

红外目标模拟器消热差光学系统设计

张晓晖, 梁志毅, 常青
(西北工业大学航天学院, 西安 710072)

摘要: 基于红外目标模拟器的成像特点,以改进型柯克式系统为初始结构,设计一套大视场中波红外消热差光学系统;该光学系统视场 30° ,出瞳距300 mm,最大口径 $\phi 220$ mm,焦距240 mm,基于光学被动消热差原理,采用一片非球面透镜,通过选择合适的玻璃及光焦度,设计的镜头在 $-40\sim 60^\circ\text{C}$ 的环境下空间频率16 lp/mm时MTF优于0.4,有很好的热稳定性和成像质量,结构简单、加工方便,有很强的工程实用性。

关键词: 红外目标; 模拟器; 光学设计; 柯克物镜; 消热差

中图分类号: V271.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)08-0087-03

Design of an Athermalized Projection Optical System for Infrared Target Simulator

ZHANG Xiao-hui, LIANG Zhi-yi, CHANG Qing
(School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Based on the imaging characteristics of the infrared target simulator, a wide field-of-view (FOV) medium-wave infrared heat dissipation differential optical system was designed taking the improved Cooke type system as the initial structure. The optical system has an FOV of 30° , an exit pupil of 300 mm, a maximum diameter of 220 mm, and the focal length of 240 mm. Based on the principle of optical passive athermalization, a piece of aspheric lens is used. By choosing appropriate glass and focal power, the lens has an MTF superior to 0.4 under the environment of $-40\sim 60^\circ\text{C}$ at spatial frequency of 16 lp/mm, and also has good thermal stability and imaging quality, simple structure, and very strong practicability.

Key words: infrared target; simulator; optical design; Cooke objective lens; athermalization

0 引言

红外目标模拟器能够模拟真实目标和背景的红热像,为评估探测设备性能提供了精确可控、可重复的试验条件^[1]。由于红外系统使用环境的不确定性,红外系统需要在很大的温度范围内保持稳定的性能。但是随着温度的变化,透镜和机械结构膨胀收缩,透镜材料折射率发生改变,导致红外光学系统产生离焦,像质变差,为了系统在很大的温度范围内保持良好的成像质量,红外消热差光学系统的研究设计就显得尤为重要^[2-3]。然而现在大部分用于模拟器的消热差光学系统视场都比较低,为使在仿真环境下提升探测设备对目标的搜索判断能力,提高仿真试验的可信度和成功率,首要任务是要研究设计出具有大视场、大孔径、

高成像质量的消热差光学系统。

1 红外模拟器工作原理

红外目标模拟器光学系统主要有3个作用^[4]:

- 1) 将红外图像生成器件所产生的红外目标、背景、干扰景象投射到无限远,保证导弹武器系统成像清晰;
- 2) 满足目标模拟器与导弹武器系统瞳孔匹配,在导弹武器系统中没有光晕现象,保证成像的一致性;
- 3) 在导弹武器接收系统的焦平面上,实现景物元的像与探测元之间位置匹配,保证景物的辐射与导弹武器系统接收的一致性,并且不能有外界环境干扰。

基于红外光学系统的要求,通过分析将本文研究光学系统的指标列入表1中。

红外目标模拟器光学系统的成像特点决定光学系统光阑不在第一片透镜上,亦不在系统内部,而是在远离光学系统300 mm处,外光阑形式使得轴外光束入射到透镜表面的高度较大,产生较强的像散、场曲和畸

变,并且这些轴外像差会随着出瞳距的增加而增大,因此对于长出瞳距的光学系统来讲,除了初级像散、场曲等三级像差,需要校正的高级像差也大大增加^[5-6]。考虑到系统的相对孔径不大,因此,该光学系统主要矫正的是与视场有关的像差,即彗差、像散、场曲及畸变。对于中红外系统,光谱比较宽,要矫正的还有色差,考虑到系统结构所能负担的相对孔径以及视场角值^[7],选择由正-负-正光焦度组成的柯克形式作为初始结构,然而外光阑形式决定该系统不能做成对称式,垂轴像差的矫正难度增大,因此将柯克形式进行改进,选择在后截距加入一片透镜,类似于天塞物镜,这样可以增加自由度,为像差矫正提供有利条件。

表1 光学系统指标

Table 1 Optical system indicators

工作波段/ μm	视场角 (ω×2)/(°)	焦距f'/ mm	出瞳直径 D/mm	出瞳距L/ mm
3~5	30	240	50	300

2 消热差原理

红外光学系统要同时达到消热差和消色差的目的,必须选择合适的光学材料和机械材料。通过参考文献[8]可得,当4片透镜以硅-锗-硅-硒化锌的顺序排列组合时,在温度变焦范围内离焦量最小。在满足光焦度分配和消色差要求下,考虑到镜筒材料的膨胀系数对透镜间隔的影响,为了使透镜材料的热差系数引起的离焦与机械镜头材料热膨胀系数导致的像面移动一致,需满足给出的光焦度分配公式以及消色差公式^[9],即

$$\frac{1}{h_1} \sum_{i=1}^n h_i \varphi_i = \varphi \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{h_i}{h_1} \right)^2 \frac{\varphi_i C_i}{\varphi^2} = 0 \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{h_i}{h_1} \right)^2 T_i \varphi_i = -\alpha \varphi \quad (3)$$

式中:φ为系统的总光焦度;n为透镜个数;h_i为轴上点近轴孔径光线在透镜表面的入射高度;C_i为透镜在工作波段上的消色差系数;α为机械结构的热膨胀系数;T_i为材料的消热差系数。

根据材料的物理性能,所选材料的消色差系数及消热差系数见表2。

考虑到系统的结构形式,在初始结构求解过程中,将系统的外径尺寸之比大约定为1:0.8:1:1,以及镜筒支架材料铝的膨胀系数α=23.6×10⁻⁶/℃,初步可以选择固定第一片透镜的光焦度为0.0067,将以上数据代入式(1)~(3),联立解得各个透镜的光焦度为

0.0067, -0.00978, 0.00086, 0.00443, 保证系统的光焦度以及系统消色差和消热差的基础。

表2 中波时红外材料的消色差系数和消热差系数

Table 2 Chromatic aberration coefficient and thermal coefficient of the material under the medium infrared wave

材料	消色差系数C	消热差系数T
Si	4.23×10 ⁻³	7.03×10 ⁻⁵
Ge	9.11×10 ⁻³	1.26×10 ⁻⁴
ZnSe	5.65×10 ⁻³	3.62×10 ⁻⁵
ZnS	8.79×10 ⁻³	2.77×10 ⁻⁵
AMTIR-1	4.75×10 ⁻³	3.89×10 ⁻⁵

3 光学设计

在实际工作中,红外目标模拟器作为发射系统,以均匀性良好的黑体作为发射源,靶标上有目标的外形轮廓孔,余下表面为背景,将靶标放置于光学系统焦面上投射于无穷远处,对于该系统,由视场和焦距可知,靶标的外形尺寸最小为φ128.6mm,需要黑体发射面尺寸大于φ128.6mm的中温黑体作为照射源,方可满足波段、视场角、焦距等要求。

在Zemax软件上采用反向设计,将照射源作为像面,设计出常温下达到衍射极限的光学系统,整个系统光学参数如表3所示。

表3 透镜参数表

Table 3 Optic parameters of the lenses

	半径1	半径2	材料	外径φ mm
透镜1	183.38	327.19	硅	240
透镜2	361.73	-1359.94	锗	180
透镜3	665.66	-802.29	硅	240
透镜4	180.78	163.32	硒化锌	110

锗镜上放非球面,半径为-1359.94mm,最高系数为八次项,参数为:0.0039, 6.8783×10⁻⁸, 2.0353×10⁻¹², 1.0956×10⁻¹⁶,透镜1外径尺寸为φ240mm,保证光线以30°视场收缩的情况下达到300mm出瞳距处的出瞳直径要求,图1所示为红外系统光路图。

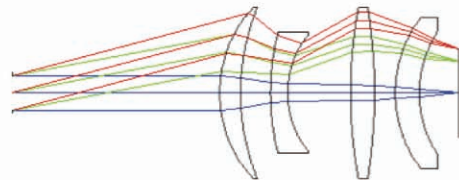


图1 光学系统光路图

Fig. 1 2D layout of the optic system

图2为20℃、-40℃、60℃下的点列图及传函图,系统点列图的最大RMS值均小于艾利斑的尺寸,系统在空间频率16lp/mm时MTF值优于0.4,均匀性良好。

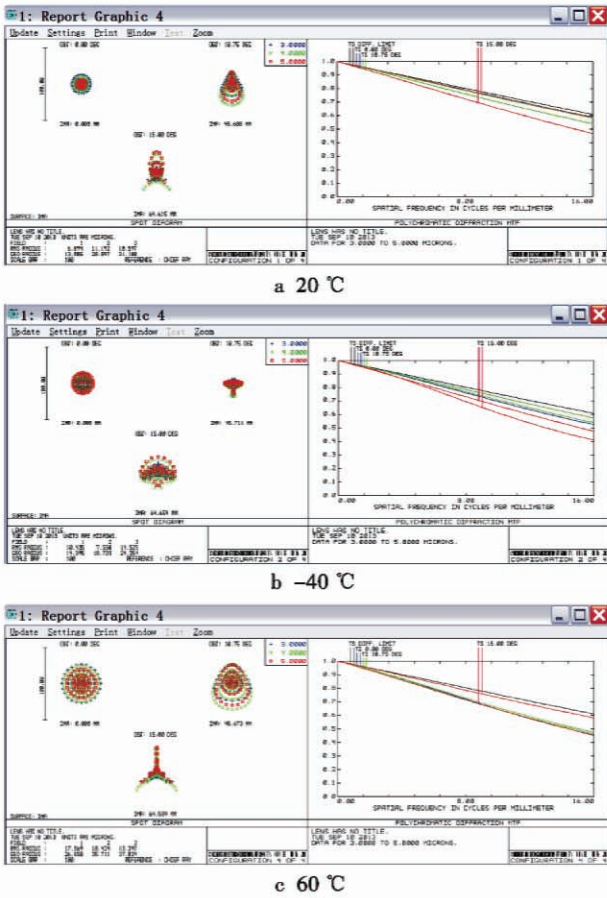


图 2 不同温度下的点列图及传递函数曲线图

Fig. 2 Spot diagram and MTF at different temperature

图 3 为系统的光学系统场曲/畸变图和消色差图,在 0.7 视场处消色差场曲量小于 0.1 mm,畸变量 $q \leq 0.5\%$ 。

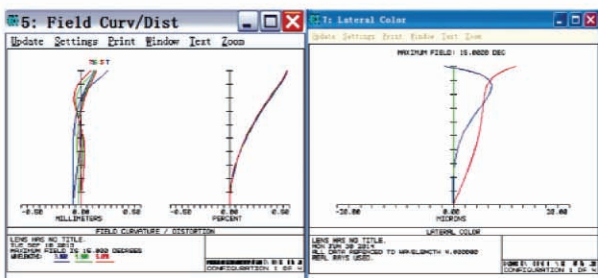


图 3 光学系统场曲/畸变图和消色差图

Fig. 3 Field curvature/distortion and chromatic aberration

4 总结

本次设计的光学系统采用一个非球面,得到同时消热差和消色差的光焦度分配,系统在 -40 ~ 60 °C 的环境温度有良好的像质,可用于红外目标模拟仪器及其他准直系统中。

参考文献

[1] 胡初强. 红外目标模拟器的光学系统设计[D]. 长春:

长春理工大学,2011. (HU C Q. Optical system design of the infrared target simulator[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011.)

[2] 王远方舟,白玉琢,贾钰超,等. 一种长波红外光学消热差系统设计[J]. 红外技术,2012, 34(9):531-534. (WANG Y F Z, BAI Y Z, JIA Y C, et al. A design of FIR athermal system[J]. Infrared Technology, 2012, 34(9): 531-534.)

[3] 李华,韩维强,沈忙作. 中波红外光学系统被动无热化设计及测试[J]. 红外与激光工程,2009, 38(4):687-691. (LI H, HAN W Q, SHEN M Z. Passive athermal design and measurement of MWIR optical system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(4):687-691.)

[4] 赵松庆,吴永刚. 红外成像目标模拟器光学投射系统设计中的几个问题[C]//中国系统仿真学会学术年会,2001:461-466. (ZHAO S Q, WU Y G. Some issues of infrared imaging simulator in the design of optical projection system[C]//The Chinese Society of System Simulation Academic Essays, 2001:461-466.)

[5] 朱文超,于旭东,李卓. 长入瞳距红外目标模拟器投影光学系统设计[C]//第三届红外成像系统仿真、测试与评价技术研讨会,2011:300-302. (ZHU W C, YU X D, LI Z. Infrared design with long entrance pupil distance [C]//The Third Session of Infrared System Simulation, Test and Evaluation Technology Symposium Proceedings, 2011:300-302.)

[6] 乔杨,徐熙平,辜义文,等. 消热差的红外目标模拟器投影光学系统设计[J]. 兵工学报,2013, 34(4):431-436. (QIAO Y, XU X P, GU Y W, et al. Design of an athermalized projection optical system for infrared target simulator[J]. Acta Armamentar, 2013, 34(4):431-436.)

[7] 刘钧,高明. 光学设计[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2006. (LIU J, GAO M. Optical design[M]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Press, 2006.)

[8] 吴晓靖,孟军和. 红外光学系统无热化设计的途径[J]. 红外与激光工程,2003, 32(6):572-576. (WU X J, MENG J H. Approach of athermalizing infrared optical systems [J]. Infrared and Laser Engineering, 2003, 32(6):572-576.)

[9] 陈建发,王合龙,刘欣. 中波红外光学系统光学被动无热化设计[J]. 电光与控制,2013, 20(12):88-91. (CHEN J F, WANG H L, LIU X. A passive optical athermalization design of middle-wavelength infrared optical system[J]. Electronics Optics & Control, 2013, 20(12):88-91.)