

# 高分辨率制冷型中波广角红外成像系统的光学设计

杨胜杰

(中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471009)

**摘要** 设计了一个  $F$  数为 2, 工作波段为  $3.7\sim 4.8\ \mu\text{m}$ , 全视场  $2\omega=111.2^\circ$  的高分辨率制冷型中波广角红外成像光学系统。该系统采用二次成像构型, 通过 Si、Ge、ZnSe 三种材料六片式对称布局, 利用折/衍混合器件及非球面, 实现了光学被动消热差设计, 使系统在  $-55\ \text{C}$  至  $+80\ \text{C}$  的宽温范围内, 在空间频率为 33 lp/mm 处的光学传递函数 (MTF) 均大于 0.4, 系统在  $15\ \mu\text{m}$  的像素尺寸内, 能量集中度大于 70%; 采用  $f-\theta$  设计, 使成像系统对不同视场具有相同的角分辨率; 通过引入光阑像差和控制像方视场角, 使像面具有较好的均匀性, 边缘视场最低相对照度为中心视场的 90.9%, 且具有近 100% 的冷光阑效率, 同时, 系统具有较好的冷反射抑制效果, 该光学系统适用于像素为  $15\ \mu\text{m}$ , 分辨率为  $640\ \text{pixel}\times 512\ \text{pixel}$  的中波制冷探测器。

**关键词** 光学设计; 广角红外镜头; 消热差; 折/衍混合系统; 冷反射

中图分类号 TN216 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0822003

## Optical Design for High Resolution Cooled Mid-Wavelength Infrared Wide-Angle Imaging System

Yang Shengjie

(Luoyang Research Institute of Electro-Optical Equipment, Aviation Industry Corporation of China, Luoyang, He'nan 471009, China)

**Abstract** An optical system of mid-wavelength infrared for high resolution cooled wide-angle imaging system is designed. The  $F$ -number of the system is 2 and full field of view (FOV)  $2\omega=111.2^\circ$ . The system chooses a double imaging configuration. By introducing a diffractive optical element, setting aspheric surfaces and symmetrically distributing three types of material Si, Ge and ZnSe with 6 elements, the system is athermalized across a wide temperature range from  $-55\ \text{C}$  to  $+80\ \text{C}$  and the optical aberration is well balanced. In the athermalized temperature range, the modulation-transfer function (MTF) is higher than 0.4 at 33 lp/mm, and the diffractive radial energy is more than 70% in a circle of  $15\ \mu\text{m}$ . Based on the principle of  $f-\theta$  lens, the wide-angle system gets the same angular resolution for different fields. By intently introducing stop aberration and specifically controlling the FOV in imaging space, the focal plane gets a very good illumination uniformity, the relative illumination of off-axis field is more 90.9% and the efficiency of the cold stop is almost 100%. Moreover, the narcissus of the system is controlled very well. This system is suitable for high resolution cold  $640\ \text{pixel}\times 512\ \text{pixel}$  detector with pixel size of  $15\ \mu\text{m}$ .

**Key words** optical design; wide-angle infrared lens; athermalization; hybrid refractive/diffractive system; narcissus

**OCIS codes** 220.3620; 050.1970; 040.3060

### 1 引言

随着红外探测器的飞速发展, 红外成像探测技术在航空、航天和地面监控等领域的应用越来越广泛。文献[1]综述了信息时代对“全向”态势感知和

“实时”信息获取的需求及进展, 报道了其长波非制冷焦平面阵列的鱼眼系统成像效果和中波制冷型鱼眼系统, 对凝视型广角红外成像系统及鱼眼红外成像系统的设计提出了迫切需求及设计思路, 文献[2]

收稿日期: 2012-02-14; 收到修改稿日期: 2012-03-23

作者简介: 杨胜杰(1980—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事光学系统设计和应用光学等方面的研究。

E-mail: eoei@vip.163.com

设计了满足航天器自主导航用的非制冷型广角红外地平仪镜头,文献[3]对非制冷探测器的红外鱼眼成像系统进行了非均匀校正研究。但相对而言,非制冷红外探测器的性能与制冷型红外探测器性能还有一定差距,为了获得更高综合性能的广角红外成像系统,需要设计制冷型的红外广角成像光学系统。

现代光学仪器,特别是航空、航天工程中所用的光学仪器,为满足工程应用,通常都要求能够适应很宽的温度范围,即光学仪器在较大的温度范围内,都应具有较好的成像性能。由于温度变化时,光学系统中结构、光学元件的曲率、厚度和折射率都会发生变化,特别是对于红外系统,其材料的光学特性(如 $dn/dT$ -折射率温度变化率)随温度变化更大,是可见光玻璃材料(如K9玻璃)的几十甚至上百倍,当温度变化时,这些参数变化会引起像面漂移及像质恶化,使光学系统成像性能大大降低。因此,光学仪器特别是红外成像光学系统都要进行消热差设计。

不仅如此,对于制冷型的中波广角红外成像系统,其像面照度均匀性、冷反射控制和外形尺寸限制等诸多约束,为完全满足系统性能要求的光学设计带来了很大的难度。

本文采用二次成像结构,综合应用材料匹配及非球面和衍射元件,设计了一个全视场 $2\omega=111.2^\circ$ 的高分辨率制冷型中波广角红外成像光学系统,使系统在 $-55^\circ\text{C}$ 至 $+80^\circ\text{C}$ 的宽温范围内,33 lp/mm处的光学传递函数(MTF)大于0.4,像面具有较好的均匀性,边缘视场最低相对照度为90.9%,同时,对系统最有可能的光学表面进行冷反射分析,冷反射成像均在焦平面形成一定散焦,系统具有较好的冷反射抑制效果。

## 2 系统设计思路

### 2.1 设计要求

红外成像系统对光学设计的基本要求有:

- 1) 中波制冷探测器: $F/2$ ,像素为 $15\ \mu\text{m}$ ,分辨率为 $640\ \text{pixel}\times 512\ \text{pixel}$ ;
- 2) 工作波段: $3.7\sim 4.8\ \mu\text{m}$ ;
- 3) 视场(FOV): $2\omega=111.2^\circ$ ;
- 4) 温度适应范围: $-55^\circ\text{C}\sim +80^\circ\text{C}$ 。

### 2.2 构型设计

对制冷型红外系统,其探测器的冷光阑为光学系统的光阑,设计时要保证光学系统出瞳与探测器冷光阑相匹配,同时,对于广角大视场成像系统,其有效焦距通常较短,为保证设计系统具有足够的工

作距离,构型设计采用二次成像构型。光学系统第一组负担主要的光焦度,后组主要负担二次成像,并完成残余像差平衡。

### 2.3 消热差设计

在常用的几种消热差方式中,由于光学被动消热差设计结构相对简单、无运动部件和可靠性高而一直备受关注。光学被动式无热化设计是通过选择光学材料并合理地分配光焦度,使光学系统产生的像面离焦与仪器壳体热胀冷缩产生的像面离焦相抵消,从而保证光学系统成像位置的稳定。文献[4]从红外材料的热特性出发,利用对材料的色差及热差特性组合,求解消热差和消色差方程来进行消热差设计;衍射元件由于其特殊的色散及温度特性,也常被用来进行消热差及消色差设计。折射元件和衍射元件的光热膨胀系数可表示为

$$x_{t,r} = \alpha_g - \frac{1}{n-1} \left( \frac{dn}{dT} - \frac{1}{n_0} \frac{dn_0}{dT} \right), \quad (1)$$

$$x_{t,d} = 2\alpha_g + \frac{1}{n_0} \frac{dn_0}{dT}, \quad (2)$$

式中 $x_{t,r}$ 为折射元件的光热膨胀系数; $x_{t,d}$ 为衍射元件的光热膨胀系数; $n$ 为透镜材料的折射率; $dn/dT$ 为透镜材料折射率温度变化系数变化; $\alpha_g$ 为透镜材料的热膨胀系数; $n_0$ 为系统所在介质空间的折射率; $dn_0/dT$ 是系统所在空间介质的折射率温度变化系数。

从(1)式和(2)式可以看出,折射透镜的光热膨胀系数由光学材料的热膨胀系数和折射率随温度的变化率共同决定,而衍射透镜焦距的变化仅仅是 $\alpha_g$ 的函数,不随元件基底材料热致折射率变化而变化。正是衍射元件的这种特性,使得其在消热差设计中非常有效。文献[5~9]利用折/衍混合设计了长波或中波消热差系统,文献[10]则用衍射元件进行了消色差变焦系统设计,文献[11]利用折/衍混合同时实现了复消色差和消热差设计,文献[12]则利用折/衍混合实现了大相对孔径消热差光学系统设计。随着光学面型加工精度的提高<sup>[13]</sup>,非球面上附加衍射面的加工也已经能够实现,为消热差设计提供了更多的自由度。

实验中的系统设计中也采用折/衍混合消热差,结构材料选用常用的铝材料。同时,考虑到系统中其他约束,系统中还要采用非球面。

### 2.4 像面照度均匀设计

对于光学系统而言,其像面上边缘视场与中心视场照度关系为

$$E' = E'_0 K_a \cos^4 \omega', \quad (3)$$

式中  $E'$  为边缘视场像面照度,  $E'_0$  为中心视场像面照度,  $K_a$  为边缘视场渐晕系数,  $\omega'$  为像方半视场角。在实际应用中, 当像方半视场  $\omega' = 45^\circ$  时, 在不考虑  $K_a$  的情况下, 边缘视场像面照度仅为中心视场的 25%, 随着像方视场角的进一步增加, 边缘视场像面照度会急剧下降。这种像面照度的不一致性会大大影响系统的成像性能。

从(3)式中可以看出, 可以通过两种方式改善像面照度均匀性: 1) 设计中尽量约束减小  $\omega'$ , 当  $\omega' = 0^\circ$  时, 在不考虑  $K_a$  的情况下, 边缘视场与中心视场获得一致的像面照度, 这就是经典的像方远心系统。文献[2]采用此种构型, 获得了不均匀性低于 1% 的像面照度。但这种设计对非制冷红外系统较为适用, 对制冷型的红外系统, 会由于系统光阑无法充满光线而引入杂散光, 影响系统的信噪比。2) 改善像面照度的方法就是通过光瞳像差, 充分利用像差渐晕, 扩大边缘视场成像光束宽度, 体现在光学系统设计中, 即是边缘视场引入负渐晕, 从而使对边缘视场,  $|K_a| > 1$ , 减少像面照度的不均匀性。

实验中的系统设计, 同时采用两种方案, 采用  $f-\theta$  设计, 引入较大的桶形畸变, 减小像方半视场角; 同时, 保证光学系统的冷光阑匹配, 为边缘视场引入负渐晕, 扩大边缘视场实际参与成像光束宽度, 保证系统像面照度的一致性。

### 2.5 冷反射抑制设计

冷反射是制冷型探测器红外成像系统特有的属性, 其抑制设计的好坏直接关系系统设计成败, 特别是对于扫描制冷红外成像系统<sup>[14,15]</sup>。对于凝视型面阵探测而言, 虽然冷反射可以通过非均匀校正来进行一定的补偿, 但还是一个不可忽视的问题。

制冷系统由于有冷源(中波探测器工作温度

90~110 K), 光学元件表面反射率高(可见光波段增透膜可以达到 99.99%, 而红外元件表面增透达到 99% 即比较困难)。当冷源的反射像分布在焦平面上时, 就会在焦平面上形成冷像, 形成局部的点或圈, 降低系统成像性能。当光学系统工作在常温环境中时, 其冷反射经验公式为

$$\Delta T_{\text{Nar}} = (\Delta T_{\text{scene-detector}} R) / (H_{\text{Nar}} / H_{\text{image}})^2, \quad (4)$$

式中  $\Delta T_{\text{Nar}}$  为冷反射导致的图像温差,  $\Delta T_{\text{scene-detector}}$  为目标与探测器之间的温差,  $R$  为一次反射表面的反射率,  $H_{\text{Nar}}$  为冷反射在像面上的成像大小,  $H_{\text{image}}$  为正常像面尺寸。

从(4)式中可以看出, 假设探测器的温度为 100 K, 环境温度为 300 K, 表面反射率为 1%, 当冷反射回来像点与像面尺寸相等时, 引入的冷反射温差  $\Delta T_{\text{Nar}} = 2$  K; 当是像面尺寸一半时,  $\Delta T_{\text{Nar}} = 8$  K, 将对探测器正常成像产生不容忽视的影响, 降低系统成像性能。

冷反射抑制设计主要是靠控制系统中相应面的  $V_{\text{YNI}}$  值(近轴边缘光线在该面的入射高度  $y$ 、折射率  $n$  和入射角  $i$  之积), 该值的绝对值越大, 产生冷反射的可能性越小。对于设计系统中  $V_{\text{YNI}}$  分析, 当其绝对值小于 1 时, 对该面进行逆向光线追迹, 看经过该面反射的一次像是否聚焦在焦平面附近, 从而确定是否需要继续优化冷反射。

### 3 光学系统设计结果

根据上述设计思路, 经过多轮优化设计得到如图 1 所示的光学系统。该系统前组焦距与系统焦距基本相等, 后组按约 1:1 比例进行二次成像。材料选用 Si、Ge、ZnSe 三种, 在系统中按 Si、Ge、ZnSe、ZnSe、Ge、Si 对称分布。光学系统光焦度前后两组为“+、+”结构, 六片元件光焦度按“+、+、+、+、-、+”分布。

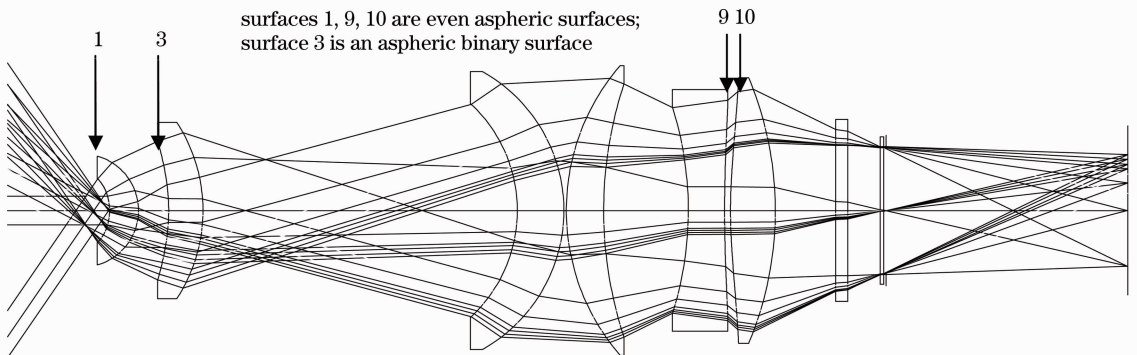


图 1 光学系统布局图

Fig. 1 Layout of optical system

系统最大口径为  $\Phi 22$  mm, 总长为 86 mm, 后截距为 30 mm。其中第 1 面、第 10 面、第 11 面均为偶

次非球面; 第 3 面为带衍射面的非球面, 其非球面叠加的衍射相位及非球面面型结构如图 2 所示。

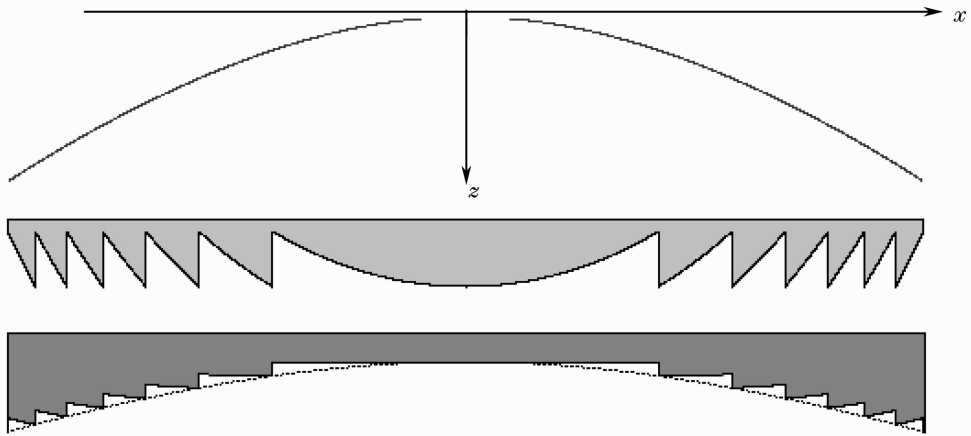


图 2 面 3 叠加相位及带衍射面的非球面面型

Fig. 2 Diffractive phase superimposed on and aspheric profile of surface 3 with diffraction surface

#### 4 性能分析

图 3 分别为 20  $^{\circ}\text{C}$ 、-55  $^{\circ}\text{C}$ 、+80  $^{\circ}\text{C}$  时光学系统的

光学传递函数。从图 3 中可以看出, 在 33 lp/mm 时, 各温度范围下, 各视场的光学传递函数都在 0.4 以上。

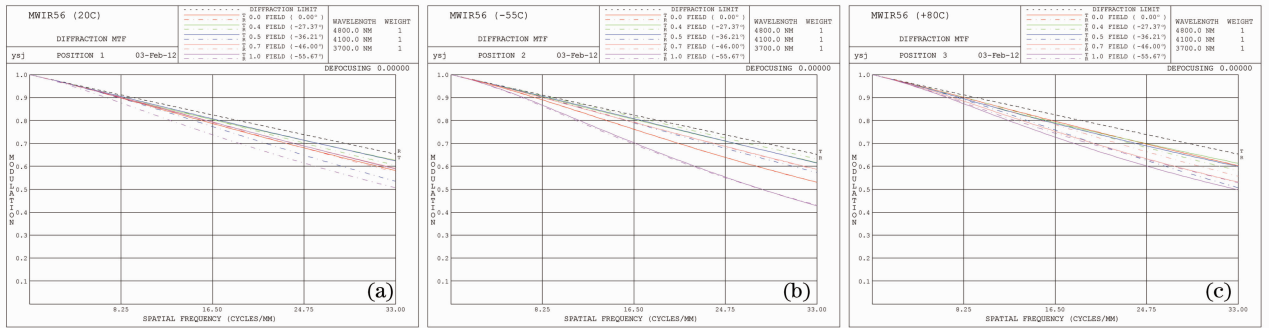


图 3 不同温度下光学系统的光学传递函数

Fig. 3 MTFs of the optical system at different temperatures

图 4 是光学系统特征频率下轴上点和轴外点光学传递函数随温度变化曲线, 从图 4 中可以看出, 轴上点光学传递函数在整个消热差范围内, 均在 0.5 以上, 轴外点子午和弧矢两个方向光学传递函数, 均高于 0.4, 且整个温度变化范围内, 相差幅度不超过 0.1, 光学系统消热差设计取得很好的效果。图 5 是光学系统在不同温度条件下的能量环直径, 可以看出, 在整个温度范围内, 均有 70% 的能量在像素尺寸内。

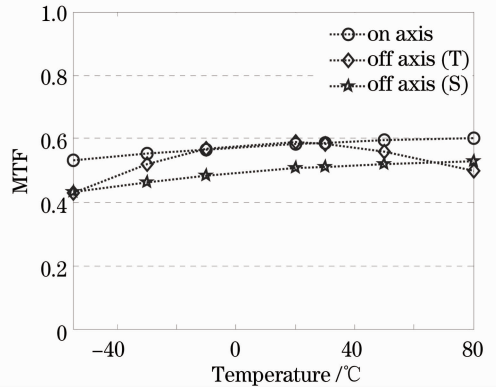


图 4 33 lp/mm 光学传递函数随温度变化曲线

Fig. 4 MTF at 33 lp/mm versus temperature

图 6 是光学系统像面上不同视场的相对照度分析, 从图 6 中可以看出, 设计系统的边缘视场的像面相对照度为中心视场的 90.9%, 其像面照度不均匀性不超过 10%, 获得了良好的照度一致性。

特性, 在引入畸变改善像方视场角的同时, 确保了在不同视场观测成像时, 系统具有一致的空间角分辨率。

图 7 则是系统的  $f-\theta$  特性曲线, 系统校正后畸变不一致性绝对值最大为 0.22%, 具有良好的  $f-\theta$

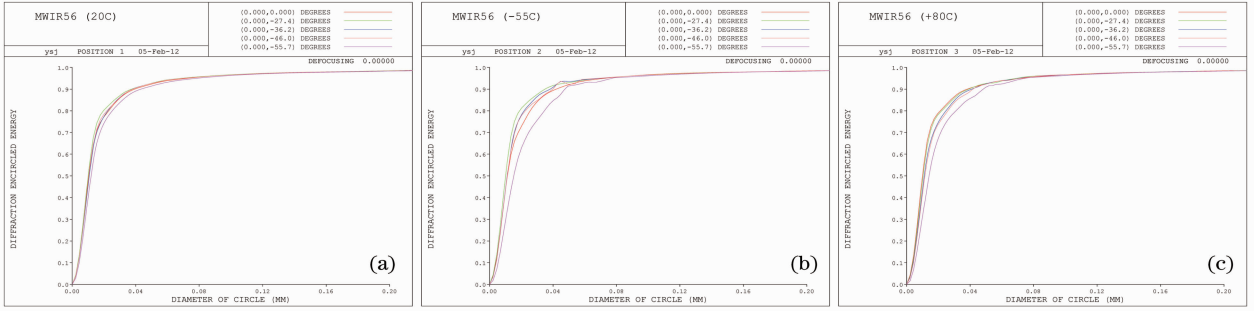


图 5 不同温度条件下的能量环

Fig. 5 Diffractive radial energies at different temperatures

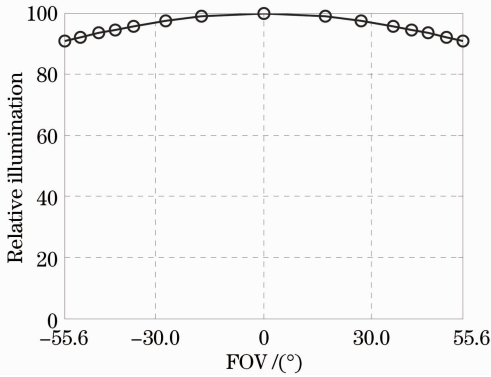


图 6 像面照度均匀性分析

Fig. 6 Analysis of illumination uniformity on imaging plane

图 8 是系统中  $V_{YNI}$  绝对值较小的两个面, 面 1 和面 2 的冷反射分析。即以像面中心点为物点, 逆向追迹光线, 并在关注面反射后, 在焦平面附近的成像情况。从图中分析可以直观看出, 对这两个面, 其对焦平面的一次反射冷像均离像面较远, 冷反射能量在焦

面上均匀散开, 不会对系统成像性能带来影响。

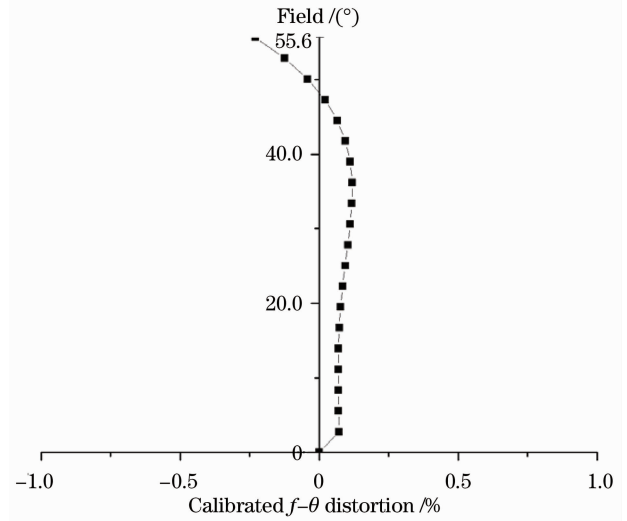


图 7  $f-\theta$  特性曲线

Fig. 7 Linear characteristic of  $f-\theta$  lens

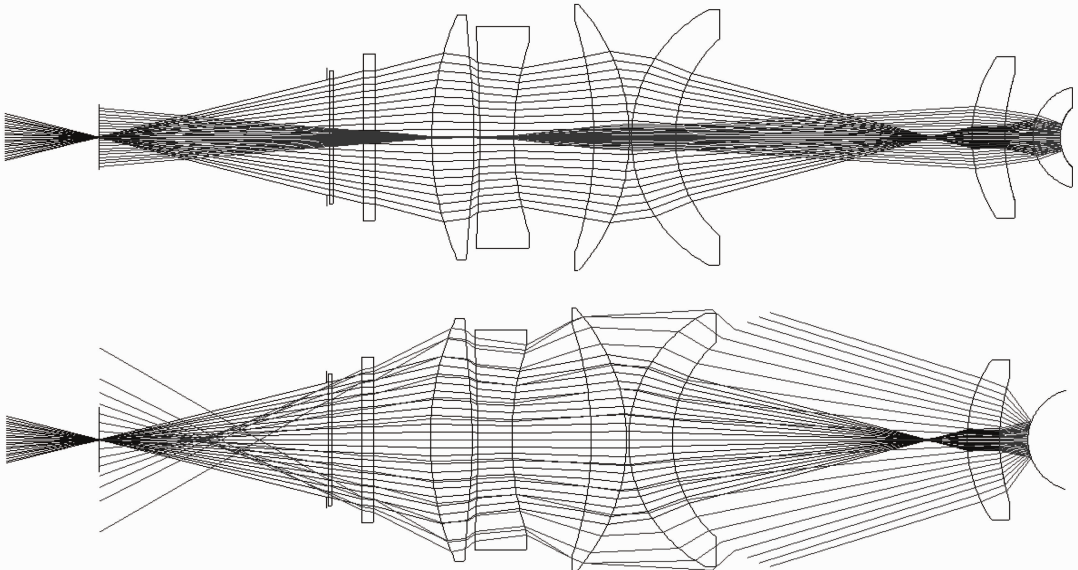


图 8 面 1 和面 2 的冷反射逆向追迹分析

Fig. 8 Narcissus analyses on surface 1 and surface 2 with inverse raytracing

## 5 结 论

制冷型广角红外成像系统,由于受到光阑后置、冷反射抑制、像面照度均匀性和杂散光要求等限制,平衡像差设计具有很大难度,特别是提出无热化要求后,设计一个能在工程上实现的光学系统难度很大。通过对高分辨率制冷型中波广角红外成像系统的系统考虑,分析了系统构型、消热差、像面照度一致性及冷反射抑制的设计原理,给出了可工程化的制冷红外广角光学系统设计思路。该光学设计采用二次成像构型,通过 Si、Ge、ZnSe 三种材料六片式对称布局,利用折/衍混合元件及非球面,实现了光学被动消热差设计,使系统在 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的宽温范围内,在空间频率为 $33\text{ lp/mm}$ 处的光学传递函数均大于 $0.4$ ,系统在以 $15\text{ }\mu\text{m}$ 的像素尺寸内,能量集中度大于 $70\%$ ;采用 $f-\theta$ 设计,使成像系统对不同视场具有相同的角分辨率;通过引入光阑像差和控制像方视场角,使像面具有较好的均匀性,边缘视场最低相对照度为中心视场的 $90.9\%$ ,且具有近 $100\%$ 的冷光阑效率,同时,系统具有较好的冷反射抑制效果。该系统设计综合考虑了工程应用中的各个方面,设计结果可以满足 $F$ 数为 $2$ ,工作波段为 $3.7\sim 4.8\text{ }\mu\text{m}$ ,全视场 $2\omega=111.2^{\circ}$ 的高分辨率制冷型中波广角红外成像系统的应用需求。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Yongzhong. Biomimetic staring infrared imaging omnidirectional detection technology [J]. *Chinese Sci. Bull.*, 2010, **55**(19): 1859~1865  
王永仲. 模仿生物视觉的凝视红外成像全向感知技术[J]. 科学通报, 2010, **55**(19): 1859~1865
- 2 Liu Ying, Wang Jing, Qu Feng *et al.*. Optical design of high precision wide-angle lens for static infrared earth sensors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(6): 1243~1248  
刘英,王靖,曲锋等. 广角 $f-\theta$ 静态红外地平仪镜头的光学设计[J]. 光学精密工程, 2010, **18**(6): 1243~1248
- 3 Fan Dan, He Yongqiang, Li Jitian *et al.*. A nonuniformity correction method based on fish-eye system[J]. *Infrared*, 2009, **30**(8): 28~31  
范丹,何永强,李计添等. 一种基于鱼眼镜头的非均匀校正方法[J]. 红外, 2009, **30**(8): 28~31
- 4 Wang Xinxue, Jiao Mingyin. Athermalization design for infrared optical systems [J]. *J. Applied Optics*, 2009, **30**(1): 129~133  
王新学,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
- 5 Chen Xiao, Yang Jianfeng, Ma Xiaolong *et al.*. Athermalization

- design of wide temperature range for hybrid refractive-diffractive objective in  $8\sim 12\text{ }\mu\text{m}$  [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2089~2092
- 陈潇,杨建峰,马小龙等.  $8\sim 12\text{ }\mu\text{m}$ 折-混合物镜超宽温度消热差设计[J]. 光学学报, 2010, **30**(7): 2089~2092
- 6 Gao Hongyun, Chen Mengwei, Yang Yingping *et al.*. Novel long wavelength infrared diffractive/refractive athermal optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(12): 2143~2146  
郭洪云,陈梦苇,杨应平等. 新型长波红外折衍混合消热差系统[J]. 光子学报, 2010, **39**(12): 2143~2146
  - 7 Han Ying, Wang Zhaoqi, Yang Xinjun *et al.*. Design on athermal infrared diffractive refractive hybrid inverted telephoto system in  $8\sim 12\text{ }\mu\text{m}$  [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(1): 77~80  
韩莹,王肇圻,杨新军等.  $8\sim 12\text{ }\mu\text{m}$ 波段折/衍混合反望远系统消热差设计[J]. 光子学报, 2007, **36**(1): 77~80
  - 8 Bai Yu, Yang Jianfeng, Ma Xiaolong *et al.*. An athermal design of infrared hybrid diffractive/refractive optical system in  $3.7\sim 4.8\text{ }\mu\text{m}$ [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(9): 2261~2264  
白瑜,杨建峰,马小龙等. 红外 $3.7\sim 4.8\text{ }\mu\text{m}$ 波段折/衍射光学系统的消热差设计[J]. 光子学报, 2009, **38**(9): 2261~2264
  - 9 Liang Ling, Zhang Liang, Pan Xiaodong. Athermal design of refractive-diffractive hybrid infrared optical systems [J]. *Electronics Optics & Control*, 2008, **15**(8): 2143~2146  
梁玲,张良,潘晓东. 折衍混合红外光学系统消热差设计[J]. 光电与控制, 2008, **15**(8): 2143~2146
  - 10 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): 2083~2088  
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): 2083~2088
  - 11 Song Yanfeng, Shao Xiaoping, Xu Jun. Design of a hybrid infrared achromatic optical system beyond normal temperature [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(10): 6298~6303  
宋岩峰,邵晓鹏,徐军. 实现复消色差的超常温混合红外光学系统[J]. 物理学报, 2008, **57**(10): 6298~6303
  - 12 Liu Lin, Shen Weimin, 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
  - 13 Yang Shengjie. Object design of helmet mounted night vision goggles with high order plastic aspherical surfaces[J]. *Electronics Optics & Control*, 2009, **16**(1): 80~83  
杨胜杰. 含高次塑料非球面的头盔微光夜视物镜设计[J]. 光电与控制, 2009, **16**(1): 80~83
  - 14 Yang Zheng, Qu Enshi, Cao Jianzhong *et al.*. The narcissus study in the optical system for the infrared staring arrays[J]. *Laser & Infrared*, 2008, **38**(1): 35~38  
杨正,屈恩世,曹剑中等. 对凝视红外热成像冷反射现象的研究[J]. 激光与红外, 2008, **38**(1): 35~38
  - 15 Wang Haitao, Guo Liangxian. Cooled thermal imaging mid-wavelength infrared zoom camera [J]. *Infrared Technology*, 2007, **29**(1): 8~11  
王海涛,郭良贤. 制冷型中波红外变焦镜头[J]. 红外技术, 2007, **29**(1): 8~11

栏目编辑: 王晓球