

中波红外长焦距折反光学系统设计

虞林瑶^{1,2*}, 魏群¹, 张天翼^{1,2}, 王超¹, 韩景壮¹, 朱瑞飞¹, 宋宝奇¹, 贾宏光¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:针对多模制导中长焦距红外光学系统结构紧凑及宽温度范围热稳定性的要求,设计了一种中波红外折反光学系统。该系统根据其它模式制导的要求,采用固定焦距和口径的主镜,通过二次成像,在保持长焦距的同时减小了透镜的口径,降低了到达中继成像系统主光线的高度,同时也降低了制造成本。设计了波长为 $3.7\sim 4.8\ \mu\text{m}$ 、焦距 f 为300 mm、 F 数为2的中波红外成像系统。结果表明,该系统结构紧凑像质优良,各视场光学传递函数均大于0.6,接近衍射极限,并且在 $-50\sim 70\ ^\circ\text{C}$ 可实现光学被动消热差。针对该光学系统进行了公差分析并提出了抑制杂散辐射的方法,该系统满足实际加工和应用需求。

关键词:红外光学系统;折反系统;无热化

中图分类号:TN215;TH691.9 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20150802.0234

Design of long focal infrared catadioptric optical system for multi-guided system

YU Lin-yao^{1,2*}, WEI Qun¹, ZHANG Tian-yi^{1,2}, WANG Chao¹, HAN Jing-Zhuang¹,

ZHU Rui-fei¹, SONG Bao-qi¹, JIA Hong-guang¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

* *Corresponding author, E-mail: yulinyao87@163.com*

Abstract: In order to meet the requirement of compact structure and athermal stability with wide temperature range, a middle infrared catadioptric optical system is designed. According to the requirements of other guided modes, the focal length and aperture of the primary mirror is fixed. The height of the principal ray reaching the relay system can be reduced. The aperture of the lens can be decreased, which will lower the cost. A compact infrared imaging system with a wavelength $3.7\sim 4.8\ \mu\text{m}$, focal length $f=300\ \text{mm}$, F number 2, is presented in this paper. The results show that the system performs well and the optical transfer function of each field is close to the diffraction limit. Between $-50\sim 70\ ^\circ\text{C}$, passive optical athermalization can be realized in this system. For this system, the tolerance analysis and some ways of resisting the stray light are presented at

收稿日期:2014-10-17;修订日期:2015-01-15

基金项目:装备预研基金资助项目(No. 51301060207)

last. It shows that the MIR system meet the demand of actual processing and application.

Key words: infrared system; catadioptric system; athermalization

1 引言

近年来,随着红外探测器技术的飞速发展,探测器像元尺寸逐渐缩小,面阵规模逐渐增大,这为设计简单、紧凑、远作用距离的前视红外光学系统奠定了基础。目前在中波红外长焦距光学系统设计中,由于大口径的红外材料价格昂贵,因此多采用反射式的结构,但是视场无法做大^[1-2]。采用折反式红外成像系统能够集合透射式和反射式的优点,具有更大的远摄比和视场。尤其在多模式混合制导系统中,要求光学系统有较低的遮拦比和紧凑的结构,以减少对其它模式探测的影响,这种结构的优势更为明显^[3,4]。

一般多模制导系统的工作环境温度在 -50 ~ 70 °C,而红外材料的折射率受温度影响较大,严重降低成像质量。目前针对红外系统的无热化分析。主要采用衍射元件,利用其特殊的色散性质,实现消色差、消热差。但是衍射元件的衍射效率也是需要考虑的问题,而且会给系统引入额外的杂散光^[5-6]。另外机电式主动调焦补偿系统也常用于红外光学系统无热化设计当中。

针对上述分析,本文设计了一种适用于多模式制导的长焦红外折反系统,波段为 3.7 ~ 4.8 μm, F 数为 2, 100% 冷光阑效率,并且在 -50 ~ 70 °C 实现了消热差,成像质量接近衍射极限。

2 折反系统设计

中波红外系统由于要满足冷阑效率,需要使系统的出瞳与探测器的冷阑匹配,而如果采用 R-C 反射镜结构,将会导致次镜口径过大,增加系统的遮拦比,因此中波红外反射系统通常采用二次成像的方式来实现,如图 1 所示。前组采用 R-C 双反射结构,后组采用具有一定放大率的中继成像系统^[7-8]。

R-C 系统的初始结构可由系统主镜的曲率半径 R_1 、遮拦比 α 和次镜的放大率 β 由高斯公式求

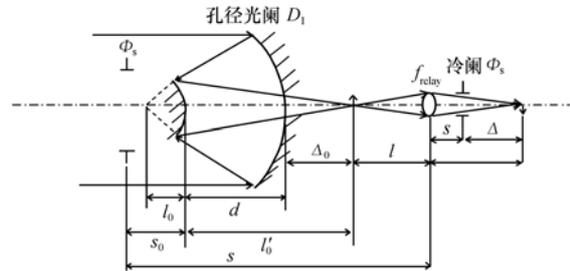


图 1 二次成像折返结构

Fig. 1 Relay imaging system

得:

$$R_2 = \frac{\alpha\beta}{1 + \beta} R_1. \tag{1}$$

R-C 系统不产生色差,仅需考虑单色像差,在消球差和慧差的情形下,即 $S_I = S_{II} = 0$, 可以解得:

$$e_1^2 = 1 + \frac{2\alpha}{(1 - \alpha)\beta^2}, \tag{2}$$

$$e_2^2 = \frac{\frac{2\beta}{1 - \alpha} + (1 + \beta)(1 - \beta)^2}{(1 + \beta)^3}. \tag{3}$$

于是在确定主镜焦距及次镜的遮拦比和放大率后,便可以确定 R-C 系统的初始结构。

中继成像系统具有一定放大倍率 ω , 放大倍可以利用前组反射系统焦距 f_1 与系统总焦距 f 获得:

$$\omega = \frac{f}{f_1}. \tag{4}$$

而中继成像的两镜系统具体的初始结构参数有如式(5):

$$l = \frac{B(1 - A)(s_0 - l'_0)}{A - B}, \tag{5}$$

式中, $A = \frac{2D_1 F l_0}{r_1 l'_0}$, F 是系统的 F 数; $B = -\frac{d}{M s_0}$, $M = \frac{D_1}{\phi'_s}$ 。

式(5)中各个变量的物理意义见图 1 所示。于是通过式(5),只要确定了两镜系统的结构以及探测器的参数,则可以算出转像系统的共轭成

像位置及其焦距。为了满足大视场和消色差要求,转像系统通常需要2~3片透镜组成。

综上所述,利用式(1)~(5)便可以确定整个光学系统的初始结构。

3 无热化分析

由于红外光学材料的折射率温度系数 dn/dt 比可见光区域的常见玻璃材料大许多,比如锗(Ge)单晶的 dn/dt 值约为 $396 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,而K9玻璃的 dn/dt 值仅为 $2.8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。红外材料在不同温度下的折射率的变化将会引起光学系统中光线光程的变化,另外温度的变化也会使透镜的厚度和曲率半径发生变化,这些将会降低成像的质量。由此可见当进行红外光学设计时,必须要进行无热化分析。

为实现光学系统无热化,目前采用的方法可分为三类:机械被动式,机电主动补偿式和光学被动式。本文采用光学被动式实现光学系统的无热化。该光学系统中前组为全反射结构,当反射镜受到均匀的热影响并达到热稳定状态时,其面型的变化很小,由单个反射镜引入的像差可以忽略。但是主次镜的连接结构件的膨胀或收缩会使得间距发生变化,这是前组热像差的主要来源。中继成像系统受温差产生的像差来源包括透镜和结构件。透镜结构件应采用线膨胀系数小的材料,其中钛合金不仅线膨胀系数小而且质量轻、硬度高,是结构件的理想材料。这样可以降低系统消热差的难度,提高结构强度,但是会提高成本。后组采用了全透射式结构,需要单独消色差,同时也要配合前组实现整个系统的消热差,并承担一定的光焦度。这导致后组的设计比较困难,所以拟采用三片式结构,满足以下方程:

$$\frac{1}{h_1} \sum_i h_i \Phi_i = 0, \quad (6)$$

$$\frac{1}{h_i^2} \sum_i h_i \frac{\partial \Phi_i}{\partial T} = \frac{1}{h_1^2} \sum_i h_i \rho_i \Phi_i = 0, \quad (7)$$

$$\frac{1}{h_1^2} \sum_i h_i \frac{\partial \Phi_i}{\partial \lambda} = \frac{1}{h_1^2} \sum_i h_i \theta_i \Phi_i = 0, \quad (8)$$

式中, h_i 为第一近轴光线在各透镜组的高度,系统中采用密接透镜结构时, $h_i = h_1$; Φ_i 为第 i 个透镜的光焦度; Φ 为后组总的光焦度; ρ_i 和 θ_i 为材

料的消热差系数和消色差系数。

通过分析目前国内常用中波红外材料的温度特性(如表1所示),将表1中的数据带入式(6)~(8),进行计算后,其中采用Ge、ZnSe和ZnS这3种材料可以实现后组中继成像系统的设计,并且达到消热要求。为了校正系统中的高级球差和慧差,降低系统复杂度,提高成像质量,在Ge和ZnSe的前表面采用了高次非球面。

表1 常见红外材料的消热差和消色差系数

Tab.1 Coefficients of athermalization and achromatism of common infrared materials

材料	折射率($10 \mu\text{m}$)	$P/10^{-6}$	$\theta/10^{-3}$
Ge	4.003 1	125.8	0.285
ZnSe	2.406 5	38.2	4.28
ZnS	2.200 2	33.8	10.6
GaAs	3.277 9	60	2.9

4 光学系统参数

该光学系统用于中波红外和毫米波复合导引系统,因此根据总体要求主反射镜为毫米波与中波共用,其面型为抛物面,焦距 $F_1 = 240 \text{ mm}$ 。中波红外成像系统采用 $F/2, 320 \times 256 \text{ pixel}$,像元尺寸为 $30 \mu\text{m}$ 的制冷型探测器。光学系统参数如表2所示。

表2 光学系统参数

Tab.2 Parameters of optics system

波段/ μm	焦距/mm	视场 $2\omega/(^\circ)$	相对口径
3.7~4.8	300 ± 0.1	2.24	0.5

设计指标如下:光学系统结构应当紧凑,远摄比小于0.6,中心遮拦小于30%,为了最大幅度的抑制背景辐射的影响,要求实现100%冷光阑匹配。设计要求全视场单元像元内能量集中度85%以上, $-40 \sim 60 \text{ } ^\circ\text{C}$ 温度范围内实现光学被动消热差。

5 设计结果

设计中主反射镜的面型为抛物面,焦距 $F_1 =$

120 mm,这样不仅满足毫米波成像要求,也方便主反射镜的安装和检测,次反射镜为双曲面。考虑到次反射镜的口径,遮拦比和两镜的间距,前组的焦距定为 300 mm,中继成像系统的放大率为 -1,采用三片式结构,分别是 Ge、ZnSe 和 ZnS。由于系统焦距较长,口径较大,导致像差校正困难。设计中分别在 Ge、ZnSe 的前表面设置了两个高次非球面,对系统中的球差、慧差和像散单色像差进行校正。这两种材料物理性质适宜进行高次非球面的加工。利用 Focus Software 公司的 ZEMAX-EE 软件的用户自定义约束函数,对系统进行全局优化和局部优化,最终实现如图 2 所示的光学系统设计。透射元件的直径都小于 25 mm,有益于系统质量和成本的控制。

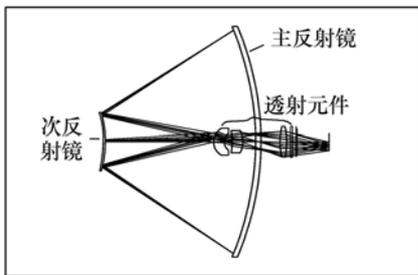


图 2 光学系统结构图

Fig. 2 Configuration of optical system

图 3 ~ 图 5 分别是光学系统在 20、-50、70 °C 时的光学传递函数曲线,从图中可以看出,在探测器的特征频率 17 lp/mm 处,不管是中心视场还是边缘视场,该光学系统的传递函数均接近

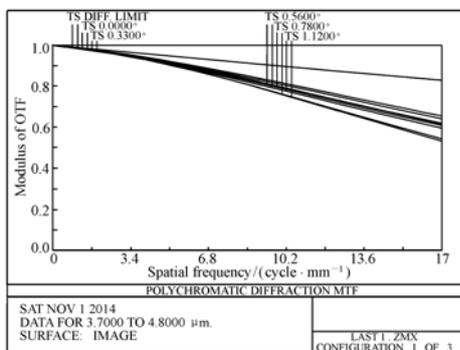


图 3 20 °C 时的传递函数曲线

Fig. 3 Modulation transfer function at the temperature of 20 °C

衍射极限。

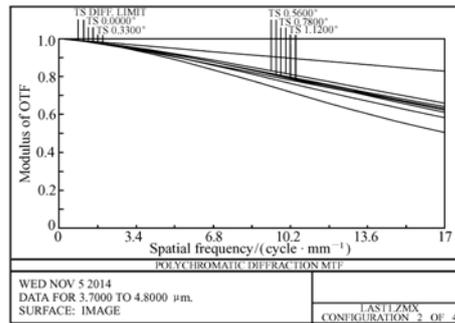


图 4 -50 °C 时的传递函数曲线

Fig. 4 Modulation transfer function at the temperature of -50 °C

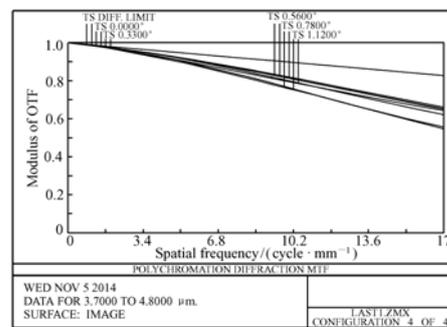


图 5 70 °C 时的传递函数曲线

Fig. 5 Modulation transfer function at the temperature of 70 °C

图 6 为 20 °C 时,光学系统的能量集中度曲线,从图中可以看出,在一个像元尺寸 30 μm 内,能量集中度在 90% 以上,满足红外成像系统的要求。

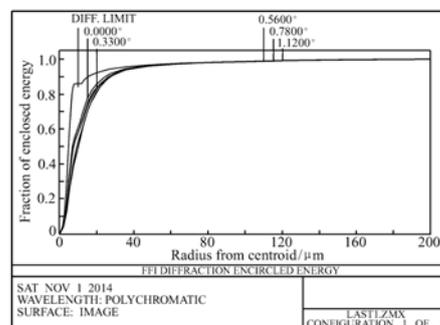


图 6 20 °C 时的能量包围曲线

Fig. 6 Energy encircle curve at the temperature of 20 °C

6 公差分析

为了验证光学系统的加工实现的可行性,降低加工成本,需要进行合理公差分配。通过反复使用 Zemax 的蒙特卡罗分析,我们得到如表 3 所示的公差分布,其中主反射镜和次反射镜的加工和装配精度要求比较高,但也在现有加工和装调技术范围内。20 °C 时,相应的蒙特卡洛仿真传递函数如图 7 所示,结果表明在各种随机误差的影响下,系统的光学传递函数高于 0.55 的概率大于 90%,该系统满足实际加工装调成像的要求。

表 3 公差分布表

Tab. 3 Distribution of tolerance data

面形	3(光圈)	表面偏心 1~2	± 0.01 mm
面形不均匀	0.3(光圈)	表面偏心 2~10	± 0.03 mm
厚度 1~2	± 0.01 mm	表面倾斜 1~2	$\pm 30''$
厚度 2~10	± 0.03 mm	表面倾斜 3~8	$\pm 1'$

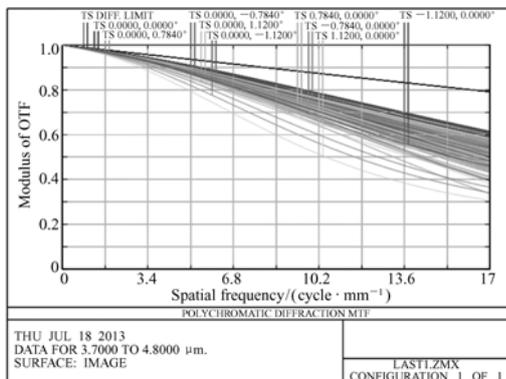


图 7 20 °C 蒙特卡洛仿真分析后的 MTF 曲线

Fig. 7 MTF curve after Monte Carlo simulation at the temperature of 20 °C

7 杂散光分析

在红外光学系统中,杂散辐射对成像质量的

影响成为必须考虑的因素。折反二次成像系统的杂散光抑制可以采用以下方法:首先对于来自成像视场外的杂散光,可以采用主镜遮光筒和次镜遮光筒,内外表面可以进一步加工消光螺纹,有效地减少一次及多次反射进入探测器的杂散光,通过设置主镜镜筒的长度可以控制入射到主镜的视场外的杂光;其次利用二次成像部分,在一次成像面附近加入视场光阑限制入口的光束^[9-11]。

本文最后使用 Lighttools,采用逆光路法,将有效光线和杂散光分离,最终得到了百分比表示的杂散光系数,分析时因为没有实际测量各个表面的透射率,按照经验取 2% 的反射率,追迹 10^7 条光线,在右侧接收器的光线能量占输出总能量的 96%,由此可以分析出,该光学系统的杂散光的能量占探测器接收能量的 2%,可以满足成像探测需求。

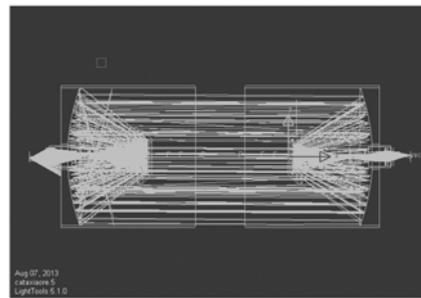


图 8 Lighttools 光线追迹图

Fig. 8 Ray trace based on Lighttools

8 结论

本文设计了一种紧凑型中波折反光学系统,用于多模混合制导中,该系统遮拦比低,体积小,且成像质量优良, -50 ~ 70 °C 消热差,公差分析结果显示该系统满足加工及装调成像要求。本文最后提出了一些消杂散光的措施,使得该系统能够有效抑制太阳背景辐射以及系统内部杂散辐射,从而提高信噪比。

参考文献:

- [1] 薛慧. 红外搜索与跟踪系统中光学系统的设计[J]. 光学学报, 2010, 30(8): 2383-2386.

- XUE H. Optical design of infrared search and trace system[J]. *Acta Optica Sinica*,2010,30(8):2383-2386. (in Chinese)
- [2] 骆守俊. 大面阵中波红外连续变焦光学系统设计[J]. *光学精密工程*,2012,20(10):2117-2123.
LUO SH J. Design of middle infrared continuous zoom optical system with a large FPA[J]. *Opt. Precision Eng.*,2012,20(10),2117-2123. (in Chinese)
- [3] 潘君骅. 大口径红外成像系统的光学设计[J]. *光学学报*,2003,23(12):1475-1478.
PAN J H. The methodic design of the IR imaging system with large aperture[J]. *Acta Optica Sinica*,2003,23(12):1475-1478. (in Chinese)
- [4] 赵文才,马军. 双向大视场消畸变低温红外目标模拟光学系统设计[J]. *光学精密工程*,2012,20(12):2619-2625.
ZHAO W C,MA J. Design of cryogenic infrared target simulation system with bidirectional and wide field for eliminating distortion[J]. *Opt. Precision Eng.*,2012,20(12):2619-2625. (in Chinese)
- [5] 虞林瑶,魏群. 一体式紧凑型折反光学系统设计[J]. *光学精密工程*,2013,21(3):561-566.
YU L Y,WEI Q. Design of compact integer structure of two-mirror system[J]. *Opt. Precision Eng.*,2013,21(3):561-566. (in Chinese)
- [6] 项建胜,潘国庆,张运强. 应用于空空导弹的二次成像折反式红外光学系统的设计[J]. *红外技术*,2011,33(8):457-459.
XIANG J SH,PAN G Q,ZHANG Y Q. The design of reflect and refractive reimaging infrared optic system used in air-to-air missile[J]. *Infrared Technology*,2011,33(8):457-459. (in Chinese)
- [7] 熊衍建,吴晗平,吕照顺. 军用红外光学系统性能及其结构形式技术分析[J]. *红外技术*,2010,32(12):688-695.
XIONG Y J,WU H P,LV ZH SH. Performance and structural form analysis of military infrared optical system[J]. *Infrared Technology*,2010,32(12):688-695. (in Chinese)
- [8] 董科研,王健,孙强. 机载双视场中波红外光学系统优化设计[J]. *中国光学*,2012,5(6):596-601.
DONG K Y,WANG J,SUN Q. Design of an airborne dual field-of-view middle wave infrared optical system[J]. *Chinese Optics*,2012,5(6):596-601. (in Chinese)
- [9] 刘洋,安晓强,邓键. 制冷型红外光学系统温栏杂散辐射分析及消除方法[J]. *应用光学*,2012,33(1):186-190.
LIU Y,AN X Q,DENG J. Removal of stray radiation from warm shields in cooled infrared optical systems[J]. *Opt. Precision Eng.*,2012,33(1):186-190. (in Chinese)
- [10] 赵楠,薛育,王晶. 利用蒙特卡洛法分析红外光学系统的杂散辐射[J]. *中国光学与应用光学*,2010,3(6):665-670.
ZHAO N,XUE Y,WANG J. Analysis of stray radiation from infrared optical system with Monte-Carlo method[J]. *Chinese J. Optics and Applied Optics*,2010,3(6):665-670. (in Chinese)
- [11] 牛金星,周仁魁,刘朝晖,等. 红外探测系统自身热辐射杂散光的分析[J]. *光学学报*,2010,30(8):2267-2271.
NIU J X,ZHOU R K,LIU ZH H,*et al.*. Analysis of stray light caused by thermal radiation of infrared detection system [J]. *Acta Optica Sinica*,2010,30(8):2267-2271. (in Chinese)

作者简介:



虞林瑶(1987—),男,江苏镇江人,研究实习员,2011年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事光学技术、红外系统方面的研究。E-mail: yulinyao87@163.com



韩景壮(1986—),男,吉林人,硕士,2012年于北京航空航天大学获得硕士学位,主要从事无人机航迹规划与总体设计的方面研究。E-mail: hanjingzhuang@126.com



魏群(1983—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,2005年于浙江大学获得学士学位,2010年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事共形光学及气动光学方面的研究。E-mail:wei.q@hotmail.com



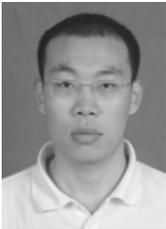
朱瑞飞(1986—),男,山西朔州人,博士研究生,2009年于吉林大学获得学士学位,主要从事图像处理方面的研究。E-mail:zhuirufei1105@163.com



张天翼(1985—),男,辽宁本溪人,研究实习员,2011年于中国科学技术大学获得硕士学位,主要从事导引头系统结构设计方面的研究。E-mail:zhangtianyi@163.com



宋宝奇(1985—),男,辽宁抚顺人,硕士,助理研究员,分别于2008年、2011年在北京大学获得学士、硕士,主要从事太阳辐射计量和嵌入式软件开发等方面的研究。E-mail:songbaoqipku04@126.com



王超(1984—),男,黑龙江哈尔滨人,硕士,2010年于中国地质大学获得硕士学位,主要从事仪器仪表技术方面的研究。E-mail:wcl00714@163.com



贾宏光(1971—),男,黑龙江五常人,研究员,博士生导师,2000年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光机电系统微型化与精确制导技术方面的研究。E-mail:jiahg@ciomp.ac.cn