

双波段双视场折反式光学系统无热化设计

王合龙^{1,2} 陈建发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 利用中波和长波红外双波段联合探测,可以有效地提高机载光电探测设备的性能。介绍了四反射镜和光学被动式无热化技术的设计方法,设计了一套双波段双视场折反式光学系统。系统由四反射望远镜系统和二次成像会聚系统两部分构成,采用光学被动无热化设计,满足轻量化、小型化、无热化的设计要求。光学工作波段为 $4.5\sim 5.1\ \mu\text{m}/7.7\sim 9.7\ \mu\text{m}$,焦距为100/300 mm,变倍比为3, F 数为2,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 $-60\ ^\circ\text{C}\sim 70\ ^\circ\text{C}$ 温度范围内,双波段双视场成像质量良好。

关键词 光学设计;红外光学;双视场;双波段;无热化

中图分类号 TN216 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.112201

Athermalization Design of Dual-Band and Dual-Field-of-View Catadioptric Infrared Optical System

Wang Helong^{1,2} Chen Jianfa²

¹ Science and Technology on Electro-Optical Control Laboratory, Luoyang, Henan 471009, China

² Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, Aviation Industry Corporation of China, Luoyang, Henan 471009, China

Abstract The use of medium-wave and long-wave infrared dual-band combination can effectively improve the performance of airborne photoelectric detection device. The design method using four mirrors and optical passive athermal technology is introduced. A dual-band and dual fields-of-view (FOVs) catadioptric optical system is designed. The system consists of two parts, i.e., the four-mirror telescope system and secondary imaging aggregation system, and uses optical passive thermal design. It meets the design requirements of lightweight, miniaturization, and athermalization. The optical system works in the $4.5\sim 5.1\ \mu\text{m}$ and $7.7\sim 9.7\ \mu\text{m}$ wavelength bands. It can achieve the zoom of 100 mm and 300 mm, with the zoom ratio of 3, F number of 2, and a compact structure and can meet 100% cold shield efficiency. The final optical design along with their modulation transfer function (MTF) is presented, showing excellent imaging performance in dual FOVs and dual-band at the temperature range between $-60\ ^\circ\text{C}$ and $70\ ^\circ\text{C}$.

Key words optical design; infrared optics; dual-field-of-view; dual-band; athermalization

OCIS codes 220.4830; 110.3080; 280.6780

1 引言

不同景物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]。利用红外双波段成像系统探测不同波长的红外辐射可有效剔除目标的伪装信息,提高目标的探测与识别能力,并降低系统的虚警率^[2],从而提高光电探测设备的侦察能力。

为满足军事侦察的需要,机载光电探测系统通常具有两个视场(FOV),在大视场下搜索目标,当锁定目标后,切换至小视场进行轮廓细节识别和定位跟踪^[3]。制冷型探测器相对于非制冷探测器具有更高的灵敏度,机载光电探测系统一般都采用制冷型探测器。但采用制冷型探测器就要实现光学系统的出瞳与探测器的冷光阑匹配,即冷光阑效率100%^[4]。

机载光电探测系统工作环境极为复杂、恶劣,其中温度的变化范围达到 $-60\ ^\circ\text{C}\sim 70\ ^\circ\text{C}$ 。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

收稿日期: 2013-05-22; 收到修改稿日期: 2013-07-08; 网络出版日期: 2013-10-28

作者简介: 王合龙(1965—),男,博士,研究员,主要从事光电系统总体技术方面的研究。E-mail: eoei@vip.sina.com

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],此时必须采用无热化设计才能保证光学系统稳定的成像质量。

目前在光学设计方面对红外光学系统的研究主要集中在双视场或双波段单个方面,而对同时具备双波段双视场探测的光学系统无热化设计报道较少;双波段光学被动无热化研究方面多集中在衍折混合系统,对于较宽的波段范围,衍射效率较低,无效衍射会产生杂散光,而对采用材料搭配实现双波段系统无热化的报道较少。基于此背景,本文设计了一套双波段双视场折反式无热化红外光学系统,系统由离轴四反望远系统和二次成像会聚系统两部分构成,工作波段为 4.5~5.1 μm /7.7~9.7 μm ,焦距为 100/300 mm,变倍比为 3, F 数为 2。光学系统满足轻量化、小型化的设计要求。像质评定结果表明,光学系统在 -60 $^{\circ}\text{C}$ ~70 $^{\circ}\text{C}$ 温度范围内,双波段双视场成像质量良好。

2 光学系统参数

光学系统采用 320 pixel \times 256 pixel 制冷型双色探测器, F 数为 2,其敏感波段为 4.5~5.1 μm 和 7.7~9.7 μm 两个波段,像素大小 30 μm ,其空间特征频率为 16.7 lp/mm。光学系统由反射式望远系统和折射式二次成像会聚系统两部分构成。其中反射镜面材料、支撑材料和光学系统镜筒结构材料均采用铝合金,其热膨胀系数为 23.6×10^{-6} K^{-1} 。光学系统的具体设计参数及要求如表 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	4.5~5.1/7.7~9.7
Short focal length /mm	100
Long focal length /mm	300
Wide FOV /($^{\circ}$)	6(± 3)
Narrow FOV /($^{\circ}$)	2(± 1)
F number	2
Distortion /%	≤ 3
Transmittance	≥ 0.6
Fold volume /mm	$\leq 500\times 300\times 200$
Athermal temperature range / $^{\circ}\text{C}$	-60~+70

3 设计方法

3.1 四反射望远系统设计

目前常用的反射式望远系统通常采用两种结构,即 Ritch-Chretien(RC)望远系统和三镜消像散(TMA)望远系统。其中同轴 RC 望远系统存在中心遮拦和视场角过小的问题;TMA 望远系统结构不够紧凑,且理论设计中仅能消除球差、彗差、色差,不能消除畸变,这将增加红外光学系统视场拼接的难度。设计中发现在 TMA 系统中增加一片反射镜,一方面可以折叠光路使得结构更加紧凑,另一方面可以消除畸变。目前常用的方法是在三反射镜光路中增加反射镜进行反复优化设计,但这样大大地增加了设计周期。

基于此背景,下面给出一种基于 Seidel 像差系数的四反射镜初始结构的直接求解方法。单色像差一共有五种:球差、彗差、像散、像面弯曲及畸变,其三级像差系数分别为 S_1, S_2, S_3, S_4 及 S_5 。三级像差理论给出单色像差的表示式为^[6]

$$\begin{cases} S_1 = \sum hP + \sum h^4 K, \\ S_2 = \sum yP - J \sum W + \sum h^3 yK, \\ S_3 = \sum \frac{y^2}{h} P - 2J \sum \frac{y}{h} W + J^2 \sum \Phi + \sum h^2 y^2 K, \\ S_4 = \sum \frac{\Pi}{h}, \\ S_5 = \sum \frac{y^3}{h^2} P - 3J \sum \frac{y^2}{h^2} W + J^2 \sum \frac{y}{h} \left(3\Phi + \frac{\Pi}{h} \right) - J^3 \sum \frac{1}{h^2} \Delta \frac{1}{n^2} + \sum h^3 yK, \end{cases} \quad (1)$$

式中 h 为边缘光线在各个镜面上的入射高度, y 为主光线在各个镜面上的入射高度, n 为介质空间折射率, J 为拉氏不变量, K 为各个镜面归一化非球面系数, Π , P 和 W 为各个镜面的单色像差参量。

四反射光学系统光路如图 1 所示。其主镜 M_1 、次镜 M_2 、三镜 M_3 和四镜 M_4 的二次非球面系数分别为 $e_1^2, e_2^2, e_3^2, e_4^2$ 。假定物体位于无穷远, 即 $l_1 = \infty, u_1 = 0$; 入瞳位于主镜上, 即 $x_1 = 0, y_1 = 0$ 。

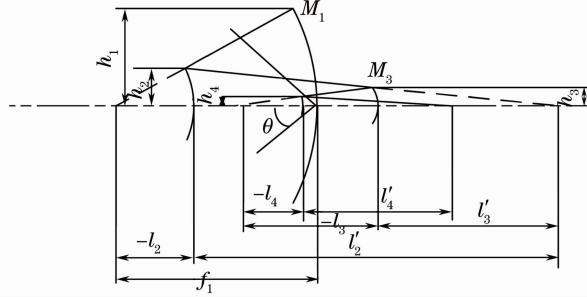


图 1 同轴四反射镜结构图

Fig. 1 Systematic structure of the four-mirror system

定义 α_i 为该镜对于前一面镜子的遮拦比, β_i 为该镜对于后一面镜子的放大率 ($i = 1, 2, 3$)。定义 r_j 为每个镜面的半径, 定义 d_j 为该镜到后一面镜子的距离, h_j 为边缘光线在各个镜面上的入射高度, y_j 为主光线在各个镜面上的入射高度, K_j 为各个镜面的归一化非球面系数, P_j 和 W_j 为各个镜面的单色像差参量 ($j = 1, 2, 3, 4$)。易知

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{l_2}{f_1} \approx \frac{h_2}{h_1}, & \beta_1 = \frac{l'_2}{l_2} = \frac{u_2}{u_1}, \\ \alpha_2 = \frac{l_3}{l'_2} \approx \frac{h_3}{h_2}, & \beta_2 = \frac{l'_3}{l_3} = \frac{u_3}{u_2}, \\ \alpha_3 = \frac{l_4}{l'_3} \approx \frac{h_4}{h_3}, & \beta_3 = \frac{l'_4}{l_4} = \frac{u_4}{u_3}. \end{cases} \quad (2)$$

对于反射系统, $n_1 = n'_2 = n_3 = n'_4 = 1, n'_1 = n_2 = n'_3 = n_4 = -1$, 令 $h_1 = 1, f' = 1$ 及 $\theta = -1$, 当光阑位于主镜时,

$$\begin{cases} y_1 = 0, & h_1 = 1, \\ y_2 = \frac{(\alpha_1 - 1)}{\beta_1 \beta_2 \beta_3}, & h_2 = \alpha_1, \\ y_3 = \frac{\alpha_2 (\alpha_1 - 1) + \beta_1 (1 - \alpha_2)}{\beta_1 \beta_2 \beta_3}, & h_3 = \alpha_1 \alpha_2, \\ y_4 = \frac{\alpha_3 \alpha_2 (\alpha_1 - 1) + \alpha_3 \beta_1 (1 - \alpha_2) + \beta_1 \beta_2 (\alpha_3 - 1)}{\beta_1 \beta_2 \beta_3}, & h_4 = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3. \end{cases} \quad (3)$$

此外可以算得

$$\begin{cases} P_1 = -\frac{\beta_1^3 \beta_2^3 \beta_3^3}{4}, & W_1 = \frac{\beta_1^2 \beta_2^2 \beta_3^2}{2}, & K_1 = \frac{e_1^2}{4} \beta_1^3 \beta_2^3 \beta_3^3, \\ P_2 = \frac{\beta_3^3 \beta_2^3 (1 + \beta_1) (1 - \beta_1)^2}{4}, & W_2 = \frac{\beta_3^2 \beta_2^2 (1 + \beta_1) (1 - \beta_1)}{2}, & K_2 = -\frac{e_2^2}{4} \frac{(1 + \beta_1)^3 \beta_2^3 \beta_3^3}{\alpha_1^3}, \\ P_3 = -\frac{\beta_3^3 (1 - \beta_2)^2 (1 + \beta_2)}{4}, & W_3 = \frac{\beta_3^2 (1 - \beta_2) (1 + \beta_2)}{2}, & K_3 = \frac{e_3^2}{4} \frac{(1 + \beta_2)^3 \beta_3^3}{\alpha_1^3 \alpha_2^3}, \\ P_4 = \frac{(1 - \beta_3)^2 (1 + \beta_3)}{4}, & W_4 = \frac{(1 - \beta_3) (1 + \beta_3)}{2}, & K_4 = \frac{e_4^2}{4} \frac{(1 + \beta_3)^3}{\alpha_1^3 \alpha_2^3 \alpha_3^3}. \end{cases} \quad (4)$$

将以上各参数代入(1)式, 令五种单色像差为 0, 可得到平场曲条件式和非球面系数的线性方程组:

$$\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} = 0, \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} h_1^4 & h_2^4 & h_3^4 & h_4^4 \\ h_1^3 y & h_1^3 y & h_1^3 y & h_1^3 y \\ h_1^2 y^2 & h_1^2 y^2 & h_1^2 y^2 & h_1^2 y^2 \\ h_1 y^3 & h_1 y^3 & h_1 y^3 & h_1 y^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ K_4 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

通过求解线性方程组(6)式,可得到球差、彗差、像散和畸变为0时,四个镜子的非球面参数。此时即可确定一个四反射镜光学系统的初始结构^[7]。

根据总体要求,望远系统变倍比为3, F 数为2,为了保证系统结构紧凑,在设计之初可以令四镜间隔相等,由上述设计方法得到四反射镜的初始结构参数为

$$\begin{aligned} \mathbf{r} &= [-1054.97, \quad -532.53, \quad -890.40, \quad 1110.82]; \\ \mathbf{d} &= [-400, \quad -400, \quad -400]; \\ \mathbf{K} &= [-0.96, \quad -10.12, \quad -1.54 \times 10^{-26}, \quad -1.01]. \end{aligned}$$

3.2 无热化设计方法

对于无热化温度范围较窄且 F 数较大的光学系统采用电子主动式无热化技术,可大大降低设计的难度。电子主动式无热化技术主要是通过调整像面位置弥补系统产生的热离焦。当无热化温度范围较宽且 F 数较小时,热离焦将远远大于系统焦深,此时就会导致电子主动式无热化失效。为了保证光学系统高低温稳定的成像质量,可采用光学被动式无热化技术。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:

$$\begin{cases} \phi = \frac{1}{f} = \frac{1}{h_1} \sum_{i=1}^k h_i \phi_i, \\ \omega = \frac{1}{h_1^2 \phi} \sum_{i=1}^k h_i^2 \omega_i \phi_i = 0, \\ \theta = \frac{1}{h_1^2 \phi} \sum_{i=1}^k h_i^2 \theta_i \phi_i = 0, \end{cases} \quad (7)$$

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

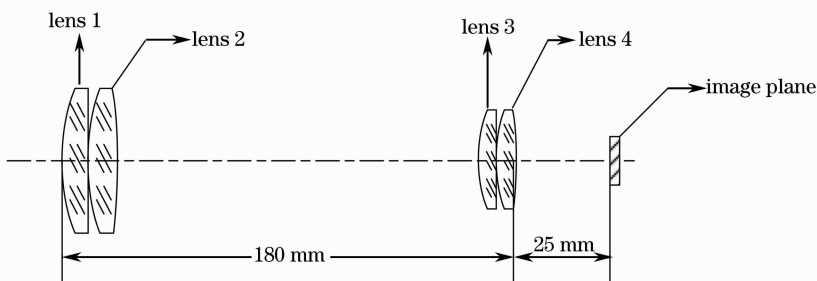


图2 会聚系统无热化初始结构

Fig.2 Initial structure of athermal aggregation system

会聚系统焦距100 mm,采用二次成像构型,由物镜和目镜两部分构成,设计中物镜采用Ge、ZnS,目镜采用Ge、ZnSe,建立光焦度矩阵和结构矩阵。初始结构采用4片镜子,透镜1和3为Ge镜,透镜2为ZnS镜,透镜4为ZnSe镜,其中透镜1和透镜2,透镜3和透镜4分别为密接透镜组,镜筒结构材料为铝合金,膨胀系数为 $23.6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。

温度对零件光焦度的影响为

$$\partial \phi / \partial t = \phi [|\partial n / \partial t| / (n - 1) - \alpha] = \phi \theta, \quad (8)$$

式中 $\partial n / \partial t$ 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,零件光焦度和结构材料系数变为

$$\begin{cases} \phi_{i\Delta t} = \phi_i(1 + \Delta t\theta), \\ D_{i\Delta t} = D_i(1 + \Delta t\alpha). \end{cases} \quad (9)$$

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

$$\sigma_i = B_{i\Delta t} - B_i. \quad (10)$$

找到热离焦量矩阵绝对值最小值对应的光焦度和结构矩阵, 即为会聚光学系统的无热化结构参数。最终求得结构参数如下,

$$\begin{aligned} \mathbf{f} &= [-82.95, 46.51, -254.95, 31.55]; \\ \mathbf{d} &= [0, 180, 0, 25]. \end{aligned}$$

此时对应的热离焦 $\sigma = 7.1 \times 10^{-4}$ mm, 远小于系统焦深 0.032 mm, 满足设计要求。

4 光学系统设计

4.1 光学系统结构

望远系统采用四反射结构, 反射系统不存在色差, 且当结构材料与镜面材料一致时, 可以实现无热化设计。结构材料与镜面材料采用铝合金, 镜面镀高反膜, 保证单个镜面反射率达到 99%。将上述初始结构参数输入 Code V 软件中, 通过光阑离轴, 最终优化结构如图 3 所示, 其中主镜为凹的抛物面, 次镜为凸的双曲面, 三镜为平面反射镜, 四镜为高次非球面, 孔径光阑如图所示, 离轴量 60 mm。

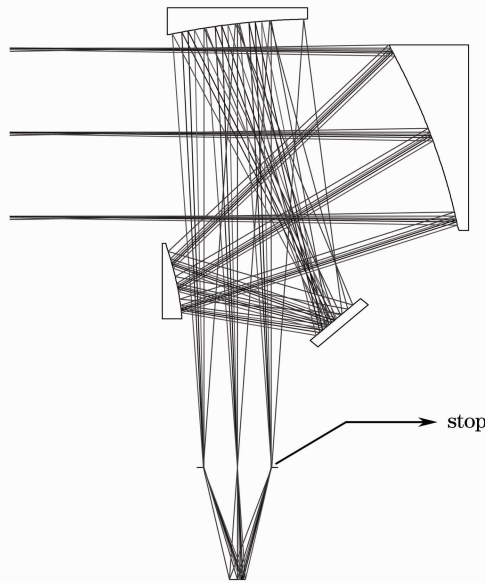


图 3 望远系统结构图

Fig. 3 Structure of telescope system

双波段会聚系统采用光学被动无热化设计, 将上述初始结构参数输入 Code V 软件中, 为了校正像差, 在优化过程中进一步对镜组进行分裂。最终优化的系统结构图如图 4 所示, 会聚系统入瞳在物镜组第一块

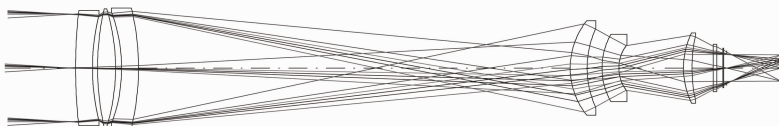


图 4 会聚系统结构图

Fig. 4 Structure of aggregation system

镜子表面,系统由6个光学元件构成,其中元件1、4为Ge镜,元件2为ZnS镜,其余为ZnSe镜。为减少元件个数,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。

双波段双视场折反光学系统总体结构图如图5所示,在图示箭头位置旋转插入一平面反射镜控制入射光束,即可实现大小视场切换,视场切换速度快。大视场时系统的入瞳在会聚系统第一块镜子表面;小视场时,望远系统的出瞳位置与会聚系统的入瞳位置相匹配,实现望远系统和会聚系统的瞳孔衔接,此时系统的入瞳在第一块反射镜前300 mm处。其中反射镜的镜面材料、支撑材料及会聚系统的镜筒材料均采用铝合金,膨胀系数一致,望远系统可独立实现消热差设计。

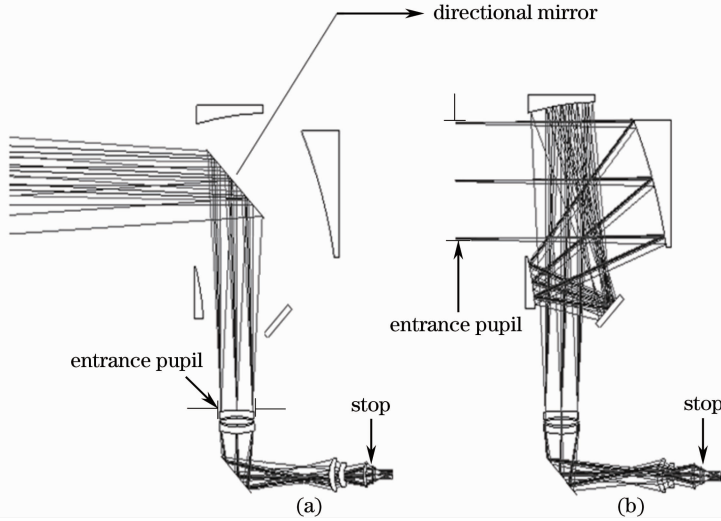


图5 光学系统总体结构图。(a)大视场;(b)小视场

Fig. 5 Overall structure of optical system. (a) Wide FOV mode; (b) narrow FOV mode

4.2 光学系统性能分析

光学系统畸变分析图如图6所示,光学系统中波大视场最大畸变为1.4%,中波小视场1.2%,长波大视场1.2%,长波小视场1.12%,均小于3%,满足视场拼接的设计要求。

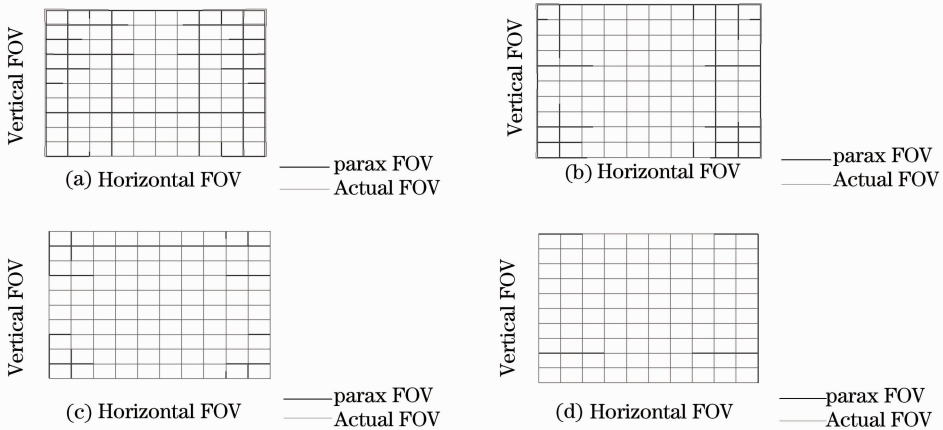


图6 光学系统畸变图。(a)中波, EFL100 mm; (b)中波, EFL 300 mm; (c)长波, EFL 100 mm; (d)长波, EFL 300 mm

Fig. 6 Distortion of optical system. (a) Middle wavelength, EFL 100 mm; (b) middle wavelength, EFL 300 mm; (c) long wavelength, EFL 100 mm; (d) long wavelength, EFL 300 mm

系统的光学调制传递函数(MTF)如图7所示,全温度范围内($-60\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$)在18 lp/mm处,MTF值在中波时短焦边缘视场约为0.7,长焦边缘视场约为0.5,长波时短焦边缘视场约为0.6,长焦边缘视场约为

0.5,成像质量均接近衍射极限。

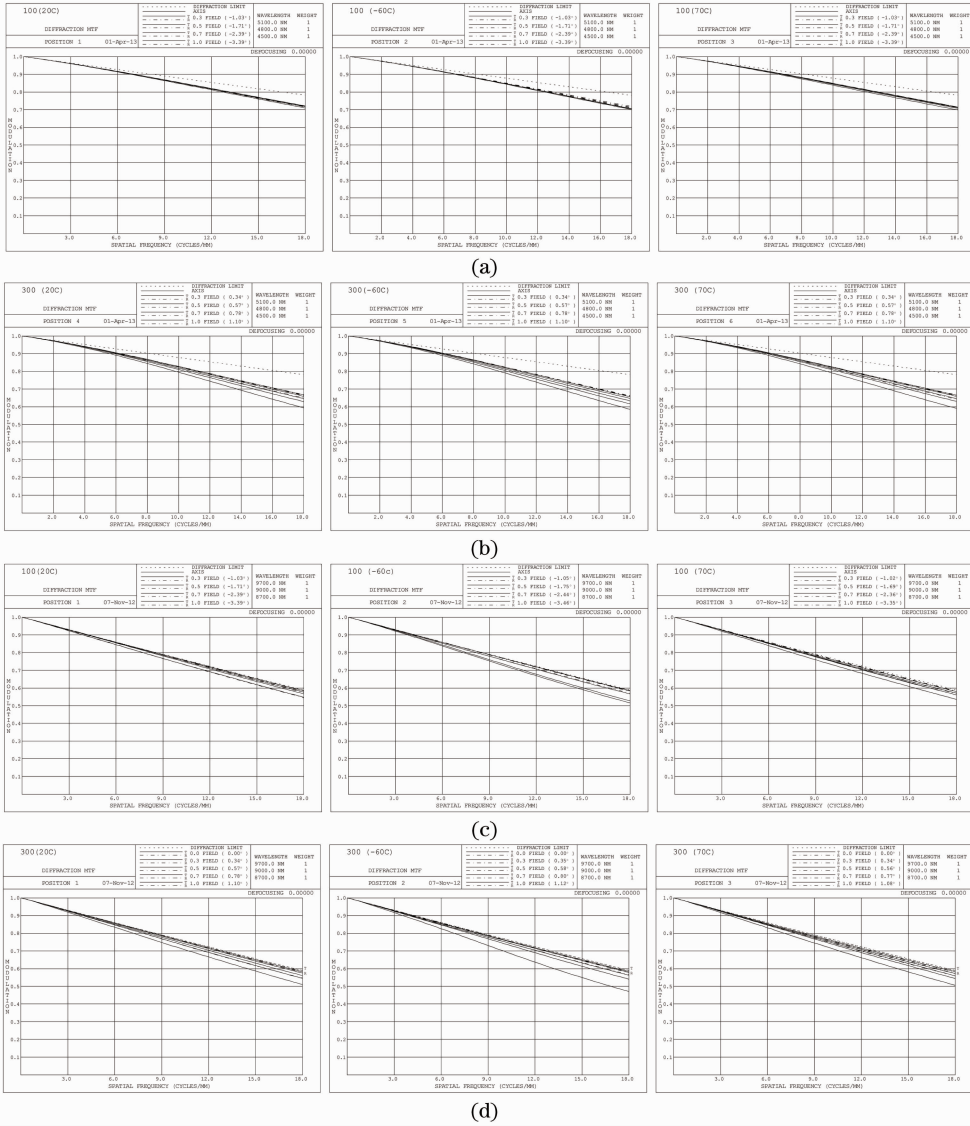


图7 光学系统 MTF。(a)中波,有效焦距(EFL)100 mm, 温度 $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $70\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b)中波, EFL 300 mm, $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $70\text{ }^{\circ}\text{C}$; (c)长波, EFL 100 mm, $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $70\text{ }^{\circ}\text{C}$; (d)长波, EFL 300 mm, $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $70\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig.7 MTF of optical system. (a) Middle wavelength, effective focal length (EFL) 100 mm, temperature $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $70\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) middle wavelength, EFL 300 mm, $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $70\text{ }^{\circ}\text{C}$; (c) long wavelength, EFL 100 mm, $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $70\text{ }^{\circ}\text{C}$; (d) long wavelength, EFL 300 mm, $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $70\text{ }^{\circ}\text{C}$

光学系统点列图如图8所示,最大弥散斑直径 $17.8\text{ }\mu\text{m}$,小于探测器像素尺寸 $30\text{ }\mu\text{m}$,也小于艾里斑物理直径。

光学系统透射率也是性能考核的重要指标之一。考虑材料吸收和表面反射后的透射率计算公式为

$$T = T_r \exp(-\alpha),$$

式中 T_r 为透镜或反射镜经表面反射损失后的透射率, α 为材料对光波能量的吸收系数。

系统采用 Ge、ZnSe 和 ZnS 三种材料,在 $4.5\sim 5.1\text{ }\mu\text{m}$ 波段,Ge 镜的吸收系数约为 0.0013 cm^{-1} ,ZnSe 的吸收系数约为 0.0004 cm^{-1} ,ZnS 的吸收系数约为 0.02 cm^{-1} ;在 $7.7\sim 9.7\text{ }\mu\text{m}$ 波段,Ge 镜的吸收系数约为 0.03 cm^{-1} ,ZnSe 的吸收系数约为 0.0005 cm^{-1} ,ZnS 的吸收系数约为 0.1 cm^{-1} ;反射镜反射率 98%,单个透镜透射率 98%。

光学系统大视场由 6 块镜子构成,其中 Ge 镜 2 块,总厚度为 1.9 cm;ZnSe 镜 3 块,总厚度为 3.1 cm,

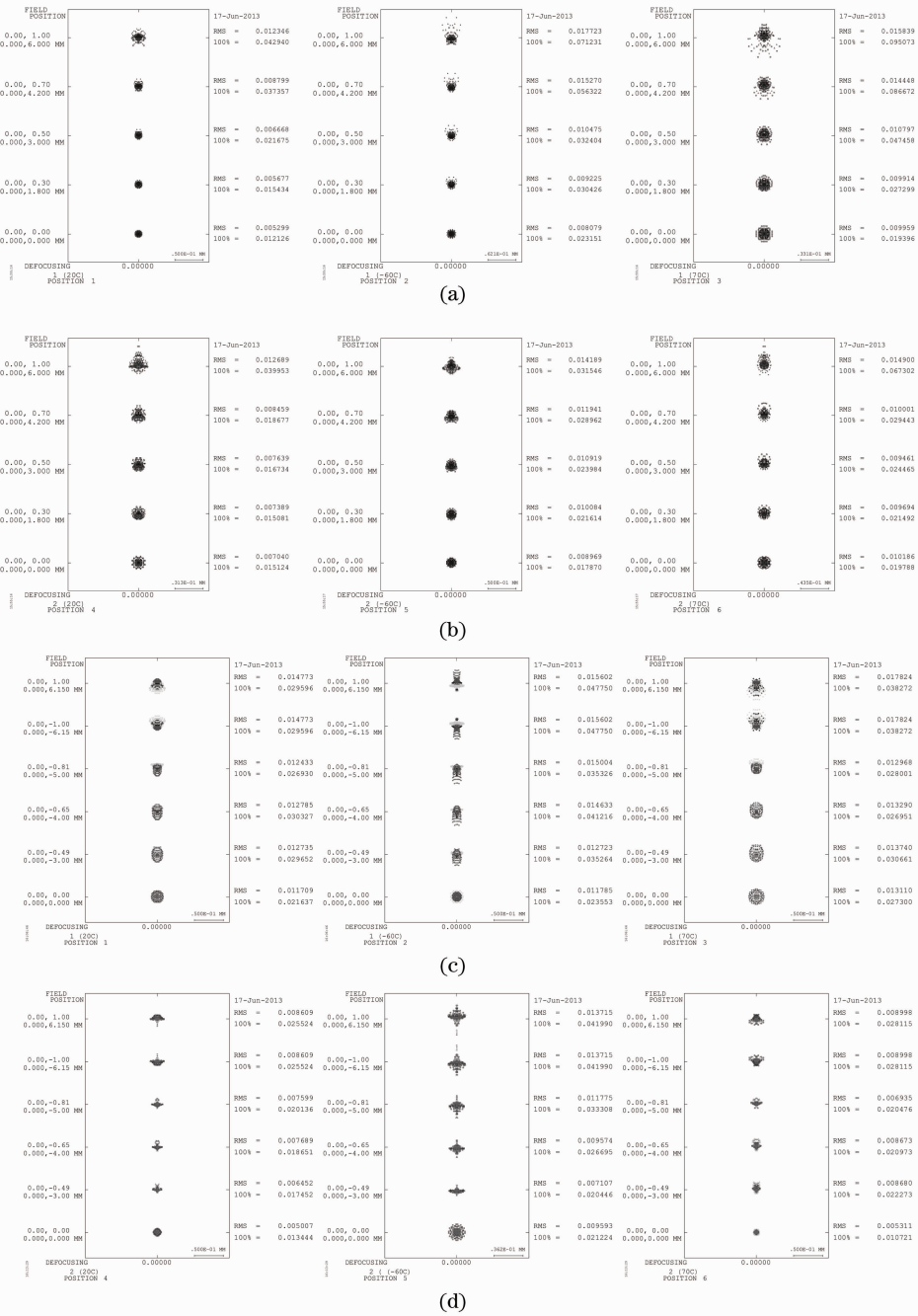


图 8 光学系统点列图。(a)中波,EFL 100 mm, $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $70\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b)中波, EFL 300 mm, $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $70\text{ }^{\circ}\text{C}$; (c) 长波, EFL 100 mm, $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $70\text{ }^{\circ}\text{C}$; (d)长波, EFL 300 mm, $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $70\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig.8 Spot diagram of optical system. (a) Middle wavelength, EFL 100 mm, $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $70\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) middle wavelength, EFL 300 mm, $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $70\text{ }^{\circ}\text{C}$; (c) long wavelength, EFL 100 mm, $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $70\text{ }^{\circ}\text{C}$; (d) long wavelength, EFL 300 mm, $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $70\text{ }^{\circ}\text{C}$

ZnS 镜 1 块,总厚度为 1.1 cm,一块反射镜。此时中波透射率为

$$\tau = (0.98)^7 \exp[-(0.0013 \times 1.9 + 4 \times 10^{-4} \times 3.1 + 0.02 \times 1.1)] = 0.84;$$

长波透射率为

$$\tau = (0.98)^7 \exp[-(0.03 \times 1.9 + 5 \times 10^{-4} \times 3.1 + 0.1 \times 1.1)] = 0.73.$$

光学系统小视场由 10 块镜子构成,其中 Ge 镜 2 块,总厚度为 1.9 cm;ZnSe 镜 3 块,总厚度为 3.1 cm,

ZnS 镜 1 块,总厚度为 1.1 cm,四块反射镜,此时中波透射率为

$$\tau = (0.98)^{10} \exp[-(0.013 \times 1.9 + 4 \times 10^{-4} \times 3.1 + 0.02 \times 1.1)] = 0.80;$$

长波透射率为

$$\tau = (0.98)^{10} \exp[-(0.03 \times 1.9 + 5 \times 10^{-4} \times 3.1 + 0.1 \times 1.1)] = 0.69.$$

上述透射率均可满足远距探测的需求。

5 结 论

设计了一套双波段双视场折反红外光学系统,用于机载光电探测系统。系统工作波段为 4.5~5.1 μm /7.7~9.7 μm ,由反射望远系统和二次成像会聚系统共同构成,通过插入一块平面反射镜实现系统视场的切换。望远系统采用离轴四反构型,结构紧凑,会聚系统采用二次成像构型,实现了 100%冷光阑效率,光学系统采用被动无热化技术,保证了全温度范围内良好的成像质量。

参 考 文 献

- 1 Gerald C Holst. Electro-Optical Imaging System Performance (3rd edn.) [M]. Bellingham: SPIE Press, 2003. 345.
- 2 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.
张兴德, 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.
- 3 Muhammad Nadeem Akram. A design study of dual-field-of-view imaging systems for the 3~5 μm waveband utilizing focal-plane arrays [J]. J Opt A: Pure Appl Opt, 2003, 5(4): 308–322.
- 4 Luo Jinping, Wang Helong, Liu Xin, *et al.*. Passive optical athermalization design in re-imaging optical system [J]. Electronics Optics & Control, 2012, 19(1): 85–88.
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(1): 85–88.
- 5 Li Lin. Modern Optical Design Method [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009.
李林. 现代光学设计方法[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009.
- 6 Pan Junhua. The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surface[M]. Suzhou: Suzhou University Press, 2004.
潘君骅. 光学非球面的设计与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004.
- 7 Chen Jianfa, Wang Helong, Liu Xin, *et al.*. Design of a zoom four-mirror optical system [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(s2): s216001.
陈建发, 王合龙, 刘欣, 等. 变焦四反射镜系统设计[J]. 中国激光, 2012, 39(s2): s216001.