

双波段红外光学系统无热化设计

王鹏程 曹 阳

(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 介绍了双波段红外光学系统无热化设计的方法,设计了一个双波段无热化红外光学系统。该系统采用二次成像系统构成,利用 Ge、ZnS 和 ZnSe 三种材料及引入两个非球面,实现了双波段红外光学系统光学被动无热化设计。系统工作波段为 $3.7\sim 4.8\ \mu\text{m}$ 和 $7.7\sim 10.3\ \mu\text{m}$,结构紧凑,满足 100%冷光阑效率要求。像质评定结果表明,光学系统双波段在全温度范围内($-60\ ^\circ\text{C}\sim 70\ ^\circ\text{C}$)像质良好,证明了该方法的正确性与可行性。

关键词 光学设计;红外光学系统;光学被动无热化;双波段

中图分类号 TN216 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.062202

Athermalization Design of Dual-Wavelength Infrared Optical System

Wang Pengcheng Cao Yang

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

Abstract The athermalization method for dual-wavelength infrared optical system is introduced. An athermalized dual-wavelength infrared dual-view optical system is designed. The optical system adopts the passive optical athermalization technology and a re-imaging system. A passive optical athermalization design of dual-wavelength infrared optical system is presented by using three common materials Ge, ZnS and ZnSe and two aspherical surfaces. The results show that the optical system working in the $3.7\sim 4.8\ \mu\text{m}$ and $7.7\sim 10.3\ \mu\text{m}$ wavelength bands has a compact structure and can meet the requirement of 100% cold shield efficiency. The imaging performance of dual-wavelength infrared optical system is very well in the temperature range from $-60\ ^\circ\text{C}$ to $70\ ^\circ\text{C}$. The correctness and feasibility of the design method are proved.

Key words optical design; infrared optical system; passive optical athermalization; dual-wavelength

OCIS codes 220.4830; 110.3080; 280.6780

1 引言

红外双波段成像系统利用探测不同波长的红外辐射提高装备的侦察能力^[1,2]。由于景物自身辐射特性及大气传输的影响,其中在中波红外和长波红外有着不同的辐射特性,比如在靠近热源或背景杂散辐射较强的情况下长波红外具有较强的侦察能力,而在湿热的环境下中波红外优势更为明显^[1~4]。

红外光学系统一般都工作在复杂、恶劣的环境条件下,其中温度的剧烈变化是对系统的一项严峻考验。温度的变化将导致光学系统各元件,包括各透镜及机械结构的性质改变,诸如透镜的曲率半径、厚度、折射率、镜筒长度等。如果没有经过任何处理,这些因素往往会严重影响光学系统性能,从而降低整个系统的性能^[5~7]。目前无热化技术主要有机械被动式、电子主动式和光学被动式三种,其中光学被动式具有结构简单、尺寸小、无需供电、可靠性好等特点^[8]。

传统光学被动无热化设计局限于密接型透镜的设计,不适用于双波段红外光学系统。本文介绍一种适用于双波段红外光学系统的光学被动无热化设计方法。光学系统满足轻量化、小型化的设计要求,像质评定

收稿日期: 2013-01-05; 收到修改稿日期: 2013-03-08; 网络出版日期: 2013-05-22

作者简介: 王鹏程(1985—),男,工程师,主要从事光电系统总体设计方面的研究。E-mail: ubuntu613@126.com

结果表明,光学系统在 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 全温度范围内,双波段成像质量良好。

2 无热化设计方法

光学被动无热化技术是指利用光学材料间不同的热差与色差特性,通过合理分配光焦度与元件间隔,使得系统在要求的温度范围内,其热离焦近似为零。

空气中由 k 个薄透镜组成的系统无热化应满足的光焦度方程、消色差方程、消热差方程如下^[9]:

$$\begin{cases} \phi = \frac{1}{f} = \frac{1}{h_1} \sum_{i=1}^k h_i \phi_i \\ \omega = \frac{1}{h_1^2 \phi} \sum_{i=1}^k h_i^2 \omega_i \phi_i = 0, \\ \theta = \frac{1}{h_1^2 \phi} \sum_{i=1}^k h_i^2 \theta_i \phi_i = -\alpha \end{cases} \quad (1)$$

式中 h_i 为近轴边缘光线在第 i 个透镜上的高度, α 为镜筒结构件的线性膨胀系数, ω 和 θ 分别为色差系数和热差系数。

对于双波段红外光学系统,系统存在双重结构,建立光焦度矩阵 ϕ_i 和结构矩阵 D_i 。温度对零件光焦度的影响为

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \phi \left[\frac{|\frac{\partial n}{\partial t}|}{(n-1) - \alpha} \right] = \phi \theta, \quad (2)$$

式中 $\frac{\partial \phi}{\partial t}$ 为折射率随温度的变化, n 为折射率, α 为热膨胀系数, ϕ 为零件光焦度, θ 为热差系数。

当温度变化 Δt 时,零件光焦度变为

$$\phi_{i\Delta t} = \phi_i (1 + \Delta t \theta), \quad (3)$$

结构矩阵变为

$$D_{i\Delta t} = D_i (1 + \Delta t \alpha). \quad (4)$$

由 ϕ_i 、 D_i ,通过近轴光线追迹,可以计算出其后截距 B_i ;同样由 $\phi_{i\Delta t}$ 、 $D_{i\Delta t}$,可以计算出温度变化 Δt 后的后截距 $B_{i\Delta t}$ 。于是可以计算出热离焦量为

$$\sigma_i = B_{i\Delta t} - B_i. \quad (5)$$

可将 $\sum_i^N \sigma_i^2$ 作为系统的热离焦量衡量值,此时该值一般比较大,不满足无热化的设计要求。需要采取锆材料来进行热补偿设计。

一般对系统物镜组和目镜组进行光焦度分裂补偿,即分裂成由两种材料组成的双透镜。本设计中采用Ge、ZnS、ZnSe三种材料,则对应第 i 重结构,可以得到一个二维光焦度矩阵 ϕ_i ,重复上述步骤即可得到一个二维的热离焦量矩阵 σ_i 。

求得满足 $\min(\sum_i^N \sigma_i^2) < 10^{-5} \text{ mm}^2$ 时对应的光焦度矩阵 ϕ_i 和结构矩阵 D_i ,即可得到系统无热化设计对应的初始结构参数。上述过程可通过Matlab编程很容易的实现。

3 设计实例

3.1 光学系统设计指标

下面给出一个设计实例,系统设计参数如表1所示。系统采用 $320 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 中长波双色红外探测器,像素大小 $30 \text{ }\mu\text{m}$ 。

3.2 初始结构参数计算

系统采用二次成像系统构型,零件材料为锆材料,结构材料为铝材料,初始结构如图1所示。

表 1 光学系统设计参数

Table 1 Design parameters of the optical system

Parameter	Value
Wavelength / μm	3.7~4.8/7.7~10.3
Focal length /mm	100
Field of view /($^\circ$)	6
F number	2
Pixel detector /pixel	320 \times 256
Pitch detector /mm	0.030
Athermalization temperature range / $^\circ\text{C}$	-60~70

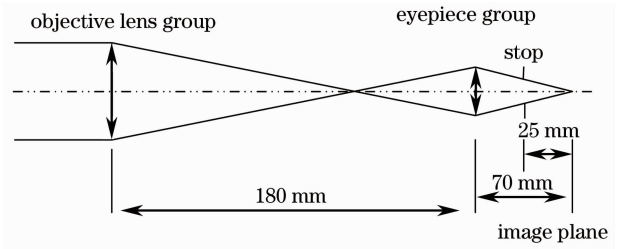


图 1 光学系统结构示意图

Fig. 1 Sketch map of optical system

由上述方法求得初始结构参数,其光焦度矩阵和结构矩阵为:

$$\phi_1 = [-0.01226 \ 0.02170 \ -0.003822 \ 0.03160];$$

$$\phi_2 = [-0.01218 \ 0.02104 \ -0.003780 \ 0.03306];$$

$$D_1 = D_2 = [180 \ 70].$$

(6)

3.3 光学系统设计及性能分析

将初始结构参数输入光学设计软件 Code V 中进行优化设计,为了校正正像差,在优化过程中,对镜组进一步分裂。最终优化的系统结构图如图 2 所示,系统由 8 个光学元件构成,其中元件 1、4 为 Ge 镜,元件 2、3、5、7 为 ZnS 镜,其余为 ZnSe 镜。为减少元件个数,设计中在锗镜上引入两个非球面,分别为元件 1 的后表面和元件 4 的后表面,其余均为球面,系统不含衍射面。镜筒结构采用铝,线性膨胀系数为 $23.6 \times 10^{-6} \text{ mm}/^\circ\text{C}$ 。

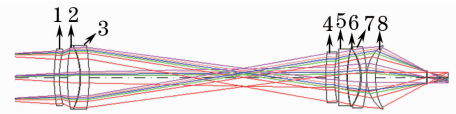


图 2 优化后的光学系统结构图

Fig. 2 Optical system layout after optimization

双波段红外光学系统在不同温度下的调制传递函数(MTF)如图 3 所示。全温度范围内($-60 \text{ }^\circ\text{C} \sim 70 \text{ }^\circ\text{C}$),中波和长波时光学系统边缘视场的 MTF 在 18 lp/mm 处均在 0.5 以上,满足系统性能要求。

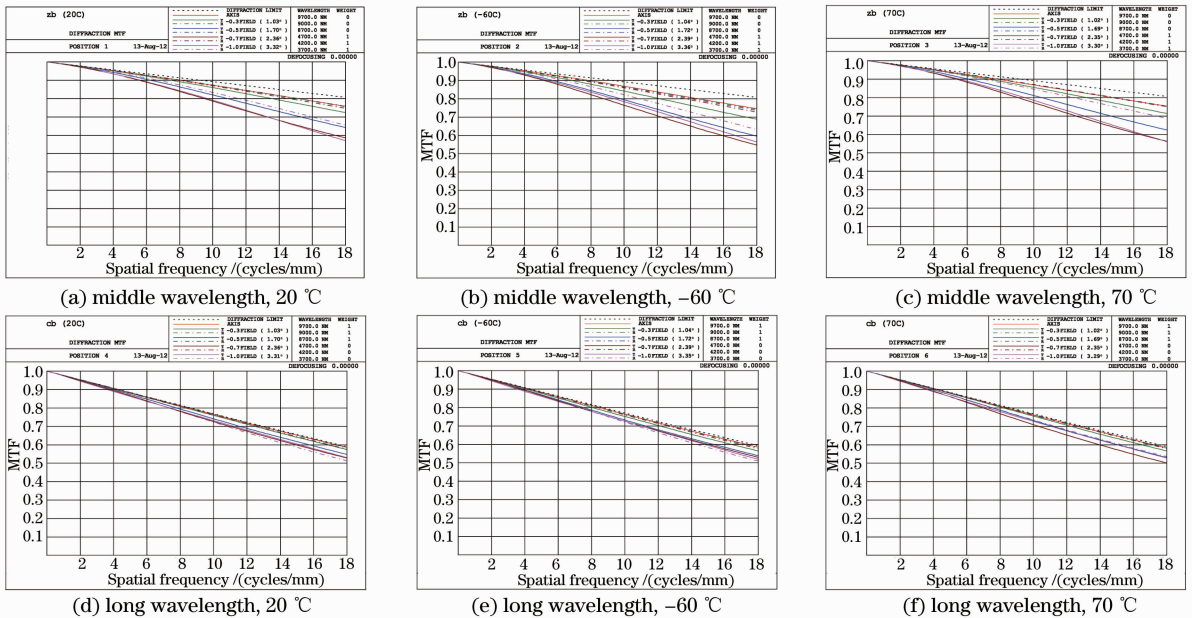


图 3 系统 MTF 图

Fig. 3 MTF curves of the system

光学系统的弥散斑数据如表 2 所示。从表中可以看出长、短焦下各视场的弥散斑在全温度范围内的变化不大,中波最大均方根(RMS)弥散斑直径为 $22.5 \mu\text{m}$,长焦最大 RMS 弥散斑直径为 $15.5 \mu\text{m}$,均小于艾里斑物理直径。

表 2 光学系统 RMS 弥散斑直径 (单位: μm)
Table 2 Spot RMS diameter of the athermalized optical system (unit: μm)

Field-of-view	Middle wavelength			Long wavelength		
	20 °C	-60 °C	70 °C	20 °C	-60 °C	70 °C
0°	12.5	10.5	15.8	7.2	10.8	9.2
1.8°	11.7	14.2	13.3	6.4	12.4	11.1
3°	15.5	19.3	16.5	9.1	14.8	11.4
4.2°	18.6	22.5	19.5	11.0	15.0	13.1
6°	18.3	21.2	18.7	12.9	15.5	13.7

4 结 论

利用中波、长波双波段的红外辐射对目标进行探测、识别了显著提高光学系统的侦察能力。光学被动无热化技术为红外光学系统满足环境温度适应性(-60 °C~70 °C)提供了有效技术手段。本文成功实现了双波段红外光学系统的光学被动无热化设计,所设计的结构满足设计要求,表明了设计方法的正确性和可行性。随着双色探测器的进一步发展,双波段红外光学系统将得到越来越广泛的应用。

参 考 文 献

- Zhang Xingde, Li Ronggang, Liu Lin *et al.*. Research and development of dual-band infrared camera system[J]. *Laser & Infrared*, 2010, **40**(8): 801~804
张兴得, 李荣刚, 刘琳等. 红外双波段成像系统的研究与发展[J]. *激光与红外*, 2010, **40**(8): 801~804
- Oliver Schreer. Helicopter-borne dual-band dual-FPA system[C]. *SPIE*, 2003, **5074**: 637~647
- Michael Lidwell. Diffractive lenses for dual-wave band IR[C]. *SPIE*, 1996, **2774**: 352~362
- Andrew Bodkin. Compact multi-band (VIS/IR) zoom imager for high resolution long range surveillance[C]. *SPIE*, 2005, **5783**: 816~826
- Liu Feng, Xu Xiping, Sun Xiangyang *et al.*. Design of infrared (IR) hybrid refractive/diffractive lenses for target detecting/tracking[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2084~2088
刘峰, 徐熙平, 孙向阳等. 折/衍射混合红外目标搜索/跟踪光学系统设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2084~2088
- 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
- Liu Lin, Shen Weimin, Zhou Jiankang. Design on athermalized middle wavelength infrared optical system with large relative aperture[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 675~679
刘琳, 沈为民, 周建康. 中波红外大相对孔径消热差光学系统的设计[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 675~679
- Gerald G. Holst. *Electro-Optics Imaging System Performance*[M]. Bellingham: SPIE press, 2003. 245
- Allen Mann. *Infrared Optics and Zoom Lenses*[M]. Bellingham: SPIE Press, 2009
- Warren J. Smith. *Modern Optical Engineering, the Design of Optical Systems*[C]. *SPIE*, 2008