

## 航空相机光学镜头被动消热一体化设计与验证分析

王春雨, 王 聪, 牛锦川, 赵英龙, 张生杰

(北京空间机电研究所, 北京 100094)

**摘要:** 航空相机的使用环境温度变化范围较大, 温度的变化会在相机光学镜头中产生温度梯度, 影响相机成像质量。为保证相机光学系统的成像质量, 需要对镜头在一定温度范围内进行消热设计。运用 ZEMAX 光学设计软件对某航空相机光学系统进行了热分析, 并根据分析结果运用 ANSYS 软件实现了多片式、大视场角光学镜头被动式消热光机一体化设计, 通过镜头内部补偿环节沿轴向的微位移改变镜间距, 实现对光学系统不同温度下像质的补偿。同时, 研制消热补偿试验件, 采用一种高精度光学非接触式在线直接检测微位移的方法, 精度达到 $\pm 1 \mu\text{m}$ , 完成了消热补偿试验件微位移测试。结果表明: 不同温度下的微位移量与分析数据一致, 最后通过对采用该消热一体化设计的实际航空镜头在不同温度下的像质检测, 验证了该设计的有效性, 镜头在各温况下性能良好。

**关键词:** 航空相机; 光机一体化设计; 温度梯度; 被动式消热补偿; 非接触式在线检测

**中图分类号:** TP702      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA20200220

## Passive athermal integrated design and verification analysis for the optical lens of aerial camera

Wang Chunyu, Wang Cong, Niu Jinchuan, Zhao Yinglong, Zhang Shengjie

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

**Abstract:** The temperature of aerial camera varies greatly in the working environment, and the temperature change will produce a temperature gradient in the optical lens of the camera, which will affect the image quality of the camera. In order to ensure the image quality of the optical system, the lens need to be designed for dissipate heat within a certain temperature range. The thermal analysis of an aviation camera optical system was accomplished by ZEMAX optical design software. According to the analysis results, the integrated optical-mechanical design of passive athermalization of multi-chip and large-field optical len was realized with ANSYS software. The image compensation at different temperature was achieved through micro-displacement variation between the compensation link inside the lens along the axial direction. At the same time, an optical non-contact online detection method was proposed with high precision, and the accuracy is  $\pm 1 \mu\text{m}$ . And then heat dissipation compensation test piece was developed to achieve micro displacement test, which showed the test data of micro displacement was consistent with the analysis data. Finally, the effectiveness of the design was verified by the image quality testing of the actual aerial lens with this integrated design, and the lens performs well at working temperature.

**Key words:** aerial camera; integrated optical and mechanical design; temperature gradient; passive heat dissipation compensation; non-contact online detection

收稿日期:2020-06-05; 修订日期:2020-10-16

基金项目:国家自然科学基金(41871278); 高分辨率对地观测系统重大专项

## 0 引言

航空相机是机载对地摄影测量的主要设备,通常安装在飞机设备舱中,由于舱内空间有限,温控措施实施受限,并且无法实现完全密封,舱内温度会随飞行高度及环境温度的变化而发生很大变化。由于温度变化时光学元件的曲率、厚度和间隔将发生变化,同时元件基体材料的折射率及所在介质的折射率也将发生变化,直接导致系统性能的下降<sup>[1]</sup>。为减小温度对光学系统的影响,需要对镜头进行消热设计,从而保证航空相机在较宽的温度环境范围内具有稳定的性能。

目前国内外航空相机光学系统的消热方式一般有主动式、被动式和混合式三种类型。主动式采用手动、机械或机电等方式对补偿机构进行调节,实现消热补偿;被动式又可分为机械被动式和光学被动式,机械被动式是通过镜头结构中各材料热胀冷缩特性的差异或采用特殊的机械结构型式改变光学系统透镜或透镜组的位置来补偿温度效应;光学被动式是利用不同光学材料的温度特性,适当选配光学材料组合来消热差;混合式消热是在系统设计阶段使系统具有一定的被动补偿能量,对残留的热效应则用主动式予以调节<sup>[2-3]</sup>。国内透射式红外光学系统及折衍混合红外光学系统多数采用光学被动补偿的方式进行消热,利用不同材料的温度特性,适当选配材料,合理分配光焦度,实现系统消热差设计,该方法具有结构相对简单、体积小、系统可靠性高等优点,缺点是不同光学材料热性能的匹配选取较难,当视场较大时为获得较好的成像质量,必然引入更多的元件、高次非球面或使用更多的材料,导致系统结构复杂<sup>[4]</sup>。

考虑到航空相机在质量、空间、设备复杂程度等方面的要求和限制,文中通过优选材料热匹配的方案,运用机械被动补偿原理实现了航空相机光学镜头的消热补偿与结构一体化设计。该方式的优点在于:选取并使用特殊材料与镜头主体材料形成热匹配,实现光学系统热补偿与结构一体化的设计,避免了需额外增加控制单元的弊端,结构简单,易于装配,不增加镜头的质量和体积,可自适应补偿消热,消热稳定性高,制造成本低。同时,还设计了消热验证方案,设计加工了消热试验件,并运用一种高精度非接触式光学

测量新方法对消热试验件进行了测试试验,验证了该消热设计的正确性。

## 1 消热设计原理

在均匀温度场中薄透镜系统的位置热差 $\Delta l'_{th}$ 和倍率色差 $\Delta y'_{th}$ 表达式为<sup>[5]</sup>:

$$\Delta l'_{th} = -\frac{1}{n'_k u_k^2} \sum_1^{k+1} (h^2 \varphi T + u^2 \Delta d) \quad (1)$$

$$\Delta y'_{th} = -\frac{1}{n'_k u'_k} \sum_1^{k+1} (h h_p + u u_p \Delta d) \quad (2)$$

式中: $k$ 表示透镜个数; $n'_k, u'_k$ 为系统像方折射率和像方孔径角; $h, h_p$ 指轴上、轴外近轴光线在各透镜上的高度; $\Delta d$ 为相邻透镜间距的热该变量; $u$ 为透镜物方孔径角; $\varphi$ 为透镜光焦度; $T$ 为透镜初级位置热差系数。

由公式(1)、(2)可以看出,两种热差均由光学热差系数和机械热差系数组成,所以消热过程就是使光学热差和机械热差相互补偿的过程,而光学热差又可以通过选择不同 $T$ 值的透镜组合加以改变,使之与机械热差匹配。因此,消热的关键在于选取合适的光学材料和结构材料组合。

要使光学系统能在一定温度范围内具有良好的性能,系统必须同时满足总光焦度、消轴向色差和热补偿方程,即<sup>[6-10]</sup>

$$\sum_{i=1}^j h_i \varphi_i = \varphi \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^j h_i^2 \varphi_i / \vartheta_i = 0 \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^j \frac{d\varphi_i}{dT} = \alpha_L L \quad (5)$$

式中: $j$ 为系统光学元件数量; $h_i$ 为近轴光线在第 $i$ 透镜上的入射高度; $\varphi_i, \vartheta_i$ 分别为第 $i$ 透镜的光焦度及阿贝常数; $\alpha_L$ 为镜筒支架的线胀系数, $L$ 为镜筒结构的总长度。公式(3)为构成系统的单透镜与全系统光焦度的关系,公式(4)为消轴向色差条件,公式(5)为补偿像面离焦需满足的条件,称为热补偿条件。通过求解该消热方程组,选定材料,确定光焦度分配,根据材料和光焦度合理配合,使系统色散因子和热膨胀系数同时满足系统消热差和消色差的条件,即实现高质量消热差<sup>[9-11]</sup>。

## 2 镜头消热设计与分析

### 2.1 光学系统温度适应性分析

文中的光学镜头为 13 片透镜组成的透射式光学系统,如图 1 所示。性能指标如表 1 所示。

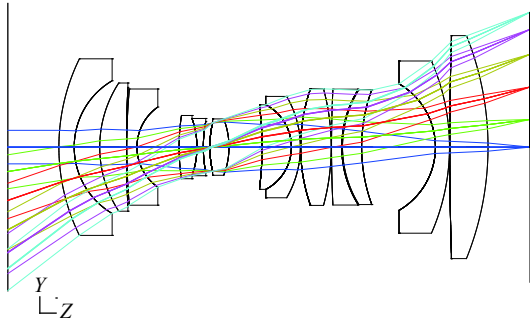


图 1 光学系统示意图

Fig.1 2D layout of the optical system

表 1 镜头性能指标

Tab.1 Lens performance index

Project	Index
$f/mm$	130
Half-field/(°)	38
MTF@100 lp/mm	$\geq 0.30$
Working temperature/°C	20±5

镜头工作温度为 (20±5) °C, 要求在此温度范围内 MTF 均要优于 0.3。镜头结构材料采用铝合金 (线胀系数为  $23 \times 10^{-6}/^{\circ}C$ ), 光学系统设计参数如表 2 所示, 在 20 °C、15 °C 和 25 °C 下的 MTF 设计值如表 3 所示。

该光学系统设计使用多片温度灵敏度高的光学材料 H-FK61 进行色差及二级光谱矫正, 且由于相机尺寸限制, 光学系统无法进行无热化设计, 所以系统对温度特别敏感。由不同温度条件下 MTF 曲线可知, 在 20 °C 温度下, 成像质量良好, 在其他温度条件下, 系统成像质量急剧变差, MTF 已无法满足设计使用要求, 镜头需进行消热补偿设计。

由于该相机采用焦平面拼接方式实现大幅面功能, 焦面组件体积和质量均较大, 不易调节, 故选取在镜头内设置消热补偿环节。结合消热补偿环节尽量小巧轻便、易实现的原则, 最终选取口径小、质量轻的透镜 6 组件作为被动消热补偿元件。消热部分光学系统如图 2 所示。

利用 ZEMAX 软件对系统进行仿真分析, 以 MTF

表 2 光学系统设计参数表

Tab.2 Design parameter table of optical system

Lens	R	Spacing	Material
1#	154.651	11.835	H-FK61
	59.501	19.725	
2#	90.708	20.71	H-ZLAF53B
	1018.40	20.2	
3#	512.971	7.89	H-FK61
	37.814	32.547	
4#	162.108	13.808	H-FK61
	-66.032	0	
Glued mirror 1	-66.032	4.931	H-ZBAF16
	105.814	5.041	
6#	83.921	14.794	H-FK61
	-60.365	25.581	
7#	-255.57	22.684	H-FK61
	-36.835	0	
Glued mirror 2	-36.835	6.904	H-LAK12
	-77.799	0.2	
9#	136.937	23.671	H-FK61
10#	-172.60	0.2	H-LAF10LA
	929.987	7.89	
11#	84.166	0.592	H-ZF5
	84.166	14.7945	
12#	129.24	7.061	H-LAFL5
	-56.503	10.849	
13#	-165.64	0.2	H-ZF52A
	2639.82	29.588	
	-230.89		

表 3 光学系统不同温度下的 MTF 设计值

Tab.3 MTF design value of optical system at different temperature

Temperature/°C	MTF design value
15	<p>MTF<sub>avg</sub>: 0.12</p>
20	<p>MTF<sub>avg</sub>: 0.46</p>
25	<p>MTF<sub>avg</sub>: 0.1</p>

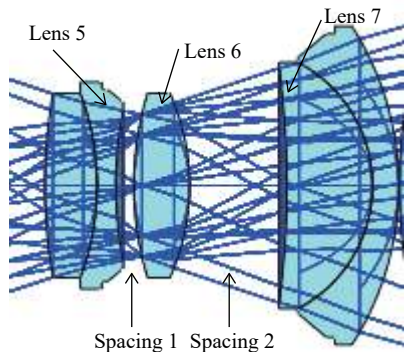


图 2 光学系统消热部分示意图

Fig.2 Schematic diagram of heat elimination part of the optical system

及焦距作为目标函数,通过调整透镜 6 前后镜间距可实现对不同温度下系统像质的优化补偿。表 3 给出了以 20 °C 为基准,不同温度下透镜 6 前后镜间距需要的补偿调整量,规定向右移动为正。从表 4 和图 3 可以看出,透镜 6 在进行温度补偿时可认为是线性移动,需要的最大移动量为 0.016 mm。

表 5 给出了消热补偿后的系统 MTF 数据,可看出补偿后的不同温度下系统 MTF 平均值可达到 0.4,高于设计要求。同时,进行消热设计后,在 (20±5) °C 范围,温度变化造成的系统离焦量为 0.015 mm,小于系统焦深±0.032 mm(λ 取 600 nm),满足成像质量要求。

表 4 不同温度下镜间距 1 与镜间距 2 相对于 20 °C 时的变化量 (单位: mm)

Tab.4 Variation of mirror spacing 1 and mirror spacing 2 with respect to 20 °C at different temperature (Unit: mm)

Temperature/°C	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Variation of spacing 1	-0.016	-0.013	-0.01	-0.007	-0.003	0	0.003	0.007	0.01	0.013	0.016
Variation of spacing 2	0.016	0.013	0.01	0.007	0.003	0	-0.003	-0.007	-0.01	-0.013	-0.016

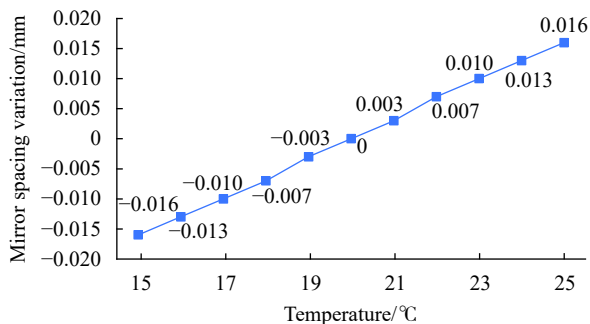


图 3 镜间距随温度变化曲线

Fig.3 Curve of mirror spacing with temperature

## 2.2 消热补偿组件设计

依据光学系统对环境温度的分析,透镜 6 需移动量为±16 μm。采用一种利用材料自身热胀系数实现的被动消热方式,依据公式 (6) 进行分析计算。

$$\sum L = \alpha L_1 \Delta T \quad (6)$$

式中:  $\sum L$  为热变形量;  $\alpha$  为材料线胀系数;  $L_1$  为材料在指定温度下的长度,即基准长度;  $\Delta T$  为温度变化量。

镜头结构采用铝,其线膨胀系数  $\alpha_{\text{铝}}=2.3 \times 10^{-5}/\text{°C}$ ,从材料手册中查找比铝的线膨胀系数大的材料,且满足一定的刚度和强度的情况下,选取材料尼龙 PA12,  $\alpha_{\text{PA12}}=16 \times 10^{-5}/\text{°C}$ ,令  $\sum L=16 \mu\text{m}$ ,取  $\Delta T=5 \text{ °C}$ ,计算得

表 5 消热补偿设计后光学系统不同温度下的 MTF 数据  
Tab.5 MTF of optical system at different temperature after heat elimination compensation design

Temperature/°C	MTF after heat elimination compensation design
15	
20	
25	

到  $L_1=20$  mm, 依据计算结果设计消热部分结构如图 4 所示。

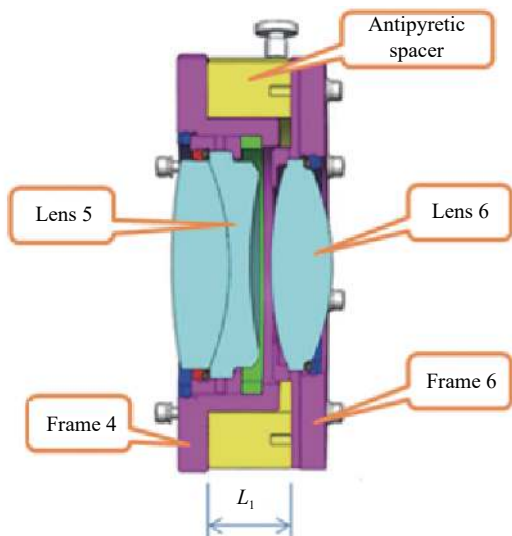


图 4 消热组件示意图

Fig.4 Schematic diagram of heat dissipation components

### 2.3 消热结构仿真分析

消热组件作为镜头的主要组件,应能够确保整个镜头在  $(20\pm 5)$  °C 的情况下正常工作。使用 ANSYS 软件对消热部分进行有限元分析,约束镜框 4 左端面,同时加上重力场方向,以 20 °C 作为应变为 0 时的参考温度如图 5 所示,得到透镜 5 与透镜 6 在不同温度下镜间距的变化量,如表 6 所示。

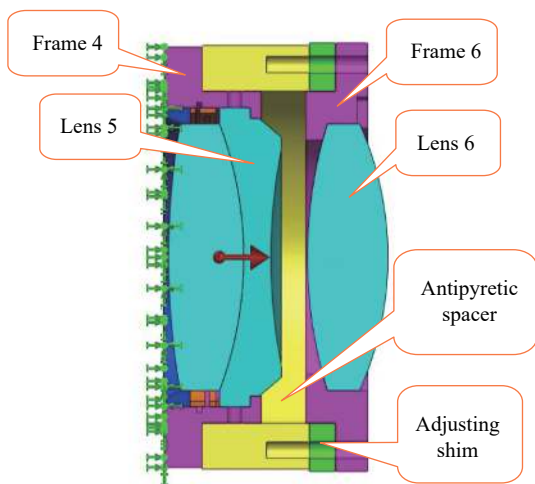


图 5 消热部分有限元分析示意图

Fig.5 Schematic diagram of finite element analysis of heat dissipation part

对消热组件仿真分析的结果表明,该设计能够使镜头达到被动消热的目的,满足镜头对工作环境温度的适应性要求。

表 6 不同温度下镜间距的变化量 (20 °C 作为参考温度,应变为 0)

Tab.6 Variation of mirror spacing at different temperature (20 °C as reference temperature, strain 0)

Temperature/°C	Displacement of lens 5/ $\mu\text{m}$	Displacement of lens 6/ $\mu\text{m}$	Distance variation between lenses 5 and 6/ $\mu\text{m}$
15	-2.506	-19.14	-16.634
17	-1.277	-11.5	-10.223
19	-0.4952	-3.82	-3.3248
20	0	0	0
21	0.4984	3.848	3.3496
23	1.492	11.51	10.018
25	2.497	19.19	16.693

## 3 验证试验

### 3.1 方案设计

为验证该被动式消热组件对镜间距的调整效果,设计加工了与实际消热组件一致的试验件进行不同温况下的镜间距测试。消热试验件如图 6 所示。

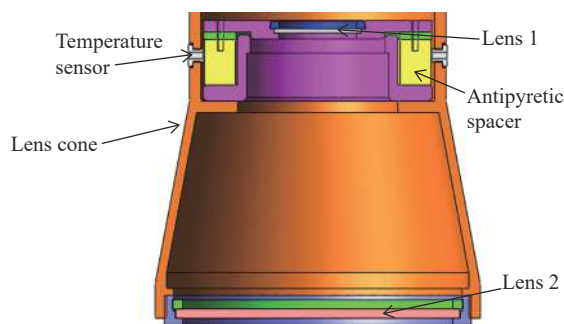


图 6 消热试验件示意图

Fig.6 Schematic diagram of heat dissipation test piece

由于在  $\pm 5$  °C 最大温差情况下镜间距的变化量只有 0.016 mm,这就需要测试精度非常高的设备才能检测出各中间温度时镜间距的变化;同时,试验件两端是由镜片密封的,若采用一般的接触式测量无法实现各温况下镜间距的在线直接测试。为此,设计了一种利用镜面定位仪进行镜间距高精度直接测试的试验方法。试验示意图如图 7 所示。



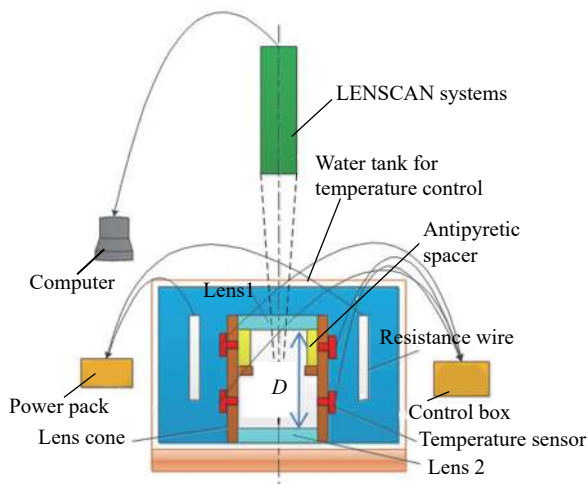


图 7 消热效果验证试验示意图

Fig.7 Schematic diagram of heat dissipation effect verification test

将密封试验件放置在控温水箱中, 利用加热电阻丝给水箱中的水加热, 通过温度传感器及温控系统实现对水的恒温控制, 进而使试验件达到需要的恒温状态。当试验件到达某一测试温度并充分平衡后, 在试

验装置上方架设镜面定位仪, 采用自准直短相干原理, 镜面定位仪发出的测试光束每到达一个光学表面时就自准反射与参考光发生干涉, 产生一个干涉信号, 逐一记录信号位置, 就可以计算出镜间距  $D$ 。

该试验方案主要有以下几个优点: (1) 实现了镜间距的高精度测量, 测量精度为  $\pm 1 \mu\text{m}$ ; (2) 实现了在线非接触式直接测量, 解决了密闭空间内无法直接测试间距的问题, 也避免了传统接触式间接测试带来的误差累计。

### 3.2 试验过程及结果

将装有温度传感器并密封好的消热试验组件放入盛有水的温控箱中, 利用电阻丝及温控系统对水进行温度控制, 通过温度传感器对消热组件温度进行监测, 当温度达到某一测温点并保持恒定时, 利用镜面定位仪对镜间距  $D$  进行测试。以  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  时镜间距变化量为 0 作为基准, 镜间距随温度变化的测试结果如表 7 所示。

表 7 消热组件热补偿效果试验数据表

Tab.7 Test data sheet of heat compensation effect of heat dissipation components

Temperature/ $^\circ\text{C}$		15	17	19	20	21	23	25
Variation of mirror spacing $D/\mu\text{m}$	Theoretical value	-16.634	-10.223	-3.324	0	3.349	10.018	16.693
	Measured value	-17.333	-10.8241	-3.726	0	3.5476	10.415	15.842
Difference/ $\mu\text{m}$		-0.699	-0.6011	-0.402	0	0.1986	0.397	-0.851

从表 7 中的结果可以看出, 实测数据与分析结果一致性很好, 最大偏差在  $1 \mu\text{m}$  以内。

### 3.3 镜头测试结果

依据上述试验验证结果, 镜头采用该消热补偿设计完成了装调, 并分别对 15、20、25  $^\circ\text{C}$  下的各视场像质进行了测试, 测试结果如表 8~表 10 所示。在 15~25  $^\circ\text{C}$  范围内各视场 MTF 均已优于 0.32。

## 4 结束语

文中讨论了应用于航空领域的光学镜头温度适应性问题, 提出了一种采用被动式消热原理实现热补偿与镜头结构一体化设计技术的方法, 在不增加额外单元的情况下, 通过镜头内部自补偿环节随温度变化沿轴向的微位移实现光学系统不同温度下像质的自补偿, 并采用一种高精度光学非接触式在线检测方法完成了对消热补偿试验件的验证测试, 结果与仿真分

表 8 不同温度下镜头 MTF 实测值 (0 视场)

Tab.8 MTF test value of lens at different temperature (0 field)

Temperature/ $^\circ\text{C}$	System wavefront and MTF after heat dissipation
15	<p>MTF<sub>avg</sub>: 0.36</p>
20	<p>MTF<sub>avg</sub>: 0.39</p>
25	<p>MTF<sub>avg</sub>: 0.36</p>

表 9 不同温度下镜头 MTF 实测值 (+1 视场)

Tab.9 MTF test value of lens at different temperature (+1 field)

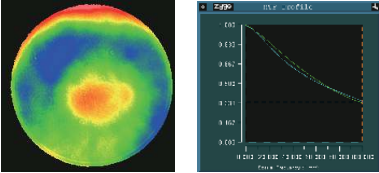
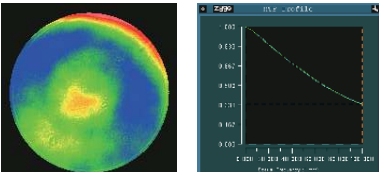
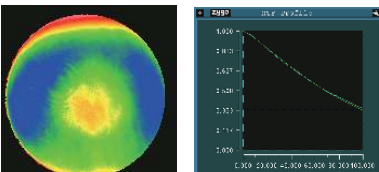
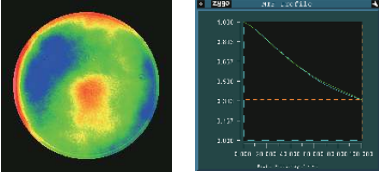
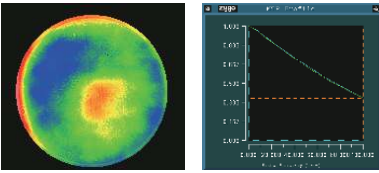
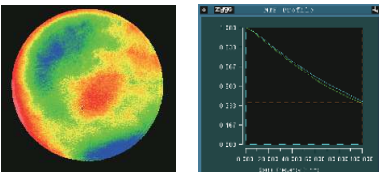
Temperature/°C	System wavefront and MTF after heat dissipation
15	 <p>MTF<sub>avg</sub>: 0.33</p>
20	 <p>MTF<sub>avg</sub>: 0.35</p>
25	 <p>MTF<sub>avg</sub>: 0.34</p>

表 10 不同温度下镜头 MTF 实测值 (-1 视场)

Tab.10 MTF test value of lens at different temperature (-1 field)

Temperature/°C	System wavefront and MTF after heat dissipation
15	 <p>MTF<sub>avg</sub>: 0.34</p>
20	 <p>MTF<sub>avg</sub>: 0.36</p>
25	 <p>MTF<sub>avg</sub>: 0.34</p>

析数据一致,最后通过对采用该消热设计的实际镜头不同温度下的像质检测,验证了该消热补偿设计的有效性,提升了镜头品质,在航空相机光学镜头研制工作中具有广泛的应用价值。

参考文献:

- [1] Zhang Yu, Yang Changcheng, Yang Kuntao. Design on athermal infrared diffractive/refractive hybrid optical system in 8-14 μm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(11): 1535-1536. (in Chinese)
- [2] Li Juan, Wang Yingrui, Zhang Hong. New passive compensating mechanism for athermalisation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(4): 476-478. (in Chinese)
- [3] Fan Yue, Liang Wei, Ma Wenli. Thermal design of the optical system in an aerial camera [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, 40(1): 51-52. (in Chinese)
- [4] Luo Gangyin, Wang Bidou, Chen Yuqi, et al. Design of athermal mid-infrared imaging spectrometer based on Offner scheme [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(11): 1104004. (in Chinese)
- [5] Chen Defu, Li Xiangjun, Zhu Min. Design of passive athermal compensation of infrared lens [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2011, 26(3): 21-23. (in Chinese)
- [6] Jiang Lun, Hu Yuan, Dong Keyan, et al. Passive athermal design of dual-band infrared optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3353-3355. (in Chinese)
- [7] Gao Hongyun, Chen Mengwei, Yang Yingping, et al. Novel long wavelength infrared diffractive/refractive athermal optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(12): 2143-2144. (in Chinese)

- [8] Bai Yu, Xing Tingwen, Yang Jianfeng, et al. Design of uncooled infrared step-zoom optical system with optics passive athermalisation [J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(7): 748-750. (in Chinese)  
白瑜, 邢廷文, 杨建峰, 等. 实现光学被动热补偿的非制冷红外双焦光学系统[J]. *激光与红外*, 2010, 40(7): 748-750.
- [9] Zhang Yu. Computer aided alignment method of three-mirror system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005. (in Chinese)  
张羽. 被动热补偿型折衍混合红外光学系统的研制[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [10] Shen Biyun, Gao Ming. Passive optical athermalization design for infrared optical system [J]. *Electronics Optics & Control*, 2012, 19(6): 70-72. (in Chinese)  
申碧云, 高明. 红外光学系统被动式无热化设计方法[J]. *光电与控制*, 2012, 19(6): 70-72.
- [11] Wang Qian. Research of opto-mechanical thermal compensation for infrared[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)  
王倩. 红外变焦光学系统的光机热补偿方法研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2011.



第一作者简介: 王春雨 (1979-), 男, 硕士, 高级工程师。主要研究方向为航天遥感相机装调与检测, 曾荣获国防科技进步一等奖, 中国航天科技集团科技进步一等奖。Email: hit\_wangcy@163.com