

文章编号 1004-924X(2012)07-1447-08

氙灯和发光二极管作光源的积分球太阳光谱模拟器

刘洪兴^{1,2}, 孙景旭¹, 刘则洵¹, 李葆勇¹, 任建伟^{1*}, 叶 钊^{1,2}, 任建岳¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:设计了一种由氙灯和发光二极管(LEDs)作光源的积分球太阳光谱模拟器来提高太阳光谱的光谱匹配精度。引进模拟退火算法研究光谱匹配技术,设计了氙灯模块及LEDs模块的结构和控制系统。LEDs采用环带摆放和恒流驱动方式,并通过多机通信系统控制。氙灯模块上安装截止滤光片和程控衰减器,滤光片用来滤去氙灯红外波段的尖峰,衰减器则用来调整氙灯入射到积分球的辐射通量。仿真实验表明:Epitex公司的53种单色LEDs和氙灯完全可以模拟380~1000 nm波段的AM 1.5标准太阳光谱,光谱的平均相对误差为5.67%。分析讨论了该太阳光谱模拟器的光谱失配误差、出光面的辐照非均匀度和辐照不稳定性,三者均可以控制在±3%以内。

关键词:氙灯;发光二极管;积分球;太阳光谱模拟器;光谱匹配

中图分类号:O432.1;TN312.8 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122007.1447

Design of integrating sphere solar spectrum simulator based on xenon lamp and LEDs

LIU Hong-xing^{1,2}, SUN Jing-xu¹, LIU Ze-xun¹, LI Bao-yong¹

REN Jian-wei^{1*}, YE Zhao^{1,2}, REN Jian-yue¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

* *Corresponding author, E-mail: Renjw@ciomp.ac.cn*

Abstract: By taking an xenon lamp and Light Emitting Diodes(LEDs) as luminescence media, an integrating sphere solar spectrum simulator was proposed to improve the matching precision of solar spectra. The Simulated Annealing (SA) algorithm was introduced to study spectrum matching technique, and the mechanical structures and control systems of LED module and xenon lamp module were designed. The LEDs were positioned in an annular manner, driven by a constant current and controlled by a multi-computer communication system. A cut-off filter and a programmable attenuator were mounted in the xenon lamp module, a filter was used to cut off the infrared spectrum of xenon lamp and an attenuator was used to vary the incidence radiant flux of xenon lamp entered in the integrating sphere. The simulation experiment indicates that 53 Epitex LEDs and the xenon lamp could simulate the AM 1.5 standard solar spectra successfully, and the average relative error is 5.67%. The

收稿日期:2011-12-20;修订日期:2012-02-28.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 863-2-5-1-13B)

mismatching error, irradiance uniformity and the irradiance instability were analyzed and discussed, and they all has the potential of performing better than $\pm 3\%$.

Key words: xenon lamp; Light Emitting Diode (LED); integrating sphere; solar spectral simulator; spectrum matching

1 引言

太阳能是一种取之不尽、用之不竭的可再生能源,其利用方式多种多样,如光热、光伏、光化学等。在太阳能应用领域,常需要具有一定光谱分布的光源作为标准测试光源。太阳光虽然具有理想的光谱分布,但其应用受到时间、地点以及天气状况等因素的制约,太阳光谱模拟器则克服了这种局限性,可以任意改变试验条件,在实验室内反复进行测试,为太阳能的研究提供了一种相对稳定的测试光源^[1]。此外,太阳光谱模拟器还可以作为空间相机的辐射定标光源^[2],摄影工业、钻石等级判断以及艺术品照明等领域的标准光源^[3],因此,研制高性能的太阳光谱模拟器具有重要意义。

现实中不存在与太阳光谱分布完全一致的光源,因此,很多研究针对光源的选择展开^[3-7],最常用的光源有溴钨灯、冷光灯、氙灯和发光二极管(Light Emitting Diodes, LEDs)。溴钨灯的色温值在 3 000 K 左右,光谱和太阳光谱相差很远,红外线含量太多,紫外线含量过少,通常用 3 cm 厚的水膜滤去一部分红外线,却无法补充过少的紫外线。冷光灯是由溴钨灯和一种介质反射镜构成的组合装置,这种反射镜对红外线几乎是透明的,但对其余光线能起良好的反射作用;改善冷光灯的光谱,其色温可达 3 400 K,但其额定寿命仅为 50 h。氙灯光谱分布总体上接近太阳光,但在近红外波段有很强的尖峰,常采用滤光片修正氙灯光谱^[4]。Dobrowolski 以 Wright 的 4 片吸收式滤光片将氙灯光谱修正为 D65 光谱^[5],吸收式滤光片虽然不受角度的影响,但无法在某些波长产生很陡的穿透光谱并很容易受热变质。LED 具有发光效率高、寿命长、发光稳定性好等众多优点^[8-9]。美国国家标准和技术局(National Institute of Standards and Technology, NIST)设计了可见光波段的 LEDs 光谱分布可调谐积分球光源^[6],采用该光源系统模拟太阳光谱面临着光强不足的问题,即使将 LEDs 换成大功率 LEDs 也

存在弊端:首先,大功率 LEDs 种类少于低功率 LEDs,这将影响太阳光谱的匹配精度;另外,大量大功率 LEDs 还存在散热问题。Lo Mei-ling 等人通过调整可见光波段的 6 种大功率 LEDs 的电流参数来逼近太阳光谱,然后设计特定的干涉式滤光片得到太阳光谱^[3],但干涉式滤光片受角度影响同样面临受热变质的问题,此外,该设计也经受过光强不足的困扰。

本文设计了一种积分球太阳光谱模拟器,积分球作为一种较为理想的匀光器,其内部采用 LEDs 和基底光源的混合光源,在基底光源光谱分布基础上调整 LEDs 的点亮组合来匹配太阳光谱,而基底光源可以保证太阳光谱模拟器的光强要求。然后,引进模拟退火(Simulated Annealing, SA)算法研究太阳光谱的光谱匹配技术,给出了太阳光谱模拟器的结构设计和控制系统设计,并分析讨论了光谱失配误差、出光面的辐照不稳定度和辐照面非均匀度等指标。

2 积分球太阳光谱模拟器的设计

如图 1 所示,积分球太阳光谱模拟器主要包括积分球、LED 模块、基底光源模块、电源控制箱、光纤摄谱仪和 PC 机。积分球作为较为理想

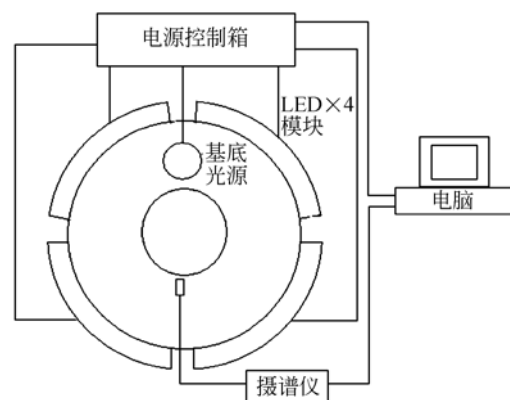


图 1 积分球太阳光谱模拟器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of integrating sphere solar spectrum simulator

匀光器,不仅实现了氙灯和LEDs的充分混光,而且可以提供一个均匀性好、稳定性高的朗伯光源^[10]。LED模块上安装了不同峰值波长和光谱分布的LEDs,在基底光源光谱基础上通过调整LED的点亮组合即可得到近似的太阳光谱,电源控制箱可以控制任意组合LEDs的开关组合,光纤摄谱仪实时监测积分球输出的光谱分布并反馈到PC机,PC机通过软件计算匹配光谱和太阳光谱的差异并调整LEDs点亮组合直至得到太阳光的最优匹配光谱。

2.1 光谱匹配技术

积分球内部光源选择基底光源和LEDs的混合光源,基底光源可保证太阳光谱模拟器的光谱要求,而不同LEDs点亮组合则可以保证所需的输出光谱分布,这不仅弥补了氙灯、溴钨灯和冷灯光谱分布与标准太阳光谱分布的差别,而且可以改善纯LEDs光谱分布可调谐光源光强不足的缺点。此外,LEDs还可以提高该太阳光谱模拟器的光谱可调谐能力。例如,当基底光源的发光光谱改变时,可以通过调整LEDs组合来校正匹配光谱。

基底光源选择380~1000 nm波段的连续分布光谱,且尽量接近太阳光谱。图2给出了AM 1.5标准太阳光谱分布以及带截止滤光片氙灯和

欧司朗溴钨灯的实测相对光谱分布曲线。由图2可知,与溴钨灯光谱相比,带滤光片氙灯更接近太阳光谱,是相对理想的基底光源。

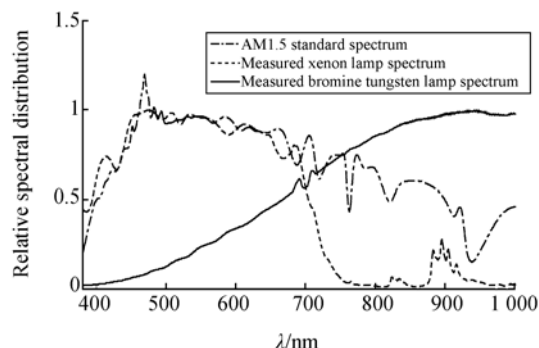


图2 AM1.5标准太阳光谱以及带滤光片氙灯和溴钨灯的实测相对光谱分布

Fig. 2 AM 1.5 standard solar spectrum, relative measured spectra of xenon lamp with optical filter and bromine tungsten lamp

光谱匹配技术可归结为优化组合问题,即在众多LEDs组合中寻找光谱匹配精度最高的LEDs组合,本文引进SA算法^[11]作为光谱匹配算法,寻找全域内与太阳光谱最为匹配的LEDs组合。为了评价匹配光谱与目标光谱的近似程度,定义评价函数为:

$$\chi = \sqrt{\frac{1}{J} \sum_{j=1}^J [(S_{AM1.5}(\lambda_j) - S_{base}(\lambda_j) - \sum_{i=1}^n k_i S_i(\lambda_j))^2]} / \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J S_{AM1.5}(\lambda_j)}, \quad (1)$$

其中: χ 为平均相对误差, χ 值越小,匹配光谱与太阳光谱的相似程度越高; $S_{AM1.5}(\lambda_j)$ 、 $S_{base}(\lambda_j)$ 和 $S_i(\lambda_j)$ 分别为AM 1.5标准太阳光谱、基底光源以及第*i*种LED在 λ_j 波长处的光谱辐射量; k_i ($i=1, \dots, n$)是*n*种LEDs的整数组合, λ_j ($j=1, \dots, J$)是在光谱波段内按1 nm等间隔所取的*J*个波长。

本文采用商品化的LEDs进行仿真实验,选取Epitex LEDs,将53种单色LEDs的额定电流、峰值波长(λ_p)、半高宽度(Full Width Half Maximum, FWHM)以及辐射功率(P_o)等参数带入高斯分布函数近似地得到光谱功率分布曲线,如图3所示。53种LEDs的 λ_p 非等间隔地分布在375~980 nm波段内,不同LED光谱辐射功率峰值差距明显。例如,645 nm附近LED种类相对稀少,而550~600 nm波段内LEDs的辐射功

率低于其他波段LEDs。

图4为带截止滤光片的氙灯和Epitex LEDs仿真匹配AM 1.5标准太阳光谱曲线的效果图,采用SA算法作为光谱匹配算法,平均相对误差 $\chi=5.67\%$ 。

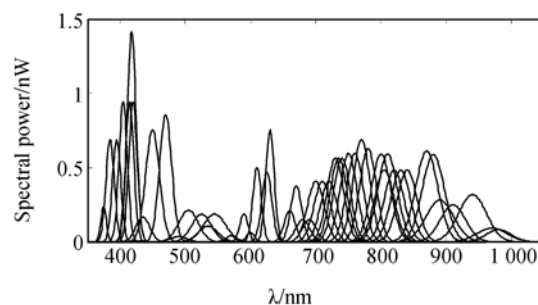


图3 53种Epitex LEDs光谱功率分布

Fig. 3 Spectral power distribution of 53 kinds of Epitex LEDs

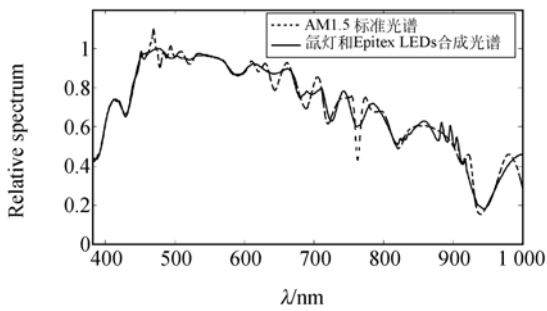


图 4 带滤光片氙灯和 Epitex LEDs 匹配 AM 1.5 光谱
Fig. 4 Matching spectrum for AM 1.5 achieved by Epitex LEDs and xenon lamp with optical filter

研究表明,选择 FWHM 值与 λ_p 间隔的比值大于 2 的 LEDs 可提高太阳光谱模拟器的光谱匹配程度;光谱平缓光滑的波段应选择 FWHM 比较大的 LEDs,而存在尖峰和尖谷的波段则需要 FWHM 较小的 LED 来表现细节。例如,450~500 nm 和 600~660 nm 波段光谱失配误差偏大,原因是该波段内的 LEDs 的 FWHM 与 λ_p 间隔的比值仅为 1~1.5 左右;而 750~770 nm 波段匹配误差比较大则是由于该波段内 LEDs 的 FWHM 偏大以致不能很好地表现尖谷细节。

2.2 结构设计

积分球太阳光谱模拟器的结构设计主要包括积分球设计、氙灯模块设计以及 LEDs 模块设计 3 部分,如图 5 所示。积分球设计要求内直径为 500 mm,出光口直径为 100 mm,380~1 000 nm 波

段最大输出辐亮度不低于 $80 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ 。辐亮度传递公式^[12]为:

$$I_{\text{out}} = \frac{\Phi_{\text{in}}}{\pi \times a} \cdot \frac{\rho \cdot f}{1 - \rho(1 - f)} = \frac{\Phi_{\text{in}}}{\pi \times A} \cdot \frac{\rho}{1 - \rho(1 - f)} \quad (2)$$

其中: I_{out} 为积分球输出辐亮度; Φ_{in} 为积分球输入辐射功率; f 为积分球开口比, $f = \frac{a}{A}$; a 为总开口面积; A 为积分球内径球的面积, $A = \pi d^2$; d 为积分球内直径,取 $f = 5\%$; ρ 为内表面涂层的光谱反射率,随波长细微变化,可视作常数, $\rho = 0.98$ 。

当 $L_{\text{out}} = 80 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ 时, $\Phi_{\text{in}} = 13.884 \text{ W}$ 。仿真计算可知需要约 970 只 Epitex LEDs,为了保证最大辐亮度要求,积分球内安装 1 200 只 LEDs,此时积分球开口比为 4.8% 左右。

为了节省积分球开口面积,LEDs 呈三角形阵列排布在环带区域,环带分 4 个模块,便于拆卸和安装,如图 5 所示。同类 LEDs 对称放置以提高出光口的面均匀性,LED 模块的外沿高出 LEDs 以避免 LEDs 发出的光直接照射到积分球出光口。LED 的光强输出、正向偏压、峰值波长都受温度的影响,为此 LED 模块后端要安装散热风扇以提高太阳光谱模拟器的稳定性。

氙灯光源模块需要安装散热片、截止滤光片和光强衰减器,滤光片的作用是滤去氙灯红外近红外波段的尖峰,衰减器用来调整射到积分球的辐射通量。

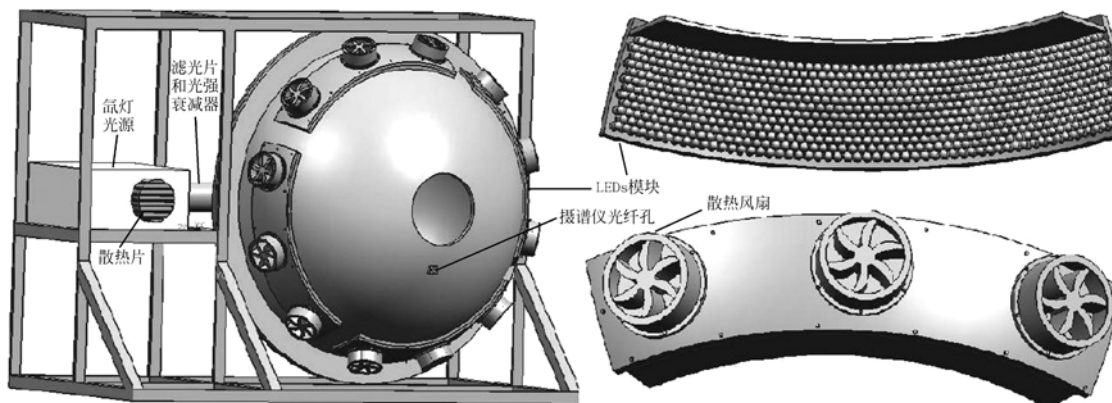


图 5 积分球太阳光谱模拟器的结构图

Fig. 5 Mechanical structure of integrating sphere solar spectrum simulator

2.3 控制系统设计

可变的驱动电流会改变 LED 的 λ_p 、FWHM 以及光谱分布曲线,并且 LED 在额定电流下工作寿命更长,因此采用恒流驱动 LEDs 通过调整 LEDs 点亮组合来匹配太阳光谱的方案。

LEDs 控制系统设计要求能够点亮所需的 LEDs 组合并提供稳定的电流。控制方案原理如图 6 所示:PC 机通过串行口和多个 MCU 通信,

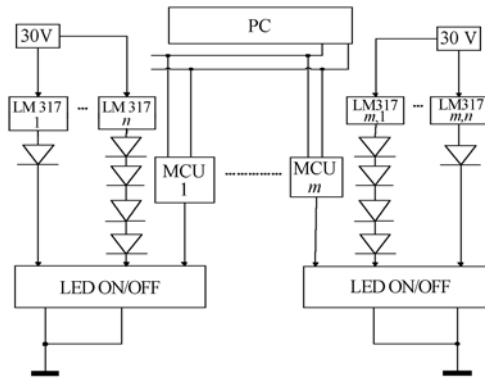


图 6 LEDs 控制系统设计原理图

Fig. 6 Principle of LEDs' control system

在这种多机通信中,PC 机为主机,MCU 为从机。首先 PC 机发送地址信息与所需的 MCU 进行联络,然后发送控制指令与数据给被寻址的 MCU,被寻址的 MCU 根据控制指令控制 LEDs 的开关,此外,LM317 三端稳压模块可为 LED 提供高精度、稳定的驱动电流。

氙灯采用专用电源供电,程控衰减器来调整氙灯入射到积分球的辐射通量,间接调整积分球太阳光谱模拟器的亮度等级。

3 积分球太阳光谱模拟器性能分析

为了评价该太阳光谱模拟器设计的性能,本文对光谱匹配误差、出光面的辐照不稳定性和辐照非均匀度进行了分析和讨论。

3.1 光谱失配误差

表 1 为 AM 1.5 标准太阳光谱和仿真实验匹配光谱的各波段辐射量所占有效波段总辐射量的比例以及对应波段的光谱失配误差^[13]。

同一种 LEDs 的个体差异会影响到光谱失配误差,应先进行 LEDs 筛选实验以选出个体差异小的 LEDs。表 1 中,最大的光谱失配误差为

-1.15%,在工程实践中,该积分球太阳光谱模拟器的光谱匹配误差可以控制在 $\pm 3\%$ 以内。

表 1 AM 1.5 和匹配光谱在各波段内的辐射量比例以及对应的失配误差

Tab. 1 Radiation rates of AM 1.5 and matched spectrum within each wave range and corresponding mismatching errors (%)

波段	辐射量比例		失配误差
	AM 1.5	匹配光谱	
380~400	2.21	2.21	0
400~500	19.69	19.77	0.41
500~600	21.43	21.41	-0.09
600~700	19.51	19.52	0.05
700~800	16.06	16.05	-0.06
800~900	13.14	13.17	0.23
900~1 000	7.97	7.88	-1.15

3.2 出光面辐照不稳定性

积分球太阳光谱模拟器的出光面辐照不稳定性是指有效出光面内任意位置上,在规定时间内间隔内,辐射量随时间变化的最大相对偏差^[11],计算公式为: $\pm \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \times 100\%$ 。其中, E_{\max} 和 E_{\min} 分别为指定点在规定时间内最大和最小辐射量。

积分球太阳光谱模拟器的不稳定性主要取决于光源的不稳定性。LEDs 的不稳定性与驱动电路的稳定性息息相关,高精度驱动电路的 LEDs 可以保证 LEDs 的不稳定性优于 $\pm 0.02\%$ ^[14]。此外,任建伟等对两只 LEDs 进行了长达 3 000 h 的电老练实验,老练初期相对辐射强度的变化比较明显,这种上升趋势大概持续了 250 h,之后辐射强度相对平稳,300~1 200 h 之间的光强衰减小于 1.5%^[15],因此,在工程实践中,应首先进行 LEDs 电老练实验。氙灯的不稳定性主要受弧漂的影响,而积分球对氙灯光束具有匀化和积分的作用,因此,氙灯放入积分球后的不稳定性将大大改善。根据文献^[16]的实验数据,经过一段时间稳定之后,氙灯在 3 h 测试时间内的不稳定性优于 $\pm 2\%$ 。因此,该积分球太阳光谱模拟器的辐照不稳定性可以控制在 $\pm 3\%$ 以内。

3.3 出光面辐照非均匀度

积分球太阳光谱模拟器的辐照非均匀度是指有效测试面内,辐照度随位置变化的最大相对偏差^[13],计算公式为: $\pm \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \times 100\%$ 。其中, E_{\max} 和 E_{\min} 分别为有效测量面内所测得辐射量的最大值和最小值。

根据积分球理论和工程实践经验,积分球出光口的辐照非均匀度取决于内部光源的摆放位置和方式、涂层的反射率、积分球开口比等参数,在上述参数确定的情况下,等比例调整积分球的内直径和开口直径等结构参数,积分球的非均匀度保持不变。利用积分球辐射性能测试装置测试现有积分球的辐照非均匀度,所选积分球的参数与测试状态尽量逼近设计积分球的状态以保证测试结果的参考意义。实验中测量的数码值与辐照度成正比关系。所选积分球内直径为 3 000 mm,开

口比约为 4%,优于所设计积分球的 4.8%。测试积分球内涂层在 380~1 000 nm 波段的反射率高于 95%,略低于所设计积分球的 98%。积分球测试状态为点亮环形均匀分布的 4 组溴钨灯以对应 4 个 LEDs 光源模块。测试区域为以积分球开口出光面中心为基准点确定的 1 000 mm×1 000 mm 的正方形,扫描步长设为 50 mm。分析区域为以出光面中心为基准点,直径为 860 mm 的圆域,该区域内测试点的测试数据如表 2 所示,面非均匀度为 ±1.82%。综合考虑所设计积分球的开口比、内涂层反射率等参数与测试积分球的不同,设计积分球的面非均匀度应在 ±1.82% 附近。

氙灯光源的非对称分布会影响积分球出光口的非均匀度,蓝菲光学研制的光源非对称式积分球的出光面非均匀度小于 ±2%。因此,该积分球太阳光谱模拟器的出光面辐照非均匀度可以控制在 ±3% 以内。

表 2 直径为 860 mm 圆域内的测试数据

Tab. 2 Test data within 860 mm round region

(mm)

坐标	-400	-350	-300	-250	-200	-150	-100	-50	0	50	100	150	200	250	300	350	400
400						35531	35833	35863	35766	35623	35515	35237					
350					35819	35955	35997	36051	35996	35917	35877	35759	35467				
300				35961	36045	36045	36099	36105	36062	36035	36011	35943	35867	35621			
250			35887	35867	35967	36011	36059	36103	36135	36137	36115	36099	36075	36003	35481		
200		36027	36005	35953	36051	36097	36143	36179	36191	36185	36171	36155	36119	36057	35821	35119	
150	35005	35885	36015	35997	36087	36123	36169	36195	36209	36193	36199	36199	36159	36097	35863	35521	35531
100	35561	35951	36209	36039	36133	36207	36229	36237	36245	36253	36231	36215	36175	36137	35891	35653	35537
50	35821	35981	36077	36049	36097	36157	36221	36249	36257	36273	36233	36217	36191	36157	35917	35721	35843
0	35700	36042	36074	36081	36133	36167	36227	36239	36261	36249	36251	36231	36213	36171	36097	35831	35375
-50	35769	36017	36063	36035	36121	36187	36205	36231	36253	36271	36235	36229	36183	36141	36121	35749	35583
-100	35429	36045	36083	36041	36111	36169	36217	36257	36275	36265	36257	36221	36207	36161	36275	35855	35593
-150	34045	36011	36163	36039	36109	36169	36195	36231	36259	36263	36241	36223	36177	36115	35967	35059	35451
-200		35755	36137	36011	36069	36129	36181	36209	36227	36219	36203	36169	36125	36051	35851	35893	
-250			35941	35797	36011	36097	36143	36181	36185	36177	36153	36107	36029	35917	35671		
-300				36061	36359	36333	36123	36291	36216	36057	36073	35627	35327	35595			
-350					35447	36161	36129	36105	35963	35561	35483	35061	35693				
-400						35425	35837	35401	35390	35987	35519	35775					

4 结 论

本文设计了 LEDs 和氙灯的积分球太阳光谱模拟器。引进 SA 算法研究太阳光谱的光谱匹配技术,详细介绍了积分球太阳光谱模拟器结构及

其控制系统的设计。积分球作为较为理想的匀光器,不仅实现了氙灯和 LEDs 的充分混光,而且可以提供均匀性好、稳定性高的面光源。该太阳光谱模拟器的光谱失配误差、出光面辐照不稳定度和出光面辐照非均匀度均可控制在 ±3% 以内。

仿真实验表明, Epitex 公司的 53 种单色 LEDs 和实验室现有氙灯完全可以模拟 AM 1.5 标准太阳光谱, 380~1 000 nm 波段最大输出辐亮度不低于 80 W/(m²·sr), 积分球的开口比为 4.8%。鉴于氙灯光谱在红外波段截止, 可以设计更加合适的滤光片或者加入其它基底光源来改善红外光谱, 以提高积分球太阳光谱模拟器的辐亮

度等级。

采用不同峰值波长和光谱分布的 LEDs 作为内部光源不仅很好地解决了光谱匹配的问题, 在一定范围内实现了光谱分布可调, 而且 LED 作为新材料光源, 具有发光效率高、寿命长、发光稳定性好等众多优点, 更加符合当今能源低碳环保的发展主题。

参考文献:

- [1] 彭小静, 徐林, 郭泽. A 级太阳模拟器的光谱校正 [J]. 太阳能学报, 2008, 29(11): 1324-1327.
PENG X J, XU L, GUO Z. The spectral calibration of the class A solar simulator [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2008, 29(11): 1324-1327. (in Chinese)
- [2] 陈凤, 郑小兵. 光谱非匹配对光学遥感器定标精度的影响 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(3): 415-419.
CHEN F, ZHENG X B. Influence of spectrum non-matching on calibration precision of remote sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(3): 415-419. (in Chinese)
- [3] LO M L, YANG T H, LEE C C. Fabrication of a tunable daylight simulator [J]. *Appl. Opt.*, 2011, 50(9): C95-C99.
- [4] 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.
CHEN W ZH, JIANG L L, JIANG L, *et al.*. Experimental research of spectral design of solar simulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 0222002. (in Chinese)
- [5] DOBROWOLSKI J A. Optical interference filters for the adjustment of spectral response and spectral power distribution [J]. *Appl. Opt.*, 1970, 9(6): 1396-1402.
- [6] FRYC I. LED-based spectrally tunable source for radiometric, photometric, and colorimetric applications [J]. *Opt. Eng.*, 2005, 44(11): 363-371.
- [7] 任建岳, 苏克强, 王兵, 等. 真空应用太阳模拟灯及其灯针的研制 [J]. 光学精密工程, 2010, 18(8): 1699-1706.
REN J Y, SU K Q, WANG B, *et al.*. Development of vacuum application solar simulation Xe flash-lamp array [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(8): 1699-1706. (in Chinese)
- [8] 金鹏, 喻春雨, 周奇峰, 等. LED 在道路照明中的光效优势 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(1): 51-55.
JIN P, YU CH Y, ZHOU Q F, *et al.*. Superior application of LED to street lighting [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(1): 51-55. (in Chinese)
- [9] 赵星, 吴宏超, 宋丽培, 等. 微型投影机自由曲面 LED 聚光器的设计 [J]. 光学精密工程, 2010, 18(10): 2123-2129.
ZHAO X, WU H CH, SONG L P, *et al.*. Design of freeform LED concentrator for micro-project [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10): 2123-2129. (in Chinese)
- [10] 谢萍, 吴浩宇, 郑小兵, 等. 大口径积分球方向辐射特性自动测试系统研究 [J]. 光学精密工程, 2010, 18(9): 1943-1950.
XIE P, WU H Y, ZHENG X B, *et al.*. Automatic directional radiometric testing system for large aperture integrating spheres [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9): 1943-1950. (in Chinese)
- [11] 汪定伟, 王俊伟, 王洪峰, 等. 智能优化算法 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
WANG D W, WANG J W, WANG H F, *et al.*. *Intelligent Optimization Methods* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2007. (in Chinese)
- [12] ROBERT L L. Lambertian radiance and transmission of an integrating sphere [J]. *Appl. Opt.*, 2007, 46(28): 6966-6970.
- [13] 中华人民共和国国家标准 GB/T12637-1990. 太阳模拟器通用规范 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1990.
National standard of the People's republic of china GB/T12637-1990. *General Specification for Solar Simulator* [S]. Beijing: Standards Press of China, 1990. (in Chinese)
- [14] 王南, 徐晓洁, 叶楠, 等. 提高 LED 稳定性的高精度数控恒流源 [J]. 微计算机信息, 2006, 22(12): 246-247.

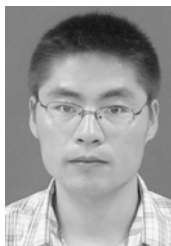
WANG N, XU X J, YE N, *et al.*. Design of a high precision digital constant-current source for improving the stability of LED [J]. *Control and Automation*, 2006, 22(12): 246-247. (in Chinese)

- [15] 麦镇强, 李凤有, 任建伟, 等. 星上定标光源 LED 长期工作的稳定性[J]. *发光学报*, 2007, 28(5): 748-753.

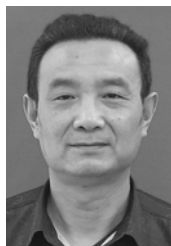
MAI ZH Q, LI F Y, REN J W, *et al.*. The long term working stability of spaceborne calibration LED light source [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2007, 28(5): 748-753. (in Chinese)

- [16] DANTE D A. Spectral radiance and temporal stability of a uniform radiance source integrating sphere with enhanced blue performance [J]. *SPIE*, 1998, 3428: 3428-0277-786.

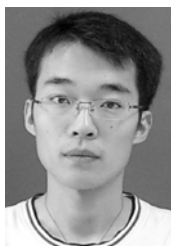
作者简介:



刘洪兴(1986—),男,山东聊城人,博士研究生,主要从事太阳光谱模拟技术、光学遥感器辐射定标方面的研究。E-mail:lhxing_888@126.com



任建伟(1956—),男,吉林长春人,高级工程师,研究生导师,主要从事光谱/辐射测试设备的开发研制和光学遥感辐射校正方面的研究。E-mail:Renjw@ciomp.ac.cn



孙景旭(1984—),男,山东阳谷人,博士研究生,主要从事空间光学遥感器结构设计及辐射定标方面的研究。E-mail:sunjingxu2004@163.com



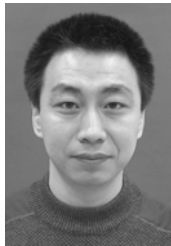
叶 钊(1986—),男,博士研究生,主要从事遥感图像辐射校正及光电仪器辐射定标的研究。E-mail:sunyeath@gmail.com



刘则洵(1980—),男,吉林人,硕士研究生,助理研究员,主要从事空间光学遥感器辐射定标方面的研究。E-mail:bjxlzx@163.com



任建岳(1952—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要研究方向为空间光学及光机电系统。E-mail:Renjw@ciomp.ac.cn



李葆勇(1975—),男,吉林人,副研究员,主要从事辐射定标及相关领域的研究。E-mail:lby7575@yahoo.com