文章编号:1002-2082(2013)06-0920-08

小型星模拟器系统的设计研究

张 杰[1],张 涛[1],况涉青[2]

(1.四川大学 激光应用研究所,四川 成都 610061;2.中国核动力研究设计院,四川 成都 610065)

摘 要:基于超小型 P13XM015 型 TFT-LCD 技术的小型星模拟器的工作原理,及其在工程应用中整个系统的设计、制造、加工、调试和检测技术,提出对星间间距采用软件修正以及先分别测量再组合修正的方法,对星等采用使用相适应的仪器星等的方法。采用模块化方法设计了小型星模拟器系统的光学系统准直物镜、模拟星库的编制、坐标转换、位置解算、系统控制软件等。在实验室实现了整个系统的组装,搭建了控制和测试平台,并给出了实验结果。实验结果表明:本系统的星库精度及星位置解算误差 $\delta_1 \leqslant 2''$,角分辨率误差 $\delta_2 \leqslant 3.43''$。

关键词:小型星模拟器;星间间距;星等;星库精度;位置解算

中图分类号:TN247;TH703 文献标志码:A doi:10.5768/JAO201334.0601009

Design of small star simulator system

ZHANG Jie[1], ZHANG Tao[1], KUANG She-qing[2]

(1. Laser Application Research Institute, Sichuan University, Chengdu 610061, China;
2. Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610021, China)

Abstract: Based on the working principle of the small P13XM015-TFT-LCD star simulator and its designing, manufacturing, processing, debugging and detection technology of the whole system during the engineering application, the detection method for the two parameters of the small star simulator such as inter-satellite spacing and magnitude was studied. The inter-satellite spacing was corrected by software then measured respectively and recombined to be corrected, while the adapted instrument magnitude method was used for the magnitude testing. The optical system collimating lens, preparation of simulator star database, coordinate transformation, position calculating, and system control software of the small star simulation system were designed by using modularity method. The assembly of the entire system was implemented in the laboratory, the controlling and testing platform was set up, and then the experimental results were obtained. The results show that, this system has high reliability with star database precision and position calculating error of no more than 2″and angular resolution error of no more than 3.43″.

Key words: small star simulator; spacing; magnitude; star database precision; position calculating

引言

随着科技进步,我国的星模拟器和星敏感器也日益发展起来。近几年,国外出现了用 CMOS APS(有源像元)图像传感器研制的星敏感器,使星敏感器的发展出现了新的飞跃。星模拟器也随之逐渐发展起来,由最初的单星模拟器,发展到现在的多星、大视场、宽光谱、多种星等的动态和静态星模拟器。

小型星模拟器主要是针对空间光学姿态敏感器的最高级——星敏感器。星敏感器本身的应用前景非常丰富,它除了主要用于卫星、飞船、航天飞机、空间站的高精度姿态确定外,还用在火箭、

收稿日期:2013-04-19; 修回日期:2013-05-04

作者简介:张杰(1989—),男,湖北武汉人,硕士研究生,主要从事工程光学、激光应用技术方面的研究。
E-mail:zhangjie617367@sina.com.cn

导弹上进行恒星制导和控制,同时还可以实现对潜艇、船只的精确定位和测量。因此,随着星敏感器用途的扩展,星模拟器的应用前景将十分广阔。

过去研制的星模拟器,主要表现为体积大,精度相对较低,动态性差,单台模拟的恒星参数少,长期稳定性不够,成本高等特点。因此,开展以高精度、小型化、低成本、高可靠性的星模拟器的研究具有较高的实用价值。

1　单星模拟器的工作原理

星敏感器对观测到的每一幅星图处理后,得到的是视场中每颗星的亮度和在空间的方向。如图 1 所示,A 为天球上的某颗星,A″为 A 通过星敏感器镜头在 CCD 上成的像,现将星图显示屏——液晶光阀放在镜头前,调整液晶光阀使其与星敏感器的 CCD 靶面平行,液晶光阀的边沿与 CCD 靶面的边沿平行,且液晶光阀中心、CCD 靶面中心与星敏感器镜头光轴在同一直线上。直线 AA″与液晶光阀显示屏面的交点为 A′,则根据 A 的星等,以对应的亮度将液晶光阀显示屏面上 A′点附近的一些像素点点亮时,这些像素成像在 CCD 靶面上,与实际星球 A 在 CCD 靶面上所形成的图像一样,A′随 A 的运动而移动,即可得到运动的星像 A″。

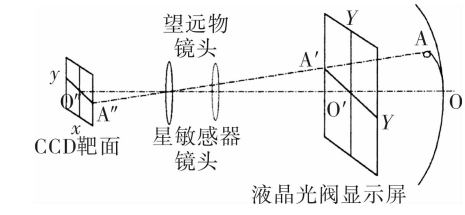


图 1　小型星模拟器工作原理图

Fig. 1　Working principle of miniature star simulator

2　小型星模拟器系统的组成部分

小型星模拟器系统从结构布局上(如图 2 所示),可由 5 个部分组成:

1) 星模拟器主计算机系统;

2) 星图显示及接口电路系统;

3) 星图动态显示系统;

4) 大视场平行光系统;

5) 机械接口及安装微调支架系统。

星模拟器主机根据大系统计算机提供的星敏感器的空间指向(与航天器姿态及轨道参数有关)参数,实时局部激活 SAO 星表并解算出模拟探头对应视场内各星的角位置,并由星图显示电路执行正在探头内的液晶光阀显示屏上的平面直角坐标位置。接通接口电路,经传输电缆送到液晶光阀显示屏上再现这些星点。由于液晶光阀显示屏(LCD)位于大视场平行光管的前焦面上,使有不同亮度的星点经光管在联接的星敏感器光学系统的入瞳处产生模拟的无穷远平行光,即实现对星光的模拟。小型星模拟器各组成部分的相互关系如图 3 所示。

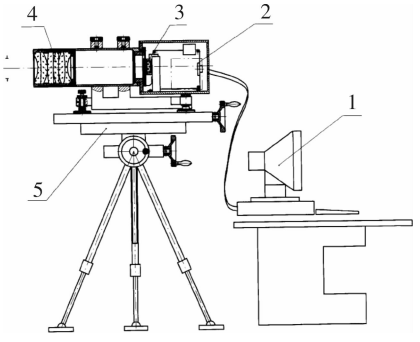


图 2　小型星模拟器系统结构布局

Fig. 2　Structure and layout of small star simulator system

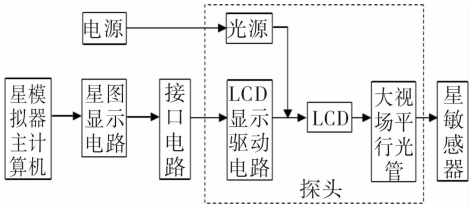


图 3　小型星模拟器各组成部分的相互关系

Fig. 3　Relationship of each component of miniature star simulator

3　小型星模拟器光机系统设计

3.1　系统技术参数的确定

3.1.1　大视场光学系统准直物镜焦距 f 的设计

星图显示器上单个像元素尺寸为 25 μm×26 μm,有效尺寸为 26.624 mm×19.968 mm,而用户星敏感器光学系统视场角应不小于 5°×6.5°,结合光学系统设计参数考虑,星模拟器光学系统设计视场指标为 5.1°×6.8°(对角线约为 8.5°)。

取边长 26.624 mm,6.8°视场,有:

$$f_1=\frac{26.624\ \text{mm}}{2\times\tan\frac{6.8}{2}}\approx 224.07\ \text{mm}\approx 224.1\ \text{mm}$$

根据 $f_1=224.1$ mm,可获得优于 6.5°×5°的有效模拟视场。再考虑光学系统的其他参数,如校正畸变、场曲、球差、色散等因素后,实际设计光学系统焦距 $f_{实际}=226.025$ mm。

3.1.2 最小单星张角的设计

使用单个像元作为一个星点时,则单星张角为

$$a=\tan^{-1}\frac{0.026\ \text{mm}}{226}\approx 23.73''$$

因此,$a=23.73''$的设计满足星模拟器单星张角 20″~40″的技术要求。

3.1.3 大视场光学口径,出瞳位置的设计

准直物镜出射的平行光直径应与星敏感器光学系统参数统一考虑。

首先,物镜的出瞳应与敏感器入瞳位置重合,以保证全模拟视场内各处的星点发出的光对敏感器入瞳的总光通量相同。其次,物镜出瞳的大小应与敏感器入瞳大小相同,过大或过小都不利于系统的设计。一般用户星敏感器的出瞳口径 Φ52 mm,出瞳距离为 80 mm。因此,实际设计为:出瞳口径 Φ52 mm,出瞳距离大于 80 mm。

3.1.4 光学系统其他参数设计

为保证星场内所有星像位置准确,能量场恒等,要求光学系统具有小畸变、平像场、消色差的成像质量的特点,加上较大的视场,这使设计有很大难度。设计时按全视场内任一星点经光学系统后形成的平行光平行度误差≤10″,波段范围 0.46 μm~0.71 μm,中心波长为 0.59 μm,并经 F 线,D 线,C 线,R 线 4 条谱线修正像差,确保满足 $\Delta\omega\leqslant 10''$的要求,如表 1 所示为光学系统准直物镜设计的主要参数。

表 1 准直物镜主要光学结构参数

Table 1 Main optical structure parameters of collimation lens

序号	半径 R/mm	中心距离 $d\pm\Delta d$/mm	玻璃牌号	偏心差 C/mm	通光口径 Φ/mm	全口径 D/mm	元件焦距 /mm
1	−62.3	8±0.02	TF3	0.01	62.6	65	−111.135
2	−762.1	17±0.02	ZK9	0.03	70.68	82	135
3	−76.38	0.1±0.02		0.01	74.8	82	−2 071.68
4	285.77	15±0.02	LaK1	0.02	76.9	82	
5	7500	0.1±0.02		0.06	76.7	82	450.22
6	129.44	13±0.02	LaK1	0.01	76.7	82	
7	875	0.1±0.02		0.04	74.7	82	228.82
8	108.03	17±0.02	ZK9	0.01	72.7	82	118.55
9	−217.4	7±0.02	TF3	0.02	68.7	82	−76.84
10	60.887			0.01	59.9	62	−291.95

注:光阑距 $L_p=80$ mm,通光口径 Φ 52 mm;像面像距 $L'=197.88$ mm,通光口径 Φ 52 mm

3.2 机械接口及安装微调支架系统的设计

根据星模拟器技术指标中关于机械接口的要求,选择测量三脚架作为安装微调结构的主支架,可实现相对于星敏感光轴的水平、俯仰、前后、上下 4 个自由度的位移,能更好地满足机械接口的使用要求。如图 4 和图 5 所示,为实际外形主体结构图和控制面板图。

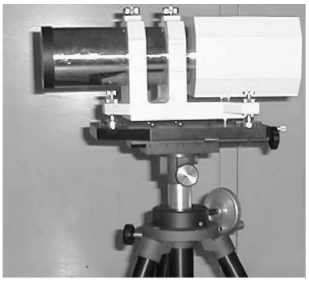


图 4 小型星模拟器外形主体结构图

Fig. 4 Main structure of small star simulator shape

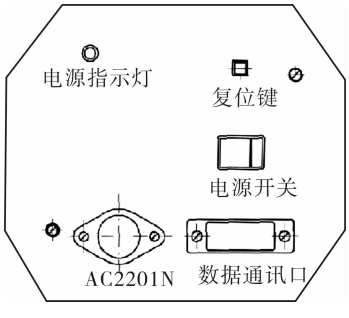


图 5 电路控制面板图

Fig. 5 Figure of circuit control panel

4 硬件及接口电路设计

小型星模拟器电控系统硬件及接口电路主要

是实现星图的动态显示,因此,其电控系统硬件及接口电路实际就构成了一套星图动态显示系统。

4.1　星图显示系统原理及组成

星图动态显示系统的基本工作方式是:计算机利用星库中的星位置在规定的视场范围内准确地放置目标,并以图像的方式通过计算机的多频卡经星图显示器件的驱动电路送至星图显示器件的显示屏产生星图像。

星图动态显示系统包括:星模拟器主计算机、星图显示电路、接口电路、TFT-LCD 显示驱动电路、TFT-LCD 液晶显示板、冷阴极平面背光板、背光板的控制电路等组成。

系统原理性试验方案及设备如图 6 所示:

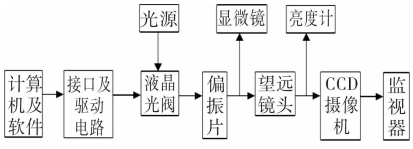


图 6　系统原理性试验方案图

Fig. 6　Principle test scheme of system

4.2　星图显示电路及接口电路设计

星图显示电路及接口电路的工作原理是:将视频接口控制器分成 2 个部分,即数字和模拟部分。数字部分包括用于逻辑控制和数据的 ASIC 以及数据存储用的缓冲器、模拟部分包括像素时钟发生器、视频放大器、A/D 转换器和模拟电压源等。将模拟部分放在控制器的前端,接收 VGR 视频信号并转换成数字格式,同步信号(VSYSC)、(NSYSC)和时钟也由这部分提供。数字化的视频数据被存储在缓冲区内,并连续地送到 TFT-LCD 上完成控制,工作原理图如图 7 所示。

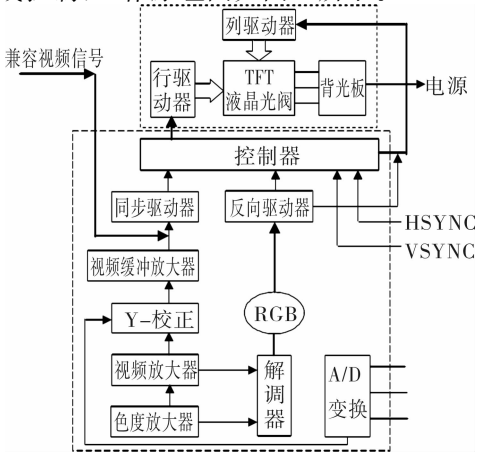


图 7　星图显示电路及接口电路的工作原理

Fig. 7　Working principle of display circuit and interface circuit

5　小型星模拟器的软件设计

5.1　小型星模拟器软件设计基础

星模拟器软件的任务是从 SAO 星表中按照视场大小进行导航星的提取,然后分别进行坐标和星等的交换,最后将这些星以二维图像的形式显示于计算机屏幕上,实现星空模拟。

由天文台提供的 SAO 星表并不是所需要时刻的星表,要对星表进行修正,同时应该考虑岁差和章动的影响。关于岁差和章动的数据可由理论公式计算得出,并对星表加以修正。

5.1.1　视场星图的建立

由经过岁差和章动校正的导航星在天球坐标系内的位置,以及系统实验主计算机给出的星敏感器光轴和 CCD 平面 X 轴在天球坐标系中的赤经赤纬,求解出星敏感器视场内的模拟星点位置。

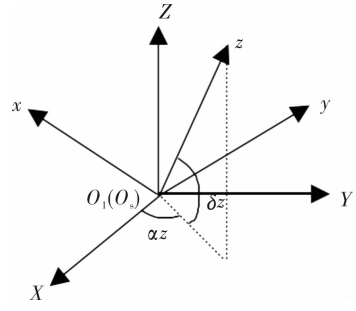


图 8　天球坐标系与星敏感器坐标系

Fig. 8　Celestial coordinate system and star sensor coordinate system

如图 8,X,Y,Z 为天球坐标系,$\boldsymbol{X}_1,\boldsymbol{Y}_1,\boldsymbol{Z}_1$ 为单位矢量;x,y,z 为星敏感器坐标系,$\boldsymbol{X}_s,\boldsymbol{Y}_s,\boldsymbol{Z}_s$ 为单位矢量,则有如下关系:

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix} = \boldsymbol{A} \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中:$\boldsymbol{A}$ 为两坐标变换的方向余弦阵,且为正交矩阵。又 X_s,Y_s 轴在天球坐标系中的赤经赤纬为 (α_x,δ_x) 和 (α_z,δ_z),则:

$$\alpha_{11}=\cos\alpha_x\cos\delta_x$$

$$\alpha_{31}=\cos\alpha_z\cos\delta_z$$

$$\alpha_{12}=\sin\alpha_x\cos\delta_x$$

$$\alpha_{32}=\sin\alpha_z\cos\delta_z$$

$$\alpha_{13}=\sin\delta_x$$

$$\alpha_{33}=\sin\delta_z$$

又由于:

$$\boldsymbol{y}_s=\boldsymbol{z}_s\times\boldsymbol{x}_s=\begin{bmatrix}\boldsymbol{i}&\boldsymbol{j}&\boldsymbol{k}\\ \alpha_{31}&\alpha_{32}&\alpha_{33}\\ \alpha_{11}&\alpha_{12}&\alpha_{13}\end{bmatrix} \tag{2}$$

则可以解出:

$\alpha_{21}=\sin\alpha_z\cos\delta_z\sin\delta_x-\sin\alpha_x\cos\delta_x\sin\delta_z$

$\alpha_{22}=\cos\alpha_x\cos\delta_x\sin\delta_z-\cos\alpha_z\cos\delta_z\sin\delta_x$

$\alpha_{23}=\cos\alpha_z\cos\delta_z\sin\delta_x\cos\delta_z-\sin\alpha_z\cos\delta_z\cos\alpha_x\cos\delta_x$

即为 $\boldsymbol{A}$ 矩阵各元素。

5.1.2 小型星敏感器软件设计要求

小型星模拟器是一种精度较高的目标仿真器。其功能是在实验室条件下按照主计算机要求范围,以动态方式仿真某个星空的局部,以此作为星敏感器的观测目标。通过对星模拟器的观测,可以在实验室条件下对星敏感器的性能,特别是动态特性进行测试,以评价星敏感器在卫星姿态轨道控制系统的工作状态。小型星模拟器设计软件的要求是:主要完成姿态数据接收、提取导航星、坐标变换、显示星图等功能。

5.2 小型星模拟器软件

小型星模拟器软件功能运行的主流程如图 9 所示。

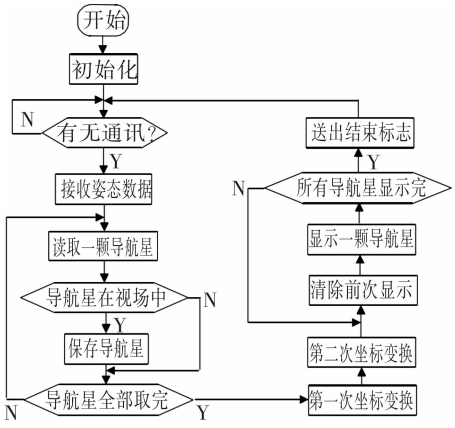


图 9 系统软件流程图

Fig. 9 Software flow chart of system

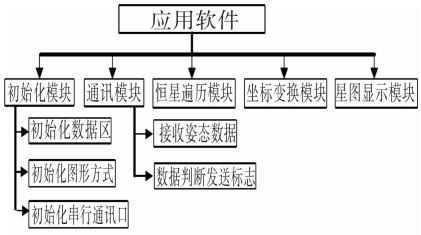
小型星模拟器软件的设计包括:初始化模块、通讯模块、恒星遍历模块、坐标变换模块、星图显示模块等。其软件模块组成见表 2。

表 2 软件模块组成

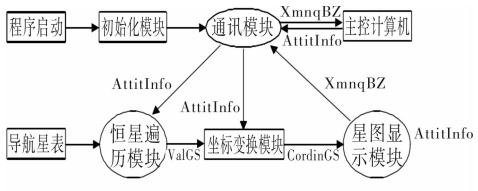
Table 2 Composition module of software

模块名称	标识	输入	处理	输出
初始化模块	INIT		初始化异步串行通讯口、初始化图形方式、初始化数据区;	初始化结果
通讯模块	COMU	通讯数据	初始化通讯队列、与主控计算机进行通讯、判断接收数据正误、发送标志;	通讯接收队列、标志
恒星遍历模块	StarSeek	通讯接收队列 导航星表	对导航星表进行遍历,提取出可能进入星模拟器现场的有效导航星	有效导航星队列,星数
坐标变换模块	Conv	通讯接收队列 有效导航星队列	进行坐标变换,求出有效导航星在星划拟器显示屏上的平面坐标	有效导航星平面坐标队列
星图显示模块	Disp	有效导航星 平面坐标队列	根据有效导航星的平面坐标,在星模拟器显示屏上显示星点	星图

软件具体设计结构如图 10 所示。



(a) 应用软件结构关系图



(b) 应用软件数据流图

图 10 系统应用软件结构图

Fig. 10 Application software structure of system

应用软件的外部接口只有一个通讯接口,即利用PC本身的异步串行通讯接口进行与主控计算机的通讯。

所有模块在软件运行之前都需要进行初始化,具体初始化流程图如下图11和图12所示。

6　小型星模拟器主要参数测量

星间角距和星等的精度是衡量星模拟器质量

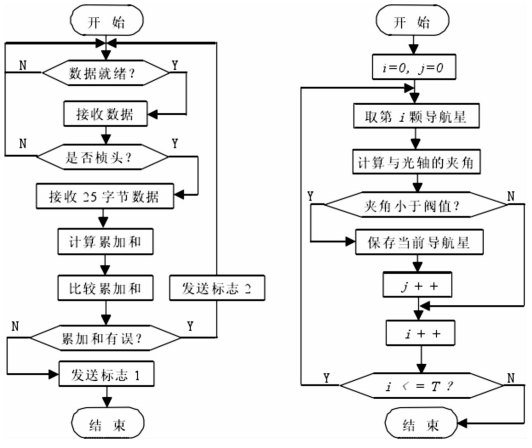


图11　通讯流程图和恒星遍历流程图

Fig. 11　Flow chart of communication and stars traversal

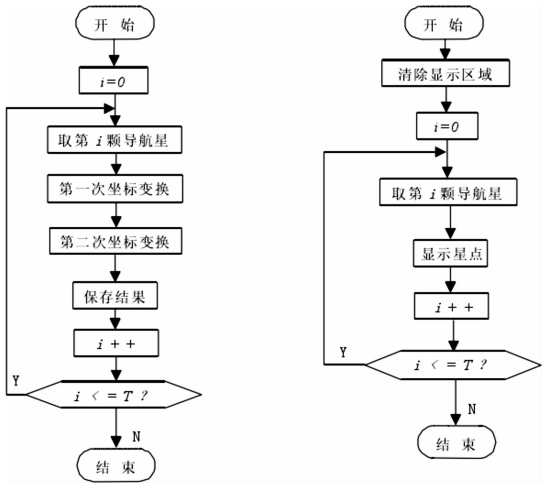


图12　坐标变换流程图和星图显示图

Fig. 12　Flow chart of coordinate transformation and star map display

最重要的技术指标。星间角距精度的误差主要分为系统误差和随机误差两个方面;检测星等是采用相适应的仪器星等。

部分实验数据结果如表3～表5所示。

表3　方位第一组的测试数据

Table 3　Test data of position of the first set

方位序号	检测的像元素坐标	坐标点的T4测试值	相邻两点间角度测试差值	相邻两点间角度标准值	相邻两点间角度误差值	误差极值点
1	1,1	0°0′ 72″	0	0	0	
2	101,1	0°39′ 57.4″	0°39′ 50.2″	0°39′ 54.9″	4.7″	
3	202,1	1°20′ 21.1″	0°40′ 23.7″	0°40′ 18.8″	4.9″	
4	303,1	2°0′ 36.7″	0°40′ 15.6″	0°40′ 18.8″	−3.2″	
5	404,1	2°40′ 56.1″	0°40′ 19.4″	0°40′ 18.8″	−0.6″	
6	505,1	3°21′ 20.9″	0°40′ 24.8″	0°40′ 18.8″	6.0″	6.0″
7	606,1	4°1′ 38.0″	0°40′ ,17.1″	0°40′ 18.8″	−1.7″	
8	707,1	4°42′ 0.9″	0°40′ 22.9″	0°40′ 18.8″	4.1″	
9	808,1	5°22′ 15.5″	0°40′ 14.6″	0°40′ 18.8″	−4.2″	−4.2″
10	909,1	6°2′ 36.1″	0°40′ 20.6″	0°40′ 18.8″	1.8″	
11	1 008,1	6°42′ 3.3″	0°39′ 27.2″	0°39′ 31.0″	−3.8″	
方位象元像 α_0 标准值		23.949″	方位角距最大误差值		10.2″	

表 4 高低第一组的测试数据

Table 4 Test data of high and low of the first set

高低序号	检测的象元素坐标	坐标点的T4测试值	相邻两点间角度测试差值	相邻两点间角度标准值	相邻两点间角度误差值	误差极值点
1	1,1	0°0′ 8.1″	0	0	0	
2	1,61	0°24′ 6.2″	0°23′ 58.1″	0°2.3″ 55.8″	2.3″	
3	1,162	1°4′ 27.8″	0°40′ 16.9″	0°40″ 16.9″	4.7″	4.7″
4	1,263	1°44′ 46.1″	0°40′ 18.3″	0°40′ 16.9″	1.4″	
5	1,364	2°25′ 1.5″	0°40′ 15.4″	0°40′ 16.9″	−1.5″	
6	1,465	3°5′ 13.8″	0°40′ 12.3″	0°40′ 16.9″	−4.6″	−4.6″
7	1,566	3°45′ 27.9″	0°40′ 14.1″	0°40′ 16.9″	−2.8″	
8	1,567	4°25′ 43.8″	0°40′ 15.9″	0°40′ 16.9″	−1.0″	
9	1,768	5°6′ 3.6″	0°40′ 19.8″	0°40′ 16.9″	2.9″	
高低像元素 α_0 标准值			23.93″	高低角距最大误差值		9.3″

表 5 方位、高低各组的测试数据

Table 5 Test data of bearing, high and low of each group

方位组号	方位各组角距最大误差值	误差极值点	高低组号	高低各组角距最大误差值	误差极值点
1	10.2″		1	9.3″	
2	7.5″		2	9.4″	
3	8.1″		3	8.0″	
4	7.2″		4	7.3″	
5	6.3″		5	5.6″	
6	8.2″		6	5.4″	
7	7.6″		7	6.1″	
8	10.7″	10.7″	8	8.3″	
9	9.6″		9	7.5″	
			10	9.8″	9.8″
			11	8.9″	
任意两点间距误差极值			$\Delta_{p\text{-}v\text{值}}=\sqrt{10.7^2+9.8^2}=14.5''$		

7 小型星模拟器精度分析

小型星模拟器一系列主要技术指标的精度与模拟星空间角位置的精度有关。经过测试计算,星库精度及星位置解算误差 $\delta_1\leqslant 2''$。又已知每个单星张角 $\alpha=23.73''$,2 个相邻单元的角间距也是 $23.73''$,连续的星空点空间位置则被一个角间距为 $\alpha/2$ 的离散系统代替,由此产生的位置误差为

$$\delta_2\leqslant\frac{\alpha/2}{2\sqrt{3}}\approx 3.43''$$

8 总结

本文从用户星敏感器的工程实际需要出发,

分析了模拟原理,详细设计了系统结构,研究了星敏感器的功能特性,系统体积小、结构简单、可靠性高,使之进一步较好地适应国内星敏感器的发展。本次设计是在实验室环境中,结合工程实际设计了具有大视场、小畸变、平像场、消色差成像特点的光学系统,系统具有很好的工程应用价值。

参考文献:

[1] 樊靖中. 空间光学姿态敏感器的发展[J]. 控制工程,1986(6):13-16.
FAN Jing-zhong. The development of space optical attitude sensors[J]. Control Engineering,1986(6):13-16. (in Chinese with an English abstract)

[2] 朱耆祥. 白天用. CCD 摄像机对天体目标的探测及实验[J]. 光电工程,1995,22(6):1-10.
ZHU Ji-xiang,BAI Tian-yong. CCD camera for celestial object detection and experiment[J]. The Photoelectric Engineering 1995,22(6):13-16. (in Chinese with an English abstract)

[3] SMITH J L ,WHITFORD C. 小卫星的低成本姿态确定与控制[J]. 控制工程,1998(2):41-53.
SMITH J L,WHITFORD C. The low cost of small satellite attitude determination and control[J]. Control Engineering ,1998(2):41-53. (in Chinese with an English abstract)

[4] SGHEDONI M. 多任务航天器平台的姿态和轨道控制系统[J]. 控制工程,1997(5):32-40.
SGHEDONI M. Multimission platform for spacecraft attitude and orbit control systems[J]. Control Engineering,1997(5):32-40. (in Chinese with an English abstract)

[5] 李春霞,付苓,许世文,等. 星模拟器光学系统的设计[J]. 哈尔滨工业大学学报,1998,30(3):115-117.
LI Chun-xia,FU Ling,XU Shi-wen,et al. Star simulator design of optical system[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,1998,30(3):115-117. (in Chinese with an English abstract)

[6] 郁道银,谈恒英. 工程光学基础教程[M]. 北京:机械工业出版社,2008.
YU Dao-yin,Tan Hen-ying. Engineering optical basic course[M]. Beijing:Mechanical Industry Press,2008. (in Chinese)

[7] 张杰,余敏,张涛,等. 全色彩 RGB 灯电控光源设计研究[J]. 应用光学,2012,33(6): 1047-1052.
ZHANG Jie, YU Min, ZHANG Tao, et al. Design and research of circuit controlled light source system of RGB LED[J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(6): 1047-1052. (in Chinese with an English abstract)

[8] 卢欣,方蓉初. 星敏感器技术[J]. 控制工程,2001(5/6):69-78.
LU Xin,FANG Rong-chu. The star sensor technology [J]. Journal of Control Engineering,2001(5/6):69-78.

[9] Van BEZOOIJEN R W H. Autonomous Star referenced attitude determination[M]. USA:NASA, 1989.

[10] 张杰,张涛,肖鹏. 多色温多星等输出的单星模拟器光机系统设计[J]. 应用光学, 2012, 33(5): 949-953.
ZHANG Jie, ZHANG Tao, XIAO Peng. Design and research of the opto-mechanical single-star simulator system of multi-color temperature and multi-magnitude output[J]. Journal of Applied Optics, 2012,33(5): 949-953. (in Chinese with an English abstract)

[11] 黄欣. 星敏感器光学系统参数的确定[J]. 控制工程,1999(5):19-24.
HUANG Xin. The star seusor optical system of parameters[J]. Control Engineering,1999(5):19-24. (in Chinese with an English abstract)