

# 紧凑型无热化非制冷红外光学系统设计

曲贺盟 张 新 张继真 王灵杰

(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中国科学院重点实验室, 吉林 长春 130033)

**摘要** 随着非制冷红外探测器技术的快速发展,非制冷红外光学系统得到了广泛应用。为满足机载或弹载非制冷红外光学系统结构尺寸紧凑、相对孔径大、温度适应性强、杂散光抑制能力高的要求,采用折反射式二次成像光学系统结构形式,实现了远射比 0.55,  $F$  数 0.8 的光学系统设计,同时采用光学被动补偿方式,通过适当的光学和结构材料匹配实现了一  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  无热化设计,并配合一次像面处视场光阑保证光学系统具有较高的杂散光抑制能力。给出了完整的光学系统设计,设计结果表明:光学系统在不同温度下各视场调制传递函数接近衍射极限,空间排布紧凑。通过高低温成像实验,验证了该非制冷红外光学系统满足机载或弹载应用的环境要求。

**关键词** 光学设计;红外光学系统;无热化;折反射式光学系统

中图分类号 TN216 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0522003

## Design of Compact Athermalizing Uncooled Infrared Optical System

Qu Hemeng Zhang Xin Zhang Jizhen Wang Lingjie

(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** With rapid growth of uncooled infrared detector technology, uncooled infrared optical systems are widely used. The uncooled infrared optical system must fulfill the requirements of compact size, large relative aperture, high temperature adaptability and stray light suppression ability. A catadioptric optical system with secondary image is adopted to realize the design parameters of 0.55 ratio of total length and focal length and 0.8  $F$  number. In addition, the optical passive compensation method is used to realize an athermalized design in the temperature range of  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  by matching optical and structural materials properly, and the field stop in the first image can ensure the optical system a high stray light suppression ability. The design result shows that optical system's modulation transfer function in each field is close to the diffraction limit at different temperatures and the system size is compact. Finally, it is proved that this uncooled infrared optical system can meet environmental requirements of airborne and missile application through the actual imaging experiment at high and low temperatures.

**Key words** optical design; infrared optical system; athermalization; catadioptric optical system

**OCIS codes** 040.3060; 220.4830; 230.1150

## 1 引 言

红外非制冷探测器以其重量轻、小体积、低功耗、高稳定性的优势,近年来得到了飞速发展。由于非制冷光学系统不再需要冷阑匹配,系统正向着紧凑、小巧方向发展。尤其是应用于机载或弹载环境中的红外成像系统由于结构尺寸受限,工作环境严酷,需要光学系统具备高成像质量、小结构尺寸、轻系统质量和优异的环境适应性。同时由于非制冷探测器基于外光电效应进行探测,其探测效率普遍低

于制冷探测器,辐射响应率相对较低。因此,发展一种结构紧凑、质量轻、相对孔径大、环境适应性强的非制冷红外光学系统十分必要<sup>[1-3]</sup>。

近年来国内所报道的相关非制冷小  $F$  数紧凑型无热化红外光学系统的主要设计思路是采用透射反远距光学系统结构形式,但是由于其本身特点决定了其远射比不会小于 0.8,因而限制了系统结构的小型化,同时透射一次成像系统在杂散辐射的抑制方面能力有限,进一步降低了红外非制冷光学系统的成像质量。

收稿日期: 2013-10-21; 收到修改稿日期: 2013-11-26

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61007009)

作者简介: 曲贺盟(1984—),男,博士,助理研究员,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: quhemeng@126.com

鉴于上述因素,本文针对目前应用于机载和弹载的非制冷红外光学系统轻小型、大相对孔径和高环境适应性的要求,采用折叠光路的折反射式光学系统,设计了工作波段  $8\sim 13\ \mu\text{m}$ , 焦距  $80\ \text{mm}$ ,  $F$  数  $0.8$  的长波红外光学系统,光学系统远射比达到了  $0.55$ 。系统采用二次成像配合视场光阑,有效地提高了光学系统的杂散辐射抑制能力。针对光学系统无热化要求,采用光学被动消热差方式,通过不同材料的匹配使系统实现了  $-40\ ^\circ\text{C}\sim 50\ ^\circ\text{C}$  的无热化设计。设计结果在空间频率  $30\ \text{lp/mm}$  处各视场调制传递函数(MTF)接近衍射极限,并且在  $-40\ ^\circ\text{C}\sim$

$50\ ^\circ\text{C}$  温度范围内成像质量没有明显下降。

## 2 光学系统结构

目前,红外非制冷光学系统的结构形式主要包括折射式和折反射式,同时每种形式又包括一次成像和二次成像方式。几种光学系统的特点如表 1 所示。其中满足机载或弹载结构尺寸紧凑要求的光学系统通常为:反远距结构形式的透射一次成像,以及采用折转光路的折反一次、二次成像结构形式。

表 1 不同光学系统结构形式的特点比较

Table 1 Characteristic comparison of different optical system configuration

Parameter	Primary imaging	Secondary imaging	Catadioptric primary imaging	Catadioptric Secondary imaging
Focal length	Short	Long	Short	Long
Length/focal length	1	$>1$	$<1$	$<1$
Field of view	Large	Large	Narrow	Narrow
Stray light	Much	Little	Much	Little
Self-radiation	Much	Little	Much	Little
Lens	Few	Many	Few	Many
Central obscuration	No	No	Yes	Yes

从表 1 中可以发现,透射式一次成像反远距光学系统结构相对简单,视场和相对孔径更大,装调更为简单,同时没有中心遮拦的影响,常用于可见光和空间尺寸要求相对宽松的红外成像系统中。但是由于透镜组自身红外辐射较大,且系统没有一次像面而无法设置视场光阑,因而其杂散光抑制能力相对较差,影响了光学系统的搜索和跟踪能力。采用折反一次成像结构形式的光学系统,远射比可以达到  $0.6$  左右,但是此时系统中心遮拦较大,影响系统能量接收,同时该结构同样无法设置视场光阑,需要较长的遮光罩配合实现光学系统的杂散光抑制。综上所述,可选择折反二次成像方式以满足机载或弹载红外光学系统的要求<sup>[4-5]</sup>。

传统折反射光学系统的前组反射系统大多采用卡塞格林结构形式,即主镜为抛物面,次镜为双曲面,能够很好地校正轴上点球差,但是无法满足正弦条件,其视场相对较小。为了满足红外搜索和跟踪系统较大的搜索和跟踪视场,前组反射系统采用 R-C 结构形式,即主次镜均采用双曲面。其优势在于系统可以消除彗差影响,视场相对卡塞格林更大,像质也相对更好。一次像面处放置视场光阑,可以有效地降低系统受杂散光的影响。一次像面后的中继透镜组将景物最终成像到像面,同时进一步校正前组轴外像差。前组主次镜分担了系统  $2/3$  光焦度的,

这有利于系统的无热化设计。整个系统尺寸较短,整体远射比达到了  $0.55$ ,系统  $F$  数达到了  $0.8$ 。

## 3 光学系统设计

### 3.1 光学系统设计参数

光学系统采用非制冷  $320\times 240$  面阵探测器,像元尺寸为  $17\ \mu\text{m}$ ,光学系统参数如表 2 所示。

表 2 光学系统参数

Table 2 Parameters of optical system

Parameter	Value
Wavelength / $\mu\text{m}$	$8\sim 13$
Focal length / mm	80
$F\#$	$0.8$
Operating temperature / $^\circ\text{C}$	$-40\sim 50$
Spurious reflection	No spurious reflection
Total length / mm	$<50$
Center obstruction	$<30\%$

### 3.2 光学系统初始结构建立

分析系统设计指标发现如何满足光学系统总长度、中心遮拦及  $F$  数成为方案的设计难点。上文分析中确定了系统前组采用 R-C 反射式结构形式,主反射镜采用双曲面,以进一步校正像差。设计时为减小主次间距和次镜中心遮拦而尽可能地加大主镜光焦度,并加入  $4, 6, 8$  次高次非球面,同时保证主、次镜一次像面处像质优良,并与后组透镜同步优化,以达到最优成像质量。

R-C 系统结构形式如图 1 所示,其初始结构的确定,主要根据前组焦距  $f'$ 、主镜焦距  $f'_1$ 、次镜倍率  $\beta$ 、中心遮拦比  $\alpha$ 、主镜距焦点距离  $\Delta$  来确定主、次反射镜的曲率半径  $R_1$ 、 $R_2$ ,主、次反射镜偏心率  $e_1$ 、 $e_2$ ,以及主、次间距  $d$ 。主镜焦距  $f'_1$  与  $\beta$  的乘积为前组反射系统焦距  $f'$ ,  $e_1^2$  为主镜二次曲面系数,  $e_2^2$  为次镜二次曲面系数,  $S_{\text{I}}$  为赛德尔球差系数,  $S_{\text{II}}$  为赛德尔彗差系数<sup>[6-8]</sup>。

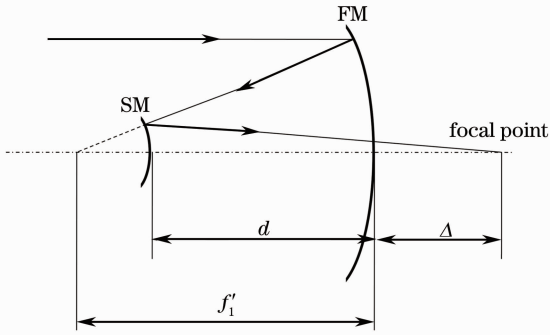


图 1 R-C 光学系统结构

Fig.1 R-C optical system configuration

根据高斯光学公式可以计算得到次镜放大倍率  $\beta$  与中心遮拦比  $\alpha$  的关系为

$$\alpha = |f' + \Delta \cdot \beta| / \beta(\beta - 1). \quad (1)$$

通过系统指标可以计算出光学系统  $\alpha$  和  $\beta$ , 并得到光学系统主镜曲率半径  $R_1$  和次镜曲率半径  $R_2$  及主、次镜间距  $d$  与其关系为

$$R_1 = 2f' / \beta, \quad (2)$$

$$R_2 = \alpha\beta R_1 / (\beta + 1), \quad (3)$$

$$d = f'(1 - \alpha) / \beta. \quad (4)$$

由于 R-C 系统需要消球差与彗差, 即  $S_{\text{I}} = S_{\text{II}} = 0$ , 可得到主、次反射镜偏心率  $e_1$ 、 $e_2$  与次镜放大倍率  $\beta$  和中心遮拦比  $\alpha$  的关系为

$$e_1 = 1 + \frac{2\alpha}{(1 - \alpha)\beta^2}, \quad (5)$$

$$e_2 = \frac{\frac{2\beta}{1 - \alpha} + (1 + \beta)(1 - \beta)^2}{(1 + \beta)^3}. \quad (6)$$

表 3 长波红外透镜材料光学特性及热特性

Table 3 Optical and thermal properties of material of long-wave infrared lens

Material	$N / (10 \mu\text{m})$	$\alpha_g \times 10^{-6} / (\text{m} \cdot \text{cm}^{-1} / \text{C})$	$\partial n / \partial t \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$	$V (8-12 \mu)$
Ge	4.0032	5.5~6.1	280-396	834.3
ZnS	2.1986	6.6	43.3	22.9
ZnSe	2.40652	8.54	100	58
GaAs	3.04	5.7	149	16.3
AMTIR-1	2.1976	12.8	72	115.2
Irtran2	2.1986	6.9~7.4	51	22.9
Irtran4	2.40652	7.4~8.0	48~58	58
CdTe	2.67513	4.5~5.9	107	150.6

通过上述公式推导得到中心遮拦比  $\alpha$  后, 其余参数均能计算得到, 系统要求中心遮拦小于 30%, 由此确定前组系统参数。设计指标严格规定了光学系统总长, 方案中将一次像面放置在主镜之前, 即  $\Delta < 0$ 。系统前组焦距不能太长, 这是由于相对孔径较大, 对于后组设计压力较大, 因此在设计时应尽量增大次镜的负光焦度以增长系统前组焦距, 进而满足前组焦距为系统焦距的 2/3。由于系统主、次反射镜光焦度均较大, 本身的像差较严重, 因而必须采用高次非球面进行校正。此类高次非球面的加工技术已成熟, 完全能够满足设计公差要求。后组采用四片式成像系统, 跟前组系统同步优化, 以满足系统指标要求。

### 3.3 光学系统无热化设计

总体指标中规定光学系统工作温度范围为  $-40 \text{C} \sim 50 \text{C}$ , 红外系统由于受温度影响而相对可见光更敏感, 例如单晶锗材料  $\partial n / \partial t$  达到  $396 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$ , 而 K9 材料  $\partial n / \partial t$  仅为  $2.8 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$ , 两者相差两个数量级。由于温度变化导致材料折射率、厚度、面形与空气间隔同时发生变化, 将对系统焦距产生影响, 在无调焦的光学系统中将严重影响光学系统的成像质量。因此在设计过程中必须进行无热化设计<sup>[9-11]</sup>。

目前普遍采用的红外无热化技术主要有三种方式: 电子主动补偿、机械被动补偿和光学被动补偿。考虑系统应用于机载或弹载环境, 要求光学系统体积小、重量轻、可靠性高。光学被动补偿在可靠性和体积重量上均满足光学系统使用环境要求, 因此选择光学被动无热化补偿方式<sup>[12-14]</sup>。

光学被动补偿方式是通过光学材料  $\partial n / \partial t$  的相互匹配, 配合光学元件和机械元件的热胀系数, 以达到各影响因素相互补偿, 使光学系统在温度变化时保证成像质量。目前应用于红外长波的光学材料其光学特性与热特性如表 3 所示。其中  $\alpha_g$  为膨胀系数,  $\partial n / \partial t$  为折射率温度变化系数,  $V$  为色散系数。

光学系统前组主反射镜采用铝合金作为反射镜基底材料,厚度上重点考虑加工、比热容及热胀最优的反射镜厚度。当温度升高时,主镜的曲率半径增加,光焦度减小,一次像面向后组移动,对于后组透镜来说相当于物距减小,根据牛顿公式可知系统像面将向后移动,相当于系统焦距变长,而对于后组透射系统,当温度升高时,红外材料折射率变大,即后组焦距变短。因此可以利用该特性,使系统实现无热化设计<sup>[15]</sup>。

设定主反射镜的曲率半径为  $r$ ,材料热胀系数为  $\alpha_1$ ,镜筒材料热胀系数为  $\alpha_2$ ,主、次镜间距为  $d$ ,后组透射系统焦距为  $f'_2$ ,与前组成像像面相对的后组物距为  $L_1$ ,后组像距为  $L_2$ 。当系统工作温度变化时,前组像面位置变化量为

$$\Delta L_1 = \left( \frac{r\alpha_1}{2} - d\alpha_2 \right) \Delta t. \quad (7)$$

计算中次镜采用低热胀系数的材料,忽略其热效应。后组透射系统受温度影响焦距变化为  $\Delta f'_2$ ,根据牛顿公式得到其温度变化后的像距为

$$L'_2 = \frac{(f'_2 + \Delta f'_2)(L_1 + \Delta L_1)}{L_1 + \Delta L_1 - f'_2 - \Delta f'_2}. \quad (8)$$

为保证光学系统在工作温度范围内无热差,必须保证  $L_2 = L'_2$ ,得到

$$\Delta f'_2 = \frac{f'_2 \Delta L_1}{L_1 + L_1 \Delta L_1 - f'_2 \Delta L_1}, \quad (9)$$

将(7)式代入(9)式得到

$$\Delta f'_2 = \frac{f'^2_2 (r\alpha_1 - 2d\alpha_2) \Delta t}{L^2_1 + (L_1 - f'_2)(r\alpha_1 - 2d\alpha_2) \Delta t}, \quad (10)$$

透镜光焦度表达式为

$$\phi = (n-1)(1/r_1 - 1/r_2), \quad (11)$$

当温度变化时  $dt$  所引起的透镜光焦度变化为

$$\frac{d\phi}{dt} = \phi \left( \frac{dn/dt}{n-1} - \alpha_1 \right), \quad (12)$$

式中  $\frac{dn/dt}{n-1} - \alpha_1$  为透镜消热差系数,将其进行归一化,设为系数  $\mathcal{S}$ ,并代入(12)式中得到

$$\frac{d\phi}{dt} = \mathcal{S}\phi, \quad (13)$$

根据近轴像差公式推导得到由透镜引起的位置热差为

$$n'_k u'^2_k \frac{dL'_k}{dt} = - \sum_{i=1}^k h_i^2 \mathcal{S}_i \phi_i - \sum_{i=1}^{k-1} n'_i u'^2_i dd_i, \quad (14)$$

由透镜引起的倍率热差为

$$n'_k u'_k dy'_k = - \sum_{i=1}^k h_i h_z \mathcal{S}_i \phi_i dt - \sum_{i=1}^{k-1} n'_i u'_i dd_i. \quad (15)$$

在无热化设计中必须消除倍率热差和位置热差,针对无限远成像即系统满足  $n_1 u_1 dy_1 = 0$ ,通过分析发现,当系统后组透镜组采用适当的材料匹配,同时配合殷钢镜筒材料时可以满足系统消热差要求。

同时系统需要考虑温度引起的离焦量,通过公式推导得到在温度变化  $dt$  时的离焦量为

$$d\xi = -f' \left( f' \sum_{i=1}^k \mathcal{S}_i \phi_i + \alpha_2 \right) dt. \quad (16)$$

通过上述计算可以得到满足光学系统无热化要求的系统近轴关系,通过镜筒材料与透射元件的材料匹配得到满足系统无热化要求的光学系统初始结构。

根据上述设计思想进行光学系统无热化设计,首先主镜选择热胀系数较高的铝合金材料,其次次镜选择热胀系数较低的低热材料,而透镜选择 Ge、Ge、ZnSe、Ge 四片式,镜筒材料选择低热胀系数的殷钢材料,最终使光学系统满足无热化要求<sup>[16-18]</sup>。

## 4 设计结果

由于总体对光学系统尺寸严格限制,因此主镜的相对孔径选取 0.5,并采用高次非球面校正像差。系统有效焦距为 80 mm,  $F$  数为 0.8,系统总长小于 44 mm,后组采用 Ge、Ge、ZnSe、Ge 四片式。为了更好地消除系统球差、彗差和像散等像差,以提高系统像质,前两片 Ge 材料加入非球面设计,使用光学设计软件对光学系统进行反复优化,得到最优的设计结果如图 2 所示。

系统选择探测器为  $17 \mu\text{m} \times 17 \mu\text{m}$ ,特征频率为 30 lp/mm。系统在  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $50 \text{ }^\circ\text{C}$  的调制传

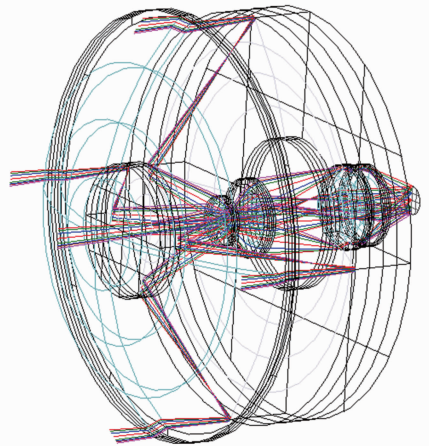


图 2 光学系统结构图

Fig. 2 Configuration of optical system

递函数(MTF)分别如图3、图4、图5所示。可以看出不同温度下的光学系统调制传递函数各视场均接近衍射极限。图6显示了系统像散和畸变量,可以看出系统畸变得到了很好的校正,视场系统畸变为0.201%。

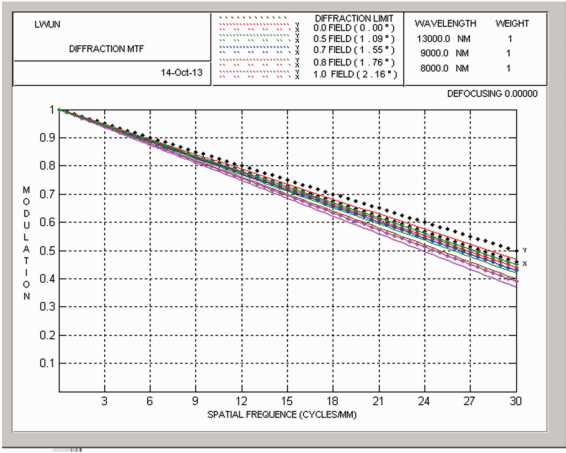


图3 -40 °C 光学系统调制函数曲线

Fig.3 MTF curves of optical system at -40 °C

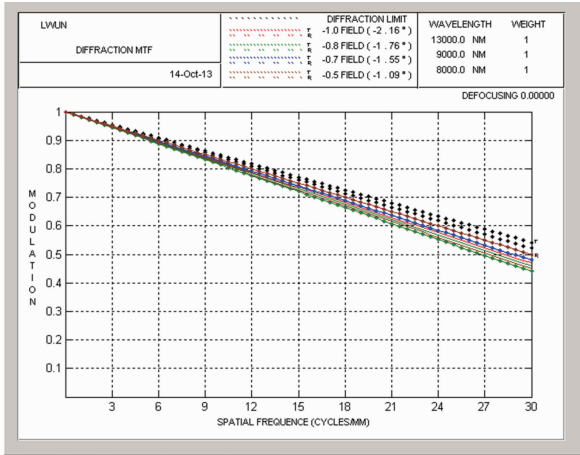


图4 20 °C 光学系统调制函数曲线

Fig.4 MTF curves of optical system at 20 °C

总结了系统在不同温度下的焦距和离焦位置,如表4所示。系统景深为±0.0128 mm,可以看出不同温度下系统离焦量均在景深范围内。

表4 光学系统不同温度下焦距和离焦量

Table 4 Optical system's focal length and defocus at different temperatures

	-40 °C	20 °C	50 °C
Focal length /mm	80.03	80	99.98
Defocus /mm	0.008	0	-0.006

## 5 杂散辐射分析

采用光学仿真分析软件对系统杂散辐射进行分

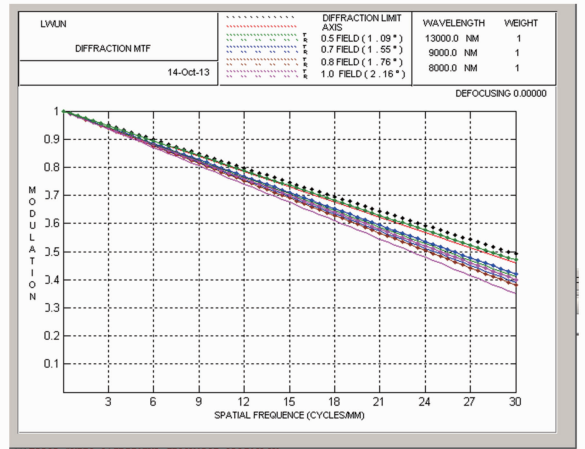


图5 50 °C 光学系统调制函数曲线

Fig.5 MTF curves of optical system at 50 °C

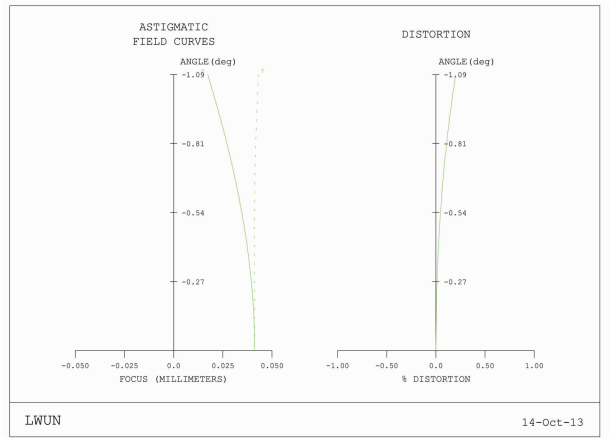


图6 光学系统像散畸变曲线

Fig.6 Optical system astigmatism and distortion curves

析,如图7所示。由分析可以发现在没有机械结构件对系统杂散辐射进行抑制的情况下,系统存在不经过主、次镜而直接经过透镜到达像面的一次杂散光,严重影响系统性能。针对系统杂散辐射情况在一次像面处设置视场光阑,能够有效地抑制系统杂散辐射。

## 6 实验结果

非制冷长波红外镜头按照公差要求进行装调,确认实际成像,并进行高低温工作实验,检验光学系统无热化效果。将光学系统置于具有红外锗窗口的高低温箱内,同时在窗口外部架设红外黑体平行光管,采用适当的空间分辨率靶标,黑体温差调致0.2 K。系统在-40 °C、20 °C、50 °C的成像如图8所示。

从成像质量上可以看出光学系统在-40 °C~50 °C温度范围内实际成像质量并无明显变化,达到光学系统设计的调制传递函数要求,表明光学系统满足无热化设计要求。

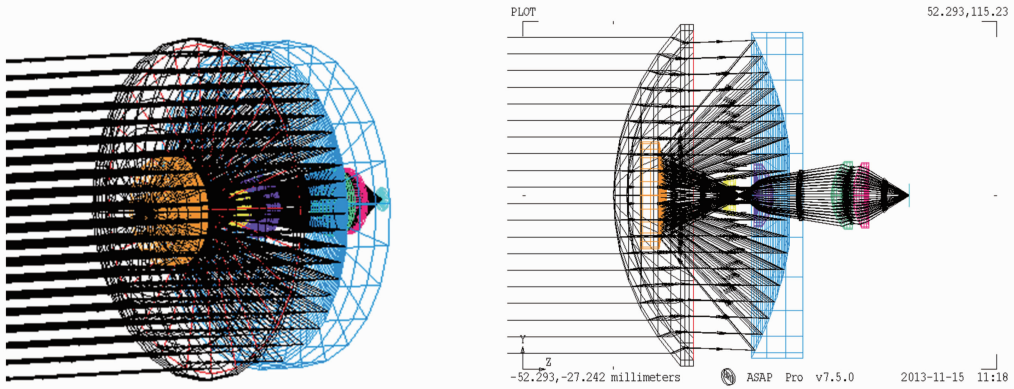


图 7 系统杂散辐射分析

Fig. 7 Analysis of system stray radiation

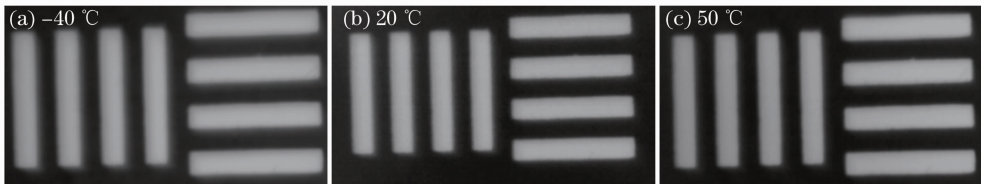


图 8 光学系统不同温度实际成像质量

Fig. 8 Imaging quality of optical system at different temperatures

## 7 结 论

采用折反射二次成像光学系统结构形式设计了一种紧凑型无热化非制冷红外光学系统,远射比为 0.55,  $F$  数为 0.8, 并采用光学被动补偿方式, 在不增大系统体量的前提下, 实现了  $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  温度范围内的光学系统无热化设计, 并在一次像面处设置视场光阑有效地抑制了系统杂散辐射。给出的光学系统设计结果表明, 非制冷红外光学系统成像质量优异, 各指标满足机载或弹载环境使用要求。

### 参 考 文 献

- Liu Wu, Ye Zhenghua. Status and trends of foreign infrared photodetectors [J]. *Laser and Infrared*, 2011, 41(4): 365–370.
- 刘 武, 叶振华. 国外红外光电探测器发展动态[J]. *激光与红外*, 2011, 41(4): 365–370.
- Cai Yi, Hu Xu. State of the art and future trend of detectors for infrared imaging seekers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(1): 7–11.
- 蔡 毅, 胡 旭. 红外成像寻的用红外探测器现状和发展趋势[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(1): 7–11.
- Du Chunlei, Lin Xiangdi, Zhou Lishu, *et al.*. Method for improving performance of infrared detector by micro-optical lens array [J]. *Acta Opt Sinica*, 2010, 21(2): 246–249.
- 杜春雷, 林祥棣, 周礼书, 等. 微透镜阵列提高红外探测器探测能力的方法研究[J]. *光学学报*, 2010, 21(2): 246–249.
- Guan Yingzi, Kang Lixin. LWIR uncooled optical system design [J]. *Infrared Technology*, 2008, 30(2): 79–82.
- 关英姿, 康立新. 长波红外非制冷光学系统设计[J]. *红外技术*, 2008, 30(2): 79–82.

- Kang Yusi, Liu Weiqi, Feng Rui. A refract-reflect telescope with cooke as compensated lens [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15 (3): 303–307.
- 康玉思, 刘伟奇, 冯 睿. Cook 结构补偿镜的球面折反型望远镜系统[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(3): 303–307.
- R Blakley. Cesarian telescope optical system [J]. *Opt Eng*, 1996, 35(1): 3338–3341.
- Cai Zhen'en, Liu Zhaohui, Huang Jing, *et al.*. Dual band night vision R-C system with wide field of view and large relative aperture [J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(4): 525–528.
- 蔡占恩, 刘朝晖, 黄 静, 等. 大视场大相对孔径双波段夜视 R-C 系统设计[J]. *应用光学*, 2010, 31(4): 525–528.
- Pan Junhua. The Design Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces [M]. Suzhou: Suzhou University Press, 2004.
- 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检测[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004.
- Richard Simmons. Athermalization of a fast infrared telescope objective [C]. *SPIE*, 2007, 2539: 137–149.
- William A Goodman. Athermal glass by design [C]. *SPIE*, 2007, 6666: 666604.
- Yasuhisa Tamagawa, Toru Tajime. Dual-band optical systems with a projective athermal chart: design [J]. *Appl Opt*, 1997, 36 (1): 297–301.
- Tadeusz Krzyszczynski, Marcin Les'niewski. Material problem in athermalization of optical systems [J]. *Opt Eng*, 1997, 36(6): 1596–1601.
- Pilkington. Athermalization techniques in infrared systems [C]. *SPIE*, 1986, 0655: 142–153.
- Juan L Rayces, Lan Lebach. Thermal compensation of infrared achromatic objectives with three optical materials [C]. *SPIE*, 1990, 1354: 752–759.
- Guo Yonghong, Shen Mangzuo, Lu Zukang. Athermal design for infrared diffractive/refractive optical system [J]. *Acta Optic*

- Sinica, 2000, 20(10): 1392—1395.
- 郭永洪, 沈忙作, 陆祖康. 折射/衍射红外光学系统的消热差设计[J]. 光学学报, 2000, 20(10): 1392—1395.
- 16 Xue Hui. Optical design of infrared search and trace system [J]. Acta Optic 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.
- 17 Tong Jingbo, Cui Qingfeng, Xue Changxi, *et al.*. Optical design of a off-axis dual-channel helmet mounted display [J]. Acta Optic Sinica, 2010, 30(9): 2662—2667.
- 佟静波, 崔庆丰, 薛常喜, 等. 离轴双通道头盔显示器光学系统设计[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2662—2667.
- 18 Qu Hemeng, Zhang Xin, Wang Lingjie, *et al.*. Design of a low  $F$ -number compact athermalizing infrared optical system [J]. Acta Optic 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.

栏目编辑：韩 峰