

基于光机集成分析的火情监察 红外变焦镜头主动消热差设计

尹晶, 刘旭, 徐晓影, 崔艳群, 王强, 郭富城
(长春电子科技学院, 吉林 长春 130114)

摘要: 红外变焦监视镜头的F数与焦深相对较小, 因此温度变化极易导致离焦现象, 导致成像质量下降。本文针对火情监察红外变焦镜头在 $-40^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$ 范围内成像清晰的技术要求, 采用有限元法分析温度变化下各光学镜片前后镜面的刚体位移与旋转量, 将刚体位移导入至 Sigit 光机集成分析软件中仿真出温度变化工况下镜头的离焦量, 分析结果表明焦距值变量在 $-0.16\sim +0.4\text{mm}$ 之间, 调焦量为 $0.108\sim 0.188$ 。针对上述情况, 采用两个凸轮两套执行机构来分别控制变倍组和补偿组的移动, 实现镜头的主动消热差保证温度变化下成像仍旧清晰。最终通过温度可靠性实验对镜头光学分辨率温度适应性的进行考核, 实验结果表明在温度变化过程中空间分辨率均大于 30lp/mm , 变焦过程成像质量基本清晰。

关键词: 火情监察; 光机集成分析; 红外变焦镜头; 主动消热差

中图分类号: O439 文献标志码: A 文章编号: 1001-8891(2021)11-1073-08

Active Athermalization Design of Infrared Zoom Lens for Fire Monitoring Based on Opto-mechanical Integration Analysis

YIN Jing, LIU Xu, XU Xiaoying, CUI Yanqun, WANG Qiang, GUO Fucheng
(Changchun College of Electronic Technology, Changchun 130114, China)

Abstract: The F-number and focal depth of infrared monitoring zoom lens are relatively small; therefore, the temperature change can easily cause defocusing, resulting in the deterioration of imaging quality. This article is aimed at the technical requirements for the clear imaging of the fire monitoring infrared zoom lens in the range of -40°C to 50°C . The finite element method is used to analyze the rigid body displacement and rotation of the front and rear mirrors of each lens under temperature changes and import the rigid body displacement into the Sigit optical-mechanical integrated analysis software to simulate the defocus of the lens under temperature change conditions. The analysis result shows that the focal length variable is between -0.16 to 0.4mm and the focusing amount is 0.108 to 0.188 . In response to the above situation, two cams and two sets of actuators are used to control the movement of the zoom group and the compensation group respectively, for realizing the active athermalization design of the lens to ensure that the imaging is still clear under the condition of temperature change. Finally, the temperature adaptability of the lens optical resolution is evaluated through a temperature reliability experiment. The experimental results show that the spatial resolution is greater than 30lp/mm during temperature change. The image quality is basically clear during zooming process.

Key words: burning monitoring, opto-mechanical integration analysis, infrared zoom lens, initiative athermalization design

0 引言

随着农作物单产提高, 秸秆总量迅速增加, 多数地区就开始出现秸秆焚烧现象并越来越严重^[1]。基于

收稿日期: 2021-05-14; 修订日期: 2021-06-15.

作者简介: 尹晶 (1983-), 女, 副教授, 研究方向为光电检测技术及仪器。E-mail: 621232@qq.com.

通信作者: 刘旭 (1982-), 男, 副教授, 研究方向为电气控制研究。E-mail: 65493440@qq.com.

上述安全问题以及秸秆焚烧区分布广且分散的特点，采用红外变焦光学镜头远程监控发生火警、污染物排放等情况，实时高效地对焚烧区异常情况进行监视。由于红外变焦光学系统的F数相对于可见光变焦光学系统小，因此红外变焦光学系统的焦深相对于可见光变焦光学的焦深小，温度变化易造成光电接收器偏离光学系统的高斯成像面，造成成像质量下降^[2-3]。近年来国内外相关机构和研究人员相继对光机集成分析技术(Thermal-structural-optical (TSO) integrated analysis)进行了诸多研究^[4]，尤其是针对红外系统中红外镜片的光学材料的折射率温度系数较大的特性^[5]，光机集成分析技术在红外光机系统中的消热补偿中的应用已经被广泛证明是目前比较有效、合理的仿真分析手段。本文采用光机集成分析技术仿真红外变焦镜头在变焦过程中物距无穷远、物距10m以及物距30m处三档焦距处的离焦量，以消热差设计补偿焦面位移而带来的离焦量，采用两个凸轮两套执行机构来分别控制变倍组和补偿组的移动实现镜头的主动消热差设计，保证温度变化工况下成像仍旧清晰。上述方法也可应用到其他光学系统的热光学分析或主动消热差设计过程。

1 红外变焦光学系统

本文以火情监察红外变焦光学镜头为研究对象，该光学系统的具体设计参数与技术指标如表1所示。

红外变焦镜头基于库克三分离物镜进行优化设计，变倍方式为移动第二片玻璃，为了矫正满足同时

校正两档变焦系统的残余像差，将经典三片式最后的正透镜拆成分离的两个正光焦度的透镜，即系统设计用了4片玻璃，其中第一~第三片材料为锗，第四片为硒化锌，同时第二片~第四片中各设一个表面(共计3个表面)为非球面更好地矫正残余像差。孔径光阑的位置选择在后固定组附近，位于第三片与第四片玻璃之间。红外变焦镜头光学结构如图1、图2所示。

在ZEMAX中对整个变焦系统的成像质量进行评价，得出的变焦系统在20℃室温状态下长焦及短焦时物距在无限远及有限远处的Modulation Transfer Function (MTF)曲线，如图3(a)~(d)所示。由MTF曲线图可以看出，各视场下MTF值均在0.4以上，接近衍射极限，成像质量良好。

2 基于光机集成分析的红外变焦镜头主动消热光机设计

红外材料具有较大的温度系数，温度变化时折射率和阿贝系数将发生较大变化影响光学系统的成像性能^[6]。针对上述问题，无热化设计则可以保证光学系统在使用温度范围内的正常工作。消热化设计主要有3种方法：光学被动式^[7-8]、机电主动式^[9]和机械被动式^[10]。机电主动式消热设计可根据实际系统应用时带来的焦面位移进行调焦，不需额外增加镜片，所以本文采用机电主动式热分析方式。为了准确地分析出光机系统在使用温度范围内的离焦量，采用光机集成方法分析得出后截距即像面位置移动量。

表1 红外变焦镜头设计参数与技术要求

Table 1 Design parameters and technical requirements of infrared zoom lens	
Design parameter	Value
Wave length	8-14 μm
Focal length	34.5 mm/77.5 mm
Field of view	$f = 34.5 : 2\omega_x \approx 9.148^\circ; 2\omega_y \approx 6.768^\circ$ $f = 77.5 : 2\omega_x \approx 4.02^\circ; 2\omega_y \approx 3.016^\circ$
Aperture	$F=1$
Technical requirement	The imaging is clear in the range of -40℃ to 50℃

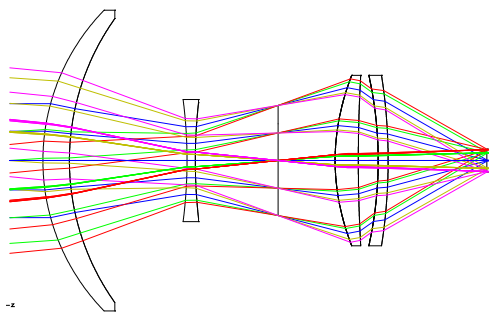


图1 短焦 (f=34.5mm) 红外光学系统图

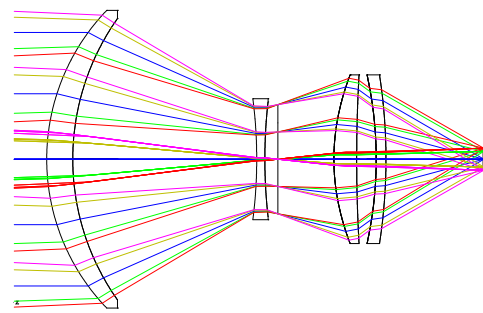
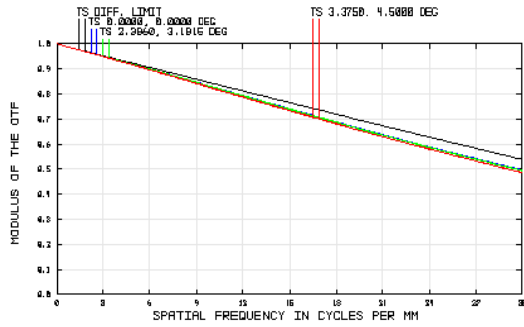


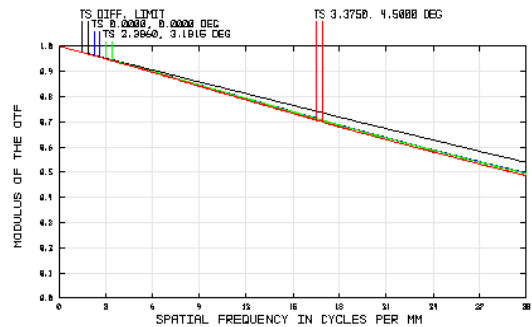
图2 长焦 (f=77.5mm) 红外光学系统图

Fig.1 Infrared optical system diagram at short-focal configuration

Fig.2 Infrared optical system diagram at long-focal configuration



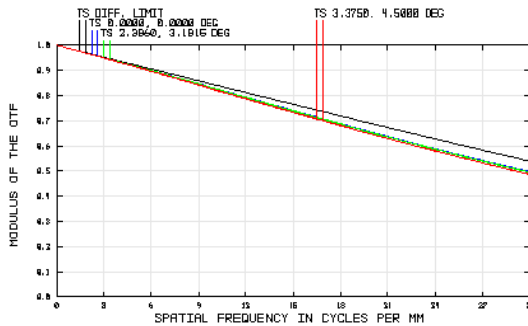
(a) 无限远物距短焦组态 MTF 曲线



(b) 无限远物距长焦组态 MTF 曲线

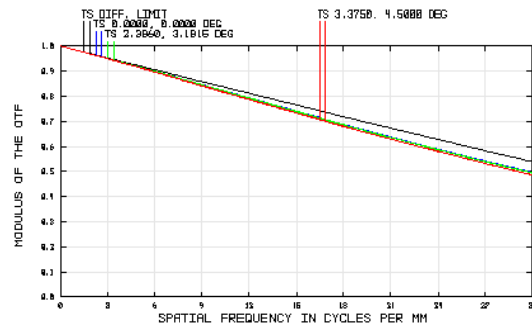
(a) MTF at short focal configuration for infinite object

(b) MTF at long focal configuration for infinite object



(c) 10m 物距短焦组态 MTF 曲线

(c) MTF at short focal configuration for object at 10 m distance



(d) 50m 物距长焦组态 MTF 曲线

(d) MTF at long focal configuration for object at 50 m distance

图3 20℃长/短焦组态红外镜头 MTF 曲线

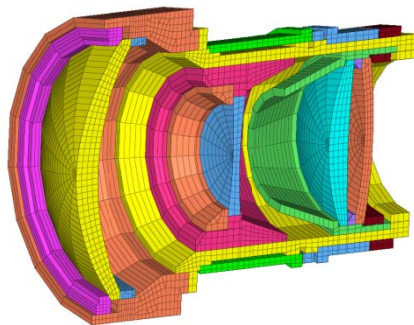
Fig.3 MTF curves of at Infrared optical system at short/long focal configuration under 20℃

2.1 有限元模型建立

在有限元通用前处理 Hypermesh 软件平台对红外变焦镜头的两档变焦组态建立有限元模型, 手动划分 167856 个高质量网格, 网格群雅各比大于 0.7 的网格占比大于 86%, 同时等效耦合节点, 针对螺纹连接以及螺栓连接等进行节点耦合处理简化处理, 光学玻璃周向上划分平均厚度为 0.2 mm 的硫化型硅橡胶层 (room temperature vulcanized silicone rubber, RTV), 有限元模型如图 4 所示, 镜头所选各材料参数如表 2 所示。

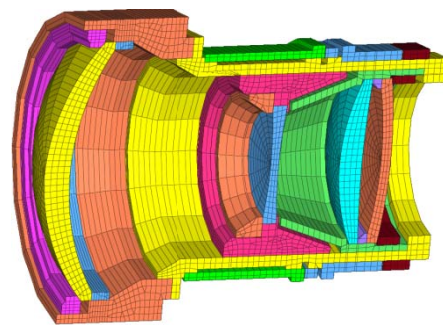
2.2 有限元分析结果

将有限元模型导入至 Patran & Nastran 软件平台下进行热变形仿真计算, 设定 20℃ 室温为红外变焦镜头的初始参考温度, 根据 -40℃~50℃ 范围内成像清晰的技术要求, 将两个极限温度 (-40℃ 和 50℃) 作为温度载荷施加在红外变焦镜头光机系统整机。镜头外框与底座连接位置设为位移约束。经计算, 随温度变化过程中 -40℃ 极低温度下变焦镜头在两档焦距组态下的刚体位移形变量云图如图 5 所示。



(a) 短焦 ($f=34.5\text{mm}$) 镜头的有限元模型

(a) Finite element model of lens at short focus ($f=34.5\text{ mm}$)



(b) 长焦 ($f=77.5\text{mm}$) 镜头的有限元模型

(b) Finite element model of lens at long focus ($f=77.5\text{ mm}$)

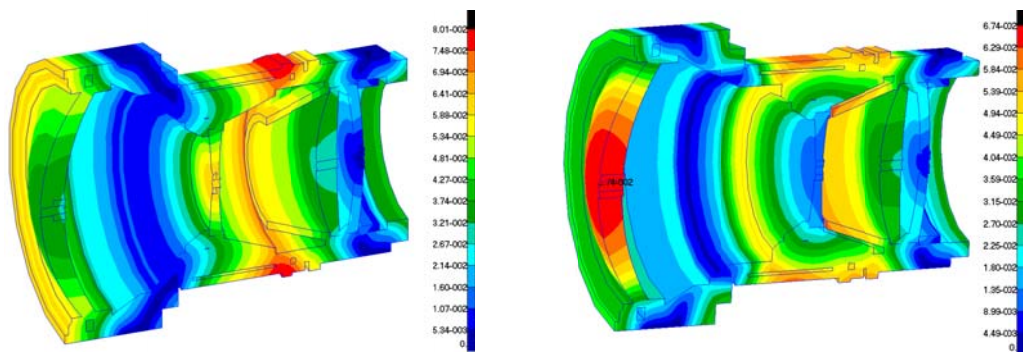
图4 红外变焦镜头有限元模型

Fig.4 Finite element model of infrared zoom lens

表 2 红外变焦镜头各材料参数表

Table 2 Material parameters of infrared zoom lens

Material	Elastic modulus (MPa)	Density(10^{-6} kg/mm ³)	Poisson ratio	Coefficient of linear expansion($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
Aluminium alloy(2A12)	75000	2.7	0.33	23
Brass alloy(H62)	200000	8.43	0.277	20.6
Alloy steel(45)	200000	7.8	0.3	11.6
Germanite glass	103000	5.32	0.28	6.1
Zinc selenide	70000	5.27	0.28	7.1



(a) -40°C 工况下短焦组态镜头热变形位移云图
(a) Displacement cloud of thermal deformation of lens at short focal configuration under -40°C

(b) -40°C 工况下长焦组态镜头热变形位移云图
(b) Displacement cloud of thermal deformation of lens at long focal configuration under -40°C

图 5 -40°C 工况下红外变焦镜头热变形位移云图

Fig.5 Displacement cloud of thermal deformation of infrared zoom lens

2.3 光机集成分析

将上述热变形分析后的红外变焦镜头的各镜片前后表面的刚体位移提取出来,并导入至 Sigfit 光机集成仿真平台软件基于 37 项 Fringe Zernike 多项式^[11],拟

合出热变形后的面型信息,包括形变后的镜面偏移、旋转。表 3 和表 4 分别为红外变焦镜头在极限温度(-40°C)下两档变焦组态下 Sigfit 生成的 FIT 结果文件中刚体位移、旋转的变化量。

表 3 红外变焦镜头短焦组态 ($f=34.5\text{mm}$) -40°C 温度载荷下各镜面刚体位移、旋转变化量

Table 3 Variations in displacement and rotation of rigid bodies of each mirror of infrared zoom lens at short-focus configuration($f=34.5\text{mm}$) under -40°C temperature load

Mirror number	Rigid body displacement (X-axis)	Rigid body displacement (Y-axis)	Rigid body displacement (Z-axis)	Rigid body rotation (X-axis)	Rigid body rotation (Y-axis)	Rigid body rotation (Z-axis)
1	7.77×10^{-3}	5.28×10^{-3}	2.48×10^{-2}	-3.267×10^{-12}	-7.301×10^{-13}	-1.904×10^{-12}
2	7.62×10^{-3}	4.73×10^{-3}	1.68×10^{-2}	1.124×10^{-12}	-9.678×10^{-13}	-2.564×10^{-12}
3	-6.62×10^{-3}	-5.46×10^{-3}	6.35×10^{-2}	-4.22×10^{-12}	-3.514×10^{-12}	-3.114×10^{-12}
4	-7.11×10^{-3}	-5.03×10^{-3}	5.55×10^{-2}	-3.15×10^{-12}	-3.212×10^{-12}	-3.163×10^{-12}
5	6.77×10^{-3}	5.72×10^{-3}	-2.48×10^{-2}	1.25×10^{-11}	-2.675×10^{-12}	-9.006×10^{-13}
6	7.11×10^{-3}	5.68×10^{-3}	-2.62×10^{-2}	-3.66×10^{-12}	-2.253×10^{-12}	5.046×10^{-12}
7	4.66×10^{-3}	5.33×10^{-3}	-7.46×10^{-3}	-6.62×10^{-12}	-2.170×10^{-12}	-2.006×10^{-12}
8	3.54×10^{-3}	5.76×10^{-3}	-7.29×10^{-3}	-6.67×10^{-12}	-2.061×10^{-12}	1.120×10^{-12}

表4 红外变焦镜头长焦组态 ($f=77.5\text{mm}$) -40°C 温度载荷各镜面刚体位移、旋转变化量

Table 4 Variations in displacement and rotation of rigid bodies of each mirror of infrared zoom lens at long-focus configuration ($f=77.5\text{mm}$) under -40°C temperature load

Mirror number	Rigid body displacement (X-axis)	Rigid body displacement (Y-axis)	Rigid body displacement (Z-axis)	Rigid body rotation (X-axis)	Rigid body rotation (Y-axis)	Rigid body rotation (Z-axis)
1	3.37×10^{-2}	1.2×10^{-2}	-6.68×10^{-2}	1.182×10^{-11}	-1.776×10^{-11}	-5.684×10^{-12}
2	3.11×10^{-2}	2.06×10^{-2}	-6.747×10^{-2}	1.124×10^{-11}	-8.886×10^{-12}	-5.564×10^{-12}
3	-3.66×10^{-2}	3.33×10^{-2}	-7.77×10^{-3}	-7.51×10^{-12}	-7.152×10^{-12}	-1.752×10^{-12}
4	-3.56×10^{-2}	2.68×10^{-2}	-7.26×10^{-3}	-6.99×10^{-12}	-6.88×10^{-12}	-2.846×10^{-12}
5	3.51×10^{-2}	-1.27×10^{-2}	-3.34×10^{-2}	-1.13×10^{-11}	-9.996×10^{-13}	-9.687×10^{-13}
6	3.12×10^{-2}	-9.97×10^{-3}	-4.09×10^{-2}	-6.66×10^{-12}	-1.752×10^{-12}	3.514×10^{-12}
7	2.17×10^{-2}	1.17×10^{-2}	-1.13×10^{-2}	-8.884×10^{-13}	-8.684×10^{-13}	-1.1904×10^{-12}
8	1.64×10^{-2}	1.22×10^{-2}	-1.44×10^{-2}	-9.991×10^{-13}	-5.152×10^{-13}	-1.188×10^{-12}

由表3和表4观察可知,在 -40°C 温度载荷下的红外镜头两档焦距组态的各光学组元前后镜面的旋转量微乎其微,可以忽略不计,但是刚体位移量较大,说明温度变化对空气间隔以及镜片厚度变化的影响较为严重。将Sigfit生成的FIT结果文件中的镜片间距及厚度变化、镜片面型变化的Zernike系数、镜片材料折射率变化等参数分别导入到Zemax宏文件中,分析过程中发现由于红外变焦光学系统的F数与焦深相对较小,焦平面偏离光学系统的高斯成像面,光机集成仿真分析结果表明, $-40^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$ 范围内,红外光学系统焦距及离焦量的变化如表5和表6所示。

由表5可知焦距改变量在 $-0.16 \sim 0.4\text{mm}$ 之间,其中短焦距改变量在 $-0.16 \sim 0.34\text{mm}$ 之间,长焦距改变量在 $-0.2 \sim 0.4\text{mm}$ 之间。

由表6可知后截距即像面位置移动量在 $-0.092 \sim 0.808\text{mm}$ 之间,其中从无穷远到有限距离的调焦量为 $0.108 \sim 0.188\text{mm}$,为补偿热变形带来的焦面位移而带来的离焦量为 $-0.092 \sim 0.808\text{mm}$ 。经过光机集成分析出的对应的不同温度下的离焦量作为主动消热差设计的离焦补偿量,将这一对应关系采用最小二乘法进行拟合。例如经过光机集成分析后的短焦组态对于物距为无穷远的离焦量为 $+0.44 \sim -0.215\text{mm}$,其对应的温度为 $-40^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$,建立二者的关系方程与对应关系曲线如图6所示。在主动消热差设计中,根据拟合后多项式方程解算不同温度、组态下的离焦量,该值则作为温度补偿电机驱动消热补偿凸轮的轴向位移量,从而实现消热温度精确补偿。

表5 不同温度下的焦距值

Table 5 Focal length values at different temperatures

Temperature/ $^\circ\text{C}$	Infinity object distance		10 m object distance		30 m object distance	
	short focal length		short focal length		long focal length	
	value/mm		value /mm		value /mm	
20	34.5		77.5		unchanged	
-40	34.84		77.9		unchanged	
+50	34.34		77.3		unchanged	

表6 不同温度下的离焦量

Table 6 Defocus at different temperatures

Temperature / $^\circ\text{C}$	Infinity object distance		10 m object distance		0 m object distance	
	short focal defocus		short focal defocus		long focal defocus	
	amount/mm		amount/mm		amount /mm	
20	0		0.108		0.188	
-40	+0.44		0.554		0.808	
+50	-0.215		-0.092		-0.102	

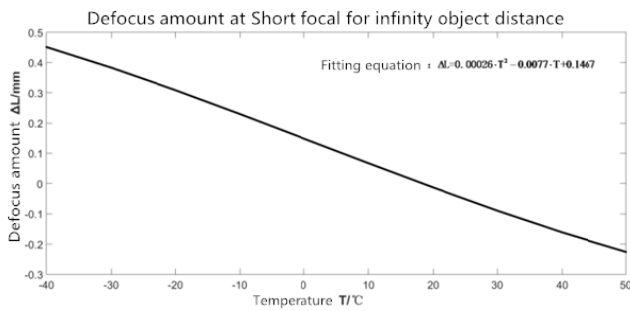


图 6 红外变焦镜头短焦组态离焦量与温度对应曲线

Fig.6 Corresponding curve of defocus and temperature of infrared zoom lens at short-focus configuration

2.4 主动消热光机设计

由表 5 和表 6 可以看出温度由 -40°C 变到 50°C 时, 光学系统的焦距值和离焦量都会发生变化, 且离焦量远远超过半焦深, 采用常见的变焦调焦机构 (即采用一个凸轮实现变倍组和补偿组的移动) 很难满足成像质量要求, 因为同一凸轮仅能保证变倍组和补偿组唯一的一一对应关系, 但是从表 5 和表 6 可知, 对于长/短焦不同的组态、温度以及物距, 变倍量与补偿量并非线性的一一对应关系, 需要各自具备驱动机构。因此采用两个凸轮以及两套执行机构来分别控制变倍组和补偿组的移动。变焦完成后通过补偿组的移动来补偿由于温度的变化产生的离焦, 实现成像质量要求, 主动消热调焦镜头光机结构设计结果如图 7 所示。

根据仿真分析得到温度载荷下的离焦量进行焦距补偿, 重新分析主动消热补偿后的红外变焦镜头的

物距在无限远及有限远处的 MTF 曲线, 如图 8 所示。

由图 8 的 MTF 曲线图可以看出, 经过主动消热差设计后镜头在 -40°C 变到 50°C 物距在无限远及有限远处的 MTF 值均在 0.4 以上, 接近衍射极限, 成像质量良好, 说明系统成像质量能够满足技术指标要求。

最终对红外变焦镜头进行分辨率温度可靠性实验, 实验的原理示意图如图 9 所示, 不同温度工况下的多杆靶的图像如图 10 所示, 由图 10 观察可见不同温度工况下基于光机集成分析的主动消热差设计后的红外镜头的多杆靶标图像基本清晰, 空间分辨率均大于 30 lp/mm 。

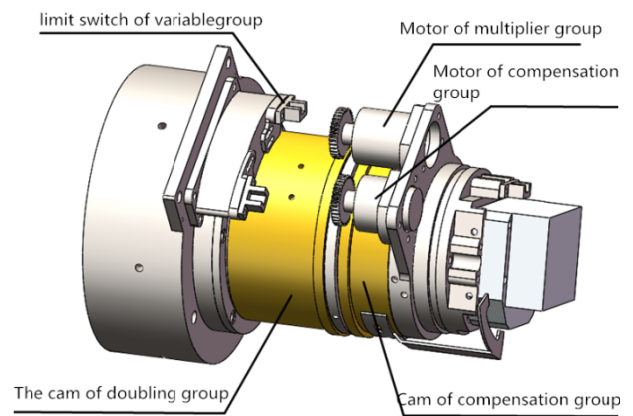
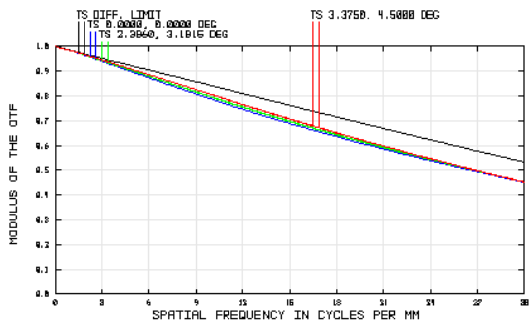


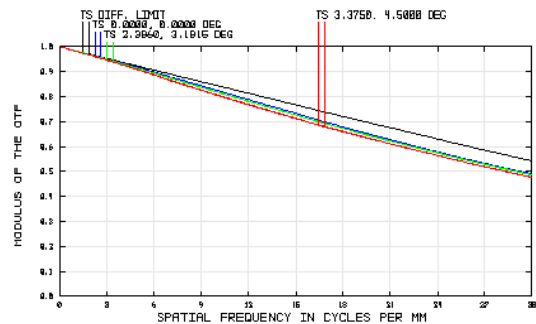
图 7 主动消热调焦镜头光机结构设计

Fig.7 Optical machine structure design with active athermalization



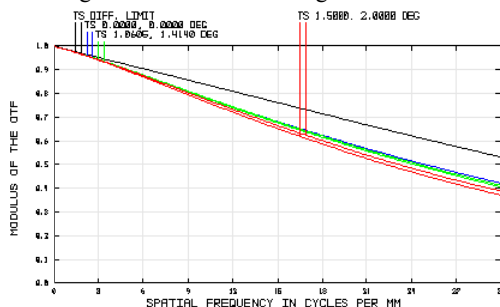
(a) -40°C 短焦传递函数图

(a) MTF diagram at short focal configuration under -40°C



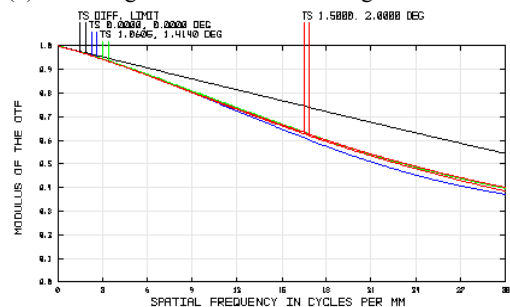
(b) 50°C 短焦传递函数图

(b) MTF diagram at short focal configuration under 50°C



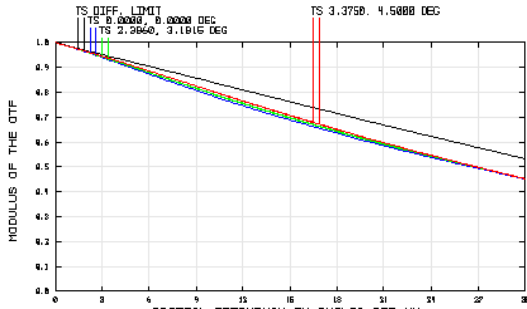
(c) -40°C 长焦传递函数图

(c) MTF diagram at long focal configuration under -40°C



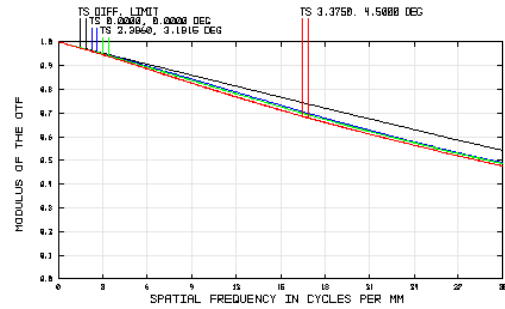
(d) 50°C 长焦传递函数图

(b) MTF diagram at long focal configuration under 50°C



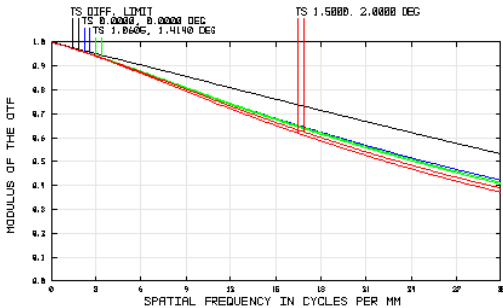
(e) 物距 10m、-40°C短焦传递函数图

(e) MTF diagram at short focal configuration under -40°C for object at 10m distance



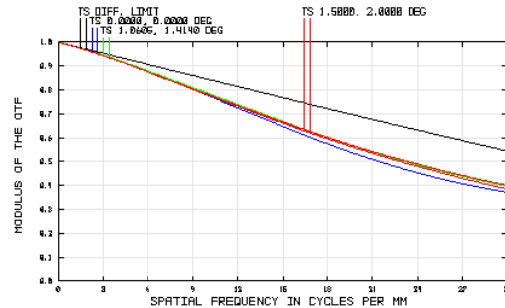
(f) 物距 10m、50°C短焦传递函数图

(f) MTF diagram at short focal configuration under 50°C for object at 10m distance



(g) 物距 30m、-40°C短焦传递函数图

(g) MTF diagram at short focal configuration under -40°C for object at 30m distance



(h) 物距 30m、50°C短焦传递函数图

(h) MTF diagram at short focal configuration under 50°C for object at 30m distance

图8 主动消热设计后的光机集成分析结果

Fig.8 The result of the integrated opti-mechanical analysis of the after initiative athermalization design

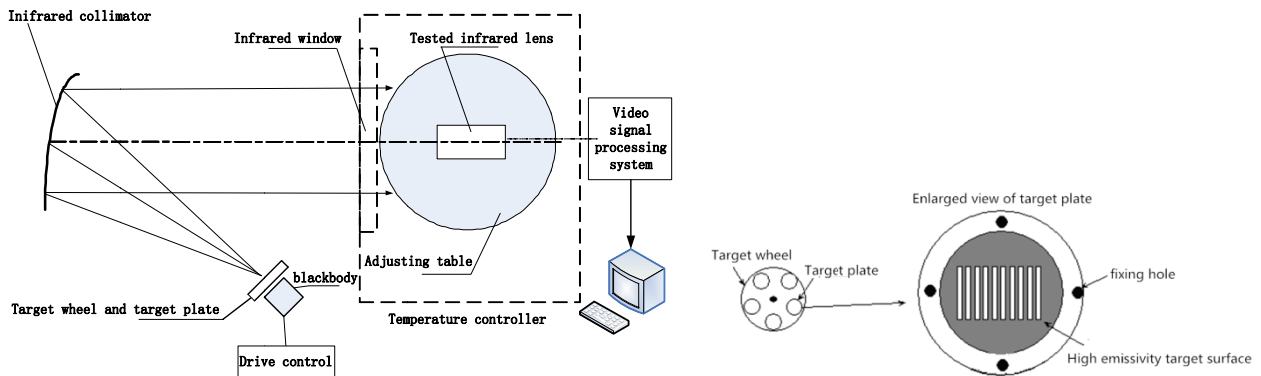


图9 红外镜头分辨率温度可靠性实验原理图

Fig.9 Schematic diagram of resolution temperature reliability experiment of infrared zooming lens



(a) Image of a multi-shot target under -40°C (b) Image of a multi-shot target under -40°C (c) Image of a multi-shot target under 50°C

图10 不同温度工况下分辨率温度可靠性实验多杆靶图像

Fig.10 Image of multi-bar targets of resolution temperature reliability experiment under different temperature conditions

3 结论

本文基于火情监察红外变焦镜头在 $-40^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$ 范围内成像清晰的技术要求,针对红外变焦监视镜头的F数与焦深相较于可见光变焦镜头相对较小、温度变化极易导致红外镜头离焦现象,利用光机集成分析技术分析红外变焦镜头在温度载荷下的离焦量,并采用主动消热补偿结构设计解决上述温度变化导致成像不清晰的问题,为其他类似的工作在温度环境变化的红外光机镜头提供一种仿真方法及设计思路。

参考文献:

- [1] 刘蓝, 谢明江, 高珊, 等. 基于无线传感技术的秸秆焚烧火点在线监测系统设计与实现[J]. 东北农业大学学报, 2020, 51(9): 89-96.
LIU Lan, XIE Mingjiang, GAO Shan, et al. Design and implementation of online monitoring system for straw burning places based on wireless sensor technology[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2020, 51(9): 89-96.
- [2] 郭小虎, 赵辰霄, 周平, 等. 变焦光学系统的景/焦深延拓及其分析[J]. 光学技术, 2019, 45(3): 263-268.
GUO Xiaohu, ZHAO Chenxiao, ZHOU Ping, et al. Application and analysis of the extension of depth of field and focus in zoom system[J]. *Optical Technique*, 2019, 45(3): 263-268.
- [3] 范哲源, 高立民, 张志, 等. 中波红外三视场变焦光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 523-527.
FANG Zheyuan, GAO Limin, ZHANG Zhi, et al. Design of three-field middle-wave infrared zoom system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 523-527.
- [4] 杜伟峰, 刘永志, 高文杰, 等. 空基跟踪平台变焦镜头光机热集成分析[J]. 激光与红外, 2020, 50(5): 615-622.
DU Weifeng, LIU Yongzhi, GAO Wenjie, et al. Thermal structure optical integrated analysis of zoom lens for airborne tracking platform[J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(5): 615-622.
- [5] 王雷, 杨照金, 黎高平, 等. 红外光学材料折射率温度系数测量装置[J]. 应用光学, 2005, 26(3): 54-54.
WANG Lei, YANG Zhaojin, LI Gaoping, et al. An equipment for Measuring the Temperature Coefficient of Refractive Index of Infrared Materials[J]. *Journal of Applied Optics*, 2005, 26(3): 54-54.
- [6] 张林. 红外望远镜温度自动补偿技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2004: 12-16.
ZHANG Lin. Research on Automatic Temperature Compensation Technology for Infrared Telescope[D]. Nangjing: Nangjing University of Science And Technology, 2004: 12-16.
- [7] 王学新, 焦明印. 光学被动式和机电式组合消热差方法的研究[J]. 应用光学, 2010, 31(3): 354-359.
WANG Xuexin, JIAO Mingyin. Combination of optical passive and mechanical-electrical athermalisation[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(3): 354-359.
- [8] 刘光. 基于光机热集成的空间相机主动热光学关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2019: 11-15.
LIU Guang. Research on key technologies of active thermal optics for space camera based on optical-mechanical-thermal integration[D]. Changchun: University of the Chinese Academy of Sciences, 2019:11-15.
- [9] 杨瑞宇, 樊佩琦, 吴诚, 等. 一种具有温度补偿的红外热像仪自动对焦系统及方法[P]. CN109068073A. 2018.
YANG Ruiyu, FAN Peiqi, WU Cheng, et al. The invention relates to an automatic focusing system and method for infrared thermal imager with temperature compensation[P]. CN109068073A. 2018.
- [10] 朱峰, 张宇, 陈骥, 等. 消热差红外镜头热光学特性分析[J]. 激光与红外, 2017, 47(10): 1299-1304.
ZHU Feng, ZHANG Yu, CHEN Ji, et al. Analysis of thermal optical properties for athermal infrared lens[J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(10): 1299-1304.
- [11] 米振洲. 非制冷型红外双波段连续变焦光学系统设计[D]. 西安: 西安工业大学, 2014: 21-23.
MI Zhenzhou. Design of uncooled infrared dual-band continuous zoom optical system[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2014: 21-23.