

## 基于 $\mu$ LED 发光技术的新型星模拟器设计

孙向阳<sup>1,2</sup>, 付跃刚<sup>2</sup>, 李杰<sup>1</sup>, 段洁<sup>2</sup>

(1. 长春大学 电子信息工程学院, 吉林 长春 130022;

2. 长春理工大学 博士后流动站, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 针对常规星模拟器存在的模拟参数少、精度低和模拟技术难度大等具体问题, 将  $\mu$ LED 发光技术引入到星模拟器的设计中, 提出一种基于  $\mu$ LED 发光技术的新型星模拟器研制方法。结合星模拟器准直光学系统设计结果, 详细设计了整体机械结构, 以确保其具有在仿真环境下, 最大程度弱化温变、振动等外界因素的特性。重点研究星点位置精度和星点发光亮度的控制技术, 并对星点圆度、星点发光均匀度以及星点光谱控制技术进行具体分析。分析与测试结果均表明, 所设计的星模拟器具有星间角距精度小于  $3''$ , 多种 5 个连续星等模拟, 同时满足星点圆度、发光均匀度以及发光光谱的多参数模拟性能。所提出的设计方法也为更高级别的星模拟器研制提供一种可行的技术方案。

**关键词:** 星模拟器; 光学设计;  $\mu$ LED; 星间角距精度; 星等

**中图分类号:** V524.7 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0424002

## New star simulator design based on $\mu$ LED luminous technology

Sun Xiangyang<sup>1,2</sup>, Fu Yuegang<sup>2</sup>, Li Jie<sup>1</sup>, Duan Jie<sup>2</sup>

(1. School of Electronic and Information Engineering, Changchun University, Changchun 130022, China;

2. Post-doctoral Mobile Stations, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** According to some specific problems of conventional star simulator including the less simulation parameters, low accuracy and big difficulty of star simulation technology, by creatively introducing the  $\mu$ LED luminous technology into the design of star simulator, a development scheme of novel star simulator based on the  $\mu$ LED luminous technology was proposed. Combining with design results of collimating optical system, the overall mechanical structure of star simulator was designed in detail, to ensure that the designed simulator having characteristics of the largest possible weakening of temperature change, vibration and other external factors in the simulation environment. Control technology of star position accuracy, star brightness, star roundness, emitting uniformity of star light was researched and analyzed. Analysis and test results show that the designed star simulator owing the properties of angular distance precision between stars less than  $3''$ , a variety simulation of 5 continuous magnitudes, at the same time to meet multi-parameter simulation requirement about the star roundness, luminous uniformity and luminescence spectra. The proposed design method can provide a feasible technical solution for the development of higher level of star simulator.

**Key words:** star simulator; optical design;  $\mu$ LED; accuracy of angular distance between stars; magnitude

收稿日期: 2015-08-05; 修订日期: 2015-09-11

基金项目: 吉林省教育厅“十二五”科学技术研究项目(2015LY502L12)

作者简介: 孙向阳(1978-), 男, 讲师, 博士, 主要从事航天器地面模拟技术与光电检测技术方面的研究。Email: sxy0321@126.com

## 0 引言

星模拟器的作用就是为星敏感器的地面标定提供模拟的标准星图。通过分析星敏传感器所提取的标准星图的误差来完成星敏传感器工作参数的标定和修正。当前由于星敏传感器性能指标要求的不断提高,常规的星图模拟技术就显得相对落后,无论是面光源与靶标配合模拟的静态星图,或液晶光阀控制像素发光的动态星图,甚至是能提供更高分辨率的 LCOS 拼接方式的星图,均不能实现星敏传感器标定中对星间角距精度、星等模拟精度、星点发光光谱、星点发光均匀度以及星点圆度等多种参数的模拟。从查阅的相关文献可以看出,靶标是在金属板上通过机械加工通孔制作的,模拟星点的位置和亮度不能实时改变。而基于液晶光阀控制来模拟星图,单个像素点亮度受电流调节的限制,无法实现多范围星图等模拟,即使可通过像素块大小来表示星等的不同,但在同一副星图中完成不同像素块大小的控制仍很难实现;而采用像素块模拟星点,根本不能满足高精度星敏传感器在微米级精度下对星点圆度指标的要求,并且对于通过提取发光点质心来计算星点位置的常规算法缺点明显<sup>[1-3]</sup>。笔者也曾设计出一款基于光纤与 OLED 面光源耦合技术的星模拟器,虽然可以实现单星可控、星点圆度和发光均匀度的模拟,但装调精度要求非常严格,研制成本和后期维护费用较高,技术不易推广<sup>[4-5]</sup>。

而随着微光电子机械系统(MOEMS)应用技术的日益成熟, $\mu$ LED 作为发光光源的应用技术逐步成熟。因此针对以上已有星模拟器的技术缺点,文中创新性地将  $\mu$ LED 引入到星模拟器的设计当中,提出一种基于  $\mu$ LED 发光技术的星图模拟器研制方法,并设计一款星模拟器,来实现星敏传感器标定中对星间角距精度、星等、星点圆度、星点发光均匀度以及星点发光光谱等多参数的标定要求。

## 1 星模拟器工作原理与设计思想

文中提出的星模拟器主要由星图模拟光源和准直光学系统两部分组成。如图 1 所示,精微可控电源控制  $\mu$ LED 上各个点的亮暗(灭),使  $\mu$ LED 实现不

同星图的变换,微调焦机构保证  $\mu$ LED 处于理想的焦平面处;准直光学系统将  $\mu$ LED 模拟的星图在衰减、滤光后,以较高的准直度投射到被标定星敏感器的入瞳处。

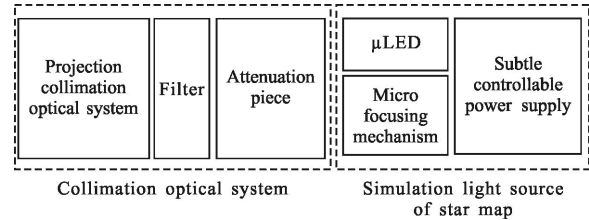


图 1 星模拟器总体构成

Fig.1 Overall composition of star simulator

方案中作为星模拟光源的  $\mu$ LED 是应用 MOEMS 技术在 LED 外延片上加工的,是由多个  $\mu$  级大小圆点构成的一幅多点发光面。MOEMS 技术可以使  $\mu$  级的发光点成阵列布局,也能根据星敏感器的标定需求进行专用星图图案设计。此设计方案可使星图模拟光源无需通过其他机构配合实现星点的位置控制, $\mu$ LED 自身的  $\mu$  级加工精度就能保证星点位置精度,同时也保证了星点的圆度和星点发光均匀度。采用此方案将大大简化传统的星模拟器总体机构配置,装调和后期维护更加简便<sup>[6]</sup>。

## 2 星模拟器的总体设计

准直光学系统是星模拟器的重要组成部分之一,其基本参数由被标定星敏感器的光学系统参数决定。针对某型星敏传感器标定要求,给出一款星模拟器准直光学系统的设计结果,并参考此结果进行整体机械结构设计。

### 2.1 星模拟器光学系统设计

光学系统采用透射式光学系统,设计结果如图 2 所示。基本参数为:焦距 517.493 mm,像高 15.364 mm。为计算星点位置精度,给出场曲和畸变像差曲线,由图 3 可以看出最大相对畸变小于 0.0048%。



图 2 星模拟器光学系统

Fig.2 Optical system of star simulator

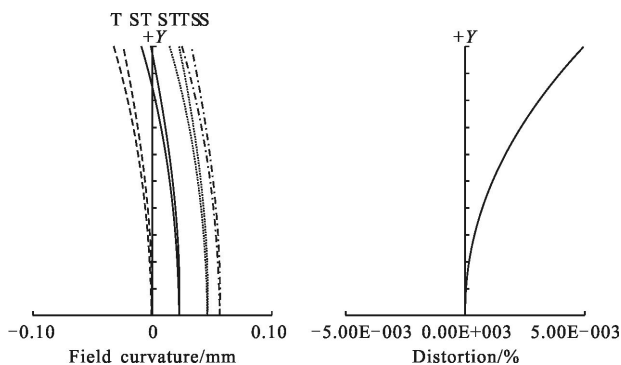


图 3 场曲和畸变像差曲线

Fig.3 Field and distortion aberration curve

为便于调焦和最终星点位置精度检测,在光路中增加了分光棱镜,并配置有读数显微镜,原理如图 4 所示。

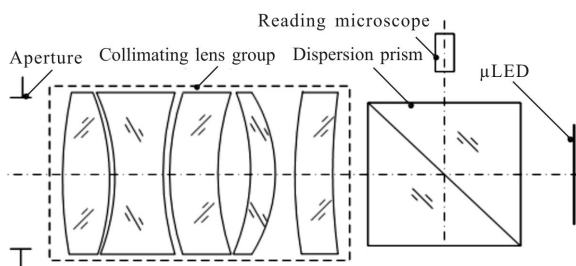


图 4 星模拟器调焦与检测原理

Fig.4 Focusing and detection principle of star simulator

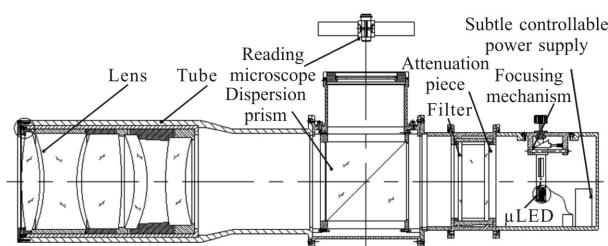
### 2.2 星模拟器机械结构设计

针对星模拟器星点模拟所要求的弱光、高稳定性以及较高的星点位置精度特点,结合星模拟器的仿真实验环境,机械结构的设计需重点考虑温变、振动对星模拟器的性能影响。

图 5(a)给出了星模拟器的整体结构,其主要由准直光学系统机构和  $\mu$ LED 光源机构两大部分构成。准直光学系统机构包括透镜组、镜筒、分光棱镜,滤光片和衰减片; $\mu$ LED 光源机构则由  $\mu$ LED、精微可控电源以及调焦机构组成。

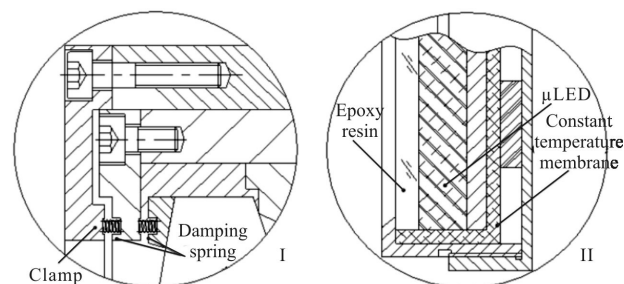
考虑到仿真试验的微振动条件,准直光学镜头进行了减震化设计和装配,如图 5(b)所示,所有镜片统一安装在一个内镜筒中,端面的压板将 12 组周向布置的压缩弹簧压靠在内镜筒的端面压圈上,另一组压缩弹簧与第一块透镜相接触,由此产生的预载依次传递到各个透镜隔圈,最终压靠在内镜筒的靠缘上。考虑  $\mu$ LED 的材料特性和仿真的低温环境,在

$\mu$ LED 前表面涂有环氧树脂进行固定,在后表面设计有恒温膜,如图 5(c)所示,这样通过精微可控电源的控制,就可保证  $\mu$ LED 正常工作时尽可能地消除温变对位置精度的影响。 $\mu$ LED 的调节机构采用悬挂式楔形微调手动方式,既保证了移动精度,又弱化了振动影响。在后期星间位置精度和星等的检测时,所设计的分光棱镜、衰减片和滤光片都应在检测过程中临时抽出,以消除它们对星图在暗室中检测的影响,所以用于安装这几个光学元件的机构被统一装配于一个独立的短镜筒中,其再安装到星模拟器的大镜筒中<sup>[7]</sup>。



(a) 星模拟器总体结构

(a) General structure of star simulator



(b) 局部放大 I

(b) Zoom in I

(c) 局部放大 II

(c) Zoom in II

图 5 星模拟器整体结构

Fig.5 Overall composition of star simulator

## 3 星模拟器的关键技术

### 3.1 星点位置精度控制技术

星点位置精度在标定中是以星间角距精度  $\delta$  这一指标来表示的:

$$\delta_{\text{星间角距}} = \frac{\Delta_{\text{位置}}}{f} \times \frac{3600}{\pi} \times 180'' \quad (1)$$

式中: $\Delta_{\text{位置}}$ 为  $\mu$ LED 发光点在出瞳处的线性总误差; $f$ 为星模拟器光学系统焦距。

由于此方案无需靶标配合,星点的位置精度就

主要由  $\mu$ LED 加工工艺和准直光学系统性能以及检测方案的原理误差决定。 $\mu$ LED 在采用 MOEMS 加工时,通过星图图案光刻、化学蚀刻等工序,最终的位置精度目前可控制在  $\pm 2 \mu\text{m}$ 。准直光学系统中的畸变是位置精度的另一个影响因素,由图 3 的设计结果(相对畸变 0.004 8%)可计算出全视场内畸变的最大值为 0.000 36 mm。由公式(1)可得到线性误差下的  $\delta_{\text{位置}}=1.737 8''$ ;采用 50 $\times$ 读数显微镜检测星点的方案,所产生的瞄准误差约为 1.2''(人眼分辨率约 60'',瞄准误差  $\approx 60/50$ ),星间角距精度为两点精度,因此星光出射精度应为观测结果的  $\sqrt{2}$  倍,那么星间角距的总精度为:

$$\delta_{\text{总星间角距}}=\sqrt{2} \times \sqrt{1.737 8^2+1.2^2} \approx 2.986 1''$$

可见,以  $\mu$ LED 作为光源的星模拟器可实现较高的位置精度的控制。

### 3.2 星图星等控制技术

模拟调光和脉宽调制(PWM)调光是 LED 亮度调节的两种基本方法。模拟调光是通过调整 LED 的电流大小来改变亮度,缺点是亮度只在一定范围内与电流成正比关系;而 PWM 调光则是通过灯的亮灭时间比例调整来改变平均感观亮度。将电源方波数字化后,控制脉冲波形(占空比)即可改变输出电流,使 LED 亮度精确调节。对于文中模拟器所要求的 5 种星等的模拟来说,亮度变化范围大,比例关系控制精度要求高,因此对星等的控制采用了 PWM 调光<sup>[8-11]</sup>。

对 5 种星等的模拟,也就是对 5 个连续等级亮度的控制,由星等亮度的定义可知,每级星等亮度有 2.51 倍的关系,则亮度值  $x$  和级别  $n$  的关系为:

$$x=2.51^{n-1} \quad (2)$$

数字调光中,亮度与 PWM 占空比成对数关系,为使 LED 的亮度最大使用,设定 LED 额定工作状态下的亮度值为最高级别,即占空比为 100%时为 5 级亮度,则有:

$$x=2.51^{5-1}=39.69$$

亮度值和占空比之间的对数关系由公式(3)给出:

$$x=\log_{\alpha}^y \quad (3)$$

式中: $x$  为 LED 亮度值; $\alpha$  为常数; $y$  为占空比。

由计算可知,当  $n=5$ 、 $y=100$  时, $x=39.69$ ,由此可

推算出公式(3)中常数值:

$$\alpha=10^{\frac{\lg y}{x}}=10^{\frac{\lg 100}{39.69}}=1.123 026 \quad (4)$$

由此,公式(3)可写为:

$$x=\log \frac{y}{1.123 026} \quad (5)$$

联立公式(1)和公式(5)可得到占空比与亮度级别的关系:

$$y=1.123 026^{2.51n-1} \quad (6)$$

根据公式(6)可求得不同亮度与占空比的对应数值,如表 1 所示。

表 1 亮度与占空比的对应关系

Tab.1 Corresponding relationship between brightness and duty ratio

Brightness	1	2	3	4	5
Duty ratio	1.123%	1.338%	2.077%	6.261%	99.993%

通过表 1 的分析结果,再配合不同参数的衰减片,就可实现多种 5 个连续星等的模拟。

### 3.3 星图星点圆度、发光均匀度、星点光谱的控制技术

LED 外延片通过 MOEMS 技术制作时,星点的圆度就可通过光刻实现,精度高,设计简单。而同一幅星图出自同一块 LED 外延片,也可保证各星点具有相同的发光特性和理想的发光均匀度。

由于技术所限,常规的星模拟器较少考虑发光光谱这一参数,且多为可见光波段的模拟。例如此设计中应用的  $\mu$ LED 为功率型白光 LED,波长在 450~530 nm。随着国内对深空导航技术的深入开展,紫外、红外星敏感器都将成为重点发展方向,而 LED 外延片就具有不同材料衬底发光波段不同的特性,所以选择不同的 LED 外延片来加工  $\mu$ LED,就能实现多种波段的星图模拟。进一步还可通过外延片拼接完成同一星图不同光谱的模拟,所模拟的星图更加真实<sup>[12]</sup>。

## 4 星模拟器关键参数的检测方法与结果

图 6 为基于  $\mu$ LED 发光技术所设计出的一款星模拟器试验样机。文中将给出星间角距精度和星等这两个关键参数的检测方法和一组检测结果。

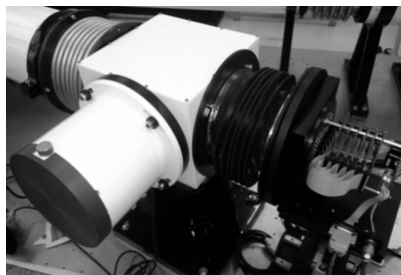


图 6 星模拟器试验样机

Fig.6 Star simulator test sample

#### 4.1 星间角距精度的测试方法与测试结果

采用 50×读数显微镜分别读取  $\mu$ LED 面上星点位置,结合公式(1)就可求得星间角距精度,其精度可由文中所提的星点位置精度控制技术来保证。图 7 为实测时的一幅  $\mu$ LED 放大效果图<sup>[13]</sup>。

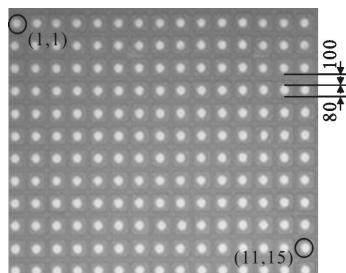


图 7  $\mu$ LED 实际效果图

Fig.7 Actual rendering of  $\mu$ LED

#### 4.2 星等的测试结果

星等精度检测时,考虑到模拟的星等亮度较弱,同时为避免存在背景光干扰,会在衰减片抽出后,于暗室中采用高精度亮度色度计进行测试。图 8 给出了 30 个星点在 5 种占空比下的测试亮度。

从图 8 的测试结果可以看出,占空比为 6.261 时的各点亮度最为均匀,其余 4 种占空比控制下的各点亮度值均有明显波动,这是由每路控制电路的噪声引起的。对于亮度误差较大的星点,可通过后期

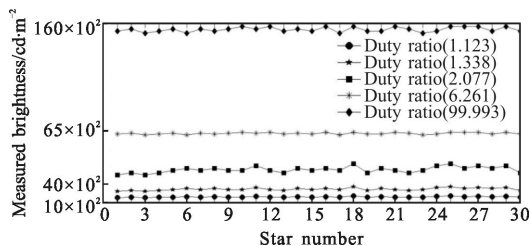


图 8 实测星点亮度(5 种占空比)

Fig.8 Measured star brightness(5 kinds of duty ratio)

此星点的控制电流修正来保证其亮度精度。因此在得到 5 种连续定比例关系的亮度后,配合衰减片就可实现 5 种连续星等的精确模拟。

### 5 结 论

针对提出的基于  $\mu$ LED 发光技术的星模拟器设计方案,结合星模拟器准直光学系统的设计结果,设计出具有可弱化温变、振动等仿真条件对星模拟器工作性能影响的星模拟器机械结构。对星间角距精度和星等控制技术进行了深入研究,并分析了采用  $\mu$ LED 作为星图模拟光源实习星等圆度、星点发光均匀度以及发光光谱的可行性。最终的理论分析和测试均表明所设计的星模拟器达到了星间角距精度小于 3",且可实现多种 5 个连续星等、星点圆度、星点发光均匀度以及星点发光光谱的多参数模拟要求。

#### 参考文献:

- [1] Liu Shi, Zhang Guoyu, Sun Gaofei, et al. Design of dynamic star simulator based on LCOS optical splicing technology [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2013, 33 (2): 200–206. (in Chinese)  
刘石, 张国玉, 孙高飞, 等. 基于 LCOS 拼接技术的动态星模拟器设计[J]. *空间科学学报*, 2013, 33(2): 200–206.
- [2] 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. (in Chinese)  
李璟, 杨宝喜, 胡中华, 等. 星敏传感器光学系统的研制与性能测试[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0522005.
- [3] Tang Shengjin, Guo Xiaosong, Zhou Zhaofa, et al. Modified systematic error compensation algorithm for star centroid sub-pixel detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6): 1503–1507. (in Chinese)  
唐圣金, 郭晓松, 周召发, 等. 星点亚像元定位中系统误差的改进补偿方法[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(6): 1503–1507.
- [4] Yan Xingtao, Yang Jianfeng, Zhang Guoqi. Design of freeform surface LED reflectors for uniform illumination based on compensation method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 718–723. (in Chinese)
- [5] Qian Feng, Jia Jianjun, Zhang Liang, et al. Positioning accuracy of spot detecting camera in acquisition, tracking, pointing system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(3): 0205007. (in Chinese)  
钱锋, 贾建军, 张亮, 等. 捕获、跟踪、瞄准系统中光斑探测

- 相机的定位精度[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0205007.
- [6] Chen Qimeng, Zhang Guoyu, Sun Xiangyang, et al. Optical system design of LCOS-based and high precision dynamic star simulator [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(7): 0716003. (in Chinese)  
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.
- [7] Qian Keyuan. Near field optical modeling of LED and design optimization for direct-type back light optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0522001. (in Chinese)  
钱可元. LED 近场光学模型与直下式背光源透镜的设计优化[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0522001.
- [8] Tian Chao, Liang Jingqiu, Liang Zhongzhu, et al. Design and experiment of algaInP micro-LED arrays with double strip electrode [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, 34(11): 1494-1499. (in Chinese)  
田超, 梁静秋, 梁中翥, 等. 双条形电极结构 AlGaInP-LED 微阵列器件的设计和实验研究 [J]. 发光学报, 2013, 34(11): 1494-1499.
- [9] Wang Lidong, Mao Zhenhua, Ni Wei. Photoelectric parameter measurement system based on Cortex-M3 for LED [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(4): 856-862. (in Chinese)  
汪黎栋, 茅振华, 倪魏. 基于 Cortex-M3 的快速发光二极管光电参数测量系统 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(4): 856-862.
- [10] Yan Juncen, Che Ying. Equipment of infrared earth sensor for testing EMC performance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 3894-3897.
- [11] Song Pengcheng, Wen Shangsheng, Shang Jun, et al. A dimming method for RGB LED based on three channels' PWM [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0223001. (in Chinese)  
宋鹏程, 文尚胜, 尚俊, 等. 基于 PWM 的三基色 LED 的调光调色方法[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0223001.
- [12] Tian Lidong, Zhou Jijun, Qin Huibin. Design of PWM dimming LED driver [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2012, 29(4): 465-468. (in Chinese)  
田立东, 周继军, 秦会斌. PWM 调光 LED 驱动器设计[J]. 机电工程, 2012, 29(4): 465-468.
- [13] Zhao Chenguang, Tan Jjiubin, Liu Jian, et al. Star simulator for testing celestial navigation equipment [J]. *Opt Precision Eng*, 2010, 18(6): 1326-1332. (in Chinese)  
赵晨光, 谭久彬, 刘俭, 等. 用于天文导航设备检测的星模拟装置[J]. 光学精密工程, 2010, 18(6): 1326-1332.