

折衍混合长波红外光学系统消热差设计

张发强, 樊祥, 朱斌, 程正东, 方义强

(脉冲功率激光技术国家重点实验室, 合肥电子工程学院, 安徽 合肥 230037)

摘要: 分析了温度变化对红外光学系统结构参数的影响, 给出了红外光学系统消热差设计应满足的条件, 讨论了衍射光学元件的温度特性, 并将其引入到红外光学系统的消热差设计中。利用 ZEMAX 软件, 设计了一套由锗和硫化锌组合的三片式折衍混合长波红外光学系统, 其工作波段为 8~12 μm , 视场为 10.2°, 焦距为 45 mm, $F/\#$ 为 1.5, 总长为 70 mm。设计结果表明, 该镜头在 -40~60 $^{\circ}\text{C}$ 温度范围内成像质量接近衍射极限, 系统全视场调制传递函数在特征频率 20 lp/mm 处高于 0.6, 87% 的能量集中在探测器的一个像元内, 实现了消热差设计。该系统具有结构紧凑、体积小、质量轻等优点, 适用于军事或空间红外系统。

关键词: 红外光学系统; 衍射光学元件; 消热差; 调制传递函数

中图分类号: O435; TN216 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)04-1158-06

Athermal design of long-wave infrared optical system with hybrid refractive/diffractive

Zhang Faqiang, Fan Xiang, Zhu Bin, Cheng Zhengdong, Fang Yiqiang

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronical Engineering Institute of Hefei, Hefei 230037, China)

Abstract: The influences of infrared optical system structure parameters, which caused by temperature change, was analyzed. And the condition of infrared optical system athermal design was provided. Then, the temperature characteristic of diffractive optical element was discussed, and it was introduced into infrared optical system athermal design. A long-wave infrared optical system with hybrid refractive/diffractive was designed by ZEMAX. The system was composed of three lenses, which used only two materials of Ge and ZnS, including five spherical surfaces and a diffractive surface. Its operating band was 8 to 12 μm , the filed of vision angle was 10.2°, the focal length was 45 mm, the F/number was 1.5 and the total length was 70 mm. The design result shows that the image quality of the system can approach the diffraction limit at the working temperature of -40 $^{\circ}\text{C}$ to 60 $^{\circ}\text{C}$. The modulation transfer function(MTF) is greater than 0.6 in the full filed of vision when the Nyquist frequency of detector is 20 lp/mm, and 87% of the energy is focused in single pixel. The imaging quality of the system is good, and athermal design is realized. The optical system has many advantages, such as compact structure, small volume, light

收稿日期: 2014-08-05; 修订日期: 2014-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(61307025, 61271376)

作者简介: 张发强(1981-), 男, 博士生, 主要从事红外探测系统设计方面的研究。Email: zhui_1981@163.com

导师简介: 樊祥(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电对抗方面的研究。Email: FanxiangLXL@163.com

weight and so on. It can be applied to martial or special infrared system.

Key words: infrared optical system; diffractive optical element; athermalization; modulation transfer function

0 引言

近年来,随着红外探测器技术的飞速发展,红外光学系统在军事和民用工程领域内得到了广泛应用。相对于可见光光学系统,红外光学系统有其特殊的设计要求。由于红外光学材料选择性小,透过率低,同时红外波长长,系统色差大,尤其是折射率温度系数较大,如常用的红外光学材料单晶锗的折射率温度系数 dn/dt 为 $3.96 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$,而可见光 BK7 玻璃的 dn/dt 为 $2.8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,前者约为后者的 150 倍^[1]。而红外光学系统的工作环境温度起伏较大,使得红外光学材料的折射率、光学元件的曲率和厚度、零件间隔等参数都会随着温度的变化发生变化,产生热离焦等现象,导致光学系统成像质量变差,所以在红外光学系统的设计中,消热差是一个难点。

常用的红外光学系统消热差设计方法主要有三种:机械被动式、机电主动式和光学被动式。机械被动式和机电主动式虽然容易实现,但都只补偿像面位移,无法保证焦距的补偿,而且由于使用了机械装置,不可避免地使系统复杂化,体积变大,重量增加,可靠性降低。而光学被动式消热差技术既保证了系统的焦距补偿,又具有结构相对简单、尺寸小、重量轻、系统可靠性高等优点,因而在红外光学系统消热差设计中得到了广泛应用^[2-3],在光学被动消热差技术中,衍射光学元件由于其独特的温度特性倍受重视。

衍射光学元件又称二元光学元件,是基于光波的衍射理论,利用计算机辅助设计和超大规模集成电路制作工艺,在片基上(或传统光学器件表面)刻蚀产生多个台阶的浮雕结构或连续浮雕结构,形成钝相位和同轴再现,具有极高衍射效率的一类光学元件^[4-5]。在红外光学系统的设计中引入衍射元件可以获得更多的设计自由度和独特的色散及温度特性,比起折射光学元件能更容易的校正色差和热差,改善光学系统的成像质量,并有利于简化系统结构、缩小体积和减轻重量。

文中将衍射光学元件引入折射式长波红外光学系统的设计中,通过合理的组合,设计出了工作温度为 $-40 \sim 60^\circ\text{C}$ 之间的成像质量接近衍射极限的衍射混合长波红外光学系统。

1 红外光学系统消热差设计的基本原理

1.1 温度对红外光学系统的影响

对于红外光学系统的设计,需要考虑温度变化对其影响。经过分析,温度对红外光学系统的影响主要有以下几个方面:曲率半径,元件厚度,空气间隔,光学材料折射率和空气折射率^[6],其表达式如下:

$$\begin{cases} r=r_0(1+\alpha dt) \\ D=D_0(1+\alpha dt) \\ S=S_0(1+\alpha dt) \\ n=n_0+\beta dt \\ n_{\text{air}}=n_{\text{air}0}+\beta_{\text{air}} dt \end{cases} \quad (1)$$

式中: r 、 D 、 S 、 n 和 n_{air} 分别为光学元件的曲率半径、元件厚度、空气间隔、元件折射率和空气折射率; α 为热性热膨胀系数; β 为折射率温度系数,即 dn/dt 。

上式表示了温度变化会引起红外光学系统一系列结构参数发生变化,使得系统像差增大和离焦,进而导致光学系统性能降低,尤其是红外材料折射率随温度的变化数值要远大于工作于可见光波段的光学玻璃,因此大范围的温度变化对红外系统影响不可忽略,所以对其进行消热差设计是非常必要的。

1.2 光学被动式消热差设计的原理

光学被动式消热差技术基本原理是在温度变化时,光学元件产生的离焦和机械结构产生的离焦相互补偿,使整个系统的离焦量在允许的范围内,以保持像面的稳定。光学被动式消热差应满足以下 3 个方程^[7]。

光焦度分配要求:

$$\sum_{i=1}^n h_i \phi_i = \phi \quad (2)$$

消轴向色差要求:

$$\Delta f_b^T = \left(\frac{1}{h_1 \phi} \right)^2 \sum_{i=1}^n (h_i^2 \omega_i \phi_i) = 0 \quad (3)$$

消热差要求:

$$df_b^T/dt = \left(\frac{1}{h_1 \phi} \right)^2 \sum_{i=1}^n (h_i^2 \chi_i \phi_i) = \alpha_s L \quad (4)$$

式中: ϕ_i 为各个透镜组的光焦度; ϕ 为系统的总光焦度; h_1 为第一近轴光线在各透镜组的高度; ω_i 为每个透镜组的色散因子, 即色散引起光焦度的相对变化; χ_i 为热差系数, 即温度引起焦距的变化率; α_s 为机械结构的热膨胀系数; L 为机械结构件的长度。其中公式(2)表示总的光焦度要合理分配到每一个透镜组; 公式(3)表示为了消除光学系统轴向色差, 要求系统因色散引起的焦距变化量为零; 公式(4)的含义是温度引起光学组件焦距的变化量等于光学机械镜筒随温度的变化量, 即通过被动补偿的方法使光学系统像面随探测器光敏面的移动而移动, 整个系统不产生离焦。

1.3 衍射光学元件的特点

衍射光学元件基于光波的衍射理论, 利用计算机辅助设计, 刻蚀于片基上或传统光学器件表面上, 结构如图 1 所示。

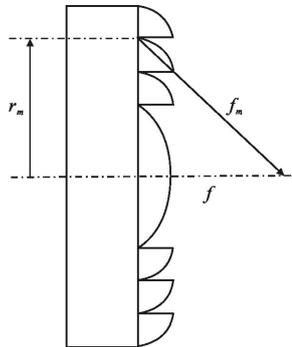


图 1 衍射光学元件模型

Fig.1 Model of diffractive optical element

图 1 中 r_m 为第 m 个环带的半径, f 为中心环带的焦距, f_m 为第 m 个环带的焦距, 衍射光学元件的焦距是由其中心波长和环带半径决定的, 对于不同的环带有不同的焦距:

$$f_m = \frac{n_0 r_m}{2m\lambda_0} \quad (5)$$

式中: n_0 为介质的折射率; λ_0 为中心波长。

在光学被动消热差设计中, 引入衍射光学元件主要是利用其和折射元件截然不同的温度特性, 衍射元件的热差系数为^[8]:

$$\chi_{f,r} = \frac{1}{f} \frac{df}{dT} = \alpha_s - \frac{1}{n-n_0} \left(\frac{dn}{dT} - n \frac{dn_0}{dT} \right) \quad (6)$$

衍射元件的热差系数:

$$\chi_{f,d} = \frac{1}{f} \frac{df}{dT} = 2\alpha_s + \frac{1}{n_0} \frac{dn_0}{dT} \quad (7)$$

式中: α_s 为光学材料的热膨胀系数; n 为光学元件的折射率; dn/dT 为材料的温度折射率系数; dn_0/dT 为介质的温度折射率系数。

从以上两式可以看出, 折射元件的温度特性是由材料的热膨胀系数和材料的折射率温度系数决定, 而衍射元件的温度特性只是由材料的热膨胀系数决定, 而和材料的折射率及其温度系数无关, 衍射元件的这个特点非常重要, 由于折射元件的热差系数和衍射元件的热差系数符号相反, 可以将两者合理组合, 相互补偿, 使其满足公式(4)的要求, 达到消热差的目的。

2 设计实例及性能评价

2.1 光学系统的设计

根据长波红外光学系统的工作特点, 选用像元数为 320×256 , 像元尺寸为 $25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$ 的非制冷红外焦平面探测器件, 工作波段为 $8 \sim 12 \mu\text{m}$, 设计的光学系统指标参数如表 1 所示。

表 1 光学设计指标

Tab.1 Parameters of optical design

Focal length/mm	FOV/(°)	F/#	Temperature /°C	Nyquist frequency /mm ⁻¹ ·lp
45	10.2	1.5	-40~60	20

要求该系统在 $-40 \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度范围内成像质量接近衍射极限, 设计中选用铝作为镜筒材料, 其热膨胀系数为 $\alpha_t = 23.6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。

根据以上参数可计算得到此长波红外光学系统的焦深为 $\Delta = 4\lambda F / \#^2 = 90 \mu\text{m}$, 艾里斑的半径为 $1.22\lambda f / D = 18.3 \mu\text{m}$ 。

在系统选型时, 考虑到红外光学材料的透过率较低以及系统的制作公差要求, 尽可能用简单的结构达到设计要求, 文中首先以常温 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 为参考温度进行设计, 采用三片式结构, 其中衍射面加工在第三片透镜的第二面上, 使第三片透镜成为折衍射混合元件, 其他的面都选用球面, 为了降低加工的难度, 在满足设计要求的前提下, 尽可能避免使用非球面。系统的第一片透镜和第三片透镜选用锗(Ge), 第二

片透镜选用硫化锌(ZnS), 介质为空气, 根据参考文献[9], 分别将锗的折射率, 热膨胀系数和折射率温度系数代入公式(6)和(7), 可得到此时锗和硫化锌折射元件热差系数分别为 $-1.26 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 和 $-3.4 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 而锗的衍射元件热差系数为 $1.32 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 可见折射元件和衍射元件热差系数符号相反, 利用光学设计软件对这两种材料的折射元件和衍射元件进行组合, 使其相互补偿, 达到消热差的目的。

在进行具体的系统设计时, 将每片透镜的厚度控制在 4~6 mm 之间, 系统总长控制在 100 mm 以内, 利用光学设计软件 ZEMAX 中的多重结构设计方法, 对光学系统在 $-40 \sim 60 \text{ } ^\circ\text{C}$ 温度范围内选取合适的节点进行消热差设计, 并进行优化。20 $^\circ\text{C}$ 光学系统的结构参数如表 2 所示。

表 2 系统的结构参数

Tab.2 Configuration parameters of system

Surf.No	Type	Radius/mm	Thickness/mm	Glass
STO	Standard	63.745	5	Ge
2	Standard	90.980	30	-
3	Standard	-24.110	4	ZnS
4	Standard	-26.118	20	-
5	Standard	22.210	5.5	Ge
6	Binary	22.320	5.483	-
IMA	Standard	Infinity	-	-

视场取子午面为参考, 波长分别取 8 μm , 9 μm , 10 μm , 11 μm , 12 μm , 设 10 μm 为主波长, 利用 ZEMAX 对其进行设计和优化, 得到如图 2 所示的消热差长波红外光学系统。

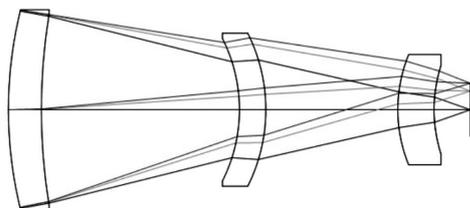


图 2 消热差系统光学设计图

Fig.2 Optical layout of the athermal system

图 2 所示的光学系统的总长为 70 mm, 后工作距为 5.5 mm, 系统结构紧凑, 简单合理。

2.2 性能评价

利用 ZEMAX 的像质评价和温度分析功能, 可得到系统在不同温度下的性能参数, 为了突出系统设计的要求, 在众多的评价指标中选用点列图、能量分布图和调制传递函数三个常用的评价指标对系统进行评价。

对中心视场(0°)、带视场(3.5°)、边缘视场(5.1°) 3 个视场进行光线追迹, 选用常温 20 $^\circ\text{C}$ 和成像质量恶化程度最大 $-40 \text{ } ^\circ\text{C}$ 以及 60 $^\circ\text{C}$ 3 个温度节点进行分析。

图 3、图 4 和图 5 分别为 $-40 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、20 $^\circ\text{C}$ 和 60 $^\circ\text{C}$ 时系统的点列图, 图中外面大圆圈表示艾里斑的大小, 可以看出在 $-40 \sim 60 \text{ } ^\circ\text{C}$ 工作温度范围内, 系统全视场均方根半径最大值为 1.977 μm , 即其直径为 3.954 μm , 远小于艾里斑直径 36.6 μm 和探测器尺寸 25 μm , 同时可以看出, 各个波段的均方半径均远小于艾里斑半径, 说明系统的色差也校正到允许范围内, 满足设计要求。

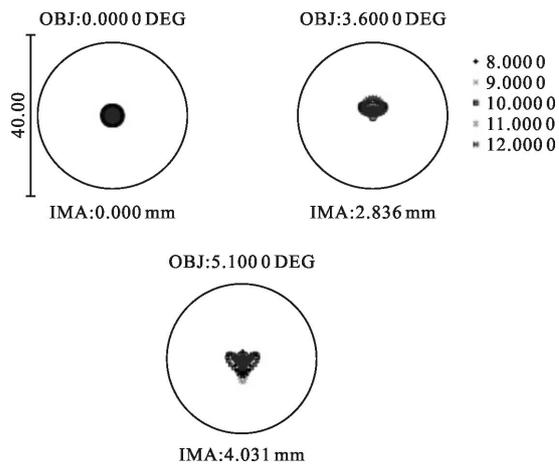


图 3 20 $^\circ\text{C}$ 的点列图

Fig.3 Spot diagram at 20 $^\circ\text{C}$

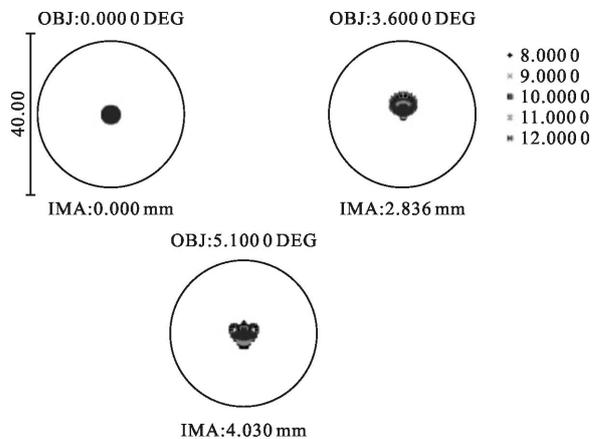


图 4 $-40 \text{ } ^\circ\text{C}$ 的点列图

Fig.4 Spot diagram at $-40 \text{ } ^\circ\text{C}$

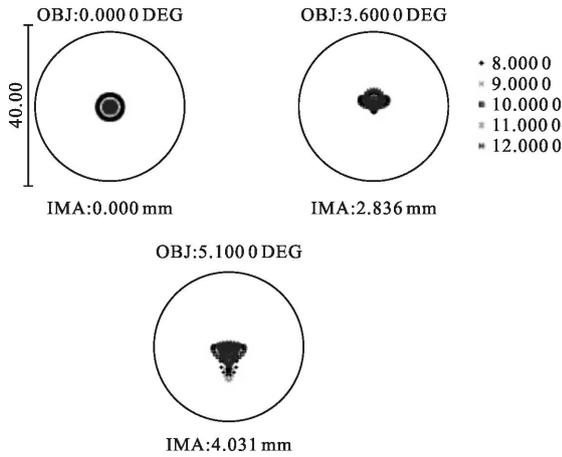


图 5 60 °C 的点列图

Fig.5 Spot diagram at 60 °C

图 6、图 7 和图 8 分别为 20 °C、-40 °C、60 °C 时系

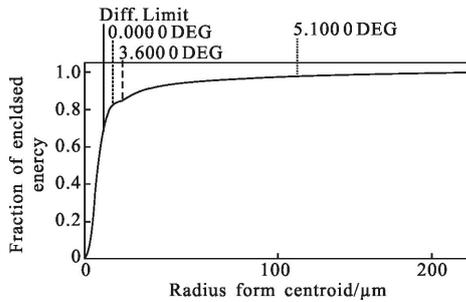


图 6 20 °C 的能量分布

Fig.6 Encircled energy at 20 °C

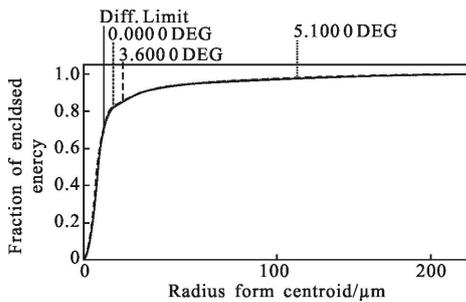


图 7 -40 °C 的能量分布

Fig.7 Encircled energy at -40 °C

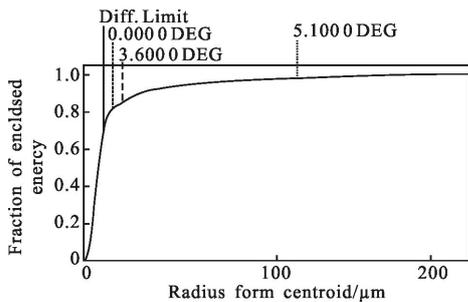


图 8 60 °C 的能量分布

Fig.8 Encircled energy at 60 °C

统的能量分布图,可以看出在系统全视场内 87% 以上的能量集中在探测器一个像元内,即 25 μm 的范围内,能量分布非常集中,并且温度对其几乎没有影响,系统具有良好的能量透过特性,达到了消热差效果,满足设计要求。

图 9、图 10、图 11 分别为系统在 20 °C、-40 °C 和 60 °C 的调制传递函数(MTF)曲线,可以看出系统在 -40~60 °C 的全视场的 MTF 在特征频率 20 lp/mm 处均达到 0.6 以上,接近衍射极限,并未随温度出现明显变化,成像质量稳定,达到消热差的效果,满足系统的设计要求。

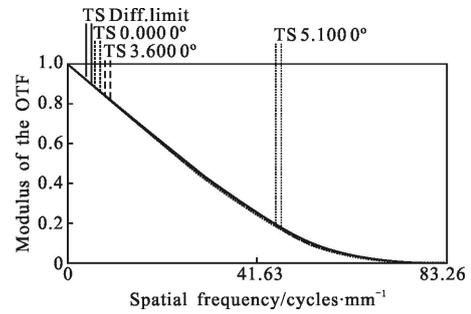


图 9 20 °C 时的调制传递函数

Fig.9 Modulation transfer function at 20 °C

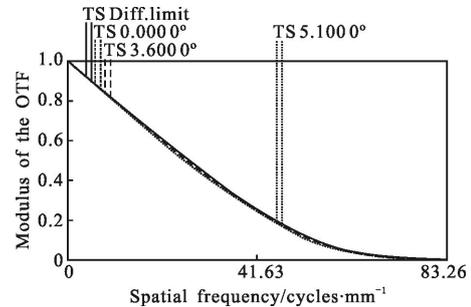


图 10 -40 °C 时的调制传递函数

Fig.10 Modulation transfer function at -40 °C

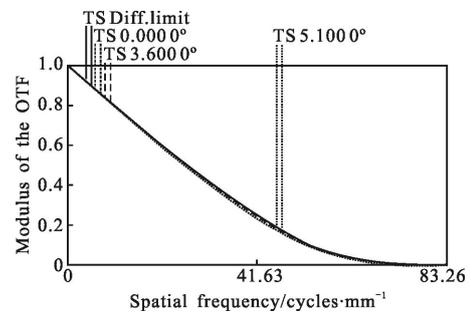


图 11 60 °C 时的调制传递函数

Fig.11 Modulation transfer function at 60 °C

消热差设计要求系统的焦距随温度的变化量,也就是离焦量要控制在焦深范围内,表 3 是系统在

-40~60℃范围内几个节点上的离焦量。

表3 温度引起系统的系统离焦量

Tab.3 Defocus of the system caused by temperature

Temperature/℃	-40	-20	0	20	60
Focal shift/μm	17	10.5	4.84	-4.02	-7.24

从表3可以看出,文中所设计的消热差折衍混合长波红外光学系统在-40~60℃温度范围内的离焦量远远小于系统的焦深90μm,保证了系统良好的成像质量。

3 结论

文中在分析了温度变化对红外光学系统结构参数影响的基础上,详细介绍了光学被动消热差技术的原理,并将衍射元件引入到红外光学系统的消热差设计中,设计出了一套三片式折衍混合长波红外光学系统,该系统使用两种常见的红外光学材料锗和硫化锌进行组合,系统共含有五个球面和一个衍射面,在-40~60℃温度范围内在实现了消热差设计的同时也校正了色差,在此温度范围内,系统的全视场调制传递函数在特征频率20lp/mm处达到0.6,接近衍射极限,87%的能量集中在1个像元内,能量透过率高。该系统在引入衍射元件的同时避免使用非球面元件,系统更为简单,可以为设计工作温度范围大的军用或空间红外光学系统提供理论指导。

参考文献:

- [1] Shen Mande. Design of infrared diffractive/refractive search and trace optical system beyond normal temperature [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3355-3359. (in Chinese)
沈满德. 超宽温折衍混合红外搜索跟踪光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3355-3359.
- [2] Wu Xiaojing, Meng Junhe. Athermalizing infrared optical system by using simple mechanical framework [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(4): 391-393. (in Chinese)
吴晓靖, 孟军和. 使用简单机械结构实现红外光学系统无热化[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(4): 391-393.
- [3] Lei Li, Zhang Chenzhong, Meng Junhe. Imaging optical system with wide field of view, fastaperture and large surface array CCD [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S): 12-15. (in Chinese)
雷丽, 张晨中, 孟军和. 大视场大相对孔径大面阵 CCD 成像光学系统设计研究 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(S): 12-15.
- [4] Hu Wang, Yu Bai, Jianjun Luo. Hybrid refractive/diffractive optical system design for light and compact uncooled longwave infrared imager[C]//SPIE, 2012, 8416:84162N-1.
- [5] Oikawa M, Misawa S, Banno J, et al. Stacked Planar optics: an application of the planar microlens [J]. *Appl Opt*, 1982, 21: 3456-3460.
- [6] Zhang Xuyan, Jiang Ruikai, Jia Hongguang. Athermalization of long-wave infrared optical system with large relative aperture[J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(6): 1227-1231. (in Chinese)
张续严, 姜瑞凯, 贾宏光. 大相对孔径长波红外光学系统无热化设计[J]. 应用光学, 2011, 32(6): 1227-1231.
- [7] Meng Qingchao, Pan Guoqing, Zhang Yunqiang, et al. Design of athermalizing infrared optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 35(S): 723-727. (in Chinese)
孟庆超, 潘国庆, 张运强, 等. 红外光学系统的无热化设计 [J]. 红外与激光工程, 2008, 35(S): 723-727.
- [8] Liang Ling, Zhang Liang. Thermal design for infrared refractive/diffractive hybrid infrared optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36 (S): 120-124. (in Chinese)
梁玲, 张良. 折/衍混合红外光学系统无热设计[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(S): 120-124.
- [9] Fischer R E. Optical design in the infrared optical system[C]//SPIE, 1985, 531: 82.