

文章编号: 1000-7032(2011)10-1074-07

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

刘洪兴^{1,2}, 任建伟^{1*}, 李葆勇¹, 李宪圣¹, 万志¹, 赵文才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: 采用溴钨灯和恒流驱动的 LED 混合作为积分球内部光源, 提出了模拟退火算法作为光谱匹配算法, 研究了光谱分布可调谐积分球光源的光谱匹配技术。仿真实验表明, 该混合光源完全能够定量地模拟 CIE-D65 和等能光谱分布, 且在辐射功率优于 LED 模拟结果的前提下, LED 的数量分别减少 79.8% 和 82.9%, 平均相对误差分别减小 10% 和 40.5%。给出了 380~900 nm 波段最大输出辐亮度不低于 50 W/(m²·sr) 的直径为 0.5 m 的光谱分布可调谐积分球光源的混光方案。实验表明, 模拟退火算法和恒流驱动方案可应用于光谱分布可调谐积分球光源的工程实践。

关键词: LED; 溴钨灯; 积分球光源; 可调谐光谱分布; 光谱匹配

中图分类号: O482.3; O433.1

PACS: 42.72.-g

PACC: 0765

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fjxb20113210.1074

1 引言

理想的光谱分布可调谐积分球光源(STIS)可以模拟各种形状的光谱,如太阳光谱、等能光谱等。这在光电子仪器的标定、工业、色彩学以及生物学等领域具有广泛的应用^[1],例如太阳光谱则可应用于太阳能电池能量输出测定和空间相机的实验室辐射定标等。

积分球是较为理想的朗伯光源和匀光器^[2],常用的内部光源有溴钨灯和氙灯,两者在可见光波段光谱丰富且相对固定。美国的 National Physical Laboratory (NPL) 曾设计了由溴钨灯、准直系统、分光系统和空间滤波器组成的光谱分布可调谐的光源系统,然而该系统具有输出光谱能量不足的缺点,并且系统结构相对复杂^[3]。LED 具有发光效率高、寿命长(理论寿命为 10⁵ h)、环保、发光稳定以及峰值波长(λ_p)丰富等优点,将大量不同 λ_p 的 LED 放入积分球,调整 LED 的驱动电流,积分球即可调谐输出不同分布的光谱,这样就构成了 LED 的 STIS。美国的 National Institute of Standards and Technology (NIST) 最先设计出此类光

源,并采用一种迭代算法作为光谱匹配算法^[4-6]。在国内,陈凤等^[7]也设计出了类似的光源;朱继亦等^[1]还提出一种改进 LED 光谱的模型,并通过求解超定方程组非负最小二乘解来实现目标光谱的光谱匹配。然而 STIS 要达到实用光的强度,需要大量的小功率 LED 组合,这不仅增加了光源的成本和控制电路的复杂程度,更重要的是,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^[2,8]。选用大功率 LED 也存在弊端:首先,受工艺水平的限制,大功率 LED 的 λ_p 范围不如小功率 LED 的丰富^[9-10],因此采用大功率 LED 会削弱 STIS 的光谱可调谐能力;其次,大功率 LED 的散热问题如不能很好的解决,将严重影响 LED 寿命和 STIS 的稳定性。研究表明,可变电流驱动 LED 会引起 λ_p 漂移、光谱半峰宽度(FWHM)以及相对光谱分布的变化^[11]。而光谱匹配算法需要固定的光谱分布作为基光谱^[1,6],因此采用可变电流驱动 LED 会降低光谱匹配算法的效率和精度。此外,迭代算法和非负最小二乘解法给出的是非整数 LED 组合^[1,6],单纯的四舍五入并不是最优整数组合,因此还需再

收稿日期: 2011-06-02; 修订日期: 2011-07-13

基金项目: 国家“863”高技术计划(863-2-5-1-13B); 吉林省科技发展规划(20100524)资助项目

作者简介: 刘洪兴(1986-),男,山东聊城人,主要从事辐射定标技术应用的研究。

E-mail: lhxing_888@126.com; Tel: (0431) 86176095

*: 通讯联系人; E-mail: renjw@ciomp.ac.cn; Tel: (0431) 86176885

次寻找整数 LED 组合。本文从工程实践需求出发,引入模拟退火(Simulated Annealing, SA)算法^[12]作为光谱匹配算法。积分球内部光源采用溴钨灯和 LED 的混合光源,LED 采用恒流驱动方式,通过调整 LED 的点亮组合来实现 STIS 的可调谐光谱分布,在此基础上研究了 STIS 的光谱匹配技术。

2 实 验

仿真实验中使用的混合光源包括 Epitex 公司可见光和近红外波段的 50 种单色 LED 和欧司朗溴钨灯。分别采用 Epitex LED 和混合光源定量仿真匹配 CIE-D65 和等能光谱分布,其中光谱匹配算法为 SA 算法。

验证实验基于辉锐光电科技有限公司的 16 种单色 LED 进行,采用 PHOTO RESEARCH 公司的 PR-735 Spectrascan (380 ~ 1 080 nm) 测量 16 种 LED 的光谱曲线,选取 570 ~ 650 nm 波段内的 8 种 LED 匹配 CIE-D65 和等能光谱分布。在实验中,SA 算法作为光谱匹配算法,LED 采取恒流驱动方式,20 mA 的驱动电流由安捷伦直流电源和 LM317 三端稳压模块提供。LED 组合在直径为 0.5 m 的 Labsphere 积分球内实现混光,LED 稳定 10 min 后采用 PR-735 Spectrascan 监测开口处的光谱辐亮度,并调整 LED 组合直至与目标光谱分布匹配的最佳 LED 组合。所有测量均在室温条件下进行。

3 结果与讨论

3.1 恒流驱动 LED 的光谱分布和选择

因为可变电流驱动 LED 会降低光谱匹配算法的效率和精度,并且理论上 LED 在额定电流下工作寿命最长,所以我们采用恒流(一般选用额定电流)驱动 LED,通过调整点亮 LED 组合来调整输出光谱分布的方案。

单色 LED 展示了一个相对窄带光谱,其光谱分布可以用高斯分布函数来近似表达^[1]。文献[14-17]均采用理想的 λ_p 等间隔的 LED 进行仿真计算,仿真结果不能直接评价 STIS 在工程实践中的性能。采用商品化的 LED 进行仿真实验,选取 Epitex LED,根据 50 种单色 LED 的额定电流、 λ_p 、FWHM 值以及辐射功率(P_o)等参数^[9],带入光谱分布模型得到光谱功率分布曲

线。如图 1 所示,50 种 LED 的 λ_p 非等间隔地分布在 375 ~ 910 nm 内,不同 LED 光谱辐射功率峰值差距明显。例如,645 nm 附近 LED 种类稀少,而 550 ~ 600 nm 波段内 LED 的辐射功率低于其他 LED。

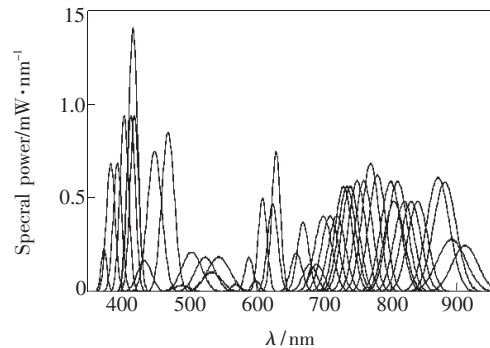


图 1 Epitex LED 光谱功率分布曲线

Fig. 1 Spectral power distribution of Epitex LED

为了定量地研究 STIS 的光谱匹配技术,设定积分球的内直径为 0.5 m,出光口直径为 0.1 m,380 ~ 900 nm 波段最大输出辐亮度不低于 50 W/(m² · sr),积分球输出辐亮度 L_{out} 和输入辐射功率 Φ_{in} 关系^[13]为:

$$L_{out} = \frac{\Phi_{in}}{\pi^* a} \cdot \frac{\rho f}{1 - \rho(1 - f)} = \frac{\Phi_{in}}{\pi^* A} \cdot \frac{\rho}{1 - \rho(1 - f)}, \quad (1)$$

其中 a 为开口面积; f 为积分球开口比, $f = 0.05$; A 为积分球内表面面积, $A = \pi d^2$; ρ 为内表面涂层的光谱反射率,随波长细微变化,可视为常数 $\rho = 0.95$ (根据实验室水平)。由此可得,当 $L_{out} = 50$ W/(m² · sr) 时, $\Phi_{in} = 12.649$ W。

3.2 基底光源的光谱分布和选择

积分球出口要达到理想的均匀性,开口比应小于 5%^[8]。不同 λ_p 的 Epitex LED 辐射功率(分布在 0.05 ~ 26 mW)最多相差 3 个数量级,使用低功率 LED 将会大大增加积分球的开口比,而低功率 LED 对仿真精度的影响要远低于同等数量的其他 LED,因此在光谱匹配精度允许的前提下可减少低功率 LED 的使用。此外,采用混合光源方案,加入基底光源,在基底光源光谱基础上调整 LED 组合匹配目标光谱将减少 LED 的使用。选择基底光源的原则是:稳定性好、在 380 ~ 900 nm 波段光谱分布曲线连续平滑均匀、尺寸小、对环境要求比较低、性价比高。

氙灯和溴钨灯是积分球常用的内部光源,图

2 为归一化的实测欧司朗溴钨灯、带滤光片的进口氙灯和普通国产氙灯光谱辐亮度曲线 (380 ~ 900 nm)。虽然进口氙灯 730 ~ 880 nm 波段能量太低, 国产氙灯光谱尖峰太多, 溴钨灯在短波波段能量相对偏低, 但是总体上看光谱曲线还是连续平滑均匀覆盖的。寿命方面, 欧司朗溴钨灯为 2 000 h, 普通国产氙灯为 300 ~ 500 h, 进口氙灯可达 3 000 h。价格方面, 进口氙灯要比溴钨灯高出几十倍甚至上百倍。综合考虑, 溴钨灯是比较理想的基底光源。

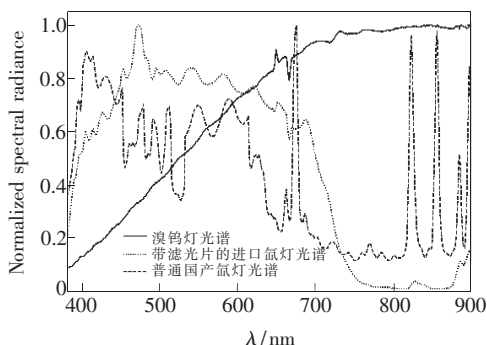


图 2 归一化的实测溴钨灯、进口氙灯和国产氙灯光谱辐亮度分布

Fig. 2 Normalized measured spectral distribution of bromine tungsten lamp, import xenon lamp and homemade xenon lamp.

3.3 光谱匹配算法

光谱匹配技术可看作优化组合问题, 即在众多 LED 组合中寻找目标光谱分布的最佳匹配组合。采用 SA 作为光谱匹配算法, 可直接得到匹配目标光谱的最优 LED 整数组合。具体操作如下:

(1) 设定初始温度: $T = 5\ 000\ \text{K}$, 选择初始的 LED 组合 $M_0 = (k_1, \dots, k_i, \dots, k_n)$, k_i 为非负整数, 采用平均相对误差来评价光谱匹配精度, 平均相对误差定义为:

$$\chi = \sqrt{\frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \left[\frac{S_{\text{目标}}(\lambda_j) - S_{\text{基底}}(\lambda_j) - \sum_{i=1}^{50} k_i S_i(\lambda_j)}{S_{\text{目标}}(\lambda_j)} \right]^2}, \quad (2)$$

其中 $S_{\text{目标}}(\lambda_j)$ 、 $S_{\text{基底}}(\lambda_j)$ 和 $S_i(\lambda_j)$ 分别为目标光谱、基底光源以及第 i 种 LED 在 λ_j 波长处的光谱辐射量 $j = 1 \sim J$ 是在光谱波段内 1 nm 等间隔所取的 J 个波长点。

(2) 在当前组合 M_0 邻域随机搜索新的整数

LED 组合 $M = (k_1 + dk_1, \dots, k_i + dk_i, \dots, k_n + dk_n)$, 计算新组合平均相对误差 $\chi(M)$ 和当前组合平均相对误差 $\chi_0(M_0)$ 的差值: $\Delta\chi = \chi(M) - \chi_0(M_0)$ 。根据 Metropolis 准则判断是否接收新组合, 若 $\Delta\chi < 0$ 则新组合被接受; 若 $\Delta\chi > 0$, 则新组合按概率 $P = \exp(-\Delta\chi/kT)$ 接收, k 为波尔兹曼常数, T 为温度。当新组合被接收时, 置 $M_0 = M$, $\chi(M_0) = \chi(M)$, 否则 M_0 和 $\chi(M_0)$ 保持不变。

(3) 每个温度 T 下进行 1 000 次邻域搜索, 即重复步骤 (2)。

降温函数为: $T = 0.99T$, 重复步骤 (2) 和 (3), 直到 $T < 0.1\ \text{K}$ 为止。此时 M_0 即为最优整数 LED 组合, 对应的平均相对误差为 $\chi(M_0)$ 。

3.4 仿真实验比较分析

利用 Epitex LED 和混合光源 (Epitex LED 和溴钨灯) 分别仿真模拟 CIE-D65 (380 ~ 830 nm) 和等能 (380 ~ 900 nm) 光谱的分布, SA 作为光谱匹配算法。

图 3(a)、(b)、(c)、(d) 分别给出了 Epitex LED 和混合光源 (溴钨灯和 Epitex LED) 定量地模拟 CIE-D65 (380 ~ 830 nm) 和等能 (380 ~ 900 nm) 光谱分布的效果, 对应波段内的辐亮度均不低于 $50\ \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$, 光谱匹配所需 LED 的数量、溴钨灯的辐射功率、平均相对误差、辐射功率如表 1 所示。混合光源中舍弃了 λ_p 为 490, 555, 565 nm 三种低功率 Epitex LED。

从细节上看, 仿真平均相对误差和 LED 的 FWHM、FWHM 与 λ_p 间隔的比值有关。图 3(a)、(b) 中 440 ~ 670 nm 波段仿真误差较大, 该波段内 LED 的 FWHM 一般为 LED λ_p 间隔的 1 ~ 1.5 倍, 特别是 645 nm 附近仿真误差最大, 其两侧 LED (630 nm 和 660 nm) 的 FWHM (15 nm 和 20 nm) 仅为 λ_p 间隔 (30 nm) 的 1/2 和 2/3。相比之下, 670 ~ 900 nm 波段的仿真效果比较好, 该波段内 LED 的 FWHM 一般为 LED λ_p 间隔的 2 ~ 3 倍。因此, 要提高 STIS 的仿真精度应选用 FWHM 为 λ_p 间隔 2 ~ 3 倍的 LED。当目标光谱分布平缓光滑时, 应选择 FWHM 比较大的 LED; 而当目标光谱本身就存在尖峰时, 应选择 FWHM 较小的 LED 来表现细节。

图 3(c)、(d) 中 520 ~ 670 nm 波段仿真精度优于 3(a)、(b), 被舍弃的 555 nm 和 565 nm LED 附近的仿真精度并未降低。这是由于 555 nm 和

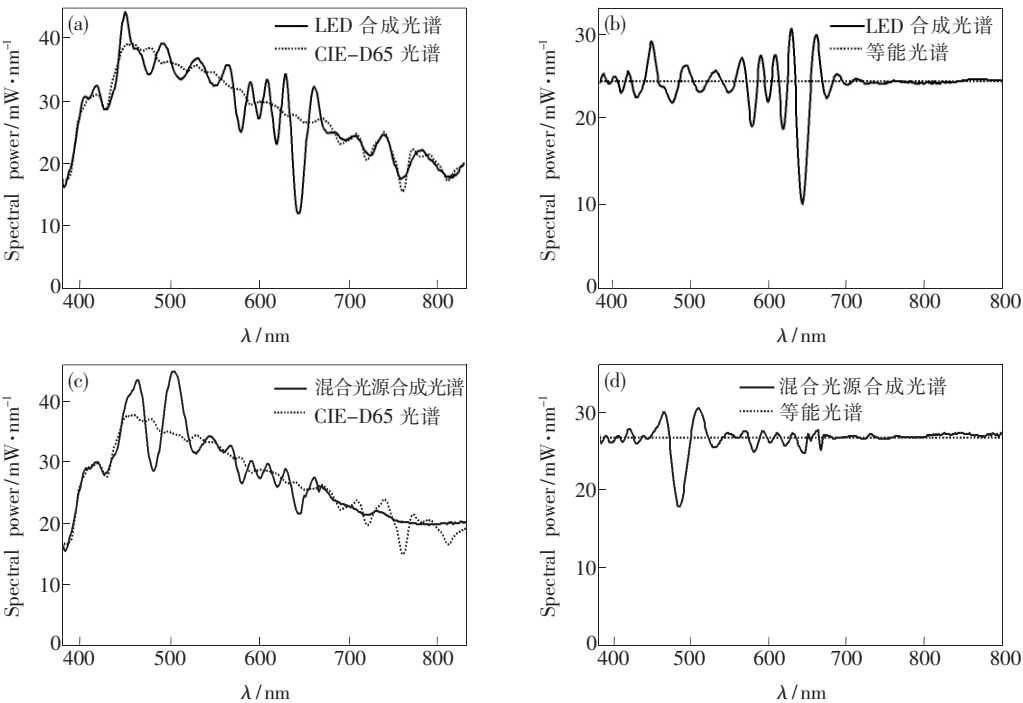


图 3 分别使用 Epitex LED (a ,b) 和混合光源 (c ,d) 匹配特定光谱 (a ,c) CIE-D65 (380 ~ 830 nm) 和 (b ,d) 等能光谱 (380 ~ 900 nm) 。

Fig.3 Realizations of two specific spectral distributions , (a ,c) CIE-D65 (380 ~ 830nm) ; (b ,d) equi-energy (380 ~ 900 nm) . Respectively achieved by Epitex LED (a ,b) and mixed-lamps (c ,d) .

表 1 分别使用 Epitex LED 和混合光源匹配 CIE-D65 和等能光谱的结果参数

Table 1 Spectral matching parameters for CIE-D65 and equi-energy achieved by Epitex LEDs and mixed-lamps respectively

	LED 数量	溴钨灯辐射功率/W	平均相对误差	辐射功率 P/W
Epitex LED 合成 CIE-D65	4 069		10.714%	12.487
Epitex LED 合成等能光谱	3 388		10.448%	12.514
混合光源合成 CIE-D65	821	6	9.643%	12.577
混合光源合成等能光谱	579	10	6.216%	13.842

565 nm 两侧 LED 的 HWHM 与 λ_p 间隔介于 1.5 ~ 2.7 之间 ,两侧的 LED 和溴钨灯共同作用改善了仿真精度。相比之下 ,490 nm LED 两侧的 LED 的 HWHM 与 λ_p 间隔比值小于 1 ,它们和溴钨灯不能弥补由舍弃 LED 所增加的仿真误差 ,因此 ,图 3 (c) 、(d) 中 460 ~ 520 nm 波段的仿真精度低于图 3 (a) 、(b) 。

从整体上看(如表 1) ,Epitex LED 定量模拟 CIE-D65 和等能光谱分布所需 LED 的数量分别为 4 069 和 3 388 只。考虑到匹配其他光谱分布的情况 ,该辐亮度等级的 STIS 的 LED 需求量将超过 5 000 只 ,积分球的开口比超过 20% ,将严重降低积分球输出光谱的均匀性和余弦特性。而基

于混合光源定量匹配 CIE-D65 光谱和等能光谱在辐射功率更优的前提下 ,LED 的数量分别减少 79.8% 和 82.9% ,平均相对误差分别减小 10% 和 40.5% ,不仅节约了成本 ,而且提高了光源的整体性能。为保证辐射亮度不低于 50 W/(m² · sr) ,在 0.5 m 积分球内安装 1 200 只 LED(参考表 1 的仿真结果) 和 4 只溴钨灯 ,简单计算积分球开口比约为 4.8% ,满足开口比小于 5% 的要求。仿真实验表明 ,混合光源方案不仅大大降低了 LED 的需求量 ,而且提高了光源的光谱匹配精度。

3.5 验证实验结果分析

表 2 为实验室现有的 16 种 LED 在恒定驱动电流(20 mA) 下的实测光谱的光谱参数。

表 2 16 种 LED 实测光谱的光谱参数

Table 2 The parameters of 16 LEDs' measured spectra

标称波长/ nm	λ_p / nm	FWHM/ nm	光谱辐亮度峰值 [$10^{-6} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$]
395	401.67	17.95	12 097.93
455	452.68	25.50	15 109.81
475	475.31	28.09	4 367.32
502	508.13	39.79	6 935.22
510	509.30	34.92	4 507.02
515	514.90	40.24	5 038.36
525	527.54	42.34	3 877.51
570	573.35	18.28	1 156.74
585	596.91	17.42	1 5476.15
592	595.94	16.90	2 148.41
600	613.73	20.97	6 258.50
610	624.68	23.01	1 382.26
615	635.84	20.41	50 631.98
625	638.63	20.12	20 329.37
640	646.40	20.16	3 197.68
810	807.20	33.48	34 440.25

从表 2 可知,16 种 LED 在 570 ~ 650 nm 波段内连续覆盖性比较好。采用此波段内的 8 种 LED 进行验证实验,8 种 LED 的 FWHM 一般为 LED λ_p 间隔的 1 ~ 2.5 倍,与该波段内 Epitex LED 的分布相当。验证实验用到的 LED 的组合如表 3,实测的光谱辐亮度分布曲线如图 4 所示。

表 3 匹配 CIE-D65 和等能光谱所需 LED 的数量

Table 3 Quantity of LEDs needed for CIE-D65 and equi-energy spectra

标称波长/ nm	匹配 CIE-D65 所需的 LED	匹配等能光谱 所需的 LED
570	159	154
585	12	20
592	32	24
600	23	17
610	55	60
615	1	1
625	0	3
640	37	40

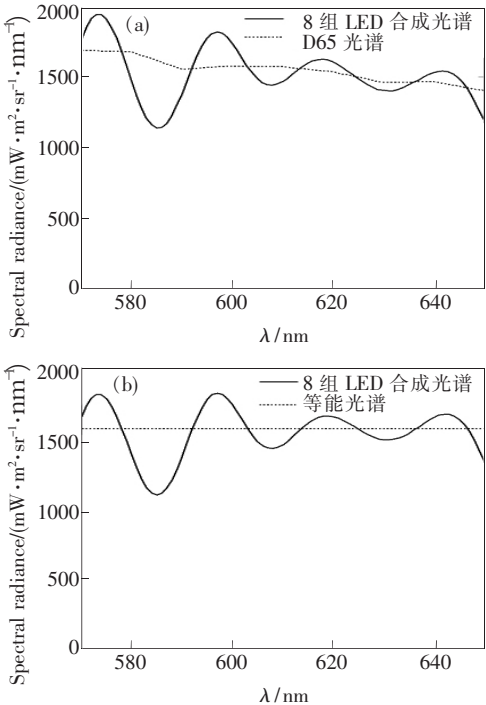


图 4 实测的 8 组 LED 匹配 (a) CIE-D65; (b) 等能光谱的效果。

Fig. 4 Measured (a) CIE-D65; (b) equi-energy achieved by 8 kinds of LED.

实测光谱和目标光谱之间的平均相对误差

$$\chi_{\text{实测}} = \sqrt{\frac{1}{650 - 570} \sum_{j=570}^{650} \left[\frac{S_{\text{目标}}(\lambda_j) - S_{\text{实测}}(\lambda_j)}{S_{\text{目标}}(\lambda_j)} \right]^2}$$
 为:
 $\chi_{\text{D65}}^{\text{实测}} = 10.96\%$ 和 $\chi_{\text{等能}}^{\text{实测}} = 11.25\%$,与 Epitex LED 的仿真结果 $\chi_{\text{D65}} = 10.71\%$ 和 $\chi_{\text{等能}} = 10.45\%$ 相当。验证实验结果表明,SA 算法和 LED 的恒流驱动方案可应用于 STIS 的工程实践。

4 结 论

从工程实践需求出发,提出恒流驱动 LED,通过调整 LED 的点亮组合来实现 STIS 的可调谐光谱分布。引入 SA 算法,采用 Epitex LED 仿真匹配 CIE-D65 和等能光谱分布,针对仿真中 LED 数量过多的缺点,提出减少低功率 LED 的使用并采用基底光源和 LEDs 混合光源的方案。通过对积分球常用光源的稳定性、光谱分布曲线、寿命、性价比等因素综合比较,选择溴钨灯作为基底光源。仿真实验结果表明:溴钨灯和 LEDs 完全能够定量地模拟 CIE-D65 和等能光谱分布,且在辐射功率优于 LEDs 模拟结果的时候,LED 的数量分别减少 79.8% 和 82.9%,平均相对误差分别减小

10% 和 40.5%。基于仿真结果,给出了 380~900 nm 波段最大输出辐亮度不低于 $50 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ 的直径为 0.5 m 的 STIS 的混光方案。基于实验

室现有 LED 的验证实验结果表明,光谱匹配精度和仿真实验结果相当,SA 算法和 LED 的恒流驱动方案可应用于 STIS 的工程实践。

参 考 文 献:

- [1] Zhu Jiyi, Ren Jianwei, Li Baoyong, *et al.* Synthesis of spectral distribution for LED-based source with tunable spectra [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2010, **31**(6): 882-887 (in Chinese).
- [2] Jin Weiqi, Hu Weijie. *Radiometry, Photometry, Colorimetry Theory and Measurement* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009: 163-166 (in Chinese).
- [3] Wall C F, Hanson A R, Taylor J A F. Construction of a prommable light source for use as a display calibration artifact [J]. *SPIE*, 2001, **4295**: 259-266.
- [4] Brown S W, Santana C, Eppeldauer G P. Development of a tunable LED-based colorimetric source [J]. *Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, 2002, **107**(4): 363-371.
- [5] Fryc I, Brown S W, Eppeldauer G P. LED-based spectrally tunable source for radiometric, photometric and colorimetric applications [J]. *Opt. Eng.*, 2005, **44**(11): 111309-111316.
- [6] 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.
- [7] Chen Feng, Zheng Xiaobing. Design of spectral tunable LED light source [J]. *Optics and Precision Engineering* (光学精密工程), 2008, **16**(11): 2060-2064 (in Chinese).
- [8] Labsphere Corp. A guide to integrating sphere theory and applications [EB/OL]. Available at Labsphere's web site, <http://www.labsphere.com/technical/technical-guides.aspx> [2011-4-27].
- [9] Epitex Corp. LED Plastic Mold [EB/OL]. Available at Epitex's web site, http://www.epitex.com/products/led_plastic_mold/led_plastic_mold.htm [2011-4-27].
- [10] Epitex Corp. High Power TOP LED [EB/OL]. Available at Epitex's web site, http://www.epitex.com/products/high_power_top_led/high_power_top_led.htm [2011-4-27].
- [11] Ren Jianwei, Mai Zhenqiang, Wan Zhi, *et al.* Feasibility of LED light source in spaceborne calibration [J]. *Optics and Precision Engineering* (光学精密工程), 2008, **16**(3): 398-405 (in Chinese).
- [12] Wang Dingwei, Wang Junwei, Wang Hongfeng, *et al.* *Intelligent Optimization Methods* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2007 (in Chinese).
- [13] Lucke R L. Lambertian radiance and transmission of an integrating sphere [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(28): 6966-6970.

Spectrum-tunable Distribution and Spectral Matching for Integrating Sphere Light Source Based on Bromine Tungsten Lamps and LEDs

LIU Hong-xing^{1,2}, REN Jian-wei¹, LI Bao-yong¹, LI Xian-sheng¹, WAN Zhi¹, ZHAO Wen-cai¹

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

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The mixed-lamps of bromine tungsten lamps and LEDs were proposed to serve as integrating sphere inner source and LEDs were driven by constant current. Simulated Annealing (SA) algorithm was introduced to study the spectral matching technique of spectrum-tunable integrating sphere light source (STIS). The simulation experiment indicated that mixed-lamps could not only mimic CIE-D65 and equi-energy spectra successfully, but also improve the performance of STIS. The numbers of LEDs reducing 79.8% and 82.9%, respec-

