

# 双视场长波红外光学系统无热化设计

陈建发<sup>1,2</sup> 王合龙<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471009; <sup>2</sup> 中国航空工业集团公司洛阳光电设备研究所, 河南 洛阳 471009)

**摘要** 介绍了凝视面阵双视场长波红外光学系统设计及无热化技术。采用两种不同的光学构型实现视场切换, 第一种方案通过轴向移动一组透镜实现视场切换, 第二种方案通过旋转变倍插入镜组实现视场切换, 对比了它们各自的优缺点。研究发现旋转变倍光学系统光学性能优于轴向两档变倍光学性能, 但不适合采用光学被动式无热化设计; 两档变倍光学系统在小变倍比的情况下(倍率小于4), 各项光学性能良好, 且较容易采用光学被动式无热化设计, 实现轻量化小型化设计。设计中引入非球面降低系统残余像差, 减少了镜组个数, 降低了系统成本。光学系统工作波段为 7.7~9.7  $\mu\text{m}$ , 结构紧凑, 可达到 100% 冷光阑效率, 像质评定结果表明, 光学系统双视场在全温度范围内(-60  $^{\circ}\text{C}$ ~70  $^{\circ}\text{C}$ ) 像质良好。

**关键词** 光学设计; 红外光学; 两档变倍; 旋转变倍; 无热化

中图分类号 TN216 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.062203

## Athermalization Design of Dual-Field-of-View Long Wavelength Infrared Optical System

Chen Jianfa<sup>1,2</sup> Wang Helong<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Science and Technology on Electro-Optical Control Laboratory, Luoyang, Henan 471009, China  
<sup>2</sup> Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, Aviation Industry Corporation of China, Luoyang, Henan 471009, China

**Abstract** An athermalization design of switchable dual-field-of-view optical systems for 8~12  $\mu\text{m}$  wavelength band using infrared focal-plane array (FPA) is presented. In order to switch the field-of-view (FOV), two different optical configurations are explored and compared. The first scheme is based on the axial motion of a lens group and the second is based on a rotate-in motion of two widely separated lens groups. It is found that the rotate-in scheme achieves better performance than the step-zoom scheme, but the optical passive athermalization misfits this scheme. The step-zoom scheme is easy to use the optical passive athermalization to achieve lighter weight and smaller volume, and the performance is well for small zoom ratio. Aspheric surfaces are utilized to control aberrations and reduce the total lens cost. The results show that the optical system in the 7.7~9.7  $\mu\text{m}$  wavelength band has a compact structure and can achieve 100% cold shield efficiency. The final optical designs along with their modulation transfer function (MTF) are presented, showing excellent imaging performance in dual FOVs at the temperature range between -60  $^{\circ}\text{C}$  and 70  $^{\circ}\text{C}$ .

**Key words** optical design; infrared optics; step-zoom; rotate-in group zoom; athermalization

**OCIS codes** 220.4830; 110.3080; 280.6780

## 1 引言

工作波段在 3~5  $\mu\text{m}$  和 8~12  $\mu\text{m}$  的红外搜索与跟踪系统一般具有两个视场(FOV), 小倍率大视场用来观察一个较大范围的场景, 搜索潜在目标; 高倍率窄视场用来观察一个小范围的场景, 分辨识别锁定目标的轮廓细节, 大视场与小视场之间的变倍比一般在 3~4<sup>[1~5]</sup>。为了提高图像的信噪比, 避免鬼像, 就要实现光学系统的出瞳与探测器光阑的匹配, 即 100% 冷光阑效率<sup>[4,6~8]</sup>。实现 100% 冷光阑效率可采用两种结构, 分别是一次成像光学系统和二次成像光学系统。由于光学系统的窄视场一般都有较长的焦距和出瞳距<sup>[4]</sup>,

收稿日期: 2013-01-09; 收到修改稿日期: 2013-03-07; 网络出版日期: 2013-05-22

作者简介: 陈建发(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学设计方面的研究。E-mail: ly471141@hotmail.com

导师简介: 王合龙(1965—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光电系统总体技术方面的研究。E-mail: huqnwpu007@163.com

因此只能采取二次成像光学系统,以减小第一片物镜的口径(可减少至窄视场状态下系统的入瞳直径)<sup>[8]</sup>。军用光学系统一般都要求一个宽的工作温度范围,典型的工作温度是 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[10]</sup>。目前无热化技术主要有机械被动式、电子主动式、光学被动式三种<sup>[7~9]</sup>,其中光学被动式结构简单、尺寸小、质量轻、无需供电、系统可靠性好<sup>[8]</sup>。

本文对采用凝视面阵制冷型长波红外探测器,工作波段为 $8\sim 12\text{ }\mu\text{m}$ 的双视场光学系统展开研究。对比分析采用两种不同设计方案实现双视场的 $8\sim 12\text{ }\mu\text{m}$ 光学系统所能达到的性能。第一种设计方案通过轴向移动一组透镜实现视场切换,可以看作为连续变焦中的一个位置,采用光学被动式无热化设计;第二种设计方案通过旋转一组镜组实现视场切换,这种方式只能实现两档变焦,采用电子主动式无热化设计。对比分析发现,在小倍率情况下,光学被动式无热化轴向变倍光学系统(两档变倍光学系统)高低温状态下性能良好,且体积更为紧凑,是一种更好的设计方案。

## 2 光学设计参数

光学系统采用 Sofradir 公司  $320\text{ pixel}\times 256\text{ pixel}$  长波红外凝视面阵制冷探测器,像素大小  $30\text{ }\mu\text{m}\times 30\text{ }\mu\text{m}$ ,CCD 像面尺寸大小为  $9.6\text{ mm}\times 7.68\text{ mm}$ ,对角线为  $12.23\text{ mm}$ ,敏感波段为  $7.7\sim 9.7\text{ }\mu\text{m}$ 。光学镜筒材料采用铝合金,膨胀系数为  $23.6\times 10^{-6}\text{ K}$ 。由探测器本身参数和系统总体要求计算出的光学系统基本要求如表 1 所示。

表 1 光学系统设计参数

Table 1 Design parameters of the optical system

Parameter	Value
Wavelength / $\mu\text{m}$	$7.7\sim 9.7$
Focal length /mm	100
Wide FOV /( $^{\circ}$ )	$6(\pm 3)$
Narrow FOV /( $^{\circ}$ )	$2(\pm 1)$
$F$ number	2
Distortion /%	$\leq 5$
Geometric diameter of circle	80% energy within $30\text{ }\mu\text{m}$
Transmittance	$\geq 0.6$
Total length of the system /mm	$400\times 300\times 200$
Athermal temperature range / $^{\circ}\text{C}$	$-60\sim 70$

## 3 两档变倍光学系统

两档变倍光学系统是指通过轴向移动一组透镜使得系统的放大倍率发生改变,而物平面和像平面位置保持不变的光学系统。该光学系统与轴向连续变焦光学系统类似,物镜采用三组元设计,其光焦度分配为“+ - +”。目镜为二次成像组元,将中间像再次聚焦到在探测器像面上并实现冷光阑效率 100%,采用近似密接三片式设计可以较好地消除像差。为满足大范围的工作温度( $-60\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,温差大于  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),光学系统要考虑无热化设计,同时为实现系统小型化和轻量化设计,应采用光学被动无热化的技术进行设计。光学系统结构图如图 1 所示,移动组元导程小于  $100\text{ mm}$ ,可满足快速切换视场的要求。

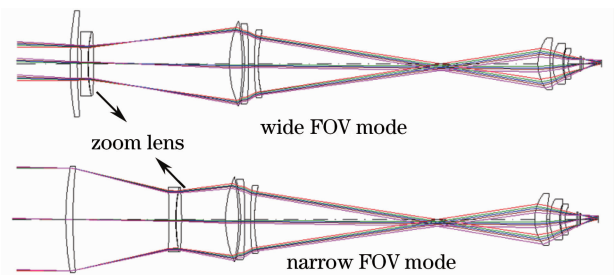


图 1 两档变倍光学系统结构图

Fig. 1 Configuration of the step-zoom optical system

光学系统采用光学被动无热化设计,消除系统随环境变化时产生的热离焦,在全温度范围内( $-60\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),系统成像性能良好。光学调制传递函数(MTF)如图 2 所示,全温度范围内在  $18\text{ lp/mm}$  时短焦、长焦边缘视场大于 0.5,成像质量接近衍射极限。

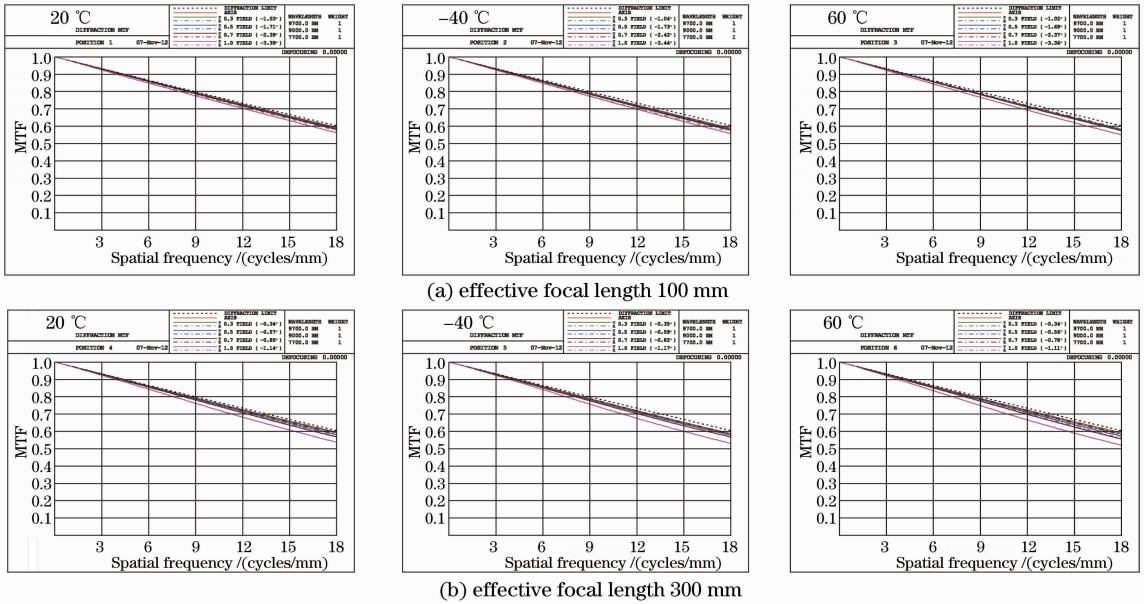


图 2 两档变焦光学系统 MTF

Fig. 2 MTFs of theathermalized step-zoom optical system

光学系统无冷反射,经计算该系统的透射率为 0.64,可满足远距探测的需求。由于系统物镜组采用“+ - +”三组元设计,增加了补偿组(第三组元)的光焦度,采用光学被动无热化设计,进一步引入了负组元补偿,增加了系统的光焦度,在校正的过程中,使得系统残余高级像差,光学系统公差较严格。

### 4 旋转变倍光学系统

旋转变倍光学系统是指在系统中旋转插入一组镜元使得系统的焦距(或视场)发生改变,物平面和像平面保持不变的光学系统。

无热化设计方面,若采用光学被动式无热化技术,插入镜组和窄视场镜组需要单独实现无热化,这样会导致旋转插入的镜元增加 2 块左右,对系统的体积和控制产生影响;同时窄视场状态下镜元个数也要增加 3 块左右,这会严重降低系统宽、窄视场的透射率。因此,选择电子无热化技术实现无热化设计。光学结构如图 3 所示,通过插入/旋出旋转组元,可实现视场的快速切换。

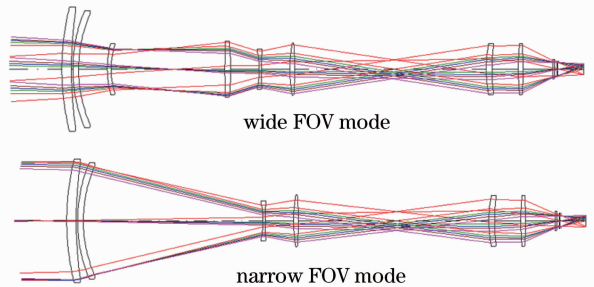


图 3 旋转变倍光学系统结构图

Fig. 3 Configuration of the rotate-in zoom optical system

该系统的 MTF 如图 4 所示,在 18 lp/mm 时短焦边缘视场大于 0.5,长焦边缘视场大于 0.4,成像质量

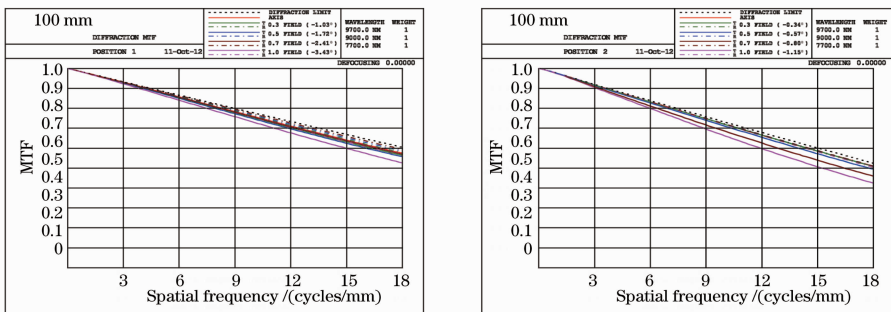


图 4 旋转变倍光学传递函数 MTF

Fig. 4 MTFs of the rotate-in zoom optical system

接近衍射极限。

采用电子主动无热化方式,理论计算拟合出无热化温度补偿曲线如图 5 所示,

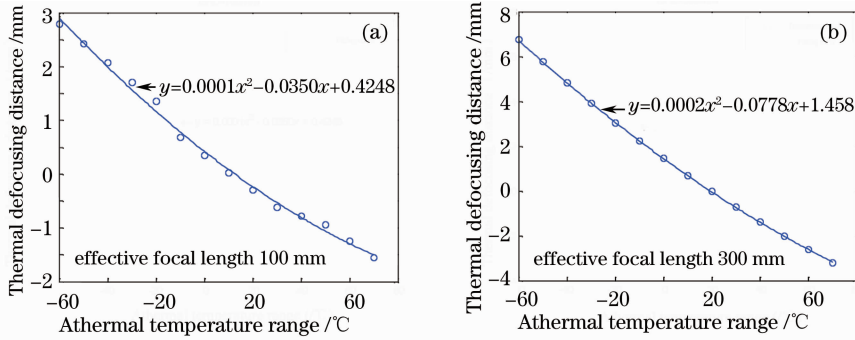


图 5 无热化温度补偿曲线

Fig. 5 Curves of temperature compensation adjustment

采用电子主动式无热化技术对温度变化产生的热离焦进行补偿,补偿前后系统高低温下的光学传递函数 MTF 如图 6 所示。

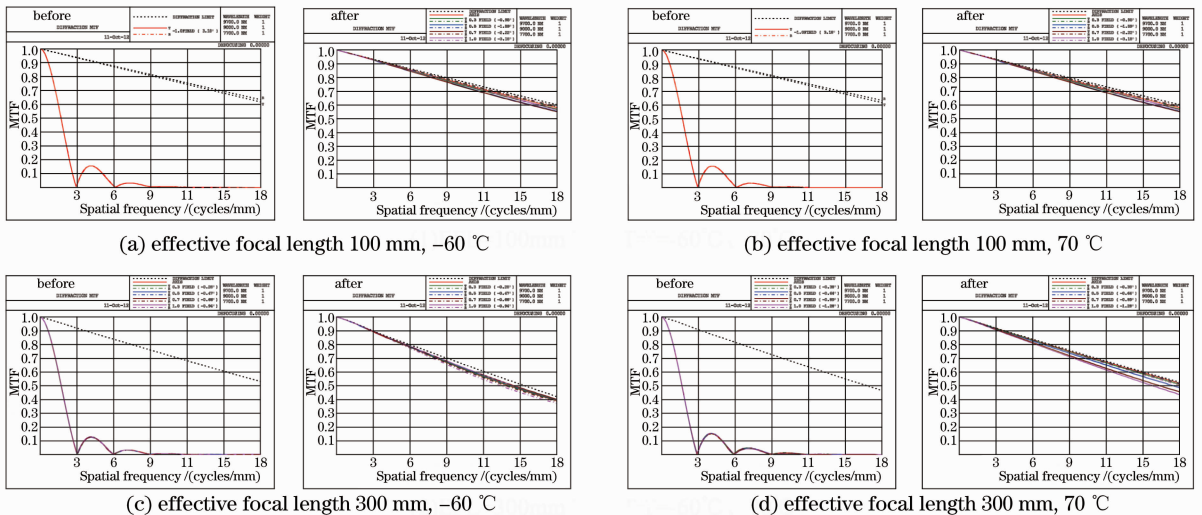


图 6 温度补偿前后光学系统传递函数 MTF

Fig. 6 MTFs before and after temperature compensation adjustment

光学系统无冷反射,经计算该系统的大视场透射率为 0.77,窄视场透射率 0.84,可满足远距探测的需求。光学系统像差得到了很好的校正,光焦度分配合理,系统公差较好,在常温下( $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )具有比两档变倍光学系统更好的性能。光学系统数值孔径较大,焦深很小,约为 0.175 mm,由于电子主动无热化设计的原理是基于热离焦的补偿设计,使得光学系统在高低温下性能不如两档变倍光学系统,且相对而言体积不够紧凑。综合考虑军用光学系统温度环境适应性和体积的严格限制,认为采用光学被动式无热化设计的两档变倍光学系统是一种最佳的设计方案。

## 5 结 论

研究了双视场的两种设计构型,考虑到军用光学系统温度适应性的要求,提出了两种构型的最佳无热化实现方式,并进行了详细的设计分析。研究发现,旋转变倍光学系统与两档变焦光学系统相比,其切换视场速度较快(小于 1 s),系统光学透射率高,公差不敏感。但由于电子无热化技术只能对热离焦量进行补偿,高相对孔径时( $F$  数小于 3)由于光学系统本身焦深很小,会造成成像质量的严重恶化。两档变倍光学系统宽窄视场镜元个数相等,补偿量较多,可在不增加太多镜元的情况下实现光学被动无热化设计,使得系统高低温状态下的像质得到了很好的校正,保证了系统全温度范围内( $-60\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ )良好的成像质量。在小

变倍比下,光学被动式无热化两档变倍光学系统是一种最佳的军用红外光学系统设计方案,高低温下均具有较好的成像性能,结构紧凑,且能满足快速切换视场的需求。

### 参 考 文 献

- 1 Zhang Liang. One kind of athermalization and dual field of view optical system design[J]. *Optical Technique*, 2009, **35**(4): 566~568  
张 良. 无热化双视场红外光学系统的设计[J]. 光学技术, 2009, **35**(4): 566~568
- 2 Xue Hui. Optical design of infrared search and trace system[J]. *Acta Optical Sinica*, 2010, **30**(8): 2383~2386  
薛 慧. 红外搜索与跟踪系统中光学系统的设计[J]. 光学学报, 2010, **30**(8): 2383~2386
- 3 Liu Feng, Xu Xiping, Sun Xiangyang *et al.*. Design of infrared (IR) hybrid refractive/diffractive lenses for target detecting/tracking[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2084~2088  
刘 峰, 徐熙平, 孙向阳 等. 折/衍射混合红外目标搜索/跟踪光学系统设计[J]. 光学学报, 2010, **30**(7): 2084~2088
- 4 Muhammad Nadeem Akram. A design study of dual-field-of-view imaging systems for the 3~5  $\mu\text{m}$  waveband utilizing focal-plane arrays[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2003, **5**(4): 308~322
- 5 Deng Jian, Tong Weihong, An Xiaoqiang *et al.*. Athermalization of infrared zoom system[J]. *J. Applied Optics*, 2011, **32**(1): 133~137  
邓 键, 童卫红, 安晓强 等. 双视场红外变焦镜头的无热化研究[J]. 应用光学, 2011, **32**(1): 133~137
- 6 Jiang Lun, Huang Wei. Lens design for optical system of high zoom ratio[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(12): 1222006  
江 伦, 黄 玮. 高变倍比变焦距系统设计[J]. 光学学报, 2011, **31**(12): 1222006
- 7 Wang Xuexin, Jiao Mingyin. Athermalization design for infrared optical systems[J]. *J. Applied Optics*, 2009, **30**(1): 129~133  
王学新, 焦明印. 红外光学系统无热化设计方法的研究[J]. 应用光学, 2009, **30**(1): 129~133
- 8 Luo Jinping, Wang Helong, Liu Xin *et al.*. Passive optical athermalization design in re-imaging optical system[J]. *Electronics Optics & Control*, 2012, **19**(1): 85~88  
罗金平, 王合龙, 刘 欣 等. 二次成像光学被动无热化设计[J]. 光电与控制, 2012, **19**(1): 85~88
- 9 Liu Lin, Shen Weiming, Zhou Jiankang. Design on athermalised middle wavelength infrared optical system with large relative aperture[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 675~679  
刘 琳, 沈为民, 周建康. 中波红外大相对孔径消热差光学系统的设计[J]. 中国激光, 2010, **37**(3): 675~679
- 10 Li Lin. Modern Optical Design Method[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009  
李 林. 现代光学设计方法[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009