

轻小型星敏感器光学系统的设计

吴峰^{1,2} 沈为民²

(1 常州工学院 电子信息与电气工程学院, 江苏 常州 213002)

(2 苏州大学 现代光学技术研究所, 江苏 苏州 215006)

摘要 介绍了星敏感器的工作原理,对光学系统的指标进行详细的分析,给出光学系统的设计结果和评价. 设计得到的镜头焦距 22.7 mm,相对孔径 1:1.4,视场角 17.1°×17.1°(圆视场角 24°),而长度仅 45.3 mm. 由七个球面透镜组成,光阑放在第二、三透镜之间.

关键词 星敏感器;光学设计;CCD 姿态测量

中图分类号 V448 **文献标识码** A

0 引言

星敏感器光学系统设计的公开报道比较少见. 文献[1]报道了使用 Matsutov-Bouwers 折反式结构设计星敏感器镜头,全视场角为 7°. 文献[2]的设计结果,全视场角为 8.5°,由六块透镜组成. 但具体的设计结果以及系统参数都没有介绍.

本文通过对折射式星敏感器光学系统的优化设计,减小系统的长度、体积和质量,同时保证较大的视场角和相对孔径,以满足星敏感器运行要求. 设计得到的系统焦距为 22.7 mm,相对孔径 1:1.4,视场角 17.1°×17.1°(圆视场角 24°),总长度仅 45.3 mm.

1 星敏感器光学系统设计指标

星敏感器光学系统相当于一个望远摄影物镜,把无穷远的恒星成像在焦平面上. 主要的设计指标有焦距、视场角、相对孔径、能量集中度、光谱范围、畸变、分波段倍率色差等.

焦距、视场角、相对孔径的确定,可以参考文献^[2,3]的方法. 本文的设计要求焦距为 22.7 mm,全视场角为 17.1°×17.1°(圆视场角 24°),*F* 数 1.4,通光口径 16.21 mm. 当 CCD 能探测到的最小光照度为 2.3×10^{-3} lux 时,光学系统的透过率为 0.8,通过计算,星敏感器能观察到 6 等星. 视场角的大小应该使得局部天区星图识别捕获三颗以上导航星或者全天星图识别捕获五颗以上导航星的概率接近^[4]100%. 从式(1)可见,选定 CCD 探测器的尺寸大小后,视场角和焦距相互制约,增大视场角,需减小焦距.

$$f' = \frac{h}{2 \tan \omega} \quad (1)$$

式中 f' 表示系统焦距, h 表示 CCD 的长或者宽, ω

为对应方向的半视场角.

指标要求能量成正态分布,85%的能量集中在直径为 30 μm 的圆内. 这样的要求由 CCD 探测器的特性以及求星像中心的方法决定^[5,6].

星敏感器光学系统的畸变过大,可以通过数字处理校正^[7],但会增加软件处理的时间,降低数字更新速率. 本文设计要求,畸变不大于 1%.

每颗恒星发出的光,其光谱范围大约为 100 nm. 色差特性考虑分波段倍率色差. 将光学系统光谱范围分成几个波段,每个波段的范围约 100 nm. 色差要求每个波段的倍率色差 RMS 值不大于 1 μm .

2 设计结果

本文给出一个光学设计的结果. 系统焦距 $f' = 22.7$ mm, $F/\# = 1.4$,视场角 17.1°×17.1°(圆视场角 24°),光谱范围 400 nm ~ 800 nm,系统全长为 45.3 mm,最后一个光学面到像面的距离为 8.35 mm. 系统结构参数如表 1 给出,光路图如图 1.

表 1 光学系统的结构参数

序号	半径/mm	间隔/mm	材料
1	39.51327	2.998912	SILICA
2	209.7484	0.1002255	ZK7
3	21.1791	3.268631	
4	38.51273	10.92563	ZK7
光阑	Infinity	1.764007	
6	-14.24754	1.000079	ZBAF3
7	76.29413	0.5426259	
8	-83.8866	6.453485	ZK7
9	-14.33609	0.09994992	
10	35.50539	3.098689	ZK9
11	-62.42281	0.09997587	
12	15.78586	2.546094	SILICA
13	31.36818	0.0999699	
14	10.99919	0.447285	SILICA
15	7.335513	8.354416	
像面	Infinity		

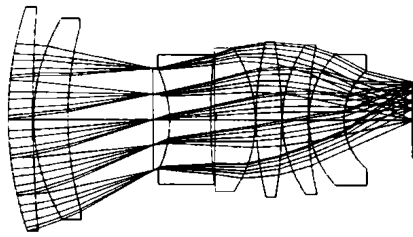


图1 系统光路图
Fig. 1 Layout of optical system

整个系统共采用了七个球面透镜,光阑设在第二、三透镜之间. 第一个透镜和最后一个透镜的折射材料采用石英. 由像差理论可知,光学面弯向光阑,对于大视场系统可以起到减小除场曲以外的轴外像差的作用,也即光学面符合同心原则. 这个系统光阑前面的每个光学面,以及第三个透镜的前一个光学面都弯向光阑.

3 像质评价

对于该系统,需要考虑的成像质量包括点列图、能量集中度、畸变、色差特性等. 下面的评价中,分别选取六个视场角(这里取圆视场角)和五个波长,即0.0°、3.6°、6.0°、8.5°、10.5°、12.0°视场,400、500、600、700、800 nm 波长.

内插精度会因为星像弥散斑的不对称而降低,因此弥散斑需要近似成圆形. 点列图如图2,各视场的弥散斑圆度很好. 相对于点列图质心,各个视场的点列图几何半径及 RMS 值见表2. 每个视场的光线与像面相交,形成一个弥散斑,这个弥散斑的质心在像面的位置就是点列图的质心坐标. 点列图几何半径指的是每个视场的各条光线在像面上的交点与点列图质心间距离的最大值,半径 RMS 值指的是这些距离的方均根值. 从这些数据可以看出在各视场内,弥散斑大小较均匀.

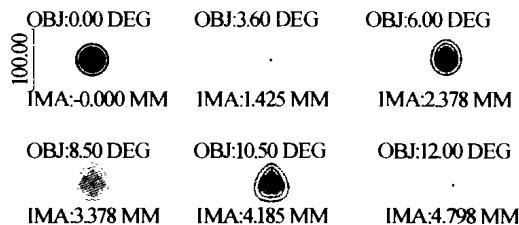


图2 点列图
Fig. 2 Spot diagram

表2 点列图的几何半径、半径 RMS 值和质心高度

Field(°)	0	3.6	6.0	8.5	10.5	12.0
质心半径值/ μm	29.93	29.69	32.89	35.37	34.81	35.65
半径 RMS 值/ μm	10.62	10.69	11.01	11.59	11.89	11.96
质心的高度/mm	0	1.42	2.37	3.38	4.18	4.79

能量集中度如图3中曲线,横坐标是离点列图质心的距离,单位为 μm ,纵坐标是横坐标数值确定半径内所占能量比例,可见能量分布接近高斯正态分布. 在直径30 μm 区域内,上述视场的能量集中

度分别为89.06、88.67、88.09、86.19、86.36、88.58%,超过了要求的85%,为制造公差留有较宽的余地.

畸变如图4,纵坐标表示视场,横坐标为对应视场的畸变大小,边缘视场的畸变值为-0.35%,远优于指标值,畸变小有利于提高星敏感器的测控精度.

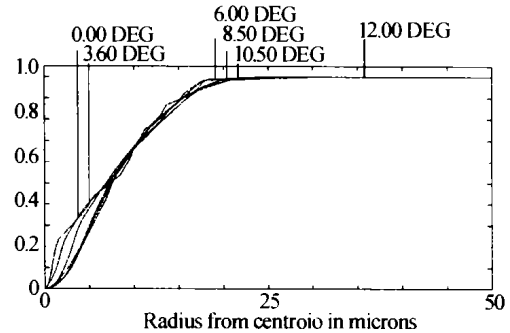


图3 能量集中度
Fig. 3 Geometric encircled energy

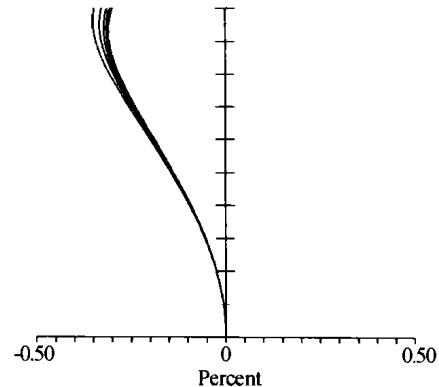


图4 畸变随视场的变化曲线
Fig. 4 Distortion vs field of view

图5给出倍率色差特性曲线,另外考虑分波段倍率色差. 图6(a)~(d)给出了400~500、500~600、600~700、700~800 nm 波段随视场变化的倍率色差曲线,每个波段均匀选取10个波长,以各波段的中心波长450、550、650、750 nm 为参考波长. 图中横坐标表示倍率色差的大小,单位为 μm ,纵坐标表示视场. 考虑到星体发射光谱分布的随机性,应考察其 RMS 数值. 如表3所列,分波段色差的 RMS 最大不超过0.65 μm ,色差校正比较好. 表中的 P-V 值指的是一个波段中倍率色差的极大值和最小值.

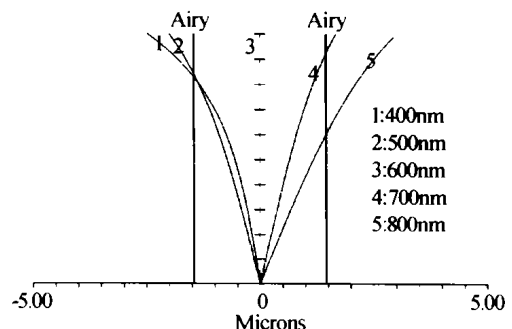


图5 倍率色差曲线
Fig. 5 Lateral color

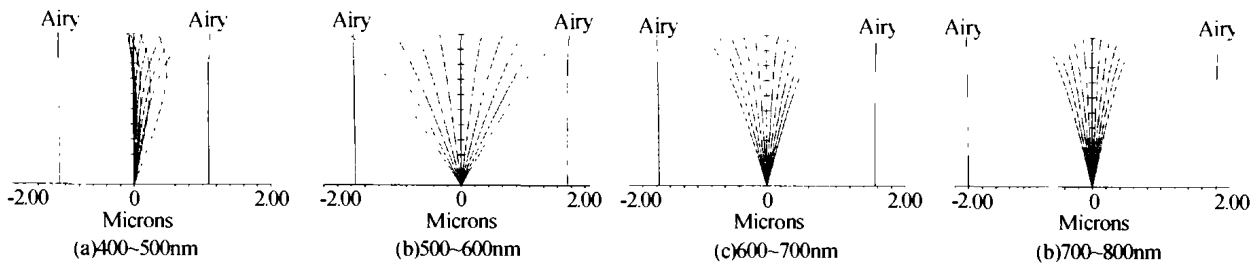


图6 分波段色差曲线

Fig.6 Lateral color of separated wavelength ranges

表3 分段波色差的PV值和RMS值

波段 (nm)	400 ~ 500	500 ~ 600	600 ~ 700	700 ~ 800
P-V 值 (μm)	0.812 -0.064	0.980 -1.018	0.758 -0.884	0.622 -0.6972
RMS 值 (μm)	0.290	0.633	0.528	0.417

4 结论

与反射式光学系统比较,折射式光学系统的视场角易于增大.根据星敏感器的使用要求,来确定光学系统的各项指标,使设计结果能保证星敏感器正常工作.减小光学系统的体积和重量,是星敏感器小型化的有效手段.本文设计了一种折射式星敏感器光学系统,总长度较短,各项指标达到了设计要求.

参考文献

- Clark, Natalie. Intelligent star tracker. *Proc of SPIE*, 2001, **4592**:216 ~ 226
- 卢欣. CCD 星敏感器光学系统设计. *控制工程*, 1993, (5):9 ~ 17
Lu X. *Engineering Cybernetics*, 1993, (5):9 ~ 17
- 黄欣. 星敏感器光学系统参数的确定. *控制工程*, 1999, (5):19 ~ 24
Huang X. *Engineering Cybernetics*, 1999, (5):19 ~ 24
- 阚道宏,朱铮,过瑞英. 星敏感器用导航星星表的建立. *宇航学报*, 1992, (4):43 ~ 49
Kan D H, Zhu Z, Guo R Y. *Journal of Astronautics*, 1992, (4):43 ~ 49
- 王一凡. 根据光能量分布确定 CCD 内插求中心精度. *控制工程*, 1993, (4):11 ~ 13
Wang Y F. *Engineering Cybernetics*, 1993, (4):11 ~ 13
- 王一凡. 用于星敏感器的星点提取算法. *控制工程*, 1995, (2):13 ~ 16
Wang Y F. *Engineering Cybernetics*, 1995, (2):13 ~ 16
- 王虎,苗兴华,惠彬. 短焦距大视场光学系统的畸变校正. *光子学报*, 2001, **11**(30):1409 ~ 1412
Wang H, Miao X H, Hui B. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **11**(30):1409 ~ 1412

Design of a Light and Compact Optical System for Star Sensors

Wu Feng^{1,2}, Shen Weimin²

¹ School of Electronic Information & Electric Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213002

² Modern Institute of Optical Technology, Soochow University, Suzhou 215006

Received date:2004-05-12

Abstract The principle and the performance index of compact optical system for star sensors are introduced and analyzed. An optical system used for star sensors is reported. It is composed of seven spherical lenses, and the stop is between the second and third lens. Its focal length, relative aperture, and field of view are 22.7 mm, 1:1.4, and $17.1^\circ \times 17.1^\circ$ (circular field of view is 24°) respectively. And its total length is only 45.3mm.

Keywords Star sensor; Optical design; CCD; Attitude measurement

Wu Feng was born in 1978. He graduated from Soochow university with a master degree in 2004. His research interest is in applied optics and optical instruments.

