

doi:10.3788/gzxb20154405.0522003

# 自动标定型光谱可调星模拟器光源系统

李晓妮<sup>1,2</sup>, 吴隽罡<sup>1</sup>, 赵昕<sup>3</sup>, 卢振华<sup>1</sup>, 解来运<sup>1</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 中国人民解放军驻国营六九九厂军事代表室, 北京 100142)

**摘 要:**为了得到宽光谱波段范围内光谱可调多色温多星等能量分布的星模拟器光源,并且达到星模拟器光源的自动标定,本文从辐度学和色度学出发,基于最小二乘法,在 400 nm~900 nm 光谱范围内,采用双积分球法,以白光 LED 光源为基底光源,多种不同峰值波长的窄带 LED 光源对目标光谱进行补偿以实现色温 3 900 K~6 500 K 连续可调,星等 -1 MV~+6 MV,1 MV 可调的自动标定型多光谱星模拟器光源系统.最后,在实验室完成了光源系统以及与相应的光学系统形成星模拟器并对其进行装配调试,所测得的光谱分布和星等值与理论模拟结果以及标准目视星等值进行了对比.星模拟器输出光谱点模拟误差和星等误差分别在 $\pm 10\%$ 和 $\pm 10\%$ 范围内,满足现阶段星模拟器的使用要求.同时在后期控制电路稳定的情况下,星等误差可保证在 $\pm 5\%$ 范围内.

**关键词:**可变光谱;多星等;多色温;自动标定;双积分球

中图分类号:V524.7;O433.4

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)05-0522003-6

## The Research of the Light Source for Star Simulator with Automatic Calibration and Adjustable Spectrum

LI Xiao-ni<sup>1,2</sup>, WU Cui-gang<sup>1</sup>, ZHAO Xin<sup>3</sup>, LU Zhen-hua<sup>1</sup>, XIE Lai-yun<sup>1</sup>

(1 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 1000049, China)

(3 Military Representative Office Positioned in 699 Factory of PLA, Beijing 100142, China)

**Abstract:** In order to obtain the star simulator sources system of the adjustable spectrum with more color temperatures and more magnitudes and it can be calibrated automatically in a wide range of spectral bands. Embarking from the amplitude and colorimetry, This paper realize the automatic calibrating multispectral light star simulator system which the color temperature is continuous adjustable from 3 900 K to 6 500 K and the magnitudes is 1 MV adjustable in -1 MV~+6 MV with double integrating spheres in 400 nm~900 nm spectral range, The light system is based on the least squares method and the white LED are treated as the main body, a variety of different peak wavelength and narrow-band spectrum LEDs to compensate the objective spectrum. Finally, the source system and star simulator are completed and debugged in the laboratory, and the results are compared with the theoretical simulation values and standard visual magnitudes. The results show that the star simulator spectrum simulation error and magnitude error are within the range of  $\pm 10\%$  and  $\pm 10\%$  respectively and meet the stage star sensor needs, At the same time ,In ensuring the stability of the control circuit, magnitude error can be within the range of  $\pm 5\%$ .

基金项目:国家自然科学基金(No. 11404387)资助

第一作者:李晓妮(1988-),女,硕士研究生,主要研究方向为高精度宽光谱模拟. Email:llxn-2008@163.com

导师(通讯作者):吴隽罡(1977-),男,高级工程师,主要研究方向为高精度宽光谱模拟以及可见光红外目标模拟. Email:WCG\_HZ@163.com

收稿日期:2014-12-29;录用日期:2015-03-09

<http://www.photon.ac.cn>

**Key words:** Alterable spectrum; Multi-color temperatures; Multi-magnitudes ; Calibrate automatically; Double integrating spheres

**OCIS Codes:** 220.0220;220.4830;220.4298;230.3670;330.1730

## 0 引言

随着航天事业的日益发展,作为星敏传感器在航天领域得到了大规模的使用.星敏传感器主要是通过光学系统测量星空中不同位置的恒星发出的光,产生观测星图,与系统中预存的导航星图进行特征匹配,以确定航天飞行器的姿态信息.因此,星敏传感器技术中非常关键的一项就是对周围恒星发射光的接收,因此对于接收光信号设备的校正和标定显得尤为重要.但是由于空中标定实施困难、可靠性不高且价格异常昂贵使得星敏传感器必须在地面进行标定<sup>[1]</sup>.随着对星敏传感器定位准确度的要求越来越高,对作为星敏传感器实验室检测和标定的星模拟器也提出了更高的要求.星模拟器就是提供一束平行光供星敏传感器测量,用来模拟无穷远处的恒星发出的平行光.由于恒星的明亮等级不同,而且恒星的年龄、质量、压力和化学成分等不同会使恒星表面的温度相差很大,发出来的光所形成的光谱也不一样,因此,恒星都会具有不同的星等和光谱类型.但是目前的星模拟器存在的主要问题是光谱波段范围窄、色温单一、星等范围小.2005年美国国家标准和技术研究院曾研制过一种大量使用LED光源的光谱分布可调积分球光源<sup>[2-3]</sup>,后来陈风等人也曾提出基于LED的光谱分布可调光源的设计<sup>[4-5]</sup>,其设计都只是利用多种不同颜色的LED光源对光谱的模拟,没有光亮度的模拟,并且只限于原理的模拟,没有样机的形成.随后2011年,刘洪兴等人在英国国家物理实验室设计的以溴钨灯为发光介质的光谱可调谐光源系统的基础上,设计了一种基于溴钨灯和LED积分球光源系统<sup>[6-8]</sup>,其光源系统的结构比较复杂,通过滤光器改变输出光谱比较有限.张晓娟等人也曾在美国蓝菲公司的基础上提出采用氙灯和卤钨灯混合形成的积分球光源<sup>[9-10]</sup>,虽然模拟的光谱范围以及色温范围都比较大,但是结构复杂,而且也没有对星等进行要求.张杰等人也研制出了LED光源做补偿的氙灯的多色温多星等输出的星模拟器光源系统<sup>[11-12]</sup>,其通过复杂的波段光强控制器变换色温和星等,使得该系统结构复杂,实现难度较大,控制困难,难于调试和标定.

本文从辐度学和色度学的基础出发<sup>[13-14]</sup>,基于最小二乘法<sup>[15]</sup>,以白光LED光源为基底,采用多种单色LED进行补偿实现了一种400 nm~900 nm光谱范围内光谱可调的多色温多星等静态星模拟器光源系统.该系统可以对所形成的光谱进行自动标定和调整,在保证多色温多星等模拟准确度的情况下具有结构简

单,标定耗时少等特点,并且实现了样机的生产,能够满足现阶段星模拟器科研生产的需要.

## 1 系统组成

本系统设计的主要原理是基于最小二乘法,以白光LED光源为基础,利用多种单色窄带LED光源,经过积分球匀光形成不同色温不同星等的光谱能量分布.通过软件控制实现不同色温不同星等下参数的自动计算,并利用数字调光实现最终LED光源的发光控制.由于-1MV~+6MV跨度范围大,能量相差631倍.单纯依靠电路控制这样大跨度的能量是比较难实现的,而且准确度不能满足要求.因此采用控制电流与切换积分球相结合的方式实现星等的变换.

本静态星模拟器光源系统由积分球1、积分球2、多种LED光源、导轨、电机、电源、计算机、LED光源驱动板等部分组成,如图1所示与相应的星点板和光学系统装配就可完成整个光谱可调的星模拟器.

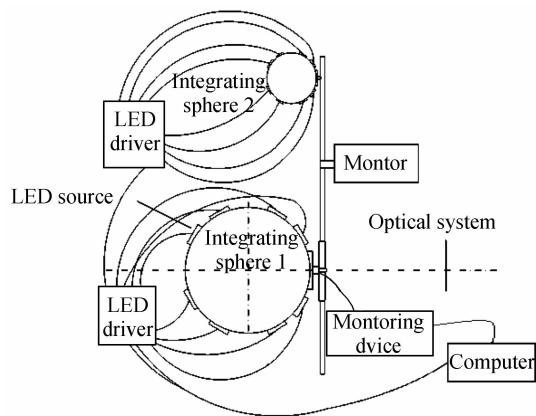


图1 星模拟器光源系统组成

Fig.1 The components of the star simulator sources system

## 2 模拟仿真

根据黑体辐射理论,利用普朗克公式来描述黑体光谱辐射的分布,即

$$M_{\lambda B}(\lambda, T) = c_1 \lambda^{-5} [\exp(c_2/\lambda T) - 1]^{-1} \quad (1)$$

式中, $\lambda$ 为辐射波长(单位:nm); $T$ 为黑体的热力学温度(单位:K); $c_1 = 3.741832 \times 10^{-16} (\text{W} \cdot \text{m}^2)$ 为第一辐射常量; $c_2 = 1.438786 \times 10^{-2} (\text{m} \cdot \text{K})$ 为第二辐射常量.

图2为不同温度下黑体的辐射出射度曲线.因此从数学模型模拟的角度,可以采用无穷多个单色光源叠加得到所需的光谱能量分布的.但实际中无法获得足够多的单色光源以获得高准确度的宽光谱分布模拟.本文为解决该问题,采用白光LED光源和多个较

窄光谱分布的 LED 光源叠加得到一定范围内的光谱分布,并采用积分球作为混光和匀光设备,使输出光束光强具有很高的均匀性.

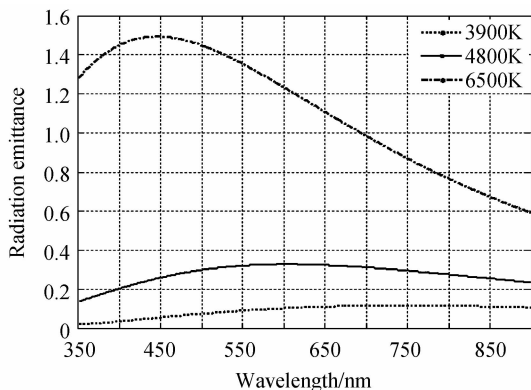


图2 不同色温下黑体辐射出射度曲线

Fig. 2 The black body radiation emitted curve under different color temperatures

典型的单色 LED 的光输出是一个窄带光谱,其带宽(半峰全宽)一般在 20 nm~50 nm. 根据 LED 光源的物理特性可知<sup>[16]</sup>,单个 LED 光轴方向上单位立体角内的辐射功率随光谱的分布模型可以用高斯分布函数来近似,即

$$L(\lambda) = \alpha \cdot \exp \left[ \frac{-(\lambda - \lambda_p)^2}{2\tau^2} \right] \quad (2)$$

$$W_{FWHM} = 2\tau \sqrt{\ln 4} \quad (3)$$

式中,  $\lambda_p$  为 LED 光源的峰值波长,  $\alpha$  为比例系数,  $W_{FWHM}$  为 LED 辐射强度光谱分布的半峰宽度,  $\lambda$  为波长. 半峰宽度为 50 nm 的光谱分布曲线如图 3.

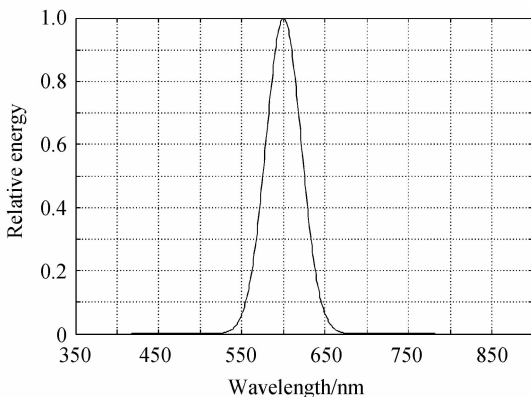


图3 LED 光源的光谱能量分布曲线

Fig. 3 The spectral energy distribution curve of the LED light source

采用不同峰值波长的单色理想 LED(如图 3 所示)共同作用来叠加形成如图 1 所示的光谱能量分布,根据光谱的叠加原理得到 LED 光谱合成的基本数学模型为

$$\hat{L}(\lambda) = \sum k_i L_i(\lambda) \quad (4)$$

式中  $\hat{L}(\lambda)$  为目标光谱分布,  $L_i(\lambda)$  为单个 LED 的光谱分布,  $k_i$  为比例系数.

虽然实际的光谱是连续的,实验测得的光谱数据均是对应特定波长的离散数据. 假定被模拟的光谱离散分布数据为  $\{\lambda_i, M'''(\lambda_i, T)\} (i=1, 2, \dots, m)$ , 以 LED 的光谱辐亮度数据作为拟合的基函数  $\{L_j(\lambda)\} (j=1, 2, \dots, n)$ .

若用函数  $f(\lambda) = k_1 L_1(\lambda) + k_2 L_2(\lambda) + \dots + k_n L_n(\lambda)$  拟合被模拟的光谱离散分布数据, 必须适当地选取拟合参量  $k_1, k_2, \dots, k_n$  才能提高拟合准确度. 记向量  $\mathbf{L}_1 = [L_1(\lambda_1), L_1(\lambda_2), \dots, L_1(\lambda_n)]^T$ , 矩阵  $\mathbf{A} = [L_1, L_2, \dots, L_n]$ ,  $\mathbf{b} = [M'''(\lambda_1, T), M'''(\lambda_2, T), \dots, M'''(\lambda_m, T)]^T$ ,  $\mathbf{X} = [k_1, k_2, \dots, k_n]^T$ . 当  $m > n$  时, 得到超定方程

$$\mathbf{A}\mathbf{X} = \mathbf{b} \quad (5)$$

求得误差最小的超定方程的近似解, 即

$$\|\mathbf{b} - \mathbf{A}\mathbf{X}^*\|_2 = \min_{\mathbf{X} \in \mathbb{R}^n} \|\mathbf{b} - \mathbf{A}\mathbf{X}\|_2 \text{ 时的解.}$$

同时实际应用中, 比例系数  $k_i$  只能取非负值, 所以只需得到超定线性方程的非负最小二乘解  $\mathbf{X}^*$  (如若拟合得到的  $\mathbf{X}$  中有小于 0 的  $k_i$ , 则设置最小的  $k_i$  为 0, 重新再次拟合进行  $\mathbf{X}$  判断, 依次使得  $k_i$  全部非负得到非负最小二乘解  $\mathbf{X}^*$ ), 则多个 LED 光源合成的光谱分布为

$$\hat{\mathbf{L}} = \mathbf{A}\mathbf{X}^* \quad (6)$$

本文采用半峰宽度 = 25 nm, 不同峰值波长间隔的单色 LED 进行光谱能量分布的 Matlab 仿真. 图 4 和图 5 分别为采用峰值波长间隔  $d=25$  nm 和  $d=20$  nm 的理想 LED 对色温  $T=4800$  K 的模拟结果.

从图 4 和图 5 可以看出, 图 4 中的光谱曲线锯齿波动大, 而图 5 中的光谱曲线相对平滑. 因此, 可通过适当地选用峰值间隔较小的 LED 光源, 减少光谱分布的锯齿波动状况, 使光谱分布相对平滑, 进一步降低模

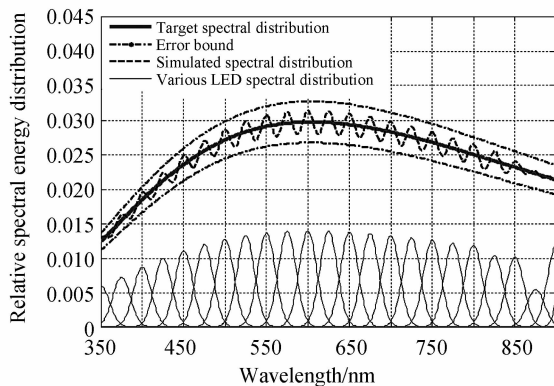


图4  $T=4800$  K,  $d=25$  nm 时采用理想高斯分布模拟的光谱能量分布图

Fig. 4 The spectral energy distribution simulated by using the ideal Gaussian distribution under the condition of  $T=4800$  K,  $d=25$  nm

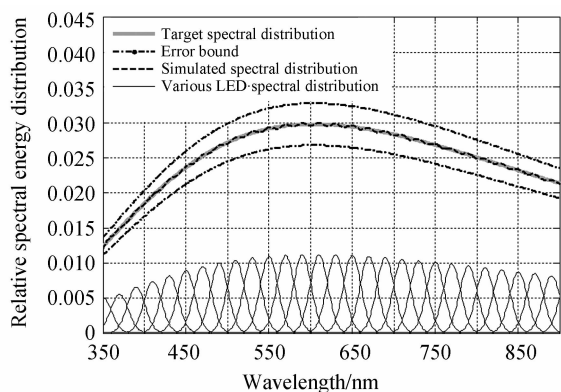


图5  $T=4800\text{ K}$ ,  $d=20\text{ nm}$  时采用理想高斯分布模拟的光谱能量分布图

Fig. 5 The spectral energy distribution simulated by using the ideal Gaussian distribution under the condition of  $T=4800\text{ K}$ ,  $d=20\text{ nm}$

拟的光谱能量分布曲线的误差. 采用峰值波长间隔为  $20\text{ nm}$ , 半峰宽度为  $25\text{ nm}$  的 29 种单色 LED 光源合成的色温为  $3900\text{ K}$ 、 $4800\text{ K}$  和  $6500\text{ K}$  三个色温光谱拟合的最大误差分别为  $3.10\%$ 、 $3.69\%$  和  $4.44\%$ .

根据 LED 的性质和市场上 LED 的种类和特点<sup>[7]</sup>, 如图 6, 采用 29 种高斯分布的理想单色 LED 光源, 峰值为  $610\text{ nm}$  的 LED 峰值波长变化为  $614\text{ nm}$  时,  $4800\text{ K}$  条件下合成的光谱分布, 其中最大误差由原来的  $1.44\%$  变化为  $10.15\%$ , 超出了  $10\%$  的误差限.

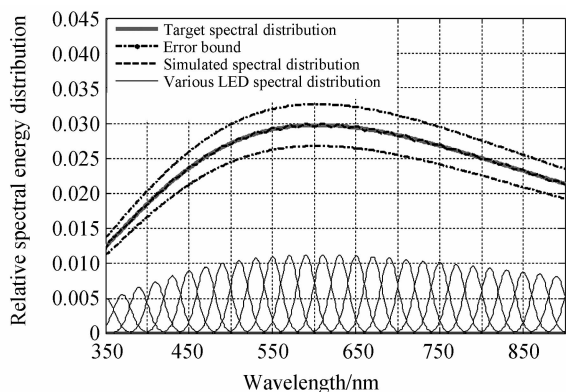


图6 峰值波长发生变化时  $4800\text{ K}$  条件下的光谱分布曲线

Fig. 6 The spectral distribution curve when the peak wavelength is changed under the condition of  $4800\text{ K}$

因此, 本文对 LED 光源进行筛选, 采用实测峰值波长与标称值误差较小的 35 种 LED 完成目标光谱的合成.

首先对所选用的 35 种单色 LED 光谱分布进行采集, 利用这些实测的 LED 光谱数据对不同色温下不同星等的目标光谱进行 Matlab 仿真, 得到式 (6) 中的  $A$  矩阵, 即实际使用的各单色 LED 的数目. 表 1 为在直径为  $250\text{ mm}$  的积分球 1 中实现色温为  $3900\text{ K}$  和

$6500\text{ K}$  的  $+2\text{ MV}$  的目标光谱所需的 LED 数量, 两种情况下的光谱能量模拟曲线如图 7、8. 因此, 实现色温  $3900\text{ K}\sim 6500\text{ K}$  范围内  $+2\text{ MV}\sim +6\text{ MV}$  的光谱模拟的积分球 1 内至少得包含 100 个 LED 光源.

表 1 色温  $3900\text{ K}$ 、 $4800\text{ K}$  和  $6500\text{ K}$  下  $+2\text{ MV}$  所需要的 LED 种类和数量

Table 1 The LED's types and quantities of the spectrum that the color temperatures are  $3900\text{ K}$ ,  $4800\text{ K}$ ,  $6500\text{ K}$  and the magnitude is  $+2\text{ MV}$

LED types	3 900 K	4 800 K	6 500 K	Maximum rounding
375 nm	1.892 4	3.701 4	7.638 3	8
385 nm	0.693 4	1.232 1	2.245 2	3
405 nm	0.882 2	1.447 4	2.459 4	3
420 nm	0.346 9	0.541 7	0.868 3	1
430 nm	0.540 4	0.803 5	1.225 5	2
450 nm	0.3700	0.588 3	0.928 8	1
470 nm	0.829 6	1.145 3	1.520 9	2
490 nm	1.781 5	2.379 6	3.034 7	4
505 nm	1.175 5	1.260 9	1.320 0	2
525 nm	1.181 3	1.536 8	1.861 0	2
545 nm	2.610 4	2.147 8	2.292 8	3
570 nm	10.727 0	6.212 5	4.449 4	5
590 nm	0.774 0	0.418 9	0.216 8	1
600 nm	0.892 1	0.485 4	0.253 3	1
610 nm	0.679 8	0.375 6	0.183 7	1
625 nm	0.704 6	0.436 9	0.248 9	1
640 nm	0.923 0	0.611 2	0.371 7	1
660 nm	0.791 8	0.558 4	0.366 7	1
670 nm	1.371 5	0.983 8	0.650 8	2
680 nm	0.776 0	0.701 2	0.560 5	1
690 nm	2.354 2	1.531 1	0.916 9	3
700 nm	1.364 9	1.097 9	0.825 3	2
710 nm	2.770 5	2.163 8	1.527 1	3
720 nm	1.924 9	1.397 6	0.970 7	2
735 nm	1.523 0	1.122 4	0.777 7	2
750 nm	0.611 8	0.550 1	0.397 5	1
760 nm	2.403 2	1.742 1	1.188 2	3
780 nm	1.878 2	1.451 5	0.974 8	2
800 nm	0.123 8	0.020 8	0.016 8	1
810 nm	1.484 3	1.101 9	0.706 8	2
820 nm	2.195 5	1.506 1	0.985 5	3
850 nm	3.080 3	2.096 4	1.307 0	4
890 nm	3.235 4	2.186 5	1.272 4	4
910 nm	12.431 8	7.899 7	4.864 9	13
White LED	6.817 5	8.658 5	9.109 3	10
Summation				100

同理, 可得出实现色温  $3900\text{ K}\sim 6500\text{ K}$  内  $-1\text{ MV}\sim +1\text{ MV}$  的光谱模拟的直径  $80\text{ mm}$  的积分球 2 内至少所需的 LED 光源数量为 154 个.

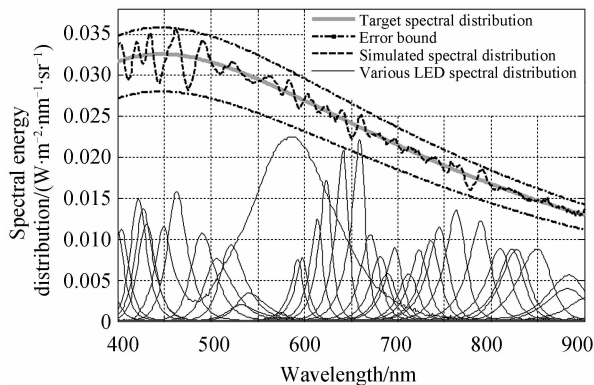


图7 色温 6 500 K,+2 MV 的光谱能量分布模拟曲线  
Fig. 7 The simulated spectral energy distribution curve which the color temperature is 6 500 K and the magnitude is +2 MV

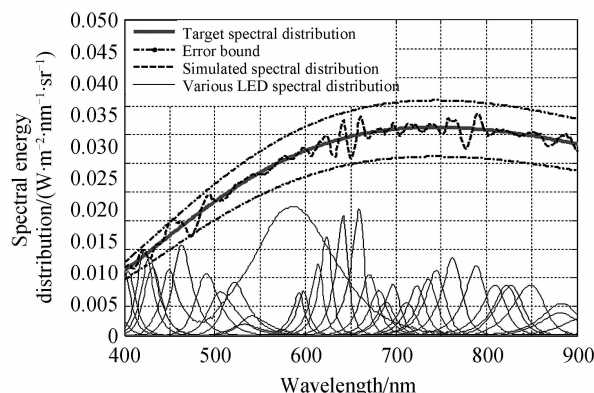


图8 色温 3 900 K,+2 MV 的光谱能量分布模拟曲线  
Fig. 8 The simulated spectral energy distribution curve which the color temperature is 3 900 K and the magnitude is +2 MV

### 3 实验与结果

以所使用的 35 种 LED 光谱分布为基常量,即式(6)中的  $A$ ,以此为基础,利用 VC++ 编写的控制程序自动实现相应星等和色温范围下的各 LED 所需数量的计算,所需各数量转换为十六进制,发送并控制各 LED 的发光,模拟目标光谱,并对输出光谱进行实时反馈,进行相应的误差分析,对控制参量进行修正。但是由于目前光谱检测仪的性能限制,无法完成光谱数据的实时输出,因此在保证所选 LED 足够稳定和数量充足的情况下自动定时发送控制参量保持模拟输出光谱的稳定性。因此自动标定型可变光谱星模拟器光源系统软件界面如图 9。

最后,在实验室完成整个自动标定型光源系统的装配,并配备满足一定要求的星点板和光学准直系统(星点板直径实测为  $19.2 \mu\text{m}$ ,光学准直系统的焦距为  $1400 \text{ mm}$ ),使得星点位于光学系统光轴上形成单星模拟器,如图 10。利用 ASD 公司的光谱辐亮度计和中国计量研究院的照度计在星模拟器出光口采集最终形成

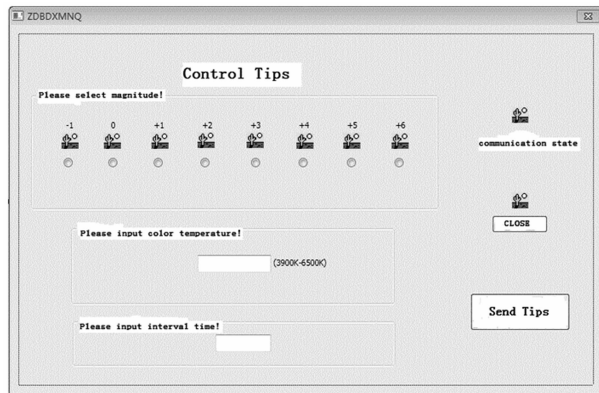


图9 软件控制界面

Fig. 9 The software control interface

的目标光谱的能量分布数据和光学系统出光口的光照度,试验时测试了 3 900 K,4 500 K,4 800 K,5 500 K 和 6 500 K 五个色温下的不同星等光谱图。以测得的光谱能量分布数据作曲线与黑体辐射目标光谱曲线对比,并以间隔波长  $1 \text{ nm}$  进行光谱能量分布数据比较。如图 11 为色温 4 800 K 下星等 +2MV 光谱曲线对比图,其中粗线为黑体辐射目标光谱,点虚线为目标光谱  $\pm 10\%$  误差限,虚线为试验得到的光谱。表 2 为 5 个色

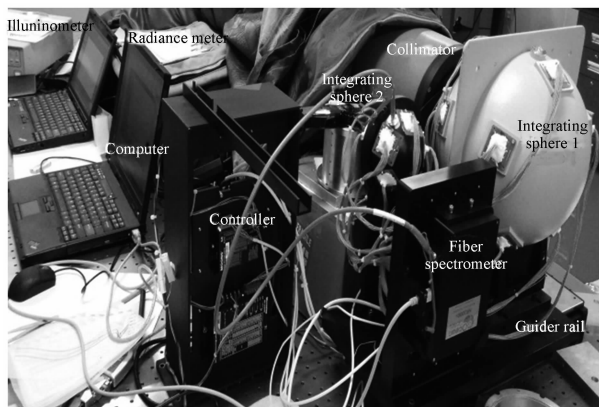


图10 实验室完成的样机

Fig. 10 The completed prototype in laboratory

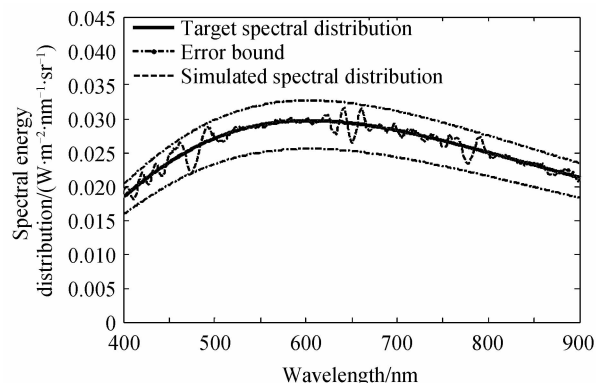


图11 试验得色温 4 800 K 的光谱数据曲线

Fig. 11 The comparison between the experimental spectral data and the theoretical values in color temperature 4 800 K

表2 不同色温下光学系统出瞳处的目视星等测量值与标准目视星等对照表  
Table 2 The comparison table of the standard visual magnitude and the measured value at the exit pupil of the optical system in different color temperature

Visual magnitude	Standard illuminometer/lx	3 900 K/lx	4 500 K/lx	4 800 K/lx	5 500 K/lx	6 500 K/lx
-1MV	$6.65 \times 10^{-6}$	$6.75 \times 10^{-6}$	$6.57 \times 10^{-6}$	$6.69 \times 10^{-6}$	$6.71 \times 10^{-6}$	$6.53 \times 10^{-6}$
0MV	$2.65 \times 10^{-6}$	$2.72 \times 10^{-6}$	$2.55 \times 10^{-6}$	$2.67 \times 10^{-6}$	$2.77 \times 10^{-6}$	$2.60 \times 10^{-6}$
1MV	$1.05 \times 10^{-6}$	$1.09 \times 10^{-6}$	$1.03 \times 10^{-6}$	$1.06 \times 10^{-6}$	$1.10 \times 10^{-6}$	$1.03 \times 10^{-6}$
2MV	$4.18 \times 10^{-7}$	$4.25 \times 10^{-7}$	$4.08 \times 10^{-7}$	$4.23 \times 10^{-7}$	$4.26 \times 10^{-7}$	$4.13 \times 10^{-7}$
3MV	$1.67 \times 10^{-7}$	$1.68 \times 10^{-7}$	$1.62 \times 10^{-7}$	$1.68 \times 10^{-7}$	$1.73 \times 10^{-7}$	$1.65 \times 10^{-7}$
4MV	$6.65 \times 10^{-8}$	$6.8 \times 10^{-8}$	$6.4 \times 10^{-8}$	$6.8 \times 10^{-8}$	$6.9 \times 10^{-8}$	$6.5 \times 10^{-8}$
5MV	$2.65 \times 10^{-8}$	$2.7 \times 10^{-8}$	$2.6 \times 10^{-8}$	$2.8 \times 10^{-8}$	$2.7 \times 10^{-8}$	$2.6 \times 10^{-8}$
6MV	$1.05 \times 10^{-8}$	$1.0 \times 10^{-8}$	$1.0 \times 10^{-8}$	$1.1 \times 10^{-8}$	$1.1 \times 10^{-8}$	$1.0 \times 10^{-8}$

温下星模拟器光学系统出光口的光照度. 从实验结果可以看出, 光谱的每波长点误差和星等误差分别都在10%以内, 而且预期在控制电路稳定的情况下, 星等误差将达到5%. 其中, 星等误差  $\sigma_{\text{星等}} = (E_{\text{试验}} - E_{\text{标准}}) / E_{\text{标准}}$ ,  $E_{\text{试验}}$ 、 $E_{\text{标准}}$  分别为星等的试验测得的照度和标准照度. 同时在规定的环境条件下对光学系统  $3^\circ \times 3^\circ$  有效视场内进行中心视场和 0.7 视场的输出平行光平行度测试以及连续工作 8 h 输出平行光亮度的变化(平行度测试利用五棱镜法, 稳定性测试采用照度计). 本文以色温 4 800 K、星等+2 MV 光谱进行测试, 实验结果得出: 中心视场出射平行光平行度误差不大于  $1''$  ( $\sigma$ ), 0.7 视场平行度误差不大于  $2.5''$  ( $\sigma$ ), 连续工作 8 h, 输出平行光亮度变化在 10% 范围内, 符合某星模拟器项目的指标要求.

## 4 结论

本文以静态恒星模拟系统为研究基础, 基于白光 LED 光源, 各单色 LED 光源进行光谱补偿的双积分球为研究特点, 实现了 400 nm~900 nm 光谱范围内, 色温 3 900 K~6 500 K 连续可调, 星等-1MV~+6MV, 1MV 可调的光谱模拟光源系统. 该星模拟器光源系统可以高准确度的模拟恒星的光谱和星等, 满足使用要求, 并且具有结构简单, 使用方便, 标定耗时短和成本低等特点.

### 参考文献

- [1] LU Xin, FANG Rong-chu. The star sensor technology[J]. *Control Engineering*, 2001, **5**(6):69-78.  
卢欣, 方蓉初. 星传感器技术[J]. *控制工程*, 2001, **5**(6):69-78.
- [2] BROWN S W, SANTANA C, EPELDAUER G P. Development of a tunable LED-based colorimetric source[J]. *Journal of Research of NIST*, 2002, **107**(4): 363-371.
- [3] FRYC I, BROWN S W, EPELDAUER G P, et al. LED-based spectrally tunable source for radiometric, photometric and colorimetric applications[J]. *Optical Engineering*, 2005, **44**(11): 111309.
- [4] CHEN Feng, YUAN Yin-lin, ZHENG Xiao-bing, et al. Design of spectral tunable LED light source[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(11): 2010-2064.  
陈凤, 袁银麟, 郑小兵, 等. LED 的光谱分布可调光源的设计[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(11):2060-2064.
- [5] ZHU Ji-yi, REN Jian-wei, LI Bao-yong, et al. Synthesis of spectral distribution for LED-based source with tunable spectra[J].

- Chinese Journal of Luminescence*, 2010, **31**(6): 882-886.  
朱继亦, 任建伟, 李葆勇, 等. 基于 LED 的光谱可调光源的光谱分布合成[J]. *发光学报*, 2010, **31**(6):882-886.
- [6] WALL C F, HANSON A R, TAYLOR J A F. Construction of a programmable light source for use as a display calibration artifact[C]. SPIE, 2001, **4295**: 259-266.
  - [7] LIU Hong-xing, REN Jian-wei, LI Bao-yong, et al. Spectrum-tunable distribution and spectral matching for integrating sphere light source based on bromine tungsten lamps and LEDs[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2011, **32**(10): 1074-1080.  
刘洪兴, 任建伟, 李葆勇, 等. 基于溴钨灯和 LED 积分球光源的可调谐光谱分布及光谱匹配[J]. *发光学报*, 2011, **32**(10): 1074-1080.
  - [8] LIU Hong-xing, REN Jian-wei, WAN Zhi, et al. Measurement of relative spectral responsivity of photodetector by LED-based spectrum-tunable source[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, **33**(1): 250-254.  
刘洪兴, 任建伟, 万志, 等. 基于 LED 光谱可调谐光源的光电探测器相对光谱响应测量研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, **33**(1):250-254.
  - [9] WANG Wei-zhi, LIU Bing-bin. Labsphere Inc under Chinese big market[J]. *Laser & Optoelectronic Progress* 2009, **1**: 76-78.  
王伟之, 刘兵斌. 中国大市场下的蓝菲光学[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **1**:76-78.
  - [10] ZHANG Xiao-juan, ZHANG Guo-yu, SUN Gao-fei, et al. Spectral study for star simulator on hybrid light source[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(2): 022201-1-6.  
张晓娟, 张国玉, 孙高飞, 等. 基于混合光源的星模拟器光谱研究[J]. *光子学报*, 2014, **43**(2):022201-1-6.
  - [11] ZHANG Jie, ZHANG Tao, XIAO Peng. Opto-mechanical system of single-star simulator with multi-color temperature and multi-magnitude output[J]. *Applied Optics*, 2012, **33**(5): 949-953.  
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.
  - [12] MA Qiang, ZHANG Tao. Single star simulator with adjustable magnitude and spectrum for calibration [J]. *Applied Optics*, 2014, **35**(1): 38-42.  
马强, 张涛. 星等及光谱可调的标定用单星模拟器系统设计[J]. *应用光学*, 2014, **35**(1):38-42.
  - [13] 金伟其, 胡威捷. 辐射度光度与色度及其测量[M]. 北京:北京理工大学出版, 2007:34-50.
  - [14] CHEN Yuan, ZHANG Wen-ming. Tunable color temperature light source for star simulator [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, **37**(8): 24-28.  
陈源, 张文明. 面向星模拟器的可调标准色温光源[J]. *光电工程*, 2010, **37**(8):24-28.
  - [15] 李庆阳, 王能超, 易大义. 数值分析[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2008:64-70.
  - [16] LÜ Zheng, LÜ Liang, JI Zhong-ying. The stability of monochromatic peak wavelength and the radiation intensity [J]. *China Light and Lighting*, 2004, **12**: 1-2.  
吕正, 吕亮, 计忠瑛. 单色峰值波长和辐射强度的稳定性[J]. *中国照明电*, 2004, **12**:1-2.