

## 共光路红外双波段小型化光学镜头分析与设计

亓晨 靳阳明 谢晓喻 侯辉辉 李永生

### Miniaturization analysis and design of the common-optical path dual-wave infrared optical lens

Qi Chen, Jin Yangming, Xie Xiaoyu, Hou Huihui, Li Yongsheng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20230722>

#### 您可能感兴趣的其他文章

##### Articles you may be interested in

#### [红外双波段共光路环形孔径超薄成像系统设计](#)

Design of infrared dual-band common path annular aperture ultrathin imaging system

红外与激光工程. 2021, 50(3): 20200270 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200270>

#### [红外双波段/双视场导引头的光学设计](#)

Optical design of infrared dual band/dual field of view seeker

红外与激光工程. 2020, 49(7): 20190490 <https://doi.org/10.3788/IRLA20190490>

#### [折/衍射双波段共光路齐焦光学系统设计](#)

Design of diffractive-refractive dual-band co-path parfocal optical system

红外与激光工程. 2017, 46(5): 518003 <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0518003>

#### [LAMOST高分辨率光谱仪杂散光分析](#)

Stray light analysis on LAMOST high-resolution spectrograph

红外与激光工程. 2019, 48(1): 117003 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0117003>

#### [折衍混合红外双波段变焦光学系统设计](#)

Design of hybrid refractive-diffractive infrared dual-band zoom optical system

红外与激光工程. 2020, 49(10): 20200036 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200036>

#### [多波段共孔径光学成像系统的几种实现途径（特约）](#)

Several ways to realize multi-band common aperture optical imaging system(*Invited*)

红外与激光工程. 2020, 49(6): 20201017 <https://doi.org/10.3788/IRLA20201017>

# 共光路红外双波段小型化光学镜头分析与设计

元 晨, 靳阳明\*, 谢晓喻, 侯辉辉, 李永生

(中国电子科技集团公司第二十七研究所, 河南 郑州 450047)

**摘要:** 针对中长波共光路小型化光学系统设计需求, 建立了基于高斯光学与初级像差理论且尺寸受限下的二次成像结构光学指标分配模型。主镜因其边缘光线高度高和承担的光焦度小, 其球差、色差和二级光谱是该系统像差的主要来源, 为矫正二级光谱, 可使用“-、+、-”结构形式的高、中、低相对色散材料的透镜组合作为主镜结构, 此时主镜的残余像差较小, 采用场镜降低中继镜组光线高度以及非球面矫正球差等方法平衡主镜残余像差。最后开展实例设计, 对提出的小型化设计思想进行验证, 设计了中波波长 3.7~4.8  $\mu\text{m}$ 、长波波长 7.7~9.5  $\mu\text{m}$  的共光路双波红外小型光学系统, 总长不大于 135 mm, 结构小巧紧凑, 光学传函接近衍射极限, 工作温度范围 -40~60  $^{\circ}\text{C}$ , 且对温度不敏感。实现了基于二次成像结构光学指标分配模型的中长波共光路小型化光学系统分析及设计, 满足中长波共光路小型化光学系统需求。

**关键词:** 光学设计; 红外双波段共光路; 像差矫正; 杂散光分析

**中图分类号:** TN216 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230722

## 0 引言

共光路双波红外系统因其结构紧凑、抗干扰能力强而备受关注<sup>[1-6]</sup>, 然其光学设计往往有着严格的尺寸限制, 且需要在小型化要求的前提下实现宽光谱消色差和被动无热化设计。早期及至近年, 人们多采用衍射透镜的负色散特性和低膨胀系数进行色/热差矫正<sup>[7-14]</sup>, 新型光学元件的采用虽然在某种程度上改进了光学设计, 取得了结构简单、紧凑的设计结果, 但同时也会带来一些新的问题, 如衍射透镜一般加工难度大、效率低、且会引入非工作级次杂光等; 其色散特性在中波和长波两个波段上相同, 且与材料本身特性无关, 而系统中其他非衍射透镜的色散特性在中、长两个波段上不同, 且与材料本身特性有关, 这将使得系统像差, 尤其是色差校正变得复杂。得益于新型硫系材料<sup>[15]</sup>的发展, 解决了红外宽波段材料较少的问题。通过上述手段, 红外双光光学系统的小型化有了进一步的提升。2022 年, 长春理工大学的田晓航设计了一款小  $F$  数红外双波段无热化折衍摄远物镜<sup>[16]</sup>,  $F$  数为 1.1, 焦距为 75 mm, 光学系统长度为

105.35 mm, 镜焦比 (即光学系统长度与焦距之比) 为 1.405; 2023 年, 中国航空工业集团公司洛阳光电设备研究所的黄辰旭设计了一款双波段透射式红外光学系统<sup>[17]</sup>, 焦距为 320 mm,  $F$  数为 2, 光学系统长度为 480 mm, 镜焦比为 1.5。为实现基于传统折射元件的小型化双波共光路设计, 文中采用不同材料的透镜组合进行色/热差消除<sup>[17-19]</sup>, 利用高斯光学和初级像差理论, 研究小型化设计的光学指标分配及像差校正特点, 给出适配材料组合及色、热、球差和二级光谱矫正方法, 最后通过实例对提出的小型化设计思想进行验证, 开展成像质量优良、小型、温度不敏感的中长波共光路光学系统优化设计。

## 1 设计原理

### 1.1 光学指标分配模型

为保证 100% 冷光阑效率, 制冷红外光学系统通常将光学系统的出瞳匹配探测器的冷光阑<sup>[20-22]</sup>。一次成像系统的结构形式简单, 但其入瞳远离主镜, 主镜尺寸较大, 而二次成像结构可使入瞳位于主镜附

收稿日期: 2023-12-27; 修订日期: 2024-03-07

作者简介: 元晨, 女, 助理工程师, 硕士, 主要从事红外光学设计方面的研究。

通讯作者: 靳阳明, 男, 高级工程师, 博士, 主要从事光电系统设计与开发方面的研究。

近,主镜口径小,较适合使用在小型化平台上。二次成像结构形式示意图如图 1 所示,一般由主镜组 (Primary lens)、中继镜组 (The relay lens group) 和冷光阑 (Cold diaphragm) 等组成。定义  $f$  为系统焦距,  $f_1$  为主镜组焦距,  $L$  为光学系统总长,  $L_1$  为中继镜组 (Relay lens) 的物距,  $L_2$  为中继镜组的像距。

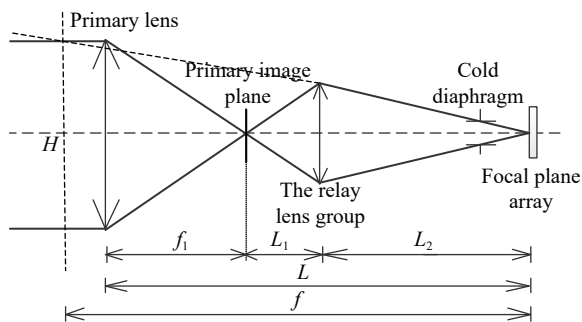


图 1 二次成像示意图

Fig.1 Schematic diagram of the secondary imaging

结合高斯公式,可知该光学系统的筒长与镜焦比成正比,与中继镜组放大倍率成反比,并建立该光学系统的指标分配模型如下:

$$L = f_1 \alpha + \left(1 + \frac{1}{m}\right) L_2 \quad (1)$$

$$f = m f_1 \quad (2)$$

$$L_2 = m L_1 \quad (3)$$

$$F_{\text{主}} = \frac{F_{\text{系统}}}{m} \quad (4)$$

式中:  $m$  为中继镜组放大倍率;  $\alpha$  为主镜组镜焦比。

由于该系统所用制冷型红外探测器的感光面距离冷光阑有距离为 19.7 mm, 中继镜与冷光阑距离较近, 为方便定量分析, 可令  $L_2 > 20$  mm。为直观化上述光学指标分配模型, 分别取主镜镜焦比  $\alpha=0.8$ 、1.0、1.2, 中继镜组放大率  $m$  从 1 变化到 2, 得到  $m$ 、 $L$ 、 $\alpha$  之间的限制关系, 如图 2 所示。

可以看出, 随着中继镜组放大倍率增加, 光学系统总长减小; 同一中继镜组放大倍率下, 通过减小主镜组的镜焦比, 光学系统总长也减小。因此, 可以通过从增大中继镜组放大倍率  $m$  和减小主镜镜焦比  $\alpha$  的角度考虑减少光学系统总长。但也可以看到, 随着中继镜组放大倍率增加, 主镜  $F$  数变小。当  $m$  增加到 2 时, 主镜  $F$  数降到 1。由像差理论可知, 各单色像差

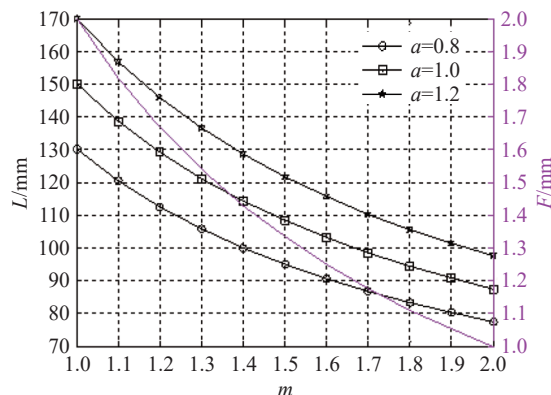


图 2  $m$ 、 $L$ 、 $\alpha$  的限制关系

Fig.2 Restriction relationships of  $m$ ,  $L$ , and  $\alpha$

均与系统的  $F$  数有关,  $F$  数越小, 反而将系统复杂化, 难以减小尺寸, 主镜  $F$  数以不小于 1 为宜。

### 1.2 像差特性分析

上述分析得到在系统约束条件下理想光学系统结构特点, 然而实际光学系统中不可避免地存在差与色差, 且红外光学系统特殊的热效应会引起不同温度下像面的位移, 因此接下来对该光学系统进行像差分析与无热化设计。

根据初级像差理论, 光学系统的球差、色差、二级光谱公式<sup>[23]</sup>如下:

$$\delta L = -\frac{1}{2n'u'^2} \sum nih(i-i')(i'-u) \quad (5)$$

$$\delta l_{ch}' = -\frac{1}{n'u'^2} \sum h^2 \frac{\phi}{v} \quad (6)$$

$$\sum C_i^{F,D} = \sum h^2 \frac{\phi}{v} \frac{n_F - n_D}{n_F - n_C} \quad (7)$$

式中:  $\frac{n_F - n_D}{n_F - n_C}$  为相对色散, 符号定义为  $P$ 。

在该光学系统中, 根据像差理论可知, 主镜边缘光线较高, 承担主要的球差、色差、二级光谱等系统像差, 为实现消像差目的, 必须对主镜的像差进行平衡。由于主镜与中继镜组光焦度均为正, 根据公式 (6) 可知, 正透镜组不能实现消色差, 必须引入负光焦度透镜。负光焦度透镜的引入应尽可能多地贡献色散系数, 尽可能少地贡献光焦度, 原正光焦度主镜更多地贡献正光焦度, 少贡献色散系数, 这就要求负镜材料具备小阿贝数 (符号为  $V$ ), 正镜材料具有大阿贝数。表 1 列出了几种红外材料在双波段范围的光学特性, 角标中的  $f$ 、 $d$ 、 $c$  有如下对应关系:  $f=3.7 \mu\text{m}$ ,

$c=9.5 \mu\text{m}$  波长,  $d=4.8、7.7 \mu\text{m}$ 。从表 1 中可以看出, ZnS 材料的阿贝数最小, 约为其他红外材料的 1/4, 较

适合选为负镜材料。而除 ZnSe、IRG208 外, 其余材料均比较适合选作正镜。

表 1 几种红外材料的光学特性

Tab.1 Optical properties of several infrared materials

Materials	$N_f$	$N_d$		$N_c$	$P_d$		$V_d$	
		$d=4.8 \mu\text{m}$	$d=7.7 \mu\text{m}$		$d=4.8 \mu\text{m}$	$d=7.7 \mu\text{m}$	$d=4.8 \mu\text{m}$	$d=7.7 \mu\text{m}$
IRG201	2.513855	2.510236	2.502922	2.497732	0.224495	0.678092	93.66783	93.21424
IRG202	2.511224	2.507694	2.500724	2.495913	0.23056	0.685739	98.46816	98.01298
IRG203	2.607391	2.603005	2.594223	2.588077	0.227079	0.681755	82.9957	82.54102
IRG204	2.786165	2.781418	2.773711	2.769073	0.277744	0.728621	104.2225	103.7716
IRG205	2.62355	2.619273	2.610849	2.605094	0.231726	0.688172	87.73343	87.27698
IRG206	2.796253	2.791509	2.783922	2.779417	0.281747	0.732413	106.4065	105.9559
IRG207	2.623095	2.619482	2.613569	2.609976	0.27538	0.726078	123.4498	122.9991
IRG208	2.418159	2.413559	2.40087	2.390473	0.166146	0.624467	51.05802	50.59969
IRG209	3.165434	3.15623	3.1459	3.141838	0.390086	0.827866	91.37959	90.94181
Germanium	4.029211	4.017606	4.007251	4.004855	0.476502	0.901649	123.8955	123.4703
ZnSe	2.434334	2.430243	2.418698	2.409392	0.164017	0.626893	57.34287	56.88
ZnS	2.254125	2.247816	2.22558	2.206207	0.13165	0.595696	26.04061	25.57656

在引入 ZnS 负镜后, 主镜的色差得到平衡, 然而根据公式 (7), 若靠“+、-”光焦度的镜头结构, 既要消色差, 又要消二级光谱, 势必要求两种材料的相对色散相同, 但由表 1 可知, 所备选的宽波段红外材料其相对色散均比 ZnS 的略高, 即“+、-”光焦度的镜头结构主镜组的二级光谱将是一个正值, 不能同时满足消色差和二级光谱的要求。因此, 为消二级光谱, 应在主镜附近再引入一片负镜, 构成“-、+、-”结构, 分析如下: 主镜组各个镜片上光线高度接近, 将光焦度、色差和二级色散公式展开得到如下公式<sup>[23]</sup>:

$$\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 = \phi \tag{8}$$

$$\frac{\phi_1}{v_1} + \frac{\phi_2}{v_2} + \frac{\phi_3}{v_3} = \varepsilon_1 \tag{9}$$

$$\frac{\phi_1}{v_1} P_1 + \frac{\phi_2}{v_2} P_2 + \frac{\phi_3}{v_3} P_3 = \varepsilon_2 \tag{10}$$

式中:  $\varepsilon_1$  与  $\varepsilon_2$  为小量值。结合表 1 中的材料特性, 可令  $v_1 = v_2 = 4v_3$ , 联立公式 (8)~(10), 可近似得到如下关系式:

$$\frac{\phi}{3}(P_1 - P_3)P_1 + \frac{\phi_2}{4}(P_2 - P_1) = \varepsilon_2 \tag{11}$$

式中:  $\phi、\phi_2$  均为正值。已选定的 3 镜 ZnS 其  $P_3$  较小, 为使上式能够趋于一个无穷小量, 则要求  $P_1$  比  $P_2$  大, 表 1 中 Germanium 和 IRG209 的相对色散较大, 通常采用铝合金作为镜筒材料, IRG209 的膨胀系数与铝合金材料热膨胀系数相当, 较适合作为另一片负镜的玻璃材料, 用于矫正二级光谱, 且不引入热差。

红外光学系统因热效应造成镜片及结构件热膨胀, 会导致光学系统焦面随着温度漂移。目前国内外消热差常用以下三种方式: 机械被动式消热差、电子主动式消热差以及光学被动式消热差。由于前两种方式均需依赖机械装置进行补偿, 体积会随之变大, 不利于整机小型化的实现, 因此文中采用光学被动式消热差方法, 利用光学材料热特性以及机械材料热特性进行光学补偿, 进而减小热差引起的离焦, 该方法无需引入补偿结构, 有利于整机结构小型化的实现。消热差方程如下:

$$\frac{1}{h_1^2 \phi^2} \sum h_i^2 \chi_i \phi_i = \sigma_n L \tag{12}$$



式中： $\chi_i$ 为透镜光热膨胀系数； $\sigma_h$ 为结构件材料的热膨胀系数； $L$ 为机械结构长度。

## 2 实例设计

为验证上述设计思想，选择某一特定的制冷中长红外共光路光学系统作为实例进行优化设计，其设计参数以及探测器指标如表 2 所示。

表 2 光学系统设计参数

Tab.2 Design parameters of the optical system

Index	Parameter
Working band/ $\mu\text{m}$	3.7-4.8
	7.7-9.5
$F$ -number	2
Focal length/mm	100
Field of view	$>6^\circ \times 7^\circ$
Efficiency of cold diaphragm	100%
Temperature/ $^\circ\text{C}$	-40-60
Size of area array	640 $\times$ 512
Pixel/ $\mu\text{m}$	20
Distance form cold diaphragm to detector/mm	19.7

系统采用二次成像透射式共光路结构，为实现光路结构紧凑，使光学系统后截距略大于探测器的光窗至光焦面的距离，根据表 2 中探测器冷光阑至焦面距离，近似地令  $L_2 = 20 \text{ mm}$ ， $m=2$ 。根据表 2 得到系统  $F$  数为 2，系统焦距为 100 mm，结合光学系统参数中  $F$  数与系统焦距， $D = 50 \text{ mm}$ ，结合第 1 节公式得到主镜组  $F$  数为 1， $f_1 = 50 \text{ mm}$ ， $L_1 = 10 \text{ mm}$ ，当镜焦比为 1.8 时， $L=120 \text{ mm}$ 。将设计值输入 Zemax 软件，根据分析得到的主镜结构关系，设定前三片镜片玻璃材料分别为 IRG209、IRG202 和 ZnS，完成光路设计，最终得到的光学系统设计光路如图 3 所示，该光学系统主镜焦距为 46.551 mm，主镜镜长为 86.522 mm，光学系统总长  $L$  为 134.9 mm，镜焦比为 1.349。

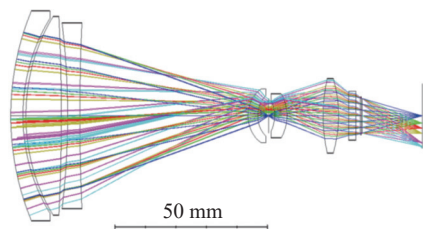


图 3 共光路双波段红外光学系统布局图

Fig.3 Layout of the dual-band infrared optical system

## 3 实例分析

光学系统总长 134.9 mm，中继镜组放大倍率 2.2，主镜组焦距 46.5 mm，与设计分析相符。图 4 为光学系统镜组关系，该光路共六片镜片，主镜的三片镜片光线高度接近，第四、五片透镜靠近一次像面，用于偏折光线降低中继镜组光线高度和调整热离焦焦面位置，从而减弱其像差影响，并实现消热差设计。材料选择主要为 Ge、ZnS 与硫系玻璃；主镜材料选择后，光路仍有较大球差，若增加镜片平衡球差，会增加光路重量，且一定程度上拉长了光学系统，因此引入非球面。根据公式 (5) 可知，边缘光线高度越大，球差越大。根据初级相差理论可知，球差的矫正与彗差、像散成正相关，因此应在靠近光阑的镜片上设置非球面，最终在第 10 面、11 面与 12 面上引入非球面，镜筒采用铝合金材料，其热膨胀系数为  $2.36 \times 10^{-5} \text{ mm}^\circ\text{C}$ ，优化后得到成像质量优良的中长红外共光路光学系统，长波后截距为 19.8688 mm，中波后截距为 19.8715 mm，相差 0.0027 mm，满足共光路共焦面设计要求。

在工作温度范围内，中波、长波在奈奎斯特频率 25 lp/mm 处的调制传递函数 (MTF) 如表 3 所示。中波红外 MTF 在全温度范围内均大于 0.42，长波红外 MTF 在全温度范围内均大于 0.28，成像质量优异。图 4 为常温下中波红外与长波红外的 MTF 图。

表 3 光学系统 MTF

Tab.3 MTF of optical system

MTF		On the	0.7 field	Full field
		optical axis	of view	of view
		25 lp/mm	25 lp/mm	25 lp/mm
20 $^\circ\text{C}$	3.7-4.8 $\mu\text{m}$	0.62	0.47	0.48
	7.7-9.5 $\mu\text{m}$	0.41	0.27	0.25
-40 $^\circ\text{C}$	3.7-4.8 $\mu\text{m}$	0.58	0.42	0.48
	7.7-9.5 $\mu\text{m}$	0.41	0.26	0.28
60 $^\circ\text{C}$	3.7-4.8 $\mu\text{m}$	0.51	0.51	0.42
	7.7-9.5 $\mu\text{m}$	0.42	0.30	0.28

该共光路双波段小型红外光学系统的杂散光分析结果如图 5 与图 6 所示，由于该光学系统冷阑效率达到了 100%，因此仅考虑光学系统内杂散光引起的冷反射。外壳与压圈隔圈作简化处理，相接的部分作

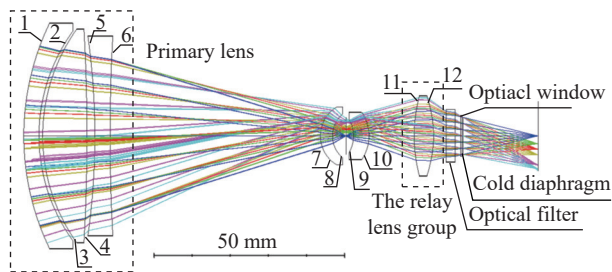


图 4 共光路双波段红外光学系统详细布局图

Fig.4 Detailed layout diagram of dual band infrared optical system with common optical path

一体化处理, 近似将外壳内表面看作主要杂散光发出源, 光源类型为面光源。热辐射强度主要与结构件温度和表面发射率有关, 系统工作温度范围为  $-40\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 分别设置面光源温度为  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 发射面型为朗伯发射面型; 设置外壳内表面发射率为 0.98; 根据光学系统仿真结果输入镜片材料参数, 设置

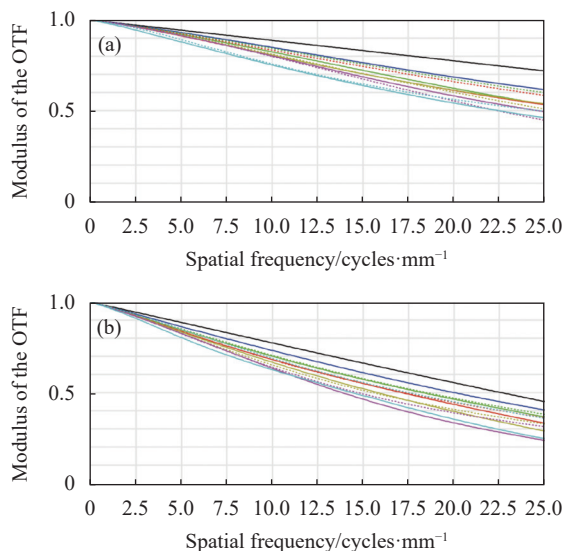


图 5 中波红外 MTF (a) 与长波红外 MTF (b)

Fig.5 MTF of medium-wave infrared (a) and MTF of long-wave infrared

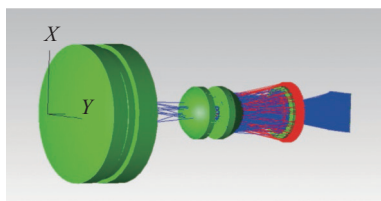
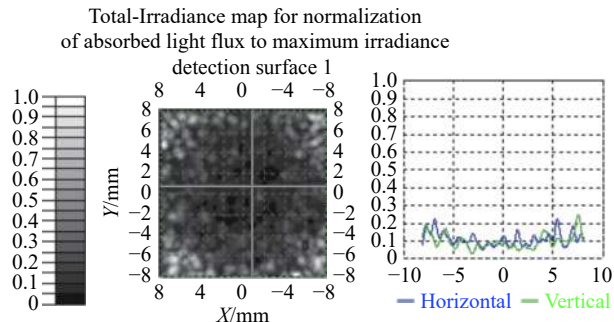


图 6 光学系统杂散光分析

Fig.6 Stray light analysis of optical systems



Min: 0.024 618, Max: 1, Ave: 0.177 21  
Total irradiance: 2.879 2e-007 W, Irradiance:  
0.000 158 21, 14 005 incident rays

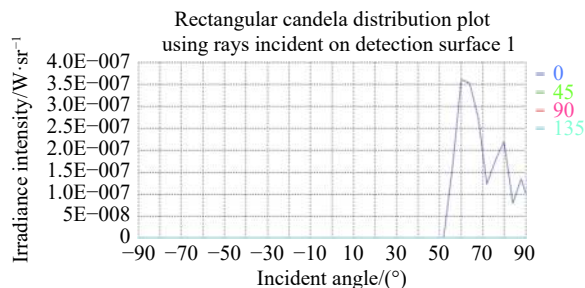


图 7  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  杂散光分析结果

Fig.7 Stray light analysis results under  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$

外壳镀膜参数。最终外壳内表面光源引起的光学系统杂散光在像面上的辐照度在  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  时最大不超过  $5.3\times 10^{-9}\text{ W/m}^2$ , 在  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  时最大不超过  $9.4\times 10^{-8}\text{ W/m}^2$ , 图 7 显示了在  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 像面上杂散光辐照度最大不超过  $3.7\times 10^{-7}\text{ W/m}^2$ , 均不会在像面上产生杂斑。

基于光路设计研制了样机, 实测得到镜片参数、镜片间隔以及表面倾斜的实测公差数据, 如表 4 所示。

将表 4 中数据输入到 Zemax 中, 像质受到一定的影响。以常温下中波全视场 MTF 为例, 从图 8 中可

表 4 光学系统实测公差数据

Tab.4 Measurement tolerance data of optical systems

Surface	Radius/mm	Thickness/mm	Surface tilt/( $^{\circ}$ )
1	-0.032	-0.035	0.000 7
2	0.003	-0.024	
3	0.004	0.002	0.005 62
4	-0.231	-0.066	
5	-0.036	0.015	0.000 504
6	0.026	0.001	
7	0.002	0.016	0.014 6
8	0.002	-0.086	
9	-0.005	-0.006	0.004 41
10	-0.001	0.038 222	
11	0.006	0.035	0.005 84
12	0.031	0.022	

以看出, MTF 从原本的 0.48 降至 0.31。通过焦面补偿, 将像面向前移动 0.053 mm, 最终得到的系统常温下中波全视场 MTF 为 0.41, 该系统具备加工条件。

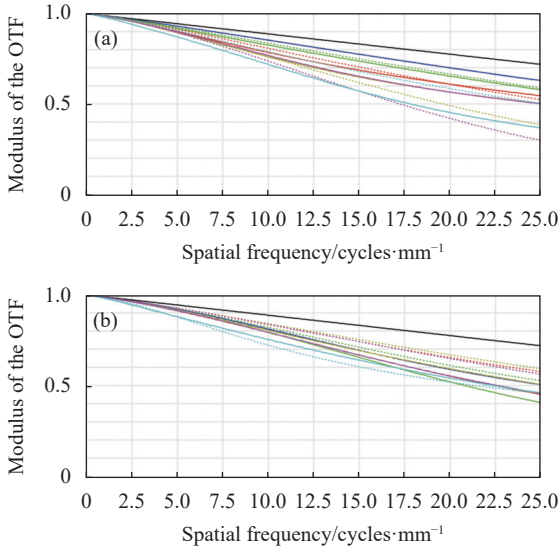


图 8 常温下中波 MTF。(a) 公差数据输入后 MTF; (b) 焦面补偿后 MTF

Fig.8 Medium wave MTF at room temperature. (a) MTF after tolerance data input; (b) MTF after focal plane compensation

#### 4 结 论

文中基于高斯光学建立了光学指标分配模型, 分析得到了系统筒长、放大倍率与镜焦比之间的限制关系; 在此基础上进行像差分析与无热化设计, 重点分析了主镜组球差、色差与二次像差的矫正方法, 通过红外玻璃材料性质分析选定了高部分色散负镜、大阿贝数正镜以及小阿贝数负镜构成主镜的“-、+、-”结构; 同时对该系统进行被动式无热化设计; 最终在此研究基础上进行实例设计, 得到系统参数如下的光学系统: 工作波段 3.7 ~ 4.8  $\mu\text{m}$ 、7.7 ~ 9.5  $\mu\text{m}$ ,  $F$  数为 2,  $f=100$  mm, 视场角大于  $6^\circ \times 7^\circ$ , 工作温度范围为  $-40 \sim 60$   $^\circ\text{C}$ 。最终得到的光学系统成像质量优良, 工作温度范围内中波 MTF 最低大于 0.42, 长波 MTF 最低大于 0.28; 长波后截距为 19.8688 mm, 短波后截距为 19.8715 mm, 相差 0.0027 mm, 镜焦比为 1.349, 满足共光路共焦面光学系统设计需求。后续将开展后组镜片的消像差能力研究, 减少镜片和非球面使用数量。

#### 参考文献:

- [1] Yu Jun, Liu Xiaotian, Niu Xinshang, et al. Dual-band freeform prism in middle and long wave infrared region [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(8): 0822016. (in Chinese)
- [2] Wang Qi, Piao Mingxu, Meng Yutong, et al. Design of infrared dual-band common path annular aperture ultrathin imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(3): 20200270. (in Chinese)
- [3] Mao Yankai, Zhao Zhenyu, Zhang Guohua, et al. Optical design of infrared dual band/dual field of view seeker [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(7): 20190490. (in Chinese)
- [4] Chen Yang, Zhang Anfeng, Ru Zhibing. Design of infrared dual band optical system based on anti-laser detection[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(9): 0918002. (in Chinese)
- [5] Cheng Zhifeng, Liu Fuhe, Xun Xianchao. Opto-mechanical design and analysis of dual-band sharing aperture imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3366-3372. (in Chinese)
- [6] Lin Qing, Jin Weiqi, Guo Hong, et al. Confocal-window telescope objective design in visible and long-wave infrared [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0922005. (in Chinese)
- [7] Li Shenghui, Li Xin, Li Hongjing. Design of infrared dual-band common aperture thermal elimination optical system based on harmonic diffraction [J]. *Infrared Technology*, 2020, 42(1): 19-24. (in Chinese)
- [8] Yang Liangliang, Shen Fahua, Liu Chenglin, et al. Athermal design of infrared dual-band optical system with double-layer diffractive optical elements [J]. *Infrared Technology*, 2019, 41(8): 699-704. (in Chinese)
- [9] Zhang Jianzhong, Yang Le, Guo Banghui, et al. Optical design of MWIR/LWIR scene projector with hamonic diffraction element [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(7): 1758-1764. (in Chinese)
- [10] Gao Ming, Xu Huangrong, Liu Jun, et al. Design of diffractive-refractive dual-band co-path parfocal optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(5): 0518003. (in Chinese)
- [11] Yang Hongtao, Yang Xiaofan, Mei Chao, et al. Design of hybrid refractive-diffractive infrared dual-band zoom optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(10): 20200036. (in Chinese)
- [12] Yue Baoyi, Liu Jun, Guo Jia, et al. Optical system design of folded/diffractive co-aperture infrared dual-band beam positioner[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(4): 0418003. (in Chinese)

- [13] Pan Yue, Xu Xiping, Qiao Yang. Opto mechanical structural design for two DMD infrared dual band scene simulator [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(12): 2994-3002. (in Chinese)
- [14] Zhang Yu, Wang Wensheng. Design of cooled infrared dual-band common path refractive-diffractive telephoto objective [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0522006. (in Chinese)
- [15] Chen Jinjin, Zhou Gangjie, Tan Yan, et al. Infrared imaging optical systems based on novel chalcogenide glasses (*invited*) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(5): 20230102. (in Chinese)
- [16] Xiaohang Tian, Changxi Xue. Athermalization design of small *F*-number refractive-diffractive telephoto objective lens in infrared dual-band [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(14): 1422002. (in Chinese)
- [17] Huang Chenxu. Design of dual-band transmission infrared non-thermal optical system [J]. *Henan Science and Technology*, 2023, 42(18): 9-13. (in Chinese)
- [18] Wang Shaobai, Song Lu, Huang Chenxu. Athermal design of dual-band infrared optical system with common aperture [J]. *Henan Science and Technology*, 2023, 42(8): 9-13. (in Chinese)
- [19] Fu Qiang, Zhang Xin. Materials choose for mid-wave/long-wave dual-waveband infrared optics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0208003. (in Chinese)
- [20] Yu Yang, Jian Yi, Pan Zhaoxin, et al. Design and test-result of re-imaging athermal infrared optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(12): 3180-3184. (in Chinese)
- [21] Zhang Bao, Cui Enkun, Hong Yongfeng. Infrared MWIR/LWIR dual-FOV common-path optical system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(2): 395-401. (in Chinese)
- [22] Luo Jinping, Wang Helong, Liu Xin. Passive optical athermalization design in re-imaging optical system [J]. *Electronics Optics & Control*, 2012(4): 85-88. (in Chinese)
- [23] 李晓彤, 岑兆丰. 几何光学·像差·光学设计 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2020: 127-134.

## Miniaturization analysis and design of the common-optical path dual-wave infrared optical lens

Qi Chen, Jin Yangming\*, Xie Xiaoyu, Hou Huihui, Li Yongsheng

(The 27th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation,  
Zhengzhou 450047, China)

### Abstract:

**Objective** This paper aims to realize the miniaturization design of medium and long wavelength common optical path optical systems.

**Methods** An optical index allocation model for secondary imaging structures under size constraints based on Gaussian optics and primary aberration theory was established. Lens combinations of high, medium and low relative dispersion materials in the form of "-", "+, -" structures are used as the primary mirror structure to correct the secondary spectrum; Meanwhile, field lenses and aspheric surfaces are used to correct spherical aberration to reduce the relay mirror. The light height is set to balance the residual aberration of the primary mirror.

**Results and Discussions** Because of the high edge light height and small optical power of the primary mirror, its spherical aberration, chromatic aberration and secondary spectrum are the main sources of aberrations in the system. To correct the secondary spectrum, the "-", "+, -" structure can be used. A lens combination of high, medium and low relative dispersion materials is used as the main mirror structure. At this time, the residual aberration of the main mirror is small. Field lenses are used to reduce the light height of the relay lens group and aspherical surfaces are used to correct spherical aberration to balance the residual main mirror Aberration.

**Conclusions** Based on the above theory, a common optical path dual-wave infrared small optical system with a



medium wave wavelength of 3.7-4.8  $\mu\text{m}$  and a long wave band of 7.7-9.5  $\mu\text{m}$  is designed. The total length of the system is no more than 135 mm, the structure is small and compact, the optical transfer function is close to the diffraction limit, and the operating temperature range covers  $-40-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  and is not sensitive to temperature. The analysis and design of a medium and long-wavelength common optical path miniaturized optical system based on the secondary imaging structure optical index distribution model are realized to meet the needs of a medium and long-wavelength common optical path miniaturized optical system.

**Key words:** optical design; infrared dual band common optical path; aberration correction; stray light analysis