

基于单色 LED 的太阳光谱合成方法

王宏民^{**}, 唐帆^{*}, 薛萍

哈尔滨理工大学自动化学院 LED 光电工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150080

摘要 为解决目前白光 LED 光谱非连续性问题, 设计出一种基于单色 LED 的太阳光谱合成方法。该方法通过构建单色 LED 光谱模型, 采用最小二乘算法以最大相关指数 R^2 为优化目标, 实现对太阳光谱的拟合。在理想峰值波长等间隔 LED 拟合的基础上, 对非等间隔的单色 LED 进行最佳拟合求解, 得到 27 种单色 LED 的最优组合, 其相关指数 R^2 达到 0.9576; 通过递减实验, 优化分析两组 17 种单色 LED 组合光谱的拟合结果, 其混合光谱仍满足 AM1.5 的 A 级标准要求, 实现了多种 LED 对太阳光谱的最佳拟合, 同时降低了工程应用的难度。

关键词 光谱学; 单色 LED; 照明; 相关指数; AM1.5

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.093004

A Solar Spectrum Synthesis Method Based on Monochrome LED

Wang Hongmin^{**}, Tang Fan^{*}, Xue Ping

LED Photoelectric Engineering Research Center, Automation College, Harbin University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China

Abstract In this study, we design a solar spectrum synthesis method based on monochrome LEDs to solve the problem of spectral discontinuity associated with white LED. The proposed method ensures the fitting of the solar spectrum by constructing a monochromatic LED spectral model by the least squares algorithm considering the maximum correlation index R^2 as the optimization target. Based on the ideal peak-wavelength equal-interval LED fitting, the simulation experiment is solved to obtain an optimal fitting solution for a non-equal-interval monochrome LED. Thus, we obtain an optimum number (27) of monochrome LED combinations, and the maximum correlation index R^2 is 0.9576. Furthermore, the spectral fitting result of two groups of 17 monochromatic LED combinations obtained by decreasing experiment is analyzed. The mixed spectrum meets the Class-A-level standard requirements of AM1.5. Thus, the best fit of various LEDs is achieved with respect to the solar spectrum, and the difficulty of engineering implementation is reduced.

Key words spectroscopy; monochromatic LED; illumination; relevance index; AM1.5

OCIS codes 300.6170; 230.3670; 150.2950

1 引言

太阳光作为人体长期适应的自然光, 是公认的最健康的照明光源, 具有光照连续性强、光谱失配度好、辐照均匀性好、准直性强等优点^[1]。荷兰教授 Aries 等^[2]通过对大量数据的研究, 证实了自然光与人体健康具有一定的相关性。因此, 随着 LED 技术的不断发展, 为了获得健康的照明光源, 类日光光源受到越来越多的关注^[3]。目前, 一些传统光源如

氙灯、卤钨灯等气体灯已被用来模拟太阳光照明^[4], 但考虑到光源光谱与太阳光谱的匹配效果、光谱的可调性, 以及光效和色温等, 传统光源无法实现与太阳光谱的良好匹配。

LED 作为第四代照明光源^[5-6], 与许多传统的白炽灯、荧光灯等照明光源相比, 其具有独特的优点: 光效高、使用寿命长、波长覆盖范围广^[7-8]、单色性能好、光色可调、节能、环保^[9-12]等。目前许多学者已经对 LED 拟合光谱的方法进行了大量研究, 徐

收稿日期: 2019-09-02; 修回日期: 2019-09-15; 录用日期: 2019-09-20

基金项目: 黑龙江省自然科学基金(F201310)、哈尔滨市科技创新人才项目(2016RAQXJ037)

* E-mail: tangfan1009@163.com; ** E-mail: 13904810908@163.com

广强等^[13]采用光子在二维空间内联合态密度函数作为单色 LED 的光谱辐射模型,求出拟合精度最高的 LED 的种类和数量,该方法所构建的拟合模型准确性较高,但是忽略了 LED 的重要参数——半峰全宽对光谱拟合的影响;倪俊雄等^[14]采用反演法,根据光谱特性对所需仿真的目标光谱进行分析,计算出不同波段所需的 LED 单元数,该方法的准确性较高,但所仿真的对象为峰值波长等间隔的半峰全宽非常窄的单色 LED,不适用于实际工程;孙健刚等^[15]设计出一种太阳模拟器光学系统,采用 4 种单色 LED 补偿大功率高显色指数白光 LED 实现光谱匹配,此方法虽然简单,但拟合精度较低,光学仿真模拟只达到国家 B 级标准。本文侧重于工程实现,基于光谱叠加原理,混合不同峰值波长的单色 LED,通过调节不同单色 LED 组成比例以及驱动电流实现对混合光谱的控制,从而实现对太阳光谱的拟合研究。

本文基于不同峰值波长的单色 LED,以国际电工委员会(IEC)规定的 AM1.5^[16] 标准太阳辐射光谱为目标光谱,以修正高斯函数为基础,建立单色 LED 的光谱辐射模型,通过求解非负最小二乘解进行光谱拟合,分析讨论不同种类的单色 LED 混合光谱与太阳光谱的拟合度,并通过递减实验进一步对拟合太阳光谱的 LED 种类进行优化分析。本文实现了使用较少的单色 LED 组合对太阳光的拟合,对实际工程应用具有一定的指导意义。

2 光谱拟合原理及方法

2.1 LED 光谱辐射模型

单色 LED 的光谱分布与普遍使用的光源不同,典型的单色 LED 辐射光谱是一个窄带单峰谱线,其半峰全宽一般为 20~50 nm。根据 LED 光源辐射特性,在光轴方向上单色 LED 单位立体角的辐射强度随波长的分布模型可结合修正高斯函数^[17]来近似描述,具体公式为

$$I(\lambda) = \alpha I_0 \times \exp\left[-3.2213 \left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda}\right)^2 \times \exp\left(-0.3 \left|\frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda}\right|\right)\right], \quad (1)$$

式中: $I(\lambda)$ 为单个 LED 在光轴方向上的辐射强度; λ 为入射波长; α 为驱动电流与辐射强度的转换系数; I_0 为单个 LED 的驱动电流; λ_0 为峰值波长; $\Delta\lambda$ 为半峰全宽。

为了验证 LED 光谱辐射模型与实际单色 LED

的拟合度,采用 Origin 2017 软件对实测主波长为 460 nm 的蓝光 LED 光谱分布进行拟合,拟合结果如图 1 所示。从拟合结果可以看出,此 LED 光谱辐射模型能够很好地表征出蓝光 LED 光谱曲线。

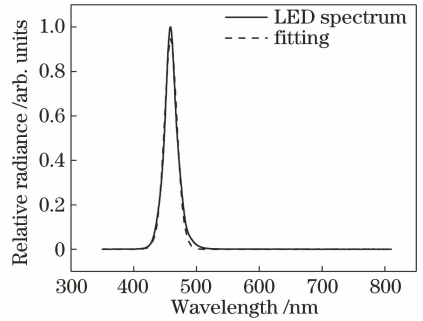


图 1 光谱辐射模型拟合的 460 nm LED 光谱
Fig. 1 460 nm LED spectra fitting by spectral radiation model

2.2 曲线拟合算法

曲线拟合问题是指:通过观察或者测量得到一组离散数据序列 $(x_i, y_i), i = 1, 2, 3, \dots, m$,当所得到的数据相对准确时,构造拟合函数 $\psi(x)$ 逼近客观存在的函数 y ,使得 $\psi(x)$ 和 y 的误差或距离最小^[18]。最小二乘算法是曲线拟合中最常用的回归算法之一,已广泛应用于实际工程和科学实验中。对于给定的数据组 (x_i, y_i) ,选取近似函数形式,即给定函数类 H ,求函数 $\psi(x) \in H$,使得

$$\sum_{i=1}^n [\psi(x_i) - y_i]^2 = \min_{\psi \in H} \sum_{i=1}^m [\psi(x_i) - y_i]^2. \quad (2)$$

这种求近似函数的方法称为数据拟合的最小二乘法,函数 $\psi(x)$ 称为这组数据的最小二乘函数或最小二乘解。

根据单色 LED 光谱特性,太阳光谱可见光部分可看作由多个单色 LED 叠加而成,LED 光谱合成的数学模型^[19]可表示为

$$L(\lambda) = \sum_{n=1}^i k_n I_n(\lambda), \quad (3)$$

式中: $L(\lambda)$ 为目标光谱曲线; $I_n(\lambda)$ 为单色 LED 在额定驱动电流下的光谱辐照函数; k_n 为拟合系数。通过求解最小二乘解获得拟合太阳光谱所需的单色 LED 峰值波长以及相应的驱动电流。

在仿真模拟中,采用相关指数 R^2 来评价不同的单色 LED 组合所拟合太阳光谱曲线的好坏程度^[20],其定义为

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y - y_a)^2}{\sum (y - y_i)^2}, \quad (4)$$

式中: y 为目标值; y_i 为期望值; y_a 为估计值。 $R^2 \leq 1$, 其值越接近 1, 拟合效果越好, 当达到极限情况, $R^2 = 1$, 说明实测点完全落在拟合曲线上。

3 实验验证

3.1 驱动电流对 LED 光谱的影响

LED 属于电流控制型半导体器件, 根据二极管所具有的伏安特性, LED 在正常工作时, 其发光强度与正向工作电流具有近似的正比关系。采用 OSRAM 公司生产的 3528 系列波长为 460 nm 的单色 LED 灯珠进行实验验证, 在保证测试环境温度 25°C , 工作电压为 5 V 的情况下, 将驱动电流从 20 mA 逐步调节至 50 mA, 所测得的光谱辐照强度变化如图 2 所示。实验测量结果表明, 随着电流的不断增大, 单色 LED 光谱的辐照强度逐渐增大, 且半峰全宽呈逐渐变宽的趋势。因此, 通过改变 LED 的驱动电流可以实现对单色 LED 光谱辐照强度的调整, 在此基础上, 结合多种不同单色 LED 的光谱特性来实现对太阳光谱的拟合。

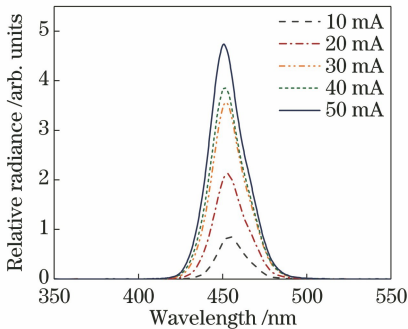


图 2 光谱辐照强度随驱动电流变化的实验结果
Fig. 2 Experimental results of spectral irradiance as a function of drive current

3.2 实际 LED 合成太阳光谱仿真

为了验证拟合算法的可行性, 选取 OSRAM 公司生产的 3528/2835 系列的 7 种单色 LED 灯珠以及深圳光台光电子公司提供的 4 种单色 LED 灯珠, 来合成 450~660 nm 可见光波段范围内的光谱, 11 种不同波长的单色 LED 光谱曲线如图 3 所示。

对所选取的 11 种单色 LED 进行光谱合成, 仿真结果如图 4 所示。可以看出, 在 380~800 nm 可见光波段, 通过改变不同单色 LED 的驱动电流以调整其光谱的辐照强度来合成的光谱曲线, 可以在很大程度上弥补了单一白光 LED 缺失的光谱波段, 增强了光谱连续性, 与太阳光谱曲线相似度较高。因此, 采用多种单色 LED 拟合太阳光谱照明具有可行性。

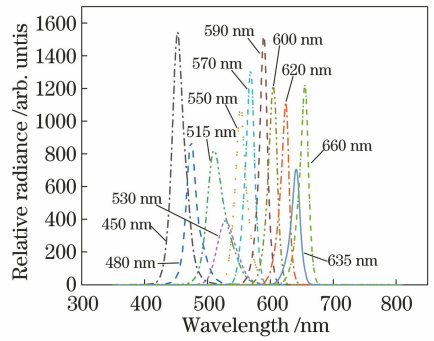


图 3 实验选取的 11 种单色 LED 光谱图
Fig. 3 Spectra of 11 monochrome LEDs chosen to be used in the experiment

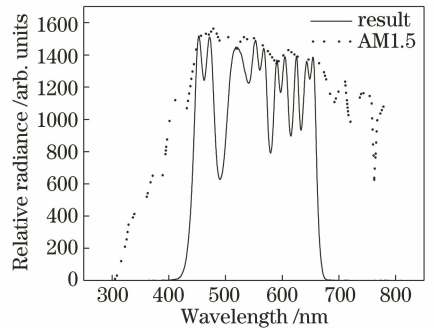


图 4 实验选取的 11 种单色 LED 光谱合成结果
Fig. 4 Experimental result for 11 monochrome LED spectrum synthesis

4 最佳拟合结果及分析

4.1 等间隔单色 LED 拟合仿真

用(1)式的数学模型来模拟单个 LED 的光谱, 通过 MATLAB 软件对 AM1.5 可见光波段进行光谱拟合, 结果如图 5 所示。令 $\Delta\lambda = 20\text{ nm}$, 在 380~800 nm 光谱范围内分别使用 27 种(峰值波长等间隔为 15 nm)、21 种(峰值波长等间隔为 20 nm)和 14 种(峰值波长等间隔为 30 nm)单色 LED 对 AM1.5 光谱曲线进行仿真拟合。对每一种 LED 辐射强度的优化, 可以根据目标光谱的拟合要求进行单色 LED 的种类和数量调整, 虽然通过调整单色 LED 的驱动电流可以改变其光谱曲线, 但由于频繁的调节电流会造成 LED 半峰全宽的变化以及温度的升高, 因此在实际工程中应该尽可能避免频繁的电流调节, 在必要时可以微调电流来调整拟合光谱。

由拟合结果可知, 等间隔为 15, 20, 30 nm 的单色 LED 混合光谱相对于目标光谱的相关指数 R^2 分别为 0.9797, 0.9694, 0.7855。从图 5 可以明显看出, 所选用的单色 LED 种类越多, 峰值波长间隔越小, 获得的拟合结果越好, 与目标光谱曲线的

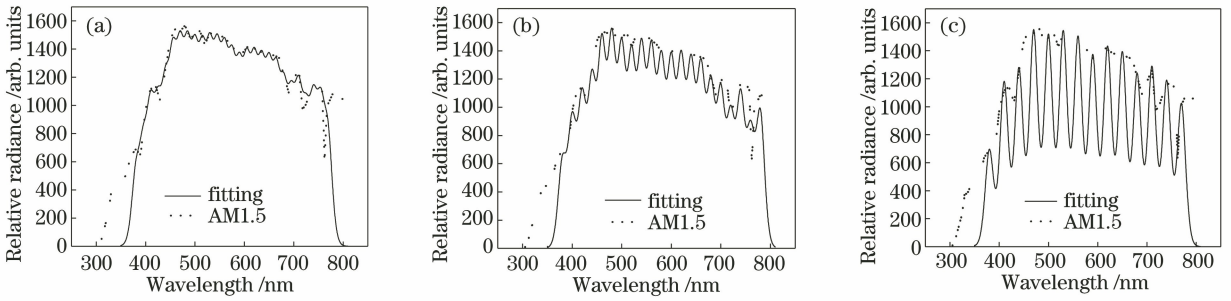


图 5 使用不同等间隔 LED 合成 AM1.5 光谱。(a) 15 nm;(b) 20 nm;(c) 30 nm

Fig. 5 Realizations of AM1.5 spectral distributions by different equal intervals. (a) 15 nm; (b) 20 nm; (c) 30 nm

相似度越高,图 5(a)所示的拟合效果最好,但所需的 LED 种类繁多。

4.2 非等间隔单色 LED 拟合仿真

由于实际的 LED 产品的峰值波长并不是等间隔的,因此从工程实现角度考虑,通过 MATLAB

软件求解得到最优的 LED 的峰值波长和半峰全宽,对 AM1.5 光谱曲线 380~800 nm 波段进行非等间隔单色 LED 的仿真拟合,最优组合采用 27 种单色 LED,数据如表 1 所示,光谱拟合结果如图 6 所示。

表 1 最优组合的 27 种单色 LED 的中心波长和半峰全宽(FWHM)

Table 1 Central wavelength and full width at half maximum (FWHM) of optimal group with 27 monochromatic LEDs

Central wavelength /nm	FWHM /nm	Central wavelength /nm	FWHM /nm
380	18	590	15
400	20	600	18
420	15	610	15
435	20	625	16
450	21	635	18
460	22	650	20
480	20	660	18
495	30	680	25
505	30	700	21
525	33	720	20
540	36	740	21
550	23	750	28
570	15	780	30
580	15		

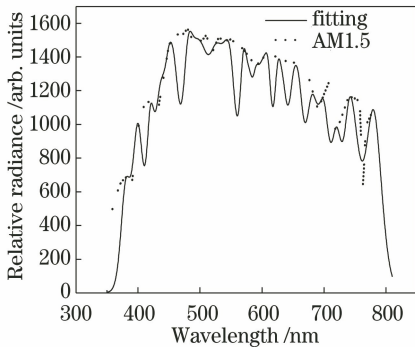


图 6 最佳组合的 27 种单色 LED 光谱合成结果

Fig. 6 Spectral synthesis result of the optimal group with 27 monochromatic LEDs

从图 6 可以看出,混合光谱与目标光谱的整体拟合效果较好,能够体现目标光谱总体变化趋势,混

合光谱与目标光谱的相关指数为 0.9576。从混合光谱曲线可以看出,450~600 nm 波段的拟合效果较好,380~450 nm 波段的混合光谱曲线能够很好地贴近目标光谱。从最佳组合中单色 LED 数据可以看出,在 450~550 nm 波段选用了半峰全宽值较大的单色 LED,使得该波段的拟合效果更好,说明在光谱变化相对平缓的波段更适合使用半峰全宽值较大的单色 LED 组合;而在 380~450 nm 这类光谱曲线变化明显的波段使用半峰全宽值较小的单色 LED 组合,能更好地呈现目标光谱的细节变化。相对而言,在 620~780 nm 波段范围内,目标光谱曲线的前半段变化平缓,后半段出现骤降和骤升,导致 620~780 nm 波段拟合仿真难度增大,为了权衡整体与局部的关系,在 620~780 nm 波

段牺牲了部分细节,保证了整体拟合效果达到最佳。

4.3 仿真拟合评价

IEC 60904-9 标准^[21]中规定光谱匹配度在 0.75~1.25 范围内为 A 级。由于本文主要研究 378~800 nm 可见光波段的光谱拟合,故对此范围

内混合光谱与目标光谱的匹配情况进行讨论。27 种单色 LED 混合光谱与 AM1.5 光谱的匹配度如表 2 所示,在 378~800 nm 可见光范围内混合光谱全部达到 A 级,符合太阳光谱的模拟标准,说明利用较少波段的多种单色 LED 来合成太阳光谱可以达到设计标准,使实际工程应用成为可能。

表 2 混合光谱匹配情况

Table 2 Matching distribution of mixed spectra

Wavelength range /nm	Standard percentage of AM1.5 /%	Percentage of mixed spectrum /%	Matching degree
400-500	18.5	17.4	0.9405
500-600	20.1	19.3	0.9468
600-700	18.3	16.9	0.9235
700-800	14.8	13.3	0.8986

5 优化拟合仿真分析

最佳的单色 LED 组合虽然能够较好地拟合 AM1.5 光谱曲线,但所使用的单色 LED 种类较多,在工程实践中具有一定的难度。因此,为了验证最佳组合的可靠性和方案的可优化性,获取更切合实际的数据,根据最佳组合中不同单色 LED 对光谱拟合的整体贡献度,逐一减少贡献较小的单色 LED 并调整其他种类单色 LED 的中心波长以及半峰全宽值。采用递减实验形式,每次减少 1 种 LED,获得相应数据,不同 LED 组合混合光谱对于目标光谱相关指数与使用的 LED 种类数之间的变化关系如图 7 所示。

由图 7 可知,不同组合选用 LED 数量与相关指数 R^2 之间近似服从 Logistic 函数分布,随着选用 LED 种类数的减少,拟合度逐渐降低。结合递减实验数据,在最佳组合 27 种单色 LED 的基础上,优化

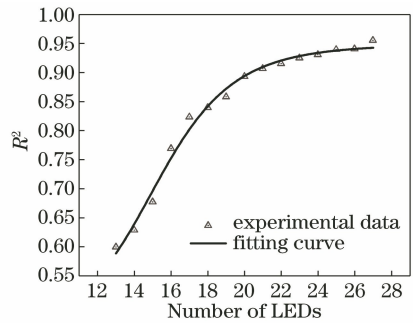


图 7 递减实验中不同 LED 组合的混合光谱与目标光谱的相关指数 R^2 随使用的 LED 数量的变化关系

Fig. 7 Relationship between the used-LED number of different LED combinations and evaluation parameter R^2

分析求得两组 17 种单色 LED 的组合,并利用这两组 LED 组合对目标光谱进行拟合,两组数据如表 3 所示,两组光谱拟合结果如图 8 所示。

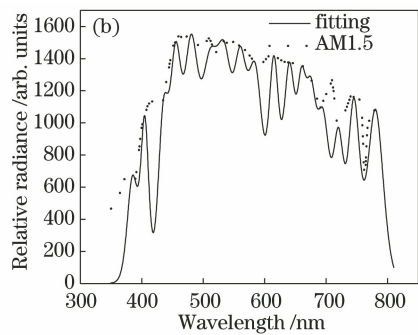
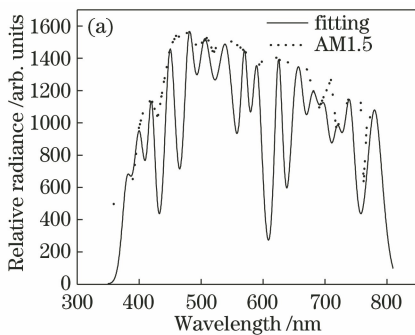


图 8 两组优化的 17 种单色 LED 光谱合成结果。(a) Group I ; (b) group II

Fig. 8 Spectral synthesis results of two optimized groups including 17 monochrome LEDs . (a) Group I ; (b) group II

分析两组数据拟合结果可得,group I 的混合光谱与目标光谱的相关指数 R^2 为 0.8234,group II 的混合光谱与目标光谱的相关指数 R^2 达到 0.9272,均满足 AM1.5 的 A 级标准。且从图 8 可以看出,group I 的混合光谱 450~500 nm 波段以及 590~

650 nm 波段有明显的上升和下降趋势,而 group II 在这两个波段处选用半峰全宽值较大的单色 LED,使得 group II 的混合光谱没有出现急促的上升或者下降,混合光谱连续性更好。此外,同一波段两组数据的中心波长虽然不相同,但在对 AM1.5 目标光谱

表3 两组优化的17种单色LED的中心波长和半峰全宽

Table 3 Central wavelength and full width at half maximum in two optimized groups including 17 monochrome LEDs

Group I		Group II	
Central wavelength /nm	FWHM /nm	Central wavelength /nm	FWHM /nm
380	18	385	20
400	20	405	15
420	15	435	20
450	21	455	22
480	20	480	28
505	30	510	33
540	36	535	30
570	15	560	25
590	15	585	30
625	16	615	20
650	20	640	23
660	18	660	18
680	25	675	20
700	21	695	25
720	20	720	20
740	21	745	22
780	30	780	30

的拟合过程中并没有产生较大的影响。比较两组数据的光谱合成结果,发现在单色LED的中心波长相差不大,且各单色LED中心波长间隔相对均衡的情况下,半峰全宽值较大的单色LED拟合光谱连续性更高。因此,使用17种单色LED进行光谱合成时,可以抛开特定中心波长的局限,选用半峰全宽值合适的临近中心波长的单色LED进行光谱拟合。

6 结 论

从工程实现目标出发,设计出一种基于单色LED的太阳光谱合成方法,对太阳光谱进行仿真拟合。在3组峰值波长等间隔的单色LED对AM1.5太阳光谱的仿真基础上,从实际单色LED现状出发,对峰值波长非等间隔的单色LED进行最佳拟合求解,得到最佳组合包含27种不同峰值波长的单色LED,拟合相关指数 R^2 为0.9576,混合光谱的匹配度达到AM1.5的A级标准。通过递减实验,发现不同组合中选用LED数量与相关指数 R^2 之间近似服从Logistic函数分布,根据27种LED最佳组合优化分析得出的17种单色LED组合的混合光谱亦可实现对太阳光谱的拟合。同一波段范围单色LED的中心波长对拟合结果不会产生较大影响,此外单色LED的半峰全宽是光谱拟合的重要影响因素,在光谱曲线变化明显的波段使用半峰全宽值较小的单色LED组合能更好地呈现出目标光谱的细

节变化,而在光谱变化相对平缓的波段更适合使用半峰全宽值较大的单色LED组合。本研究验证了使用不同种类的单色LED来合成太阳光谱是可行的,对实际工程实现具有一定的指导意义。

参 考 文 献

- [1] Zhang Y B, Dong L, Zhang G Y. Simulation of high power monochromatic LED solar spectrum based on effective set algorithm [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2018, 39(6): 862-869.
张玉宝,董礼,张国英.基于有效集算法的大功率单色LED太阳光谱模拟仿真[J].发光学报,2018,39(6):862-869.
- [2] Aries M, Aarts M, van Hoof J. Daylight and health: a review of the evidence and consequences for the built environment [J]. Lighting Research & Technology, 2015, 47(1): 6-27.
- [3] Lei J, Xin G, Liu M Q. Spectral assemblage using light emitting diodes to obtain specified lighting characteristics[J]. Applied Optics, 2014, 53(35): 8151-8156.
- [4] Su S, Zhang G Y, Wang L Y, et al. Solar simulators based on light emitting diodes [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(7): 070003.
苏拾,张国玉,王凌云,等.基于发光二极管的太阳模拟器的研究现状[J].激光与光电子学进展,2018,55(7):070003.

- [5] Zhu M, Lou J, Pan Y J, et al. Design of freeform surface with uniform illumination based on new LED collimation system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(4): 0422002.
朱民, 楼俊, 潘玉珏, 等. 基于新型LED准直系统的自由曲面均匀照明设计[J]. *光学学报*, 2018, 38(4): 0422002.
- [6] Song P C, Wen S S, Chen Y C. Research on color mixing based on RGBW-LEDs [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(9): 0923004.
宋鹏程, 文尚胜, 陈颖聪. 基于RGBW四色LED的混光研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(9): 0923004.
- [7] Wafer J. LEDs-continue to advance [J]. *Photon Spectra*, 2005, 3(1): 60-62.
- [8] Hu Y L, Yuan Y L, Wu H Y, et al. Spectral matching algorithm of spectrum-tunable integrating sphere light source[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(3): 472-477, 483.
胡友丽, 袁银麟, 吴浩宇, 等. 光谱可调积分球光源的光谱匹配算法研究[J]. *应用光学*, 2014, 35(3): 472-477, 483.
- [9] Nakamura S, Fasol G. The blue laser diode: GaN based light emitters and lasers [M]. Heidelberg: Springer, 1997.
- [10] Mohan M V A, Pavithran J, Osten K L, et al. Simulation of spectral match and spatial non-uniformity for LED solar simulator[C]//2014 IEEE Global Humanitarian Technology Conference - South Asia Satellite (GHTC-SAS), September 26-27, 2014. Trivandrum, India. New York: IEEE, 2014: 111-117.
- [11] Tian H J, Hao T T, Guan T, et al. Discomfort glare caused by R/G/B/W four-color light emitting diode sources [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(13): 132301.
田会娟, 郝甜甜, 关涛, 等. R/G/B/W 4色LED光源不舒适眩光研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(13): 132301.
- [12] Hua H, Mao X L, Tan J H, et al. Dynamic illumination design method based on LED array[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(10): 102202.
花卉, 毛祥龙, 谭家海, 等. 基于LED阵列的动态照明设计方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(10): 102202.
- [13] Xu G Q, Yu H Y, Zhang J H, et al. Solar spectrum matching based on white LED compensated with monochromatic LEDs [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2017, 38(8): 1117-1124.
徐广强, 于慧媛, 张竞辉, 等. 基于单色LED补偿白光LED技术的模拟太阳光谱研究[J]. *发光学报*, 2017, 38(8): 1117-1124.
- [14] Ni J X, Bai T Z, Xu Y Y. The research on multi-spectral fitting of LED spectrum tunable light source [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(6): 1606-1610.
倪俊雄, 白廷柱, 徐英莹. LED可变光谱光源的多光谱拟合反演研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(6): 1606-1610.
- [15] Sun J G, Li G H, Zhu K S, et al. Design and simulation of the optical system of LED solar simulator [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(10): 102204.
孙健刚, 李果华, 朱孔硕, 等. LED太阳模拟器光学系统设计与仿真[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(10): 102204.
- [16] State administration of standardization administration. SJ/T 10174-91. AM1.5 steady-state solar simulator [S]. Beijing: Standards Press of China, 1991.
国家标准化管理委员会. SJ/T 10174-91. AM1.5 稳态太阳模拟器[S]. 北京: 中国标准出版社, 1991.
- [17] Shen H P, Feng H J, Pan J G, et al. LED spectral mathematical models and their applications[C]. 26th Annual Meeting of Chinese Illuminating Society, Beijing, 2005: 83-85.
- [18] Quan K B, Jia N, Du P S. Curve fitting based on least square method[J]. *Business*, 2015(3): 296.
权开波, 贾宁, 杜培寿. 基于最小二乘法的曲线拟合[J]. *商*, 2015(3): 296.
- [19] Zhang Y W, Xu L, Wan S. Synthesizing algorithm for LED standard solar spectrum lamp [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(5): 596-600.
张译文, 徐林, 万松. 基于LED的标准太阳光谱灯拟合算法[J]. *光子学报*, 2013, 42(5): 596-600.
- [20] Xu Q, Xue X, Xu R. On the correlation exponent R^2 in curve fitting [J]. *Chinese Journal of Health Statistics*, 1992, 6(9): 44-45.
徐秦, 薛茜, 徐睿. 浅论曲线拟合中的相关指数 R^2 [J]. *中国卫生统计*, 1992, 6(9): 44-45.
- [21] Photovoltaic devices-Part 9: Solar simulator performance requirements: IEC 60904-9-2007 [S]. Geneva: IEC, 2007.