

# 基于硫系玻璃的大相对孔径红外消热差光学系统设计

史浩东<sup>1</sup> 张 新<sup>2</sup> 曲贺盟<sup>2</sup> 张继真<sup>2</sup> 姜会林<sup>1</sup>

<sup>1</sup>长春理工大学光电工程学院空间光电技术研究所, 吉林 长春 130022

<sup>2</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033

**摘要** 针对硫系玻璃材料热稳定性高、光谱透射率好、适合模压成型等特点, 提出一种采用硫系玻璃的长波红外光学系统设计方法。理论分析了被动式光学补偿和机械补偿的设计过程。根据被动光学补偿原理求解系统初始光焦度分配, 借助被动机械补偿方法设计了一种大相对孔径红外消热差光机系统。系统焦距为 90 mm,  $F$  数为 0.9, 适配长波(8~14  $\mu\text{m}$ )非制冷红外焦平面探测器, 其像素为 640 pixel $\times$ 512 pixel, 像素大小为 17  $\mu\text{m}$ 。在-40  $^{\circ}\text{C}$ ~50  $^{\circ}\text{C}$  温度范围内工作时, 系统各视场调制传递函数(MTF)均接近衍射极限。设计结果表明, 利用硫系玻璃相互匹配并结合机械补偿方法可以实现系统被动无热化, 能够得到性价比较高的红外成像光学系统。

**关键词** 光学设计; 硫系玻璃; 红外光学系统; 消热差

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0622002

## Design of Large Relative Aperture Infrared Athermalized Optical System with Chalcogenide Glasses

Shi Haodong<sup>1</sup> Zhang Xin<sup>2</sup> Qu Hemeng<sup>2</sup> Zhang Jizhen<sup>2</sup> Jiang Huilin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Space Optoelectronics Technology, College of Optical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China*

<sup>2</sup>*Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China*

**Abstract** According to the characteristics of chalcogenide glass with high thermal stability, perfect spectrum transmittance and moldable property, a design method for long-wave infrared optical systems only with chalcogenide glasses is proposed. The design process of passive optical athermalization and passive mechanical athermalization is analyzed. The initial optical power contribution is calculated based on the theory of passive optical athermalization. An infrared athermalized optical system is designed. The focal length is 90 mm, the  $F$ -number is 0.9. This system is compatible with uncooled long-wave infrared (8~14  $\mu\text{m}$ ) focal plane array which has a format of 640 pixel $\times$ 512 pixel and a pixel pitch of 17  $\mu\text{m}$ . It can adapt within the temperature range of -40  $^{\circ}\text{C}$ ~50  $^{\circ}\text{C}$ , the modulation transfer function (MTF) of full field of view is close to the diffraction limit through the entire temperature range. The results show that the passive athermalization can be realized by matching chalcogenide glasses and using passive mechanical compensation, and the low-cost infrared imaging optical system can be achieved.

**Key words** optical design; chalcogenide glasses; infrared optical system; athermalization

**OCIS codes** 220.3620; 110.3080; 080.3620

## 1 引言

随着各国对精确制导武器的需求不断增加, 导引技术得到巨大发展。其中, 红外成像导引技术由于其

收稿日期: 2014-12-23; 收到修改稿日期: 2015-01-22

基金项目: 国家自然科学基金(91338116)

作者简介: 史浩东(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: shihaodong08@163.com

导师简介: 姜会林(1945—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光学系统设计、光电检测技术和激光通信技术等方面的研究。

E-mail: hljiang@edu.cust.cn

全天候工作特性,格外受到军方重视。红外成像系统可分为透射式、反射式和折反射式<sup>[1-5]</sup>。透射式具有无中心遮拦、装调简单、可靠性强等优势,被广泛应用在军用红外成像导引设备中。

考虑到红外光学材料性能受温度影响较大,容易产生热离焦,通常需要采用消热差设计。目前消热差设计方法主要有机械主动补偿、机械被动补偿和光学被动补偿。由于机械主动补偿需要外加调焦机构,致使系统结构尺寸过大,因而未得到广泛应用。常见的长波透射式红外光学系统一般选用Ge与ZnSe等相互配合,达到校正像差的目的。但这两种材料都属于晶体,通常采用金刚石单点车削加工,成本相对较高,不符合红外导引系统低成本的发展要求。因此,设计时需要采用新型材料替代红外晶体以控制成本。硫系玻璃是指将S、Se、Te等元素与Ge、As、Si、Sb等元素按照一定比例组合而成的化合物玻璃。该种玻璃不仅在中波和长波红外透射率较高、折射率温度系数较小,而且可以模压成型,批量生产。这大大降低了红外光学系统的制造成本和加工周期,是替代晶体的理想材料。例如,美国LightPath公司设计的 $F$ 数为1.1的长波红外镜头,采用了两片含有非球面和衍射面的硫系玻璃,实现了低成本红外镜头的批量生产<sup>[6]</sup>。然而,受国内加工水平的限制,硫系玻璃在我国的应用还处在起步阶段,史广维等<sup>[7]</sup>设计的采用硫系玻璃的红外成像系统,仍然含有Ge,且系统相对孔径不是很大。硫系玻璃材料在长波的折射率一般在2.5左右,远小于Ge的折射率( $n_{Ge}=4$ ),用其设计大相对孔径红外光学系统时,需要增加镜片数量。由于硫系玻璃的折射率受温度影响较小,要求镜筒材料受温度变化的影响也要小,单独采用光学被动补偿或机械被动补偿方法,都有可能带来系统重量增加或成本上升等问题。采用硫系玻璃给光学设计提出了更高的要求。

针对上述问题,本文从理论模型出发,根据光学被动消热差和消色差条件求解系统初始光焦度分配,结合被动机械补偿方法进一步平衡热差,实现了 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内消热差设计。系统透镜采用硫系玻璃材料,各工作温度下全视场调制传递函数(MTF)接近衍射极限,满足成像要求。

## 2 光学系统设计思想

### 2.1 硫系玻璃

目前硫系玻璃种类比较有限,可以批量生产的硫系玻璃主要有法国Umicore公司生产的Gasir系列,美国Amorphous Materials公司生产的Amtir系列以及德国Vitron GmbH生产的IG系列。红外材料的 optical thermal 特性参数用  $T$  表示<sup>[8]</sup>:

$$T = \frac{1}{n-1} \frac{dn}{dT} - \alpha_c, \quad (1)$$

式中  $\alpha_c$  为玻璃材料的热膨胀系数(CTE),  $dn/dT$  是玻璃折射率随温度变化的变化率,用  $T$  可以综合评价红外玻璃材料受温度变化的影响。常用红外晶体材料和硫系玻璃材料性能参数如表1所示。

表1 常用长波红外晶体(LWIR)材料与硫系玻璃光学、热特性参数

Table 1 Optical, thermal parameters of common long-wave infrared materials and chalcogenide glasses

LWIR material	Refractive index at	Abbe number 8~	$dn/dT$ at 10 $\mu\text{m}$	CTE $\alpha_c / (10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	Opto-thermal coefficient $T / 10^{-6}$
	10 $\mu\text{m}$	12 $\mu\text{m}$	and 20 $^{\circ}\text{C} / (10^{-6}/^{\circ}\text{C})$		
Gasir-1	2.4944	120	49.7	17	16.3
Gasir-3	2.6105	115	53.0	17	15.9
Amtir-1	2.5109	113	70.5	12	34.7
Amtir-3	2.6027	110	47.2	13.5	15.9
IG2	2.4967	105	60	12.1	28.0
IG3	2.7870	164	145	13.4	67.7
ZnS	2.2002	22.8	44	6.6	30.1
ZnSe	2.4065	58	61	7.1	36.3
Ge	4.0032	864	396	6.1	126

由表1可知,Ge的折射率和阿贝数最大,虽然有利于校正像差和色差,但其 $T$ 值远大于硫系玻璃,使其受温度变化影响较大。同时,Ge和ZnSe等晶体材料不能采用模压加工技术,在加工含有非球面或衍射面的元件时,成本陡增,不适合批量生产。

### 2.2 被动式光学补偿

在以往被动光学补偿的初始结构求解中,均以密接薄透镜为基础建立理论模型,未考虑镜筒材料受温度变化引起的离焦<sup>[9]</sup>。当透镜间距较大时,镜筒长度改变量将随之增大,并且足以影响整个系统的成像质量<sup>[10-15]</sup>。因此,需要建立具有间隔的薄透镜组,才能更加准确地描述系统无热化过程。以三分离薄透镜为基础建立了数学模型,如图1所示,三组薄透镜光焦度分别为 $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3$ ,间距分别为 $d_1, d_2$ ,后截距(BFL)为 $L_t$ ,相应的镜筒材料热膨胀系数分别为 $\alpha_{H_1}, \alpha_{H_2}, \alpha_{H_3}$ 。第一近轴光线在三组薄透镜上的入射高度分别为 $h_1, h_2, h_3$ 。

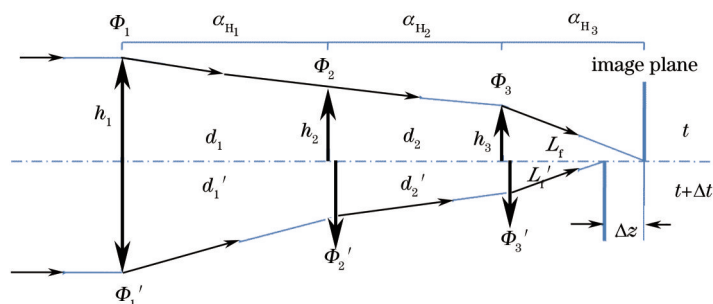


图1 三分离薄透镜热离焦模型

Fig.1 Thermal defocus model of triple separated thin lens

$$h_2 = 1 - \Phi_1 d_1, \quad (2)$$

$$h_3 = 1 - \Phi_1 d_1 - d_2(\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_1 \Phi_2 d_1), \quad (3)$$

系统总光焦度为

$$\Phi = \sum_{i=1}^3 h_i \Phi_i, \quad (4)$$

后截距为

$$L_t = [1 - \Phi_1(d_1 + d_2) - \Phi_2 d_2(1 - \Phi_1 d_1)]/\Phi. \quad (5)$$

当温度变化 $\Delta t$ 后,各薄透镜光焦度变为

$$\Phi'_i = \Phi_i(1 + T_i \Delta t), \quad (6)$$

式中 $T_i$ 为各透镜光学热特性参数。由于各透镜组之间由镜筒连接,因此当温度变化时,透镜间隔因镜筒材料的热胀冷缩(其热膨胀系数为 $\alpha_{H_i}$ )而改变,变化后的透镜间隔为

$$d'_i = d_i(1 + \alpha_{H_i} \Delta t), \quad (7)$$

温度变化后的系统总光焦度 $\Phi'$ 为

$$\Phi' = \Phi'_1 + \Phi'_2 + \Phi'_3 - \Phi'_1 d'_1(\Phi'_2 + \Phi'_3) - \Phi'_3 d'_2(\Phi'_1 + \Phi'_2 - d'_1 \Phi'_1 \Phi'_2), \quad (8)$$

变化后的后截距 $L'_t$ 为

$$L'_t = [1 - \Phi'_1(d'_1 + d'_2) - \Phi'_2 d'_2(1 - \Phi'_1 d'_1)]/\Phi'. \quad (9)$$

当镜筒的膨胀量与系统焦距的改变量恰好相等时(差值 $\Delta z = 0$ ),系统实现无热化,即

$$\Delta z = L_t(1 + \alpha_{H_3} \Delta t) - L'_t = [1 - \Phi_1 d_1 - d_2(\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_1 \Phi_2 d_1)](1 + \alpha_{H_3} \Delta t) / \Phi - \{1 - \Phi'_1(d'_1 + d'_2) - \Phi'_2 d'_2[1 - \Phi'_1 d'_1]\} / \Phi' = 0. \quad (10)$$

同时,为了校正系统色差,各组透镜光焦度 $\Phi_i$ 还应满足消色差方程

$$\sum_{i=1}^3 h_i^2 \Phi_i / V_i = 0, \quad (11)$$

式中 $h_i$ 为第一近轴光线在各组透镜的透射高度, $V_i$ 为各组透镜的阿贝数。综上所述,求解一个红外无热化光学系统的初始结构时,其光焦度分配需要同时满足(4)、(10)、(11)式。

### 2.3 被动式机械补偿

进行红外系统无热化设计时,镜筒材料作为重要的设计变量之一,决定着最终系统的成像质量和加工成本。选择镜筒材料时,应综合考虑材料的热特性和重量。表2列出了几种常用镜筒材料的性能参数<sup>[16]</sup>。

表 2 常用镜筒材料性能参数

Table 2 Properties of common mechanical materials

Mechanical materials	CTE $/(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	Density $/(g/cm^3)$
ABS	73.8	1.2
Magnesium	25.2	1.8
Aluminum (6061)	23.6	2.7
Titanium	8.8	4.4
Stainless steel (304)	14.7	8.0
Invar 36	1.3	8.1

被动式机械补偿方法是采用双层或多层套筒结构,利用不同材料的热膨胀系数差异,通过设计合理的机械结构,等效生成新的热膨胀系数  $\alpha'_H$ :

$$\alpha'_H = (\alpha_{H_b} l_2 - \alpha_{H_a} l_1) / l' \quad (12)$$

式中  $\alpha_{H_a}$  为内部镜筒材料的热膨胀系数,  $\alpha_{H_b}$  为外部镜筒材料的热膨胀系数,对应长度分别为  $l_1$ 、 $l_2$ ,  $l'$  为等效镜筒长度。如图 2 所示,设计时合理选择  $\alpha_{H_a} > \alpha_{H_b}$  的两种材料,当温度上升时,由于内部镜筒材料膨胀量大于外部镜筒膨胀量,使第二片透镜向远离探测器方向移动,即可补偿焦距受温度变化所引起的离焦。将这种补偿方法与光学补偿方法相结合,能够更好地实现系统无热化。

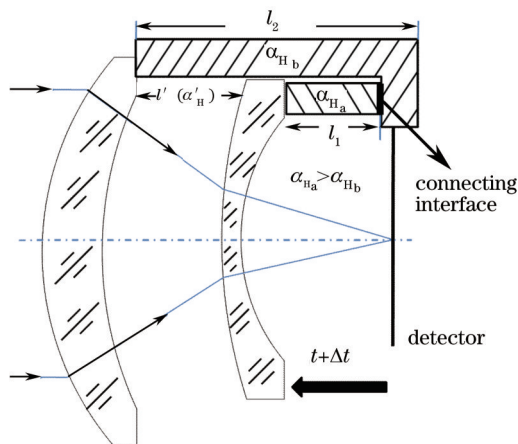


图 2 被动机械补偿原理

Fig.2 Principle of passive mechanical compensation

### 3 设计实例

#### 3.1 设计指标

采用 640 pixel×512 pixel 非制冷红外焦平面探测器,像素尺寸为 17 μm,光学技术指标如表 3 所示。

表 3 系统技术指标

Table 3 System specifications

Spectrum range	Focal length	F number	Field angle	Tube length
8~14 μm	90 mm	0.9	8.8°	<100 mm

系统要求在不使用 Ge 和 ZnSe 的情况下,仅使用硫系玻璃设计的红外光学系统,在 -40 °C~50 °C 温度范围内,各视场调制传递函数在 30 lp/mm 处大于 0.4。

#### 3.2 设计结果

由于设计时不能使用高折射率 Ge 材料,并且受到相对孔径和筒长的限制,需要将第 I 光组适当复杂化,以控制系统球差和场曲。要求第 I 光组在提供足够正光焦度的同时,实现组内消色差。取  $h_2/h_1 = 0.5$ ,镜筒材料全部采用铝,求解出不带头罩的红外光学系统光焦度分配,如表 4 所示。

表4 初始光焦度分配

Table 4 Initial optical power distribution

Part	I		II	III
Material	Gasir-1	ZnS	Amtir-1	Amtir-3
Power	0.0174	-0.0033	-0.0277	0.0269

利用光学设计软件,依照所求光焦度分配建立初始结构,使用多重组态进行光学被动无热化设计。系统采用热稳定性较好的硫系玻璃,透镜焦距受温度变化影响相对较小,无法完全补偿由铝镜筒引起的热离焦。考虑到系统重量和成本等问题,镜筒不能全部选用热膨胀系数较小的殷钢等材料。考虑借助机械被动补偿方法,进一步补偿残余热差,为像差校正提供更大空间。设计时,选择重量较轻的铝作为第I组镜筒材料,将第I组和第II组之间的镜筒材料热膨胀系数设为变量,利用软件自动优化出一个虚拟的热膨胀系数 $-17.63 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。该线膨胀系数为负值,可以模拟透镜受热后向远离探测器的方向运动,很好地补偿了由于折射率变化引起的热离焦。根据(12)式,选取殷钢作为第II组的外部镜筒材料,铝为内部镜筒材料,计算出相应的内径筒长度为6 mm。最终设计结果如图3所示。其中,第一片为ZnS头罩,光焦度很小,对热离焦贡献较小;头罩后第I组由于考虑透镜的可加工性,将初始结构中的单片Gasir-1透镜拆分成两片,用来提供正光焦度,使光线充分会聚,有效控制筒长,ZnS作为负透镜用于组内色差的校正,同时能够平衡一部分热差,其后表面为高次非球面,可以校正大相对孔径带来的高级球差;第II组和第III组两片透镜材料分别为Amtir-1和Amtir-3,主要用于平衡第I组的残余热差,同时利用高次非球面进一步提升像质。最终光焦度分配如表5所示。

表5 最终光焦度分配

Table 5 Final optical power distribution

Part	I		II	III	
Material	Gasir-1	Gasir-1	ZnS	Amtir-1	Amtir-3
Power	0.0095	0.0089	-0.0074	-0.0279	0.0287

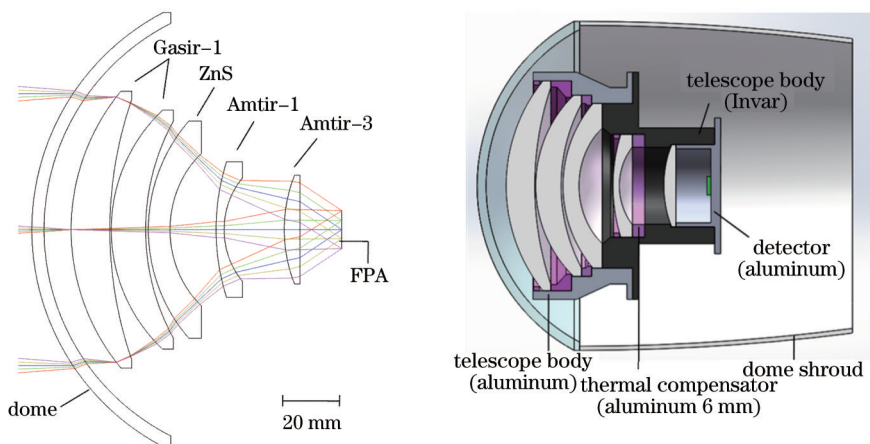


图3 (a)系统光路图;(b)系统结构图

Fig.3 (a) Optical layout of system; (b) system configuration

图4~6分别为系统在20℃、-40℃和50℃下各视场的MTF曲线,从图中可以看出,在各温度下奈奎斯特频率30 lp/mm处,MTF没有明显下降,全视场MTF值均大于0.5,满足成像要求。图7为采用被动机械补偿前后,系统在-40℃~50℃温度范围内各视场30 lp/mm处平均MTF值变化情况。未采用被动机械补偿方法时,虽然-40℃时传递函数值较高,但随着温度升高,传递函数最大下降量约为30%,成像质量不够稳定;当采用被动机械补偿后,各温度MTF值基本保持不变,且普遍高于补偿之前。说明采用被动机械补偿方法后,不仅能够平衡各温度下的热离焦,而且为像差校正提供了更大空间,有利于进一步提升像质。

利用光机仿真软件对该系统进行真实光线追迹模拟,仿真结果如图8所示,其中图8(a)为原始图像,图8(b)为经过该光学系统成像后的图像。从成像结果可以看出,该光学系统对低频信息处理较好,物体轮廓较为清晰,虽然存在一部分系统噪声,但不影响最终物体分辨。



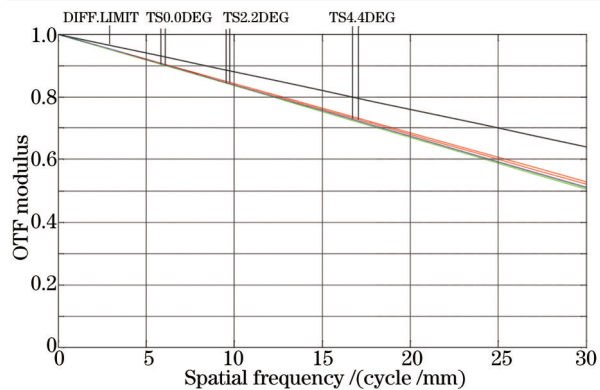


图 4 20 °C 下的 MTF 曲线

Fig.4 MTF curves at 20 °C

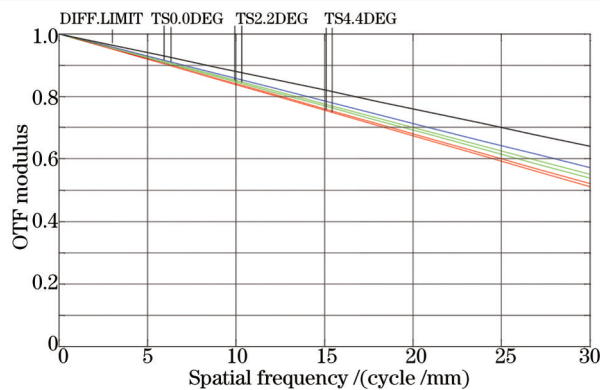


图 5 -40 °C 下的 MTF 曲线

Fig.5 MTF curves at -40 °C

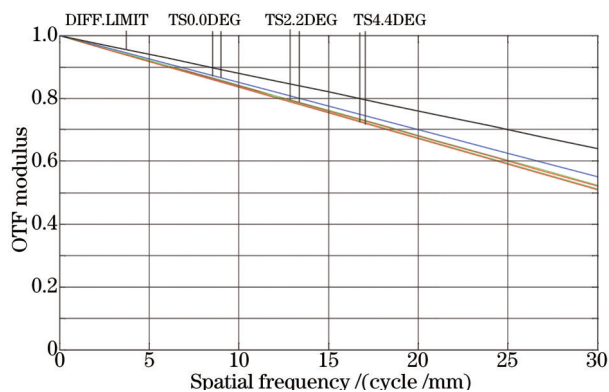


图 6 50 °C 下的 MTF 曲线

Fig.6 MTF curves at 50 °C

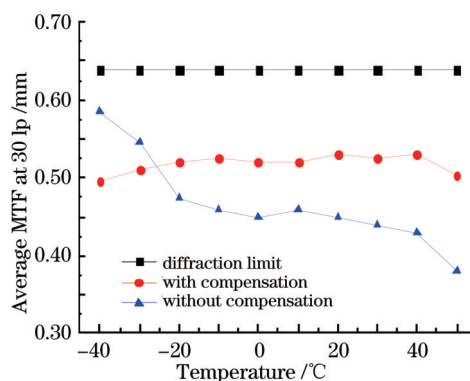


图 7 采用被动机械补偿前后各温度 MTF 变化

Fig.7 Change of MTF values with or without mechanical compensation

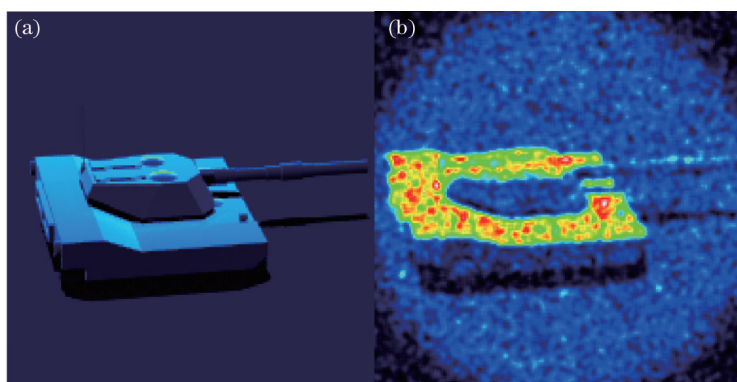


图 8 (a) 原始图像; (b) 仿真图像

Fig.8 (a) Original image; (b) simulated image

## 4 结 论

分析了三分离薄透镜消热差的基本原理,根据消热差条件,结合被动机械补偿方法,设计了采用硫系玻璃材料的长波红外导引成像光学系统。系统相对口径达到 1:0.9,能够满足非制冷红外探测器的成像需求。在 -40 °C~50 °C 工作温度范围内,系统成像质量稳定,实现了红外被动消热差设计。该设计可采用精密模压加工工艺,批量生产,符合低成本的设计要求,对未来军用红外成像导引系统发展具有一定借鉴意义。

## 参 考 文 献

- 1 Geng Yaguang, Zhang Mingqian. Miniaturization technique of dual field optical system in imaging infrared seeker [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(6): 887-890.

- 耿亚光, 张明谦. 红外成像导引头双视场光学系统小型化技术[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(6): 887-890.
- 2 Chen Xiao, Yang Jianfeng, Ma Xiaolong, *et al.*. Athermalization design of wide temperature range for hybrid refractive-diffractive objective in 8~12  $\mu\text{m}$ [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(7): 2089-2092.
- 陈 潇, 杨建峰, 马小龙, 等. 8~12  $\mu\text{m}$  折-衍混合物镜超宽温度消热差设计[J]. 光学学报, 2010, 30(7): 2089-2092.
- 3 Qu Hemeng, Zhang Xin, Zhang Jizhen, *et al.*. Design of compact athermalizing uncooled infrared optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0522003.
- 曲贺盟, 张 新, 张继真, 等. 紧凑型无热化非制冷红外光学系统设计[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0522003.
- 4 Shi Guangwei, Zhang Xin, Zhang Jianping. Unobscured catadioptric infrared optical systems[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(8): 1995-2000.
- 史广维, 张 新, 张建萍. 无遮拦反射红外光学系统[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(8): 1995-2000.
- 5 Qu Hemeng, Zhang Xin, Wang Lingjie, *et al.*. Design of a low  $F$ -number compact athermalizing infrared optical systems [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0322003.
- 曲贺盟, 张 新, 王灵杰, 等. 大相对孔径紧凑型无热化红外光学系统设计[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0322003.
- 6 G Curatu. Design and fabrication of low-cost thermal imaging optics using precision chalcogenide glass molding[C]. SPIE, 2008, 7060: 706008.
- 7 Shi Guangwei, Zhang Xin, Wang Lingjie, *et al.*. Application of the new chalcogenide glass in design of low cost thermal imaging systems[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(4): 615-619.
- 史广维, 张 新, 王灵杰, 等. 新型硫系玻璃在低成本热成像系统设计中的应用[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(4): 615-619.
- 8 Dun Xiong, Jin Weiqi, Wang Xia. Design of large relative aperture compact infrared optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0622002.
- 顿 雄, 金伟其, 王 霞. 大相对孔径超紧凑型红外光学系统设计[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0622002.
- 9 Lu Yajing, Song Baoan, Xu Tiefeng, *et al.*. Design of refractive-diffractive night vision system based on chalcogenide glass[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(12): 122204.
- 芦雅静, 宋宝安, 徐铁峰, 等. 基于硫系玻璃的汽车夜视折衍光学系统[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(12): 122204.
- 10 Wang Pengcheng, Cao Yang. Athermalization design of dual-wavelength infrared optical system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(6): 0622002.
- 王鹏程, 曹 阳. 双波段红外光学系统无热化设计[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(6): 0622002.
- 11 J Huddleston. Comparison of the thermal effects on LWIR optical designs utilizing different infrared optical materials[C]. SPIE, 2014, 9070: 90702E.
- 12 C Bigwood, A Wood. Two-element lenses for military applications[J]. Opt Eng, 2011, 50(12): 121705.
- 13 V M Tyagur, O K Kucherenko, A V Muravev. Passive optical athermalization of an IR three-lens achromat[J]. J Opt Technol, 2014, 81(4): 199-203.
- 14 Zhang Xin, Qiao Yanfeng, Zhu Mingchao, *et al.*. Two-lens athermalized infrared telephoto objective[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0822004.
- 张 鑫, 乔彦峰, 朱明超, 等. 两片式远距结构消热差红外物镜[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0822004.
- 15 G Desroches, K Dalzell, B Robitaille. Technical considerations for designing low-cost, long-wave infrared objectives[C]. SPIE, 2014, 9070: 907026.
- 16 P R Leite. Design of an optical system for a 5<sup>th</sup> generation, multi-spectral, air-to-air missile, considering the imaging performance degradation due to the aerodynamic heating[C]. SPIE, 2009, 7338: 73380I.

栏目编辑: 吴秀娟