

两片式远距结构消热差红外物镜

张鑫^{1,2} 乔彦峰¹ 朱明超¹ 何锋赞¹ 贾宏光¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)
² 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 为解决光学消热差技术镜片多且结构复杂的问题,提出了一种两片式远距结构消热差光学设计方法。该光学系统由前折衍混合正透镜和后负透镜组成,衍射面补偿系统的大部分色差和小部分热差,剩余色差和热差由负透镜平衡。设计了用于非制冷红外探测器的长波红外物镜,焦距为120 mm, F 数为1.2,远距比为0.9。调制传递函数(MTF)的设计值接近衍射极限,轴上30 lp/mm处MTF的实测结果优于0.45,成像质量优良。环境温度实验测试结果表明,−40 °C~60 °C温度范围内,靶标边缘锐利,无温度离焦。两片式远距结构消热差红外物镜适用于机载或弹载的轻量化光电系统。

关键词 光学设计;消热差设计;红外光学系统;两片式结构;远距式结构

中图分类号 TN21 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0822004

Two-Lens Athermalized Infrared Telephoto Objective

Zhang Xin^{1,2} Qiao Yanfeng¹ Zhu Mingchao¹ He Fengyun¹ Jia Hongguang¹

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract A method to design athermalized infrared two-lens telephoto objectives is proposed to reduce the number of lenses and simply the structure of an athermal optical system. The telephoto structure is composed of a front refractive-diffractive positive single lens and a rear negative single lens. A diffractive surface is used to compensate most of chromatic aberration and a small amount of thermal aberration, and residual aberrations are balanced by the rear negative lens. A long-wavelength infrared objective used for uncooled focal plane arrays is designed, whose focal length is 120 mm, F number is 1.2 and telephoto ratio is 0.9. The designed modulation transfer function (MTF) is close to the diffraction limit and the measured result of MTF is greater than 0.45 at the spatial frequency of 30 lp/mm. The results of temperature tests show that the target image remained sharp in the temperature range from −40 °C to 60 °C. The proposed two-lens structure can be applied in airborne and missile-borne electro-optical equipments.

Key words optical design; athermal design; infrared optical system; two-lens structure; telephoto objective

OCIS codes 220.3620; 110.3080; 120.4820

1 引言

非制冷红外探测器具有低成本、高可靠性、小体积的特点,使其在安防监控、机载吊舱、导弹制导等领域得到广泛的应用^[1]。商用机芯的像元尺寸已经从25 μm发展到17 μm,在同样的光学系统参数条件下,空间分辨率提高了近50%,但是小像元对光

学设计提出了更高的要求^[2]。一方面,像方空间频率的提高要求光学系统具有更高的调制传递函数(MTF);另一方面,像元尺寸的减小要求光学系统具有更小的温度离焦量,即具有更好的消热差能力。光学系统被动消热差技术主要分为机械被动式和光学被动式^[3-5]。前者通过匹配光学系统支撑结构的

收稿日期: 2014-02-20; **收到修改稿日期**: 2014-03-25

基金项目: 中国科学院知识创新工程国防科技创新重要项目(YYYJ-1122)

作者简介: 张鑫(1985—),男,博士研究生,助理研究员,主要从事光学设计、光电测量等方面的研究。

E-mail: xin_tju@163.com

导师简介: 乔彦峰(1962—),男,研究员,博士生导师,主要从事光电测量方面的研究。E-mail: yanfengqiao@ciomp.ac.cn

热膨胀系数,实现对光学系统温度离焦的机械补偿;后者利用不同光学材料的温度折射率系数差异,计算合理的光焦度分配,正负透镜相互补偿热差实现消热设计。目前的长波红外光学被动消热差设计有两种技术路线:一种是利用三种材料的透镜组合消热差、消色差^[6-7],光学系统前组由三片透镜组成,重量大且成本高;另一种是利用两种材料的透镜与折衍混合技术结合消热差、消色差^[8-9],光学系统前组由两片透镜组成,其中一片为折衍混合透镜,结构比第一种简单,在实际中应用较多。这些方法都是利用光学系统前组的三片或者两片透镜消除系统的主要热差,后组对系统热差贡献很小或者后组单独消热差^[10]。也有报道车载短焦距镜头利用两片相邻透镜实现消热差^[11],但是对于需要两组以上镜片的长焦距系统,光学系统过于复杂,若考虑将后组与前组热差特性相互补偿,光学系统将有望进一步简化。

本文提出了一种两片分离式被动消热差光学系统,前正透镜为折衍混合透镜,采用较低温度折射率系数的硫系玻璃^[12],利用衍射面补偿材料的大部分色差和小部分热差,剩余色差和热差由后负透镜平衡。系统为远距式结构、长度短、重量轻、透射率高。阐述了其设计原理,并应用该方法设计了焦距120 mm,相对孔径1/1.2的长波红外消热差物镜。环境温度实验测试结果表明,该光学系统在-40℃~60℃温度范围内靶标成像清晰,边缘锐利,无温度离焦。

2 系统设计

2.1 设计原理

消热差成像光学系统光焦度分配需要满足以下三个方程:光焦度方程,消色差方程和消热差方程。

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \varphi_i = \phi_s \\ \sum_{i=1}^n \frac{\varphi_i}{V_i} = 0 \\ \sum_{i=1}^n T_i \varphi_i = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

式中 φ 为光焦度, ϕ_s 为总光焦度, V 为阿贝常数, T 为归一化光焦度温度系数,有:

$$T = \frac{d\varphi}{\varphi dt} = -\frac{df}{f dt} = \frac{dn/dt}{n-1} - \alpha_l, \quad (2)$$

式中 f 为焦距, t 为温度, α_l 为透镜材料的热膨胀系数。同时满足以上三个方程,则 n 至少为3,即至少

需要三个光焦度单元。

早期研究的消热差结构前组采用三个密接透镜,通过不同材料和正负光焦度组合实现消色差和消热差,后组临近像面,主要用于平衡前组剩余像差,对光焦度几乎无贡献。随着折衍混合透镜理论的完善和加工工艺的成熟,前组简化为折衍混合双透镜,双透镜的正负光焦度组合消热差,衍射面用来补偿色差,后组的作用仍然是平衡前组剩余像差;若能将后组的作用扩展到承担系统热差平衡的光焦度分配,将进一步简化前组结构,实现前组单片加后组单片的两片式消热差结构,消热差设计的结构简化过程如图1所示。

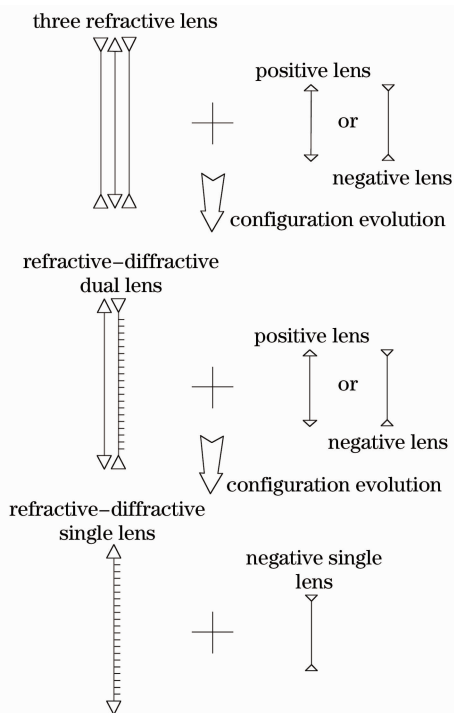


图1 消热差设计的结构进化过程

Fig. 1 Evolution progress of the athermal design

两片式消热差结构的的光焦度分配方程组为

$$\begin{cases} \varphi_P + \varphi_D + h\varphi_N = \phi_s \\ \frac{\varphi_P}{V_P} + \frac{\varphi_D}{V_D} + h^2 \frac{\varphi_N}{V_N} = 0 \\ T_P \varphi_P + T_D \varphi_D + h^2 T_N \varphi_N = 0 \end{cases}, \quad (3)$$

式中 φ_P 为正的光焦度, φ_N 为负的光焦度, φ_D 衍射面的光焦度, h 为中心视场上边缘光线在后组的归一化入射高度。

分析(3)式,由于后组光高 $h < 1$,则 $h^2 \ll 1$,导致后组对热差的贡献系数较小,所以前组正透镜应该选择光焦度温度系数尽可能小的材料,而负透镜选

择光焦度温度系数尽可能大的材料;前组的衍射面的特性是色散很大,能够与正透镜的色差相互平衡,所以后组负透镜应该选择色散小的材料。合理的材料选择能够降低前后组各自的光焦度,有利于系统高级像差降低。

2.2 光学设计

本设计实例为某型机载平台观测系统,使用分辨率为 640×480 非制冷 $17 \mu\text{m}$ 长波红外探测器,光学系统指标如表 1 所示。

表 1 红外光学系统指标

Table 1 Specifications of the infrared optical system

F number	Focal length	Field angle	Wavelength	Temperature
1.2	120 mm	6.5°	$8 \sim 12 \mu\text{m}$	$-40 \text{ }^\circ\text{C} \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$

根据前面分析两片式消热差光学系统特性,首先选择正负透镜的材料组合,表 2 为部分常用长波

表 2 常用长波红外材料的 V 、 T 和 α 值

Table 2 T , V and α data of the conventional long-wavelength infrared materials

	Ge	ZnS	ZnSe	AMTIR1	IG6
$T / (10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1})$	126.2	25.9	36.3	36.1	2.4
V	1000	23	58	110	161
$\alpha / (10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1})$	5.7	6.6	7.1	12	20.7

表 3 最终光焦度分配

Table 3 Final optical power distribution

φ_P	φ_D	φ_N
0.0077	1.35×10^{-4}	-0.0039

两片式光学系统的优化设计结果如图 2 所示。物镜的光学长度为 111 mm,远距比接近 0.9。光学系统光阑设置在正透镜前表面上,以最小化光学口径。正透镜后表面设置为衍射面和非球面,负透镜的后表面设置非球面,两个非球面的作用是提供足够多的优化参数^[13],平衡光学系统的初级和高级像差。

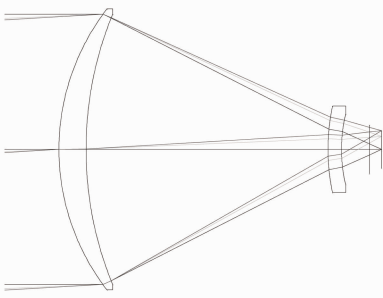


图 2 两片式光学系统结构图

Fig. 2 Configuration of two-lens optical system

图 3 为常温 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 下的 MTF 曲线,像元尺寸对

红外光学材料的光焦度温度系数、阿贝常数和热膨胀系数,对比表中数据,确定选择光焦度温度系数最小的硫系玻璃 IG6 为正透镜,光焦度温度系数最大且色散最小的锗为负透镜。

消热差光焦度分配方程组是高斯光学计算结果,所以在优化时各组的光焦度还需要调整以转化为实际厚透镜的结果。确定后组负透镜的入射光高 h 将使光焦度分配唯一化,但严格限制光焦度分配会导致系统变量过少,难以校正单色像差。不妨先取 h 为 0.2,以获得初始的光焦度分配,待优化时将其设为变量有利于像差校正。利用 Zemax 光学设计软件进行像差平衡自动优化设计。最终优化的光焦度分配如表 3 所示。优化后的 h 为 0.12,光焦度分配满足两片式消热差系统的光焦度分配方程,设计结果验证了上述改进方法的正确性。

应的奈奎斯特频率处,即 30 lp/mm ,全视场的 MTF 值都大于 0.45,接近衍射极限。

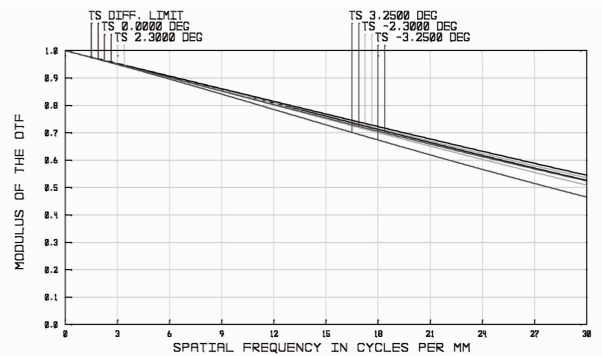


图 3 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 下的 MTF 曲线

Fig. 3 MTF curves at $20 \text{ }^\circ\text{C}$

利用 Zemax 软件进行热环境分析。图 4 为 30 lp/mm 处的各个视场的 MTF 随温度变化情况,在 $-40 \text{ }^\circ\text{C} \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内,轴上视场的 MTF 大于 0.52, 0.7 视场子午和弧矢方向的 MTF 都大于 0.48, 1.0 视场子午和弧矢方向的 MTF 都大于 0.46。MTF 在 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 温宽范围内的波动很小,轴上视场的 MTF 波动最小,小于 0.01, 1.0 视场弧矢方向的 MTF 波动最大,但仍小于 0.02。这些数据说

明该物镜具有很好的热环境适应性,满足 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内的被动消热差要求。

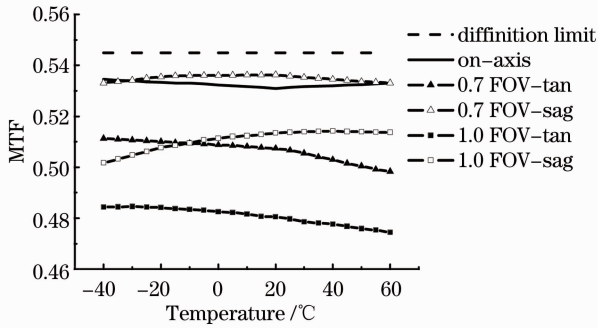


图 4 30 lp/mm 处的 MTF 随温度的变化
Fig. 4 Relationship between MTF and temperature at 30 lp/mm

图 5 为正透镜衍射面的相位及周期与径向距离的关系,此衍射元件的环带数为 15 个,衍射面台阶周期沿径向越来越小,到边缘处最小台阶间隔约为 1.56 mm,常规的单点金刚石车削技术可以保证其加工精度。

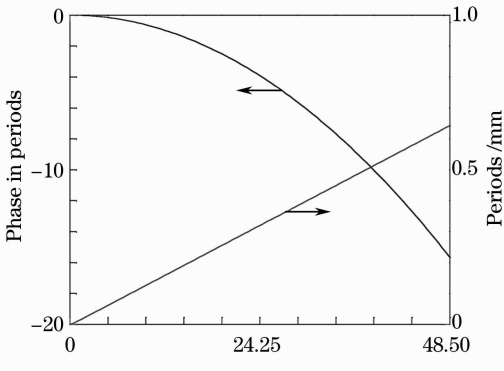


图 5 衍射元件的相位及周期和径向距离的关系
Fig. 5 Relationship between phase line frequency and radial distance

2.3 镜筒材料选择

前面的分析和优化中没有考虑镜筒材料的热膨胀导致的结构热差,优化结果适用于光学系统的镜筒材料为热膨胀系数接近零的钢,如果镜筒材料为热膨胀系数较大的钢或铝,优化后的光焦度分配结果与上面结果会稍有不同,系统结构形式相同。

图 6 为钢、钢和铝三种之间的温度与离焦的关系,虚线之间为焦深范围 $\pm 28.8\text{ }\mu\text{m}$,以离焦小于焦深范围为消热差温度范围判据,钢筒筒的光学系统消热差范围大于 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$,钢筒筒的光学系统消热差范围约为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$,铝筒筒的光学系统消热差范围约为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

导致不同镜筒材料的消热差范围不同的原因是

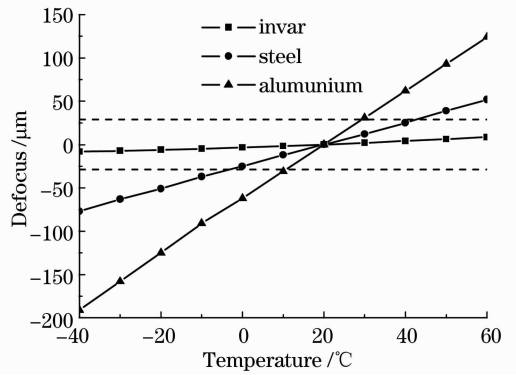


图 6 钢、钢和铝三种镜筒之间的温度与离焦的关系
Fig. 6 Relationship of temperature and defocus among invar, steel and aluminum

由于两片式结构的负透镜和衍射面的负热差都很小,仅能平衡正透镜产生的正热差,而不能补偿镜筒材料热膨胀引起的结构正热差,所以此系统的支撑结构需要采用热膨胀系数接近零的钢,合理的结构设计保证其轻量化要求。

3 样机与环境温度测试

3.1 样机及性能测试

采用单点金刚石车削加工光学非球面和衍射面,折衍混合透镜如图 7 所示,凹面圆环为衍射面周期台阶。图 8 为用钢筒筒装配完成的镜头样机。图 9 为该镜头的 MTF 测试结果,30 lp/mm 处的 MTF 优于 0.45,满足系统指标要求。

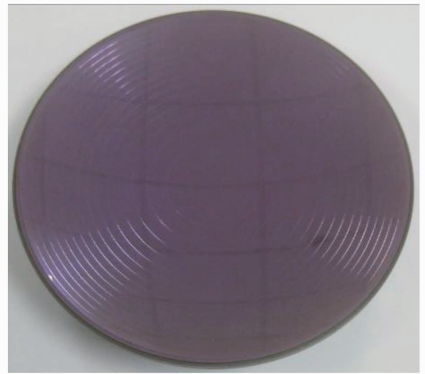


图 7 折衍混合透镜

Fig. 7 Refractive-diffractive hybrid lens

3.2 环境温度测试

对镜头样机进行环境温度测试,以验证其消热差性能。图 10 为环境温度测试原理图。红外差分黑体靶通过离轴抛物面平行光管准直成无限远目标。镜头样机装配在红外相机上,将其放置在高低温箱内,镜头通过高低温箱的双层隔热红外窗口对准平行光管,由上位机观测和采集其在高低温环境

下的成像情况,以此判断其消热差性能。图 11 所示分别为室温 25 °C、低温 -40 °C 和高温 60 °C 时的靶标图像,靶标边缘成像清晰,在低温和高温时都没有发生离焦,验证了光学系统的消热差性能。



图 8 两片式消热差光学镜头样机

Fig. 8 Prototype of two-lens athermal optical system

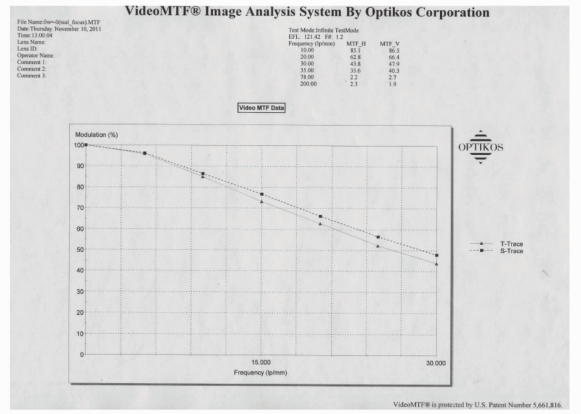


图 9 MTF 曲线的实测结果

Fig. 9 Testing result of the MTF curves

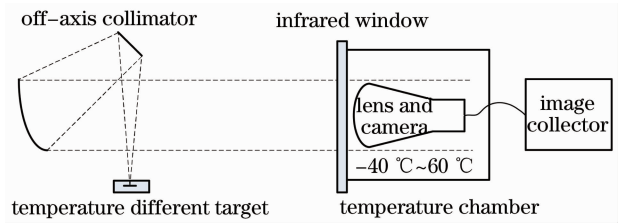


图 10 环境温度测试原理图

Fig. 10 Sketch for environment temperature test

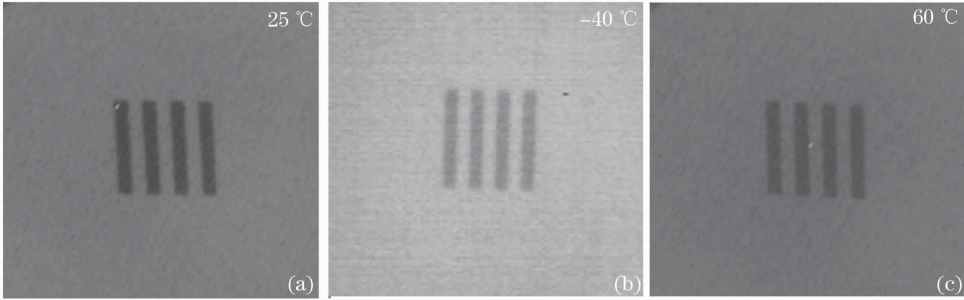


图 11 不同环境温度下的靶标图像

Fig. 11 Target images at different environment temperatures

4 结 论

给出了两片式远距结构消热差光学系统设计方法,将后组的光焦度引入消热差方程以简化光学结构,设计了适用于 640×480 非制冷 17 μm 长波红外探测器的消热差物镜。环境温度适应性成像测试结果表明,在 -40 °C ~ 60 °C 温度范围内,靶标成像清晰,验证了光学系统的消热差特性。与已报道的消热差光学系统相比,本设计具有光学镜片少、透射率高且结构紧凑的特点,能广泛应用于如机载侦察、弹载导引等环境温度波动大的场合。

参 考 文 献

1 Chuan Li, C J Han, George Skidmore, *et al.*. DRS uncooled VOx infrared detector development and production status [C]. SPIE, 2010; 76600.

2 Chuan Li, C J Han, George Skidmore. Overview of DRS uncooled VOx infrared detector development [J]. Optical Engineering, 2011, 50(6): 061017.
 3 Wu Xiaojing, Meng Junhe. Approach of athermalizing infrared optical systems [J]. Infrared and Laser Engineering, 2003, 32(6): 572-576.
 吴晓靖, 孟军和. 红外光学系统无热化设计的途径 [J]. 红外与激光工程, 2003, 32(6): 572-576.
 4 Wang Xuexin, Jiao Mingyin. Athermalization design for infrared optical systems[J]. J Applied Optics, 2009, 30(1): 129-133.
 王学新, 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 Hu Yuxi, Zhou Shaoxiang, Xiangli Bin, *et al.*. Design of athermal optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(10): 1386-1391.
 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.
 6 Chih-Wei Kuo. Achromatic triplet and athermalized lens assembly for both midwave and longwave infrared spectra [J].

- Opt Eng, 2014, 53(2): 021102.
- 7 Gao Jing. Athermalizing Optical System Design of Airborne Navigation Infrared Imager [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2013. 25-42.
高 婧. 机载导航热像仪无热化光学系统设计[D]. 西安: 西北工业大学, 2013. 25-42.
- 8 Zhang Xinting, An Zhiyong. Design of infrared athermal optical system for dual-band with double-layer harmonic diffraction element [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0622004.
张欣婷, 安志勇. 双层谱衍射双波段红外消热差光学系统设计[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0622004.
- 9 Liu Ying, Liu Jianzhuo, Li Chun, *et al.*. Athermal optical design of refractive/diffractive staring infrared earth sensor system [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0722001.
刘 英, 刘建卓, 李 淳, 等. 折/衍混合凝视型红外地平仪系统的无热化设计[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0722001.
- 10 Zhang Xin, Jia Hongguang, Zhang Yue. Optical design of athermalized infrared telephoto objective [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(1): 178-183.
张 鑫, 贾宏光, 张 跃. 远距离红外消热差物镜设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 178-183.
- 11 Xu Dawei, Xiang Yang, Wang Jian, *et al.*. Design on athermal refractive-diffractive hybrid vehicular infrared lens [J]. Infrared Technology, 2011, 33(8): 460-464.
徐大维, 向 阳, 王 健, 等. 折衍混合车载红外镜头无热化设计[J]. 红外技术, 2011, 33(8): 460-464.
- 12 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): 178-183.
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): 178-183.
- 13 Gong Dun, Tian Tiejun, Wang Hong. Design of wide band and large relative aperture star sensor optical system with asphere [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0822001.
巩 盾, 田铁印, 王 红. 含有非球面的宽波段大相对孔径星敏感器光学系统设计[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0822001.

栏目编辑: 韩 峰