

中波红外光学系统光学被动无热化设计

陈建发^{1,2}, 王合龙^{1,2}, 刘欣²

(1. 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471009;

2. 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: 介绍了多重结构中波红外系统光学被动无热化设计的方法, 设计了一个双视场无热化中波红外光学系统。该系统由变焦系统和二次成像系统构成, 采用光学被动无热化技术设计, 通过轴向移动一组(2个)光学元件实现系统变焦; 采用硅、锗两种材料及引入两个非球面实现光学被动无热化设计。系统工作波段为4.5~5.1 μm, 结构紧凑, 满足100%冷光阑效率, 像质评定结果表明, 光学系统在全温度范围内(-60~70 °C)双视场像质良好, 证明了该方法的正确性与可行性。

关键词: 红外光学系统; 光学被动无热化; 双视场

中图分类号: V271.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)12-0088-04

A Passive Optical Athermalization Design of Middle-Wavelength Infrared Optical System

CHEN Jianfa^{1,2}, WANG Helong^{1,2}, LIU Xin²

(1. Science and Technology on Electro-Optical Control Laboratory, Luoyang 471009, China;

2. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471009, China)

Abstract: A method for passive optical athermalization design of middle wavelength infrared optical system with multiple lenses is introduced, and an athermalized middle wavelength infrared dual-FOV optical system was designed. The optical system contains a zoom objective system and a secondary imaging system, and adopts the technology of passive athermalization optical design. The zoom function is achieved by moving a set of optical components (2 elements) axially. A passive athermalization optical design is presented by using crystal materials Si and Ge, and two aspherical surfaces. The results show that the infrared zoom optical system in the 4.5 ~ 5.1 μm wavelength possesses a compact structure, 100% cold shield efficiency, and better image quality in the temperature range from -60 °C to +70 °C, thereby the correctness and feasibility of the design method are proved.

Key words: infrared optical system; passive optical athermalization; dual-FOV

0 引言

用于航空和空间技术的光学系统一般都工作在恶劣的环境条件下, 其中, 温度的剧烈变化是对光学系统的严峻考验之一。温度的变化将导致光学系统各元件, 包括各透镜以及机械结构性质的改变, 诸如透镜的曲率半径、厚度、折射率、镜筒长度等。这些因素如果没有经过任何处理, 往往会严重影响光学系统性能, 从

而降低整个系统的性能^[1-2]。

机载光学系统一般工作升空范围为0~20 km。资料表明, 在海拔10 km的高度, 气温只有-60 °C, 20 km高空则会降到-120 °C。考虑到光学系统内部温度变化没有那么剧烈, 因此把光学系统设计指标设定在-60~70 °C内能正常工作。换句话说, 温差将达到100 °C以上。要在这么大的温差范围内工作, 光学系统必须采用无热化设计, 否则性能会极不稳定。目前无热化技术主要有机械被动式、电子主动式、光学被动式3种^[3-5]。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^[6]。

传统光学被动无热化设计局限于密接型透镜的设

计,基于 $\theta-\omega$ 图的光学被动无热化设计方法可以设计非密接型透镜^[5],但仍不适用于双重结构及多重结构光学被动无热化设计。通过引入衍射元件可以实现无热化设计。文献[3-4,7]利用衍射元件设计出了折/衍混合中波红外光学系统,但由于衍射元件只在单一波长上具有高的衍射效率,将会影响到系统透过率及产生杂散辐射。本文介绍一种适用于多重结构的光学被动无热化设计方法。光学系统不含衍射面,且满足轻量化、小型化的设计要求。像质的评定结果表明,光学系统在 $-60 \sim 70\text{ }^\circ\text{C}$ 全温度范围内,大小视场成像质量良好。

1 光学被动无热化

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,通过合理分配光焦距与元件间隔,使得系统在要求的温度范围内,其热离焦近似为零^[5]。

空气中由 j 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、消热差方程为

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

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 分别为色散系数和热差系数^[6-9]。

为校正色差,利用不同 ω 值材料,为消热差,需要不同的 θ 值。如果能找到一种合适的 ω 值和 θ 值的组合,就可以同时校正热差和色差。几种适用于 $4.5 \sim 5.1\text{ }\mu\text{m}$ 波长范围的红外材料如表 1 所示。

表 1 红外材料在 $4.5 \sim 5.1\text{ }\mu\text{m}$ 的色差和热差特性

Table 1 The thermal and chromatic properties of common infrared materials in the $4.5 \sim 5.1\text{ }\mu\text{m}$ wavelength band

	θ	ω
Si	6.29 E-5	6.62 E-4
Ge	13.22 E-5	14.86 E-4
Amtir	2.93 E-5	15.04 E-4
Zns	3.57 E-5	11.15 E-4
ZnSe	3.03 E-5	28.42 E-4

绘出 $\theta-\omega$ 曲线,如图 1 所示,通过两种材料点并延长与 θ 轴相交的一条直线代表着由两种材料制成的消色差透镜的等效 θ 值。根据曲线图,很明显,对于中波红外光学系统,硅-锗材料是一种很有意义的组合,合理搭配就有可能实现对系统消热差与消色差^[10]。

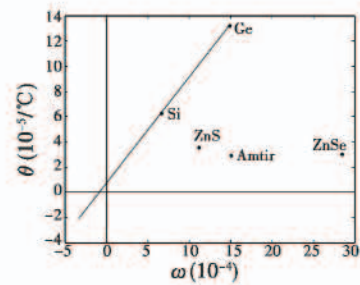


图 1 $4.5 \sim 5.1\text{ }\mu\text{m}$ 波段常用红外材料的 $\theta-\omega$ 图

Fig. 1 The $\theta-\omega$ curves of common infrared materials in the $4.5 \sim 5.1\text{ }\mu\text{m}$ wavelength band

2 设计方法

2.1 基于 $\theta-\omega$ 图的光学被动无热化设计方法

把薄透镜系统中的第 i 和 $i+1$ 个透镜等效为一个透镜,利用 $Z_e = \omega_e + j\theta_e, Z_i = \omega_i + j\theta_i$ (j 为虚数单位),可得到^[9]

$$Z_e = a \left(\frac{h_i}{h_1} Z_i \right) + (1-a) \left(\frac{h_{i+1}}{h_1} Z_{i+1} \right) \quad (2)$$

其几何意义如图 2 所示。无热化设计的目的是使整个光学零件的热差等效点与结构件在纵轴上的热差点抵消,系统色差则由光学零件本身光焦距与色差系数相互配合抵消,因此,系统的最终等效点要落在纵轴之上,且数值与结构件热差系数相反。

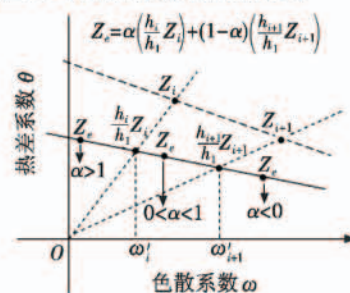


图 2 等效透镜的 $\omega-\theta$ 图

Fig. 2 $\omega-\theta$ chart of equivalent lens

因此,对于一个光学系统,当实现无热化设计时,光线在每块镜子上入射高度和光焦距虽然有很多个解,但是在材料一定的情况下,每组入射高度和光学零件的光焦距是一一对应的。对于轴向变焦红外光学系统,由于光学零件的光焦距不发生变化,而每个镜子的入射高度在不同焦距下发生了改变,因此,基于 $\theta-\omega$ 图的光学被动无热化设计方法将不适用于此类系统的设计。

2.2 基于镜组零件材料热补偿设计方法

对于类似轴向变焦的多重结构红外系统,显然传统光学被动无热化设计技术和基于 $\theta-\omega$ 图的光学被动无热化设计技术已经不再适用,下面介绍一种基于镜组零件材料热补偿设计方法。

假设系统存在 N 重结构,对于每一种结构,建立光焦度矩阵 ϕ_i ,结构矩阵 D_i 。温度对零件光焦度的影响为

$$\delta\phi/\delta t = \phi [|\delta n/\delta t| / (n-1) - \alpha] = \phi\theta \quad (3)$$

式中: $\delta n/\delta t$ 是折射率随温度的变化; n 是折射率; α 是热膨胀系数; ϕ 是零件光焦度; θ 是热差系数。当温度变化 Δt 时,零件光焦度变为

$$\phi_{i\Delta t} = \phi_i (1 + \Delta t\theta) \quad (4)$$

结构材料变化为

$$D_{i\Delta t} = D_i (1 + \Delta t\alpha) \quad (5)$$

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 $\phi_{i\Delta t}, D_{i\Delta t}$, 可以计算出其温度变化 Δt 后的后截距 $B_{i\Delta t}$, 于是可以计算出热离焦量为

$$\sigma_i = B_{i\Delta t} - B_i \quad (6)$$

可将 $\sum_i \sigma_i^2$ 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。需要采取锗材料来进行热补偿设计,一般对系统1到3个硅元件进行光焦度分裂补偿为锗双透镜。若分裂2个元件,则对应第 i 重结构,可以得到一个2维光焦度矩阵 ϕ_i , 重复上述步骤即可得到一个2维的热离焦量矩阵 σ_i 。

求得满足 $\min(\sum_i \sigma_i^2) < 10^{-5} \text{ mm}^2$ 时对应的坐标 x, y , 由该坐标值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 编程很容易地实现。

3 设计实例

3.1 光学系统的设计指标

下面给出一个设计实例,系统设计参数如表2所示。系统采用 320×256 中波红外探测器,像元大小 $30 \mu\text{m}$ 。

表2 光学系统设计参数

Table 2 Design parameters of the optical system

波长/ μm	焦距/ mm	视场/ ($^\circ$)	F 数	像元数	像元 尺寸/mm	无热化温度 范围/ $(^\circ\text{C})$
4.5~5.1	50/200	12/3	2	256 × 256	0.030	-60~70

3.2 初始结构参数计算

系统采用双重结构,零件材料为硅,结构材料为铝,初始结构如图3所示。

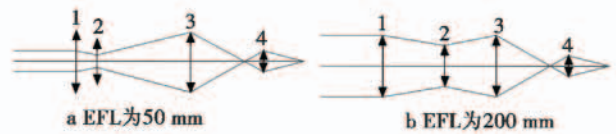


图3 光学系统结构示意图

Fig. 3 The sketch map of optical system

其光焦度矩阵、结构矩阵为: $\phi_1 = \phi_2 = [0.0048 \ -0.0161 \ 0.0129 \ 0.02]$; $D_1 = [20.64 \ 144.67 \ 215]$; $D_2 = [113.67 \ 51.67 \ 215]$ 。

零件材料由硅材料 ($n = 3.423, V = 1615$) 制造,利用光线追迹数据,可以计算出轴上色差弥散。

短焦时: $\sum T_{\text{tachn}} = \sum y^2 \phi / Vu'_k = -0.027$ 。长焦时: $\sum T_{\text{tachn}} = \sum y^2 \phi / Vu'_k = -0.045$ 。

色差较小,在初始结构中可不考虑消色差。此时 $\sum \sigma_i^2 = 21.52 \text{ mm}^2$, 热离焦相当严重。将元件2、4分裂为锗双透镜,光焦度插值间隔 -0.0001 , 循环次数500, 求得 $\min(\sum \sigma_i^2) = 8.94 \times 10^{-9} \text{ mm}^2$, 满足无热化设计,此时对应的坐标 $x = 175, y = 401$, 表明未溢出循环,得到无热化设计的初始结构参数为: $\phi_1 = \phi_2 = [0.0048 \ 0.0014 \ -0.0175 \ 0.0129 \ 0.0601 \ -0.0401]$; $D_1 = [20.64 \ 144.67 \ 215]$; $D_2 = [113.67 \ 51.67 \ 215]$ 。

3.3 光学系统设计及性能分析

光学系统结构如图4所示,系统由10个光学元件构成,其中元件3、4、10为锗镜,元件7、8为平面反射镜,其余为硅镜。为减少元件个数,采用非球面设计,考虑到锗镜表面易于加工非球面,设计中在锗镜上引入两个非球面,分别为元件4的后表面和元件10的前表面,其余均为球面,系统不含衍射面。镜筒材料采用铝,线性膨胀系数为 23.6×10^{-6} 。

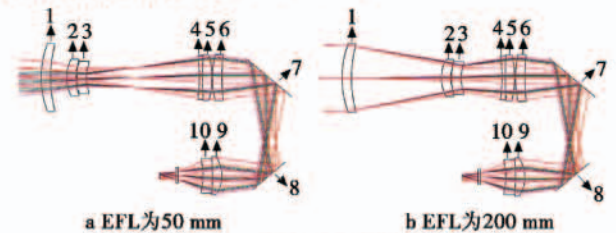
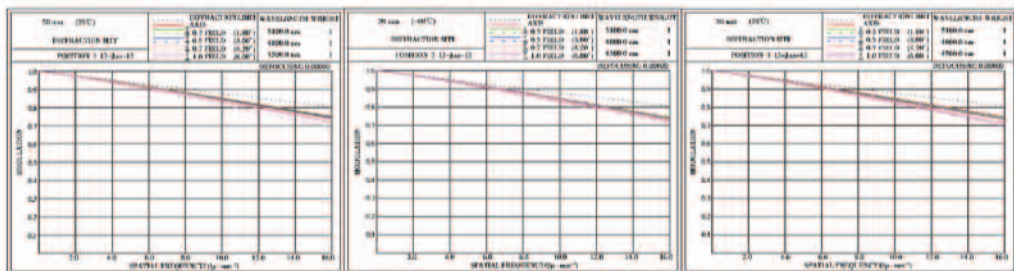
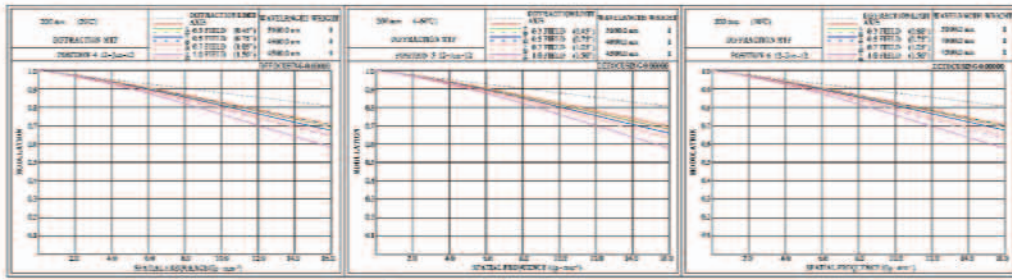


图4 光学系统结构图

Fig. 4 Optical system layout



a EFL为50 mm, T 为20 $^\circ\text{C}$ 、-60 $^\circ\text{C}$ 、70 $^\circ\text{C}$



b EFL为200 mm, T为20 °C、-60 °C、70 °C

图 5 系统 MTF 图

Fig. 5 MTF curves of the system

光学系统在不同温度下的 MTF 如图 5 所示。全温度范围内 (-60 ~ 70 °C) 大小视场下, 光学系统边缘视场的 MTF 在 16 lp/mm 处, 均在 0.58 以上, 满足系统性能要求。

光学系统的畸变如图 6 所示。从图中可以看出, 大视场(短焦)和小视场(长焦)时畸变均小于 1%, 可满足视场拼接的需求。

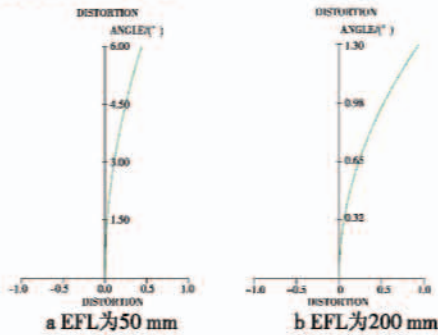


图 6 光学系统畸变图

Fig. 6 Distortion of the system

光学系统的弥散斑如表 3 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, 短焦最大 RMS 弥散斑直径为 15.6 μm, 长焦最大 RMS 弥散斑直径为 23.2 μm, 均小于艾里斑物理直径。

表 3 光学系统弥散斑直径

Table 3 Spot diameter of the athermalized optical system

FOV/ (°)	EFL 为 50 mm			EFL 为 200 mm			
	20 °C	-60 °C	70 °C	20 °C	-60 °C	70 °C	
0	12.1	11.9	13.4	0	17.4	17.5	17.9
0.9	11.7	11.6	12.8	3.6	17.1	17.3	17.4
1.5	11.8	11.9	12.2	6	17.3	17.7	17.5
2.1	12.5	12.7	12.4	8.4	18.2	18.6	18.6
3	15.5	15.6	14.7	12	21.7	21.3	23.2

4 结论

用于空间技术或航空的红外光学系统, 由于工作环境的特殊性, 必须适应较大的温差变化。为了保证光学系统的良好成像性能, 需采用无热化处理。光学被动无热化技术相对于其他无热化技术, 有结构简单、

体积小、性能可靠等优点。

本文介绍了一种多重结构中红外光学系统被动无热化的设计方法, 设计了一个双视场无热化中波红外光学系统。光学系统采用二次成像的光学构型, 入瞳位于第一块物镜上, 缩小了物镜的尺寸; 出瞳与探测器冷光阑匹配, 实现冷光阑效率 100%; 通过轴向移动一组(2 个)光学元件实现双视场切换; 采用硅、锗两种材料及两个非球面, 不含衍射面, 实现系统被动无热化。像质评定结果表明, 光学系统在全温度范围 (-60 ~ 70 °C) 内大小视场像质良好。

参考文献

- [1] 吴晓靖, 孟军和. 使用简单机械结构实现红外光学系统无热化[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(4): 391-393.
- [2] 王学新, 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): 129-133.
- [3] 邓键, 童卫红, 安晓强, 等. 双视场红外变焦镜头的无热化研究[J]. 应用光学, 2011, 32(1): 133-137.
- [4] 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.
- [5] 罗金平, 王合龙, 刘欣, 等. 二次成像光学被动无热化设计[J]. 电光与控制, 2012, 19(4): 85-88.
- [6] 沈良吉, 冯卓祥. 3.7 μm - 4.8 μm 波段折/衍混合红外光学系统的无热化设计[J]. 应用光学, 2009, 30(4): 683-687.
- [7] RAYCES L, LEBICH L. Thermal compensation of infrared achromatic objectives with three optical materials [J]. SPIE, 1990, 1354: 752-759.
- [8] 李林. 现代光学设计方法[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009: 235-241.
- [9] TAMAGAWA Y, WAKABAYASHI S, TAJIME T. New design method for athermalized optical systems[J]. SPIE, 1992, 1752: 232-238.
- [10] TAMAGAWA Y, WAKABAYASHI S, TAJIME T, et al. Multilens design with an athermal chart [J]. Applied Optics, 1994, 33(34): 8009-8013.