

# 高精度 LCOS 动态星模拟器的光学系统设计

陈启梦<sup>1</sup> 张国玉<sup>1,2</sup> 孙向阳<sup>1</sup> 王国名<sup>1</sup> 王哲<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022  
<sup>2</sup> 吉林省光电测控仪器工程技术研究中心, 吉林 长春 130022)

**摘要** 针对高精度星敏传感器对其功能测试设备精确模拟星点位置和星等的实际要求,设计了一种硅基液晶(LCOS)型高精度动态星模拟器的光学系统。分析星模拟器准直与照明光学系统的任务需求并给出了设计方案。为提高模拟器的成像精度,提出了 LCOS 的光学拼接方法,详细设计了大视场、大相对孔径、大出瞳距离的准直光学系统并进行了像质评价;为同时满足显示器件的照明条件和 $-1\sim 7$ 等星的准确模拟,对照明光学系统进行了详细设计并给出了仿真结果。提出了一种动态星模拟器星点位置修正方法,通过实验测试,动态星模拟器的星间角距误差优于 $12''$ ,精确模拟 $-1\sim 7$ 等星,满足当前对高精度星敏传感器的检测需要。

**关键词** 光学设计;星模拟器;硅基液晶;光学拼接;复眼照明

**中图分类号** V249.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0716003

## Optical System Design of LCOS-Based and High Precision Dynamic Star Simulator

Chen Qimeng<sup>1</sup> Zhang Guoyu<sup>1,2</sup> Sun Xiangyang<sup>1</sup> Wang Guoming<sup>1</sup> Wang Zhe<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Optical Engineering Institute, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022  
<sup>2</sup> Jilin Engineering Research Center of Photoelectric Measurement & Control Instruments, Changchun, Jilin 130022)

**Abstract** Aiming at completing functional tests on high precision star sensor of stars' positional accuracy and star magnitude, an optical system of liquid crystal on silicon (LCOS)-based and high precision dynamic star simulator is designed. The general designing program is presented after the analysis of the collimating and the illuminating optical system. In order to improve the simulating precision, a optical splicing method of LCOS is put forward, designing process of a collimating optical system with large field of view, large relative aperture and long exit pupil is given in detail as well as the aberration diagrams. To satisfy the illuminating conditions ordered by LCOS and achieve simulation of  $-1$  to  $7$  magnitude stars, an illuminating optical system is emulated. Experimental test indicates that the angular distance accuracy is less than  $12''$ , and  $-1$  magnitude to  $7$  magnitude stars can be simulated, which meets the calibration requirements of high precision star sensor.

**Key words** optical design; star simulator; liquid crystal on silicon; optical splicing; fly eye lens

**OCIS codes** 080.1010; 080.3620; 220.2945; 220.3620; 220.4840

## 1 引言

空间飞行器在太空中运行时,利用空间光导航敏感器捕获和提取其飞行姿态。星敏传感器是精度最高的空间光导航敏感器,通过识别天空中的恒星来实时

提供运载体位置信息。随着高精度星敏传感器的快速发展,对于其地面检测装置的要求也越来越高,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;星等模拟范围扩大到 10 等星<sup>[1-2]</sup>。

收稿日期: 2013-10-28; 收到修改稿日期: 2014-02-12

基金项目: 国家 863 计划(2011AA701111)

作者简介: 陈启梦(1989—),女,博士研究生,主要从事航天器地面标定方面的研究。E-mail: 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。

E-mail: zh\_guoyu@yahoo.com.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

动态星模拟器就是一种对星敏传感器进行功能测试的设备,可以实现对星敏传感器观测天空的实时模拟。现有的动态星模拟器多采用薄膜晶体管液晶显示屏(TFT-LCD)和数字微镜器件(DMD)组件显示星图,其中 TFT-LCD 的对比度为 600:1,光能利用率低于 10%,无法达到多星等的模拟要求,星等模拟范围多在 2~6 等星;而 DMD 的单个微反射镜尺寸为  $14\ \mu\text{m}\times 14\ \mu\text{m}$ 、相邻微镜间缝隙为  $1\ \mu\text{m}$ ,很难实现星点位置的高精度模拟,相关资料表明星间角距精度只能达到  $40''$  [3-4]。与 TFT-LCD 和 DMD 相比,反射式硅基液晶(LCOS)的光能利用率高达 55%,单象元尺寸可以做到  $8\ \mu\text{m}\times 8\ \mu\text{m}$ ,象元间隙仅为  $0.538\ \mu\text{m}$ ,作为星图显示器件具有明显的优势。因此为满足某高精度星敏传感器星间角距和星等的标验,采用 LCOS 作为星图显示器件,研制出一种大视场、大相对孔径、高精度动态型模拟器。本文结合提高设备模拟精度的设计思想,提出两片 LCOS 光学拼接的技术方案;针对出瞳外置的不对称系统像差难以校正和 LCOS 照明难以匹配的设计难点,重点对设备的光学系统进行优化设计和仿真分析。

## 2 动态星模拟器组成与工作原理

### 2.1 模拟器主要技术指标

根据高精度星敏传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

Table 1 Performance index of dynamic star simulator

Parameter	Performance index
Field of view / ( $^\circ$ )	22
Entrance pupil diameter / mm	36
Entrance pupil distance / mm	60
Wavelength range / nm	500~800
Stars positional accuracy / ( $''$ )	12
Star magnitude	-1~7

### 2.2 模拟器的工作原理与 LCOS 拼接

所设计的动态型模拟器主要由计算机控制系统、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。模拟器工作时,计算机控制系统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。

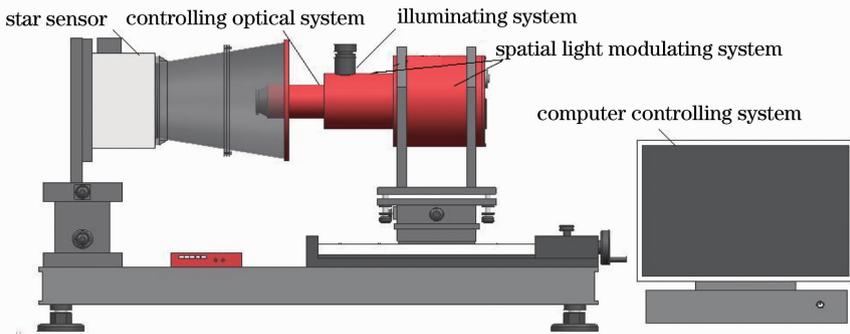


图 1 动态星模拟器工作原理

Fig. 1 Working principle of dynamic star simulator

LCOS 是空间光调制系统的关键器件,根据模拟器视场和精度的指标要求,LCOS 的像素数不能低于  $1872\times 1872$ ,考虑到国外对出口的限制与技术水平等条件的制约,目前在市场中能获得的多款 LCOS 器件

均无法满足实际设计要求。为解决单片显示器件分辨率不足的问题,采用两片 LCOS 利用一块介质膜偏振分光棱镜(PBS)相邻工作面进行短边像素重叠的拼接方案,使拼接后的显示像素数提高到  $1920\times 1920$ 。图 2 是 LCOS 的拼接原理,PBS 可以提供一对等光程的共轭面,从而两片 LCOS 共用一个光引擎架构[5],简化了光引擎结构,减小了光调制系统的体积;从 LCOS 只对 S 线偏振光起到调制作用的工作原理考虑,采用一片  $\lambda/2$  波片使被透射的 P 线偏振光光路产生  $\pi$  的位相延迟,形成 S 线偏振光点亮正对光源的 LCOS,这样就可以满足器件对照明光偏振性的要求。为满足星图中星点星等模拟准确的要求,保证两片 LCOS 拼接像面等亮度,计算机控制系统对两片

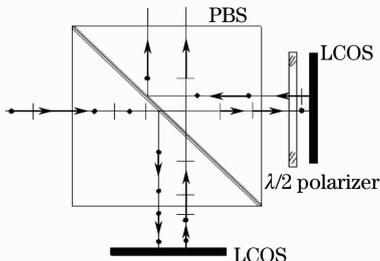


图 2 LCOS 的拼接原理

Fig. 2 Splicing principle of LCOS

LCOS 的显示灰度进行分幅控制消除透射光路两次经过波片对能量的影响。

### 3 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间角距的精确模拟,后者既需要满足显示组件的照明条件还需要实现对星等的准确模拟。

#### 3.1 准直光学系统的设计

##### 3.1.1 准直光学系统设计方案

根据星模拟器投射光原理,LCOS 放置在准直光学系统的焦平面上,空间光调制系统接收计算机系统由星表数据生成当前时刻星传感器所能观测到的星图显示命令,经过 LCOS 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星空星点位置的实时变化。因此动态星模拟器准直光学系统的性能直接影响星模拟器的精度指标,设计时主要考虑四点目标:1) 为使模拟的星点对星传感器具有很高的成像位置精度,要严格校正系统的畸变;2) 用调制传递函数(MTF)评价系统整体设计的好坏,要求轴外视场与轴上视场的点列图形状尽可能一致且几何半径相差不大;3) 星传感器探测模拟星点的能量中心,希望系统各视场的弥散斑对称性良好、尽量减小能量中心与主光线偏差;4) 为便于星传感器提取星点,应该保证系统 80% 的能量集中在 LCOS 单像素范围内<sup>[6-8]</sup>。

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,需要使用合理的正、负透镜组合来校正球差;系统光阑外置,大的出瞳距离使主光线入射高度增加引起垂轴像差明显增大,可以引入非对称的结构平衡这些像差<sup>[9]</sup>;指标要求的光谱范围是 500~800 nm,由各种色光的折射率不同而产生的位置色差和倍率色差均会给模拟星点位置带来误差,前者造成不同色光的像面不重合,导致光学系统的几何中心及能量中心的偏移,后者严重时破坏轴外星点的清晰度,故需要结合光焦度分配,选择合适的材料来尽量消除系统色差。

##### 3.1.2 准直光学系统设计结果

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

$$f' = \frac{\sqrt{2}A}{2\tan\omega} = \frac{\sqrt{2} \times 15.36}{2\tan 11^\circ} \approx 55.87. \quad (1)$$

规划后的系统焦距  $f' = 56.02$  mm,结构如图 3 所示,所有透镜采用传统面型结构紧凑。系统采用

+ - + 的光焦度分配形式,前两片正透镜将光线迅速向光轴偏折;中间负光焦度组具有失对称的结构特点,用来校正彗差、畸变,并使前组累加的像差正负抵消;后组正透镜材料选用 H-FK61,其折射率为 1.4970、阿贝数达到 81.5947,可以在一定程度上校正色差,同时正光焦度组引入弯月型透镜校正场曲以及平衡剩余像差。

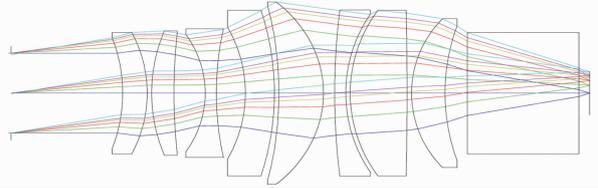


图 3 准直物镜光学系统图

Fig. 3 Layout of collimator objective

##### 3.1.3 准直光学系统像质评价

规划后的系统像差曲线如图 4 所示。在奈奎斯特频率为 60 lp/mm 时,0° 视场的 MTF 达到 0.75,全视场时大于 0.45,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 6.425  $\mu\text{m}$  (scale bar is 20  $\mu\text{m}$ ),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 0.5  $\mu\text{m}$ ;系统能量均匀,8  $\mu\text{m}$  范围内能量集中度达到 85% 以上;中心波长相对畸变小于 0.02%,完全符合系统设计的要求。

#### 3.2 照明光学系统的设计

##### 3.2.1 照明光学系统设计方案

在照明系统的设计中,尤其重视其与 LCOS 组件的匹配和 LCOS 上均匀光斑的获取。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,根据选用的 PBS,照明光学系统的光束会聚角度不能超过 6°<sup>[10-11]</sup>,从 LCOS 自身的特性考虑,光束的入射角度越大,图像的对比特度下降越显著,使用需求方面就要求照明系统具有准直性;LCOS 接收光的照度均匀性直接影响模拟器对星等的精确控制,根据星等的亮度计算,照明系统照度均匀性要不低于 90%,技术功能方面就要求照明系统出射光的均匀性。因此照明系统设计时要解决的具体问题是如何获得一个准直且均匀的照明光斑。

选用的照明系统结构如图 5 所示,光源发出的光经过抛物反光镜整形,平行投射在第一块复眼透镜前表面,透镜阵列将光源像分割若干部分,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,附加镜设计成双分离形式,既对第二块复眼透镜的通光孔

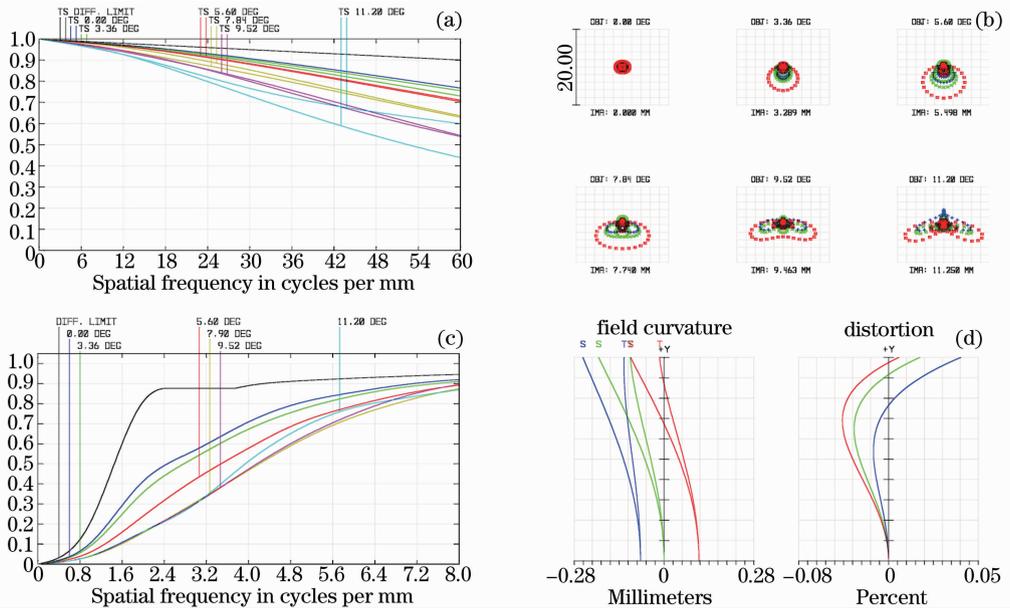


图 4 准直光学系统像差曲线。(a) MTF; (b) 点列图; (c) 径向能量分布曲线; (d) 场曲和畸变曲

Fig. 4 Aberration curves of collimating optical system. (a) MTF; (b) spot diagram; (c) diffraction encircled energy distribution curves; (d) field curvature and distortion

准直成像在辐照面上,又在一定程度上减小色差从而降低宽光谱色散的影响<sup>[12-13]</sup>。

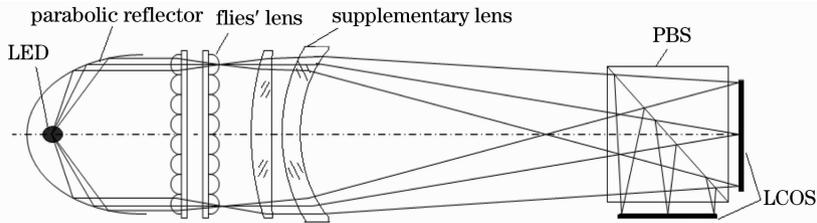


图 5 照明系统结构示意图

Fig. 5 Structure diagram of illumination system

### 3.2.2 照明光学系统设计结果

光源选择的主要依据是模拟星等范围和星图尺寸。已知每相邻星等间的亮度差为 2.512 倍,为实现 -1~7 等星的模拟,照明系统和空间光控制系统的对比度  $M$  应满足

$$M = \frac{E_2}{E_{10}} = \frac{E_0}{(2.512)^{-1}} / \frac{E_0}{(2.512)^7} = (2.512)^8 \approx 1585. \quad (2)$$

选用的 LCOS 对比度为 2500:1,故只需要 LED 经过系统各部分衰减后的辐照度大于 -1 等星的辐照度  $6.43 \times 10^{-6} \text{ lx}$ ,经计算光源选用发光角度为  $120^\circ$  的 OSRAM3014 型 LED。

整个照明光学系统  $F$  数由出射光线会聚角度  $\theta$  确定

$$F = \frac{1}{2 \sin \theta} = \frac{1}{2 \times \sin 6^\circ} = 4.8. \quad (3)$$

如图 6 所示对抛物反光碗进行设计,先对其截面进行计算,再旋转得到立体模型。为了便于理解,

以椭圆反光碗设计为基础,将抛物线看成是一个椭圆,当它的两焦点相聚无穷远的情况,便可推导出抛物反光碗的参数计算方法,如(4)~(7)式

$$(r')^2 = r^2 + s^2 - 2rs \cos(\pi - \alpha), \quad (4)$$

$$r + r' = s + 2f, \quad (5)$$

$$r = 2f / \left( 1 + \frac{1 + E \cos \alpha}{1 + E} \right), \quad (6)$$

当  $s \rightarrow \infty$  时,

$$\begin{cases} r = 2f / (1 + \cos \alpha) \\ R = r \times \sin(\alpha) \end{cases}. \quad (7)$$

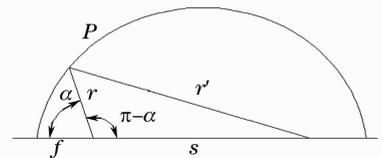


图 6 椭圆的各参数示意图

Fig. 6 Sketch of ellipse's parameters

根据 LED 参数和系统  $F$  数确定抛物反光镜和复眼透镜等的设计参数:抛物面反光碗的焦距为 5 mm,口径为 34.64 mm,长度为 35 mm;复眼透镜通道数为  $8 \times 8$  阵列,单通道尺寸为  $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ ;附加镜组焦距为 115 mm,后工作距离为 10 mm。

### 3.2.3 照明光学系统的仿真结果

根据准直光学系统和照明光学系统的设计,建立动态星模拟器光学部分仿真模型如图 7 所示。仿真模型通过 Lighttools 软件进行光线追迹得到的照度分布如图 8 所示。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%,利于模拟器对星等的控制,满足设备的使用要求。

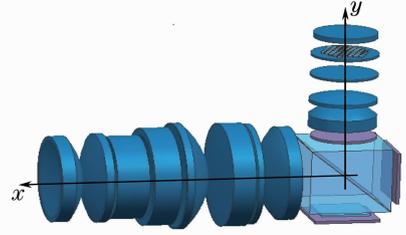


图 7 动态星模拟器模型

Fig. 7 Layout of dynamic star simulator

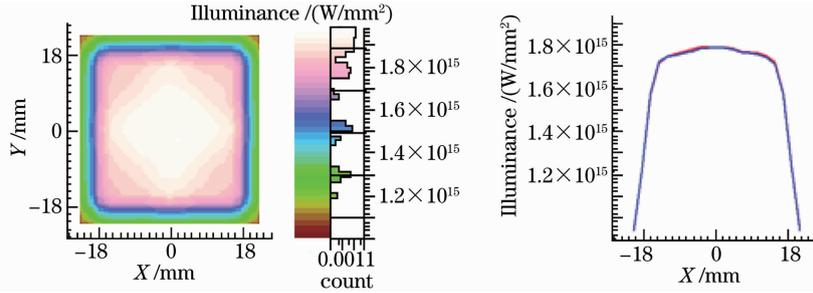


图 8 星模拟器出射光照度图

Fig. 8 Star simulator's illumination diagram

## 4 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和星等精度是关键技术指标,决定着动态星模拟器对星敏感器的标定水平,将设计的光学系统与计算机控制系统、空间光调制器相连进行测试。

### 4.1 星点位置修正与测试

#### 4.1.1 修正方法及过程

为减小系统剩余畸变对模拟器星点位置模拟精度的影响,提出一种星点显示位置的修正方法,修正模型如图 9 所示。已知一个星点在 LCOS 上的位置坐标  $(x, y)$ ,则该点相对于 LCOS 中心的距离  $d = \sqrt{x^2 + y^2}$ ,由焦距  $f$ 、视场  $\omega$  得到  $\omega = \arctan(d/f)$ 。结合准直光学系统畸变曲线,模拟器各个视场内星点的向心偏移量  $\Delta z$  可求,星点修正后的新坐标为

$\left[ x + \Delta z \cdot \cos\left(\arctan \frac{y}{x}\right), y + \Delta z \cdot \sin\left(\arctan \frac{y}{x}\right) \right]$ ,按照四舍五入的方法确定修正后星点在 LCOS 上的点亮像素。

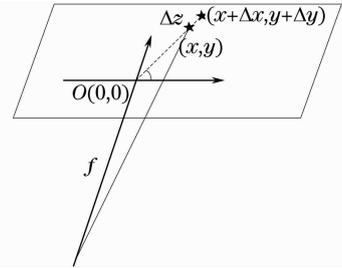


图 9 星点位置修正模型

Fig. 9 Corrected model of star position

根据设计结果,应用最小二乘法拟合办法得到偏移量修正曲线,如(8)式所示及星点在  $X$ 、 $Y$  方向偏移量与视场和方向角的三维曲面图如图 10 所示。

$$\begin{aligned} \Delta z = & -2.1252 \times 10^{-7} \omega^5 + 205681 \times 10^{-6} \omega^{-} - 8.3247 \times 10^{-6} \omega^3 + \\ & 1.8135 \times 10^{-5} \omega^2 - 2.0918 \times 10^{-5} \omega + 3.0624 \times 10^{-5}. \end{aligned} \quad (8)$$

#### 4.1.2 星点位置测试

在 LCOS 上打出一幅 11 个星点修正后的星图,使用精度为  $0.5''$  的徕卡 5100A 型经纬仪,读取星点位置的实测结果。图 11 给出星图上所有星点之

位置,由(9)式可知任意两星点角距精度为

$$\sigma = \arctan(a/f') - \theta', \quad (9)$$

式中  $a$  为 LCOS 上两星点间距离,  $f'$  为焦距,  $\theta'$  为星间星间角距误差。测试结果显示,各星点相对中心

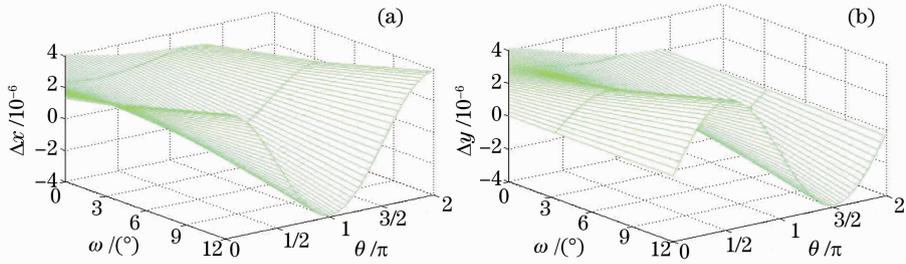


图 10 X、Y 方向偏移量与视场角和方向角三维曲面图

Fig. 10 Coefficient fitting curve of  $\Delta z, \omega$  and  $\arctan(y/x)$

点的单星位置误差均小于  $6''$ ，所有星对的星间角距误差优于  $12''$ ，满足技术指标的要求。

关设备相比具有星点位置模拟精度高、均匀性好、星等范围大等优点。建立一种动态星模拟器修正方法，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对高精度星敏感器的测试需要，模拟星点的星间焦距误差优于  $12''$ ，星等  $-1 \sim 7$  可调，满足高精度星敏感器的测试要求。

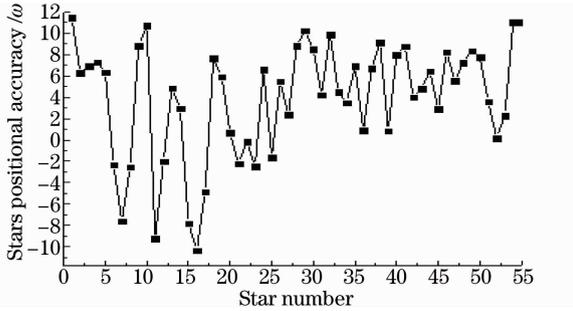


图 11 星点位置误差

Fig. 11 Error of star's position

#### 4.2 星点亮度测试

使用 KLL-04 型微光光度计对所模拟星等进行测试，其可以探测到  $10^{-8}$  lx，满足  $-1 \sim 7$  等星的测试要求。图 12 给出对一幅拥有 11 颗星、6 个星等的星图星点输出照度测试结果与对应的理论照度比较，其结果表明所设计的光学系统可以实现高精度的星等模拟。

#### 参 考 文 献

- Li Xuexie, Hao Zhihang, Li Jie, *et al.*. The research on the method of the star's position determination of the star sensor[J]. Chinese J Electron Devices, 2004, 27(4): 571-574. 李学夔, 郝志航, 李 杰, 等. 星敏感器的星点定位方法研究[J]. 电子器件, 2004, 27(4): 571-574.
- Sun Xiangyang, Zhang Guoyu, Duan Jie, *et al.*. Design of star charts simulator for high-precision star simulator[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0523001. 孙向阳, 张国玉, 段 洁, 等. 高精度星模拟器目标标准源设计[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0523001.
- Zhang Wenming, Lin Ling, Hao Yongjie, *et al.*. Design of a dynamic display system for star map in small-sized star simulator[J]. Opto-Electronic Engineering, 2000, 27(5): 11-14. 张文明, 林 玲, 郝永杰, 等. 小型星模拟器中星图动态显示系统的设计[J]. 光电工程, 2000, 27(5): 11-14.
- Gong Yan, Hu Yining, Zhao Yang. Design of mini star simulator based on digital optical processing[J]. Opt Precision Eng, 2007, 15(11): 1698-1703. 巩 岩, 胡宜宁, 赵 阳. 基于数字光处理技术的小型星模拟器设计[J]. 光学精密工程, 2007, 15(11): 1698-1703.
- He Yinbo, Xiong Jingyi, Wu Guozhong, *et al.*. Technology and applications of LCOS projector[J]. Optical Instruments, 2002, 24(2): 38-47. 贺银波, 熊静懿, 吴国忠, 等. LCOS 投影显示技术及应用[J]. 光学仪器, 2002, 24(2): 38-47.
- Liu Yaping, Li Juan, Zhang Hong. Design and calibration of star simulator[J]. Infrared and Laser Eng, 2006, 35(z1): 331-334. 刘亚平, 李 娟, 张 宏. 星模拟器的设计与标定[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(z1): 331-334.
- Li Jing, Yang Baoxi, Hu Zhonghua, *et al.*. Development and performance testing of optical system for star sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0522005. 李 璟, 杨宝喜, 胡中华, 等. 星敏感器光学系统的研制与性能测试[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0522005.
- Yan Peipei, Fan Xuewu. Design of optical system of very high precision star sensor with small F-number [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(9): 092202. 闫佩佩, 樊学武. 大相对孔径甚高精度星敏感器光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(9): 092202.
- Wang Zhijiang. Optical Technique Handbook [M]. Beijing:

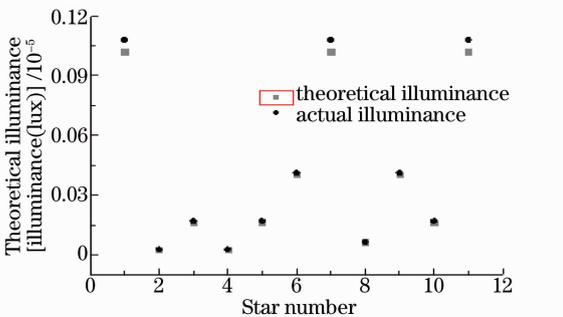


图 12 星等误差

Fig. 12 Error of star magnitude

## 5 结 论

设计出基于 LCOS 拼接的大视场、高精度动态星模拟器光学系统部分，其中准直光学系统符合宽光谱、小畸变、平像场的设计要求，照明光学系统出射光达到高均匀性、高准直性的使用要求，与已有相

- Mechanical Industry Press, 1987. 128-130.
- 王之江. 光学技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987. 128-130.
- 10 Zhou Jie, Liu Xu, Li Haifeng. Theoretical design method for improving the polarization performance of LCLV projection system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(1): 63-66.
- 周杰, 刘许, 李海峰. 改善液晶光阀投影光学系统偏振特性的理论设计方法[J]. *光学学报*, 2003, 23(1): 63-66.
- 11 Dai Yongping. LCOS micro display technology [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2009, 24(4): 471-477.
- 代永平. LCOS 微显示技术[J]. *液晶与显示*, 2009, 24(4): 471-477.
- 12 Zhou Ping, Lu Wei, Lin Yuxiang, *et al.*. Fly eye lens array used in liquid crystal projection display with high light efficiency[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(5): 587-591.
- 周平, 陆巍, 林宇翔, 等. 复眼透镜提高液晶投影照明系统的能量利用率[J]. *光学学报*, 2004, 24(5): 587-591.
- 13 Lu Fake, Li Haifeng, Gu Peifu, *et al.*. Development of visible-light optical simulator based on liquid crystal on silicon technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(5): 736-739.
- 鲁法珂, 李海峰, 顾培夫, 等. 基于硅基液晶显示技术的可见光光学目标模拟器的研制[J]. *光学学报*, 2006, 26(5): 736-739.

栏目编辑: 韩峰