

制冷型被动式消热差红外光学系统设计

李康 周峰 王保华 宫辉 郑国宪

Passive athermalization design of a cooled infrared optical system

LI Kang, ZHOU Feng, WANG Bao-hua, GONG Hui, ZHENG Guo-xian

引用本文:

李康, 周峰, 王保华, 宫辉, 郑国宪. 制冷型被动式消热差红外光学系统设计[J]. *中国光学*, 2023, 16(4): 853–860. doi: 10.37188/CO.2022–0205

LI Kang, ZHOU Feng, WANG Bao-hua, GONG Hui, ZHENG Guo-xian. Passive athermalization design of a cooled infrared optical system[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(4): 853-860. doi: 10.37188/CO.2022-0205

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0205>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

傅立叶变换型线偏振干涉成像系统分析与设计

Analysis and design of Fourier transform polarization interference imaging system

中国光学 (中英文). 2019, 12(3): 638 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0638>

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 (中英文). 2018, 11(1): 92 <https://doi.org/10.3788/CO.20181101.0092>

非制冷热像仪内部温升对测温精度的影响修正

Correction of temperature measurement accuracy affected by internal temperature rise in uncooled thermal imager

中国光学 (中英文). 2018, 11(4): 669 <https://doi.org/10.3788/CO.20181104.0669>

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 (中英文). 2018, 11(6): 1001 <https://doi.org/10.3788/CO.20181106.1001>

不同海拔地区红外大气透过率的计算和测量

Calculation and measurement of infrared atmospheric transmittance at different altitudes

中国光学 (中英文). 2019, 12(4): 843 <https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0843>

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 (中英文). 2018, 11(2): 212 <https://doi.org/10.3788/CO.20181102.0212>

文章编号 2097-1842(2023)04-0853-08

制冷型被动式消热差红外光学系统设计

李康¹, 周峰^{2*}, 王保华¹, 官辉¹, 郑国宪¹
(1. 北京空间机电研究所, 北京 100076;
2. 北京邮电大学, 北京 100876)

摘要: 在大温差条件下, 由于温度剧烈变化导致红外光学系统成像质量变差。用于机载林火监测的大视场中波红外相机工作环境变化剧烈, 对杂散辐射要求较高。为保证光学系统在要求的大视场和大温差条件下具有稳定的性能和良好的成像质量, 通过基于消热差的设计方法和基于噪声等效温差的杂散辐射综合评价方法, 设计了一套制冷型中波红外光学系统。该光学系统由6片透镜和1片滤光片组成, 工作波段为3.7~4.8 μm , F数为2.5, 焦距为62.5 mm, 视场为 $14.36^\circ \times 10.87^\circ$, 探测器采用640×512阵列中波制冷型探测器, 通过采用硅、锗材料组合, 合理分配光焦度, 实现了消色差和消热差设计, 通过冷反射优化和冷光阑匹配设计, 较好地抑制了系统的杂散辐射噪声, 通过引入少量非球面优化, 在满足指标要求的情况下, 对高阶像差进行了校正。结果表明, 光学系统在-55~+70 $^\circ\text{C}$ 温度范围内, 成像质量稳定良好。

关键词: 中波红外; 制冷型探测器; 消热差; 冷反射

中图分类号: TN216 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2022-0205

Passive athermalization design of a cooled infrared optical system

LI Kang¹, ZHOU Feng^{2*}, WANG Bao-hua¹, GONG Hui¹, ZHENG Guo-xian¹
(1. *Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing 100076, China;*
2. *Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China*)

* Corresponding author, E-mail: zfsimon@163.com

Abstract: Under conditions with large temperature differences, the imaging quality of an infrared optical system will deteriorate due to severe temperature changes. Large field-of-view medium-wave infrared cameras for airborne forest fire monitoring work in drastically changing environments, so the optical system has high requirements for stray radiation. In order to ensure that the optical system performs stably and with good imaging quality in the large field-of-view and the required large temperature range, a cooled medium-wave infrared optical system is designed based on athermalization and the comprehensive evaluation method of stray radiation based on noise equivalent temperature difference. The optical system consists of 6 lenses and 1 filter with working wavelength of 3.7–4.8 μm , F-number 2.5, focal length 62.5 mm, and field of view $14.36^\circ \times 10.87^\circ$, respectively. The pixel resolution of the medium-wave cooled detector is 640×512. By using a combination of silicon and germanium materials and reasonably distributing the optical power, achromatic aberration and athermalization designs are realized. Through cold reflection optimization and cold aperture matching, stray radiation noise in the system is well-suppressed. By a bit of aspheric optimization, higher-or-

收稿日期: 2022-09-28; 修订日期: 2022-11-02

基金项目: 高分辨率对地观测系统重大专项(民用部分)

Supported by Major Projects for High Resolution Earth Observation System (Civilian Part)

der aberrations are corrected based on the requirements. The results show that the imaging quality of the optical system is stable and good in the temperature range of $-55\sim+70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Key words: medium wave infrared; cooled detector; athermalization; cold reflection

1 引言

森林是地表最重要的生态系统,基于飞艇机载的大视场中波红外成像系统是森林监测的重要工具。尤其是在森林火灾监测方面,可有效实现火灾早期预警和应急处置。此类机载相机一般视场要求较宽,环境温度波动较大,温差高达 $135\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,无热化设计难度较大。此外,为了达到较好的成像质量,探测器需冷却到非常低的温度,这样在机械结构和探测器之间便会产生很大的温差,由于透镜的增透膜不能完全消除反射光,在系统的每个表面之间会残留部分冷反射,且机械结构产生的热辐射也会到达探测器,故对于采用制冷型探测器的红外光学系统,需要综合分析和评价杂散辐射噪声对系统设计和优化的影响,并以此作为系统进一步优化的依据,因此,如何在综合指标要求下使红外光学系统具有稳定的性能和良好的成像质量具有十分重要的意义^[1]。

目前,消热差红外光学系统大多视场较小,体积较大,其技术实现方式也多采用折衍射混合设计,难以满足机载红外探测系统大温差、大视场、体积紧凑、杂散辐射噪声小、成像良好等设计要求^[2-4]。谢洪波^[5]等人设计了一个 F 数为 2、视场为 3.9° 的中波红外消热差系统,由于该系统采用一次成像方式,故在径向尺寸约束条件下实现的视场角较小。江伦^[6]等人设计的视场角为 14° 、F 数为 1.25 的双波段红外系统,由于采用非制冷型探测器,因此系统未做冷屏匹配。张良^[7]通过使用衍射面设计出了折/衍混合中波红外光学系统,但是衍射元件只在单一波长上具有高的衍射效率,且结构较复杂,成本较高。王威^[8]等人设计的静止轨道中波红外光学系统实现了覆盖地球圆盘 $18^{\circ}\times 18^{\circ}$ 的大视场,解决了多重像差问题,并且对 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的工作环境进行了温度适应性分析。

本文以制冷型中波红外成像系统为研究对象,通过基于消热差设计方法和基于噪声等效温差的杂散辐射综合评价方法,设计了一套大视场

大温差无热化中波红外光学系统。该光学系统利用普通红外材料,不含衍射面,光机结构材料为铝合金材料,光学构型为二次成像构型, F 数为 2.5, 对角线视场为 18° , 在 $-55^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 工作温度范围内消除了温度变化对像质的影响,成像性能良好。

2 设计思想

2.1 光学结构构型

对于工作中波谱段的红外光学系统,可选材料是限制系统消热差实现的首要难点。此外,中波红外系统波段范围决定了色差校正较难。而大视场消热差的设计直接决定了系统结构的复杂程度与成本。

红外光学系统可选择材料少,且材料透过率低,对红外透射系统应使用尽可能简单的结构,减少使用透镜的片数。硅和锗性能稳定,在中波谱段有很好的透光性能。因此,一般选择硅、锗等材料^[9-10]。从系统基本参数出发,考虑各种结构校正像差的可能性。折射式光学系统的同轴性好,装调较反射式简单,容易实现较大视场,透射式光学系统色差校正比较困难,故可在透镜凹面上适当设置非球面,通过优化非球面系数和高阶参数来满足指标要求。对于大视场光学系统,从杂散辐射抑制、减小系统径向尺寸和增加工作距离等角度考虑,采用二次成像的构型设计,同时将光瞳匹配至冷屏处,保证 100% 冷光阑效率。在光学系统二次成像结构中,物镜组承担系统主要光焦度,中继镜组主要用来校正物镜组的残余像差和实现光瞳衔接^[8]。光学系统初始结构如图 1 所示。

物镜组和中继镜组的高斯成像关系为

$$\begin{aligned} f_0 &= \frac{f^2(L - D_{CS})}{L \cdot D_{CS} + f^2 - 2f} \\ f_R &= -\frac{f \cdot D_{CS}(L - D_{CS})}{(D_{CS} - f)^2} \\ m &= \frac{L \cdot D_{CS} + f^2 - 2f \cdot D_{CS}}{f(L - D_{CS})} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: L 为系统总长; 放大倍率 m 通常在 $-1.2\sim 0.8$ 之间取值,本系统取 -1.14 ; 冷光阑到探测器像

面的距离 D_{CS} 为 28 mm; 系统焦距 f 为 -62.5 mm。将上述参数代入式 (1), 可计算出系统物镜组焦距 f_0 为 54.4 mm, 中继镜组焦距 f_R 为 39.95 mm, 物镜组和中继镜组之间间隔为 129 mm, 系统总长为 215 mm。

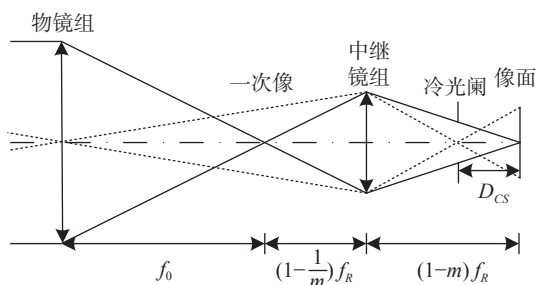


图 1 光学系统初始结构图

Fig. 1 Initial structure diagram of the optical system

2.2 消热差设计

光学系统消热差设计是指在光学系统优化设计时, 考虑将温度引起的热差和色差一并消除, 从而使该光学系统能够在大的温度变化范围内成像良好。为了消除温度的影响, 保持像面位置和像质的稳定, 从光学和机械结构两个方面考虑, 主要有机械被动消热差、机械主动消热差和光学被动消热差 3 种方法^[11-12], 其中: 光学被动消热差凭借其重量小、无功耗、可靠性高等优点, 成为光学系统消热差的首选方法。通过匹配光学材料热差系数和机械结构材料的热膨胀系数, 使各影响因素的热离焦量互相补偿, 从而使光学系统在工作环境温度范围内始终保持良好的成像质量。因此, 本文选择光学被动消热差方法进行光学设计。

空气中由 k 个薄透镜组成的系统的无热化应满足光焦度方程、消色差方程、消热差方程^[13]。

光焦度分配条件:

$$\phi = \frac{1}{f} = \sum_{i=1}^k h_i \phi_i \quad (2)$$

消色差条件:

$$\left(\frac{1}{h_1 \phi}\right)^2 \sum_{i=1}^k h_i^2 \frac{\phi_i}{v_i} = 0 \quad (3)$$

消热差条件:

$$\left(\frac{1}{h_1 \phi}\right)^2 \sum_{i=1}^k h_i^2 \theta_i \phi_i = -\alpha L \quad (4)$$

式中: h_i 为近轴边缘光线在第 i 个透镜上的高度;

v 和 θ 分别为阿贝数和热差系数; ϕ 为光焦度; α 为镜筒结构件的线性膨胀系数, L 为机械结构件的长度。

通过采用不同光学材料的优化组合搭配, 利用各种不同光学材料的热特性差异, 合理地分配透镜的光焦度, 消除温度变化对系统成像质量的不利影响, 使光学系统达到无热化效果。

2.3 杂散辐射噪声综合评价方法

红外成像系统对杂散辐射要求较高, 冷反射和光机杂散辐射是制冷型红外光学系统常见的杂光效应, 会影响光学系统的成像质量^[14-16]。因此, 光学系统设计时需要对冷反射和光机杂散辐射进行分析和抑制, 通过基于 YNI, I/Ibar 和噪声等效温差 NITD 的杂散辐射综合评价方法, 对各个表面的冷反射贡献进行分析和评价, 其中: Y 是边缘光线在该面的透射高, N 是折射率, I 是近轴边缘光线的入射角度。

YNI 能综合反映冷像的大小, 其公式如下^[17]:

$$YNI_j = y_j n_j i_j \quad (5)$$

式中, y_j 是近轴光线在第 j 面的入射高度; n_j 为第 j 面的折射率; i_j 为边缘入射光线在 j 面的入射角度。YNI 表示中心视场的冷像强度。在设计时要想办法提高各折射面的 YNI 值, 使反射的冷光线离焦。

I/Ibar 能综合反映冷反射随视场的变化情况, 其公式如下^[17]:

$$I/Ibar = i_j / i_{zj} \quad (6)$$

式中, i_{zj} 为第 j 个面的主光线入射角。对于 I/Ibar, 可以通过改变曲率来提高其值。其值如果大于 1, 说明冷反射噪声几乎不随视场的变化而变化。

NITD (Narcissus Induced Equivalent Temperature Difference) 能非常直观和量化地表示各光学元件和光机结构的冷反射和杂散辐射噪声的影响^[18], 其公式如下:

$$NITD_{ij} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \{N(\lambda, T_H) - N(\lambda, T_D)\} R_D(\lambda) t_j(\lambda)^2 R_j(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial N(\lambda, T_{MS})}{\partial T} A(\lambda) R_D(\lambda) t_0(\lambda) d\lambda} \sigma_{ij} \quad (7)$$

式中, $N(\lambda, T_H)$ 为光机结构的光谱辐照度, $N(\lambda, T_D)$

为探测器的光谱辐照度, $R_D(\lambda)$ 为探测器的光谱响应, $R_f(\lambda)$ 为表面的光谱反射率, $A(\lambda)$ 为大气透过率, σ_{ij} 为由表面 j 到达探测器表面的反射的立体角与探测器像元 i 对应的冷屏立体角的比值; $t_0(\lambda)$ 为第一透镜表面到探测器的平均透射率, $t_j(\lambda)$ 为探测器到表面 j 的平均透射率。

设计时, 首先尽量保证每个面的 YNI 与 I/\bar{I} 都大于 1, 如果无法做到, 则应保证其中一个大于 1, 然后通过 NITD 直观地评价各透镜表面的杂散辐射贡献, 进行多轮迭代优化设计, 使得 NITD 满足系统指标要求。

3 设计结果及评价

3.1 设计结果

利用上述大温差被动式消热差设计方法, 设计了一个中波红外光学系统。采用制冷型焦平面探测器, 设计指标如表 1 所示。

表 1 光学设计参数

Tab. 1 Optical design parameters

工作谱段	3.7 μm –4.8 μm
视场	14.36°×10.87°
焦距	62.5 mm
F^*	2.5
探测器	640×512(25 μm)

对上述设计参数进行光学系统设计, 通过合理分配光焦度, 最终设计结构如图 2 所示, 图中从前往后依次为 Si、Ge、Si、Si、Ge、Si。由于目前

透镜加工一般采用单点金刚石车床切削冷加工, 确定最佳拟合球面和最佳去除球面, 因此为保证工程应用的可行性和加工检测精度, 优先将透镜凹面设置为非球面, 其次, 通过将孔径光阑后相邻透镜凹面设置为非球面, 用于矫正大视场引入的高级像差, 将远离孔径光阑的表面设置为高次非球面, 用于矫正场曲和畸变, 通过观察物镜组和中继镜组在系统中承担的像差的压力, 合理确定非球面的具体位置, 此外圆锥系数 conic 值一般不宜过大, 在设计中将其控制在 ± 3 范围内, 最终选择在第一个镜片的后表面、第二个镜片的后表面、第四片镜片的后表面均使用非球面, 二次曲面系数分别为 2.378、1.073、-1.162, 其余均为球面。

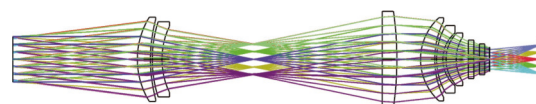
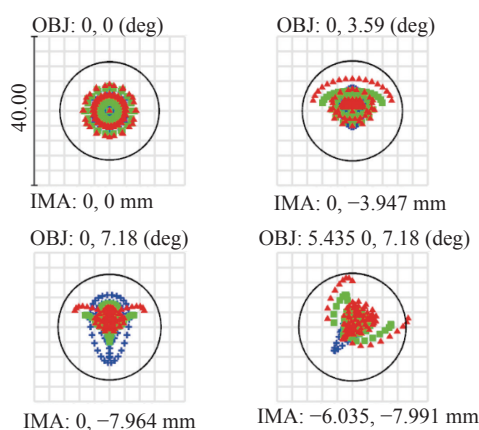


图 2 系统外形结构示意图

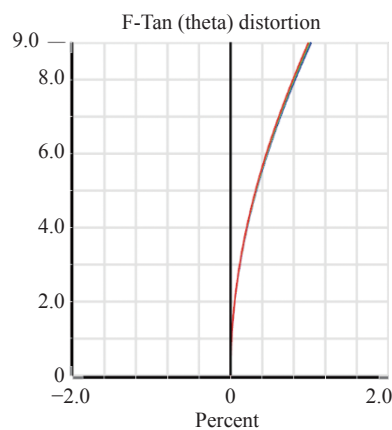
Fig. 2 System outline structure diagram

3.2 系统性能分析

图 3(a)~3(d) 分别为常温 20 °C 下此红外系统的点列图、畸变曲线和 MTF 曲线, 能量集中度曲线, 用来评价系统的成像性能。图 3(a) 中的圆表示此光学系统艾里斑大小, 各视场点列图 RMS 半径均在 4.5 μm 左右, 远小于探测器 25 μm 的像元尺寸。由图 3(b) 可见, 畸变绝对值小于 1%。由图 3(c) 可知, 系统在奈奎斯特频率 20 lp/mm 处的平均 MTF 值约为 0.686。图 3(d) 是系统的能量集中度, 在 25 μm 处约为 80%, 接近系统衍射极限。



(a) 点列图
(a) Spot diagram



(b) 畸变
(b) Distortion

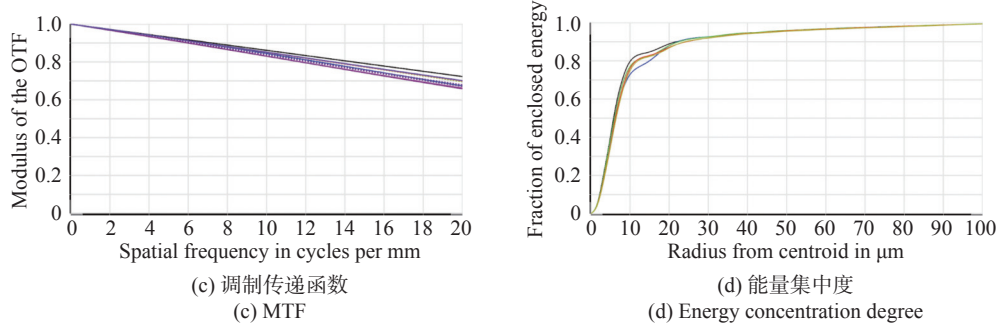


图 3 系统成像性能

Fig. 3 System's imaging performance

3.3 环境适应性分析

根据指标设计要求, 系统工作温度范围为 $-55\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$, 镜框、镜筒结构均采用 6061 铝合金材料, 线胀系数为 $23.6\times 10^{-6}/\text{K}$, 借助 Zemax 软件模拟光学系统的环境温度变化, 通过仿真分析得到 $-55\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内全波段全视场平均 MTF 及焦距变化量, 如表 2 所示。

表 2 光学系统消热差能力分析

Tab. 2 Analysis of athermal aberration capability of the optical system

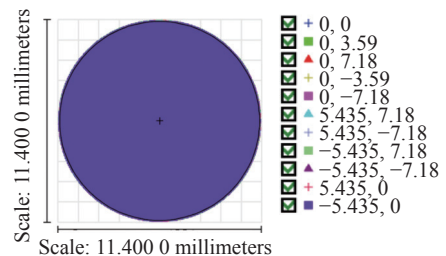
温度($^{\circ}\text{C}$)	MTF	离焦量(mm)
-55	0.684	-0.0096
-40	0.685	-0.0099
-20	0.686	-0.0083
0	0.684	-0.0055
20	0.681	-0.0013
40	0.676	0.0025
70	0.666	0.0098

可以看出, 由设计装调状态(常温常压)到工作环境($-55\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$), 温度导致的焦面最大离焦量为 0.0098 mm , 系统半焦深为 $\pm 0.053\text{ mm}$, 在 20 lp/mm 处的平均 MTF 值最大变化量为 0.015 , 表明设计的镜头具有良好的消热差能力。

3.4 冷屏匹配效率和冷反射抑制分析

光学系统的实际出瞳光斑如图 4 所示, 根据冷光阑匹配要求, 当出瞳距为 28 mm , 要求系统出瞳大小为 $\Phi 11.2\text{ mm}$ 。由于系统在入口位置有孔径光阑限制, 在设计过程中, 将入瞳设置为光阑, 通过约束出瞳位置和出瞳孔径尺寸, 使得冷屏

设计尽量完全匹配, 最终系统的冷匹配效率为 98.93% 。



Aperture diameter: 11.200 0 % rays through=98.93%

图 4 光学系统实际出瞳光斑图

Fig. 4 The actual exit pupil spot diagram of the optical system

针对已完成的无热化设计结构, 在 Zemax 软件中采用宏语言对冷反射进行数值分析。将设计好的结构进行倒置, 倒置后各表面编号如图 5 所示。

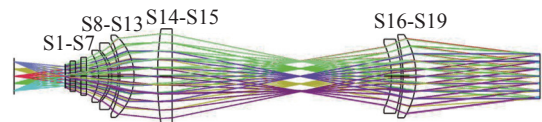


图 5 光学系统倒置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the inverted optical system

综合考虑材料镀膜之后的反射率, 在 Zemax 软件中设置各个面的反射率为 1% , 在程序中设置背景温度为 300 K , 探测器温度为 77 K , 镜筒的温度为 300 K , 计算出各个表面的 YNI、I/Ibar 和等效温差(NITD)的值。表 3 是在软件中得到的无热化系统各个表面的 YNI 和 I/Ibar 值, 各个表面的 NITD 贡献量如图 6 所示。

通过对比表 3 和图 6 可知,计算得出的 NITD 最大为 358 mK。随着视场的增大, NITD 较大的值多集中在 S2~S7 面,由于光学系统是翻转的, S2~S7 面均为滤光片、窗口等平板玻璃,其余由各透镜表面贡献的 NITD 均在 180 mK 以下。可见各个面的 NITD 都较小,说明杂散辐射得到了很好的抑制。

表 3 各表面的 YNI 和 I/Ibar 值

Tab. 3 YNI and I/Ibar values for each surface

表面	YNI	I/Ibar
S2	1.0565	0.7164
S3	1.0593	0.7218
S4	1.1498	0.7164
S5	1.1780	0.7218
S6	1.2912	0.7164
S7	1.3193	0.7218
S8	-1.3374	1.6435
S9	-5.5355	4.2410
S10	-5.7369	3.9166
S11	2.3025	0.9078
S12	3.0894	0.9951
S13	-6.4227	2.8058
S14	1.0906	0.4333
S15	-2.6650	8.6885
S16	-0.1074	0.2176
S17	1.9703	21.3971
S18	2.2516	8.7762
S19	-3.4659	0.9250

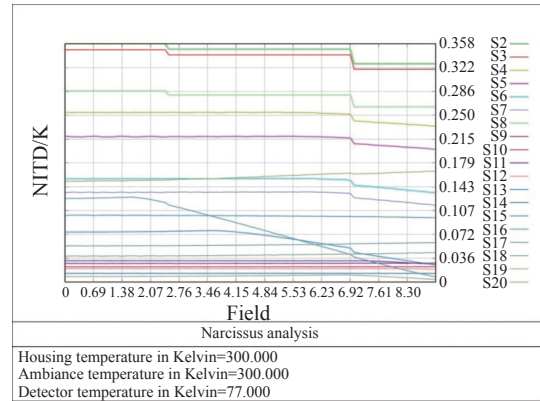


图 6 各表面 NITD 贡献量

Fig. 6 NITD contribution of each surface

3.5 系统测试

本文所设计的系统依托某多光谱相机,经过加工装调已完成镜头产品研制,通过干涉仪测试镜头的 MTF,各视场 MTF 结果如表 4 所示,其中 (0,0) 视场的 MTF 测试数据和测试现场如图 7 所示,装调后全视场畸变测试约为+1.2%,系统无冷反射聚焦现象,通过对外景进行成像,图像如图 8 所示,此外在-55 °C~+70 °C 温度条件下,该镜头工作正常,成像质量良好。

表 4 MTF 测试值 (测试波长: $\lambda=3.39 \mu\text{m}$)

Tab. 4 MTF test value (test wavelength $\lambda=3.39 \mu\text{m}$)

视场(°)	MTF		
	子午	弧矢	平均
(0, 0)	0.68	0.68	0.68
(0, 7.18)	0.5	0.48	0.49
(0, -7.18)	0.47	0.45	0.46
(5.435, 0)	0.60	0.61	0.6
(-5.435, 0)	0.58	0.61	0.59

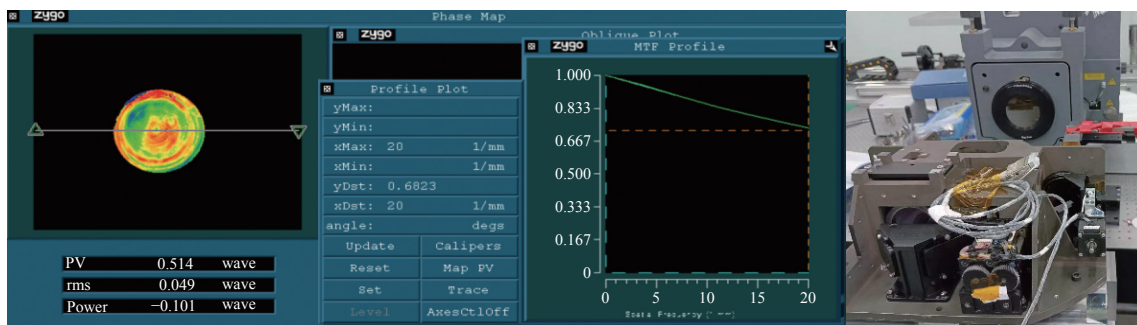


图 7 (0,0)视场 MTF 测试结果和测试现场

Fig. 7 (0,0) Field of view MTF test results and the test site



图8 外景成像图

Fig. 8 location image

4 结 论

本文以光学被动式消热差设计原则为基础, 选择合适的光学材料和机械材料, 确定了初始结构, 通过合理分配光焦度, 实现了光学系统的被动式无热化设计。通过基于噪声等效温差的杂散辐射综合评价方法, 综合分析系统的 YNI、I/Ibar 和 NITD, 针对性地进行迭代优化设计, 完成对系统杂散辐射的抑制, 且满足冷光阑效率指标要求, 实现了在 $-55^{\circ}\text{C}\sim 70^{\circ}\text{C}$ 范围内良好的成像质量。

参考文献:

- [1] JAMIESON T H. Thermal effects in optical systems[J]. *Optical Engineering*, 1981, 20(2): 202156.
- [2] 刘琳. 中波红外大相对孔径非制冷热像仪光学系统的研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2010.
LIU L. Study on fast speed optical system of uncooled MWIR imager[D]. Suzhou: Soochow University, 2010. (in Chinese)
- [3] 郭永洪, 沈忙作, 陆祖康. 折射/衍射红外光学系统的消热差设计[J]. *光学学报*, 2000, 20(10): 1392-1395.
GUO Y H, SHEN M Z, LU Z K. Athermal design for infrared diffractive/refractive optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(10): 1392-1395. (in Chinese)
- [4] 张羽, 杨长城, 杨坤涛. 8~14 μm 波段折衍混合红外光学系统的热补偿设计[J]. *光学学报*, 2005, 25(11): 1535-1538.
ZHANG Y, YANG CH CH, YANG K T. Design on athermal infrared diffractive/refractive hybrid optical system in 8~14 μm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(11): 1535-1538. (in Chinese)
- [5] 谢洪波, 孟庆斌, 杨磊, 等. 中波红外光学系统无热化设计和冷反射抑制[J]. *应用光学*, 2017, 38(3): 352-357.
XIE H B, MENG Q B, YANG L, et al.. Athermalization and suppression of narcissus for medium-wave infrared optical system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, 38(3): 352-357. (in Chinese)
- [6] 江伦, 胡源, 董科研, 等. 红外双波段光学系统被动式消热差设计[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(11): 3353-3357.
JIANG L, HU Y, DONG K Y, et al.. Passive athermal design of dual-band infrared optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3353-3357. (in Chinese)
- [7] 张良. 无热化双视场红外光学系统的设计[J]. *光学技术*, 2009, 35(4): 566-568,574.
ZHANG L. One kind of athermalization and dual field of view optical system design[J]. *Optical Technique*, 2009, 35(4): 566-568,574. (in Chinese)
- [8] 王威, 陈凡胜, 崔坤. 静止轨道大视场中波红外光学系统设计[J]. *红外技术*, 2015, 37(2): 114-118.
WANG W, CHEN F SH, CUI K. The design of MWIR staring wide FOV optical system based on GEO orbit[J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(2): 114-118. (in Chinese)
- [9] 张鑫, 贾宏光. 大相对孔径红外消热差物镜设计[J]. *中国光学*, 2011, 4(4): 374-379.
ZHANG X, JIA H G. Optical design of infrared athermalized objective with large relative aperture[J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(4): 374-379. (in Chinese)
- [10] 虞林瑶, 魏群, 张天翼, 等. 中波红外长焦距折反光学系统设计[J]. *中国光学*, 2015, 8(2): 234-240.
YU L Y, WEI Q, ZHANG T Y, et al.. Design of long focal infrared catadioptric optical system for multi-guided system[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(2): 234-240. (in Chinese)
- [11] 付跃刚, 黄蕴涵, 刘智颖. 宽波段红外消热差光学系统设计[J]. *应用光学*, 2014, 35(3): 510-514.
FU Y G, HUANG Y H, LIU ZH Y. Design of multispectral infrared athermal optical system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(3): 510-514. (in Chinese)
- [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.
SHAN Q SH, XIE M L, LIU ZH H, et al.. Design of cooled long-wavelength infrared imaging optical system[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(1): 72-78. (in Chinese)

- [13] 陈吕吉, 李萍, 冯生荣, 等. 中波红外消热差双视场光学系统设计[J]. *红外技术*, 2011, 33(1): 1-3,8.
CHEN L J, LI P, FENG SH R, *et al.*. Athermal design for MW infrared dual field-of-view optical system[J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(1): 1-3,8. (in Chinese)
- [14] 栾亚东. 红外扫描成像系统中冷反射的光学抑制[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(S2): 26-30.
LUAN Y D. Optical method of restraining narcissus in scanning infrared system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S2): 26-30. (in Chinese)
- [15] 石栋梁, 肖琴, 练敏隆. “高分四号”卫星相机杂散光分析与抑制技术研究[J]. *航天返回与遥感*, 2016, 37(5): 49-57.
SHI D L, XIAO Q, LIAN M L. Research on stray light analysis and restrain of GF-4 satellite camera[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2016, 37(5): 49-57. (in Chinese)
- [16] ASLAN S H, YERLI S K. Thin lens narcissus model in infrared lens design with cooled detectors[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(3): 728-736.
- [17] 杨正, 屈恩世, 曹剑中, 等. 对凝视红外热成像冷反射现象的研究[J]. *激光与红外*, 2008, 38(1): 35-38.
YANG ZH, QU E SH, CAO J ZH, *et al.*. The narcissus study in the optical system for the infrared staring arrays[J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(1): 35-38. (in Chinese)
- [18] 刘志祥, 马冬梅, 胡明鹏, 等. 凝视型红外成像系统中冷像的仿真分析[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(4): 702-705.
LIU ZH X, MA D M, HU M P, *et al.*. Simulation analysis of the narcissus in the staring infrared imaging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(4): 702-705. (in Chinese)

作者简介:



李 康(1992—), 男, 山西晋城人, 工程师, 中国空间技术研究院博士研究生, 2018年于中国空间技术研究院获得硕士学位, 主要从事光学遥感总体设计方面的研究。E-mail: 349364250@qq.com



周 峰(1974—), 男, 湖南隆回人, 研究员, 博士生导师, 2006年于中国空间技术研究院获得博士学位, 主要从事光学遥感总体设计方面的研究。E-mail: zfsimon@163.com