

折/衍混合凝视型红外地平仪系统的无热化设计

刘 英 刘建卓 李 淳* 王 健 孙 强

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要 为了满足地平仪系统轻小、廉价、性能可靠的要求,设计了折/衍混合无热化凝视型红外地平仪系统。利用衍射元件特殊的像差特性和热差特性,采用折/衍混合广角 $f-\theta$ 镜头结构对地平仪系统进行大视场像差、色差和热差校正,采用反远距结构,保证系统具有足够的后工作距。设计结果表明,在温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 140° 广角 $f-\theta$ 镜头的线性特性小于 0.5% ;在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度变化范围内,空间频率 20 lp/mm 处光学系统的调制传递函数均大于 0.52 ,光学系统的波像差均小于 $\lambda/4$,系统设计接近衍射极限满足成像要求,优化设计后光学系统的后工作距离为 15 mm ,满足红外光学系统的装配需求。

关键词 衍射;广角; $f-\theta$ 镜头;无热化设计;红外;地平仪

中图分类号 TN21 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0722001

Athermal Optical Design of Refractive/Diffractive Staring Infrared Earth Sensor System

Liu Ying Liu Jianzhuo Li Chun Wang Jian Sun Qiang

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract An athermal optical design of a refractive/diffractive static infrared earth sensor, which meets the requirements such as portability, cheapness and reliability, is presented. The optical system has a wide-angle $f-\theta$ structure with a diffractive element introduced, which is beneficial to the correction of the monochromatic, chromatic and athermal aberrations. The inverse telephoto structure is adopted to achieve enough back-working distance. It is shown for the designed optical system that the $f-\theta$ linearity is less than 0.5% at $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, the field of view is 140° , the modulation transfer functions are greater than 0.52 at the spatial frequency of 20 lp/mm in the temperature range from $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ and the wave-front aberration is less than $\lambda/4$ for all situations, with a satisfactory back-working distance of 15 mm . These meet the requirements in the actual applications.

Key words diffraction; wide-angle; $f-\theta$ lens; athermal design; infrared; earth sensor

OCIS codes 040.6808; 110.3080; 260.1960

1 引 言

地平仪系统是通过探测地球的红外辐射,确定和控制航天器的空间运行姿态。地平仪系统有传统的扫描型和凝视型两大类,传统的扫描型地平仪是通过机械方式将整个地平圆图像扫描在红外探测器上,然后通过红外探测器的输出信号来确定航天器相对于地球的姿态。这类地平仪虽然可以在较宽范

围提供良好的精度,但是由于运动部件的存在,其可靠性受到了限制。而凝视型红外地平仪^[1,2]是对整个地平圆进行成像,使得红外探测器可以响应到较暖的地球与冷空间之间的热断续性,并以此来确定航天器的姿态。这类地平仪在体积、重量、造价及可靠性等方面都有较大的优势。此外,地平仪系统还需要适应不同的恶劣环境,只有通过环境适应性分

收稿日期: 2012-12-16; 收到修改稿日期: 2013-02-03

基金项目: 院地合作项目(2011CJT0004)和吉林省科技厅项目(20106015,20100310)资助课题。

作者简介: 刘 英(1980—),女,博士研究生,主要从事红外光学方面的研究。E-mail: liuying19801222@126.com

导师简介: 孙 强(1971—),男,博士,研究员,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: sunq@ciomp.an.cn

* 通信联系人。E-mail: xlf-0830@163.com

析,才能保证其性能的可靠性。传统的反射式凝视型红外地平仪系统^[3,4],虽然不需要热差校正,但是存在体积大、中心遮拦和杂散光严重等缺点;然而传统的透射式凝视型红外地平仪系统^[5~7],难以实现宽温度范围的热差校正。

本文利用衍射元件特殊的像差特性和热差特性^[8~10],设计了折/衍混合无热化凝视型红外地平仪系统。系统采用反远距结构,保证系统的后工作距为 15 mm;通过系统相对畸变的控制,使得广角 $f\theta$ 镜头^[11,12]的线性特性在环境温度 20 °C 时不超过 0.5%;通过对衍射元件相位参数的限制和优化,使得光学系统在 -20 °C ~ 40 °C 温度范围内,在空间频率 20 lp/mm 处的调制传递函数(MTF)均大于 0.52,系统的波像差均小于 $\lambda/4$,满足成像光学系统的设计要求。

2 系统参数选择和设计构想

宇宙空间的红外辐射主要来自各层大气,为了降低地表和对流层辐射变化的干扰,选择光学系统的工作波段为 14~16.25 μm ^[13],并取设计波长为 $\lambda_c = 15 \mu\text{m}$,光学系统全视场角 2ω 为

$$2\omega \geq 2\arcsin\left(\frac{R}{R+H}\right), \quad (1)$$

式中 R 为地球半径, H 为航天器轨道高度。选取航天器的运行轨道高度为 700 km,由(1)式可知系统的全视场角约为 128°。为了保证偏航时图像信息的完整,设计视场角应大于实际计算值,因此,设定光学系统的全视场角为 140°,该系统即为广角系统。

为了解决广角系统中大视场像差包括彗差、像散和畸变的问题,采用 $f\theta$ 镜头进行设计,即使系统的像高 y' 和视场角的弧度值 θ 呈线性关系:

$$y' = f'\theta, \quad (2)$$

式中 f' 为光学系统的焦距。

如果把 θ 对应的实际像高记为 $H(\theta)$,则有

$$q = \frac{H(\theta) - f'\theta}{f'\theta}, \quad (3)$$

式中 q 称为 $f\theta$ 线性特性。为了保证记录信息和后续图像处理的准确性,要求光学系统的 $f\theta$ 线性特性小于 0.7%。

典型的非制冷长波红外探测器的像元数为 320 pixel×240 pixel,像元大小为 $a = 30 \mu\text{m}$,则像面大小为 12 mm,像高 y' 为 6 mm,由(2)式可得系统的焦距为 $f' \approx 5.1 \text{ mm}$ 。由此可见该系统为短焦

系统,为了实现探测器和滤光片装配的方便性,必须保证系统具有足够的后工作距,为此在光学系统设计时,采用了反远距结构。对于非制冷红外系统来说,一般要求系统的 F 数小于 1,以此来保证光学系统的能量会聚能力。

由于锗材料在 14~16.25 μm 波长范围内,具有良好的透射特性,而且折射率远远高于传统的光学玻璃,利于系统初、高级像差的校正,因此,选择锗为透镜材料。此外,为了使得设备能在不同温度环境下工作,并保证系统结构的简易性,在设计时采用折/衍混合结构,实现系统的光学无热化设计^[14]。

3 折/衍混合元件减热差设计原理

在温度均匀变化下,光学元件的温度特性用光热膨胀系数 x_f 表示,定义为单位温度变化引起的光焦度变化量,即

$$x_f = -\frac{d\phi}{dT} = \frac{1}{f'} \frac{df}{dt}, \quad (4)$$

式中 ϕ 为光学元件的光焦度, T 为温度。

在薄透镜模型中,光学系统的光焦度 $\phi = (n - n_0)(c_1 - c_2)$,其中 c_1 和 c_2 为透镜两表面的曲率, n 为透镜的折射率, n_0 为透镜所处介质的折射率,光焦度对温度求微分,可得折射元件的光热膨胀系数^[15,16] x_f^r 为

$$x_f^r = \frac{1}{f} \frac{df}{dt} = \alpha_g - \frac{1}{(n - n_0)} \left(\frac{dn}{dt} - \frac{dn_0}{dt} \right), \quad (5)$$

式中 α_g 为材料的热膨胀系数。

同理,根据折射元件的光焦度公式^[15,16],可以推导出衍射元件的光热膨胀系数 x_f^d 为

$$x_f^d = 2\alpha_g + \frac{1}{n_0} \frac{dn_0}{dt}. \quad (6)$$

根据(4)~(6)式可知,折射元件的温度特性是由材料的热膨胀系数和折射率决定的,衍射元件的温度特性只由材料的热膨胀系数决定。对于锗材料 $\alpha_g = 5.7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, $dn/dt = 396 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$,则 $x_f^r = -126.24 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, $x_f^d = 11.4 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$,由此可知,用锗材料制作的折射元件的光热膨胀系数与用锗材料制作的衍射元件的光热膨胀系数差距很大,而且符号相反。

此外,为了满足光学被动减热差设计,并保证系统具有良好的成像质量,系统光焦度必须满足总光焦度分配、消轴向色差和消热差设计方程,即

$$\frac{1}{h_1} \sum_1^N h_i \phi_i = \phi, \quad (7)$$

$$\sum_1^N h_i^2 \frac{\phi_i}{v_i} = 0, \quad (8)$$

$$\frac{1}{(h_1 \phi)^2} \sum_1^N h_i^2 x_i \phi_i = \alpha_h L, \quad (9)$$

式中 N 为光学元件的个数 ($N = 3$, 如果光学元件个数不为 3, 那就需要将光学元件分为 3 组, 算出初始结构后, 再对每组进行透镜分解, 以满足实际需求), h_i 为第一近轴光线在各光学元件上的入射高度, ϕ_i 为各光学元件的光焦度, h_1 为第一近轴光线在第一个光学元件上的入射高度, v_i 为各光学元件的阿贝数, α_h 为镜筒的线膨胀系数, L 为镜筒的长度。(7) 式为光学系统的满足成像要求的总光焦度方程式, (8) 式为光学系统满足色差校正的方程式, (9) 式为光学系统满足光学离焦等于机械离焦要求的无热化方程。为了获得合理的光学初始结构, 一般需要归一化处理, 即设 $h_1 = 1$, h_i ($i = 2, 3$, 表示第 i 组透镜) 用 h_1 表示, α_h 和 L 为已知量, 这样三个方程三个未知数, 通过求解方程组就可以获得既可满足消色差又可满足减热差的光学初始结构, 然后通过软件中像差平衡、透镜拆分、结构控制等操作完成光学系统的最终优化设计。

4 设计结果及性能分析

通过以上分析, 首先设定光学系统中光线的入射高度, 机械外壳为铝材料, 为了避免红外光学材料对红外辐射的吸收, 在整个系统中仅采用 3 片透镜, 然后利用 (7)~(9) 式计算出所需光学系统的初始结构。通过软件优化后的光学系统光路如图 1 所示, 系统采用了“负-正-正”三片式反远距结构。其中, 负透镜 1 构成前组, 正透镜 3 和 4 构成后组, 孔径光阑 2 置于正透镜 4 的前焦面处, 构成像方远心光路, 以保证像面 6 上照度的均匀性, 镜片 5 为带通滤波

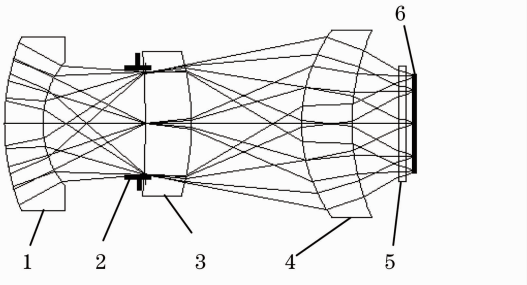


图 1 光学系统
Fig. 1 Optical system

片。系统的后工作距是指透镜 4 的后表面到像面 6 的距离, 后工作距的大小决定了系统装配的可行性, 间距太小会导致系统难以装配带通滤光片和探测器, 间隔太大会导致系统像差难以校正, 因此, 合理地选择后工作距是保证设计可行性的一个关键指标之一。综合两方面的因素, 在系统设计时将系统的后工作距控制在 15 mm。

图 1 中正透镜 3 的前表面靠近孔径光阑 2, 使得轴上点边缘光线在透镜 3 前表面上的入射高度最大, 也就是说透镜 3 对光学系统轴上点像差球差和彗差的影响最大, 因此选择在正透镜 3 的前表面加高次非球面对光学系统的初、高级球差和彗差进行校正。正透镜 4 远离孔径光阑 2, 边缘视场的主光线在透镜 4 上的入射高度最大, 使得透镜 4 对光学系统的大视场像差包括彗差, 像散以及畸变影响最大, 同时为了避免过多非球面的使用, 选择在透镜 4 前表面的非球面基础上加衍射面, 这样既可以实现非球面对大视场像差校正的目的, 又可以实现衍射面对光学系统热差和色差校正的目的。设计结果表明, 在充分考虑像差分布和系统能量透过率的情况下, 系统在三片式的基础上仅采用两个非球面便可实现光学系统的优化设计。图 2 给出了光学系统优化后能够满足系统无热化要求的衍射面环带频率、相位周期与衍射面半口径之间的关系曲线, 其中曲线 a 表示环带频率与衍射面半口径大小之间的变化关系, 环带频率是指单位长度内包含环带周期的个数, 曲线 b 表示衍射面的相位周期与衍射面半口径大小之间的变化关系, 相位周期是指整个衍射面对应的连续相位大小除以 2π 所获得的整个口径内环带的个数。从图中可以看出, 在整个衍射面内环

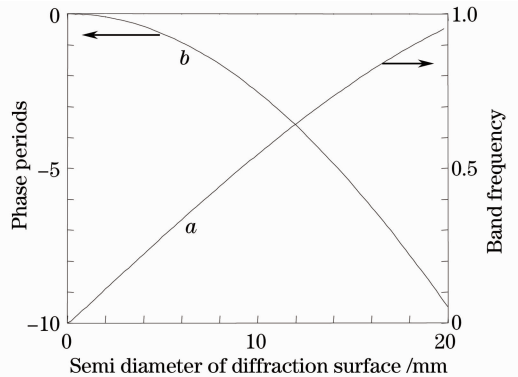


图 2 衍射面环带频率和相位周期与表面半口径之间的关系曲线

Fig. 2 Relationship among diffraction surface band frequency, phase periods and surface semi diameter

带数为 10 个,最高环带频率约为 1,则衍射面的最小环带间隔约为 1 mm,目前单点金刚石车削技术可以完成最小环带间隔为 100 μm 左右的环带加工,因此,本设计中的衍射面面型是完全可以加工的。

利用光学设计软件 Zemax 的优化控制和像质评价,得到了光学系统最终的结构参数,如表 1 所示。

图 3(a)~(d)是光学系统分别在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的 MTF 曲线图,其横坐标为像面上的空间频率,纵坐标为光学系统的 MTF 值。由此可以看到在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,光学系统在各个视场的 MTF 均大于 0.52,系统能够保持较好的

成像质量。

表 1 光学系统的参数

Table 1 Parameters of the optical system

Parameter	Value
Wavelength / μm	14~16.25
Field / ($^{\circ}$)	140
Diameter (entrance pupil) / mm	10
F	0.6
Optical material	Ge
Drawtube material	Ti alloy($\alpha_b = 10.03 \times 10^{-6}$)
Back focal length / mm	15
Total length / mm	80
Environment temperature / $^{\circ}\text{C}$	$-20\sim 40$

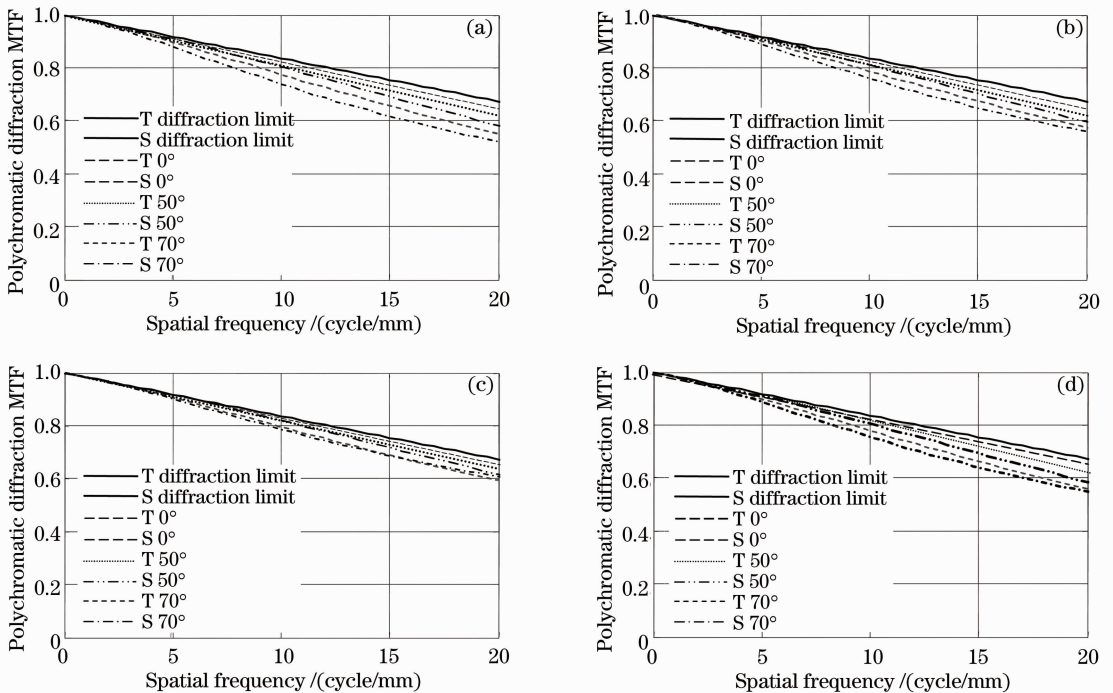


图 3 系统的 MTF。(a) $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) $0\text{ }^{\circ}\text{C}$; (c) $20\text{ }^{\circ}\text{C}$; (d) $40\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 3 MTF of system. (a) $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) $0\text{ }^{\circ}\text{C}$; (c) $20\text{ }^{\circ}\text{C}$; (d) $40\text{ }^{\circ}\text{C}$

图 4 给出了一 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内光学系统的波像差变化曲线。 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时系统的波像差最大为 0.162λ ,满足像质评价“瑞利判据”标准,即实际波面与理想波面的最大差值小于 $\lambda/4$,此时波面可看作是无缺陷的。

图 5 为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时光学系统的 $f-\theta$ 线性特性曲线图,从图中可以看出光学系统在环境温度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 $f-\theta$ 线性特性小于 0.5% ,从而保证了信息记录的真实性以及后续图像处理的准确性,实现了高精度卫星姿态控制。

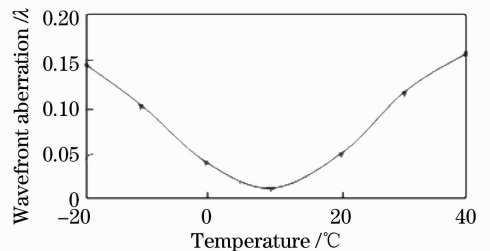
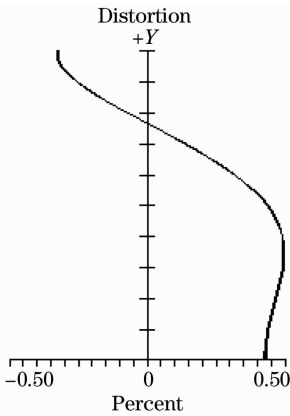


图 4 环境温度和波像差的关系

Fig. 4 Relationship between environment temperature and wavefront aberration

图 5 20 °C 时系统的 $f-\theta$ 线性特性曲线图Fig. 5 Linear characteristic of $f-\theta$ lens at 20 °C

5 结 论

地平仪系统工作在恶劣环境条件下,首先要通过环境适应性分析,才能充分保证系统性能的可靠性。本文给出了折/衍混合凝视型广角地平仪光学系统的减热差设计思想、设计结构以及像质评价。设计结果表明,折/衍混合结构不但具有良好的减热差特性,而且还能使得各种初、高级像差得到很好的校正,使系统的彗差、像散和畸变得到了很好的控制和平衡,使得光学系统的 $f-\theta$ 线性特性小于 0.5%,在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内,空间频率 20 lp/mm 处光学系统的 MTF 均大于 0.52,光学系统的波像差均小于 $\lambda/4$,并通过采用反远距结构,保证了光学系统具有足够的后工作距。因此,该系统设计不但保证了系统在环境温度变化时具有良好的成像质量,还保证了信息记录的真实性以及后续图像处理的准确性,提高了卫星姿态控制的精度,从而实现了现代地平仪系统轻小、廉价、性能可靠的设计要求。

参 考 文 献

- 1 C. A. Marshall, N. R. Butter, R. Blackwell *et al.*. Uncooled infrared sensors with digital focal plane array [C]. *SPIE*, 1996, **2746**: 23~31
- 2 E. D. Palik. Handbook of Optical Constant of Solids [M]. New York: Academic Press, 1985. 469~475
- 3 W. G. Kargbaum, S. J. Lee, A. Y. Okamoto. Microbolometer Earth Sensor Assembly [P]. USA Patent: 6026337
- 4 Dong Feng. Focal plane array static earth sensor [J]. *Infrared*, 2002, (2): 8~13
董 峰. 面阵焦平面静态地平仪[J]. *红外*, 2002, (2): 8~13
- 5 Lü Yinhuan, Cui Weixin, Zhang Tao *et al.*. Analysis on environmental adaptability of wide-angle infrared objective [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(6): 884~886

- 吕银环,崔维鑫,张 涛等. 广角红外物镜环境适应性分析[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(6): 884~886
- 6 Shen Weiming, Xue Mingqiu, Yu Jianjun. Optical design of a wide-angle lens for long-wave infrared earth sensors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, **10**(4): 329~332
沈为明,薛鸣球,余建军. 长波红外广角地平仪镜头的光学设计[J]. *光学精密工程*, 2002, **10**(4): 329~332
- 7 Liu Ying, Wang Jing, Qu Feng *et al.*. Optical design of a 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
- 8 Liu Ying, Sun Qiang, Lu Zhenwu *et al.*. Design of hyper-spectral imaging system with harmonic diffraction element in medium and long infrared [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(3): 579~585
刘 英,孙 强,卢振武等. 谐衍射中、长波红外超光谱成像系统设计[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(3): 579~585
- 9 Liu Ying, Sun Qiang, Lu Zhenwu *et al.*. Study on hyper-spectral imaging system with harmonic diffraction element in medium and long infrared [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59** (10): 6977~6984
刘 英,孙 强,卢振武等. 折射/谐衍射红外双波段成像光谱仪系统研究[J]. *物理学报*, 2010, **59**(10): 6977~6984
- 10 Liu Ying, Pan Yulong, Wang Xuejin *et al.*. Design on imaging system with harmonic diffraction element in terahertz multi-band [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16** (11): 2065~2071
刘 英,潘玉龙,王学进等. 谐衍射/折射太赫兹多波段成像系统设计[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(11): 2065~2071
- 11 Ji Tiejun, Liu Hongjun, Shen Weimin. Optical design of $f-\theta$ lens [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(1): 73~76
季铁群,刘红军,沈为民. $f-\theta$ 镜头的光学设计[J]. *光子学报*, 2007, **36**(1): 73~76
- 12 Wang Zhaoqi, Liu Juan, Fu Rulian. Design of hybrid refractive-diffractive $f-\theta$ lens working on infrared wavelength band [J]. *Infrared Technology*, 2006, **28**(2): 77~80
王肇圻,刘 娟,傅汝廉. 红外折/衍混杂 $f-\theta$ 镜研究[J]. *红外技术*, 2006, **28**(2): 77~80
- 13 Li Yuheng, Yi Kechu, Tian Hongxin. New method to improve the accuracy of attitude determination based in an onboard infrared earth sensor [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2007, **26**(3): 178~181
李于衡,易克初,田红心. 一种提高红外地平仪确定卫星姿态精度的方法[J]. *红外与毫米波学报*, 2007, **26**(3): 178~181
- 14 Qu Hemeng, Zhang Xin, Wang Lingjie *et al.*. Design of a low F-number compact athermalizing infrared optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **30**(3): 0322003
曲贺猛,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, **30**(3): 0322003
- 15 Chen Xiao, Yang Jianfeng, Ma Xiaolong *et al.*. Athermalization design of wide temperature range for hybrid refractive-diffractive objective in $8\sim 12\ \mu\text{m}$ [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2089~2093
陈 潇,杨建峰,马小龙等. $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 折-衍混合物镜超宽温度消热差设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2089~2093
- 16 Liu Lin, Shen Weimin, Zhou Jiankang. Design on athermalised middle wavelength infrared optical system with large relative aperture [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 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**(2): 675~679

栏目编辑: 韩 峰