

## 大视场宽谱段星敏感器光学系统设计

郭彦池,徐熙平,乔杨,米士隆,杜玉楠

(长春理工大学 光电工程学院,吉林 长春 130022)

**摘要:** 星敏感器是一种姿态测量系统,用于测量飞行器的实时姿态。该系统是一种基于 CCD 探测器的适用于星敏感器的光学系统。通过相关参数的计算,利用 ZEMAX 平台实现了具有良好成像质量的光学系统结构设计。该系统焦距为 50 mm, F 数为 1.8, 具有较大的视场角:  $2\omega=23^\circ$ , 光谱范围较宽: 500~850 nm, 中心波长为 680 nm。捕获三颗导航星的概率达 100%。满足星敏感器对弥散斑、能量集中度和畸变等特殊要求。倍率色差得到了很好的校正,仅为 0.087 μm。系统仅使用 6 片球面透镜,结构简单紧凑,易于加工制造。

**关键词:** 星敏感器; 光学设计; CCD

中图分类号: O439 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)12-3969-04

## Optical system design of star sensor with wide field of view and wide spectra range

Guo Yanchi, Xu Xiping, Qiao Yang, Mi Shilong, Du Yunan

(School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** Star sensor is a kind of attitude measurement system, which is used to measure the real-time posture of the aircraft. A new kind of optical system of star sensor based on CCD was designed. And the calculation of relevant parameters was carried out. This kind of optical system with wide field of view, wide spectra range and good imaging quality was realized in ZEMAX software. This optical system has an effective focal length of 50 mm, an F-number of 1.8, a field of view of 23 degrees, a spectral range of 500~850 nm and a primary wavelength of 680 nm. The capture probability of three navigation stars is up to 100%. The especial requirements of the spot, encircled energy, distortion etc. are all satisfied. Lateral color is corrected greatly. The value is 0.087 μm. The system only contains 6 pieces of lens. The structure is not only simple and compact, but also easy to manufacture.

**Key words:** star sensor; optical design; CCD

---

收稿日期: 2014-04-25; 修訂日期: 2014-05-27

作者简介: 郭彦池(1988-),女,硕士生,主要从事光学设计方面的研究。Email:grace\_gyc@163.com

导师简介: 徐熙平(1969-),男,教授,博士,主要从事光电检测技术及仪器方面的教学和科研工作。Email:xxp@cust.edu.cn

## 0 引言

星敏感器是一种测量系统，一般被安装在飞行器上，用来测量飞行器的实时姿态。星敏感器光学系统的视场角应满足局部天区星图识别捕获 3 颗以上导航星或全天识别捕获五颗以上导航星的概率接近 100%<sup>[1]</sup>。增大星敏感器光学系统的视场角和光谱范围有利于提高视场中出现的导航星的数量，从而提高星图识别的成功率和星敏感器的测量精度。一般而言，当星敏感器光学系统的视场角为  $2\omega=17^\circ$  时，捕获 3 颗导航星的概率为 99.71%。当视场角达到  $2\omega=23^\circ$  时，捕获 3 颗导航星的概率为 100%。

文中提出了一种视场角达  $2\omega=23^\circ$ ，光谱范围达 500~850 nm 的星敏感器光学系统，可实现 100% 捕获 3 颗导航星的概率。同时，对畸变、倍率色差、像散等像差进行了校正，成像质量良好。

## 1 光学系统参数的确定

星敏感器光学系统的参数主要包括系统焦距、通光孔径、视场角、光谱范围、中心波长、后工作距等。这些参数由 CCD 的特性参数、需要探测的星等、在视场内出现的恒星数目、恒星的光谱分布规律以及后续算法对像质的要求等因素综合决定<sup>[2-3]</sup>。

### 1.1 焦距与视场角

文中设计的光学系统已给定焦距为 50 mm，采用型号为 TH7888A 的 CCD 探测器。探测器原件尺寸为 14.334 mm，像元尺寸为 14 μm。根据公式(1)可求得系统视场角  $2\omega=23^\circ$ 。

$$\tan \omega = \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{2f'} \quad (1)$$

式中：**a** 为探测器原件尺寸的长；**b** 为探测器原件尺寸的宽； $\omega$  为系统半视场；**f'** 为焦距。

### 1.2 光谱范围与中心波长

光学系统的光谱范围和中心波长取决于所采用的光电探测器和恒星的发光光谱特性<sup>[4]</sup>。图 1 为 TH7888A 的光谱特性响应曲线。根据恒星的峰值波长统计，恒星的发光光谱在紫外、可见光及红外等波段均有分布。其中，波长在 0.4~0.6 μm 处的恒星最为集中。由于探测器对 0.4~0.5 μm 波长响应度低，而波长在 0.85 μm 以上的恒星数量相对并不集中，

所以将光学系统的光谱范围确定为 0.5~0.85 μm。由于 CCD 对 0.68 μm 波长的光波有较高的灵敏度，所以将中心波长定位为 0.68 μm。

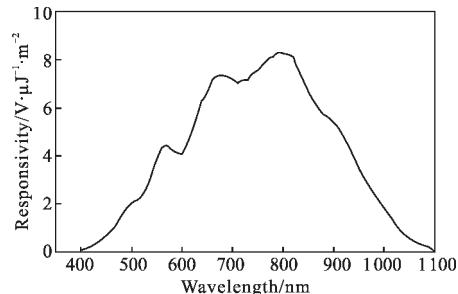


图 1 TH7888A 的光谱特性响应曲线

Fig.1 TH7888A spectral response curve

### 1.3 相对孔径的确定

视星等为  $M_V$  等的恒星点光源每秒钟发射到星敏感器光学系统入瞳上的光子数为：

$$N_p = 5 \times 10^{10} \times 10^{-\frac{2}{5} M_V} \times A \quad (2)$$

式中：**A** 为入瞳面积， $m^2$ 。

假设光学系统透过率为  $\tau_{opt}$ ，探测器的量子效率为  $Q_E$ ，像元填充系数为  $F_F$ ，星像光斑在探测器上所占据的像元数为  $n_{spread}$ ，曝光时间为  $t$ (单位:s)，则探测器产生的电子数为：

$$N_e = \frac{N_p \times \tau_{opt} \times Q_E \times F_F \times t}{n_{spread}} \quad (3)$$

为了正确提取像素内的信号能量，星敏感器的探测率应大于 99%，同时为了降低假信号的影响，虚警率应小于 1%，满足这两个条件的信噪比阈值为 5<sup>[5]</sup>。此光学系统的相对孔径为 1/1.8，最后得到的信噪比为 5.6。

由此得出光学系统的设计指标，如表 1 所示。

表 1 光学设计指标

Tab.1 Specifications of optical design

Parameter	Value
Focal length/mm	50
F number	1.8
Field of view	$2\omega=23^\circ$
Optical transmittance	$\geq 80\%$
Spectral range/nm	500~850
Primary wavelength/nm	680
Back working distance/mm	$\geq 10$

## 2 光学系统设计

根据星敏感器的工作特性, 星敏感器光学系统应具有大视场、大相对孔径、较宽光谱等特点。这一类系统由于其谱段较宽, 色差的校正比较困难。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。此外, 选择合适的光阑位置可以校正像散<sup>[6]</sup>。典型的双高斯结构是关于光阑对称的结构, 相对孔径为 1/2~1/1.7, 视场角可达到 40°。复杂化后的结构仍然基本保持对称性, 这使得垂轴像差能得到较好的校正。设计时, 只需考虑球差、色差、场曲、像散的校正。经过以上分析, 选择 6 片式双高斯结构作为初始结构。

在材料选择方面, 采用高折射率的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<sup>[7]</sup>。同时有利于增大玻璃的曲率半径, 从而减小高级像差。火石与冕牌玻璃组合有利于消色差。设计中使用了 H-ZF62 等高折射率的玻璃。另外, 在胶合组中, 采用阿贝数很大的 H-FK61 玻璃与重火石玻璃配合。

最后得到的系统结构示意图如图 2 所示。得到的设计结果如表 2 所示。

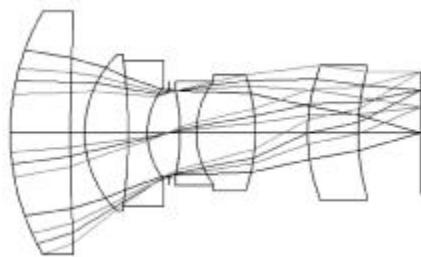


图 2 系统结构示意图

Fig.2 Layout of system

表 2 设计结果

Tab.2 Results of final design

Parameter	Value
Focal length/mm	50
F number	1.8
Field of view	$2\omega=23^\circ$
Optical transmittance	85%
Spectral range/nm	500~850
Primary wavelength/nm	680
Back working distance/mm	10.351

## 3 像质评价

由于工作特性的不同, 星敏感器对其光学系统的像质有特殊的要求。

星敏感器光学系统评价指标主要包括弥散斑尺寸、能量集中度、畸变、倍率色差等<sup>[8]</sup>。文中进行评价分析时, 视场取 0、0.5、0.707 和 1 这 4 个视场, 波长取 0.5 μm, 0.68 μm 和 0.85 μm 这 3 个波长。

### 3.1 点列图

星敏感器并不希望光斑越小越好, 而应具有一定的弥散半径, 以便计算光斑的质心, 所以星敏感器光学系统各个视场的弥散斑应尽量圆且均匀一致, 以覆盖 2~3 个像元为宜。系统点列图如图 3 所示。各视场的 RMS 直径如表 3 所示。各个视场的光斑圆度很好, 并且大小均匀, 满足光斑覆盖 2~3 个像元的要求。

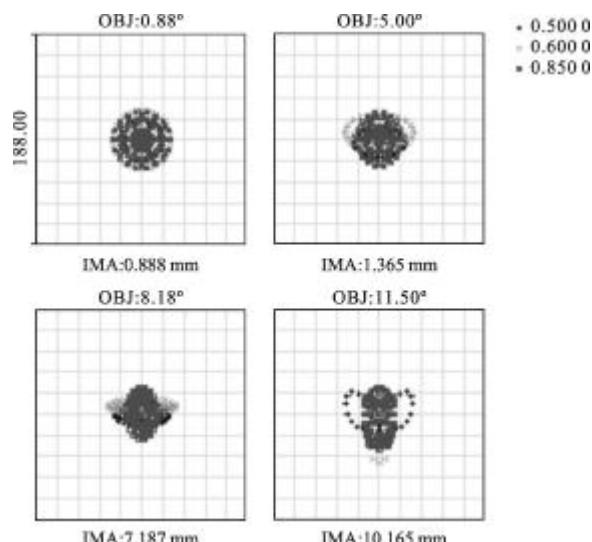


图 3 系统点列图

Fig.3 Spot diagram of optical system

表 3 光斑直径的均方根值

Tab.3 RMS of spot diameter

Field	RMS diameter/μm
0	7.914
0.5	7.756
0.707	7.930
1	7.891

### 3.2 能量集中度

能量集中度应接近正态分布，而在两个像元之内，能量集中度应达到 80%以上。系统能量集中度如图 4 所示。

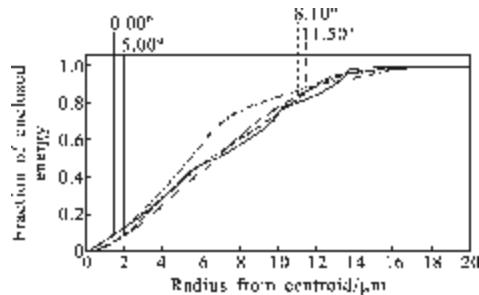


图 4 能量集中度

Fig.4 Encircled energy

图 4 中，横坐标为到质心的半径， $\mu\text{m}$ ，纵坐标为横坐标所确定范围内的能量占所有能量的百分比。由图可见，能量分布接近正态分布，在直径为  $28 \mu\text{m}$  的范围内集中 95%以上的能量。

### 3.3 畸变

过大的畸变会加大后续处理的计算量，延长数据更新的时间。另外，减小畸变有助于提高成像质量。文中要求畸变小于 1%。该系统畸变曲线如图 5 所示。最大畸变为 0.3%，满足设计要求。

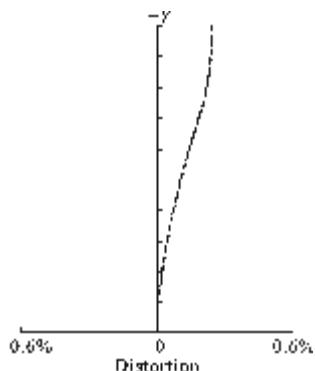


图 5 畸变

Fig.5 Distortion

### 3.4 倍率色差

恒星发光光谱从蓝光到红光均有分布，为了准确计算不同光谱的恒星的成像质心，光学系统理论上应全消倍率色差。文中要求最大倍率色差小于  $1.2 \mu\text{m}$ 。系统倍率色差如图 6 所示。横坐标为倍率色差值，纵坐标为视场。文中设计的光学结构具有很小的倍率色差，最大处不到  $0.087 \mu\text{m}$ 。

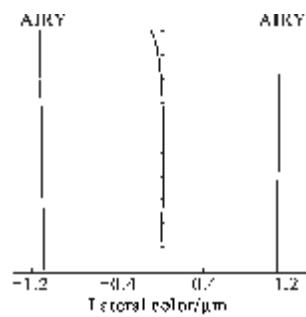


图 6 倍率色差

Fig.6 Lateral color

## 4 结 论

设计了一种适用于星敏感器的光学系统。其焦距为  $50 \text{ mm}$ ，相对孔径  $1/1.8$ ，视场角可达  $2\omega=23^\circ$ ，光谱范围  $500\sim850 \text{ nm}$ ，中心波长  $650 \text{ nm}$ 。点列图、能量集中度、畸变均符合星敏感器的特殊要求。倍率色差得到了很好的校正，仅为  $0.087 \mu\text{m}$ 。该系统仅使用 6 片球面透镜，满足了大视场、宽光谱范围的要求。实现了 100%捕获 3 颗导航星的概率，对提高星敏感器的测量精度有很大帮助。而且结构简单紧凑，成像质量良好。光学系统的相对孔径仍有待提高，扩大相对孔径将有利于提高星敏感器可探测的极限星等。

## 参 考 文 献：

- [1] Ling Tao, Qian Guoqiang. Prediction of navigation stars in the field [J]. Chinese Journal of Space Science, 1999, 19(3): 253-259. (in Chinese)
- [2] Lu Xin. Optical design of CCD star sensor [J]. Engineering Cybernetics, 1993(5): 9-17. (in Chinese)
- [3] Huang Xin. Determination for optic system parameters of star sensor[J]. Engineering Cybernetics, 1999, (5): 19-24. (in Chinese)
- [4] He Lingna. Design and optimization of the optical system of the star sensor based on CMOS APS [J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(11): 24-30. (in Chinese)
- [5] Ronald Waynant, Marwood Ediger. Electro-Optics Handbook [M]. US: Radio Corporation of America, 1974: 86-89.
- [6] Smith W J. Modern Lens Design [M]. US: McGraw-Hill Professional, 2004: 303-340.
- [7] Yang Haoming, Wang Lingjie, Weng Zhicheng, et al. Optical system of light star tracker with wide field and large aperture [J]. Optical and Precision Engineering, 2007, 15 (2): 151-154. (in Chinese)
- [8] Yan Peipei, Fan Xuewu, He Jianwei. Design of hybrid refractive-diffractive star sensor optical system with small F-number [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(12): 2458-2464. (in Chinese)