

折衍混合轻量化长波红外消热差光学系统设计

周正平*, 陈恒, 纪辉, 李夏青, 廖军

江苏曙光光电有限公司, 江苏 扬州 225000

摘要 针对非制冷热成像系统成像质量高、相对孔径大、质量轻、温度适应性广的要求,在对轻量化光学系统结构分析的基础上,根据光学被动补偿原理求解系统初始光焦度分配,利用二元衍射面异于红外材料的特性,设计了一种轻量化长波红外消热差光学系统。所设计系统焦距为 50 mm, F 数为 1, 适配长波(8~12 μm)红外非制冷探测器,其分辨率为 640×512 , 像元大小为 12 μm 。光学系统包含 3 片透镜,总质量仅为 67 g,在 $-40^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ 温度范围内,各视场调制传递函数(MTF)均接近衍射极限。环境温度实验结果表明,所设计系统消热差效果良好。

关键词 光学设计; 二元衍射面; 红外光学系统; 消热差; 轻量化

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1022001

Design of Lightweight Long-Wave Infrared Athermalized Optical System with Hybrid Refractive-Diffractive

Zhou Zhengping*, Chen Heng, Ji Hui, Li Xiaqing, Liao Jun

Jiangsu Shuguang Optoelectronics Limited Company, Yangzhou 225000, Jiangsu, China

Abstract As per the requirements of high imaging quality, large relative aperture, lightweight, and wide temperature adaptability of the non-cooling thermal imaging system, based on the structural analysis of the lightweight optical system, the initial power distribution of the system is solved using the principle of optical-passive compensation. Moreover, a lightweight long-wave infrared athermalization optical system is designed using the characteristics of binary diffraction surface different from infrared materials. The focal length of the designed system is 50 mm, and the F -number is 1. It is suitable for a long-wave (8–12 μm) infrared uncooled detector with a resolution of 640×512 and pixel size of 12 μm . The optical system comprises three lenses having a total mass of 67 g. In the temperature range of $-40^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$, the modulation transfer function of each field of view is close to the diffraction limit. The experimental results of room temperature demonstrate that the designed system has a good athermalization effect.

Key words optical design; binary diffraction surface; infrared optical system; athermalization; lightweight

1 引言

工作在长波(8~12 μm)红外光谱区域的被动式光电系统具有可全天候工作、无源、隐蔽性好、抗干扰能力强等优点,与中波红外系统相比,更适合常温目标的探测。近年来,非制冷长波红外

(LWIF)探测器迅猛发展,使得长波红外探测系统成为手持侦察设备的“标配”。然而,手持设备由于自身的使用特点,对质量的约束较为严苛,因此搭载在其中的光学系统需要进行轻量化设计。

因为温度对红外光学材料性能影响较大,所以红外系统需要消热差设计,使其在较大温度范围内

收稿日期: 2021-04-09; 修回日期: 2021-04-14; 录用日期: 2021-05-25

通信作者: *zhouzhengping1234@126.com

有好的成像质量。目前,消热差的方法主要有主动补偿和被动补偿^[1-2]。主动补偿通过手动或电动调节系统中一片或一组透镜,可在不同温度及不同物距条件下获得较好像质,该方法容易实现,但增加了调焦机构,光轴容易晃动,存在一定的瞄准误差,且不利于轻量化。被动补偿又分为机械被动补偿和光学被动补偿。机械被动补偿利用不同膨胀系数的结构元件随温度热胀冷缩带动透镜移动实现消热差,该方法光轴稳定性好,光学设计难度小、成本低,但结构相对复杂,像质相对一般;光学被动补偿通过不同光学透镜材料和结构材料的配合,合理分配光焦度实现消热差,该方法光轴稳定性好、像质高、可靠性高、结构简单,但光学设计难度大,对光学材料和光学精密加工技术依赖性较高。不同消热差方法各有优缺点,如何选择应根据具体的应用条件确定,某些应用中甚至会结合两种方法实现消热差^[3]。

本文针对手持侦察设备的使用条件,确定光学系统轻量化的设计思路,根据系统光焦度、光学被动消热差及消色差条件编制计算程序,求得一系列满足要求的玻璃组合和光焦度分配,初步优化后选取较优解,并根据需要添加二元衍射面和高次非球面进一步优化,从而完成轻量化长波红外消热差光学系统设计。所设计系统包含 3 片透镜,透镜材料

均为硫系玻璃,系统结构简单紧凑、质量轻、体积小、在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内全视场调制传递函数(MTF)接近衍射极限,环境温度实验结果表明,该系统在不同温度下成像清晰、无热离焦。

2 系统设计

2.1 轻量化思路

与制冷型探测器相比,非制冷型探测器灵敏度较低,为获得理想的成像质量,通常要求光学系统具有较大的相对口径,从而导致透镜的口径较大。常用的长波红外材料^[4]不多,相关参数如表 1 所示,其中 N 为材料折射率、 V 为阿贝常数、 α_G 为热膨胀系数、 T 为归化热差系数、 ρ 为材料密度。从表 1 可以看出,红外材料的密度相差无几,而透镜的质量与其口径的平方成正比,因此非制冷系统中透镜口径对整体质量的贡献更为直接,实现轻量化设计首先需要控制系统中大口径镜片的数量,其次要控制镜片总数量。一般情况下,将 3 块透镜的光焦度作为变量,同时满足系统光焦度、消色差、消热差的光焦度分配是唯一的,若对系统结构型式提出要求,则必须增加新的变量^[5]。若增加透镜,则对系统的质量和透过率均有影响。衍射元件^[6-9]为系统设计提供了新思路,衍射元件具有异于折射元件的热差和色差性能,其阿贝数和归化热差系数分别为

表 1 常用长波红外材料性能参数

Table 1 Performance parameters of common long-wave infrared materials

LWIR material	IRG201	IRG204	IRG205	IRG206	IRG207	ZnS	ZnSe	Ge
N	2.494	2.766	2.601	2.776	2.608	2.200	2.406	4.003
V	95.77	132.77	93.63	137.71	154.57	22.8	58	864
$\alpha_G / (10^{-6} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$	12.3	20.9	14.0	20.7	20.3	6.6	7.1	6.1
$T / (10^{-6} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$	29.2	-10.7	29.7	-2.9	-9.7	30.1	36.3	126
$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	4.42	4.72	4.68	4.63	4.49	4.09	5.26	5.33

$$V_d = \frac{\lambda_M}{\lambda_S - \lambda_L}, \quad (1)$$

$$T_d = \frac{1}{n_0} \frac{dn_0}{dt} - 2\alpha_G, \quad (2)$$

式中: λ_M 为系统中心波长; λ_S 为短波端波长; λ_L 为长波端波长,可见衍射元件的色散特性由使用谱段决定,与基底材料无关,且色散较大; n_0 为衍射元件周围介质折射率,由于系统常用于大气环境中, n_0 取常数 1,因此衍射元件的热特性只与基底材料的热膨胀系数有关。若将衍射结构直接制作在透镜上,可在不增加透镜数量的情况下实现轻量化和无热化设计。

此外,镜筒材料也是轻量化和无热化设计的关键因素,选择时需要综合考虑。虽然钛和钢的热膨胀系数较低,但密度较高,不利于轻量化;镁的密度虽然较低,但其强度不高且耐磨损能力较差^[10],综合考虑选用性价比最高的铝材。

2.2 高斯光学分析

本实验组以三分离薄透镜为基础建立分析模型,如图 1 所示,为减小透镜口径,将入瞳设置在第 1 片薄透镜上,3 组薄透镜光焦度分别为 φ_1 、 φ_2 、 φ_3 ,3 组透镜的像方孔径角分别为 u_1' 、 u_2' 、 u_3' ,第 1 近轴光线在 3 组薄透镜上的入射高度分别为 h_1 、 h_2 、 h_3 ,透

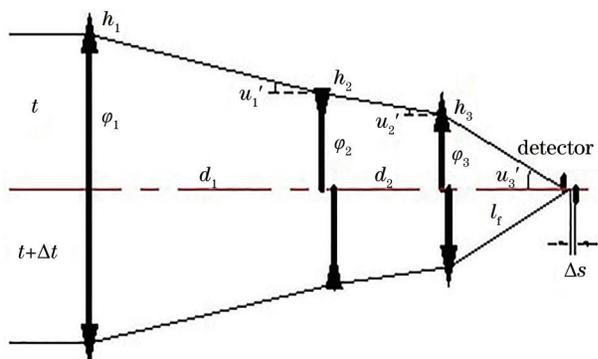


图 1 三分离薄透镜热离焦模型

Fig. 1 Thermal defocus model of triple separated thin lens

镜之间的间隔分别 d_1, d_2 。

系统的光焦度和后截距分别为

$$\varphi = h_1\varphi_1 + h_2\varphi_2 + h_3\varphi_3, \quad (3)$$

$$l_f = h_3/u_3'. \quad (4)$$

温度变化 Δt 时,各透镜曲率半径、厚度、材料折射率及透镜之间的间隔均产生变化,则系统产生的热像差为

$$\Delta\xi = -\frac{1}{u_3'^2} (h_1^2 T_1 \varphi_1 + h_2^2 T_2 \varphi_2 + h_3^2 T_3 \varphi_3 + u_1'^2 \alpha_M d_1 + u_2'^2 \alpha_M d_2), \quad (5)$$

式中: α_M 为结构膨胀系数。系统中孔径角、透镜之

间间隔,第 1 近轴光线高度及透镜光焦度之间的相互关系为

$$u_1'^2 d_1 = h_1(h_1 - h_2)\varphi_1, \quad (6)$$

$$u_2'^2 d_2 = h_2(h_2 - h_3)\varphi_2. \quad (7)$$

温度变化、镜头热膨胀引起探测器相对于最后 1 片透镜距离的变化为

$$\Delta\eta = \alpha_M l_f. \quad (8)$$

为实现无热化,必须使光学离焦量能够补偿探测器像面的离焦量,即

$$\Delta s = \Delta\xi - \Delta\eta = 0. \quad (9)$$

同时,为了校正系统色差,各组透镜光焦度还应满足色差方程,即

$$\frac{h_1^2 \varphi_1}{V_1} + \frac{h_2^2 \varphi_2}{V_2} + \frac{h_3^2 \varphi_3}{V_3} = 0. \quad (10)$$

联立式(3)、(9)、(10),即可求解出满足系统要求的初始光焦度分配。

3 设计实例

3.1 设计结果

使用的氧化钒非制冷长波红外探测器的分辨率为 640×512 ,像元大小为 $12 \mu\text{m}$,具体光学系统指标参数如表 2 所示。

表 2 光学系统指标

Table 2 Specifications of optical system

Spectrum range / μm	Focal length / mm	F number	Overall length / mm	Mass / g	Working temperature / $^{\circ}\text{C}$
8-12	50	1	≤ 60	≤ 70	-40~+60

根据上述分析,设计时需要控制大口径镜片的数量,令 h_2/h_1 取 0.35~0.45, h_3/h_1 取 0.25~0.35,则 $h_2^2, h_3^2 \ll h_1^2$,因此第 1 片透镜对系统热差和色差的贡献最大,第 1 片透镜应该选择归化热差系数和色散尽可能小的材料,同时根据式(3)~(10)及红外材料的相关性能参数编制计算程序,求解出多组满足要求的材料组合和初始光焦度分配,利用光学设计软件根据所求光焦度建立多重组态的初始结构,进行初步优化设计,得到一系列较优的解,部分结果如表 3 所示。

经过充分比对,最终选择 IRG204-IRG201-IRG204 的玻璃组合。进一步优化时,由于需要严格控制第 2、3 片透镜的口径及系统的总长,导致优化变量较少,难以得到较好的像质。因此,考虑添加衍射面和高次非球面来增加校正自由度。衍射面的特性是色散很大且恒为负值,将其添加在第 1 片透镜的后表面,分配较小的正光焦度即可与第 1 片正透镜的色

表 3 光学系统初始结构部分结果

Table 3 Partial results of optical system initial structure

No#	Material			Power		
	I	II	III	φ_1	φ_2	φ_3
1	IRG204	Ge	IRG204	0.0175	-0.0071	0.0130
2	IRG204	IRG201	IRG204	0.0202	-0.0354	0.0405
3	IRG204	IRG205	IRG204	0.0203	-0.0368	0.0414
4	IRG204	ZnSe	IRG204	0.0237	-0.0491	0.0464
5	IRG206	Ge	IRG206	0.0178	-0.0094	0.0157
6	IRG206	IRG201	IRG206	0.0199	-0.0345	0.0384
7	IRG206	IRG205	IRG206	0.0201	-0.0520	0.0529
8	IRG206	ZnSe	IRG206	0.0203	-0.0551	0.0550
9	IRG207	Ge	IRG207	0.0178	-0.0095	0.0156
10	IRG207	IRG201	IRG207	0.0184	-0.0241	0.0303
11	IRG207	IRG205	IRG207	0.0184	-0.0274	0.0334
12	IRG207	ZnSe	IRG207	0.0185	-0.0302	0.0357

差相互平衡,且不会引入较大的单色像差和热差;大相对孔径系统还存在一定难以校正的高级像差,因

此在入射光线最高的第 1 透镜后表面和靠近像面的第 3 透镜前表面添加高次非球面,平衡系统像差,进

一步提升像质。系统最终的优化设计结果如图 2 所示,光学系统总长为 59.5 mm,总质量为 67 g。

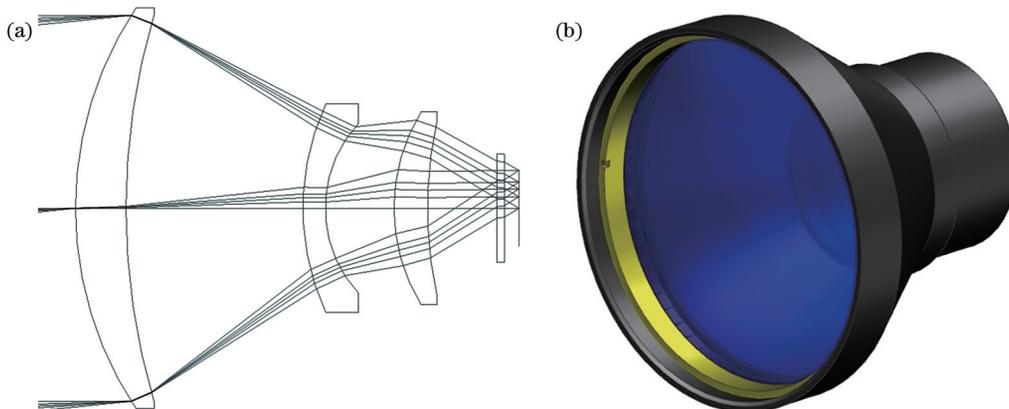


图 2 光学系统。(a)系统光路;(b)系统模型

Fig. 2 Optical system. (a) Optical layout of system; (b) system model

图 3~5 分别为系统在 22 °C、-40 °C 和 60 °C 下各视场的调制传递函数曲线(MTF)。从图中可以看出,系统 MTF 在 -40 °C~60 °C 温度范围内接近衍射极限,成像质量良好。图 6 是在 42 lp/mm 处,0、0.3、0.5、0.7 和 1 视场 MTF 随温度变化曲线图。

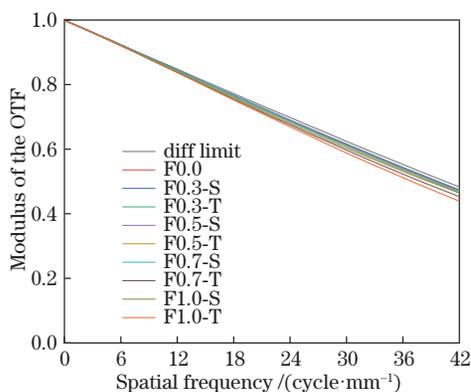


图 3 22 °C 下的 MTF 曲线

Fig. 3 MTF curves at 22 °C

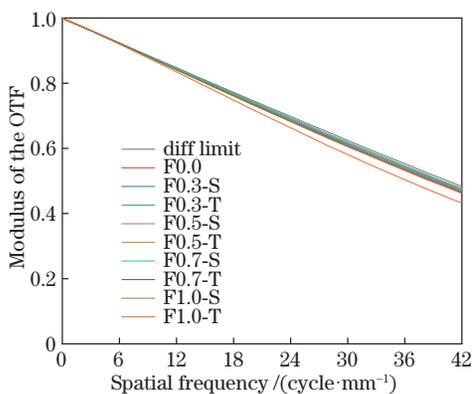


图 4 -40 °C 下的 MTF 曲线

Fig. 4 MTF curves at -40 °C

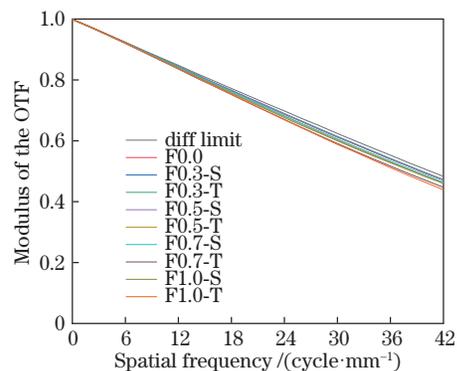


图 5 60 °C 下的 MTF 曲线

Fig. 5 MTF curves at 60 °C

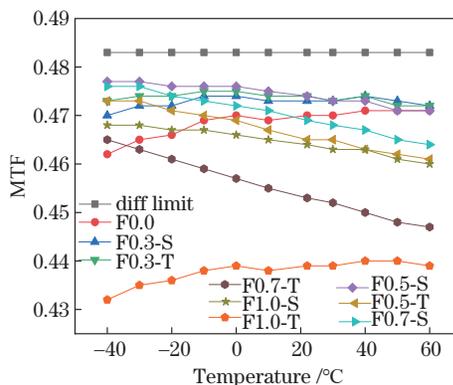


图 6 42 lp/mm 处的 MTF 随温度的变化

Fig. 6 Relationship between MYF and temperature at 42 lp/mm

从图 6 可以看出,在 -40 °C~60 °C 温度范围内,各视场 MTF 值变化量均小于 5%,且均大于 0.43,满足成像要求。

3.2 衍射面加工参数

二元衍射面面型复杂程度与其加工可行性息息

相关,因此,利用光学软件仿真后,需分析该衍射面的相关加工参数^[11-13]。衍射面的相位轮廓一般表述为

$$\Phi(r) = \frac{2\pi}{\lambda_M} (C_1 r^2 + C_2 r^4 + C_3 r^6 + \dots), \quad (11)$$

$$d = \frac{m\lambda_M}{n_M - 1}, \quad (12)$$

式中: r 为径向半径; C_1 、 C_2 、 C_3 为光学软件中优化得到的系数; d 为相位每变化 2π 衍射面的突变深度; m 为设计的衍射级次; n_M 为折-衍镜片中心波长处的折射率。衍射面突变处的径向半径满足

$$N \times 2\pi = |\Phi(r)|, \quad (13)$$

式中:衍射面环数 $N=1, 2, 3, \dots$ 。衍射面相关参数如表 4 所示,利用 MATLAB 模拟的面型如图 7 所示,衍射面的最大环带数为 9,最大环带深度为

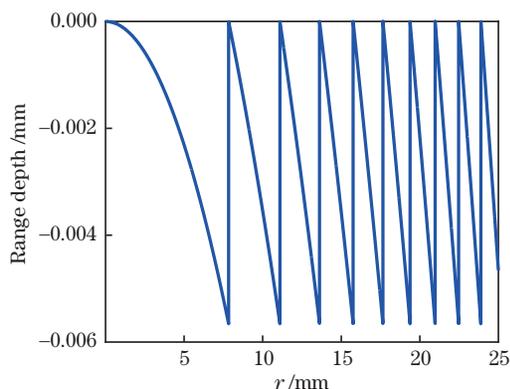


图 7 二元衍射面面型

Fig. 7 Surface type of binary diffraction surface

5.657 μm ,最小环带间隔为 1.4146 mm,常规的单点金刚石车削工艺可以保证其加工精度。

表 4 衍射面设计参数

Table 4 Design parameters of diffraction surface

Parameter	Radial diameter /mm	C_1	C_2	C_3	$\lambda_M / \mu\text{m}$	$n_M(\text{at } \lambda_M)$
Value	50	-1.6370×10^{-4}	1.0420×10^{-8}	0	10	2.7677

3.3 环境温度实验

根据设计参数完成镜头加工及装调后,对其进行环境温度实验,将整机放在高低温箱中,分别设置环境温度为 22 $^{\circ}\text{C}$ 、-40 $^{\circ}\text{C}$ 和 60 $^{\circ}\text{C}$,各个温度下放

置 2 h,而后开窗测试其成像情况。图 8 分别是不同温度下的实物场景,系统在各环境温度下成像清晰,表明系统具备良好的消热差性能。



图 8 不同环境温度下的图像

Fig. 8 Images at different environment temperature

4 结 论

给出了大相对孔径长波红外光学系统轻量化的设计思路,根据光学被动消热差条件,求解出一系列满足要求的结果,选取较优解,并结合二元衍射面的特性,设计了适用于 640 \times 512 分辨率、12 μm 像元大小的非制冷长波红外探测器的消热差光学系统。光学系统总质量仅为 67 g,满足轻量化要求,且在 -40 $^{\circ}\text{C}$ ~60 $^{\circ}\text{C}$ 工作温度范围内成像清晰,验证了系统良好的消热差性能。该设计思路不局限于文中设计指标,对大相对孔径轻量化红外系统消热

差设计具有普遍指导意义。此外,所设计系统玻璃材料均为硫系玻璃,可以采用精密模压加工批量生产,符合当下军品低成本化的发展趋势。

参 考 文 献

- [1] 胡玉禧,周绍祥,相里斌,等.消热差光学系统设计[J].光学学报,2000,20(10):1386-1391.
Hu Y X, Zhou S X, Xiangli B, et al. Design of athermal optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(10): 1386-1391.
- [2] 白瑜.长焦距宽光谱红外双波段消热差探测成像光学系统研究[D].成都:电子科技大学,2017:12-22.

- Bai Y. Research on infrared dual-band athermal detection imaging system with long focal length and wide spectrum[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017: 12-22.
- [3] 史浩东, 张新, 曲贺盟, 等. 基于硫系玻璃的大相对孔径红外消热差光学系统设计[J]. 光学学报, 2015, 35(6): 0622002.
- Shi H D, Zhang X, Qu H M, et al. Design of large relative aperture infrared athermalized optical system with chalcogenide glasses[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(6): 0622002.
- [4] 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.
- Shi G W, Zhang X, Wang L J, 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.
- [5] 刘琳. 中波红外大相对孔径非制冷热像仪光学系统的研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2010: 48-56.
- Liu L. Study on fast speed optical system of uncooled MWIR imager[D]. Suzhou: Soochow University, 2010: 48-56.
- [6] 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.
- Guo Y H, Shen M Z, Lu Z K. Athermal design for infrared diffractive/refractive optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(10): 1392-1395.
- [7] 焦明印, 冯卓祥. 采用衍射元件实现消热差的混合红外光学系统[J]. 光学学报, 2001, 21(11): 1364-1367.
- Jiao M Y, Feng Z X. Athermalized infrared hybrid optical system by employing diffractive element[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(11): 1364-1367.
- [8] 陈潇, 杨建峰, 马小龙, 等. 8~12 μm 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.
- Chen X, Yang J F, Ma X L, et al. Athermalization design of wide temperature range for hybrid refractive-diffractive objective in 8-12 μm [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(7): 2089-2092.
- [9] 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.
- Zhang X, Qiao Y F, Zhu M C, et al. Two-lens athermalized infrared telephoto objective[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0822004.
- [10] 保罗约德. 光机系统设计[M]. 3版. 周海宪, 程云芳, 周华君等., 译. 机械工业出版社, 2008: 110-117.
- Paul R Y, Jr. Opto-mechanical systems design[M]. 3rd ed. Zhou H X, Cheng Y F, Zhou H J, et al., Transl. Beijing: China Machine Press, 2008: 110-117.
- [11] 梁旭, 王军华, 徐敏, 等. 折-衍光学镜片的单点金刚石车削与检测[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(3): 032203.
- Liang X, Wang J H, Xu M, et al. Single-point diamond turning and testing of hybrid diffractive-refractive optical lens[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(3): 032203.
- [12] 刘莉萍, 王涌天, 李荣刚, 等. 制作在非球面基底上的红外衍射光学元件[J]. 红外与毫米波学报, 2004, 23(4): 308-312.
- Liu L P, Wang Y T, Li R G, et al. Infrared diffractive optical element fabricated on aspheric substrate[J]. Journal Infrared Millimeter and Waves, 2004, 23(4): 308-312.
- [13] 张发平, 张华卫. 基于二元衍射面的长波无热化光学系统设计[J]. 红外技术, 2020, 42(1): 25-29.
- Zhang F P, Zhang H W. Design of long-wave athermal optical system based on binary diffraction surface[J]. Infrared Technology, 2020, 42(1): 25-29.