

光电平台变焦镜头光机结构设计及热光学分析

柳 鸣¹ 张国玉¹ 耿树彬² 肖作江¹ 韩 旭¹

¹长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

²北京市延庆县质量技术监督局, 北京 102100

摘要 针对光电对抗稳定平台中的变焦镜头进行了光机结构设计及热光学特性分析。根据30~120 mm变焦要求采用凸轮机构进行结构设计。为确保工作在高低温环境下的光学系统获得高分辨率的目标图像,利用有限元方法分析了高低温环境下整机热变形与轴向温度场下变形位移,采用Zernike多项式对变形后的镜面进行拟合,带入Zemax软件分析出调制传递函数(MTF)、峰谷值(PV)、均方根(RMS)等评价函数随温度变化曲线,验证了光机设计的合理性。经过高低温可靠性实验对分析结果与变焦光学系统的温度适应性进行了验证。

关键词 光学设计; 变焦镜头; 热光学分析; Zernike多项式; 有限元法

中图分类号 O439; V241

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0812003

Opto-Mechanical Structure Design and Thermal Optical Analysis on Zoom Lenses of Optical-Electronic Platform

Liu Ming¹ Zhang Guoyu¹ Geng Shubin² Xiao Zuojiang¹ Han Xu¹

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

²Beijing Yanqing Bureau of Quality and Technical Supervision, Beijing 102100, China

Abstract In the light of zoom lenses of optical-electronic counteraction platform, an opto-mechanical structure is designed and thermal optical property is analyzed. Based on 30~120 mm zooming design requirement, the cam mechanism is adopted to design. In order to ensure that the optical system can obtain high resolution images under high-low temperature, thermal deformation of the whole machine under high-low temperature and rigid body displacement under axial temperature field are analyzed by means of finite element method. Subsequently, mirror surface after thermal deformation is fitted by Zernike annular polynomials and introduces into Zemax to obtain variation curve of modulation transfer function (MTF), peak-to-valley (PV), root mean square (RMS) evaluation function with temperature change to proof of opto-mechanical design rationality. Finally, the analysis results and temperature adaptability of zoom lenses are verified through high-low temperature reliability experiments.

Key words optical design; zoom lens; thermal optical analysis; Zernike polynomial; finite element method

OCIS Codes 120.6810; 120.6780; 120.4570

1 引 言

机载光电对抗稳定平台是对空中飞行目标或地面运动目标进行快速捕获、自动跟踪并主动干扰的机载设备,它可以对制导武器实现欺骗、干扰、摧毁的目的^[1]。为满足精确跟踪探测目标几何特性的需求,要求该平台的光学系统具有较高的传递函数。光电平台工作在复杂的温度环境下,光学系统会受到比较恶劣的空间热环境的考验。温度变化使得光学元件的折射率发生变化;热膨胀导致光学元件的面型发生变化;机械

收稿日期: 2015-02-15; 收到修改稿日期: 2015-03-15

基金项目: 吉林省重大专项—科技发展项目新型光电子器件及应用技术项目(20100610)

作者简介: 柳 鸣(1988-),男,博士研究生,主要从事精密仪器与检测技术方面的研究。E-mail: liuming2525775@126.com

导师简介: 张国玉(1962-),男,博士,教授,主要从事航天地面标定与精密仪器方面的研究。

E-mail: zh_guoyu@163.com(通信联系人)

结构的热变形导致光学元件产生刚体位移,造成离轴、离焦和相对倾斜等问题^[2]。这几种效应都会使得光学系统产生波前畸变、光轴漂移,进而导致光学系统传递函数下降,成像质量受到影响^[3-4]。在设计阶段需要充分考虑材料的光学性能、机械性能及热性能等,需要对其强度、安装方式进行相关的分析,所以在光学系统设计阶段,评估温度适应性对光学系统成像质量具有重大效益^[5-6]。

欧美国家在热光学研究中早已掌握了成熟的理论与设计概念,美国在20世纪70年代就采用热光学分析方法对空间望远镜进行了热设计,且采用波前探测器实时监测波面变化情况。俄罗斯空间研究所^[7]研制的热光学实验装置采用真空罐实时监测真实温度梯度下的光学系统镜片面形变化。本文在光学设计工作的基础上,采用凸轮机构实现正组补偿变焦方式^[8],根据变焦系统自身特点手动划分高质量的六面体网格,这样不仅在刚体矩阵计算阶段精度较高而且与光学分析软件互联阶段点云坐标重现时更加准确,随后采用Zernike多项式拟合变形后的面形对变焦系统的热光学特性进行分析。

2 变焦镜头设计方案

2.1 光学系统设计

根据30~120 mm四倍变焦光学系统的参数指标要求,采用四组式变倍设计,变焦系统由前固定组、变倍组、补偿组和后固定组组成,前固定组采用双-单结构形式;变倍组单-双结构形式,其光焦度为负;补偿组是单-双结构形式,其光焦度为正,实现正组补偿;后固定组由两组单透镜组成^[9]。在变倍过程中,通过变倍组的移动实现光学焦距的变化而补偿组的运动保持了成像面的稳定。最终设计的光学系统结构形式如图1所示。

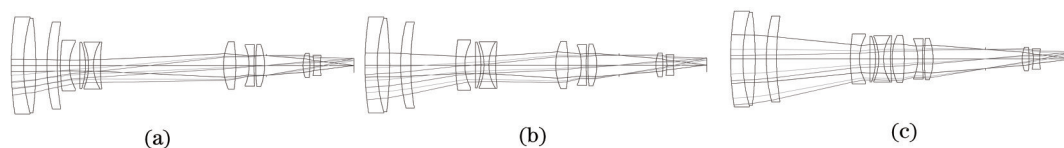


图1 焦距为(a) 30mm; (b) 60 mm; (c) 120 mm的变焦系统结构图

Fig.1 Structure charts of the zoom system with focal length of (a) 30 mm; (b) 60 mm; (c) 120 mm

光学设计结果为:焦距30~120 mm;入瞳口径7.5~30 mm;像高为8.6 mm,全视场焦距变化范围内波像差均方值小于 $\lambda/6$;最大相对畸变小于0.4%;最大离焦量55 μm 。在整个变焦距范围内,调制传递函数(MTF)大于0.4@75 lp/mm,能量集中度达80%,成像质量良好。

2.2 光机结构设计

根据30~120 mm变焦,像质清晰点不少于5个点的特性要求采用凸轮机构进行结构设计。机械结构如图2所示,图中1为前固定组,2为变倍组,3为补偿组,4为后固定组,5为电荷耦合器件(CCD)。凸轮筒7实现成像过程中的机械补偿,选用40Cr材质制造,两端加工有外齿轮,与传动机构啮合。传动机构由步进电机8、啮合齿轮10、编码器9等部分组成。由步进电机带动凸轮筒相对于凸轮座进行旋转运动,即实现变倍组和补偿组按照设计路线进行直线移动。在凸轮筒内腔中,安装有两条平行的圆柱形导轨6,两条导轨形成了变倍组和补偿组的移动轨道,且凸轮筒上加工有变焦曲线槽,当凸轮筒沿周向作旋转运动时,变倍组和补偿组按照预先设计好的曲线做相对运动,完成光学系统焦距的连续变化。值得注意的是为保证变倍组与补偿组在沿导轨运动时产生较小的晃动量,两个导向柱应严格平行。

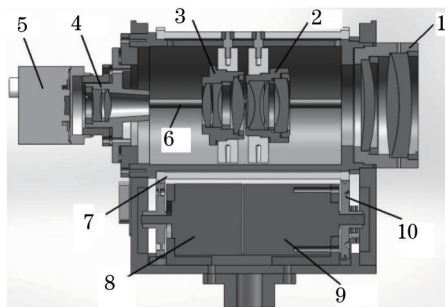


图2 变焦镜头机械结构

Fig.2 Mechanical structure of the zoom lenses

3 变焦镜头热光学分析

3.1 变焦镜头有限元仿真建模

在 Hypermesh 软件中进行建模,手动划分体 62128 个六面体网格并等效耦合节点,结构有限元剖视图如图 3 所示。其中导向柱采用一维梁单元划分,镜框、透镜、压圈与隔圈均划分为高质量六面体单元,室温硫化型硅橡胶(RTV)层采用三维六面体单元划分且平均厚度为 0.3 mm,并均匀分布在光学玻璃周向上。镜头材料参数如表 1 所示。

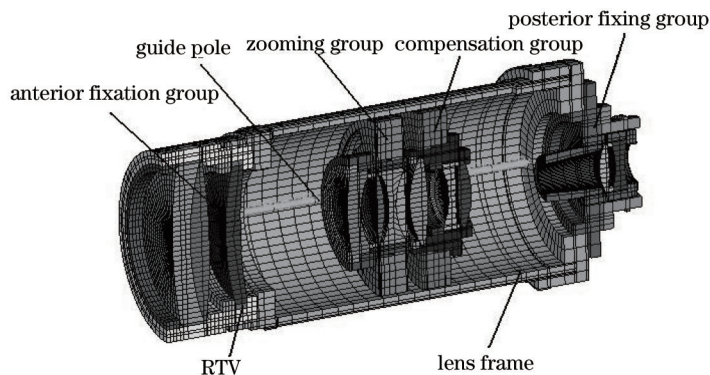


图 3 变焦镜头有限元模型

Fig.3 Finite element model of zoom lenses

表 1 变焦镜头材料参数

Table 1 Material parameters of zoom lenses

Material component	Elastic modulus /MPa	Density /(10 ⁻⁶ kg/mm ³)	Poisson ratio	Linear expansion coefficient /(10 ⁻⁶ /°C)
Aluminum alloy	75000	2.7	0.33	23
RTV	696	1.15	0.45	236
H-ZF6	90870	3.24	0.251	9.2
H-ZK3	84950	3.26	0.252	6.1
K9	79200	2.47	0.22	7.0
F5	57850	3.64	0.226	8.7

3.2 有限元分析结果

将网格模型导入 Nastran 软件中进行解算,设结构体参考温度为室温 23°C,军标中航空用变焦系统的环境温度要求为-40 °C~60 °C,该指标作为温度载荷对变焦系统进行加载。约束凸轮座与光电对抗平台舱体的连接位置。解算后发现整机随温度变化过程中-40°C极低温度下变焦镜头中的前固定组、变倍组、补偿组及后固定组将产生最大位移形变量如图 4 所示。除了整体温升(降)的影响外,变焦镜头在光电平台密闭吊舱中影响温度的因素还有内部 CCD 生成的热辐射、电机产生的热量等,这些因素使得变焦系统在轴向上产生温度梯度变化,靠近 CCD 的后固定组温度最高为 35°C,前固定由于风冷且与外界环境距离较近温度最低为-15°C。首先解算出轴向温度场分布如图 5 所示。再将温度场作为新的温度载荷解算温度梯度下的变焦系统的位移云图如图 6 所示。得到了热变形后各节点的刚体位移与坐标信息后进行热光学分析。

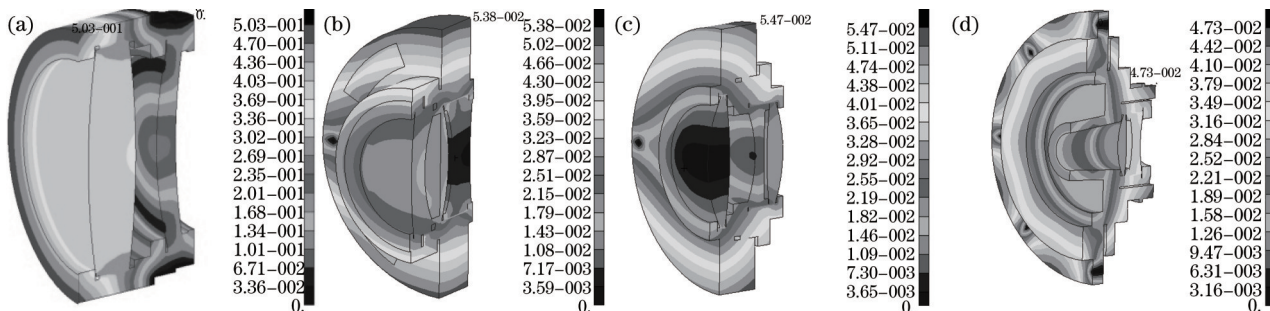


图 4 变焦镜头形变云图。(a) 前固定组; (b) 变倍组; (c) 补偿组; (d) 后固定组

Fig.4 Thermal deformation nephogram of zoom lenses. (a) Anterior fixation group; (b) zooming group; (c) compensation group; (d) posterior fixation group

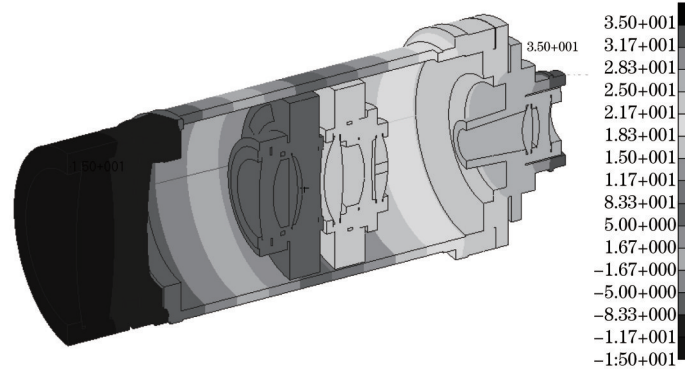


图5 轴向温度场分布

Fig.5 Axial temperature field distribution

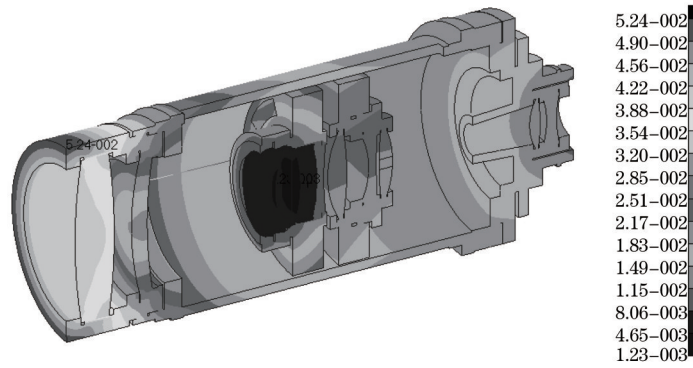


图6 温差形变示意图

Fig.6 Thermal deformation image

3.3 热光学特性分析

采取 Zernike 环形多项式将变形后镜面微元的各节点微位移信息与光学软件 Zemax 相关联,将变形后的各球面按 Zernike 多项式线性组合进行表示^[11]:

$$\Delta S = \sum_{i=1}^N a_i Z_i(\rho, \theta) = Z_1 + \frac{Z_2 \rho \cos \theta}{\sqrt{1 + \xi^2}} + \frac{Z_3 \rho \sin \theta}{\sqrt{1 + \xi^2}} + \frac{Z_4 (2\rho^2 - 1 - \xi^2)}{1 - \xi^2} + \frac{Z_5 \rho^2 \cos 2\theta}{\sqrt{1 + \xi^2 + \xi^4}} + \frac{Z_6 \rho^2 \sin 2\theta}{\sqrt{1 + \xi^2 + \xi^4}} + \frac{Z_7 [3(1 + \xi^2)\rho^3 - 2(1 + \xi^2 + \xi^4)\rho] \cos \theta}{(1 - \xi^2)\sqrt{(1 + \xi^2)(1 + 4\xi^2 + \xi^4)}} + \frac{Z_8 [3(1 + \xi^2)\rho^3 - 2(1 + \xi^2 + \xi^4)\rho] \sin \theta}{(1 - \xi^2)\sqrt{(1 + \xi^2)(1 + 4\xi^2 + \xi^4)}} + \frac{Z_9 [6\rho^4 - 6(1 + \xi^2)\rho^2 + 1 + 4\xi^2 + \xi^4]}{(1 - \xi^2)^2}, \quad (1)$$

式中 a_i 为第 i 项的系数, Z_i 为 Zernike 环形多项式第 i 项的系数, ε 为中心遮拦比, (ρ, θ) 为变形后单元节点的坐标值,该值通过 VC 开发的专门软件读取有限元结果文件获得,并转化为光学软件可执行的数据格式。光学系统波像差可以表示为^[11]:

$$W(\rho, \theta) = a_{\text{piston}} + a_{\text{defocus}} \rho^2 + a_{\text{tilt}_x} \rho \sin \theta + a_{\text{tilt}_y} \rho \cos \theta + a_{\text{sa}} \rho^4 + a_{\text{coma}_x} \rho^3 \cos \theta + a_{\text{coma}_y} \rho + a_{\text{as}_0} \rho^2 \cos 2\theta + a_{\text{as}_{45}} \rho^2 \sin 2\theta, \quad (2)$$

式中 a 为各项 Seidel 像差系数,通过对比(1)式和(2)式,可知 Seidel 像差系数与 Zernike 多项式具有一一对应关系如表 2 所示^[11]。为保证分析的精度,采用 29 项非归一化 Zernike 环形多项式进行拟合,以长焦组态为例,计算后的变焦镜头形变对整个光学系统的 Seidel 系数大小的影响如表 2 所示。

表2 Seidel系数与Zernike多项式的关系

Table 2 Relationship between Seidel coefficients and Zernike polynomial

Seidel coefficients	Zernike polynomial	Value (-40 °C)	Value(-15 °C~35 °C)
a_{piston}	$2\left[Z_1 - Z_4 + Z_9 \frac{1+4\varepsilon^2+\varepsilon^4}{(1-\varepsilon^2)^2}\right]$	9.388×10^{-3}	7.984×10^{-3}
a_{tilt_x}	$2\left\{\frac{Z_2}{(1+\varepsilon^2)^{1/2}} - \frac{2Z_7(1+\varepsilon^2+\varepsilon^4)}{(1-\varepsilon^2)[(1+\varepsilon^2)(1+4\varepsilon^2+\varepsilon^4)]^{1/2}}\right\}$	1.082×10^{-3}	-6.452×10^{-4}
a_{tilt_y}	$2\left\{\frac{Z_2}{(1+\varepsilon^2)^{1/2}} - \frac{2Z_8(1+\varepsilon^2+\varepsilon^4)}{(1-\varepsilon^2)[(1+\varepsilon^2)(1+4\varepsilon^2+\varepsilon^4)]^{1/2}}\right\}$	6.676×10^{-4}	-2.970×10^{-4}
a_{defocus}	$2[2Z_4/(1-\varepsilon^2) - 6Z_9(1+\varepsilon^2)/(1-\varepsilon^2)^2]$	3.788×10^{-3}	9.320×10^{-4}
a_{sa}	$12Z_9/(1-\varepsilon^2)^2$	-8.582×10^{-3}	-7.582×10^{-3}
a_{coma_x}	$\frac{6(1+\xi^2)Z_7}{(1-\xi^2)\sqrt{(1+\xi^2)(1+4\xi^2+\xi^4)}}$	3.131×10^{-3}	2.282×10^{-3}
a_{coma_y}	$\frac{6(1+\xi^2)Z_8}{(1-\xi^2)\sqrt{(1+\xi^2)(1+4\xi^2+\xi^4)}}$	3.006×10^{-3}	2.499×10^{-3}

将各表面的每项 Zernike 系数导入 Zemax 软件,以长焦组态为例,光学系统在轴向温度梯度变化后的 MTF 曲线如图 7 所示。从 MTF 曲线的变化可以看出轴向温差下的光学系统各视场传递函数平均下降系数为 0.08% 且 MTF 依然可以达到 0.2 以上,证明了该系统温度适应性对轴向温差并不敏感。整机热变形后的 MTF,峰谷值(PV)与均方根(RMS)变化曲线如图 8 所示。从图中可以看出 PV 值与 RMS 值的平均上升 7.5% 与 13.3%,长焦组态下各视场光学传递函数平均下降 2.79%,整个光学系统对整机热变形较敏感,但成像质量较好仍然可以满足技术指标,证明该变焦镜头结构设计合理,温度适应性良好。

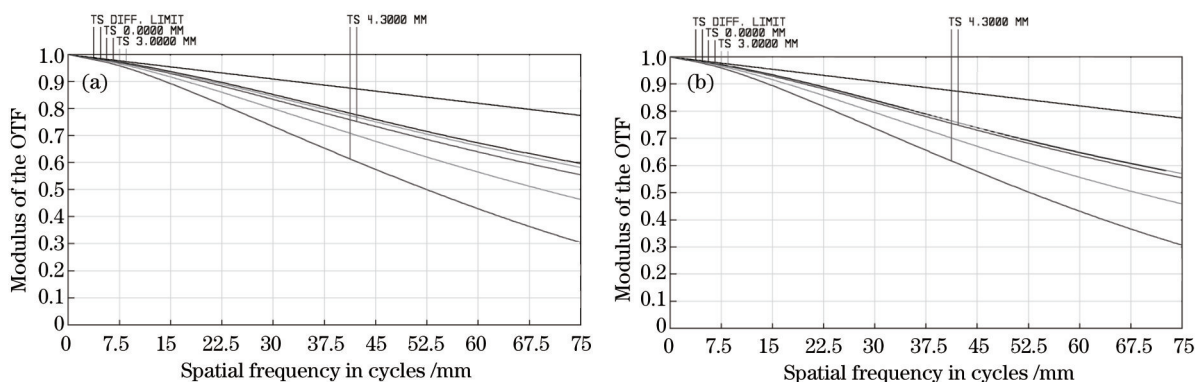


图 7 变焦镜头 MTF。(a) 室温下的 MTF 曲线; (b) 轴向温度梯度下的 MTF 曲线

Fig. 7 MTF curves of zoom lenses. (a) MTF under room temperature; (b) MTF under axial gradient temperature

4 实验验证

实验验证以光学镜头可靠性检测仪作为检测设备,将装校后的变焦镜头放置于装有光学窗口的高低温试验箱中,由积分球提供均匀光源,平行光管提供无穷远模拟目标,在光管的焦平面安装分辨率板对变焦系统的高低温适应性进行检测,实验设备如图 9 所示。在 23°C 常温环境下,四号分辨率板可以看清全部 25 组线,如图 10(a)所示,变焦镜头在 $f=31.062 \text{ mm}$ $f=65.975 \text{ mm}$ $f=116.99 \text{ mm}$ 处的空间分辨率均大于 91 lp/mm。施加 60°C 温度应力 2h 后,变焦镜头在三个焦距处的空间分辨率同样均大于 91 lp/mm。当施加 -40°C 温度应力 2h 后,四号分辨率板仅可以看清 22 组线,如图 10(b)所示,变焦镜头的在三个焦距处的空间分辨率均大于 87 lp/mm。在整个实验过程中,在整个高低温环境实验中变焦镜头基本保持成像清晰。

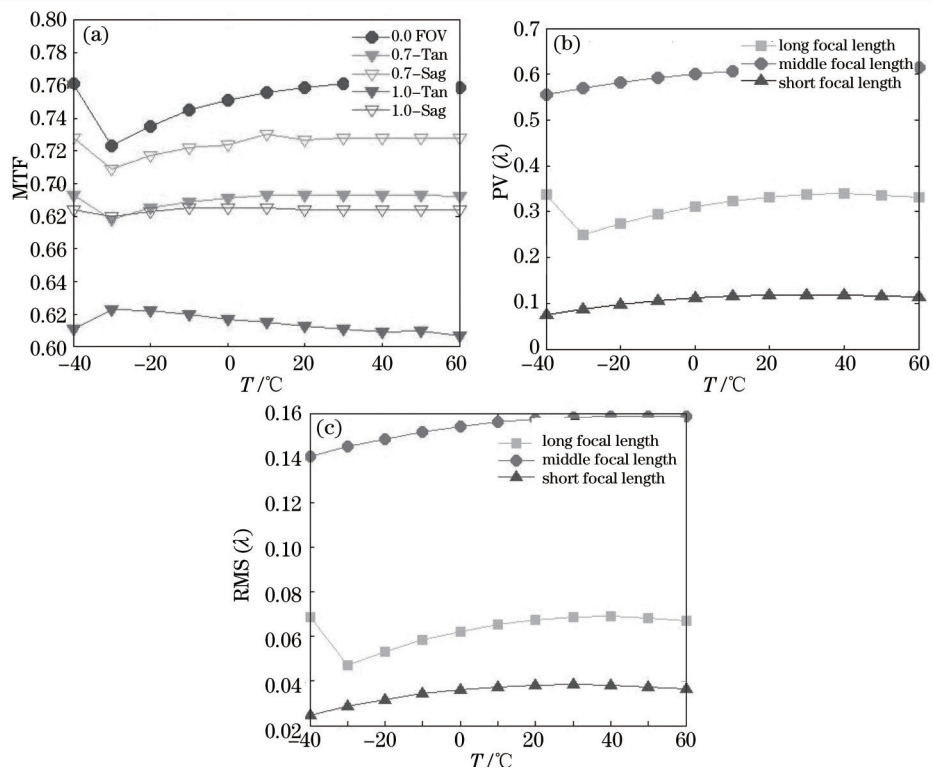


图 8 (a) MTF; (b) PV; (c) RMS 随温度变化曲线

Fig 8 Curves of (a) MTF; (b) PV; (c) RMS change with temperature

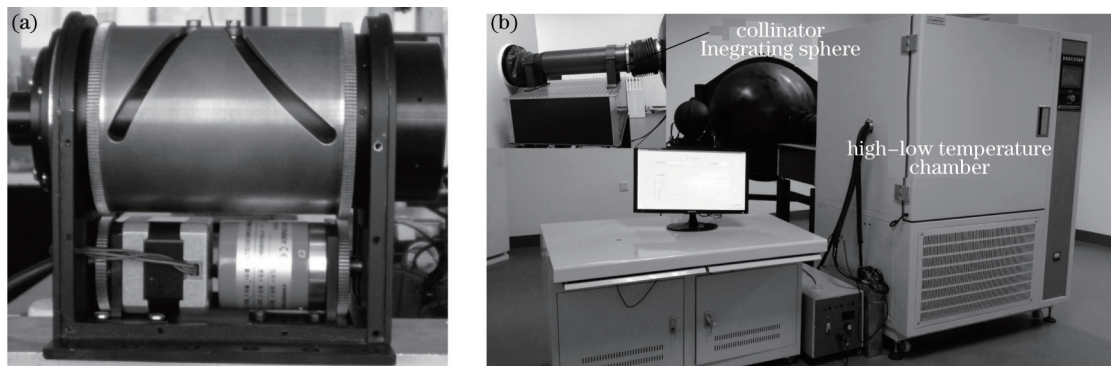


图 9 (a) 变焦镜头实物图; (b) 环境实验装置图

Fig.9 (a) Factual picture of zoom lenses; (b) equipment picture of environment experiment

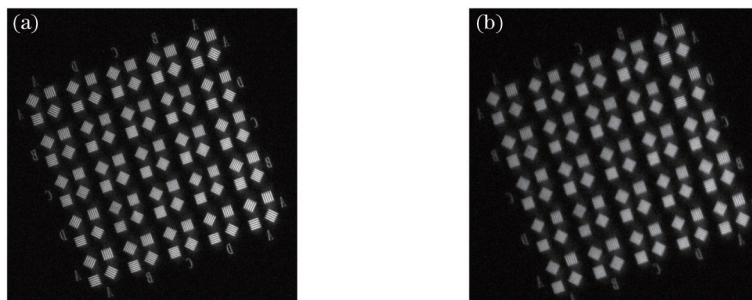


图 10 不同温度下的分辨率板图像

Fig.10 Image of resolution test target under different temperatures

5 结 论

通过有限元的分析方法,手动划分高质量的六面体网格进行仿真建模,提高了分析精度,结合 Zernike 多

项式拟合方法分析变焦镜头的热光学特性。证明了该变焦系统的光机结构设计可行性和镜片材料选择的合理性。通过可靠性实验验证变焦镜头的温度适应性,证明该研究方法合理可行,并可应用到其他光学系统的热光学分析研究中。

参 考 文 献

- 1 Xiao Zuojiang, Yang Chengyu, Yang Ruining, *et al.*. Research on the strong light power interfering technology of optical-electronic counteraction stabilized platform[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(6): 1001-1007.
肖作江, 杨成禹, 杨瑞宁, 等. 光电对抗稳定平台强光能干扰技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 1001-1007
- 2 Han Xu, Ma Jun, Li Ming, *et al.*. Temperature adaptation of mapping camera[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(6): 1175-1181.
韩旭, 马军, 黎明, 等. 测绘相机的温度适应性[J]. 光学精密工程, 2012, 20(6): 1175-1181.
- 3 Wang Ping, Zhang Guoyu, Wang Wei, *et al.*. Passive athermal design of aerial zoom lenses[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0922006.
王平, 张国玉, 王伟, 等. 航空变焦距镜头被动消热设计[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0922006.
- 4 Fang Yu, Xiangli Bin, Lü Qunbo, *et al.*. Design of optical window thickness and influence of its deformation on multi-spectral camera's optical performance[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0422007.
方煜, 相里斌, 吕群波, 等. 光学窗口厚度设计及形变对相机性能影响[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0422007.
- 5 Chen Rongli, Ma Zhen, Yang Wengang, *et al.*. Thermal-optical analysis and tests for high resolution space camera[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(11): 2068-2072.
陈荣利, 马臻, 杨文刚, 等. 适应性空间相机热光学分析与实验验证[J]. 光子学报, 2010, 39(11): 2068-2072.
- 6 Li Ming, Wu Qingwen, Yu Fei, *et al.*. Optimization of optical window glass thickness based on the thermal optical analysis[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(1): 210-213.
黎明, 吴清文, 余飞. 基于热光学分析的光学窗口玻璃厚度的优化[J]. 光学学报, 2010, 30(1): 210-213.
- 7 Zhao Lixin, Shao Ying. Summary of thermal control and thermal optical analysis for space optical system[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2010, 2001, 22(2): 13-19.
赵立新, 邵英. 空间望远镜的热设计和热光学分析综述[J]. 航天返回与遥感, 2001, 22(2): 13-19.
- 8 Wang Ping, Zhang Bao, Cheng Zhifeng, *et al.*. Optical design of cam structure of zoom lens[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(4): 893-898.
王平, 张葆, 程志峰, 等. 变焦距镜头凸轮结构优化设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(4): 893-898.
- 9 Gao Duorui, Zhong LiuJun, Zhao Zhao, *et al.*. Zoom optical system design based on Matlab[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0416002.
高铎瑞, 钟刘军, 赵昭, 等. 基于Matlab的变焦光学系统设计[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0416002.
- 10 Meng Xuan, Qiao Yanfeng, He Fengyun, *et al.*. Analyzing primary mirror deformation of photo-electronic thedolite using zernike anular polynomials[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(7): 072201.
孟轩, 乔彦峰, 何锋贇, 等. Zernike环多项式分析光电经纬仪主镜变形[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(7): 072201.
- 11 Meng Xuan. Study on Deformation of Photoelectric Thedolite Primary Mirror Influence on the Image under Gravity[D]. Changchun: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2000: 28-29.
孟轩. 重力下光电经纬仪主镜变形对成像的影响研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院长春光学精密机械与物理研究所, 2000: 28-29.

栏目编辑: 韩峰