

文章编号: 1672-8785(2022)11-0033-08

用于森林防火的大面阵中波 红外系统无热化设计

陈 潇 王红玉

(南京邮电大学通达学院, 江苏 扬州 225127)

摘 要: 森林防火的关键是通过火灾实时监测系统有效预测森林各区域的火灾风险。通过分析无人机在森林防火中的应用, 提出了一种基于无人机的森林火灾实时监测中波红外相机系统。该系统的焦距为 75 mm, 工作波段为 3.7~4.8 μm , F 数为 2.0, 可匹配像元尺寸为 12 $\mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$ 的 1280 $\times$ 1024 元制冷型中波红外焦平面阵列探测器。在光学设计中采用 3 种红外光学材料(硅、硒化锌和锗)的组合, 并引入 3 个偶次非球面。通过优化设计实现了光学被动无热化功能。设计结果表明, 在 -60~100 $^{\circ}\text{C}$ 温度范围内, 空间频率 41.7 lp/mm 处各视场的调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)均大于或接近 0.4, 成像质量良好。这种中波红外系统的成像质量与分辨率高, 视场范围大, 具有宽温度范围的自适应性, 结构紧凑且易装调, 在森林防火领域有着广泛的应用前景。

关键词: 大面阵; 光学被动无热化; 中波红外; 森林防火

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2022.11.006

Athermalization Design of MWIR System with Large-Format for Forest Fire Prevention

CHEN Xiao, WANG Hong-yu

(Tongda College of Nanjing University of Posts and Telecommunications, Yangzhou 225127, China)

Abstract: The key of forest fire prevention is to predict the fire risk effectively through the real-time fire monitoring system. By analyzing the application of UAVs in forest fire prevention, a medium wave infrared camera system for forest fire real-time monitoring based on UAVs is proposed in this paper. The focal length is 75 mm, the wavelength band is 3.7~4.8 μm , F number is 2.0. The system can match a 1280 $\times$ 1024 cooled MWIR focal plane detector with pixel size of 12 $\mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$. In the optical design, three infrared optical materials (silicon, zinc selenide and germanium) are combined, and three even aspheric surfaces are introduced. The passive athermal optical design is realized as well. The design results show that the modulation transfer function (MTF) of each field of view is greater than or close to 0.4 at the spatial frequency of 41.7 lp/mm in the temperature range of -60~100 $^{\circ}\text{C}$, which has good imaging quality. Since the medium wave infrared sys-

收稿日期: 2022-07-29

基金项目: 国家自然科学基金孵化项目(NY218094); 学院级科研项目(XK202XZ20006); 学院 STITP 项目(ZD2022016)

作者简介: 陈潇(1985-), 女, 陕西蓝田人, 工程师(讲师), 主要研究方向为红外光学设计。

E-mail: chenxiao.45678@163.com

tem has high imaging quality and resolution, large field of view, adaptability in wide temperature range, compact structure and can be installed easily, it has a wide application prospect in the field of forest fire prevention.

Key words: large-format; passive optical athermalization; MWIR; forest fire prevention

0 引言

森林火灾具有突发性强、危害性极大的特点。一旦发生火灾,无法快速扑灭则会带来巨大的资源损失,甚至可能会威胁到森林周边人类的生命财产安全^[1-2]。森林防火的关键是所用实时监测系统的有效性。目前已有的森林火灾监测方式包括地面及近地面巡护监测、航空巡护监测、雷达监测和卫星遥感监测等^[3]。其中,航空巡护监测系统主要利用飞机和无人机系统实现巡护监测,是森林防火监测中最有效的方式之一^[4]。

中波红外成像技术能够实现全天候工作,观测范围广,不受电磁干扰,而且其成像谱段与木材燃烧火焰的辐射峰值波长范围匹配。因此可采用基于无人机载平台的中波红外相机进行监测巡护,从而更高效地实施航空巡护监测作业。同时,为了降低天气状况、地理环境和工作环境等因素对中波红外相机监测作业的影响,还有必要对中波红外相机系统进行无热化设计。

本文设计了一种大面阵、光学被动无热化中波红外系统。该系统的工作波段为 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$, F 数为 2.0,可匹配像元尺寸为 $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$ 的 1280×1024 制冷型中波红外焦平面阵列探测器(对角线尺寸为 19.68 mm)。通过利用硅、锗和硒化锌 3 种红外光学材料的组合,并引入 3 个偶次非球面,最终实现了大面阵中波红外系统的光学被动无热化设计。

1 基于无人机的森林火灾监测系统

无人机可携带各种小型化的光电探测装备来实现远程操控执行任务,已在自然灾害应对、火灾搜救、交通监测等方面得到应用。利用无人机可以实现对森林动态的全面监测并对

相关情况进行预警,从而达到有效提高森林火灾发现率的目的。

在无人机上装载高分辨率中波红外相机系统可全天候监测森林动态,便于及时发现火情,且无人机可在火场上空飞行。它在执行空中巡查任务时,可实时传递监测影像。当出现可疑事件时,可通过调整无人机的飞行高度和轨迹进一步详细查看,进而精确、快速地将火灾情况传递到森林值班室。同时还可以控制无人机飞到火场上空来获取火场实时动态信息,从而制定出最佳灭火方案。

无人机森林火灾监测系统主要包括机载飞行平台与地面数据处理系统两个部分。其中,机载飞行平台是无人机森林火灾监测系统的核心部分,包括前端光学系统、光电探测器、电路控制与执行系统以及信息存储与传输系统等。

1.1 目标辐射波段的讨论

出现森林火灾时,会产生大量的烟雾和火焰。因此,森林火灾探测系统的探测目标为烟雾和火焰。为了透过烟雾观察火情,可考虑使用长波红外波段。而火焰的辐射波谱中心为 $4.3 \mu\text{m}$,所以中波红外波段是用于火焰探测的重要波段。对比相同参数的长波红外系统和长波红外系统后可知, $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 长波红外波段对烟雾的探测穿透力较强,对常温和低温目标的信号强,对干冷大气环境的透过率较高; $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 中波红外波段的空间分辨率较高,对火焰等高温目标的信号较强,对湿热大气环境的透过率较高。因此,两个波段在森林火灾探测中各有优势。但考虑到森林火灾探测中的背景为草地、土壤和沙地等,本文设计的基于无人机的红外系统最终选用中波红外波段。

1.2 红外探测器的选择

红外探测器的噪声等效温差(Noise Equiv-

alent Temperature Difference, NETD)直接决定了红外系统对目标的探测能力。一般要求红外探测器的 NETD 越小越好。非制冷型红外探测器的 NETD 一般在 50 mK 左右, 制冷型红外探测器的 NETD 在 10~30 mK 左右。制冷型长波红外探测器的 NETD 稍大于制冷型中波红外探测器的 NETD。为了获得更高的分辨率, 可选用制冷型中波红外探测器。目前, 美国 FLIR 公司、法国 Lynred 公司、中国高德红外公司和中国电子科技集团公司第十一研究所等都在研究大面阵、双波段(或多波段)、小面元尺寸的制冷型红外焦平面阵列探测器, 并已成功研制了 1024×768 元、 1280×1024 元的制冷型中波红外焦平面探测器。像元尺寸已减小到 $15 \mu\text{m}$ 和 $12 \mu\text{m}$, 甚至可减小到 $10 \mu\text{m}$ 或更小的 $5 \sim 8 \mu\text{m}$ 。本文选用高德红外公司推出的像元尺寸为 $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$ 的 1280×1024 制冷型红外焦平面阵列探测器(见图 1)^[5-6]。



图 1 像元尺寸为 $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$ 的 1280×1024 制冷型中波红外探测器组件的实物图

2 中波红外相机光学系统设计

2.1 光学系统设计指标

利用光学设计软件完成一种中波红外相机无热化设计。表 1 列出了具体的设计指标参数。

表 1 光学设计指标参数

设计指标	数值
波长范围	$3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$
有效焦距	75 mm
F 数	2
全视场角	14.95°
对角线尺寸	19.68 mm
温度范围	$-60 \sim 100^\circ\text{C}$

2.2 中波红外系统光学被动无热化原理

考虑到天气状况、地理环境和工作环境等因素, 人们对无人机森林火灾监控系统装载的中波红外相机的设计提出了更高的要求。当火灾发生时, 为了获取实时火灾动态信息, 必须控制无人机进入火场上空附近。由于该区域为高温区域, 因此要求中波红外相机系统在高温环境下仍然可以工作。同时, 考虑到森林夜间的温度低于常温, 要求相机系统在低温环境下也能正常工作。然而, 当外界环境温度发生变化时, 光学透镜本身的各项参数均会发生变化, 同时元件之间的空气间隔也会改变, 进而导致高、低温下的成像质量与常温时差异较大。因此要求所设计的中波红外系统在 $-60 \sim 100^\circ\text{C}$ 工作温度范围内具有一定的温度补偿功能。

常见的温度补偿方法有四种: 机械主动电机式补偿、机械被动式补偿、光学被动式补偿以及机械与光学混合被动式补偿。其中, 光学被动式补偿方法是在选定某种机械镜筒材料的基础上, 利用多种红外光学材料组合来合理分配各组件的光焦度, 并在满足常温像质的条件下使光学系统在工作温度范围内自动补偿温度变化所产生的热离焦, 从而实现光学系统的温度自适应性。虽然这种温度补偿方法对光学设计过程提出了更高要求, 但无热化效果良好, 不需要移动透镜组, 也不需要使用电机、导轨或凸轮、温度传感器等设备以及大体积重量的多层机械镜筒结构。

为了实现光学被动无热化设计, 同时达到焦距和消色差的要求, 必须满足以下 3 个方程。

光焦度方程:

$$\varphi = \sum_{i=1}^k \varphi_i \quad (1)$$

消色差方程:

$$\sum_{i=1}^k h_i^2 \frac{\varphi_i}{v_i} = C = 0 \quad (2)$$

消热差方程:

$$\sum_{i=1}^k h_i^2 T_i \frac{\varphi_i}{\varphi} = T = -\alpha_m L \quad (3)$$

式中, φ 为系统总的光焦度; i 取 $1, 2, 3, \dots, k$; φ_i 为各薄透镜的光焦度; h_i 为近轴光线入射到第 i 个透镜的入射高度; α_m 为所用镜筒材料的热膨胀系数; L 为机械结构镜筒的总长度^[7-9]; T 为光学热差系数; T_m 为机械热差系数; C 为色差系数。为了实现消色差设计, 要求系统的色差系数 $C=0$; 为了消除热差, 要求系统的光学热差和机械热差相等, 即要求 $T = -T_m$ 。

为了实现光学被动式无热化设计, 根据瑞利判据, 应控制高低温下的消热差误差 ΔL_T 小于四分之一波长, 并要求该误差在系统的焦深范围内^[10]:

$$\Delta L_T \leq 2\lambda (F/\#)^2 \quad (4)$$

该系统的 $F/\#$ 为 2, 波长 λ 按照中心波长 $4.2 \mu\text{m}$ 计算, 得到该系统的消热差误差 $\Delta L_T \leq 33.6 \mu\text{m}$ 。只要该系统在 $-60 \sim 100^\circ\text{C}$ 内的最大离焦量小于 $33.6 \mu\text{m}$, 就可以达到无热化设计效果。

2.3 光学系统结构形式与材料选择

设计制冷型中波红外系统时, 考虑到光阑决定了光学系统的出瞳大小和位置, 因此为了

实现光学系统 100% 的冷光阑效率, 大多数系统结构设计采用二次成像结构或折反射二次成像结构^[11]。本文设计的中波红外系统的焦距为 75 mm 。若采用二次成像结构, 则光学总长过长且体积过大, 不便装载在无人机上。为了实现冷光阑匹配, 将孔径光阑设置在冷光阑处。冷光阑同时也是系统的出瞳。采用一次成像结构可以缩短系统的光学总长。头片透镜的口径虽会增大, 但焦距较短, F 数为 2, 通光口径能够在 75 mm 以内。

表 2 列出了常用中波红外材料的光学及热特性参数。硅和锗材料是中波红外系统设计中最常用到的红外材料。这两种材料折射率高, 有利于像差校正。在中波系统设计中, 硅材料具有较高的阿贝数, 色散与密度较小, 可用作正透镜, 类似于消色差设计中的“冕牌玻璃”; 锗材料具有较小的阿贝数, 色散与密度大, 可用作负透镜, 类似于消色差设计中的“火石玻璃”。

为了实现消热差设计, 镜筒选用铝合金材料(热膨胀系数为 $23.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)。综合考虑红外材料的光谱特性、加工工艺、环境影响等因素, 且硒化锌材料的温度折射率系数小、折射率较高, 因此除了硅和锗材料之外, 还选择了硒化锌。利用以上 3 种材料的组合实现了大面阵中波红外系统的光学被动无热化设计。

3 中波红外相机无热化设计结果及像质评价

根据前面对中波红外系统的技术指标、光学被动无热化原理、结构形式与材料选择的分

表 2 常用中波红外材料的光学及热特性参数

材料	折射率 @ $4 \mu\text{m}$	阿贝数 @ $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$	折射率温度系数 dn/dt ($10^{-6}/^\circ\text{C}$)	热膨胀系数 α_g ($10^{-6}/^\circ\text{C}$)
Si	3.4255	250	150	2.62
Ge	4.0244	101	396	5.7
ZnSe	2.4332	117	60	7.1
ZnS	2.2518	113	43.3	6.6
MgF ₂	1.3488	13.5	20	9.4

析, 利用 ZEMAX 软件设计了一种中波红外相机系统。该系统的焦距为 75 mm, F 数为 2, 工作波段为 $3.7\sim 4.8\ \mu\text{m}$, 可匹配像元尺寸为 $12\ \mu\text{m}\times 12\ \mu\text{m}$ 的 1280×1024 元制冷型中波红外焦平面探测器。此系统机械件镜筒选用热膨胀系数为 $23\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 的铝合金材料。利用硅、锗和硒化锌三种材料配合, 共有 4 片透镜。其中, 第一片透镜采用折射率较高的硅材料, 为正透镜; 第二片透镜为负透镜, 采用折射率高的锗材料, 起到校正系统色差的作用; 第三、四片透镜均为正透镜, 采用硒化锌材料, 具有较小的温度折射率系数, 有利于校正系统热差。为了减小系统的剩余像差和热差, 引入 3 个高次偶次非球面。在提高系统常温成像质量的同时, 减小了高、低温下热差的影响, 最终实现了中波红外系统的光学被动无热化设计。图 2 为常温下该系统的光学结构图。系统最大口径为 70.6 mm, 光学总长为 84.68 mm, 质量为 268 g。

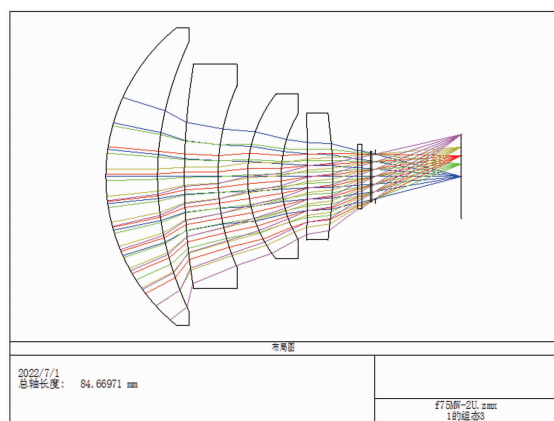


图 2 常温中波红外光学系统光路图

图 3 为中波红外相机系统在常温和高、低温下的 MTF 曲线图。可以看出, 常温 20°C 、低温 -60°C 和高温 100°C 下, 该系统在空间频率 $41.7\ \text{lp/mm}$ 处的全视场 MTF 均大于或接近 0.4, 具有良好的成像质量。虽然高、低温下的 MTF 值相对于常温时稍有下降, 但降幅很小, 说明该系统能够实现高、低温下的温度自

适应性, 具有光学被动式无热化功能。

图 4 为这种中波红外相机系统在常温及高、低温下的点列图。各温度点下, 各视场的弥散斑光斑半径的均方根(Root Mean Square, RMS)值均小于艾里斑半径 $10.22\ \mu\text{m}$ 。弥散斑光斑大小随温度的变化不明显, 说明各视场的弥散斑光斑大小受温度影响较小。表 3 列出了光学系统在常温 20°C 、低温 -60°C 和高温 100°C 下的像面热离焦量。可以看出, 各温度点下的像面离焦均在焦深 $33.6\ \mu\text{m}$ 范围内。因此, 该系统在 $-60\sim 100^{\circ}\text{C}$ 的较宽温度范围内具有良好的无热化效果, 能够满足森林防火监测应用的要求。

表 3 像面热离焦量

温度	20°C	60°C	100°C
热离焦量	0	$20.55\ \mu\text{m}$	$19.73\ \mu\text{m}$

图 5 为这种中波红外相机系统的场曲畸变图。可以看出, 场曲小于 $\pm 0.1\ \text{mm}$, 最大百分比畸变为 1.54% , 说明该系统的中心与边缘可以同时清晰成像, 且图像的形变量也能满足森林防火监控应用的要求。

4 冷反射分析

以上设计的中波红外相机光学系统属于制冷型红外成像系统。这类系统常会出现冷反射现象。若冷反射比较严重, 图像中心则会出现一个黑斑, 严重影响视场中心的成像质量, 导致图像中心的细节部分丢失。因此, 在光学设计时应应对冷反射进行控制分析, 保证所设计的光学系统受其影响较小。在光学设计中可以用 YNI (近轴边缘光线在该面的入射高度 Y 、折射率 N 和边缘光线的入射角度 I 之积) 和 I/I_{BAR} (边缘光线的入射角度 I 与主光线入射角度 I_{BAR} 的比值) 两个量值来反映冷反射的强弱^[12-14]。表 4 列出了对以上中波红外相机系统进行冷反射分析后得到的 YNI 、 I/I_{BAR} 、冷反射立体角和冷反射强度比的数值。



图 4 中波红外相机常温及高、低温下的点列图

和第 6 面(第三片透镜后表面)的冷反射强度比为 1, 但这两个面的 YNI 值和 I/I_{BAR} 值均大于 1。所以不会产生视场中心图像不均匀的冷反射效应。

表 4 冷反射分析数据

表面	拦截光阑	YNI	I/I_{BAR}	冷反射立体角	冷反射强度比
1	13(R)	7.7711	-0.990	0.069912	0.01955
2	13(R)	-3.3438	-0.492	0.114066	0.05201
3	13(R)	-4.5816	-0.571	0.093416	0.03489
4	13(F)	1.5539	2.469	0.505265	1
5	13(R)	2.9553	-4.17	0.324675	0.41812
6	13(F)	1.3978	1.292	0.505265	1
7	13(R)	-1.0831	-0.336	0.316519	0.39755
8	13(R)	-2.4905	-0.631	0.23289	0.21605
9	13(R)	-1.4840	-0.521	0.3875	0.59337
10	13(R)	-1.4657	-0.521	0.395854	0.61889
11	13(R)	-1.3407	-0.521	0.464224	0.84696

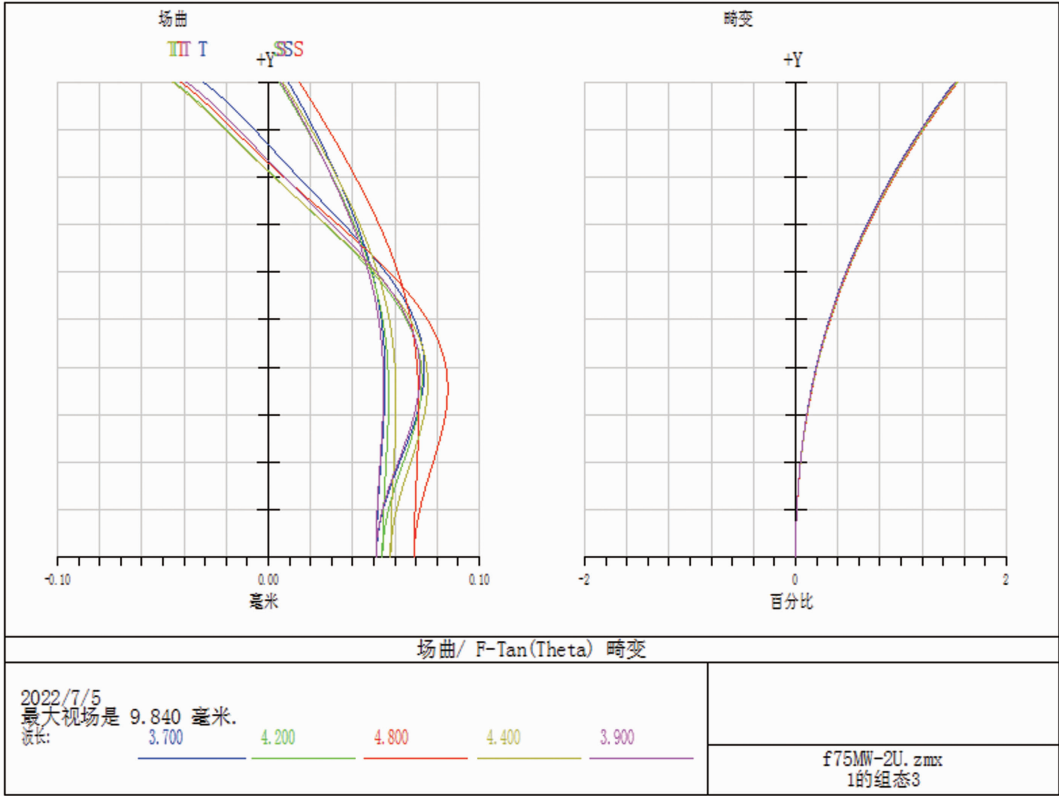


图 5 场曲畸变图

5 结束语

本文提出了一种基于无人机的森林火灾实时监测中波红外相机系统。该系统可匹配像元尺寸为 $12\text{ }\mu\text{m}\times 12\text{ }\mu\text{m}$ 的 1280×1024 元制冷型中波红外焦平面阵列探测器。根据光学被动无热化原理,采用硅、硒化锌和锗 3 种红外光学材料的组合,并引入 3 个偶次非球面,实现了一 $60\sim 100^{\circ}\text{C}$ 温度范围内的光学被动无热化设

计。光学系统 MTF、点列图、场曲与畸变以及冷反射分析结果表明,这种中波红外系统成像质量与分辨率高,视场范围大,具有宽温度范围的自适应性,无冷反射黑斑,结构紧凑且易装调,在森林防火领域有着广泛的应用前景。下一步的研究重点是可匹配像元尺寸为 $10\text{ }\mu\text{m}\times 10\text{ }\mu\text{m}$ 的 1280×1024 元制冷型中波红外探测器的光学被动无热化系统设计。

参考文献

- [1] 陈凯, 孙德新, 刘银年. 应用于森林火灾监测的中波红外相机设计 [J]. *红外技术*, 2016, **38**(6): 514–518.
- [2] Moayedi H, Mehrabi M, Bui D T, et al. Fuzzy-metaheuristic ensembles for spatial assessment of forest fire susceptibility [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, **260**: 109867.
- [3] 黄玉章. 红外热成像技术及其在火灾监控中的应用 [D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [4] 彭禹, 蔡邦成. 森林火灾监测及相关技术综述 [J]. *安徽农业科学*, 2014, **42**(32): 11355–11357.
- [5] 周立庆, 宁提, 张敏, 等. 10 μm 像元间距 1024 $\times$ 1024 中波红外探测器研制进展 [J]. *激光与红外*, 2019, **49**(8): 915–920.
- [6] 刘伟华, 刘帆, 吴正虎, 等. 12 μm 像元间距 1280 $\times$ 1024 碲镉汞中波红外焦平面探测器的制备及性能研究 [J]. *红外*, 2020, **41**(3): 9–15.
- [7] Smith W J 著. 周海宪, 程云芳译. *现代光学工程(第四版)* [M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [8] 张以谟. *应用光学* [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [9] Tamagawa Y, Tajime T. Expansion of an athermal chart into a multilens system with thick lenses spaced apart [J]. *Optical Engineering*, 1996, **35**(10): 3001–3006.
- [10] Tyagur V M, Kucherenko O K, Muravev A V. Passive optical athermalization of an IR three-lens achromat [J]. *Journal of Optical Technology*, 2014, **81**(4): 199–203.
- [11] 马文坡. 中波红外与长波红外推扫成像性能分析 [J]. *红外与激光工程*, 2014, **43**(12): 3861–3865.
- [12] 单秋莎, 谢梅林, 刘朝晖, 等. 制冷型长波红外光学系统设计 [J]. *中国光学*, 2022, **15**(1): 72–78.
- [13] 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.
- [14] 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]. *光电与控制*, 2019, **26**(10): 83–86.