

一种高分辨率短波红外宽温度范围被动 消热差光学系统

杨小儒 张 良 王希军 刘 玉

(中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471009)

摘要 介绍了一种大视场短波红外光学系统消热差设计。系统工作波段为 $0.9 \sim 1.7 \mu\text{m}$, 分辨率为 $640 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$, 光学系统总长 55 mm 。设计结果表明, 在空间频率为 20 lp/mm 处, 系统工作温度在 $-40 \text{ }^\circ\text{C} \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$ 环境下, 各个温度下的系统调制传递函数(MTF)值均大于 0.6 。系统具有高像质、工作温度范围宽、结构紧凑、重量轻等优点。

关键词 光学设计; 高分辨率; 短波红外; 被动消热差; 衍射光学

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/LOP49.012204

A High Resolution Shortwave Infrared Passive Athermalization System with Wide Temperature Range

Yang Xiaoru Zhang Liang Wang Xijun Liu Yu

(Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment of Aviation Industry Corporation of China, Luoyang, Henan 471009, China)

Abstract A design of athermalized shortwave infrared optical system with wide field of view is introduced. The working wavelength is $0.9 \sim 1.7 \mu\text{m}$, the resolution is $640 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$, and total optical length is 55 mm . The results show that the modulation transfer function (MTF) is above 0.6 at the spatial frequency of 20 lp/mm in the temperature range of $-40 \text{ }^\circ\text{C} \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$. The system has the advantages of high image quality, wide temperature range, compact structure and low mass.

Key words optical design; high resolution; shortwave infrared; passive athermalization; diffractive optics

OCIS codes 220.4830; 110.0110; 080.0080

1 引 言

短波红外辐射是指波长为 $0.76 \sim 3.00 \mu\text{m}$ 的红外辐射, 其主要来源有自然环境反射、高温物体主动辐射及人造短波红外光源。短波红外成像可以提供可见光、微光夜视、中波、长波红外成像所不能提供的信息, 包含特定的光谱辐射信息, 可以获得更多的图像细节。在透雾能力方面, 与可见光相比, 近红外光传输受雾霭、空气中的尘埃衰减损耗小, 透雾能力更强。实现短波红外成像, 填补微光夜视和中波红外成像之间的光谱空缺, 实现在三个大气红外透射窗口的“无缝隙探测”, 对在红外波段全面获取目标的信息具有重要意义。短波红外成像的应用领域非常广泛, 不仅可以用于夜视、侦察与监视、遥感、红外成像制导及光电对抗等军事领域, 还可用于光谱学、无损检测、工业多光谱成像分析、资源遥感、红外天文学、交通、风切变探测、医疗、公安等领域是一项很实用的军民两用技术, 随着红外热像仪在新领域的应用, 未来这种装置将渗透到国民经济生活的各个领域, 民用领域的红外热像仪市场极有可能出现爆发性增长, 未来民用潜在需求市场高达上千亿美元。

在短波红外成像领域, 我国与国外相比存在较大差距, 目前欧美等发达国家的短波热像仪研发单位主要有美国 Goodrich 公司和 Sinfrared 公司、德国 VDS 公司、比利时 XenIcs 公司等。欧美国家已经研制成功了各种短波红外热像仪, 如 PbSe 短波红外探测器已用于“响尾蛇”空空导弹, PbS 短波红外焦平面探测器已成功用于弹道导弹早期预警卫星, 还有各种规格的 InGaAs 短波红外探测器^[1]。

在近几年的研究中, 采用折衍射混合消热差已经取得了很好的成果^[2~6], 但国内短波红外光学系统设计

收稿日期: 2011-08-20; **收到修改稿日期:** 2011-09-16; **网络出版日期:** 2011-12-07

作者简介: 杨小儒(1983-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事红外系统工程及光学系统设计等方面的研究。

E-mail: xiaoru_yang@126.com

比较少,被动消热差短波红外光学系统尚未见报道。本文设计了一种被动消热差短波红外光学系统,可以保证短波成像系统在宽的使用环境温度下保持高质量成像。该系统能满足宽环境温度情况下的使用要求,具有广阔的市场前景。

2 光学被动消热差原理

利用红外光学材料热特性之间的差异,合理选择透镜材料、分配光焦度,利用衍射光学元件具有负色散、负的衍射热常量、正光焦度的特性,将透镜材料的热常量和镜筒材料的热膨胀系数很好地配合起来,使得温度变化时透镜热常量导致的离焦正好和镜筒材料的热膨胀系数导致的像面移动相一致,从而达到很好的消热差效果。整个光学系统在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间能保持高的成像质量。

光学系统满足以下要求^[7,8]。光焦度分配满足总光焦度,即

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

式中 φ_i 为透镜的光焦度, h_i 为近轴光线在透镜上的入射高度, φ 为系统的总光焦度。

总色差系数要求为

$$C_{\text{total}} = \left(\frac{1}{h_1 \varphi}\right)^2 \sum_{i=1}^k (h_i^2 C_i \varphi_i) = 0, \quad (2)$$

式中 C_i 为第 i 个透镜的色差系数。

对于光学被动补偿式消热差光学系统,需要使光学元件产生的离焦与机械结构产生的离焦相互抵消,从而使整个光学系统不产生温度离焦,这样可以得到

$$\chi_{\text{total}} = \left(\frac{1}{h_1 \varphi}\right)^2 \sum_{i=1}^k (h_i^2 T_i \varphi_i) = \alpha_L L, \quad (3)$$

式中 T_i 为第 i 个透镜的热差系数, α_L 为镜筒材料的线膨胀系数, L 为镜筒结构的总长度。通过求解方程组得到系统的光焦度分配情况,再利用 Code V 软件进一步优化设计。

对于像素大小为 $25\text{ }\mu\text{m}$ 的制冷型凝视焦平面探测器光学系统,要求在 20 lp/mm 空间频率处光学传递函数接近衍射极限,弥散斑小于 $25\text{ }\mu\text{m}$ 。按逐步逼近的原则,在控制色差、热差约束的条件下,释放各个透镜的优化变量,同时引入非球面、衍射面,反复分析与优化中间结构,直接获得令人满意、满足设计指标和性能要求的光学系统。

3 光学系统设计及结果

采用 InGaAs/InP 材料,分辨率 $640\text{ pixel}\times 512\text{ pixel}$,像素大小 $25\text{ }\mu\text{m}$,波长 $0.9\sim 1.7\text{ }\mu\text{m}$ 的短波红外非制冷探测器,整个光学系统由 6 块透镜组成,从物方到像方依次为孔径光阑、透镜 1、透镜 2、透镜 3、透镜 4、透镜 5、透镜 6、探测器焦平面。光路布局如图 1 所示。

透镜 1 为正光焦度透镜,弯向物方;透镜 2 为正光焦度透镜,双凸透镜;透镜 3 为负光焦度透镜,弯向像方;透镜 4 为正光焦度,弯向像方;透镜 5 为正光焦度,弯向像方;透镜 6 为负光焦度,弯向物方。由此形成光焦度+、+、-、+、+、-构型。透镜 1 采用硒化锌材料,透镜 2 采用氟化钡材料,透镜 3 采用硒化锌材料,透镜 4 采用硒化锌材料,透镜 5 采用氟化钡材料,透镜 6 采用氟化钡材料,镜筒材料为铝材料。孔径光阑设置在光学系统的最前端,透镜之间的间隔为空气。透镜 1 的前表面采用非球面,后表面采用非球面叠加衍射面;透镜 3 的后表面采用非球面;透镜 4 的后表面采用非球面;其他透镜表面都为球面。整个光学系统长度为 55 mm ,通光孔径为 $\phi 20\text{ mm}$ 。

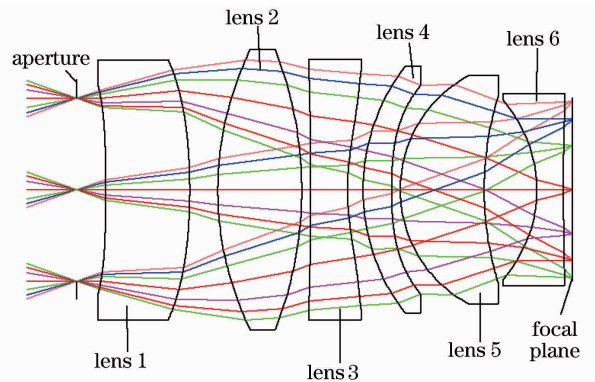


图 1 宽温度范围消热差短波红外光学系统图

Fig. 1 Shortwave infrared athermalization optical system diagram with wide temperature range

4 像质评价

4.1 传递函数

各视场的调制传递函数(MTF)评价如图 2 所示,各个视场在空间频率为 20 lp/mm 时,MTF 的数值在 0.7 以上。

4.2 能量分布

各个视场的衍射能量分布如图 3 所示,各视场 85% 以上的衍射能量集中在 1 pixel(25 μm) 的范围内。

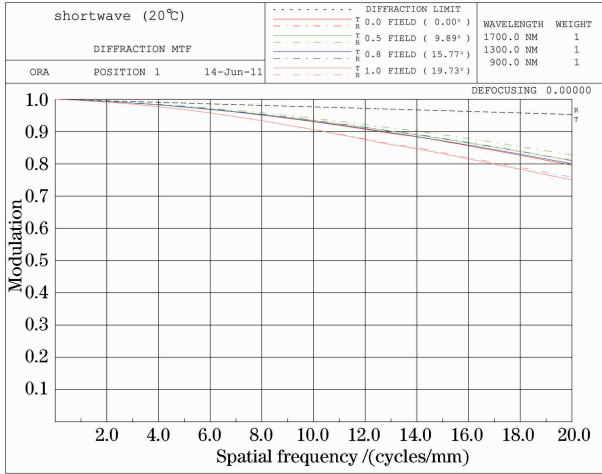


图 2 调制传递函数图

Fig. 2 Modulation transfer function (MTF) chart

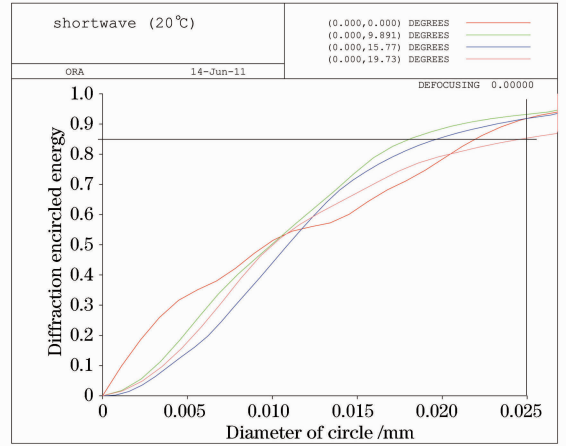


图 3 衍射能量分布

Fig. 3 Diffraction energy distribution

4.3 几何弥散斑

各视场的几何弥散斑如图 4 所示,尺寸均小于 1 pixel。

4.4 畸变

各视场的畸变如图 5 所示,整个光学系统的全视场畸变约为 3%。

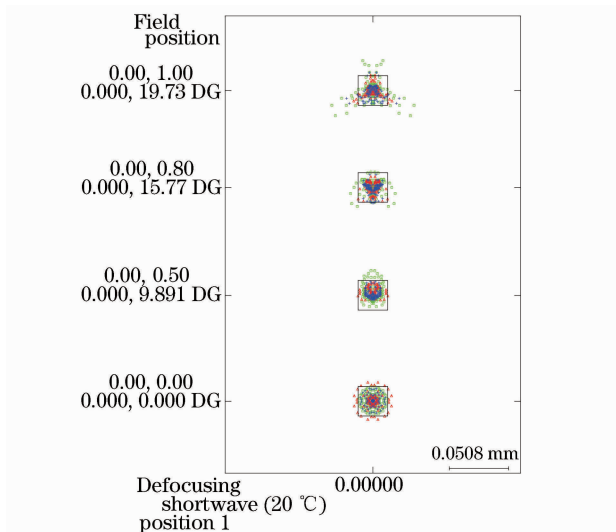


图 4 光学系统的弥散斑图

Fig. 4 The dispersion patterns of optical system

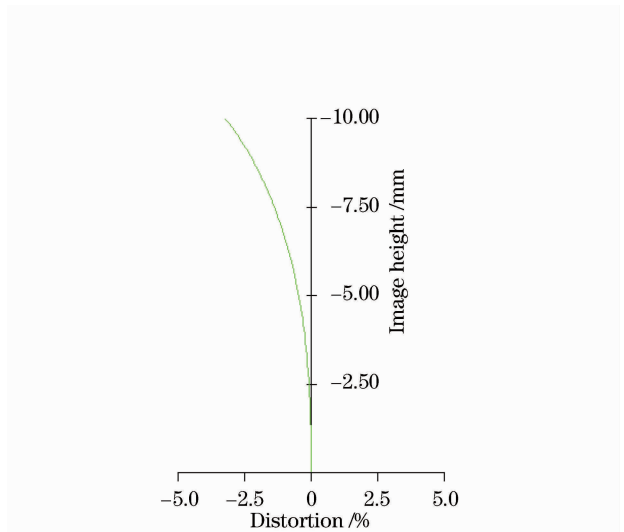


图 5 光学系统的畸变图

Fig. 5 Distortion of optical system

4.5 温度分析

各视场的温度影响情况以及温度补偿分析如图 6、图 7 所示,在空间频率为 20 lp/mm 处,系统工作温度在 -40 °C 和 60 °C 环境下,各个温度下的系统 MTF 值均大于 0.6,具有很好的像质。

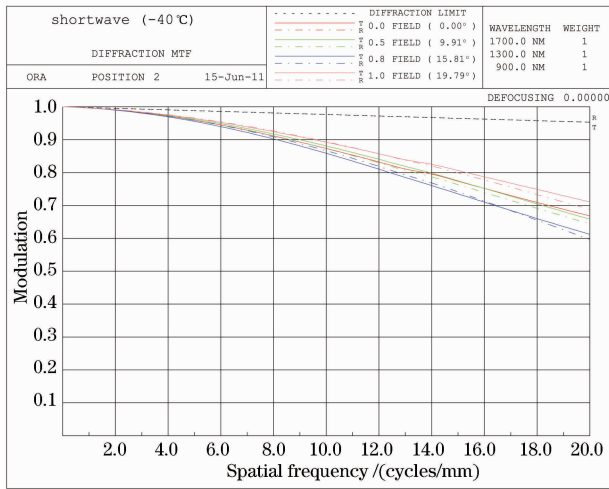


图6 -40 °C时的 MTF 图
Fig. 6 MTF chart at -40 °C

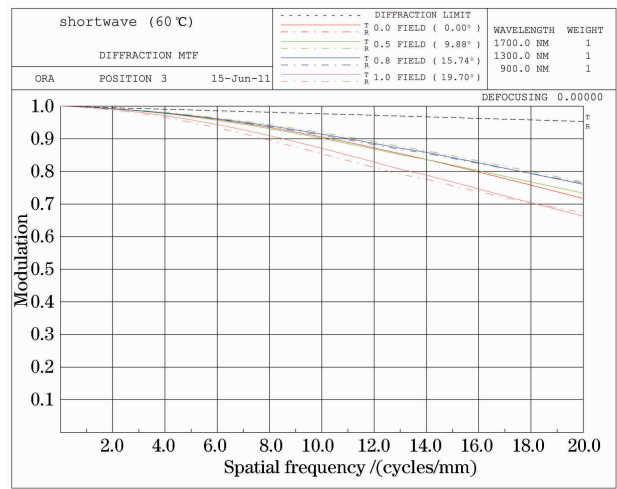


图7 60 °C时的 MTF 图
Fig. 7 MTF chart at 60 °C

5 结 论

军用或民用红外光学系统的成像质量受温度的影响很大。采用被动消热差无热化设计,使短波红外光学系统能承受大范围温度变化(典型值为-40 °C~60 °C),无需调焦,能保持短波红外光学系统的高质量成像,简化系统构型,提高可靠性,拓宽短波红外成像应用领域。

参 考 文 献

- Cai Yi, Hu Xu. Shortwave infrared imaging technology and its defence application[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(6): 643~647
蔡毅,胡旭. 短波红外成像技术及其军事应用[J]. 红外与激光工程, 2006, **35**(6): 643~647
- Bai Jian, Sun Ting, Shen Yibing *et al.*. Athermalization analysis of infrared hybrid refractive-diffractive optical systems[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(7): 997~1002
白剑,孙婷,沈亦兵等. 红外折射-衍射混合光学系统的热差分析[J]. 光学学报, 1999, **19**(7): 997~1002
- Guo Yonghong, Shen Mangzuo, Lu Zukang. Athermal design for infrared diffractive refractive optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(10): 1392~1395
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
- Jiao Mingyin, Feng Zhuoxiang. Athermalized infrared hybrid optical system by employing diffractive element[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(11): 1364~1367
焦明印,冯卓祥. 采用衍射元件实现消热差的混合红外光学系统[J]. 光学学报, 2001, **21**(11): 1364~1367
- Song Yanfeng, Shao Xiaopeng, Xu Jun. Design of a hybrid infrared apochromatic optical system beyond normal temperature [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(10): 6298~6303
宋岩峰,邵晓鹏,徐军. 实现复消色差的超常温混合红外光学系统[J]. 物理学报, 2008, **57**(10): 6298~6303
- Wang Xinxue, Jiao Mingyin. Athermalization design for infrared optical systems[J]. *J. Applied Optics*, 2009, **30**(1): 129~134
王新学,焦明印. 红外光学系统无热化设计方法的研究[J]. 应用光学, 2009, **30**(1): 129~134
- Y. Tamagawa, T. Tajime. Expansion of an athermal chart into a multilens system with thick lenses spaced apart [J]. *Opt. Engng.*, 1996, **35**(10): 3001~3006
- Chen Xiao, Yang Jianfeng, Ma Xiaolong *et al.*. Athermalization design of wide temperature range for hybrid refractive-diffractive objective in 8~12 μm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2089~2092
陈潇,杨建峰,马小龙等. 8~12 μm 折-衍混合物镜超宽温度消热差设计[J]. 光学学报, 2010, **30**(7): 2089~2092