高精度星敏感器测试设备的设计

陈启梦1,张国玉1.2,王凌云1.2,王志海1,孙向阳1

(1. 长春理工大学 光电工程学院,吉林 长春 130022;

2. 吉林省光电测控仪器工程技术研究中心,吉林 长春 130022)

摘 要:针对现有动态星模拟器在高精度星敏感器测试中无法满足星点位置和照度均匀性的高精度 模拟等实际问题,设计了一种高精度动态星模拟器。分析了星模拟器光学系统与调整机构的任务需 求。为保证星点的投射精度,提出了LCOS的光学拼接方法,优化设计了大视场、大相对孔径的准直光 学系统并进行了像质评价;为满足显示器件照明条件和星点照度均匀性的要求,对照明光学系统进行 了仿真设计并给出了照度分布;为减小对接误差提高对模拟器的测试精度,确定了高分辨力五维调整 架的机械结构,应用 CATIA 软件对调整机构的设计进行了三维建模,理论计算结果显示调整机构位 移分辨力为 18 nm,角度分辨力为 0.05"。通过实际检测,微调整机构稳定性好,出射星点照度不均匀 性优于±10%,模拟星点的单星位置误差小于 7",星间角距误差优于 12",满足当前对高精度星敏感器 测试的技术指标要求。

关键词:动态星模拟器; 光学设计; 五维调整架; 纳米分辨力; 测试 中图分类号:V556.5 文献标志码:A 文章编号:1007-2276(2014)07-2234-06

Test equipment design of high precision star sensor

Chen Qimeng¹, Zhang Guoyu^{1,2}, Wang Lingyun^{1,2}, Wang Zhihai¹, Sun Xiangyang¹

(1. The School of Electro-optical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. Jilin Engineering Research Center of Photoelectric Measurement & Control Instruments, Changchun 130022, China)

Abstract: Considering the practical problem that existing equipment can not complete the mission of high precision simulating stars' position and illumination uniformity of star points in the test of high precision star sensor, a type of high precision dynamic star simulator was designed. To ensure the accuracy of the projected stars, a method of LCOS optical splicing was presented. Optimization principles and image quality evaluations of the collimating optical system with large field of view were give in detail. In order to meet the lighting conditions and illumination uniformity, an illuminating optical system using fly eye lens was designed. By determining mechanical structure of the five dimensional high –resolution adjustment frame and establishing three –dimensional model of design results with CATIA, displacement resolution was achieved to 18 nm, angle resolution was achieved to 0.05". Through experimental tests, it is found that the micro–adjustment mechanism is stability, the illumination inhomogeneity is better than

收稿日期:2013-11-06; 修订日期:2013-12-14

基金项目:国家 863 计划(2011AA701111)

作者简介:陈启梦(1989-),女,博士生,主要从事航天器地面标定方面的研究。Email:qmchen1989@163.com

导师简介:张国玉(1962-),男,教授,博士生导师,主要从事光电检测与航天器模拟设备等方面的研究。Email:zh_guoyu@yahoo.com.cn

 $\pm 10\%$ and angular distance accuracy is less than 12". The designed simulator can approach the test requirement of high precision star sensor.

Key words: dynamic star simulator; optical system design; five-dimension adjuster; nanometer resolution; test

0 引 言

星敏感器是精度最高的空间光姿态敏感器,通 过识别天空中的恒星来实时提供空间飞行器姿态 信息。随着高精度星敏感器的快速发展,对用于其 地面测试设备的要求也越来越高,如星图刷新速度 提升到毫秒量级,星间角距精度从几十秒提高到十 几秒^[1-2]。为保证标定精度,需设计出大视场、高精 度、高稳定性的标定设备,这对于光学设计、调整机 构和装调等技术都提出了更高的要求。

作为星敏感器的重要功能测试设备,动态星模 拟器可以实现对星敏感器观测天空的实时模拟。动 态星模拟器的星图以空间光调制器与光源组合控制 来完成,现有的动态星模拟器多采用 TFT-LCD 和 DMD 组件显示星图,其中 TFT-LCD 的对比度为 600:1、光能利用率仅为5%,无法达到星点照度的模拟 要求;而DMD的单个微反射镜尺寸为14µm×14µm、 相邻微镜间缝隙为1µm,很难实现星点位置的高精 度模拟。反射式硅基液晶(LCOS)的对比度为2500:1, 单像元尺寸可以做到 8 µm×8 µm, 像元间隙仅为 0.538 µm,因此选用 LCOS 显示星图具有明显优势。 在利用模拟器对敏感器测试时,需要对模拟器光学 系统部分进行多维调整,现有的调整架多为手动调 整,效率和分辨力都比较低,对接时光轴对准误差为 2"[3],降低了测试精度。为满足某高精度星敏感器单 星位置精度、星间角距的标定要求,采用LCOS作为 星图显示器件完成星像模拟,配合亚秒级微调整架 调整光学组件位置的方案,研制出一种大相对孔径、 大视场、高精度动态星模拟器。文中结合提高星点位 置模拟精度,提高检测与装调效率的设计思想,重点 对设备的光学系统进行优化仿真,对设备的微调整 机构进行详细设计。

1 动态星模拟器组成与技术指标

1.1 模拟器组成与工作原理

所设计的动态星模拟器主要由调整机构、计算

机控制系统、照明光学系统、空间光调制系统、准直 光学系统等组成,其构成如图1所示。星模拟器工作 时,调整机构精确稳定控制模拟器头部的位置,计算 机控制系统提供星敏感器坐标轴在惯性坐标系下的 指向,由星表数据生成当前时刻星敏感器所能观测 到的星图并向空间光调制系统输入显示命令,经过 调制的光线通过准直光学系统投射出平行光来模拟 无穷远的星空。





空间光调制系统的核心是 LCOS。结合星图显示 视场,LCOS 的像素数不能低于 1872×1872,考虑到 成本与技术参数等限制,目前市场中的多款器件均 无法满足分辨率要求。为解决单片器件分辨率不足 的问题,采用两片 LCOS 短边像素重叠的拼接方案, 拼接后的显示像素数提高到 1920×1920。如图 2 所 示是 LCOS 的拼接原理,介质膜偏振分光棱镜(PBS) 为 LCOS 提供一对等光程的共轭面,使两片 LCOS 分别位于准直光学系统的等效焦面处;采用一片 λ/2 波片产生 π 的位相延迟,使两片 LCOS 均被 S 线偏 振光点亮,以满足器件对照明光偏振性的要求。



Fig.2 Principle of LCOS' splicing

1.2 模拟器的技术指标

根据高精度星敏感器的地面测试要求,所设计 的动态星模拟器主要技术参数如表1所示。

表1动态星模拟器主要技术参数

Tab.1 Parameters of dynamic star simulator

No.	Parameter	Target
1	Field of view	$\Phi 22.4^{\circ}$
2	Entrance pupil diameter	$\not< \Phi$ 36 mm
3	Entrance pupil distance	≮ 48 mm
4	Wavelength range	500–800 nm
5	Stars positional accuracy	≤15″
6	Illumination homogeneity	≮90%

2 动态星模拟器光学系统设计

光学系统是动态星模拟器的核心组成之一,包 括准直和照明系统两部分,前者要求保证设备对星 点位置的精确模拟,后者则需要满足显示组件的照 明条件并实现均匀照明。

2.1 准直光学系统的设计

2.1.1 设计方案与设计结果

准直光学系统的性能直接影响星模拟器的精度 指标。设计的准直系统相对孔径较大,使边缘孔径的 球差增大而造成较大的准直误差^[4],需要使用合理 的正、负透镜组合来校正球差:出瞳距离大使主光线 入射高度增加引起垂轴像差明显增大,可以将系统 非对称化来平衡这些像差:指标要求的光谱范围是 500~800 nm,结合光焦度分配,考虑选用适当的材 料来尽量减小系统色差^[5]。

准直光学系统的焦距 f'由动态星模拟器的设计 视场 2ω 和 LCOS 拼接后的有效尺寸 A 来确定:

$$f' = \frac{\sqrt{2} A}{2 \tan \omega} = \frac{\sqrt{2} \times 15.36}{2 \tan 11.2^{\circ}} \approx 54.85$$
(1)

规划后的系统焦距出瞳直径为40mm,出瞳距 离为 50 mm, f'=54.99 mm, 结构如图 3 所示。系统前 两片透镜将光线迅速向光轴偏折;中间负光焦度组 用来校正彗差、畸变,并使前组累加的像差正负抵 消,透镜材料选用 H-ZK9A 和 H-ZF52A,可以在一 定程度上校正色差;最后引入弯月型透镜校正场曲 以及平衡剩余像差。



图 3 光学系统结构图

Fig.3 Layout of optical system structure

2.1.2 准直光学系统像质评价

20.0

规划后的系统像差曲线如图 4~图 7 所示。在尼



Fig.6 Diffraction encircled energy



图 7 场曲和畸变曲 Fig.7 Field curvature and distortion

奎斯特频率为 60 lp/mm 时,0°视场的 MTF 达到 0.8, 全视场时大于 0.5, 系统取得了较好的成像质 量;全视场的均方根弥散斑半径为 5.289 μm,系统点 列图对称性良好且能量中心与主光线偏差最大不超 过 0.7 μm;系统径向能量分布图显示,8 μm 的单像元 范围内能量集中度达到 90%以上,系统的能量集中 度满足模拟器使用要求;中心波长相对畸变小于 0.02%,产生的最大星点位置误差为 5.2″,完全符合 系统精度要求。

2.2 照明光学系统的设计

2.2.1 设计方案与设计结果

照明系统的设计重视其与显示组件的匹配¹⁶和 均匀光斑的获取:从 PBS 的工作原理考虑,PBS 只 对满足布儒斯特条件的入射光束产生固定消光比的 偏振分光;LCOS 接受光的照度均匀性直接影响出 射星点的照度均匀性,需要照明系统照度均匀性不 低于 90%,因此选用复眼透镜^[7]加附加镜结构作为 照明系统的基本形式,以获得一个准直均匀的照明 光斑。

整个照明光学系统 F 数由选用的 PBS 的光束 会聚角度 θ 确定:

$$F = \frac{1}{2\sin\theta} = \frac{1}{2\times\sin6^{\circ}} = 4.8 \tag{2}$$

根据系统 F 数进一步确定抛物反光镜和复眼透 镜等的设计参数,设计结果如图 8 所示:抛物面反光 碗的焦距为 5 mm,口径为 30 mm;复眼透镜单通道 尺寸为 4 mm×4 mm;附加镜组焦距为 115 mm。光源 发出的光可以经过抛物面反光碗,平行投射在第一 块复眼透镜前表面,第二块复眼透镜的前主面与第 一块复眼透镜的后焦面重合,将第一块复眼透镜分 割像成像于无穷远,附加镜组对第二块复眼透镜的 通光孔准直成像在辐照面上。





2.2.2 照明光学系统的仿真结果

根据照明光学系统的设计结果,建立仿真模型 并通过 Lighttools 软件进行蒙特卡洛光线追迹,仿真 模型及照度分布曲线见图 9。结果表明:星模拟器出 射的光在充满光瞳的范围内辐照度一致且均匀性达 到 95%,利于模拟器对出射光照度均匀性的控制,满 足设备对星点照度不均匀性优于±10%的使用要求。





3 动态星模拟器调整机构设计

精密调整架¹⁸的可靠性、高分辨力等性能直接决 定星模拟器测试时光轴调整精度从而影响对敏感器 的标定结果。调整机构应该能够同时完成水平移动、 偏转角调整、垂直移动的多维调整。采用搭积的结构 形式,将调整架分为*X*、*Y*二维平移和 *θ_x、θ_y、Z*三维调 整两部分,实现多维度的独立调整^[9]。

3.1 X、Y 二维平移设计

X、Y方向调整应避免机械爬行,尽量减小调整 架 Z 向的尺寸和 X、Y 平移干涉,故设计时使 X、Y 驱

动组件的施力点都在调整板上,在接触部位采用精 密轴承,保证 X、Y 导向的垂直度,X、Y 方向调整组件 结构与精密导向机构结构简图如图 10 所示。电机通 过联轴器与丝杆固结,丝杆螺母固定在大楔形块上, 并且大楔形块通过导轨副与小楔形块连接,电机带 动丝杆转动,丝杆法兰同大楔形块轴向移动,而小楔 形块由外壳轴向限位只能径向移动,并通过密封轴 承与导向组件接触,从而实现 X、Y 方向位移调整。



Fig.10 X,Y adjustment assembly structure and precision-oriented organization structure

3.2 θ_x 、 θ_y 、Z 三维调整

进行 θ_x 、 θ_y 调整时为使调整其中一个角而不影 响另一个角度的调整,考虑采用三个类似的 Z 调整 组件来实现。 θ_x 、 θ_y 、Z 向平移组件与调节机构结构简 图如图 11 所示,电机通过联轴器与丝杆固结,丝杆 法兰固定在连接块上,并且通过螺钉连接与大楔形



图 11 $\theta_{r_x}, \theta_{r_y}, Z$ 向平移组件与调节机构简图

Fig.11 $\theta_{x,y} \theta_{y,y} Z$ translation components and adjustment structure

块固结,大楔形块通过导轨副与小楔形块连接,电机 带动丝杆转动,丝杆法兰同大楔形块轴向移动,而小 楔形块由挡板限位只能 Z 向移动,并通过顶杆与过 调整板接触,从而实现 Z 向平移方向调整。将三个顶 杆与调整板接触的三个点构成一个等腰直角三角 形,与拉簧组件构成三拉三顶结构。三点形成的直角 三角中每一条直角边是一个旋转轴,这样可使调整 其中一个俯仰角时而不影响另一个角度的调整,可 完成 Z 方向位的升降和 θ_x、θ_y 俯仰调整。

3.3 调整机构整体三维建模与分辨力计算

经过对各个组件和零件的设计,应用 CATIA 软件对设计结果进行三维建模,并对各个部件进行了 装配,组装成总体装配三维模型如图 12 所示,调整 架结构对称、安排紧凑,内部中空、质量减小。



Fig.12 Assembled three-dimensional model of the general structure

选用的调整机构电机减速比为 1:50,步距角为 1.8°,楔形块夹角 θ =10°;Z 方向的调整件上有三个 支撑点通过三个顶杆与之连接,三个支撑点构成边 长为 80 mm 的直角三角形,则调整机构的位移分辨 力 l和角分辨力 θ' 由公式(3)、(4)可知:

$$l = (1.8^{\circ}/50) \times \frac{1}{360^{\circ}} \times \tan\theta \times 10^{6} = 17.6 \text{ nm}$$
 (3)

 $\theta' = \arctan(l/80) \times 3\ 600 = 0.045''$ (4)

计算结果表明,微调整机构通过多级细分实现 *X*、*Y*、*Z*方向的直线位移纳米级的分辨力,θ_x、θ_y角位 移达到亚秒级的分辨力,从而实现对模拟器头部高 分辨力的精确调整。

4 动态星模拟器精度分析与测试结果

4.1 精度分析

单星位置度误差综合偏差 ep 主要由能量中心与

主光线偏差产生的角度误差 $\Delta \alpha_1$ 、光学系统的准直 精度 $\Delta \alpha_2$ 、光学系统畸变校正残差引起的星点位置 度误差 $\Delta \alpha_3$ 、微调整机构对星模拟器角度调整精度 $\Delta \alpha_4$ 及 LCOS 像素不均匀、人眼对准误差 $\Delta \alpha_5$ 等因素 产生^[10]。根据公式(5)、(6)可以计算星模拟器理论单 星位置误差不大于 7",星间角距误差不大于 15",符 合模拟器对星点位置误差的精度要求。

$$|e_{p}| = \sqrt{\Delta \alpha_{1}^{2} + \Delta \alpha_{2}^{2} + \Delta \alpha_{3}^{2} + \Delta \alpha_{4}^{2} + \Delta \alpha_{5}^{2}} = \sqrt{2.6^{2} + 1.2^{2} + 5.2^{2} + 0.045^{2} + 2.5^{2}} = 6.45''$$
(5)

$$\sqrt{2} |e_p| = \sqrt{2} \times 6.45'' = 9.12''$$
 (6)

4.2 测试结果

对于所设计的光学系统来说,所模拟的星间角 距误差是最关键技术指标,对所设计的动态星模拟 器进行测试。

在 LCOS 上打出 10×10 即 100 个星点,测试时 分别读取被测星点的方位角 α_i和俯仰角 β_i,则实测 的星间角距值和星间角距误差值为:

 $\gamma_{\text{min}} = \arccos[\cos\beta_i \cos\beta_j \cos(\alpha_i - \alpha_j) + \sin\beta_i \sin\beta_j] \quad (7)$

$$\Delta = (\gamma_{\text{xm}} - \gamma_{\text{m}\hat{\kappa}}) \times 3 \ 600'' \tag{8}$$

图 13 给出一组星点位置的实测精度。测试结果显示,各星点相对中心点的位置误差小于 7",所有星 对星间角距误差最大为 11.78",满足技术指标的要求。



图 13 星点位置误差图

Fig.13 Test results of star's positional accuracy

5 结 论

设计出基于 LCOS 拼接的高精度动态星模拟器,其中准直光学系统符合大视场、大孔径、小畸变的设计要求,照明光学系统出射光达到高准直性、高均匀性的使用要求,微调整机构对位移和角分辨率

精度很高,对于实现模拟器精密调整起到了一定作用,与已有相关设备相比具有星点位置模拟精度高、 照度均匀性好、测试稳定等优点。经过仿真分析和实 际测试,所设计的光学系统可以保证动态星模拟器 对高精度星敏感器的测试需要,出射星点照度不均 匀性优于±10%,模拟星点的星间角距误差优于12″, 满足高精度星敏感器的测试要求。

参考文献:

- Qiao Peiyu, He Xin, Wei Zhonghui, et al. Calibration of high –accuracy star sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2779–2784. (in Chinese)
- [2] Wei Xinguo, Zhang Guangjun, Fan Qiaoyun, et al. Ground function test method of star sensor using simulated sky image [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 37 (6): 1087–1091. (in Chinese)
- [3] Zheng Ru, Zhang Guoyu, Gao Yue, et al. Optical system design of dynamic star simulator based on LCOS splicing technology [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(9): 2144–2150. (in Chinese)
- [4] He Yinbo, Xiong Jingyi, Wu Guozhong, et al. Technology and applications of LCOS projector [J]. *Optical Instruments*, 2002, 24(2): 38-46. (in Chinese)
- [5] Zhang Jiyan, Liu Weiqi, Liu Hua, et al. Optical engines for high-performance LCoS projection systems[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2005, 20(6): 539–543. (in Chinese)
- [6] Chang Lingying, Zhao Baochang, Yang Jianfeng, et al. Optical design of ground scenery simulator [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(12): 2437–2441. (in Chinese)
- [7] Zhang Jianzhong, Sun Qiang, Yang Le, et al. Design of LCD –based visible scene simulator with long exit pupil relief and large field of view [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2453–2458. (in Chinese)
- [8] Gao Yunguo, Zhang Qian, Shi Yali, et al. Structure design of precise displacement platform without guiding apparatus [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17 (9): 2199 –2204. (in Chinese)
- [9] Luo Yong. Coordinates –decoupling of multidimensional precision optical adjusting frame [J]. *Opto –Electronic Engineering*, 2011, 38(4): 37–40. (in Chinese)
- [10] Guo Xiarui, Wang Chunyu, Liao Zhibo, et al. Misalignment and assemblage stress analysis in space transmission optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 14(4): 948–951. (in Chinese)