

文章编号 1004-924X(2007)02-0151-04

大孔径大视场轻小型星敏感器光学系统

杨皓明¹,王灵杰²,翁志成²,冯秀恒²,方志良¹

(1. 南开大学 现代光学研究所 光电信息技术教育部重点实验室,天津 300071;

2. 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:提出了一个大相对孔径、大视场轻小型 CCD 星敏感器光学系统设计方案,该星敏感器焦距为 22.5 mm, F 数为 1.2, 谱段范围 470~750 nm, 视场角 25°。采用双高斯基本型后加一片近乎等晕的正透镜,获得了较大的相对孔径,同时选择高折射率玻璃材料增大视场并降低轴上及轴外光束入射角,高折射率玻璃材料亦能降低高级像差且使系统总长缩短。像质分析表明,此设计方案能够满足使用要求,光学系统总长仅为 46.51 mm,满足实际工程轻量化需求。

关键词:星敏感器;折射;光学设计

中图分类号:V448.222 **文献标识码:**A

Optical system of light star tracker with wide field and large aperture

YANG Hao-ming¹, WANG Ling-jie², WENG Zhi-cheng², FENG Xiu-heng², FANG Zhi-liang¹

(1. *Key Laboratory of Opto-electronic Information Science and Technology, Ministry of Education, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China;*

2. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

Abstract: Star tracker composing of optical system, photoelectric receiver and image processing element is a key equipment of satellites for star position. In this paper, we present a optical system of light CCD star tracker with wide filed and large aperture in a focal length of 25 mm, a F -number of 1.2, a working wavelength range of 470~750 nm and a view angle of 25 degrees. The optical system is composed of a double-Gauss lens and a piece of positive lens, considering the large F number. In order to decrease the input angles of the axial and off-axial light bundle, the glass with high refractive index is used to produce smaller high-order aberrations and shorten the total length of the system. The imaging analysis results show that the design is a feasible scheme, and the total system length is only 46.51 mm.

Key words: star tracker; refraction; optical design

收稿日期:2006-04-22;修订日期:2006-11-18.

基金项目:中国科学院知识创新工程信息化建设专项(No. INF105SDB106)

1 引言^[1-6]

星敏感器用于定位恒星。利用星敏感器将瞬间视场中的若干恒星成像于光电探测器上,通过图像处理与已有图像,得出飞行器在空间惯性坐标的瞬间姿态误差,完成飞行器在空间惯性坐标系的姿态测量。随着航天事业的发展,星敏感器在空间飞行器姿态确定方面的应用已得到世界各国的关注。美国、苏联、日本等国都已积极开展该领域的专门研究。目前国内也有多家单位在对星敏感器进行开发研究,如北京航空航天大学、中科院西安光机所、苏州大学、长春光机所等。

本文针对实际工程需求,设计了一例大孔径、大视场小型星敏感器光学系统,在减小系统长度、体积和重量的同时,可以获得较大的视场及相对孔径。

2 CCD 星敏感器光学系统设计参数选择

星敏感器光学系统的设计指标是由所选用光电探测器的光谱响应、几何尺寸、所需探测的目标恒星、目标恒星的光谱分布以及后续拟合算法对像质的要求等诸多因素决定的。根据上述因素,能够确定系统焦距、相对孔径、视场、光谱范围、中心设计波长、系统透过率、弥散元尺寸、后工作距以及工作温度。

文中所述星敏感器光学设计指标见表 1:

表 1 光学设计指标
Tab. 1 Optical performance

能量分布	接近正态分布
渐晕	无
弥散圆形状	接近圆
相对孔径	1 : 1.2
视场	25°左右
光谱范围(μm)	0.47~0.75
中心设计波长(μm)	0.54
系统透过率	>85%
能量集中度	30 μm 集中 85% 能量

$f=22.5\text{ mm}$ 、视场角 25°,相对孔径 1 : 1.2,总长 46.51 mm,在光学特性及弥散斑大小方面都有所提高。

3 光学系统设计^[7,8]

星敏感器光学系统需保证恒星在 CCD 上的成像位置有一定的精度。因此像差校正时,需重点考虑引起像点中心位置偏移及几何失称的倍率色差、畸变和彗差三种像差。此外,为控制弥散圆在允许的范围内,还需同时校正轴向色差、球差、像散及场曲。根据以上像差校正分析及基本光学特性,本文选用复杂化的双高斯结构作为星敏感器光学系统的最初结构型式,同时拟选用高折射率材料来减少高级像差。下面将简要分析结构型式及材料的选择依据。

3.1 结构选型分析

典型的双高斯物镜为对称型结构,光阑处于前后组中间,相对孔径为 1 : 2~1 : 1.7,视场角 40~50°。由像差理论可知,对称型结构可以有效消减彗差、畸变和倍率色差几种垂轴像差,而轴向像差为半部的两倍,此外选择合适的光阑位置可以校正像散。以上分析表明,双高斯的结构型基本可以满足星敏感器光学系统像差校正的需要。实际设计时,考虑到该系统相对孔径较大,故在双高斯基本型后接了一片近于等晕的正透镜承担一定的光焦度,用以增大相对孔径。同时由于正透镜的引入,后组光焦度变大,使得整个系统主面后移,从而有利于加长后工作距离。

3.2 材料的选择

选择高折射率的玻璃材料有两种作用。首先,高折射率的玻璃材料能够使轴上光束和轴外光束的入射角迅速减小,提高相对孔径及增大视场,满足本文设计要求 F/1.2,视场 25°;其次,光焦度一定的情况下,高折射率玻璃使透镜半径增大,降低高级像差。同时透镜厚度减薄,使得系统总长缩短,可以获得更加紧凑的结构,实现小型化。因此,本文设计中选择了诸如重火石玻璃材料 ZF3、ZF2 等一类具有高折射率,高色散的玻璃材料。

4 设计结果

系统焦距 22.5 mm, F/1.2, 全视场 25°, 后截

由设计指标, 计算得到光学系统焦距

距 8.11 mm,系统总长 46.51 mm。光路图如图 1 所示。

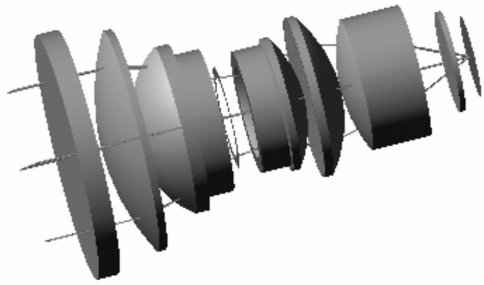


图 1 系统光路图: $F/1.2, f=22.5 \text{ mm}, 2W=25^\circ$
Fig. 1 Layout of the system: $F/1.2, f=22.5 \text{ mm}, 2W=25^\circ$

4.1 像质评价

在做像质评价时,重点分析了点列图、倍率色差及能量集中度。选取 0、0.5、0.7、0.85 及 1 等五个视场。波段选取长波 750 nm,参考波 540 nm 及短波 480 nm。

图 2 为五个视场下的点列图,表 2 给出对应视场下 RMS 光斑直径,可以看到全视场内弥散斑大小均匀。

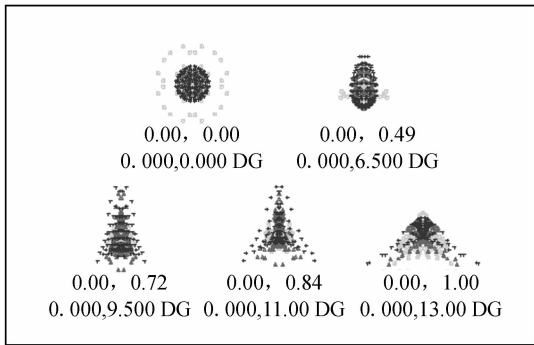


图 2 0,0.5,0.7,0.85,1 视场点列图
Fig. 2 Spot diagram

表 2 光斑直径的均方根值(RMS)
Tab. 2 Spot diameter (RMS)

视场(归一化)	RMS 直径大小(μm)
0	17.453
0.5	16.183
0.707	19.062
0.85	19.134
1	21.332

图 3 为倍率色差曲线,横坐标为倍率色差值,单位 mm,纵坐标代表视场。表 3 中给出长波~

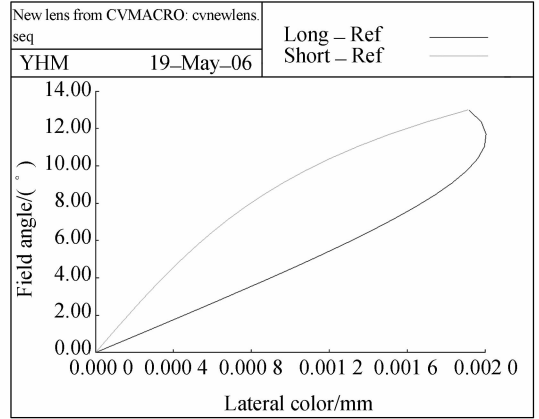


图 3 倍率色差曲线
Fig. 3 Lateral color

表 3 不同视场倍率色差值(mm)

Tab. 3 Values of lateral color(mm)

视场(归一化)	长波-参考波	短波-参考波
0	0	0
0.5	0.001 411	0.000 605
0.707	0.001 831	0.000 963
0.85	0.001 996	0.001 347
1	0.001 917	0.001 911

参考波及短波~参考波倍率色差值,单位为 mm。

在像差达到设计要求后,为了使全视场范围内能量满足 30 μm 集中 85% 能量的设计要求,可给系统一定的离焦量。表 4 为给出不同离焦量 85% 能量集中度下的弥散斑大小。

表 4 不同离焦量 85% 能量集中度下弥散斑大小(mm)

Tab. 4 Spot diameter of 85% encircled energy at different defocuses

视场 \ 离焦量	0	0.5	0.707	0.85	1
-0.026 mm	0.017 923	0.018 087	0.020 375	0.021 465	0.029 132
-0.027 mm	0.017 947	0.018 297	0.020 767	0.021 837	0.028 918
-0.028 mm	0.018 078	0.018 521	0.021 231	0.022 129	0.028 715
-0.030 mm	0.018 557	0.019 043	0.022 309	0.023 004	0.028 357
-0.035 mm	0.020 119	0.020 950	0.025 467	0.026 118	0.027 703

对比不同离焦量下集中 85% 能量不同视场弥散圆大小,可以发现 -0.035 mm 离焦量时,各视场弥散圆较均匀,故选取 -0.035 作为离焦量。此时能量集中度如图 4 中曲线,横坐标为从边缘

到质心的弥散圆直径大小,单位 mm,纵坐标为横坐标代表半径内所占能量比例,从曲线可知能量接近正态分布。

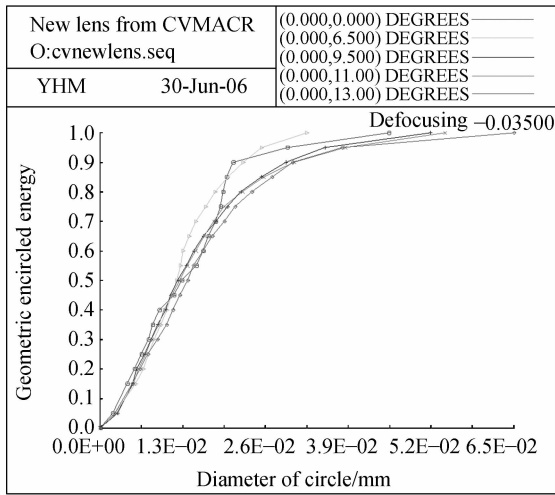


图 4 能量集中度曲线
Fig. 4 Encircled energy

对比设计指标,给出本文的设计结果如表 5:

表 5 设计结果参数

Tab. 5 Results of the final design

焦距	22.499 9 mm
相对孔径	1 : 1.2
弥散圆形状	接近圆
视场	25°
见晕	系统无见晕
光谱范围(μm)	0.47~0.75
中心设计波长(μm)	0.54
能量集中度	满足 30 μm 内集中 85% 能量

5 结 论

星敏感器光学系统属于大像差系统,对成像物体的分辨本领要求不高,但必须保证弥散圆在一定范围内。本文设计了一种星敏感器光学系统,该系统具有大相对孔径、大视场的特点,各项指标达到设计要求,特别满足能量集中度的要求。同时系统总长较短,仅 46.51 mm,满足星敏感器轻量化的需求。

参考文献:

- [1] LIU X P. Design of a novel star tracker optical system[J]. *SPIE*, 2004,5418:213-221.
- [2] 陈元枝. 适用于星敏感器的导航星星库制定[J]. *光学 精密工程*, 2000,8(4):331-334.
CHEN Y ZH. Constitution of guide star catalog for star sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000,8(4):331-334. (in Chinese)
- [3] 陈元枝. 连通聚类星识别方法[J]. *光学 精密工程*, 2000,8(3):217-220.
CHEN Y ZH. Method for star identification using connection cluster [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000,8(3):217-220. (in Chinese)
- [4] 郝胜国,郝志航. 星敏感器星像模拟软件的研究[J]. *光学 精密工程*, 2000,8(3):208-212.
HAO SH G, HAO ZH H. Star image simulation software of star-tracker[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000,8(3):208-212. (in Chinese)
- [5] 刘金国,李杰,郝志航. APS 星敏感器探测灵敏度研究[J]. *光学 精密工程*, 2006,14(4):553-557.
LIU J G, LI J, HAO ZH H, et al.. Study on detection sensitivity of APS star tracker[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(4):553-557. (in Chinese)
- [6] 李春艳,李怀锋,孙才红,等. 高精度星敏感器天文标定方法及观测分析[J]. *光学 精密工程*, 2006,14(4):558-563.
LI CH Y, LI H F, SUN C H, et al.. Astronomical calibration method and observation analysis for high accuracy star sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(4):558-563. (in Chinese)
- [7] 王之江. *光学技术手册*[M]. 北京:机械工业出版社,1987.
WANG Z J. *Optical technique handbook*[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1987. (in Chinese)
- [8] 李士贤. *光学设计手册*[M]. 北京:北京理工大学出版社,1996.
LI S X. *Optical design handbook*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996. (in Chinese)

作者简介:杨皓明(1980—),女,吉林长春人,2003年毕业于大连理工大学,同年获工学学士学位。现为南开大学博士研究生,主要从事光学设计及特殊光电成像镜头的研究。E-mail: yanghaoming@mail.nankai.edu.cn