

doi: 10.3788/gzxb20144302.0222001

基于混合光源的星模拟器光谱研究

张晓娟^{1,3}, 张国玉^{1,2}, 孙高飞¹, 张健¹, 陈启梦¹

(1 长春理工大学, 长春 130022)

(2 吉林省光电测控仪器工程技术研究中心, 长春 130022)

(3 吉林电子信息职业技术学院, 吉林 吉林 132021)

摘 要:提出了一种基于氙灯和卤钨灯混合光源的星模拟器光谱模拟方案. 采用氙灯和卤钨灯组成宽光谱光源灯阵, 并通过色温模拟与控制模块后射入积分球, 为星模拟器提供理想光源, 模拟出与特定色温 3 900 K, 4 800 K, 6 500 K 相近的光谱曲线. 通过对标准黑体光谱曲线的仿真, 计算出滤光片各个微小波段最优透过率, 并对微小波段区间的透过率进行区间合并处理, 得到满足设计指标要求的滤光片透过率, 实现对特定色温光谱曲线的模拟. 仿真结果表明, 采用本文方案能够满足微小波段匹配模拟误差在 10% 以内, 用相对面积法验证匹配误差在 4% 以内, 从而为星模拟器模拟特定色温的光谱曲线提供有效的方法.

关键词:星模拟器; 混合光源; 色温模拟; 滤光片; 光谱曲线

中图分类号: V524.7; O433.4

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)02-0222001-6

Spectral Study for Star Simulator on Hybrid Light Source

ZHANG Xiao-juan^{1,3}, ZHANG Guo-yu^{1,2}, SUN Gao-fei¹, ZHANG Jian¹, CHEN Qi-meng¹

(1 Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

(2 Optical measurement and control instrumentation, Jilin Province Engineering Research Center, Changchun 130022, China)

(3 Jilin Technology College of Electronic information, Jilin, Jilin 132021, China)

Abstract: A scheme of star simulator spectrum simulation based on mixed light source of xenon lamp and halogen tungsten lamp for foundation was proposed. The wide spectrum light source array was composed of xenon lamp and halogen lamp. After color temperature simulation and module controlling, the light entered into the integrating sphere to provide ideal light source for star simulator, and spectral curves were stimulated at specific color temperatures of nearly 3 900 K, 4 800 K, 6 500 K. Through the simulation of the blackbody spectrum curve of standard, the optimal transmission rate was calculated for each band filter, and the transmission rate of interval in tiny brand was combined for getting the transmission rate which satisfied the design index. The simulation results showed that, by using the proposed scheme, the small band matching simulation error would be less than 10%, with the relative area method verification matching error is within 4%, and this scheme provides an effective method for the star simulator to simulate spectral curves of the specific color temperatures.

Key words: Star simulator; Hybrid light source; Color temperature simulation; Optical filter; Spectral curve

OCIS Codes: 220.0220; 220.4610; 220.4298; 220.4830; 350.6090

第一作者: 张晓娟(1970-), 女, 教授, 博士研究生, 主要研究方向为光电仪器与检测技术及仿真试验. Email: jlxj2008@126.com

导师(通讯作者): 张国玉(1962-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为空间科学与技术、光电仪器与检测技术等. Email: zh_guoyu@yahoo.com.cn

收稿日期: 2013-06-17; 录用日期: 2013-08-15

0 引言

星模拟器是一种在实验室条件下模拟星空,实现星敏感器地面标定工作的仪器^[1].星模拟器按其功能的不同可分为两大类:一类是标定设备,也叫静态星模拟器,星图是不可变的,这类设备通常模拟单个或有限几个星点像,并对其大小、星等、光谱特性进行严格模拟,主要侧重于模拟准确度;另一类是功能检测设备,也叫动态星模拟器,星图可实时变化,对实际星空的位置要求较为严格^[2-3].近年来,伴随着星敏感器准确度的不断提高,对星模拟器光谱模拟准确度的要求也越来越高.

传统星模拟器主要考虑单星张角和星间角距的准确度^[4],本文研究的星模拟器主要针对星点的色温和光谱模拟.该星模拟器要求光谱范围为 360~900 nm,模拟视星等-2~+6,需要模拟三个色温 $T_1=3\ 900\text{ K}$, $T_2=4\ 800\text{ K}$, $T_3=6\ 500\text{ K}$ 的光谱,模拟误差 $\leq 10\%$.

美国国家标准和技术研究院(National Institute of standards and Technology, NIST)研制一种使用大量发光二极管(Light Emitting Diode, LED)的光谱分布可调积分球光源^[5],国内的朱继亦等还提出一种改进 LED 光谱的模型.由于可变电流驱动 LED 会引起半峰全宽的变化和峰值波长的漂移,降低光谱匹配算法的效率和准确度,因此一般只通过改变 LED 点亮个数来调整合成光谱,该光源在有些波段合成光谱的误差较大,且大量 LED 将会增大积分球的开口比,从而降低输出光谱的均匀性和余弦特性^[6-7].英国国家物理实验室(National Physical Laboratory, NPL)设计以溴钨灯为发光介质的光谱分布可调谐光源系统,系统中溴钨灯发出的光经准直系统、分光系统、聚焦透镜以及空间滤波器后入射到积分球^[5,7],调整空间滤波器透过特性即可改变积分球的输出光谱分布,该光谱光源系统在蓝绿光波段光谱能量偏低.国内的刘洪兴等在此基础上采用溴钨灯和恒流驱动的 LED 混合光源作为积分球内部光源进行了光谱分布及匹配研究^[8],但由于有些波段的 LED 难以配齐,只做了 570~640 nm 的光谱分布实验.美国蓝菲光学公司(Labsphere Inc)^[9]设计了氙灯和卤钨灯混合的均匀光源系统,光谱覆盖紫外到近红外,可以获得 3 000~6 000 K 范围相关色温的光谱.本文采用氙灯和卤钨灯混合作为积分球光源,配合椭球聚光镜、合光棱镜、滤光片及电动可变光阑等,获得特定色温的光谱曲线.

1 混合光源星模拟器的结构及功能

混合光源星模拟器主要由光谱分布可控光强可调光源系统、星图显示系统、高成像质量准直光学系统、模拟器控制计算机系统等组成.混合光源星模拟器的

结构示意图如图 1 所示.其中光源系统主要由宽光谱光源灯阵、色温模拟与控制模块、积分球、光谱辐射计等组成,用于模拟恒星的光谱.宽光谱光源灯阵提供色温与所需模拟的黑体温度相近的光源.色温模拟与控制模块由滤光片及电动可变光阑组成,实现对光线的波长和光强的控制.

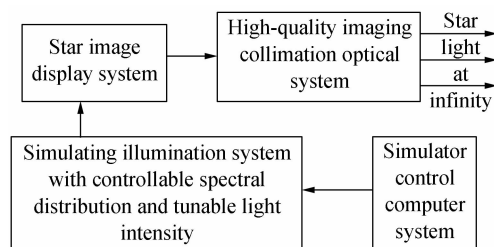


图 1 混合光源星模拟器的结构

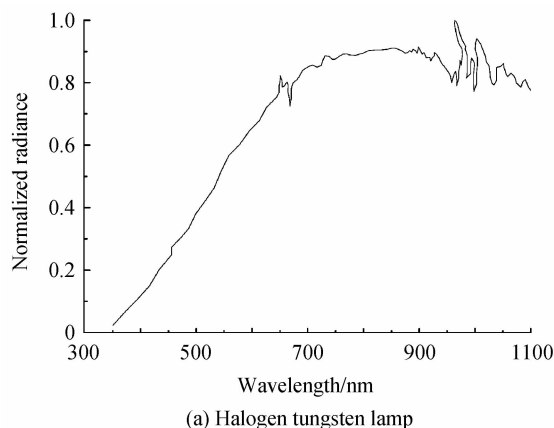
Fig. 1 Schematic layout of Star simulator on hybrid light source

1.1 光源的选定

目前常用的电光源主要有 LED 灯、卤钨灯、氙灯等.LED 具有体积小、寿命长、发光效率高等优点^[10].LED 灯光谱分布较窄,带宽通常为 5、10、20 nm,由于工艺上的原因有些波段较难实现,难以达到光谱匹配的准确度.

卤钨灯具有较强的发光强度,光谱连续且光谱范围很宽,覆盖从远紫外到远红外区域,具有很好的稳定性和比较长的使用寿命,但卤钨灯在短波波段能量相对偏低,单独使用不能满足要求^[11].氙灯的光、电参量一致性好,在寿命期内光谱能量分布几乎不变,工作状态受外界条件变化的影响小,辐射光谱能量分布与日光相接近^[12],但氙灯在 700~820 nm 附近不稳定,单独使用也难以满足要求.

为了满足模拟准确度的要求,选用卤钨灯和氙灯为光源,采用分波段控制的方法获得宽光谱.考虑到卤钨灯和氙灯是热光源,功率不宜过大.拟选取 30 W 的卤钨灯,其平均使用寿命达 2 000 h,双色涂层反光罩能减少 66% 的热辐射量,符合 IEC60598-1 标准,色温达 3 000 K.归一化后的卤钨灯光谱如图 2(a).选取



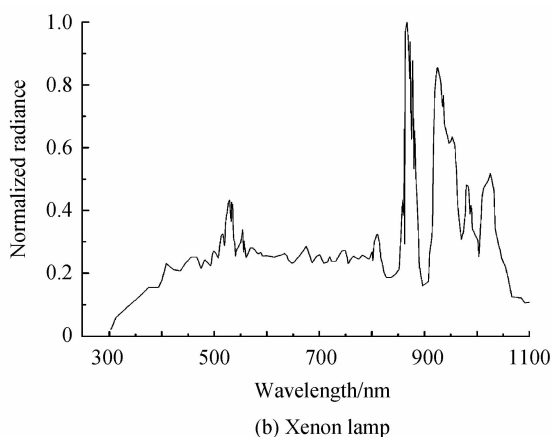


图2 归一化后的卤钨灯与氙灯光谱辐射度分布
Fig.2 Normalized radiance distribution of halogen tungsten and xenon lamp

10 W的氙灯,色温达6 000 K,归一化后的氙灯光谱如图2(b).

1.2 宽光谱光源灯阵的设计

由于要模拟特定色温黑体的光谱曲线,故宽光谱光源灯阵要提供色温与所需模拟的黑体温度相近的光源.

选用氙灯和卤钨灯组成多个发光单元作为宽光谱光源灯阵,配合使用椭球聚光镜,以保证光束经过汇聚作用后通过滤光片及电动可变光阑进入积分球.

其中,发光单元有两种组成形式:一种是单独使用氙灯或卤钨灯,配合椭球反射镜、滤光片及电动可变光阑,如图3(a),简称发光单元一,单独使用氙灯时提供光谱的工作范围为350~600 nm,单独使用卤钨灯时提供光谱的工作范围为600~900 nm;另一种是同时使用氙灯和卤钨灯,并配合椭球反射镜、合光棱镜、滤

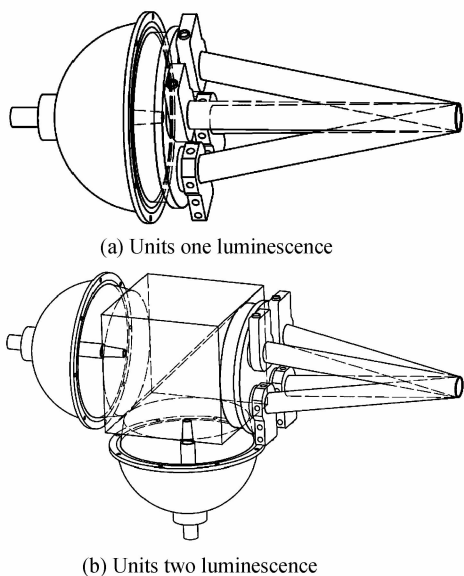


图3 发光单元一和二的三维仿真图
Fig.3 Three-dimensional simulation diagram of units one and two luminescence

光片和电动可变光阑,如图3(b),简称发光单元二,提供的光谱工作范围为500~700 nm,合光棱镜则用于发光单元二将氙灯和卤钨灯发出的光会聚.在发光单元中,通过椭球反射镜将氙灯和卤钨灯发出的光汇聚.

宽光谱光源灯阵由驱动电路控制发光,做为整个星模拟器系统的总光源,光谱范围为360~900 nm.根据氙灯和卤钨灯发出的真实光谱曲线,以及经过混光调节色温后的光谱曲线来确定发光单元一和发光单元二的使用数量.

2 混合光源光谱的数据处理

2.1 特定色温黑体光谱曲线

颜色温度^[13]是一个描述光源及其他物体光度特性的重要物理量,黑体是一个能完全吸收入射能量的理想物体.普朗克提出的黑体单色辐射公式为^[14]

$$M(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 [\exp(hc/kT\lambda) - 1]} \quad (1)$$

式中, k 为玻尔兹曼常量, $k=1.380\ 605 \times 10^{-23}$ J/K, h 为普朗克常量, $h=6.6\ 260\ 693 \times 10^{-34}$ J·s, c 为真空中的光速, $c=299\ 792\ 458$ m/s.

由黑体单色辐射公式可以计算出黑体在一定温度下波长的辐射度.故可以通过将辐射体的光谱调整到特定温度黑体的光谱来实现对特定温度黑体的模拟.

通过软件绘制特定色温下黑体的光谱曲线.标准黑体的3 900 K、4 800 K、6 500 K色温曲线如图4.

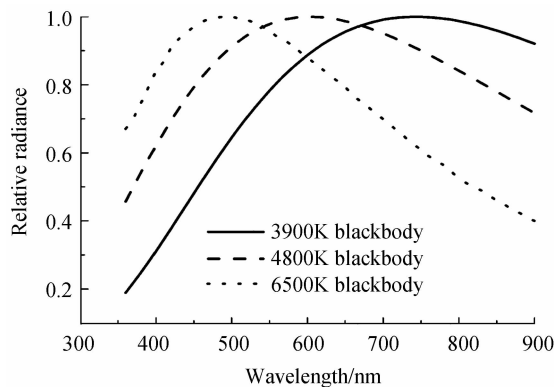


图4 标准黑体的色温曲线
Fig.4 Standard blackbody color temperature curve

2.2 实测光谱数据的处理

根据所要模拟的三种标准黑体的色温,通过对宽光谱灯阵的调制得出色温相近的较理想混合光源的光谱曲线.由于配制出混合光源的光谱数据的波长分辨率较高,故先将实验得出混合光源的辐亮度数据进行插值,实现每个微小区间波长都有相应的辐亮度数据.由于光源的光谱连续,因此对不同波长所对应的辐亮度插值后误差较小.插值的步长可以根据实际情况调节.

为了提高模拟准确度,选取较小插值处理,首先使用拉格朗日插值公式进行插值,然后对插值处理后得

到的混合光源光谱数据进行归一化处理. 归一化后的 3 900 K、4 800 K、6 500 K 混合光源光谱辐射度分布见图 5.

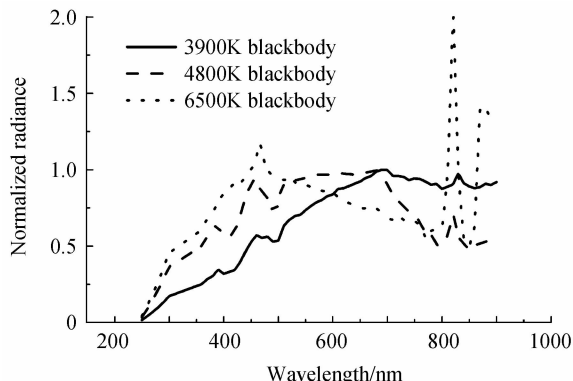


图 5 归一化后的混合光源光谱辐射度分布

Fig. 5 Normalized radiance distribution of hybrid light source

3 滤光片透过率的选择

3.1 光源误差计算

为了确定混合光源和相应色温黑体的光谱匹配程度,以 4 800 K 为例,将光源光谱和相应色温黑体的色温曲线进行比较,如图 6.

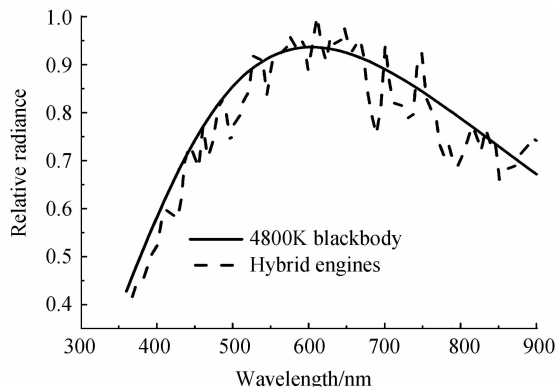


图 6 光源光谱和相应色温黑体的色温曲线比较

Fig. 6 The comparison of curve between light source spectrum and the corresponding color temperature of blackbody temperature

根据系统设计指标要求,由相对误差公式得出相应波长的混合光源相对于标准黑体辐射的误差.

$$E_r = \frac{E}{T} = \frac{x - T}{T} \quad (2)$$

式中: x 为测量值, T 为约定真值.

根据式(2)可绘制出 4 800 K 标准黑体 $\pm 10\%$ 误差线. 将混合光源光谱、相应色温黑体的色温曲线及相应黑体辐射的 $\pm 10\%$ 误差线进行比较,三种曲线的比较如图 7. 可以看出:混合光源的光在没有经过色温模拟与控制模块时,光谱分布曲线在 360~900 nm 区间不满足曲线模拟准确度 $\leq 10\%$ 的要求.

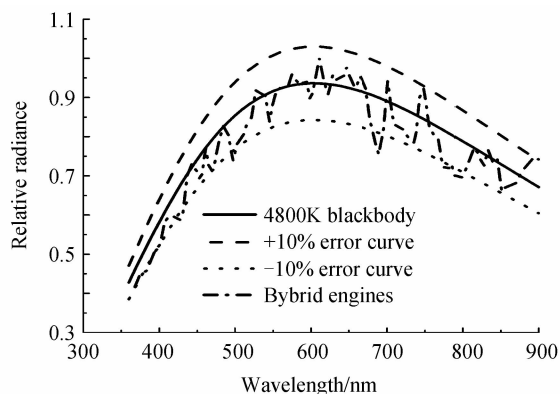


图 7 三种曲线的比较图

Fig. 7 Comparison of three curves

为了保证曲线模拟准确度优于 10% ,需要通过设计具有特定光谱透过率的滤光片^[15]对模拟准确度超差的波长范围进行光谱调节.

3.2 滤光片透过率的选择

通过特定色温光谱和光源光谱相除计算出滤光片不同波段的透过率. 由于镀膜工艺的限制,难以在每一微小波段区间镀上不同的透过率,因此需要对滤光片透过率进行区间合并,得到既满足设计指标又符合工艺要求的滤光片透过率. 滤光片微小波段透过率区间合并的原则是在能满足设计指标的前提下,将相近透过率的波长范围合并为同一区间. 4 800 K 色温对应的滤光片透过率表见表 1.

表 1 4 800 K 色温对应的滤光片透过率

Table 1 Transmittance chart of 4 800 K color temperature corresponding optical filter

Wavelength/ μm	Transmittance
0.36~0.39	0.416 666 667
0.4	0.5
0.41~0.42	0.555 555 556
0.43~0.44	0.5
0.45~0.47	0.416 666 667
0.48	0.5
0.49~0.5	0.555 555 556
0.51~0.67	0.5
0.68~0.69	0.416 666 667
0.7~0.73	0.5
0.74~0.79	0.632 911 392
0.8~0.82	0.714 285 714
0.83	0.5
0.84~0.9	0.714 285 714

滤光片由专业厂家加工,加工后 4 800 K 滤光片的透过率曲线如图 8. 通过软件仿真的 4 800 K、3 900 K 和 6 500 K 色温相应氙灯卤钨灯混合光源经过相应滤光片后的光谱如图 9.

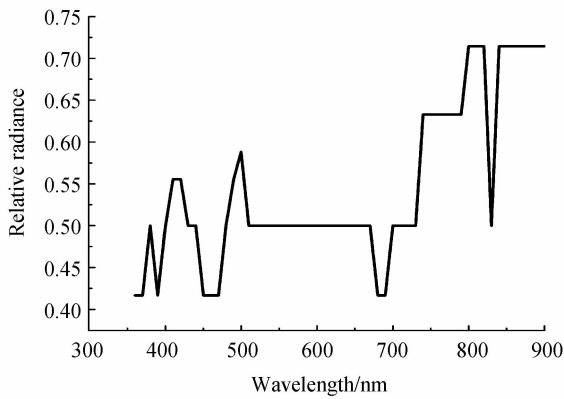
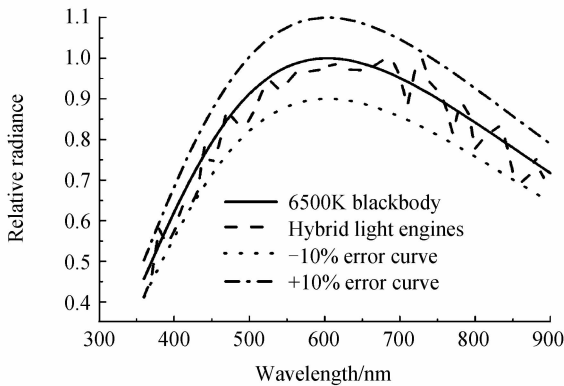
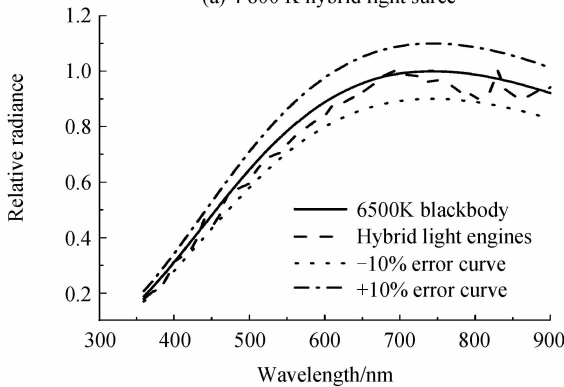


图 8 4 800 K 滤光片的透过率曲线

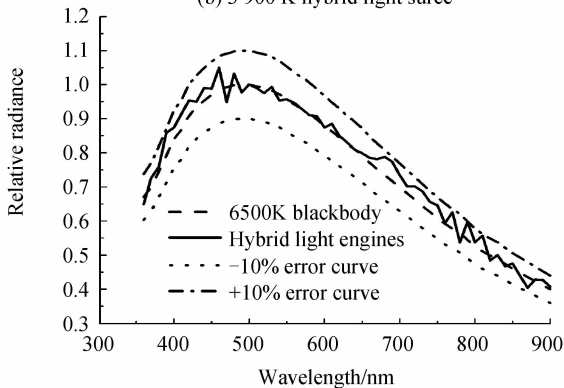
Fig. 8 Transmittance curve of 4 800 K optical filter



(a) 4 800 K hybrid light source



(b) 3 900 K hybrid light source



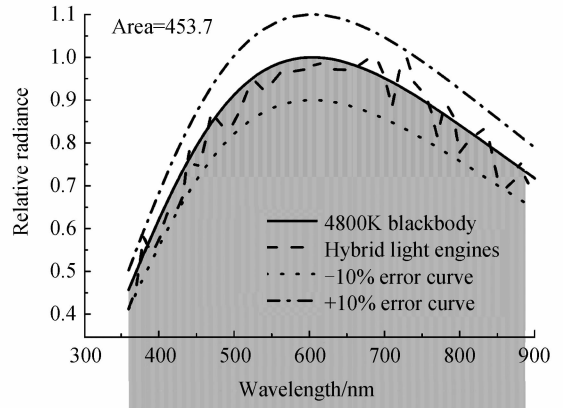
(c) 6 500 K hybrid light source

图 9 4 800 K、3 900 K 和 6 500 K 色温相应光源经过相应滤光片后的光谱图

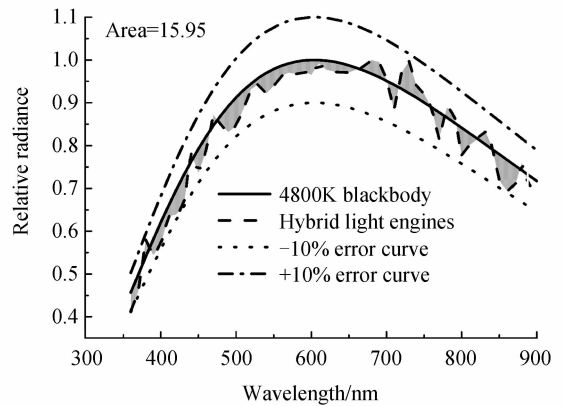
Fig. 9 The spectrum of 4 800 K, 3 900 K and 6 500 K hybrid light source going through corresponding optical filter

4 模拟误差分析

为了使混合光源能很好地模拟出光谱曲线,对光源的光谱曲线提出一定要求.目前比较普遍的评价方法是相对面积法^[16],即为了描述光谱曲线的偏差程度,令标准黑体色温曲线包围面积为 S_1 ,如图 10(a),混合光源的光谱曲线与标准黑体色温曲线的最小偏差量包围面积 S_2 ,如图 10(b),则模拟误差为 S_2/S_1 .



(a) Area surrounded by standard blackbody temperature curve



(b) The minimum deviation surrounding area

图 10 光谱曲线的偏差

Fig. 10 Deviation of spectral curve

按照相对面积法得出 4 800 K、3 900 K 和 6 500 K 色温曲线的模拟误差分别为 3.44%、3.73% 和 2.01%。这是理想状态的误差,在实际设计中,还要尽量减小来自系统的误差,如由于滤光片的镀膜工艺带来的误差(控制在 5% 以内)和由于光源的稳定性带来的误差等,使总的误差控制在 10% 以内。

5 结论

本文以星模拟器的技术指标为研究基础,以基于氙灯和卤钨灯混合的积分球光源为研究特点,以 3 900 K、4 800 K、6 500 K 三个特定色温光谱模拟为研究核心,仿真模拟了满足要求的光谱.通过各种光源的比较,选择了与模拟色温相近的氙灯和卤钨灯组成不同的发光单元构成宽光谱灯阵,并通过选择不同波段区间的滤

光片透过率,获得了理想的模拟光谱.由分析结果可知,可获得光谱范围为360~900 nm,模拟误差在10%以内的三个色温的 $T_1=3\ 900\text{ K}$, $T_2=4\ 800\text{ K}$, $T_3=6\ 500\text{ K}$ 的光谱,符合技术指标要求.在实际应用中,温度变化会对光谱形状产生影响,尤其是氙灯和卤钨灯是热光源,必须要考虑到散热和控温,保持温度的基本稳定.本文研究为后续的进一步设计提供了一种可行的思路.

参考文献

- [1] WEI Xin-guo, ZHANG Guang-jun, FAN Qiao-yun, *et al.* Ground function test method of star sensor using simulated sky image[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(6): 1087-1091.
魏新国,张广军,樊巧云,等.利用仿真星图的星敏传感器地面功能测试方法[J].*红外与激光工程*,2008,**37**(6):1087-1091.
- [2] LIU Shi, ZHANG Guo-yu, SUN Gao-fei, *et al.* Design of dynamic star simulator based on LCOS optical splicing technology[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2013, **33**(2): 200-206.
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.
- [3] CHEN Yuan, ZHANG Wen-ming. Tunable color temperature light source for sar 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.
- [4] SUN Gao-fei, ZHANG Guo-yu, JIANG Hui-lin, *et al.* Design of very high accuracy star simulator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(8): 1730-1735.
孙高飞,张国玉,姜会林,等.甚高准确度星模拟器设计[J].*光学精密工程*,2011,**19**(8):1730-1735.
- [5] 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.
- [6] 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): 882-887.
朱继亦,任建伟,李葆勇,等.基于LED的光谱可调谐光源的光谱分布合成[J].*发光学报*,2010,**31**(6):882-887.
- [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] ZU Ji-yi. The research of LED-based spectrally tunable source [D]. Changchun: Changchun Institute of Optical Precision Machinery, 2010: 36-37.
朱继亦.基于LED的光谱可调谐光源的研究[D].长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2010:36-37.
- [9] WANG Wei-zhi, LIU Bing-bin. Labsphere Inc under China's big market[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **01**: 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,**01**:76-78.
- [10] FRYC I, BROWN S W, OHNO Y. Spectral matching with an LED-based spectrally tunable light source [C]. Fifth International Conference on Solid State Lighting, Bellingham: SPIE, 2005: 59411-1-9.
- [11] PAN Ping. Single star simulator developed digital light source technology[D]. Xi'an: Chinese Academy of Sciences, Xi'an Institute of Optical Precision Machinery, 2005: 22-23.
潘平.单星模拟器数字光源研制技术[D].西安:中国科学院西安光学精密机械研究所,2005:22-23.
- [12] CHEN Wen-zhi, JIANG Lv-lin, JIANG Li, *et al.* Experimental research of spectral design of solar simulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0222002.
陈文志,蒋绿林,姜黎,等.太阳模拟器的光谱设计实验研究[J].*光学学报*,2011,**31**(2):0222002.
- [13] CHEN Yuan, ZHANG Wen-ming. Mixing arithmetic matching for color temperature on blackbody track[J]. *China Measurement & Test*, 2010, **36**(1): 32-34.
陈源,张文明.黑体轨迹色温匹配的混光算法[J].*中国测试*, 2010,**36**(1):32-34.
- [14] JIN Wei-qi, HU Wei-jie. Radiometric photometric colorimetric and measurement[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2007:34-50.
金伟其,胡威捷.辐射度光度与色度及其测量[M].北京:北京理工大学出版社,2007:34-50.
- [15] YANG Guo-wei. Research on narrow pass-band tunable filters work in broad spectral range[D]. Beijing: Zhejiang University, 2010: 7-8.
杨国伟.宽光谱窄带可调谐滤光片的研究[D].北京:浙江大学,2010:7-8.
- [16] FENG Guang-jun, MA Zhen, LI Ying-cai. Design and performance analysis of standard starlight simulator [J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, **31**(1): 39-42.
冯广军,马臻,李英才.一种高星等标准星光模拟器的设计与性能分析[J].*应用光学*,2010,**31**(1):39-42.