

## 红外二次成像无热化光学系统设计与实测

于 洋, 蹇 毅, 潘兆鑫, 金亚平, 汤心溢

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

**摘 要:** 阐述了二次成像红外光学系统相比于一次成像红外光学系统而言, 对温度变化更加敏感的特点及其影响, 讨论了基于光学被动式无热化原理的二次成像红外光学系统的设计方法。不仅给出了设计的一个红外制冷型二次成像光学系统的实例, 还对该无热化镜头进行了实际加热对比成像试验, 并给出了成像测试结果。设计结果表明: 该系统在 $-40^{\circ}\text{C}\sim+80^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内, 像质接近衍射限, 最佳像面变化量在一倍焦深范围之内, 焦距变化率低, 实现了光学被动式无热化。实际测试结果显示, 所设计的二次成像无热化光学系统, 具有良好的无热化能力, 高温环境下无需调焦依然清晰成像。

**关键词:** 红外; 二次成像; 光学被动式; 无热化设计; 实测结果

**中图分类号:** TN21    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2013)12-3180-05

## Design and test-result of re-imaging athermal infrared optical system

Yu Yang, Jian Yi, Pan Zhaoxin, Jin Yaping, Tang Xinyi

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 200083, China)

**Abstract:** The image quality of re-imaging infrared optical system is quite sensitive to temperature, compared with common optical system, its characteristics and effect was discussed in the paper. And the optical-passive design theory of athermalization was described. An instance of a cooled re-imaging infrared optical system was given, the heating contrast experiment was carried out and the test result was shown. The athermal ability of the designed optical system and the common non-athermal optical system were tested by experiment with the same optical parameters such as focal length, field of views etc. The design result shows that the system is athermalized because the image quality of the system is close to the diffraction limit in the temperature range  $-40^{\circ}\text{C}\sim+80^{\circ}\text{C}$  without focusing mechanism, and the shift rate of the focal length is relatively low. The test result shows the athermal ability of this system can remain its image quality in high temperature environment without refocusing.

**Key words:** infrared; re-imaging; optical passive mode; athermal design; test result

收稿日期: 2013-04-08; 修订日期: 2013-05-10

基金项目: 中国科学院上海技术物理研究所三期创新专项项目(Q-ZY-29)

作者简介: 于洋(1984-), 女, 副研究员, 博士, 主要从事红外光学系统设计与红外光电系统研究。Email: fishinwater99@hotmail.com

## 0 引言

红外光学系统常需要在较宽温度范围内保持成像质量的稳定。环境温度的变化,对光学系统成像质量的影响主要体现在光学材料折射率的变化、光学元件曲率半径与中心厚度的变化、光学元件间的间隔变化这三个方面<sup>[1]</sup>。其中由光学材料折射率变化带来的像质变化是最明显的。

由于红外光学材料的折射率随温度的变化率 $(dn/dT)$ 远大于可见光玻璃的变化率<sup>[2]</sup>,因此红外光学系统相比于其他光学系统,更易受到温度变化的影响,更加需要开展无热化设计。

所谓无热化设计是指在设计光学系统的过程中,采用一定方法,补偿温度变化对像质带来的影响。无热化方法主要有光学被动式、机械被动式、机电主动式等几种<sup>[3-6]</sup>,其中光学被动式不需引入调焦机构,体积小、质量轻、成本低,因此文中选择了光学被动式无热化设计方法。

二次成像光学系统由于自身特点,相比于一次成像系统,对温度变化更为敏感。基于光学被动式无热化设计方法,设计了一个长波制冷型二次成像红外光学系统,系统  $F$  数 1.65, 焦距 145 mm, 全视场为  $3.2^\circ$ , 工作波段为  $7.7\sim 10.3\ \mu\text{m}$ 。该系统在  $-40\sim 80^\circ\text{C}$  的温度范围内消除了温度变化对像质的影响。下面给出其设计过程与结果。

## 1 二次成像温度敏感性分析

制冷型红外成像系统,出于实现 100%冷光阑匹配,与同时减小第一片镜片口径的需要,常常选择二次成像的实现方式。通过二次成像可以将光学系统的出瞳位置控制在探测器的冷光阑面上,根据光瞳衔接原理实现 100%的冷光阑匹配;同时还可以将光学系统的入瞳位置控制在光学系统的前表面上,避免由于入瞳远离光学系统的前表面造成的红外光学系统口径过大,无法找到合适材料进行加工的问题。

但是二次成像也会引入一些新的问题。采用 ZEMAX 分析模拟可以发现,二次成像的红外光学系统相比于一次成像系统而言,对温度变化更加敏感,主要体现在:在高温与低温条件下,二次成像系统的像质下降更加明显,二次成像系统的焦距变化率更

大等等。实际成像实验也可以发现,温度变化时,二次成像光学系统的像质下降更加明显,需要调焦重新找到焦面位置。

手工调焦或自动对焦虽然能够补偿温度变化对像质的影响,使高温与低温的像质恢复良好,但不能降低焦距变化率,即高温低温条件下焦距变化仍然十分明显。而焦距变化将影响红外成像系统的各项性能指标,因此在设计过程中,应采取各种方法,力求系统在高温低温条件下,不仅成像质量保持稳定良好,还保证焦距尽量稳定不变。

由上述分析可见,二次成像红外光学系统更加有必要采取无热化设计方法,降低其温度敏感性,使光学系统的像质与各项参数在较宽的温度范围内保持基本不变。

## 2 光学被动式无热化原理

光学被动式无热化的思路是,利用不同材料的热特性的差异,通过选择合理的材料组合,以及合理搭配材料的光焦度分配方案,使光学系统随温度变化而产生的离焦与机械镜筒热胀冷缩的离焦相互抵消,实现自动温度补偿的目的。

如果光学系统由  $i$  个单透镜组成,则为了消色差,光学系统需要满足下列方程<sup>[7-8]</sup>。

光焦度需满足:

$$\frac{1}{h_1} \sum_{i=1}^j h_i \phi_i = \phi \quad (1)$$

消色差需满足:

$$\Delta f_b = \left( \frac{1}{h_1 \phi} \right)^2 \sum_{i=1}^j h_i^2 \theta_i \phi_i = 0 \quad (2)$$

消热差需满足:

$$\frac{\partial f_b}{\partial T} = - \left( \frac{1}{h_1 \phi} \right)^2 \sum_{i=1}^j h_i^2 x_i \phi_i = \alpha_n L \quad (3)$$

式中: $h_i$ 为第  $i$  个透镜的近轴光线投射高度,若为密接型透镜组,则  $h_i = h_1$ ;  $\phi_i$  为各个透镜的光焦度; $\phi$  为全系统的光焦度; $x_i$  和  $\theta_i$  分别为第  $i$  个透镜的消热差系数和消色差系数<sup>[9]</sup>;  $\alpha_n$  为镜筒材料的热膨胀系数,  $L$  为镜筒长度。

## 3 设计实例

### 3.1 设计指标与结果

光学系统设计指标如表 1 所示。

表 1 设计指标

Tab.1 Design target

Parameter	Value
Waveband/ $\mu\text{m}$	7.7-10.3
$D/\text{mm}$	90
$f'/\text{mm}$	145
Full FOV/( $^\circ$ )	3.2
Working temperature / $^\circ\text{C}$	-40-80
Athermal target	In the range from -40 $^\circ\text{C}$ to +80 $^\circ\text{C}$ , MTF's descend ratio < 10% (@20 lp/mm)

经过设计,该镜头由七片镜片组成,前组三片、后组四片,第一片镜片直径 95 mm。镜片由三种材料组成,分别是锗、锗玻璃与宽光谱硫化锌。系统使用了一个圆锥曲面,位于第七表面,没有使用高次非球面、二元面等,以提高加工可靠性。

镜筒材料选择为钛合金,其热膨胀系数为  $8.8\text{E}-6$ 。

镜头光路图如图 1 所示。

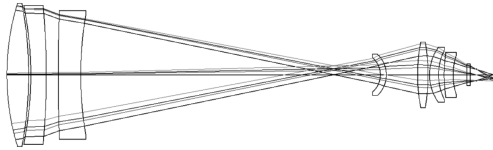


图 1 系统光路图

Fig.1 Optical system configuration

3.2 像质评价

系统 MTF 曲线如图 2 所示。由图 2 可见,在 0~33 lp/mm 范围内 MTF 接近衍射限。

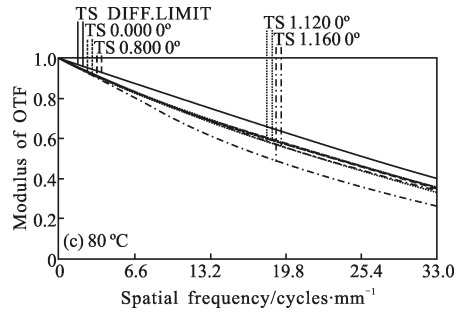
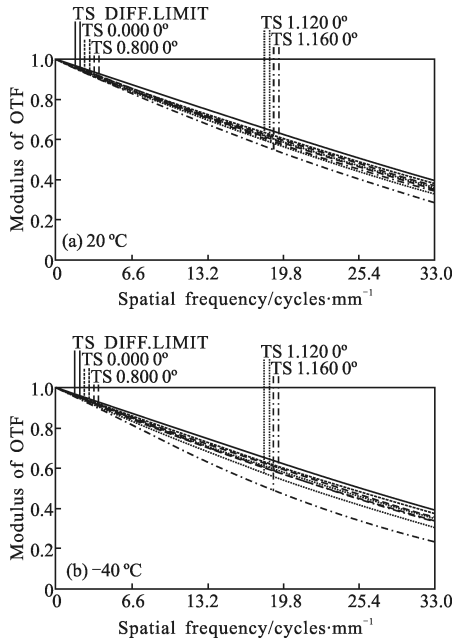


图 2 系统各温度的 MTF 曲线图

Fig.2 MTF curves of different temperature

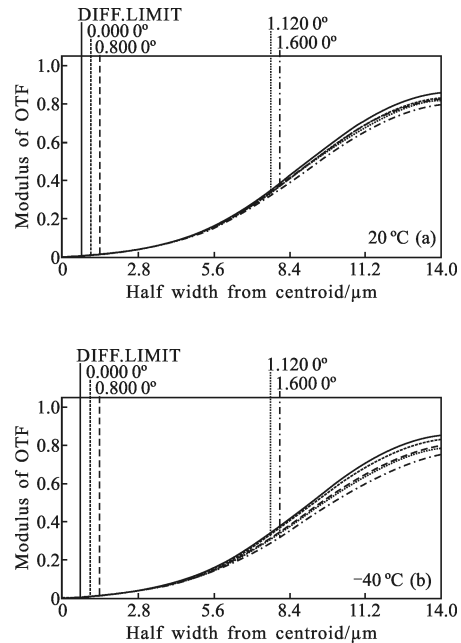
对不同温度下各视场 MTF 在弧矢和子午向的均值相对于常温的变化率的分析如表 2 所示。由表 2 可见,高低温下各视场的 MTF 相比于常温 MTF 的变化率均小于 10%,满足系统无热化指标的要求。

表 2 系统 MTF 均值与变化率

Tab.2 MTF value & descend ratio

FOV	20 $^\circ\text{C}$		-40 $^\circ\text{C}$		80 $^\circ\text{C}$	
	Value	Value	Ratio	Value	Ratio	
0	0.603	0.600	0.5%	0.568	5.8%	
0.5	0.587	0.577	1.7%	0.572	2.5%	
0.7	0.574	0.559	2.6%	0.562	2.1%	
1.0	0.550	0.518	5.8%	0.511	7.1%	

系统的能量集中度如图 3 所示。



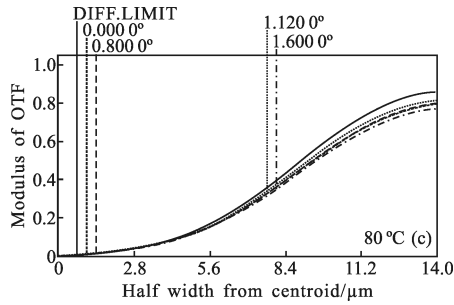


图 3 系统各温度的能量集中度曲线图

Fig.3 Encircled energy curves of different temperature

由图 3 可见,在 14 μm 的弥散半径内,系统的能量集中度随温度变化不大,接近衍射极限。

### 3.3 焦距变化率与调焦距离分析

表 3 给出了该系统在不同温度下的焦距变化率。由表 3 数据,高低温焦距相比于常温的变化率在 2.5% 以内,基本保持了稳定。

表 3 焦距变化率分析

Tab.3 Focal length change ratio

Temperature/°C	Focal length/mm	Change ratio
-40	142.008	-2.06%
-20	142.97	-1.4%
0	143.968	-0.71%
20	145.000	0%
40	146.065	0.73%
60	147.162	1.49%
80	148.292	2.27%

表 4 给出了系统不同温度下的后截距调节量,单位为 mm。

表 4 后截距调节量分析

Tab.4 Back focal length adjustive distance

Temperature/°C	Old BFL	New BFL	Adjust
-40	9.012 22	9.022 12	0.009 9
-20	9.011 95	9.012 79	0.000 84
0	9.011 67	9.007 06	-0.004 61
20	9.011 40	9.011 40	0
40	9.011 13	9.005 80	-0.005 33
60	9.010 85	9.010 04	-0.000 81
80	9.010 58	9.017 41	0.006 83

由于系统焦深约为:

$$\pm 2\lambda F^2 = \pm 2 \cdot 9 \cdot 1.6^2 = \pm 46.08 \mu\text{m}$$

因此从表 4 可见,各温度的后截距调节量远小于系统焦深,因此该系统不必进行调焦,可在 -40 ~ 80 °C 内保持像质的稳定。

## 4 实验结果

文中将设计镜头进行了实际加工,然后将文中设计的无热化镜头与各参数相同(包括焦距、F 数、波段、视场等)的对照组普通红外镜头,进行了实际常温与高温环境下的成像对比实验。

实验方法为,将无热化红外镜头与对照组普通红外镜头装入红外成像系统中,并整体放入环境试验箱内。首先打开环境试验箱门,在常温下调好焦面位置,使无热化镜头与对照组普通红外镜头均对试验箱外的楼房及天空成像,所成图像如图 4 所示。

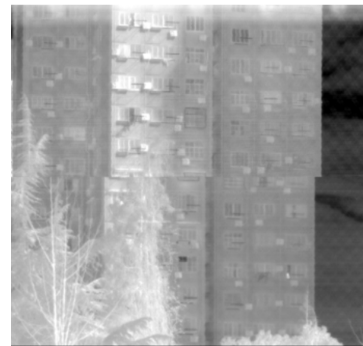


图 4 常温下无热化与对照组红外镜头成像结果

Fig.4 Imaging of athermal and non-athermal infrared lenses at normal temperature

关闭环境试验箱门,加温至 60 °C 并保温 3 h,以确保镜头整体均匀达到 60 °C 的高温。然后打开环境试验箱门,快速获取二组镜头对试验箱外的楼房及天空在高温条件下的成像图片。由于金属及玻璃材质的热传导较慢,因此在短时间快速完成成像试验仍能体现无热化红外镜头在高温的成像水平。高温时所成图像如图 5 所示。

由实验结果图 5 可见,对照组普通红外光学系统虽然在常温下成像理想,但高温条件下焦面位置改变,成像变得模糊,需要重新调焦。而文中设计的无热化红外光学系统无论常温还是在高温 60 °C 条件下均无需调焦,成像效果清晰。

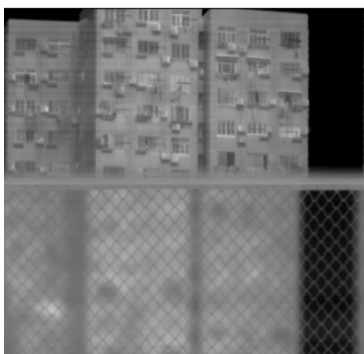


图 5 高温下无热化与对照组红外镜头成像结果

Fig.5 Imaging of athermal and non-athermal infrared lenses at high temperature

## 5 结论

文中分析了二次成像红外光学系统对温度变化敏感的特点与影响,设计了一个无热化制冷型长波二次成像光学系统。该系统在 $-40\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,不需进行调焦,能保持成像质量稳定,接近衍射限,并且焦距变化率保持在 2.5%以内。成像实验结果显示,该无热化镜头高温成像无须调焦依然清晰,满足了应用需求。

### 参考文献:

- [1] Xi Xiao, Cen Zhaofeng, Li Xiaotong. Application of athermalisation in optical systems [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(4): 388-390. (in Chinese)  
奚晓,岑兆丰,李晓彤. 无热技术在光学系统中的应用[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(4): 388-390.
- [2] Sheng Honghai, Wang Guohua, Ding Jinwei, et al. Application of active-athermal compensation to airborne IR optical systems [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(3): 593-601. (in Chinese)  
沈宏海,王国华,丁金伟,等. 主动补偿无热化技术在机载红外光学系统中的应用[J]. 光学精密工程, 2010, 18(3): 593-601.
- [3] Liu Lin. Study on fast speed optical system of uncooled MWIR imager[D]. Soochow: Soochow University, 2010. (in Chinese)  
刘琳. 中波红外大相对孔径非制冷热像仪光学系统的研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2010.
- [4] Wu Xiaojing, Meng Junhe. Approach of athermalizing infrared optical systems [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(6): 572-576. (in Chinese)  
吴晓靖,孟军和. 红外光学系统无热化设计的途径 [J]. 红外与激光工程, 2003, 32(6): 572-576.
- [5] Hu Yuxi, Zhou Shaoxiang, Yang Jianfeng, et al. Optical-mechanical-thermal co-design of infrared systems [J]. *Infrared Technology*, 2000, 22(2): 32-35. (in Chinese)  
胡玉禧,周绍祥,杨建峰,等. 红外系统的光机热一体化设计[J]. 红外技术, 2000, 22(2): 32-35.
- [6] Li Hua, Han Weiqiang, Shen Mangzuo. Passive athermal design and measurement of MWIR optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(4): 687-691. (in Chinese)  
李华,韩维强,沈忙作. 中波红外光学系统被动无热化设计及测试[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(4): 687-691.
- [7] Cui Li, Zhao Xinliang, Li Tonghai, et al. Athermalization of uncooled infrared optical system without focusing mechanism [J]. *Infrared Technology*, 2010, 32(4): 187-190. (in Chinese)  
崔莉,赵新亮,李同海,等. 无调焦非制冷红外光学系统的无热化设计[J]. 红外技术, 2010, 32(4): 187-190.
- [8] Yasuhisa Tamagawa, Toru Tajime. Expansion of an athermal chart into a multilens system with thick lenses spaced apart [J]. *Opt Eng*, 1996, 35(10): 3001-3006.
- [9] Yu Yang, Jin Yaping, Pan Zhaoxin, et al. Athermal design of cooled LWIR optical system with extensive temperature range [J]. *Infrared Technology*, 2010, 33(10): 585-587. (in Chinese)  
于洋,金亚平,潘兆鑫,等. 长波红外制冷型光学系统超宽温消热差设计[J]. 红外技术, 2010, 33(10): 585-587.