

中波红外无热化镜头的设计与制造

李荣刚, 刘琳, 张兴德, 黄和平
(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘要:无热化技术是保证工作在非设计温度下光学仪器性能的关键所在。与主动无热化技术和光学被动无热化技术相比,机械被动无热化技术在红外光学系统消热设计中具有一定的优势。在光学、机械仿真的基础上,镜头采用高膨胀系数的塑形材料以及合理的结构设计实现了无热化设计与制造。测试与试验表明,该镜头在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 工作温度范围内具有良好的成像质量。

关键词:成像光学;红外镜头;光学设计;无热化

中图分类号:TN214 **文献标识码:**B

Design and fabrication of mid-wave infrared lenses with athermalization

LI Rong-gang, LIU Lin, ZHANG Xing-de, HUANG He-ping
(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

Abstract: Athermalization is the principle of stabilizing the optical performance with respect to temperature. Compared with active athermalization and optical passive athermalization. Mechanical passive athermalization has some advantage for infrared optical system. Based on optical and mechanical simulation, the infrared lenses was designed and fabricated with athermalization via reasonable mechanical structure and plastic material with high linear expansion coefficient. Test shows that the lenses has favorable performance between $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Key words: imaging optics; infrared lenses; optical design; athermalization

1 引言

依据国军标的要求,军用光学仪器的工作范围很宽。当环境温度变化并达到热平衡状态时,光学系统的参量(如透镜的曲率、间隔、折射率、非球面系数等)会发生变化,从而使光学系统的性能急剧降低,对光学仪器的使用造成一定的影响;由于大多数红外光学材料的折射率温度变化梯度 dN/dt 比较大,红外光学系统的热效应更加明显。为了在全工作温度范围内均获得满意的像质,红外光学系统通常需要利用无热化技术对其进行再聚焦^[1-2]。

系统的无热化可以通过主动式与被动式两种方式实现^[3]。主动式无热化方式利用手动或电动的方式驱动光学系统中的某一透镜使其改变轴向位置,达到系统焦面变化的目标,该方式不适合无人干

预或对系统体积有严格要求的场合(如弹载、星载)。根据实现被动式无热化设计的手段,被动式无热化可分为光学式与机械式两种,光学被动无热化技术一般需要采用多种光学材料的透镜或采用衍射光学元件以满足系统消热、消色的条件,以保证系统的成像质量,透镜数量的增加与衍射光学元件的应用在一定程度上降低了系统的透过率,增大系统干扰的潜在威胁,这对用于弱目标探测的红外系统将产生很大的影响;机械被动无热化设计在不需要增加电机、透镜的条件下,利用特殊功能的材料(或液体),使之与精心设计的结构完美耦合,实现系统

作者简介:李荣刚(1977-),男,硕士,高级工程师,从事光机系统设计与研究。E-mail: iroptics_lrg@yahoo.com.cn

收稿日期:2010-01-25

的消热设计,与前两种无热化方式相比,该方式具有体积较小、透过率高、可靠性较强等优点,比较适合对体积、重量要求严格,无人干预的场合。

本文采用机械被动无热化的方式实现了小体积、长焦距、工作温度范围宽的中波红外镜头的设计与制造。

2 镜头设计

2.1 温度对镜头参数的影响

当温度变化并达到热平衡时,光学参量的变化如表1所示^[4]。

表1 光学参量随温度的变化

类别	温度 t	温度 $t + \Delta t$	
透镜	曲率 r	$r(1 + \alpha_L \Delta t)$	
	厚度 d	$d(1 + \alpha_L \Delta t)$	
	折射率 N	$N + (dN/dt) \Delta t$	
	非球面系数	c	c
		A	$A/[1 + \alpha_L \Delta t]^3$
		B	$B/[1 + \alpha_L \Delta t]^5$
C		$C/[1 + \alpha_L \Delta t]^7$	
	D	$D/[1 + \alpha_L \Delta t]^9$	
镜筒	间隔 s	$s(1 + \alpha_H \Delta t)$	

注: α_H 为镜筒的热膨胀系数; α_L 为透镜材料的热膨胀系数; dN/dt 为折射率温度变化梯度。

2.2 光学设计

按照系统的要求,该中波红外镜头的光学参数如表2所示。

表2 镜头的光学参数

工作波段/ μm	3.7 ~ 4.8
焦距 f'/mm	137.5
视场 $2\omega/(\circ)$	3 × 4
$F/\#$	1.93
工作温度/ $\circ\text{C}$	-40 ~ +60
探测器/ μm	320 × 240, 像元间距 30
轴向尺寸/ mm	< 100

根据镜头对轴向尺寸要求,系统采用一次成像、远距的光学结构形式进行光学设计,系统由前正透镜组与后负透镜组组成。前后透镜组满足统光焦度与消色差条件^[5]:

$$\phi_1/\nu_1 + (1 - k)^2 \phi_2/\nu_2 = 0 \quad (1)$$

$$\phi_1 + (1 - k) \phi_2 = \phi \quad (2)$$

$$k = 1 - T/f' \quad (3)$$

其中, ν_1, ν_2 为前、后组透镜的归一化的色散系数; ϕ_1, ϕ_2 为前、后组透镜的光焦度; T 为后组透镜主面

到像平面的距离。

由于该镜头为大孔径、小视场、长焦距的光学系统,球差与色差对镜头成像质量的影响最大。系统采用硅、锗两种材料校正镜头色差,采用非球面技术校正镜头球差。设计完成的镜头的光路图如图1所示。

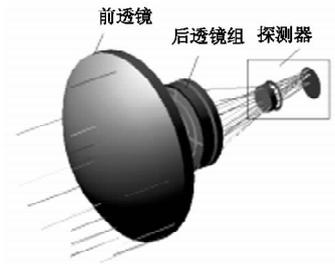


图1 镜头的光路示意图

2.3 无热化设计

按照表1所述的光学参量变化规律,镜筒材料采用硬铝 LY12(线膨胀系数 $\alpha_H = 23.6 \times 10^{-6}/\circ\text{C}$),后透镜组作为机械被动无热化的补偿镜组,驱动补偿机组的结构选用高膨胀系数的塑形材料,以与探测器配合的镜头的机械后端面为固定点仿真温度对镜头的焦面的影响,补偿镜组的补偿量及补偿后焦面位置如图2所示。

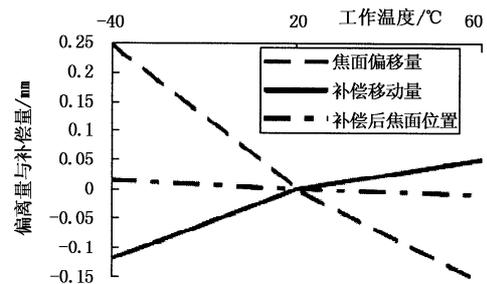


图2 温度对镜头焦面的影响与补偿量

根据光学瑞利原则^[6],温度造成的系统离焦量应不大于系统的焦深相同,即:

$$\Delta f \leq \pm 2\lambda F^2 \quad (4)$$

该镜头经过无热化设计,焦面偏离量最大为 $15 \mu\text{m}$,远远小于该镜头的焦深,满足系统成像质量的要求。

2.4 机械设计

根据光学设计以及计算仿真的无热化的结果进行结构设计,设计要求机械结构简单、可靠,光机耦合度高、符合无热化要求。在此过程中,利用 Pro/E 软件对其结构进行不同温度下的状态分析,对光学仿真的无热化数据进行修正。制作完成的无热化镜头如图3所示。



图3 加工完成的无热化镜头

3 测试与试验

3.1 光学传函

为了验证镜头的常温状态下的成像质量,利用光学传函仪对镜头进行了常温光学传递函数的测试,测试结果如图4所示。

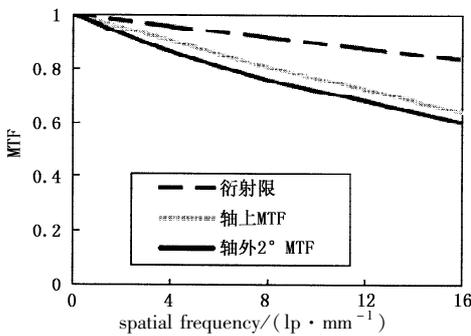


图4 镜头的常温传递函数实测值

3.2 高低温试验

为了验证镜头无热化补偿的效果以及在常温、高温及低温情况下镜头的成像效果,将该镜头与标准热像仪机芯组装,利用高低温箱模拟工作温度的变化,观测具有相应特征频率宽度靶标红外图像清晰度,试验原理框图如图5所示。

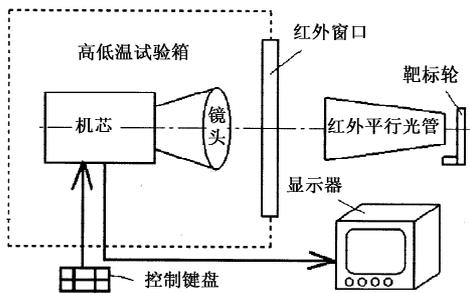
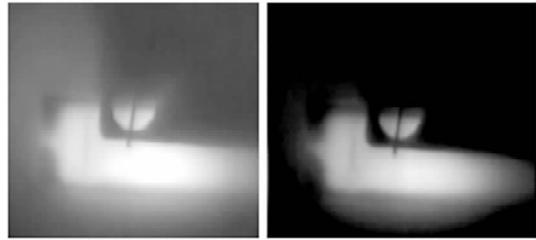


图5 高低温试验原理框图

依据对镜头的指标要求,利用高低温箱模拟 +60 ℃, -40 ℃的工作温度,试验得到的红外图像如图6所示。



(a) +60 ℃图像 (b) -40 ℃图像

图6 高低温时靶标红外图像

4 结论

在光学、机械仿真的基础上,通过采用高膨胀系数的塑形材料以及合理的结构设计实现了镜头的机械被动无热化设计。测试与试验结果表明,该镜头在整个工作温度范围内具有良好的成像质量。基于该镜头设计与仿真的方法,完全可以开展对于较复杂红外光学系统的机械被动无热化设计的研究。

参考文献:

- [1] Max J Riedl. Optical design fundamentals for infrared system[M]. Bellingham:SPIE PRESS,2005:131 - 139.
- [2] 李林,王焯. 环境温度对光学系统影响的研究及无热系统设计的现状与展望[J]. 光学技术,1997,23(5): 26 - 29.
- [3] M Roberts. Athermalization of infrared optics: a review [J]. SPIE,1989,1049:72 - 81.
- [4] 李林,安连生. 计算机辅助光学设计的理论与应用 [M]. 北京:国防工业出版社,2002,215 - 217.
- [5] Rollin. System of objectives with optical athermalization [P]. United States Patent,1993,5202792.
- [6] 胡家升. 光学工程导论[M]. 第2版. 大连:大连理工大学出版社,2005:567 - 568.