

宽视场大相对孔径星敏感器光学系统设计

王 虎^{1,2} 苗兴华¹ 汶德胜¹ 李英才¹

(1 中科院西安光机所空间室,西安 710068)

(2 中国科学院研究生院,北京 100039)

摘 要 介绍了一种用于卫星姿态控制的星敏感器光学系统,该光学系统焦距为 51 mm,相对孔径为 1/1.1,视场角为 $21^\circ \times 21^\circ$ (圆视场 $2\omega=30^\circ$),光谱范围为 $0.5\sim 0.85\ \mu\text{m}$,采用了复杂化双高斯结构.与普通成像系统不同的是,该系统要求对不同光谱的恒星所采集到的点像能量中心是一致的,且星像点像的弥散圆须控制在一定的范围内.具有倍率色差小、轴上和轴外能量分布比较一致的特点.

关键词 星敏感器;光学设计;倍率色差

中图分类号 O439 **文献标识码** A

0 引言

CCD 星敏感器属于高准确度光学敏感器,主要用于飞行器在空间惯性坐标系的姿态测量.其基本原理是通过光学系统将瞬时视场中的若干恒星成像于 CCD 上,通过图像处理与星表进行拟合,得出飞行器在空间惯性坐标系中的瞬间姿态误差.姿态测量是通过恒星间角距的测量来实现的,而星像中心计算准确度直接影响角距的测量;由此可见星像质量中心在姿态测量中的重要性.而光学系统设计的难点就在于保证恒星像质的特殊要求^[1].

普通光学系统都希望在像面上的弥散圆直径越小越好,而星敏感器光学系统要求在全视场范围内在像面上弥散圆的直径分布在一个特定的范围内,能量接近正态分布.要求弥散圆质量中心的色偏差要小.

文章介绍的光学系统在 0.8 视场内,波长分别为 $0.50, 0.54, 0.58, 0.62, 0.65, 0.71, 0.74, 0.77, 0.80, 0.85\ \mu\text{m}$ 的光线与中心波长 $0.68\ \mu\text{m}$ 的倍率色差都 $\leq \pm 0.55\ \mu\text{m}$.在像面上 0.8 视场内 80% 能量集中在直径为 $51\sim 65\ \mu\text{m}$ 的光斑内.其特点是轴上和轴外能量分布比较一致.

1 光学系统参数选择

星敏感器光学系统与一般成像物镜的使用目的有较大差别,因而决定了其设计要求的特殊性.设计条件与设计方法也与一般成像物镜不同.当恒星位于无限远时可认为是一点目标,星敏感器对几何形状的分辨能力几乎没有要求,但是恒星光谱分布差异很大,从红星到蓝星光谱分布明显,故而要求对于不同

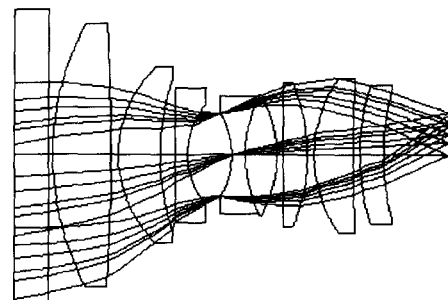
光谱的恒星所采集到的点像能量中心是一致的,因此理论上需要光学系统全消倍率色差.另外,为了利用亚像素的方法提高提取星点的准确度,需要所成星点像在像面上有所弥散,一般不小于 2 个像素,同时考虑 CCD 响应能力和捕获系统的灵敏度等条件,因此像面上点像的弥散圆要求在一定的范围内^[2~4].为了捕获到更多的目标,需要有比较大的视场角,同时大的通光孔径可提供更多的能量及信息.

光学系统的焦距 $f=51\ \text{mm}$,相对孔径 $D/f'=1/1.1$,视场角为 $21^\circ \times 21^\circ$ (圆视场 $2\omega=30^\circ$),光谱范围为 $0.5\sim 0.85\ \mu\text{m}$,以 $0.68\ \mu\text{m}$ 为中心波长,后工作距为 19.88 mm.

2 光学系统设计

2.1 结构选型

本光学系统是一个大相对孔径、大视场、宽光谱,成像质量要求很高的光学系统,Petzval 型物镜、Sonnar 型物镜都能用作大孔径系统,但它们的视场都比较小.双高斯物镜则是一种经常被用作大孔径,大视场的光学系统.典型的双高斯物镜,相对孔



LAYOUT
LENS HAS NO TITLE.
TOTAL LENGTH:118.9803mm

图 1 光学系统结构

Fig. 1 The structure of the optical system

径为 1/2, 视场角可达 40°, 其特点是采用对称型结构. 由像差理论, 对称结构可使垂轴像差如彗差、倍率色差、畸变得自动校正; 轴向像差为半部的两倍, 其中像散可通过选择合适的光阑位置进行校正^[5]. 经过深入分析研究, 为了达到宽视场大相对孔径, 选用复杂化双高斯型光学结构. 如图 1, 光学镜头由七组八片组成, 其中有一片双胶合透镜加入了石英窗口以提高抗空间辐射能力.

2.2 像差平衡及优化设计

光学镜头要求做到相对孔径 1/1.1, 视场角 21° × 21° (圆视场 2ω = 30°), 弥散圆在各波段各视场均大于 38 μm 而小于 76 μm. 结构复杂化的基本目的是要减小轴上高级球差和轴外球差. 为了减小高级球差, 首先在高斯物镜的后半部增加两块单透镜, 使其承担一定的正光焦度, 并使它们的弯曲形式为凸面向光阑, 使其基本满足球差最小值位置. 并且尽量选用高折射率材料来减少轴上光束和轴外光束的入射角, 使整个视场角范围内像面较平整, 做到各视场弥散较均匀. 另外重点考虑校正的像差是引起像点中心位置偏移和像点能量扩散不对称的像差, 即造成像点中心随波长不同而改变的倍率色差和造成像点中心偏移及几何失对称的畸变和彗差.

在校正单色像差的同时, 重点是校正二级光谱和倍率色差, 只有倍率色差校正的很好, 才能减少不同色光经光学系统后对成像中心位置的影响. 选用了高折射率低色散的镧冕玻璃作正透镜, 主要是校正二级光谱和倍率色差. 前组双胶合分离的结构能够有效地控制轴外高级负球差和高级正像散以及中间视场的彗差. 特别是能够消除由于光阑变大而引起的彗差.

2.3 光学系统像差

用 Zemax 光学设计软件进行了计算, 光学系统的主要像差曲线如图 2. 图 3 为倍率色差曲线, 各种色光相对于主色光 0.68 μm 的倍率色差在全视场

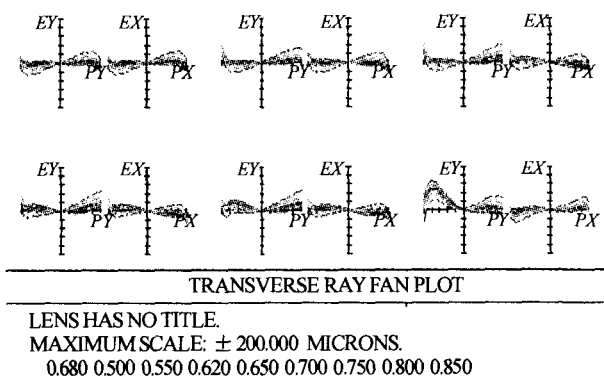
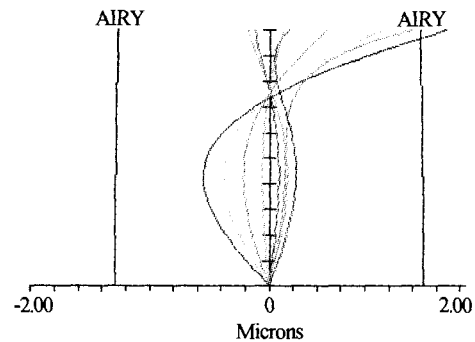


图 2 像差曲线
Fig. 2 Ray aberration of the system



LATERAL COLOR
LENS HAS NO TITLE.
ALL DATA REFERENCED TO WAVELENGTH 0.680000
REAL RAYS USED.

图 3 倍率色差

Fig. 3 Lateral color of system

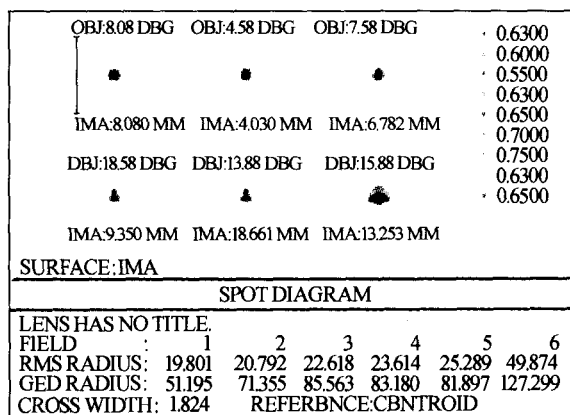


图 4 弥散圆

Fig. 4 Spot diagrams of system

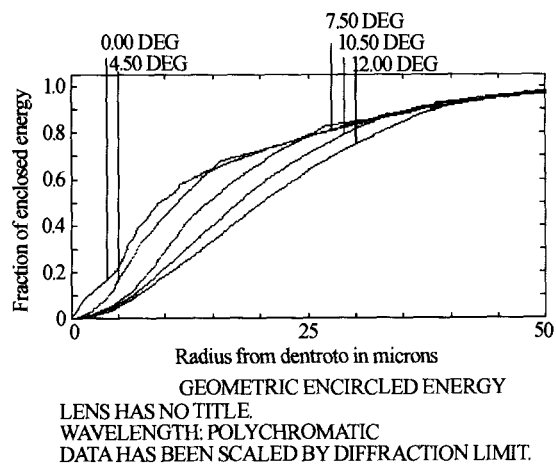


图 5 几何包围能量

Fig. 5 Geometric encircled energy

范围内均在 ±1.52 μm 内, 在 0.8 视场内各个色光相对于主色光像高偏差在 ±0.55 μm 内; 图 4 为弥散圆图; 图 5 为几何包围能量曲线, 集中 80% 能量的弥散圆直径在 51 μm ~ 65 μm 内.

3 结论

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, 宽光谱、很小的倍率色差, 与以往普通成像光学系统不同的是, 该光学系统对成

像物体的分辨本领几乎没有要求,但要求所成星点,像弥散圆,须控制在一定范围内,对于不同光谱的恒星,其所成点像能量中心要求一致。

参考文献

- 1 黄欣. 星敏传感器光学系统参数的确定. 航天控制, 2000, 1: 44~50
Huang X. *Aerospace Control*, 2000, 1: 44~50
- 2 Carl Christian Liebe. Accuracy performance of star tracking-tutorial. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38: 587~599
- 3 Carl Christian Liebe. Star trackers for attitude determination. *IEEE AES Systems Magazines*, 1995, (6): 10~16
- 4 Kazuhide Noguchi, Koshi Sato, *et al.* CCD star tracker for attitude determination and control of satellite for space VLBI mission. *SPIE*, 1996, 2810: 190~200
- 5 Warren J Smith. Modern Lens Design. Genesee Optics Software, Inc., 1992, 303~340

Optical System Design of Star Sensor with wide-view field and Small F-number

Wang Hu^{1,2}, Miao Xinghua¹, Wen Desheng¹, Li Yingcai¹

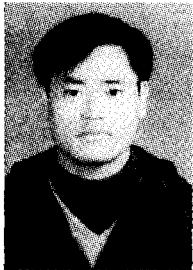
1 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanism, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068

2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

Received date: 2004-10-19

Abstract This paper presented an optical system of star sensor. The lens system was a complicated double-Gauss configuration which had an effective focal length of 51 mm, an F-number of F/1.1, a field of view of $21^\circ \times 21^\circ$ ($2\omega = 30^\circ$), and a working wavelength rang of 0.5~0.85 μm . The difference from common lens used in imaging system was that this lens system was required to have a high resolving power in the geometric pattern of stars. It was required to deliver the geometric spot dispersion in the specific rang at its focal surface and lower difference of displacements of centroids from chief ray in the interesting spectral range.

Keywords Star sensor; Optical system Design; Lateral color



Wang Hu was born in 1975. He received his B. S. degree from the Instrument Engineering Department of Xi'an Institute of Technology in 1999. From then on, he has been working in the Space Optics Lab of Xi'an Institute of the Optics and Precision Mechanics (XIOPM). Now he is a master candidate in the Space Optics Lab of XIOPM. His research interests include space optics and optical design.