

含有非球面的宽波段大相对孔径星敏感器 光学系统设计

巩 盾 田铁印 王 红

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要 星敏感器一般由光学系统和光电传感器两部分组成, 其中光学系统是最主要的组成部分。星敏感器光学系统的技术指标与成像质量要求较高, 并且其体积与重量需严格限制, 设计难度较大。在满足体积要求的前提下选择最佳系统结构, 合理分配光焦度以减小系统的高级像差与畸变, 同时使系统为远心光路; 采用特殊色散玻璃校正系统较宽波段范围的色差, 并加入非球面以提高系统成像质量。结果表明光学系统各视场实测调制传递函数大于 0.344(奈奎斯特频率处), 实验室静态传递函数大于 0.2(奈奎斯特频率处), 成像弥散斑 80% 的能量集中在直径为 23 μm 区域内, 相对畸变小于 0.1%, 满足技术指标与成像质量要求。

关键词 光学设计; 星敏感器; 消色差; 非球面

中图分类号 V248.3 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201333.0822001

Design of Wide Band and Large Relative Aperture Star Sensor Optical System with Asphere

Gong Dun Tian Tiejin Wang Hong

(Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology Chinese Academy of Sciences, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract The star sensor is composed of an optical system and a photoelectric sensor, and the former is the most important part. The star sensor optical system requires high imaging quality and good technical indexes, and its volume and weight are strictly limited, so that the corresponding optical design is difficult. In the premise of meeting volume requirements, the best system structure is selected, and the focal power is reasonably distributed to reduce distortion and high order aberration. At the same time, the system is made as a telecentric light path. Special dispersion glass is adopted to correct chromatic aberration of wide band range, and the asphere is adopted to improve imaging quality. The results show that the measured modulation transfer function (MTF) of each field is more than 0.344 (at Nyquist frequency), the laboratory static MTF is more than 0.2 (at Nyquist frequency), 80% of the imaging dispersion spot energy is focused inside 23 μm , and the relative distortion is less than 0.1%. The technical indexes and the imaging quality requirements are satisfied.

Key words optical design; star sensor; apochromatic; asphere

OCIS codes 080.2740; 120.4570; 220.2740

1 引 言

近年来随着现代航天器技术的发展, 空间遥感器作为航天器的主要载荷, 对其分辨率和系统成像质量要求不断提高。为了满足测绘需求, 空间遥感器的成像质量需要达到或接近衍射极限, 并且成像时稳定性要求极高。因此, 遥感器系统的姿态稳定性对成像质量的影响十分显著。

航天器飞行时, 姿态信息的获取和测量是航天器姿态控制系统中必不可少的重要环节, 是航天器平稳飞行和遥感器稳定成像的前提, 获取姿态信息的系统组件就叫姿态敏感器。姿态敏感器主要分为惯性陀螺、地球敏感器、太阳敏感器和星敏感器等, 其中, 星敏感器是一种以恒星为参照系的高精度的空间姿态测量装置。相比于其他姿态敏感器, 星敏感器具有测

收稿日期: 2012-11-16; **收到修改稿日期:** 2013-01-09

基金项目: 国家自然科学基金(60507003)

作者简介: 巩 盾(1982—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事光学设计和光学仪器总体设计等方面的研究。

E-mail: gongdun@sina.com

量精度高、漂移小和自主导航等优点,广泛应用于空间遥感、空间测绘、行星探测和洲际导弹等诸多领域。

星敏感器一般由光学系统和光电传感器两部分组成,主要经历了早期星敏感器、第一代 CCD 星敏感器和第二代 CCD 星敏感器三个阶段。早期星敏感器使用析像管和光电倍增管作为探测器件,不能应用于空间环境。1975 年,美国喷气推进实验室研制成世界上首台第一代 CCD 星敏感器,第一代 CCD 星敏感器视场小、体积大、姿态计算时间长。随着光学系统技术参数的提高和 CCD 技术的成熟,视场更大、探测能力更强、姿态计算更快的第二代 CCD 星敏感器逐渐研制成功。

现代星敏感器需要更强的探测能力、更宽的谱段范围以及更小的体积、更轻的质量,光学系统作为其中最主要的组成部分,决定了星敏感器的性能指标。光学系统的技术参数主要包括视场、焦距、相对孔径和谱段范围。因此,研制更宽谱段、更长焦距、更大相对孔径并且质量轻、体积小的星敏感器光学系统成为现在的热点课题^[1-4]。本文采用全新初始结构,由含有非球面的 6 片透镜设计了一套光学系统。该系统经过装调,实测成像质量良好,满足系统技术指标要求。

2 光学系统参数

星敏感器光学系统的技术指标由 CCD 光谱响应范围、几何尺寸、像素大小以及目标恒星的星等、目标恒星的光谱分布和姿态算法对成像质量的要求等因素决定的,并受限于系统的体积与重量。根据上述因素,确定系统的焦距、相对孔径、视场、光谱范围、弥散圆尺寸、传递函数等参数。

- 1) 焦距 100 mm;
- 2) 相对孔径 1/1.165;
- 3) 视场 $2\omega=6.5^\circ$, 无渐晕;
- 4) CCD 像素尺寸 $14\ \mu\text{m}$;
- 5) 谱段范围 470~830 nm;
- 6) 中心波长 650 nm;
- 7) 镜片数不多于 6 片;
- 8) 后截距大于 5 mm;
- 9) 弥散斑 80% 能量集中在 $28\ \mu\text{m}$ 内;
- 10) 全视场相对畸变小于 0.1%;
- 11) 静态调制传递函数(MTF) $f_{\text{MT},s} \geq 0.2$ (奈奎斯特频率处)。

静态调制传递函数 $f_{\text{MT},s}$ 由光学调制传递函数 $f_{\text{MT},o}$ 和探测器的调制传递函数 $f_{\text{MT},d}$ 的乘积确定;

$f_{\text{MT},o}$ 由光学设计调制传递函数 $f_{\text{MT},d}$ 和加工的衰减因子 $f_{\text{MT},p}$ 确定; $f_{\text{MT},d}$ 则由几何调制传递函数 $f_{\text{MT},g}$ 和电子学调制传递函数 $f_{\text{MT},e}$ 确定,因此可得如下关系^[5-6]:

$$f_{\text{MT},s} = f_{\text{MT},o} f_{\text{MT},d} = f_{\text{MT},d} f_{\text{MT},p} f_{\text{MT},e} f_{\text{MT},g}, \quad (1)$$

式中 $f_{\text{MT},e}$ 为 0.95, $f_{\text{MT},g}$ 为 0.637, 根据工程经验取 $f_{\text{MT},p}$ 为 0.85。

计算得静态调制传递函数大于 0.2 (奈奎斯特频率处) 时, 光学设计调制传递函数应大于 0.4 (奈奎斯特频率处)。同时, 考虑到加工装调的影响, 光学设计的成像弥散圆 80% 能量应集中在直径为 $25\ \mu\text{m}$ 区域内。

3 光学系统初始结构的选取

随着光学设计的发展, 产生了多种结构形式的光学系统, 根据星敏感器光学系统的系统参数, 可以选择双高斯型、佩茨瓦尔型、远摄型和折反式等多种系统结构。几种结构形式的初始设计如图 1~4 所示。

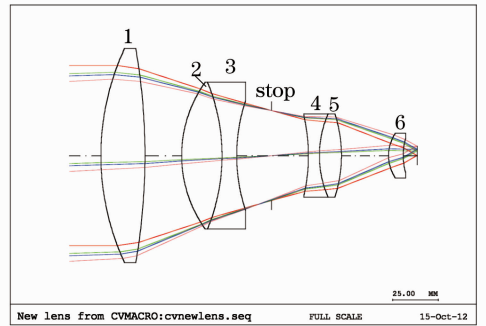


图 1 双高斯结构

Fig. 1 Double Gauss structure

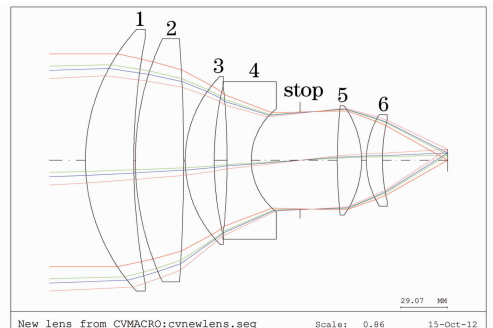


图 2 远摄型结构

Fig. 2 Long-focal structure

经过设计计算, 这几种初始结构都不能满足技术指标要求, 双高斯结构与远摄结构的孔径光阑位于前、后组镜片中间, 造成前组镜片口径较大, 厚度较厚, 大大增加了光学系统的体积与质量。

为了减小前组镜片口径, 将佩茨瓦尔结构的光

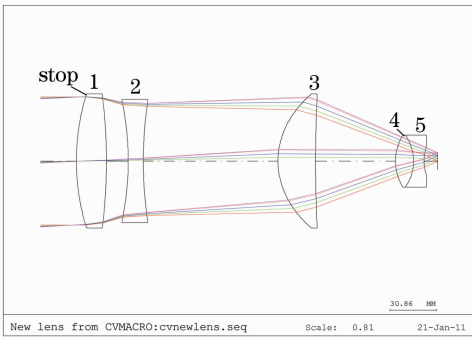


图 3 佩茨瓦尔结构
Fig. 3 Petzval structure

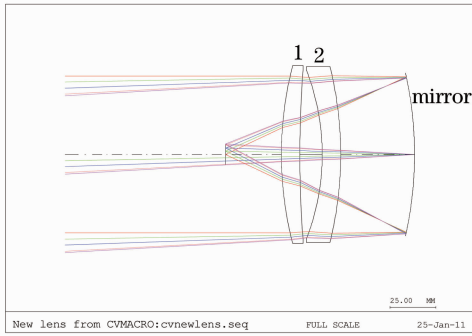


图 4 折反式结构
Fig. 4 Reflective-refractive structure

阑置于第 1 片透镜上,前、后组镜片之间加入同心齐明透镜,增大系统的相对孔径。但改进型的佩茨瓦尔结构筒长较长,增大了光学系统的体积。

折反式结构采用一片球面反射镜与两片无光焦度的透镜组成,光线两次经过透镜组,可以有效地减小较宽波段的色差,但由于系统像差的校正量少,系统的轴外成像质量较差,不能满足视场要求^[7-8]。

综合各方面原因,最后将系统结构设计为远摄型与佩茨瓦尔型的过渡型结构,这种结构的光阑位于第 1 片透镜上,前、后组透镜的口径较小,筒长适中,有效控制了光学系统的体积与重量。系统轴上、轴外成像一致性较好,畸变较小,并且可设计为像方

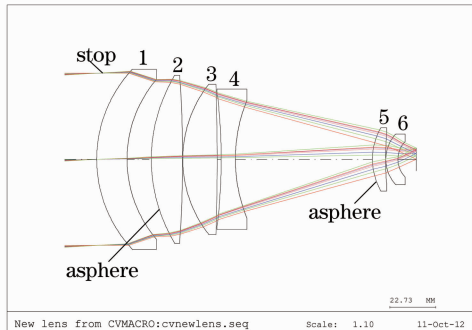


图 5 设计的光学系统结构
Fig. 5 Structure of the designed optical system

远心光路,调焦不会影响系统的测量精度。系统结构如图 5 所示。

4 光学系统设计与优化

4.1 光学系统光焦度分配

选择初始结构后,对光学系统进行优化设计。首先要合理分配光学系统前后组各片透镜的光焦度,合理分配光焦度是优化设计的第一步,也是优化设计的基础。光学系统为 3 组 6 片结构,根据几何像差理论,高级球差和高级像散可由下式计算:

$$S_1^{\text{II}} = \frac{1}{8} S_1 [(i' - u)^2 + (i' + u)^2 + (i + i')^2], \quad (2)$$

式中 S_1^{II} 为高级球差, S_1 为初级球差, i 为折射面的入射角, i' 为折射面的折射角, u 为折射面的孔径角。

$$S_{\text{III}}^{\text{II}} = \frac{1}{2} S_{\text{III}} \frac{i' + i_p/2}{i' - i_p}, \quad (3)$$

式中 $S_{\text{III}}^{\text{II}}$ 为高级像散, S_{III} 为初级像散, i'_p 为通过光阑的主光线在折射面上的折射角。

同时,高级正弦差与高级球差有关,高级场曲又由高级像散决定,以上高级像差都可以通过折射面的入射角和折射角以及光阑的位置计算。因此,合理的分配各透镜的光焦度,不使某一片透镜的光焦度过大,可以使光线流畅地通过各折射面,不产生较大的偏折角,减小各透镜产生的高级像差。经过分配后,除第 3 片透镜光焦度较大外,其他透镜光焦度均较小,提高了系统成像质量并降低了透镜的公差要求。

为了在满足星敏感器测量精度的同时不引起调焦误差,系统需要设计为像方远心光路。像方远心光路指光学系统的像方主光线平行于光轴,光学系统出瞳在像方无限远处。当像面沿光轴离焦时,主光线在新的焦面上的投射高度保持不变,调焦不会引起测量误差。

星敏感器光学系统的孔径光阑在第 1 片透镜上,系统为像方远心光路时孔径光阑经其他各片透镜所成的像即出瞳应在无穷远处。通过分配各片透镜的光焦度,使第 1 片透镜在其他透镜组成的组合系统的前焦点处,实现像方远心光路^[9-10]。

4.2 透镜光学材料的选择

星敏感器光学系统波段范围较宽,达到 470~830 nm,色差校正难度大。为了增强系统的复消色差能力,透镜 2 与透镜 3 采用德国 SCHOTT 公司生产的 FK51 型特殊色散玻璃作为正透镜,前组的负透镜采用高色散材料,增大正负透镜的色散差。

后组采用折射率与阿贝数都较大的镧系玻璃校正残余的彗差、像散与色差。

4.3 利用非球面提高系统成像质量

光学材料选择后对光学系统进行优化,由于透镜片数少,光学系统的优化参数不足,只能校正色差、球差与畸变,残余的彗差与像散较大,造成光学系统轴外视场的成像质量较差,不能满足技术指标要求。

增加系统优化参数的方法主要有增加透镜片数和加入特殊表面。受体积与重量限制,星敏感器光学系统不能增加透镜片数,只能加入特殊表面。加入的特殊表面可以分为多种表面类型,如非球面、衍射面和自由曲面。其中衍射面有色差校正能力强、热光学性能好的优点,但对于可见光宽谱段光学系统,衍射面的加工精度要求极高,难度极大,尚处在探索阶段,实用性不强;自由曲面大大提高了系统的像差校正自由度,但由于自由曲面的非对称性和像差校正的复杂性,目前还缺少有效的加工、检测和装调手段。

综合以上因素,选择加工、检测手段较成熟的二次非球面加入光学系统。目前,透镜非球面的加工手段多为车削工艺,考虑到工艺需要,选择对透镜的凸面进行车削,完成非球面加工^[10]。根据系统各表面的像差校正敏感度,选择在系统的第2片与第5片透镜的凸面上加工非球面,面形参数如表1所示。

表1 非球面面形参数

Table 1 Surface parameters of aspheres

Lens number	Type of surface	Diameter /mm	Conic
2	Ellipsoid	79.2	-0.308
5	Ellipsoid	29	-0.569

5 光学系统成像质量

5.1 理论设计成像质量

未加入非球面和加入非球面的光学系统调制传递函数曲线如图6、7所示,非球面的加入大大提高了光学调制系统传递函数,使得轴上与轴外各视场的成像质量基本一致。

各视场奈奎斯特频率处的调制传递函数值如表2所示,由表2可知最低调制传递函数值为0.428,满足设计调制传递函数值大于0.4的成像质量要求。

光学系统点列图如图8所示,由图可知轴上与轴外各视场成像均匀,弥散斑接近圆形。光学系统能量集中度曲线如图9所示,由图可知,各视场成像

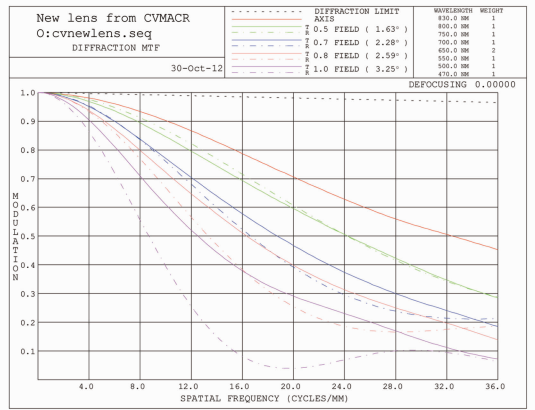


图6 未加入非球面的光学系统 MTF 曲线
Fig. 6 MTF curves of the system without asphere

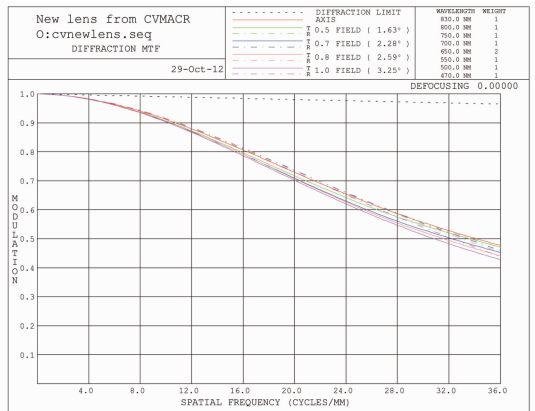


图7 加入非球面的光学系统 MTF 曲线
Fig. 7 MTF curves of the system with asphere

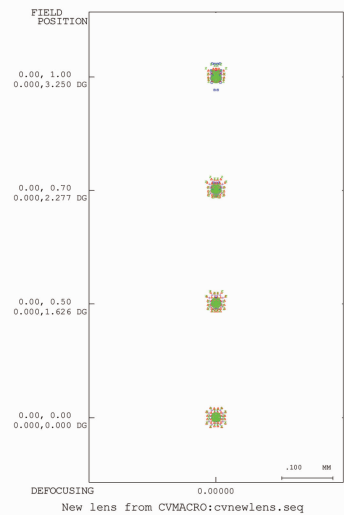


图8 光学系统点列图

Fig. 8 Spot diagram of the optical system
弥散斑 80%能量集中在直径 23 μm 的圆内,满足光斑直径小于 25 μm 的成像质量要求。

表 2 各视场 MTF 值

Table 2 MTF values of every field

Fields	MTF value (at Nyquist frequency)		
	Tangential	Sagittal	Average
0	—	—	0.477
0.5	0.471	0.469	0.470
0.7	0.452	0.460	0.456
1	0.428	0.438	0.433

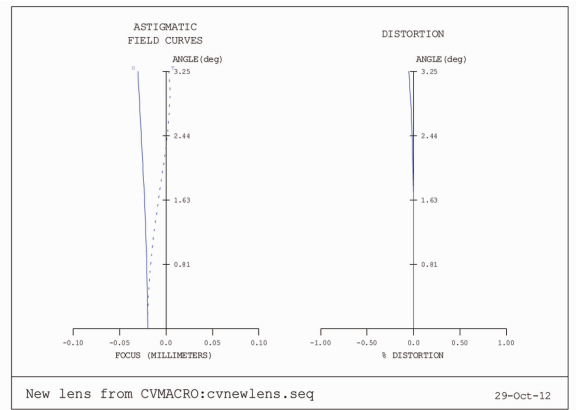


图 11 光学系统的视场曲线和畸变曲线

Fig. 11 Field curves and distortion curves of the optical system

表 4 光学系统各视场畸变

Table 4 Distortions of every field

Field	0.5	0.7	1
Distortion / %	-0.00255	-0.01099	-0.05234

5.2 实测光学系统成像质量

光学系统加工装调后,利用美国 OPTIKOS 公司生产的调制传递函数检测仪对光学系统进行检测,检测结果如表 5 所示。

表 5 各视场实测 MTF 值

Table 5 Measured MTF values of every field

Field	Test results of MTF value (at Nyquist frequency)		
	Tangential	Sagittal	Average
0	—	—	0.391
0.5	0.387	0.382	0.385
0.7	0.359	0.371	0.365
1	0.344	0.357	0.350

实测最小 MTF 值为 0.344(奈奎斯特频率处),略低于光学设计 MTF 值与加工装调衰减因子 0.85 的乘积。经分析,造成实测 MTF 值略低于理论值的原因两片 FK51 型特殊色散玻璃的阿贝数有微小差异,从而增大了系统的轴向色差,降低了 MTF 值。经计算,光学系统的最低实验室静态 MTF 值即实测最低光学 MTF 值与 CCD 几何 MTF 值和电子 MTF 值的乘积为 0.208(奈奎斯特频率处),仍大于 0.2,满足星敏感器光学系统技术指标要求。

光学系统装调后,还要对系统的相对畸变进行测量,测量系统由平行光管、焦面分划板、高精度网格、均匀照明 LED 灯和监视器组成。由于系统畸变很小,理论绝对畸变小于 3 μm,因此像点坐标采用 CCD 成像的灰度值进行细分求出,实现亚像素精度测量,测量结果如表 6 所示。

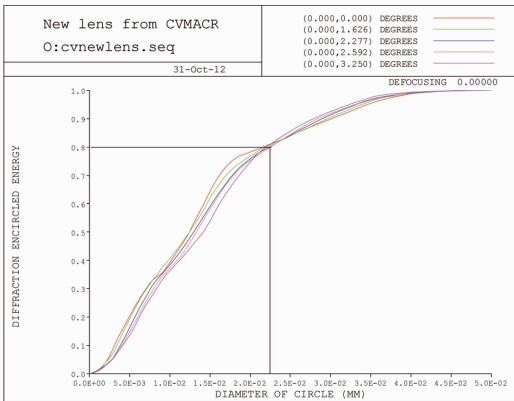


图 9 光学系统的能量集中度曲线

Fig. 9 Encircled energy curves of the optical system

倍率色差会影响星敏感器的测量精度,因此要对倍率色差进行校正,光学系统的倍率色差曲线如图 10 所示,各视场倍率色差如表 3 所示。

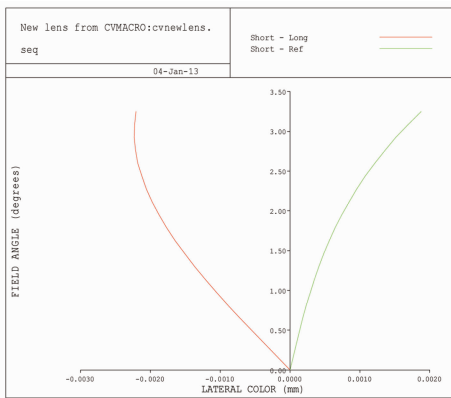


图 10 光学系统倍率色差曲线

Fig. 10 Lateral color curves of optical system

光学系统视场曲线与畸变曲线如图 11 所示,各视场畸变如表 4 所示。由表可知,最大相对畸变为 -0.052%,满足相对畸变小于 0.1% 的成像质量要求。

表 3 各视场倍率色差

Table 3 Lateral colors of every field

Field	Lateral color /mm	
	Short wave-reference wave	Short wave-long wave
0.5	-0.001641	0.000564
0.7	-0.002056	0.000957
1	-0.002202	0.001876

表 6 各视场实测相对畸变

Table 6 Measured relative distortions of every filed

Field	0.5	0.7	1
Distortion /%	-0.0305	-0.0188	-0.0591

畸变测量系统的测量精度约为 $1\ \mu\text{m}$, 在对较小视场测量时, 绝对畸变小于系统测量精度, 实测的畸变结果主要由测量误差产生, 影响了相对畸变测量的准确性。对 0.7 以上视场进行测量时, 相对畸变测量结果与理论结果基本吻合, 全视场最大相对畸变为 -0.059% , 满足相对畸变小于 0.1% 的技术指标要求。

6 结 论

设计的星敏感器光学系统具有波段宽、相对孔径大、畸变小和远心光路等优点, 在体积小、重量轻的前提下满足较高的成像质量要求。光学系统设计难度较大, 设计过程中优选了光学系统结构、合理分配各组元光焦度, 并采用特殊色散玻璃和非球面提高了光学系统的成像质量。光学系统设计 MTF 值大于 0.428(奈奎斯特频率处), 成像弥散斑 80% 的能量集中在 $23\ \mu\text{m}$ 内, 最大相对畸变为 -0.052% 。加工、装调后实测 MTF 值大于 0.344(奈奎斯特频率处), 实验室静态 MTF 值大于 0.2(奈奎斯特频率处), 最大相对畸变为 -0.059% , 光学系统成像质量良好, 满足技术指标要求。

参 考 文 献

1 Yang Haoming, Wang Lingjie, Weng Zhicheng, *et al.*. Optical system of light star tracker with wide field and large aperture [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(2): 151-154.

杨皓明, 王灵杰, 翁志成, 等. 大孔径大视场轻小型星敏感器光学系统[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(2): 151-154.

2 He Pengju, Liang Bin, Zhang Tao, *et al.*. Calibration method for wide field of view star sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(10): 1023001.

贺鹏举, 梁斌, 张涛, 等. 大视场星敏感器标定技术研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(10): 1023001.

3 Fan Qiaoyun, Li Xiaojuan. Selection of optical-system parameters for an all-day used star sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 1122001.

樊巧云, 李小娟. 全天时星敏感器光学系统设计参数选择[J]. *光学学报*, 2011, 31(11): 1122001.

4 Zhong Hongjun, Yang Mengfei, Lu Xin. Calibration method of star sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(5): 1343-1348.

钟红军, 杨孟飞, 卢欣. 星敏感器标定方法研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(5): 1343-1348.

5 Wang Jiaqi. *Optical Instrument Integrated Design* [M]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 1998. 3-5.

王家骥. 光学仪器总体设计[M]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械研究所, 1998. 3-5.

6 Gong Dun, Wang Hong, Tian Tiejun. Temperature effect on imaging performance of three-line CCD satellite camera and temperature indicators affirmed [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(6): 1213-1220.

巩盾, 王红, 田铁印. 离轴三反射系统的热光学分析和温控指标的制定[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(6): 1213-1220.

7 Zhang Yimo. *Applied Optics* [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1987. 375-378.

张以谟. *应用光学*[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987. 375-378.

8 Wang Zhijiang. *Optical Technical Manual* [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1988. 681-688.

王之江. *光学技术手册*[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988. 681-688.

9 Warren J Smith. *Modern Optical Engineering: the Design of Optical System* [M]. 2nd edition. New York: McGraw-HILL, 1990. 211-218.

10 Wang Zhijiang. *Optical Design Basic Theory* [M]. Beijing: Science Press, 1985. 78-122.

王之江. *光学设计理论基础*[M]. 北京: 科学出版社, 1985. 78-122.

11 Robert E Fischer. *Optical System Design* [M]. 3th edition. New York: McGraw-HILL, 2000. 315-352.

栏目编辑: 张腾