

高精度数字星等模拟器的设计

高兴华, 李建永*, 王霞

北华大学机械工程学院, 吉林 吉林 132013

摘要 星等模拟器是星传感器的地面标定和关键测试设备。设计了一种准直光学系统用于模拟“无穷远”处的星光, 系统采用4片式透镜分离结构, 满足微弱光需求的同时, 提升了系统的成像质量, 光学系统出瞳外置, 实现了高精度星图的模拟; 基于脉冲宽度调制(PWM)信号调节LED光源作为系统的高精度可变目标光源, 对比度为631:1, 光源系统实现了单点可控和联合调控的功能; 在暗室条件下对星等进行测试。结果表明在 $10\ \mu\text{m}$ 的星点孔下, 系统实现了0~7等星控制, 各星等的微调范围不小于半个星等, 模拟精度小于0.1(重复实验定点落在 $\pm 0.4\%$ 的要求范围内), 光谱范围覆盖整个可见光。

关键词 光学设计; 星模拟器; 星等; 星传感器; 准直光学系统

中图分类号 TH74 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.022202

Design of High-Precision Digital Star Magnitude Simulator

Gao Xinghua, Li Jianyong, Wang Xia

College of Mechanical Engineering, Beihua University, Jilin, Jilin 132013, China

Abstract Magnitude simulator is the calibration and critical testing equipment on the ground for star sensor. A collimation optical system is designed to simulate the "infinity" starlight. In this system, four lens separation structure is used to meet the demand of weak light and improve the quality of image. The beam passes through the external exit pupil to the star sensor, and high-precision star image simulation is achieved. Based on the pulse width modulation (PWM) signal, a single-point controllable LED light is adjusted as the high-precision variable light source. With a contrast of 631:1, the single-point control and joint control functions of the light source system are realized. The magnitude is tested in a darkroom. Results show that, under $10\ \mu\text{m}$ star hole, the system can simulate 0-7 star magnitude. The magnitude of the tuning range is not less than half of a star, the simulation precision is less than 0.1 (the points of repeat tests fall within $\pm 0.4\%$ of the required range), and the spectral range covers the entire visible spectrum.

Key words optical design; star simulator; star magnitude; star sensor; collimation optical system

OCIS codes 220.4830; 220.4840

1 引言

随着深空导航技术的不断发展, 空间光学姿态传感器的应用日益广泛, 常用的空间光学姿态传感器中, 恒星传感器(简称星传感器)的精度最高, 促使人们对其开展深入的研究。接受恒星发射的光并将其量化成星等是星传感器关键技术之一, 因此需要对星传感器的光信号接收设备进行标定, 为解决在轨标定昂贵、难维护等缺点, 星模拟器作为星传感器的地面标定和测试设备应运而生^[1]。

星模拟器按照目标模拟方式可以分为两种: 静态星模拟器和动态星模拟器。动态星模拟器主要由背光板和液晶光阀组成, 在地面上进行星图模拟, 产生与星传感器相匹配的实时星图, 对星传感器的星图识别、星点提取等进行功能性检测; 静态星模拟器主要对星等、星点位置等进行模拟, 对星传感器的探测能力、空间分

收稿日期: 2016-09-01; **收到修改稿日期:** 2016-10-18

作者简介: 高兴华(1966—), 女, 教授, 主要从事光电、机电智能控制方面的研究。

E-mail: xhgao1964@126.com

* **通信联系人.** E-mail: 604204901@qq.com

分辨率以及精度性能等进行检测^[2]。2003年电子科技大学和中科院光电技术研究所共同研制的小型光学导航敏感器标定系统,其星等模拟范围为2~6.5等,星等模拟精度为 ± 0.3 ;2010年长春理工大学研制的静态星模拟器和动态星模拟器可模拟5~10等星,星间角距误差小于等于 $0.5''$,质量控制在5 kg;北京航空航天大学与航天时代电子公司联合研制的多星动态星模拟器,其星等模拟范围为2~7等星,模拟精度为 ± 0.5 ^[3]。星模拟器的发展趋势逐步向高精度、轻量化方向发展^[4]。本文设计的高精度数字星模拟器主要实现对星等的高精度模拟,以便星敏感器捕捉正确的恒星信号,实现了以半个星等为单位、0~7等共15个星等档位的模拟,模拟精度达0.1,控制距离为10 m。该星模拟器光源采用LED照明系统,通过调制脉冲信号的数字化控制实现了光源的单点控制和联合调控,光照度调节范围达1~640 lux,调节精度优于0.1 lux,光谱范围覆盖整个可见光。系统整体直径不超过3 cm,长度不超过5 cm,与传统模拟控制的星模拟器相比,该模拟器具有轻量化、热量低、稳定性高、控制简单等优点。

2 系统工作原理

静态星模拟器主要包括高精度可变目标源和准直光学系统,高精度可变目标源包括驱动电路板、LED光源、星点孔板等,设备安装在密闭光室中,防止外界因素的干扰。星等模拟器的工作原理如图1所示。计算机发出的控制信号传递给高精度可变目标源,驱动电路板根据计算机的命令信号控制给定位置的LED光源发光,光束透过星点孔板到达准直光学系统,将目标光源模拟成来自“无穷远”天空中的星光,到达准直光学系统的出瞳位置并投射到星敏感器的入瞳位置,形成星图。LED光源能够实现单点可控和联合调控的功能,每个星点的亮度可通过控制单元进行设定。

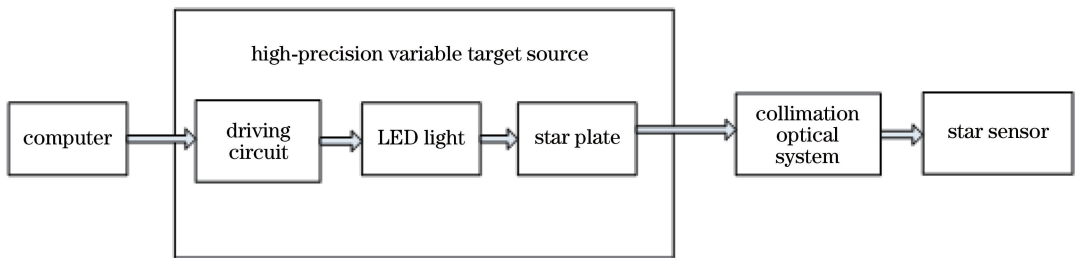


图1 星等模拟器工作原理框图

Fig. 1 Working principle diagram of star simulator

3 光学系统设计

3.1 设计参数

光学系统的设计直接影响模拟星等的位置精度和模拟精度等性能指标。为避免光通量的浪费,光学系统要遵循光瞳衔接原则,即星等模拟器的出瞳应与星敏感器的入瞳重合;为保证星图的成像质量以及星等的模拟精度,光学系统需要具有较高的像质^[5]。根据系统要求本课题组设计了一个高成像质量、出瞳外置的准直光学系统。

星模拟器的出瞳直径原则上大于等于星敏感器的入瞳直径,为使两者光瞳相匹配且不造成光通量的浪费,实际设计值取入瞳直径与出瞳直径相等,为50 mm,出瞳距离大于120 mm。

实验选取的星点孔板的直径 d 为 $10\ \mu\text{m}$,视场角 θ 为 0.001° 。由下式计算得到光学系统的焦距。

$$f' = \frac{d}{2 \tan \frac{\theta}{2}}, \quad (1)$$

式中 f' 为光学系统的焦距, d 为星点孔大小, θ 为平行光管的有效视场。

计算得到光学系统的焦距为550 mm。确定了入瞳直径和焦距值,得到光学系统的相对孔径为 $D/f = 50/550 = 1/11$ 。

综上,根据星敏感器的地面标定要求,确定高精度静态星等模拟器光学系统的设计参数如表1所示。

表 1 光学系统设计参数

Table 1 Design parameters of the optical system

System parameter	Value
Focal length	(550±10) mm
Angle of view	0.001°
Relative aperture	1/11
Central wavelength	0.59 μm
Exit-pupil diameter	50 mm

3.2 结构选取

为满足微弱光的需求,通常选用透镜式结构作为星等模拟器的光学结构,另外其光学结构通常采用双胶合或三片式结构,为进一步提升成像质量,校正轴像外差,采用 4 片式分离系统。光学系统的光路图如图 2 所示。

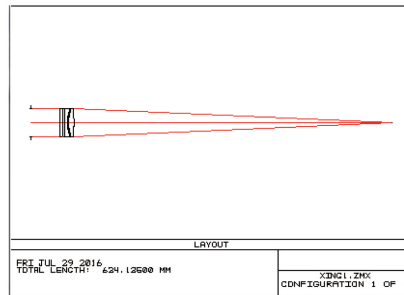


图 2 光学系统光路图

Fig. 2 Optical path of the optical system

设计后系统的实际焦距为 550.007 mm,相对孔径为 1/11,系统的入瞳直径为 50 mm。像高应为 0.005 mm,实际像高为 0.00497 mm。系统总长为 624.126 mm。

3.3 像质评价

星模拟器的像差不能影响星敏感器的使用要求,为保证星图的位置精度,星模拟器的光学系统要求畸变和倍率色差均不能太大^[6]。最终光学系统的性能指标评价方法主要有:调制传递函数(MTF)曲线、点列图、场曲与畸变曲线、波像差等^[7]。

1) MTF。光学系统的设计通常用 MTF 曲线来衡量系统的准直性,但是不能只追求高质量的 MTF 曲线,同时也要保证各视场的弥散斑。星点孔板的直径为 10 μm,得到要求的奈奎斯特频率如下:

$$N = \frac{1}{2d} = \frac{1}{2 \times 0.01} = 50 \text{ lp/mm} \quad (2)$$

系统的 MTF 曲线如图 3 所示。奈奎斯特频率为 50 lp/mm 时,系统的 MTF 值大于 0.5,接近衍射极限,满足系统的技术指标要求。

2) 点列图。根据弥散斑与 MTF 曲线的关系,如果弥散斑小,则 MTF 值就会高,系统的像质比较好,系统的点列图如图 4 所示。弥散斑的均方根半径(RSM)值均小于 0.005 mm,能量中心与主光线位置偏差不大,满足系统要求。

3) 畸变。畸变的大小对系统的像质没有影响,但它直接关系到星点的位置精度,因此畸变是系统设计中最为关注的像差,消畸变是系统设计过程中的重点。系统的畸变会引起像高的变化,根据畸变的定义:

$$\frac{\Delta y'}{y'} = \frac{f' \times \Delta \theta}{f'} = \frac{\Delta \theta}{\theta} \quad (3)$$

式中 y' 为系统的像高, $\Delta y'$ 为系统像高的变化, f' 为系统的焦距, $\Delta \theta$ 为星间角距的变化, θ 为星间角距。(3) 式说明像高的变化等于星间角距的变化,所以畸变的大小由星敏感器的定位精度决定。对于星等模拟器,像

高 $y' = f' \times \tan \theta$, 绝对畸变 $\Delta y' = \Delta \theta \times f'$, 相对畸变 $\frac{\Delta y'}{y'} = \frac{f' \times \Delta \theta}{f' \tan \theta} = \frac{\Delta \theta}{\tan \theta}$ 。

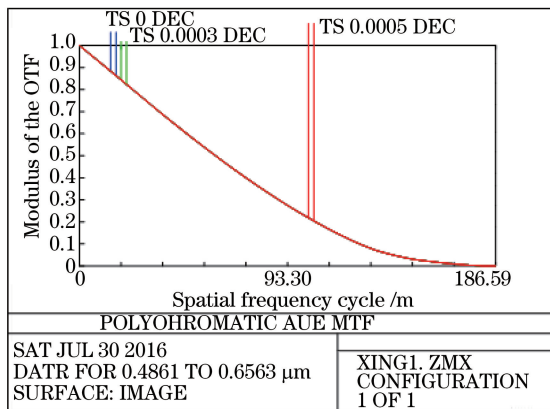


图3 MTF曲线
Fig. 3 MTF curve

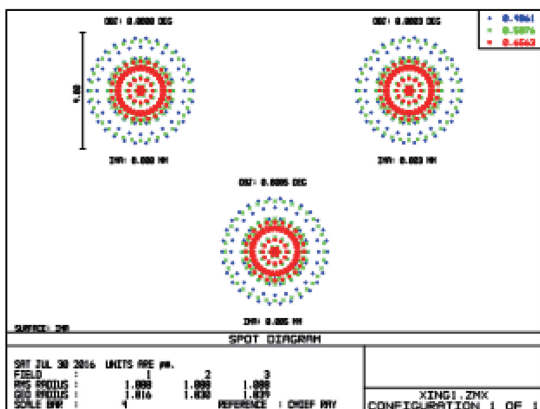


图4 点列图
Fig. 4 Spot diagram

系统的场曲与畸变曲线如图5所示,全视场内认定系统没有畸变。

4) 波像差。系统的波前如图6所示。系统的波像差均方值不大于 $\lambda/34.4$, 满足系统波像差小于 $\lambda/20$ 的要求,具有良好的成像质量。

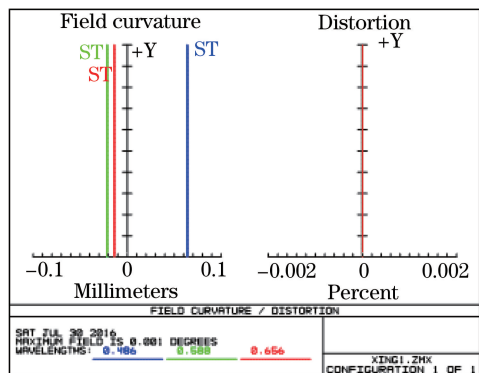


图5 场曲与畸变曲线
Fig. 5 Curves of field curvature and distortion

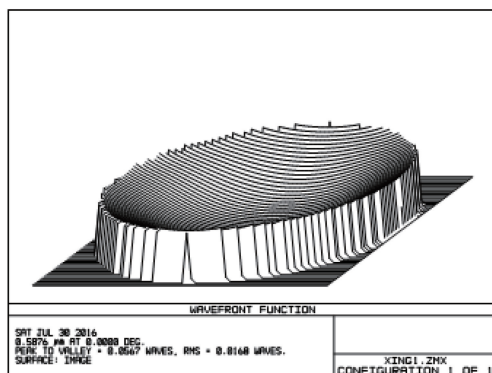


图6 波前图
Fig. 6 Wavefront diagram

4 星等的模拟

为解决传统卤素灯光源体积大、控制复杂、成本高、发热量大、寿命短、稳定性差等问题,本研究选用体积小、寿命长、光谱稳定性好的 LED 灯作为系统的光源^[8]。为满足星光全光谱范围的要求,光源器件应为全色可见光波段范围,选用的具体型号为 CREE 公司中性白系列的 X Lamp LED 光源,其驱动电流为 1 A,相关色温(CCT)为 3700~5000 K,光通量高,可达 100 lm。X Lamp LED 光源的光谱特性和电流与相对光通量特性曲线分别如图7和图8所示。

LED 调光控制实质是在从关断到开通后保持加入的电压基本恒定,通过控制电流的变化使 LED 发生明暗变化,为保证星等的模拟精度,先确定 LED 光源的亮暗对比度^[9]。已知零等星的亮度为 $E_0 = 2.70 \times 10^2 \text{ cd/m}^2$, 相邻两星等之间的亮度差 2.512 倍,本研究模拟 0~7 等星,则 LED 光源的亮暗对比度为

$$M = \frac{E_0}{E_7} = \frac{E_0}{\frac{E_0}{2.512^7}} = 2.512^7 \approx 631. \tag{4}$$

由 0 等星的亮度可以得到 7 等星的亮度为

$$E_7 = \frac{E_0}{2.512^7} \approx 0.428 \text{ cd/m}^2. \tag{5}$$

控制 LED 所加的电压和电流的比率以保证 LED 的对比度达 631:1。为解决模拟调光导致 LED 的电

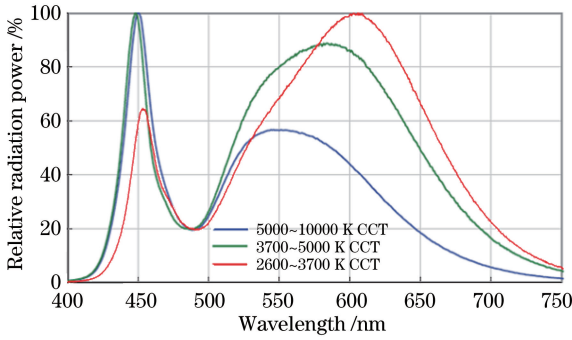


图 7 X Lamp LED 光源的光谱特性

Fig. 7 Spectrum characteristics of X Lamp LED source

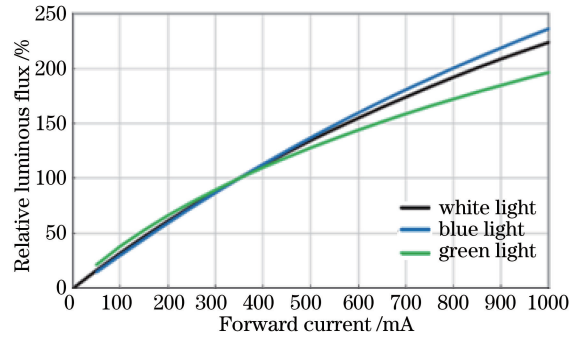


图 8 X Lamp LED 光源的电流与相对光通量特性曲线

Fig. 8 Current and the relative flux characteristics curves of X Lamp LED source

压下降从而造成色差的问题, LED 光照度由脉宽调制(PWM)信号调节线性输出, 同时也能保证光源色温稳定^[10]。PWM 的调光原理图如图 9 所示。

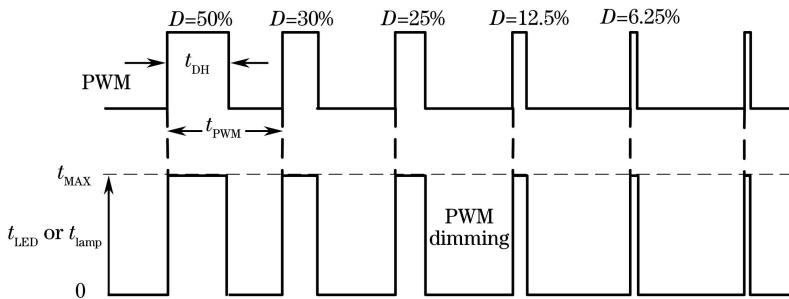


图 9 PWM 的调光原理图

Fig. 9 PWM dimming principle diagram

光源的控制系统主要包括计算机控制系统、通信接口电路、主控制器、隔离电路、发送/接收匹配器、驱动器、采样电路以及 LED 光源。控制器原理结构框图如图 10 所示。

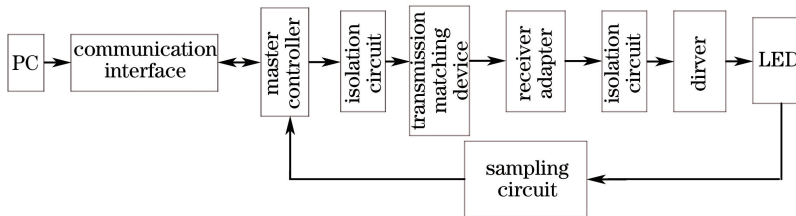


图 10 控制器原理结构框图

Fig. 10 Schematic diagram of controller

上位计算机通过串口将控制信号传递给控制器, 单片机产生不同占空比的 PWM 信号, 经过功率驱动器变换输出电流调节 LED, 同时为提高控制器输出电流的精度, 在输出端采集电流, 形成闭环控制系统。为确保系统的安全可靠运行, 在核心芯片与功率型芯片间设计了隔离电路。

5 星等测试

星等测试前对控制系统进行调试, 实验设备选用 ATmega16 微控制器产生 1.0 kHz 的 PWM, 通过示波器检测输入 PWM 占空比与 LED 照度之间的关系, 然后调节星模拟器焦距, 使其达到最佳效果。PWM 占空比与 LED 照度的关系曲线如图 11 所示。

为了验证系统整体的稳定性, 在不同环境的暗室条件下对星等模拟器进行耐久性测试。测试过程中, 选用 PHOTO-2000 μ 微光照度计, 将照度计放置于准直光学系统的出瞳处探测 LED 的光照度, 获得如表 2 所示的实验数据, 星等模拟器的照度失真率如图 12 所示。

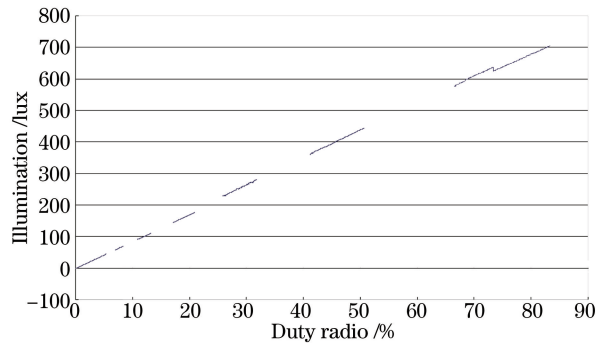


图 11 PWM 占空比与 LED 照度的关系

Fig. 11 Relationship between PWM duty cycle and LED illumination

由表 2 和图 12 可以看出,在多次不同环境下,系统波动性在 $\pm 0.4\%$ 以内,具有很高的重复稳定性,满足星等模拟器 ± 0.1 m 的模拟精度。

测试的同时计量不同星等所需的 PWM 脉冲数。得到模拟星等与 PWM 脉冲数的关系曲线如图 13 所示。由于所用照度计只能探测到 6 等星的照度,因而对于 7 等星,按照 2.512 的倍数对 6 等星所需的 PWM 脉冲数进行衰减,模拟得到 7 等星所需的脉冲数。

表 2 星等模拟器测试数据

Table 2 Test data of the star magnitude simulator

Date	Temperature /°C	Relative humidity /%	LED working time		LED illumination		
			Start time	End time	Start /lux	End /lux	Distortion /%
Feb.8 th	-12--24	57	13:00	15:45	568	566	-0.35
Feb.9 th	-8--18	59	10:00	12:30	440	441	0.23
Feb.10 th	-11--26	61	10:00	12:50	328	327	-0.30
Feb.11 st	-10--27	60	16:00	19:00	95.6	95.4	-0.21
Feb.12 nd	-4--28	58	13:30	16:00	121	121	0.00
Feb.13 rd	-2--26	57	13:30	16:20	604	602	-0.33
Feb.14 th	-3--18	59	9:00	11:00	576	577	0.17
Feb.15 th	-7--25	62	9:20	12:00	146	146	0.00
Feb.16 th	-9--28	64	12:30	14:30	70.2	72.3	0.14
Feb.17 th	-7--27	63	13:00	16:10	349	350	0.29
Feb.18 th	-5--25	60	19:30	22:10	253	252	-0.39
Feb.19 th	-2--25	59	17:30	20:20	217	217	0.00
Feb.20 th	-5--22	59	10:15	13:00	80.2	80.4	0.25
Feb.21 st	-6--25	57	14:00	16:40	361	360	-0.28
Feb.22 nd	-6--18	59	20:00	22:00	178	178	0.00

通过上述测试结果进行分析可以得知,模拟星等与 PWM 脉冲信号分布符合 2.512 倍关系,而星等照度与 PWM 脉冲占空比呈线性关系;在 $10\ \mu\text{m}$ 的星点孔下,实验达到了 1~640 lux 即 0~7 共 15 个星等的照

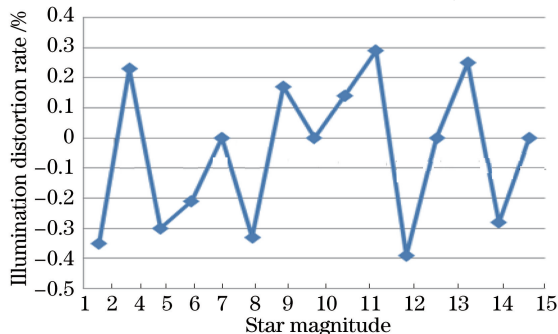


图 12 星等模拟器的照度失真率

Fig. 12 Illumination distortion rate of the magnitude simulator

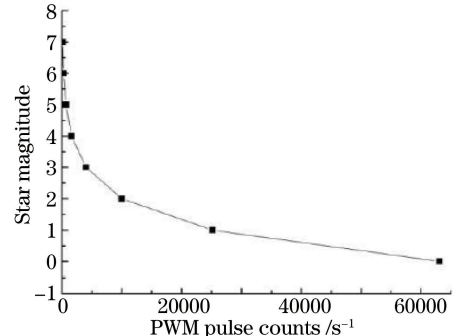


图 13 模拟星等与 PWM 脉冲数的关系

Fig. 13 Relationship between star magnitudes and PWM pulses

度要求,并且具有良好的线性度;各星等的微调范围不小于半个星等,可以满足要求的定点精度,重复实验定点落在 $\pm 0.4\%$ 的要求范围内,即模拟精度小于0.1;LED在要求的照度范围内基本不发热,谱范围覆盖整个可见光。

6 结 论

从星敏感器的地面标定设备的要求出发,设计了一种光谱范围覆盖整个可见光的高精度星等模拟器,该系统的星等模拟范围达0~7等,控制精度为0.1(重复实验定点落在 $\pm 0.4\%$ 的要求范围内),各星等的微调范围不小于半个星等,光照度调节范围达1~640 lx,调节精度优于0.1 lx。

参 考 文 献

- [1] Chen Qimeng, Zhang Guoyu, Wang Zhe, *et al.* Optical system design of high-precision static star simulator with high field view[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(5): 052202.
陈启梦, 张国玉, 王 哲, 等. 大视场高精度静态星模拟器的光学系统设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(5): 052202.
- [2] Liu Hongxing, Ren Jianwei, Liu Zexun, *et al.* LED-based single star simulator with multi-color-temperature and multi-star-magnitude output[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0212003.
刘洪兴, 任建伟, 刘则询, 等. 基于LED的多色温多星等单星模拟器[J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0212003.
- [3] Chen Qimeng, Zhang Guoyu, Sun Xiangyang, *et al.* Optical system design of LCOS-based and high precision dynamic star simulator[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(7): 0716003.
陈启梦, 张国玉, 孙向阳, 等. 高精度 LCOS 动态星模拟器的光学系统设计[J]. *中国激光*, 2014, 41(7): 0716003.
- [4] Sun Gaofei, Zhang Guoyu, Jiang Huilin, *et al.* Design of high accuracy star simulator [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(8): 1730-1735.
孙高飞, 张国玉, 姜会林, 等. 甚高精度星模拟器设计[J]. *光学 精密工程*, 2011, 19(8): 1730-1735.
- [5] Liu Yaping, Li Juan, Zhang Hong. Design and calibration of star simulator[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 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.
- [6] Tao Xue. Research on high precision static star simulator [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2013.
陶 雪. 高精度静态星模拟器研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2013.
- [7] Gong Yan, Hu Yining, Zhao Yang. Design of a mini star simulator based on digital optical processing[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 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.
- [8] Sun Xiangyang, Zhang Guoyu, Wang Dayi, *et al.* Opto-mechanical structure design of large-scale and high precision star simulator[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(9): 2121-2126.
孙向阳, 张国玉, 王大轶, 等. 大尺寸高精度星模拟器光机结构设计[J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(9): 2121-2126.
- [9] Ouyang Mingzhao. Optical system desigh of transmittive high-precision star simulator [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2010.
欧阳名钊. 透射式高精度星模拟器光学系统设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2010.
- [10] Zhao Chengren, Zhang Tao, Lin Xingtai. Design of single star simulator system with multi-color-temperature and multi-magnitude output[J]. *China Measurement & Test*, 2012, 38(3): 61-64.
赵成仁, 张 涛, 林兴泰. 多色温多星等输出的单星模拟器系统设计[J]. *中国测试*, 2012, 38(3): 61-64.