{f'(L-D_{cs})},\\ f_0'=\dfrac{f'^2(L-D_{cs})}{f'^2-LD_{cs}},\\ f_r'=-\dfrac{f'D_{cs}(L-D_{cs})}{f'^2-D_{cs}{}^2},\end{cases}\tag{2}$$

式中，f、f'为系统的物方、像方焦距；f_0、f_0'为物镜组的物方、像方焦距；f_r、f_r'为中继镜组的物方、像方焦距；l、l'为系统入瞳关于中继镜组成像的物距、像距；s、s'为一次像面关于中继镜组成像的物距、像距，其中$s=\dfrac{1-\beta}{\beta}f_r'$，$s'=(1-\beta)f_r'$；$L$ 为系统总长；β 为中继镜组的放大倍率，通常取−1.2~−0.8；D_{cs}为探测器冷阑到靶面的距离。考虑到 β 对物镜组残余像差有一定的放大倍率，β 的大小影响着二次成像系统的像差校正能力和系统的轴向尺寸。通过多次调试，本系统中 β 取值为−1 最为合适。制冷型长波红外探测器冷阑至靶面的距离为 19.8 mm，因此，需要将二次成像系统的出瞳位置放置于冷阑处，使得系统出瞳距离靶面为 19.8 mm，满足 100% 冷光阑效率。根据式 (1)~(2)，可计算出系统初始结构参数，物镜组物方焦距 f_0=−400 mm，中继镜组物方焦距f_r=−50 mm，系统总长为 L=536 mm。

3.2 设计结果

在系统设计过程中，高次非球面比球面有更高的自由度，在像差校正方面具有更强的校正能力，可以用少的镜片数量获得高的系统成像质量。因此，为了改善系统成像质量、简化系统结构，在系统设计优化过程中，引入高次非球面校正高级球差、彗差和像散。高次非球面[7-8] 的表达式为

$$z=\frac{cr^2}{1+\sqrt{1-(1+k)c^2r^2}}+Ar^2+Br^4+Cr^6+Dr^8+\cdots,\tag{3}$$

式中，c 为曲率，$c=\dfrac{1}{r_0}$，r_0为光学面的曲率半径；k 为圆锥系数；r 为归一化半径坐标；A、B、C、D 等为多次项系数，多数情况下 A 取零。为了减小成本且使系统易于加工，本系统在优化设计过程中只选用四次项、六次项和八次项非球面作为优化变量。

通过优化迭代得到最终的长波红外光学系统，如图 2 所示。系统由 3 片 Ge 镜和 3 片 ZnS 镜组成，采用二次成像透射式结构，光阑后置于热像仪冷阑处，满足 100% 冷光阑匹配，镜 4 的前表面（第 7 个面）和镜 6 的前表面（第 11 个面）均为高次非球面，剩余表面均为球面，高次非球面用来平衡系统高级像差，用较少的光学元件得到最优的成像性能。系统总长 430 mm。

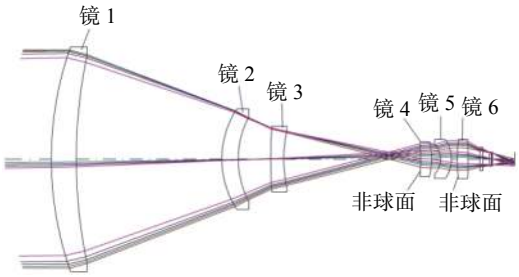


图 2 长波红外光学系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of long-wavelength infrared optical system

4 像质评价

4.1 光学系统的光学性能

图 3 为长波光学系统的 MTF 曲线图，所用探测器像元尺寸为 15 μm×15 μm，因此，设计时按 33 lp/mm 的空间频率进行评价。从图 3 可知，在空间频率 33 lp/mm 时，系统轴外 1.0 视场的传递函数大于 0.24，系统 MTF 接近衍射极限，系统具有极限分辨率。

图 4 为长波红外光学系统的点列图，系统的最大弥散斑直径为 12 μm，尺寸小于探测器的一个像元，系统成像质量较好。

图 5 为长波红外光学系统的球差、场曲和畸变曲线图，系统球差在 0.75 孔径带得到校正，全视场最大畸变发生在边缘处，其值<1%，系统成像质量良好。

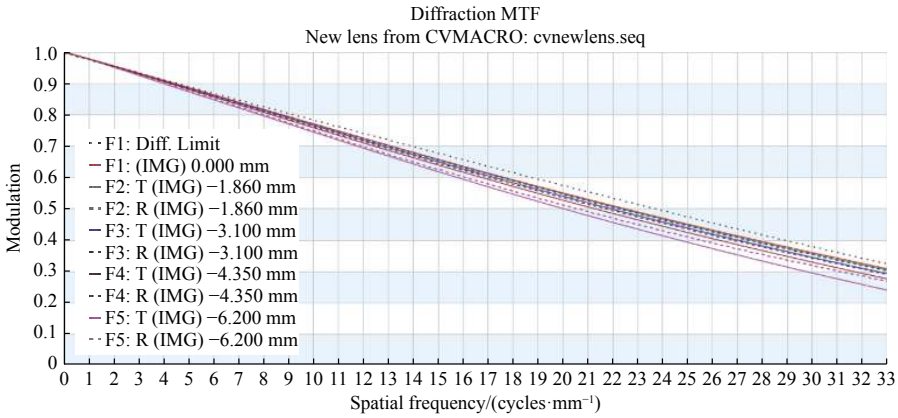


图 3　长波光学系统 MTF 曲线图

Fig. 3　The MTF curve diagram of the long-wavelength optical system

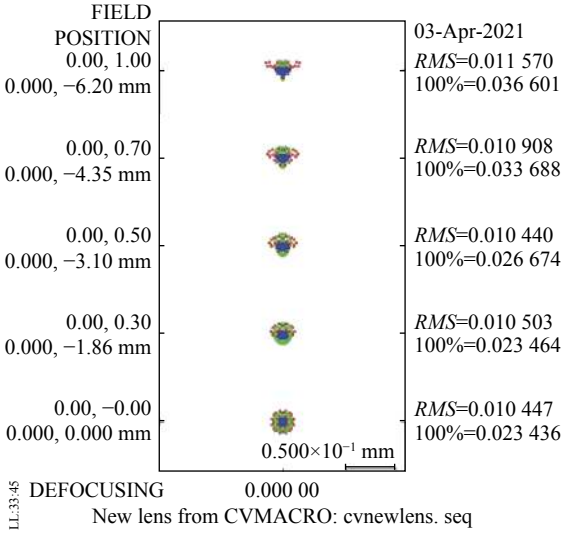


图 4　长波光学系统点列图

Fig. 4　The spot diagram of the long-wavelength optical system

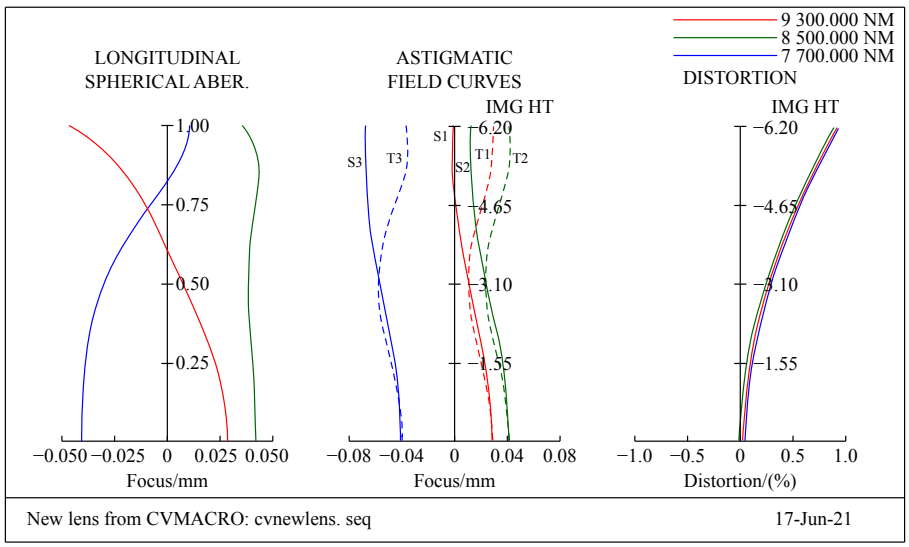


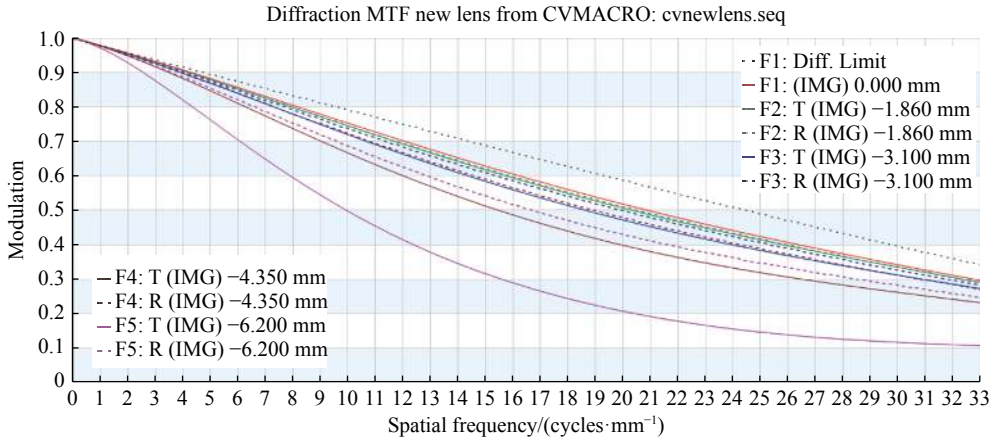
图 5　长波光学系统球差、场曲和畸变曲线图

Fig. 5　The sphere, curve and distortion diagram of long-wavelength optical system

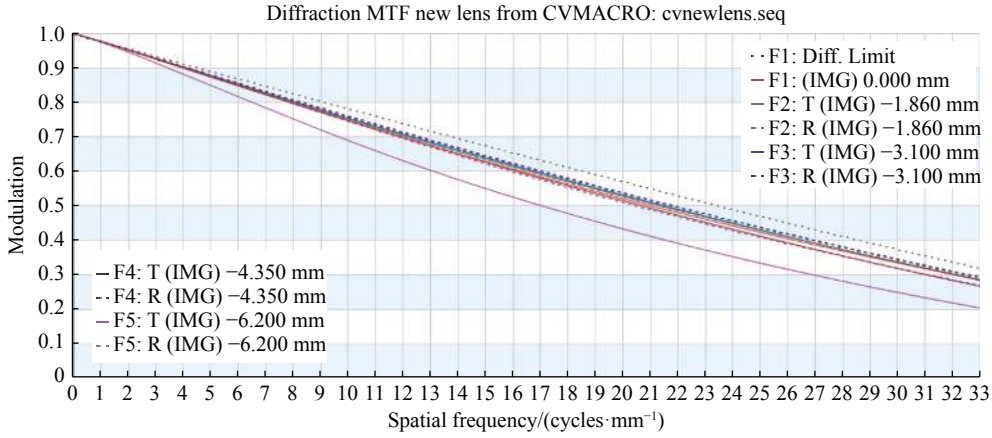
4.2 温度调焦

随着温度的变化，光学透镜的参数（曲率半径、厚度、折射率）会发生改变，从而产生热离焦现象，进而影响成像质量[9-10]。可见光光学材料的折射率温度系数为 10^{-7} 数量级，而红外光学材料 Ge 的折射率温度系数为 3.96×10^{-4}/℃，比可见光光学材料的折射率系数大至少一个数量级以上。而本系统所处的工作环境温度为−35~+55 ℃，因此，需要采用补偿措施，使红外光学系统在一个较大的温度范围内保持像面位置稳定，从而保证成像质量良好，采用调焦镜的方式补偿温度引起的像面漂移，通过调节调焦镜 3 以保证全温度范围内清晰成像。

当光学系统的工作环境温度在−35~+55 ℃变化时，调焦镜 3 需要移动的调节量为−1.57~2.68 mm，图 6 给出了环境温度分别为−35 ℃、+55 ℃ 时，经调焦后系统的 MTF 曲线图。从图 6 中可看出，全温度范围内 MTF 变化不大，在空间频率 33 lp/mm 处轴外 MTF 值不小于 0.11，能满足在全温度范围内成像清晰。



(a) 低温环境 −35 ℃
(a) Low temperature environment (−35 ℃)



(b) 高温环境 +55 ℃
(b) High temperature environment (+55 ℃)

图 6 高温、低温环境下经调焦后系统的 MTF 曲线图

Fig. 6 The MTF curve diagrams of the system after focusing in high- and low-temperature environments

4.3 冷反射分析

冷反射是制冷型红外成像系统常见的成像缺陷。制冷的探测器通过前置光学系统的微弱反射接收到来自探测器自身及周围低温腔环境的辐射，形成冷像，通常表现为在图像中心有一个黑斑[11]，这就是冷反射。一般用特征量 *YNI* 和 *I*/*IBAR* 来反映冷反射的强弱，其中，*Y* 为边缘光线在该面的投射高度；*N* 为折射率；*I* 为边缘光线的入射角

度; *IBAR* 为主光线的入射角度。当 *YNI*>1 时, 冷反射光线远离冷光阑或探测器, 冷反射效应消除, 如果某面的 *YNI* 值很小, 但 *I*/*IBAR*>1, 那么该面的冷像影响同样很小[10, 12-13]。将该条件作为一个约束量对变焦系统的冷反射强度进行控制和优化。

对本文长波红外光学系统进行冷反射分析, 光学系统的 *YNI*、*I*/*IBAR*、冷像与主像强度比等特性参数如表 2 所示。

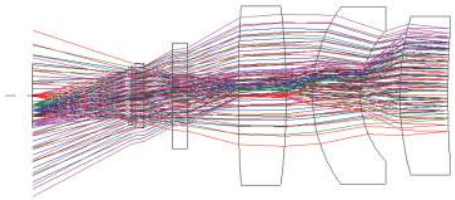
表 2　冷反射分析结果

Tab. 2　Analysis results of the narcissus effect

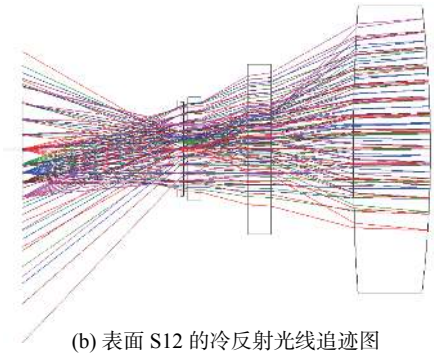
反射面	光瞳切趾	*YNI*	*I*/*IBAR*	冷像立体角	冷像强度比
1	7(R)	32.397 1	−21.550	0.012 372	0.000 72
2	7(R)	−14.167 8	−4.933	0.028 289	0.003 77
3	7(R)	8.969 8	7.885	0.044 679	0.009 42
4	7(R)	2.318 4	1.592	0.172 476	0.139 99
5	7(R)	−9.908 5	−6.533	0.040 447	0.007 72
6	7(R)	−1.037 1	−0.676	0.381 728	0.679 11
8	20(R)	1.597 9	−10.228	0.423 244	0.832 53
9	20(R)	−1.615 1	−0.509	0.166 312	0.130 18
10	20(R)	−3.584 3	−0.801	0.108 109	0.055 08
11	20(R)	−2.647 9	−0.762	0.147 997	0.103 14
12	20(R)	1.122 3	1.353	0.505 261	1.178 92
13	20(R)	−2.776 1	−0.861	0.163 054	0.125 15

由表 2 可知, 长波红外光学系统所有表面 *YNI* 或 *I*/*IBAR* 中有一项大于 1, 对成像不构成影响, 大部分表面的冷像强度比均较小, 探测器靶面上的冷像噪声的强度较弱。因此, 对成像不构成影响。表面 S8(镜 4 的前表面)和 S12(镜 6 的前表面)的 *I*/*IBAR* 均大于 1, 不过冷像强度比较大。因此, 对这两个表面进行光线追迹, 如图 7 所示。

由图 7 中分析可知, S8 和 S12 产生的冷反射光线是发散的, 可通过非均匀校正来消除, 对成像不构成影响。因此, 本长波红外光学系统中的冷反射现象对成像的影响可以忽略不计, 残余的冷反射可通过图像的非均匀性进行消除。



(a) 表面 S8 的冷反射光线追迹图
(a) The cold reflection ray trace of surface 8



(b) 表面 S12 的冷反射光线追迹图
(b) The cold reflection ray trace of surface 12

图 7　冷像强度较大的冷反射光线追迹图

Fig. 7　The cold reflection ray trace of cold images with high intensity

5　结　论

本文针对 640×512 长波红外制冷型探测器, 设计了焦距为 400 mm、冷屏 *F* 数为 2 的长波红外光学系统。系统采用二次成像结构, 将系统出瞳后置于探测器冷阑处, 且与冷阑 *F* 数相匹配, 遵循光瞳匹配原则, 具有 100% 冷光阑效率, 减小了杂散光辐射, 充分地利用冷屏口径。系统由物镜组和中继镜组组成。根据二次成像关系求得系统各个部分的初始结构形式, 通过使用两种红外材料 Ge 和 ZnS 的相互匹配以校正系统单色像差和色差, 引入高次非球面校正系统高级像差, 提高成像质量、简化系统结构。考虑本系统所处的工作环境温度为−35~+55 ℃, 宽温会给红外系统带来热离焦现象。因此, 通过调节内调焦镜进行热离焦补偿, 使系统在宽的工作温度范围内, 成像质量稳定良好。该系统具有像质好、结构紧凑、轻便等优点, 具有很强的工程应用性, 可广泛应用于对目标宽温度范围内的红外跟踪探测。

参考文献:

[1]　汤天瑾, 李岩. 红外相机共孔径双波段成像光学系统[J]. 应用光学, 2015, 36(4): 513-518.
TANG T J, LI Y. Dual-band common aperture optical system for infrared camera[J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, 36(4): 513-518. (in Chinese)

[2] 陈建发, 潘枝峰, 王合龙, 等. 基于制冷型探测器的双波段红外光学系统无热化设计[J]. 电光与控制, 2019, 26(10): 83-86.
CHEN J F, PAN ZH F, WANG H L, *et al*.. Athermalization design of a dual-band infrared optical system with cryogenic detector[J]. *Electronics Optics & Control*, 2019, 26(10): 83-86. (in Chinese)

[3] 刘星洋, 翟尚礼, 李靖, 等. 制冷型中波红外偏振成像光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(2): 20200208.
LIU X Y, ZHAI SH L, LI J, *et al*.. Design of cooled medium-wave infrared polarization imaging optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(2): 20200208. (in Chinese)

[4] 李昂, 王永刚, 邬志强, 等. 光学加工过程中高次非球面的三坐标测量数据处理[J]. 中国光学, 2020, 13(2): 302-312.
LI A, WANG Y G, WU ZH Q, *et al*.. Data processing of high-order aspheric surface measurements using CMM in optical fabrication[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(2): 302-312. (in Chinese)

[5] 付强, 张新. 基于硫系玻璃的中波红外光学系统无热化设计[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(5): 1467-1471.
FU Q, ZHANG X. Athermalization of the medium-wave infrared optical system based on chalcogenide glasses[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(5): 1467-1471. (in Chinese)

[6] 吴文达, 张葆, 洪永丰, 等. 机载红外与合成孔径雷达共孔径天线设计[J]. 中国光学, 2020, 13(3): 595-604.
WU W D, ZHANG B, HONG Y F, *et al*.. Design of co-aperture antenna for airborne infrared and synthetic aperture radar[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(3): 595-604. (in Chinese)

[7] 吕博, 冯睿, 寇伟, 等. 折反射式空间相机光学系统设计与杂散光抑制[J]. 中国光学, 2020, 13(4): 822-831.
LV B, FENG R, KOU W, *et al*.. Optical system design and stray light suppression of catadioptric space camera[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(4): 822-831. (in Chinese)

[8] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004.
PAN J H. *The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces*[M]. Suzhou: Suzhou University Press, 2004. (in Chinese)

[9] 孟超, 郭俊, 付芸. 利用非球面简化红外连续变焦光学系统的研究[J]. 红外, 2010, 31(4): 6-11.
MENG CH, GUO J, FU Y. Design of far-infrared zoom optical system based on aspheric surface[J]. *Infrared*, 2010, 31(4): 6-11. (in Chinese)

[10] 杨乐, 孙强, 王健, 等. 长波红外连续变焦光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 999-1004.
YANG L, SUN Q, WANG J, *et al*.. Design of long-wave infrared continuous zoom optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 999-1004. (in Chinese)

[11] 朱广亮, 杨林, 刘灿. 制冷型中波红外光学系统无热化设计[J]. 光学与光电技术, 2021, 19(2): 98-102.
ZHU G L, YANG L, LIU C. Athermalized design of refrigerated medium-wave infrared short-focus optical system[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2021, 19(2): 98-102. (in Chinese)

[12] HOWARD J W, ABEL I R. Narcissus: reflections on retroreflections in thermal imaging systems[J]. *Applied Optics*, 1982, 21(18): 3393-3397.

[13] AKRAM M N. Design of a multiple-field-of-view optical system for 3- to 5-μm infrared focal-plane arrays[J]. *Optical Engineering*, 2003, 42(6): 1704-1714.

作者简介：

单秋莎(1986—), 女, 山东菏泽人, 博士研究生, 2012 年于长春理工大学获得硕士学位, 主要研究方向为光学系统设计和超分辨成像。E-mail: shqsh.2007@163.com

刘朝晖(1965—), 男, 陕西西安人, 研究员, 博士生导师, 1987 年于浙江大学获得学士学位, 主要从事靶场光电跟踪技术和空间精密跟踪测量领域的研究工作。E-mail: lzh@opt.ac.cn