

航空变焦距镜头被动消热设计

王 平^{1,2} 张国玉¹ 王 伟^{3*} 高玉军² 刘仲宇²

¹ 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022
² 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033
³ 中国科学院长春应用化学研究所, 吉林 长春 130033

摘要 为减小温度对航空变焦距镜头成像质量的影响,设计了一种基于差动原理的被动消热结构。通过 NX Nastran 有限元分析软件对变焦镜头在高温和低温两种工况下进行了热分析,利用消热原理及分析数据对变焦镜头 4 个组件进行了消热设计。对消热设计前、后的变焦镜头进行了消热结构耦合分析,分析结果表明变焦镜头经过消热设计后最大热变形量减小了 0.03 mm。利用泽尼克系数作为数据接口,将获得的热结构分析结果作为光学分析软件 Code V 输入,仿真出了消热设计前、后变焦镜头在 +55 °C 时的光学传递函数曲线。和镜头设计传递函数值相比,消热设计前镜头在 78 lp/mm 处传递函数值减小约 0.2,传递函数值下降了 50%,而消热设计后镜头传递函数值基本保持不变。仿真结果证实了消热设计的有效性。最后通过实验验证了仿真结果的正确性。

关键词 成像系统;消热设计;热分析;变焦距镜头;温度补偿

中图分类号 V241.02 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0922006

Passive Athermal Design of Aerial Zoom Lenses

Wang Ping^{1,2} Zhang Guoyu¹ Wang Wei³ Gao Yujun² Liu Zhongyu²

¹ School of Photo-Electronic Engineering of Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

² Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

³ Changchun Institute of Applied Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract In order to diminish the negative temperature effect on image quality of aerial zoom lens, a passive athermal subtraction structure is designed, based on the differential principle. The thermal analysis of zoom lens in working conditions of both high and low temperatures is taken out through NX Nastran finite element analysis software, and the four components are designed by making use of athermal subtraction principle and analytical data. By means of the athermal structural coupling analysis on the zoom lens before and after design, it is proved that the reduction of the maximum athermal distortion of zoom lens is 0.03 mm on the lens after athermal subtraction design. By adopting the Zernike coefficient as the data interface and taking the obtained thermo-structural analysis results as the input of an optical analysis software named Code V, the optical transfer function curve of a zoom lens at +55 °C before and after athermal subtraction design is simulated. Compared with the design value of transfer function of the lens, the transfer function value of the lens at 78 lp/mm before the athermal subtraction design is decreased by about 0.2, namely, the transfer function value is reduced by 50%, while the transfer function value of the lens after the athermal subtraction design remains unchanged essentially. The effectiveness of the thermal subtraction design is verified. Finally, the correctness of the simulation result is verified through the experiment.

Key words imaging systems; athermal design; thermal analysis; zoom lens; temperature compensation

OCIS codes 120.6810; 120.6780; 120.3620; 110.1080

收稿日期: 2012-01-06; 收到修改稿日期: 2012-05-12

基金项目: 国家 863 计划(2008AA121813)资助课题。

作者简介: 王 平(1982—),男,博士研究生,助理研究员,主要从事光学仪器光机设计方面的研究。

E-mail: wangping_2002@163.com

导师简介: 张国玉(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事空间科学与技术、光电仪器与检测技术等方面的研究。

E-mail: zh_guoyu@yahoo.com.cn

* 通信联系人。E-mail: wboyw@126.com

1 引 言

随着图像处理技术及精密加工技术的日益发展,变焦距镜头在航空侦察领域里得到了广泛的应用。应用于航空侦察中的变焦镜头,工作的温度条件非常恶劣,当温度变化范围较大时会引起光学系统中光学元件半径、厚度和折射率及光学元件之间间隔的变化,这种变化会导致光学系统焦距变化和像面漂移,从而影响光学系统成像质量。为了保证环境温度变化时,变焦镜头仍然能正常地工作,就必须对变焦镜头进行消热设计^[1~3]。

消热设计有主动消热化设计和被动消热化设计两种方法。被动消热设计是指利用对温度变化有响应的光机结构自动完成光学元件位置的改变,以消除温度变化对光学系统的不利影响。相对于主动消热设计,被动消热由于结构简单、无能量消耗、可靠性高等优点,被广泛用于各种光学仪器的光机系统设计中,以降低光学仪器的温度敏感性,提高光学仪器的环境适应性。

被动消热设计有光学被动消热设计和机械被动消热设计两种方法,光学被动消热设计是利用不同材料的温度特性(线膨胀系数和折射率温度系数),在满足系统成像质量要求的同时,适当选配材料并合理分配光焦距,使整个光学透镜产生的像面离焦与镜筒材料热胀冷缩产生的离焦相互抵消。目前国内很多学者对变焦镜头的被动消热设计都是从这个角度来进行的^[4~7]。但是,当对光学系统的技术指标要求很高时,从光学被动消热设计角度进行温度补偿会降低光学系统的其他性能指标。

针对变焦距镜头自身特点设计了一种基于差动原理的机械被动消热结构,结构简单且可控设计变量多,在较宽温度变化范围内能够消除温度变化所产生的不利影响,较好地保证了光学系统的成像质量。仿真和实验结果均证实了变焦镜头被动消热设计的正确性和有效性。

2 变焦距镜头消热结构原理

变焦距镜头一般由前固定组、变倍组、补偿组、后固定组组成^[8,9],图1为某变焦镜头光学系统图,采用“正-负-正-正”的结构型式。图2为变焦镜头变倍组比较常见的一种光机设计结构,包括压圈、透镜、隔圈、胶合镜、镜筒等,用压圈压紧透镜,以提供一定的预载。图2所示设计的最大缺点是没有考虑消热设计。由于镜筒的热膨胀系数一般要大于光学

元件的热膨胀系数,当温度升高时,在相同的长度下镜筒膨胀量要比压圈、透镜、隔圈和胶合镜组合膨胀量大,这样就会产生轴向间隙,这种间隙是无法控制的。当温度变化范围较大时,这种轴向间隙会造成压圈施加给透镜的预载消失。如果变焦镜头工作在在振动、冲击的环境下,那么就有可能导致透镜自由移动,进而影响光学系统的成像质量。同理,当温度降低时,镜筒的收缩量要大于压圈、透镜、隔圈和胶合镜的组合收缩量,在这种情况下透镜和隔圈会受到挤压,当温度变化范围较大时,在透镜曲率表面处将产生较大的轴向应力,致使光学零件的面形精度降低,进而导致成像质量下降。总之,无论温度升高还是降低,采用这种光机结构的变焦镜头的性能是不能得到保证的。

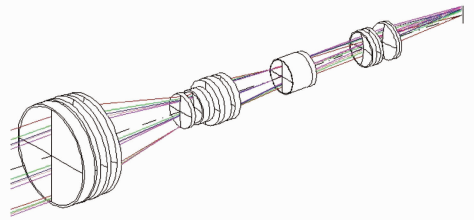


图1 变焦镜头光学系统结构

Fig. 1 Optical system structure of zoom lens

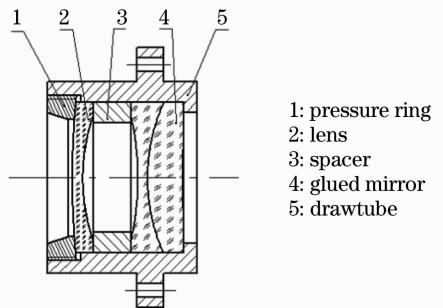


图2 传统变焦镜头变倍组光机结构

Fig. 2 Zoom group photomechanical structure of traditional zoom lens

为了克服已有技术存在的缺陷,设计了一种基于差动原理的被动消热机构,消热结构原理如图3所示,和图2的区别在于将隔圈分成左、右两个隔圈,左隔圈的右侧凸环伸进右隔圈左侧的凹环内,前者的凸环面与后者的凹环面接触,并且左隔圈的热膨胀系数大于右隔圈的热膨胀系数,这样就组成了一个差动单元结构。当温度升高时,所有零件都发生膨胀,但左隔圈的膨胀量比右隔圈大,在左隔圈的凸环和右隔圈的凹环的挤压作用下,左隔圈就会相

对右隔圈向左移动,间隙 δ 变大,这样就补偿了由于镜筒材料和光学元件材料热膨胀系数差别所产生的膨胀间隙,保证压圈预载基本不变,进而保证变焦镜头的光学性能。同理,当温度降低时,所有零件都要产生收缩,由于左隔圈的热膨胀系数大,则收缩量也比右隔圈大,在镜筒收缩挤压作用下,左隔圈就会相对右隔圈向右移动,间隙 δ 变小,这样就补偿了由于镜筒材料和光学元件材料膨胀系数差别所产生的收缩间隙,保证不会产生较大的轴向应力,进而保证光学系统的成像质量。

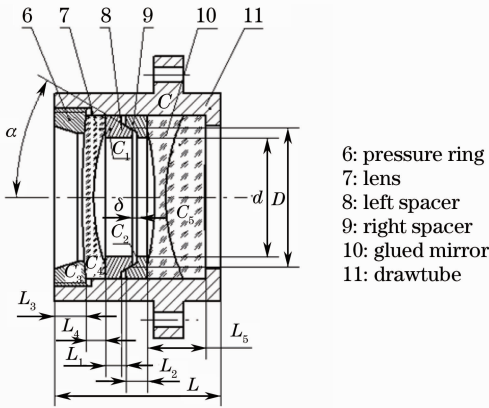


图3 变焦镜头消热结构原理

Fig. 3 Athermal-structure principle of zoom lens

当温度变化 ΔT 时,间隙 δ 变化量的计算公式为

$$\Delta\delta = \Delta T(C_1 - C_2)(D - d) \cdot c \tan \alpha, \quad (1)$$

式中 ΔT 为温度变化量, C_i 为隔圈材料的热膨胀系数, D 为两隔圈接触面中径, d 为通光口径, α 为两隔圈接触面与光轴夹角。

3 变焦距镜头热分析及消热设计

3.1 变焦距镜头热分析

利用变焦镜头消热结构原理对变焦镜头 4 个组件进行具体消热结构设计,从(1)式中可以看出,间隙是与温差成正比的,因此首先要对变焦镜头进行热分析以确定出变焦镜头各组件温度变化量。变焦

镜头所处的温度环境非常复杂,应用于航空中的变焦镜头环境温度要求一般为 $-40\text{ }^\circ\text{C} \sim +55\text{ }^\circ\text{C}$,温差接近 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 。除了环境温度影响外,变焦镜头一般安装在光电平台密闭吊舱里,影响变焦镜头各组件温度的还有变焦镜头内部 CCD 发热、电子元器件发热等,这些因素使得变焦镜头内部温度场发生变化。

传热主要有三种形式:传导、对流及辐射,对于变焦镜头来说传导和对流是主要的传热方式。由于上述各种温度因素的影响,整个变焦镜头系统是存在温度梯度的,能量会以热传导的方式从高温区向低温区移动。由于发热源 CCD 处在整个系统的靠后位置,它的对变焦镜头各组件的影响也不一样,对靠近 CCD 的组件影响较大,对远离 CCD 的组件影响较小。外界环境的温度通过空气施加在变焦镜头上,由于变焦镜头各部分存在温度梯度,空气靠近镜头的部分密度也是不一样的,因而会产生气体流动,即空气对流。空气对流系数为 $30\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$,镜筒材料 2A12 热导率为 $188.4\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$,CCD 温度取 $65\text{ }^\circ\text{C}$,环境温度分别取 $-40\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $55\text{ }^\circ\text{C}$,利用 NX Nastran 有限元仿真软件对变焦镜头温度场进行解算,变焦镜头热分析有限元模型如图 4 所示,对模型施加热载荷和边界条件后解算出变焦镜头在高温和低温两种状态下各个组件平均温度如表 1 所示^[10~12]。

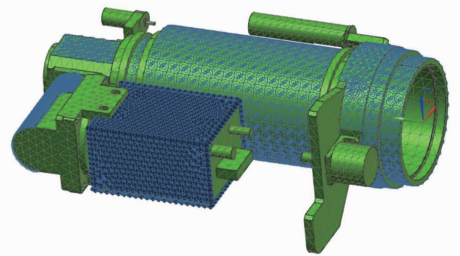


图4 施加热载荷及边界条件的变焦镜头有限元模型
Fig. 4 Finite element model of zoom lens applied with thermal load and boundary condition

表 1 变焦镜头各组件平均温度

Table 1 Average temperature of zoom lens components

	Anterior fixation group / $^\circ\text{C}$	Zoom group / $^\circ\text{C}$	Compensation group / $^\circ\text{C}$	Fixed group / $^\circ\text{C}$
High temperature	56.7	57.6	59.8	61.0
Low temperature	-39.3	-38.2	-37.3	-35.4
Temperature difference	96.0	95.8	97.1	96.4

变焦镜头在高温和低温时的温度变化云图如图 5 所示。

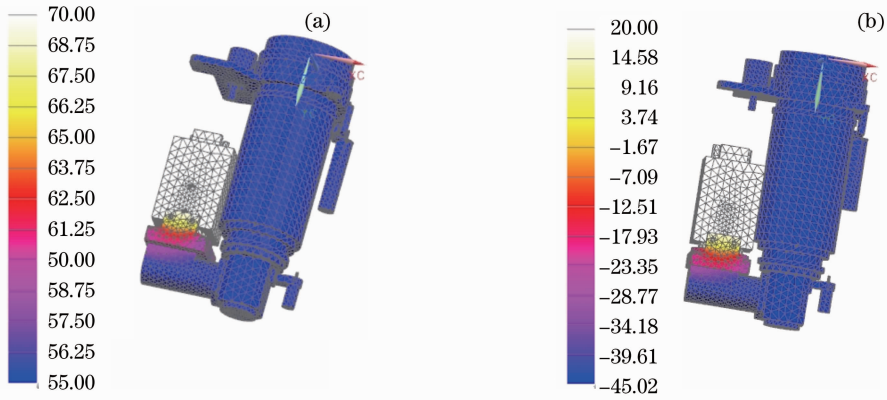


图 5 变焦镜头的温度变化云图。(a)高温环境下；(b)低温环境下

Fig. 5 Temperature-change nephogram of zoom lens. (a) Under high temperature; (b) under low temperature

从表 1 和图 5 可以看出,变焦镜头前固定组、变倍组、补偿组和后固定组 4 个组件在高温和低温时温度是不一样的,在高温时后固定组由于靠近 CCD 热源温度最高,达到 61 °C,在低温时由于前固定组离 CCD 最远,温度最低为 -39.3 °C,在知道了变焦镜头各组件温度分布后就可以利用消热原理对各组件进行详细消热设计。

3.2 变焦距镜头被动消热设计

对于图 3 所示的变焦镜头变倍组, $L, L_3, L_4, L_5, C, C_3, C_4, C_5, d$ 是已定的量, $\alpha, C_1, C_2, L_1, L_2, D$ 为设计变量,具体消热设计步骤如下:

- 1) 预定一个隔圈间楔角 α ($30^\circ < \alpha < 60^\circ$),并根据总体结构布局给定隔圈宽度 L_1, L_2 和两隔圈接触中径 D ;
- 2) 选择左隔圈和右隔圈材料,需满足 $C_1 > C_2$;
- 3) 计算出当温度变化 ΔT 时,由于镜座和光学元

件热膨胀系数差别所产生的轴向间隙 β ,计算公式为

$$\beta = \Delta T L C - \sum_{i=1}^5 L_i C_i \Delta T_i;$$

4) 令 $\Delta \delta$ 等于 β ,即可计算出楔角 α ;

5) 若楔角 α 略大于左隔圈、右隔圈间的最小摩擦自锁角,则通过微调第一隔圈 8、第二隔圈 9 的长度 L_1, L_2 和接触中径 D 使楔角 α 小于第一隔圈 8、第二隔圈 9 间的最小摩擦自锁角,避免由于隔圈间自锁而无法相对运动;

6) 若楔角 α 远大于左隔圈、右隔圈间的最小摩擦自锁角,则重新选择材料,并重复步骤 3)、步骤 4) 设计过程,直至最终完成设计。

利用上述方法对变焦镜头前固定组、补偿组、后固定组进行消热设计,最终计算出变焦镜头各组件消热结构设计变量结果及所用隔圈材料如表 2 所示。

表 2 变焦镜头各组件消热结构设计变量结果

Table 2 Athermal structure design variable results of zoom lens components

Design variable	Anterior fixation group	Zoom group	Compensation group	Fixed group
$\alpha / (^\circ)$	36.4	42.3	38.9	40.6
$C_1 / (10^{-6} / ^\circ\text{C})$	22.0	13.3	16.0	13.3
$C_2 / (10^{-6} / ^\circ\text{C})$	8.9	2.5	2.5	2.5
L_1 / mm	1.3	2.4	1.8	3.8
L_2 / mm	1.1	2.1	1.5	3.3
D / mm	56.0	28.0	32.0	21.0
Left ring material	Aluminium alloy	Alloy steel	Boron aluminum alloy	Alloy steel
Right ring material	Titanium alloy	Invar	Invar	Invar

按照消热设计结果重新更新有限元模型,利用 NX Nastran 自带的热结构耦合分析模块对经过消热设计的变焦镜头进行热变形分析。对变焦镜头安装位置进行固定约束,依据前面分析得到的温度场分布结果对变焦镜头施加热载荷,最后通过 Nastran 计算分析后得到变焦镜头在热载荷作用下

消热设计前、后位移变形云图如图 6 所示。从图中可以看出变焦镜头在消热设计前所有节点中最大热变形量超过 0.05 mm。经过消热设计后的变焦镜头最大热变形量不到 0.02 mm,变焦镜头经过消热设计后,最大热变形量减小了 0.03 mm^[13-15]。

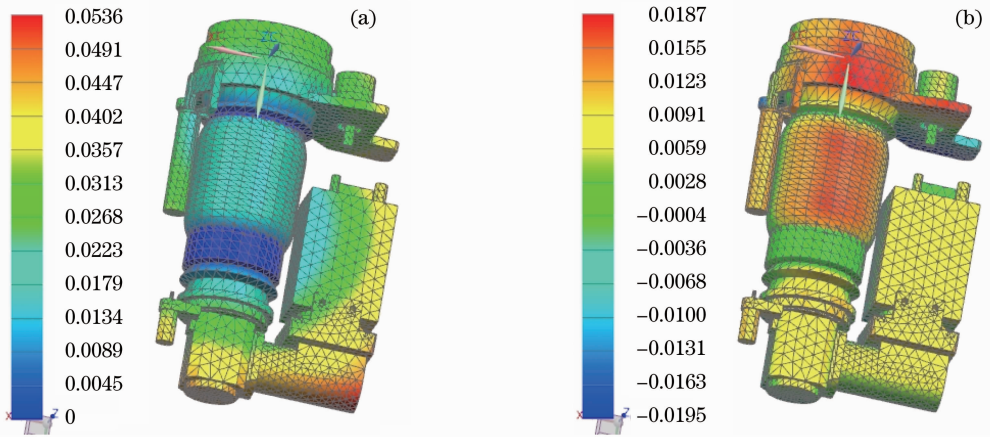


图6 变焦镜头消热设计前、后位移变形云图。(a) 消热设计前；(b) 消热设计后

Fig. 6 Displacement nephogram of zoom lens before and after athermal design. (a) Before athermal design; (b) after athermal design

采取泽尼克多项式拟合作为光、机、热软件之间的数据接口,这是因为泽尼克多项式每一项系数都有很明确的物理含义,很容易与 Seidel 像差项对应^[16,17]。通过专门编写的 Matlab 软件程序将热结构分析的结果转换为 Code V 可接受的数据格式。为保证拟合精度,采用了 9 阶 58 项的泽尼克多项式,将每一块透镜的泽尼克系数依次输入 Code V 就能分析得出整个光学系统的调制传递函数(MTF)曲线,从而实

现了热-机-光分析的集成^[18~20]。最终分析出变焦镜头消热设计前、后光学系统 MTF 曲线如图 7 所示。变焦镜头在 78 lp/mm 处设计传递函数值为 0.4,从图中可以看出变焦镜头消热设计前在 +55 °C 温度的影响下 78 lp/mm 处传递函数值下降到 0.25,消热设计后 78 lp/mm 处传递函数值依然可以达到 0.4,充分地验证了消热设计的有效性。

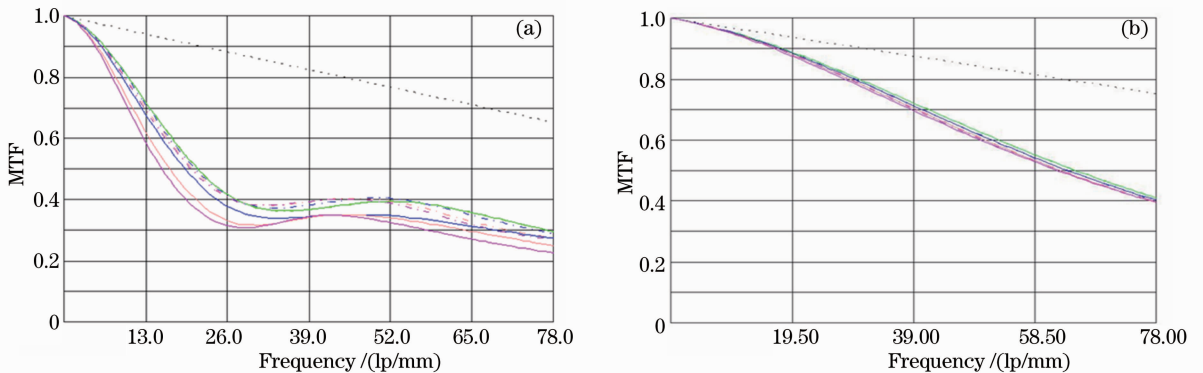


图7 变焦镜头消热设计前、后光学系统传递函数曲线。(a) 消热设计前；(b) 消热设计后

Fig. 7 Optical system transfer function curves of zoom lens before and after athermal design. (a) Before athermal design; (b) after athermal design

4 实验验证及分析

消热设计后的变焦镜头得到了实际应用,将加工、装调后的变焦镜头放进装有光学窗口玻璃的密闭箱体内,分别在常温以及施加热载荷的情况下对消热设计前、后的变焦镜头进行了传递函数检测,常温时检测的传递函数结果如图 8 所示,当密闭箱温度达到 +55 °C 时,检测的传递函数结果如图 9 所示。

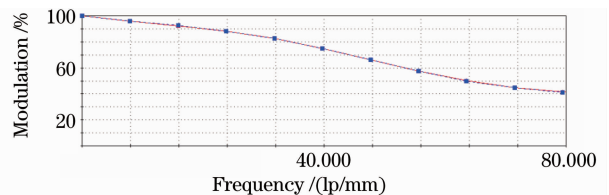


图8 常温检测的 MTF 曲线

Fig. 8 MTF curve detected under normal temperature

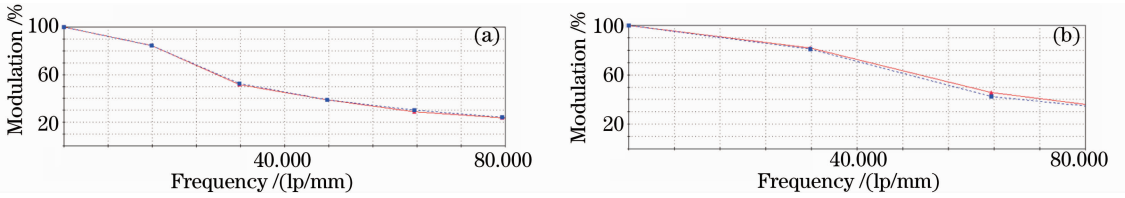


图 9 +55 °C 检测的 MTF 曲线。(a) 消热设计前；(b) 消热设计后

Fig. 9 MTF curve detected under +55 °C. (a) Before athermal design; (b) after athermal design

在常温状态下,消热设计前、后的变焦镜头传递函数结果基本一样,在 78 lp/mm 处都可达 0.4,但当温度升到+55 °C 时,无消热设计的镜头在 78 lp/mm 处传递函数下降为 0.21,下降较多,而经过消热设计的镜头在 78 lp/mm 处传递函数下降为 0.35,这和仿真分析结果相比是基本吻合的。虽然经过消热设计的镜头传递函数仿真结果可以达到 0.4,但由于实际加工、装调难免会带来一些误差,这些因素会导致镜头传递函数降低。

对消热设计前、后的变焦镜头进行了高低温试验,实验条件为:高温工作温度为 +55 °C,时间为 2 h;低温工作温度为 -45 °C,时间为 2 h。实验原理框图如图 10 所示,在高低温试验箱外面放置装有鉴别力板的平行光管,实验前调好装置使鉴别力板清晰地成像在变焦镜头焦面上。常温时消热设计前、后的变焦镜头都能保证清晰成像,当温度逐渐升高时,消热设计前的变焦镜头所成图像开始变模糊,当温度上升到 +55 °C 时所成图像如图 11(a) 所示,而消热设计后的变焦镜头在高低温实验过程中能够一直保持清晰成像,实验过程中所成的图像如图 11(b) 所示。由图 11 中可以看出,采用焦距为 1.6 m 的平行光管,消热设计前的变焦镜头当温度上升到 +55 °C 时 4 号鉴别力板只能看清 16 组线,而消热设计后的变焦镜头 4 号鉴别力板所有的 25 组线都看清楚,说明消热设计后的变焦镜头具有良好的温度适应性。

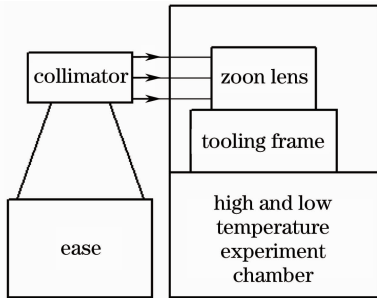


图 10 高低温实验原理框图

Fig. 10 Principle block diagram of high and low temperature experiment

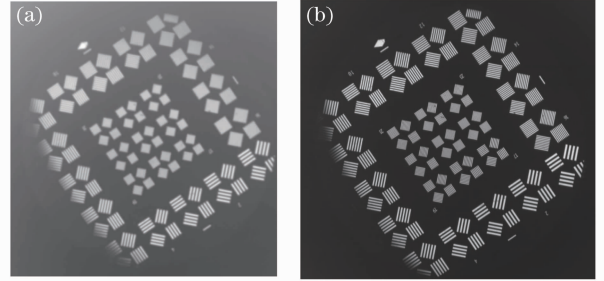


图 11 实验中鉴别力板在变焦镜头焦面所成图像。(a) 消热设计前；(b) 消热设计后

Fig. 11 Image of discrimination board in the focal plane of zoom lens in the experiment. (a) Before athermal design; (b) after athermal design

装有研制的变焦镜头随无人机系统共进行了 3 个架次的部队定型考核试飞。在无人机试飞过程中得益于镜头良好的消热设计,变焦镜头在航空恶劣的温度环境中能够一直保持清晰的成像。图 12 为外场试飞图像。



图 12 外场实验图像

Fig. 12 Image of outfield experiment

5 结 论

设计了一种基于差动原理的变焦镜头被动消热机构,利用该机构对变焦镜头 4 个组件进行了消热设计。仿真和实验结果表明:无消热设计的变焦镜头在 +55 °C 时传递函数值和设计值相比下降约 0.2,而经过消热设计后变焦镜头在 +55 °C 时传递函数值和设计值基本相当,可以较好地保证光学系统成像质量。仿真和实验结果均验证了消热设计的有效性和正确性。设计的被动消热机构结构简单,

体积紧凑,易于实现,在用于航空侦察的变焦镜头中取得了良好的使用效果。

参 考 文 献

- 1 D. J. Kenned, R. L. Kennedy. Direct versus indirect line of sight (LOS) stabilization[J]. *IEEE Trans. Control Systems Technol.*, 2003, **11**(1): 3~15
- 2 F. Y. He, J. C. Cui, S. L. Feng *et al.*. Narcissus analysis for cooled staring IR system[C]. *SPIE*, 2007, **6772**: 67224
- 3 Chen Rongli, Geng Liyin, Ma Zhen *et al.*. Thermal analysis and design for high resolution space telescope[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(1): 154~157
陈荣利, 耿利寅, 马臻等. 空间相机的热分析和热设计[J]. *光子学报*, 2006, **35**(1): 154~157
- 4 Shi Yali, Wang Yifan, Song Chunpeng *et al.*. Active focal length output of zoom lens[J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2006, **6**(27): 50~52
史亚莉, 王一凡, 宋春鹏等. 连续变焦镜头焦距实时输出问题研究[J]. *仪器仪表学报*, 2006, **6**(27): 50~52
- 5 Xu Weicai, Huang Wei. Innovated lens design for catadioptric zoom system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0622005
许伟才, 黄玮. 新型折反射式连续变焦系统设计[J]. *光学学报*, 2011, **31**(6): 0622005
- 6 Lu Qiang, Ji Yiqun, Shen Weimin. Design of a fore continual zoom system with high speed[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2674~2679
陆强, 季轶群, 沈为民. 大相对孔径连续变焦前置物镜的光学设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2674~2679
- 7 Li Jie, Zhang Zhiming, Feng Shengrong. Passive athermalisation technique of infrared optical system loading in missile [J]. *Infrared Technology*, 2005, **27**(3): 196~201
李捷, 张志明, 冯生荣. 弹载红外光学系统被动消热技术[J]. *红外技术*, 2005, **27**(3): 196~201
- 8 Wang Ping, Zhang Bao, Cheng Zhifeng *et al.*. Optimal design of cam structural of zoom lens[J]. *Optics & Precision Engineering*, 2010, **18**(4): 893~898
王平, 张葆, 程志峰等. 变焦镜头凸轮结构优化设计[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(4): 893~898
- 9 Cai Wei, Zhang Xin, Feng Xiuheng *et al.*. Compensating modes for zoom system[J]. *Optics & Precision Engineering*, 2011, **19**(9): 2063~2071
蔡伟, 张新, 冯秀恒等. 变焦距系统的变倍补偿方式[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(9): 2063~2071
- 10 Li Guoqiang, Jia Hong, Liu Qiang. Analysis for some factors affecting the temperature distribution of a CCD camera [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2001, **21**(5): 62~70
李国强, 贾宏, 刘强. 影响 CCD 相机温度分布的因素分析[J]. *中国空间科学技术*, 2001, **21**(5): 62~70
- 11 Wang Ping, Wang Wei, Ding Jinwei *et al.*. Vibration damping design for airborne electro-optical surveillance platform [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2011, **19**(1): 83~89
王平, 王伟, 丁金伟等. 机载光电侦察平台复合减振设计[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(1): 83~89
- 12 Wang Dejiang, Dong Bin, Li Wenming *et al.*. Influence of TDI CCD charge transfer on imaging quality in remote sensing system [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2011, **19**(10): 2500~2506
王德江, 董斌, 李文明等. TDI CCD 电荷转移对遥感相机成像质量的影响[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(10): 2500~2506
- 13 S. Yoshiki, N. Shinichi, H. Kenji *et al.*. Structure and thermal control of panel extension satellite[J]. *Acta Astronautica*, 2009, **65**(7-8): 958~966
- 14 Han Dong, Wu Qingwen, Chen Liheng *et al.*. Determination of extreme working conditions for attitude-varied space camera in thermal design[J]. *Optical Technique*, 2009, **35**(6): 843~850
韩冬, 吴清文, 陈立恒等. 空间相机热设计中的极端工况确定[J]. *光学技术*, 2009, **35**(6): 843~850
- 15 Kong Peng, Bayanheshig, Li Wenhao *et al.*. Optimization of double-grating flat-field holographic concave grating spectrograph [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0205001
孔鹏, 巴音贺希格, 李文昊等. 双光栅平场全息凹面光栅光谱仪的优化设计[J]. *光学学报*, 2011, **31**(2): 0205001
- 16 Wang Zhi, Xu Xiangdong, Zhou Dong *et al.*. Study on effect of thermal stress on microbridges of uncooled IRFPA and controlling methods[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0331002
王志, 许向东, 周东等. 热应力对非制冷红外焦平面微桥的影响及控制研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(3): 0331002
- 17 G. M. Xin, Y. Chen, L. Cheng *et al.*. Simulation of a LHP-based thermal control system under orbital environment [J]. *Appl. Thermal Engng.*, 2009, **29**(13): 2726~2730
- 18 Guo Liang, Wu Qingwen, Yan Changxiang. Thermal design of space spectral imaging apparatus and its analysis and verification [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2011, **19**(6): 1272~1280
郭亮, 吴清文, 颜昌翔. 空间光谱成像仪热设计及其分析与验证[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(6): 1272~1280
- 19 Yan Aqi, Yang Jianfeng, Cao Jianzhong. Optical design of aerial digital camera based on large planar array CCD[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0622003
闫阿奇, 杨建峰, 曹剑中. 大面阵 CCD 航空数码相机光学系统设计[J]. *光学学报*, 2011, **31**(6): 0622003
- 20 Liao Jingyu, Gao Xiaodong, Lan Gongpu *et al.*. Dynamic thermal structural optical analysis and design for aerial camera lens system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, **37**(7): 36~40
廖靖宇, 高晓东, 蓝公仆等. 航空相机物镜动态光机热分析与设计[J]. *光电工程*, 2010, **37**(7): 36~40

栏目编辑: 王晓球