

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201606014



采用遗传算法的 LED 太阳光谱仿真

郭震宁, 廖炫, 甘汝婷, 林木川, 颜稳萍,
潘诗发, 胡义阳, 俞星冕

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 基于简单遗传算法,通过求解超定方程组的非负最小二乘解,优化单色发光二极管(LED)匹配光源组合,实现用白光 LED 取代部分单色 LED 模拟太阳光谱,并讨论白光 LED 可以取代几种不同峰值波长的 LED. 仿真结果表明:在 300~1 100 nm 范围内,随着白光 LED 取代单色 LED 种类的增加,所用 LED 总数减少,光谱匹配度均下降;当取代 3 种不同峰值波长 LED 时,该算法拟合的相关指数为 0.903 5,可减少 15.6% 的 LED 个数,模拟光谱与目标光谱基本吻合. 该方法的光谱失配度小,可精确分辨标准太阳光谱 AM1.5 的两个吸收谷.

关键词: 发光二极管; AM1.5; 遗传算法; 光谱拟合; 最小二乘解

中图分类号: O 432; TP 391.75 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2016)06-0731-06

Spectrum Simulation of LED Solar Light Based on Genetic Algorithm

GUO Zhenning, LIAO Xuan, GAN Ruting, LIN Muchuan,
YAN Wenping, PAN Shifa, HU Yiyang, YU Xingmian

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to simulate the solar spectrum by using the white LED replacing some kinds of the monochrome LEDs, this paper, based on the simple genetic algorithm, solves the overdetermined system of equations of least square solution and optimizes the combination of monochromatic light emitting diode (LED) matching light source. The article also discusses several kinds of monochromatic LED can be replaced by white LED. The simulation results show that: in the range of 300-1 100nm, with the increase of white LED instead of monochrome LEDs, both the number of LEDs and spectral matching degree are decreased. When replacing the 3 different peak wavelength of LED, the fitting correlation index is 0.9035 and the number of LEDs can reduce 15.6%. The simulation spectra is in basically tallies with the target spectra. With the small spectral fit, this method can accurately distinguish the two absorption valleys of standard solar spectrum AM1.5.

Keywords: light emitting diode; AM1.5; genetic algorithms; spectral fitting; least-squares solution

太阳模拟技术被广泛应用于高分子固化测试、太阳电池的检测与标定、卫星热平衡试验等领域^[1]. 传统太阳模拟器的光源采用溴钨灯和氙灯,但其具有寿命短、耗能、光谱匹配度较差、光谱不可调等缺

收稿日期: 2015-01-20

通信作者: 郭震宁(1958-),男,教授,博士,主要从事半导体发光器件及光学设计的研究. E-mail: znguo@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省科技计划重点项目(2013I0004);光传输与变换福建省重点实验室开放基金资助项目(2014201)

点^[2]. 与传统光源相比,发光二极管(LED)拥有寿命长、可精确控制、节能环保、种类多样等^[3]优点. 近年来,学者对基于 LED 的太阳模拟器进行了相关研究^[4-7]. 范铎等^[8]将不同单色的 LED 排成阵列,通过改变电流改变 LED 的辐射通量,最终改变各种单色光的比例,模拟太阳光谱. 但该方法操作繁琐、耗时较大. 甘汝婷等^[9]提出一种基于遗传算法利用多种不同峰值波长 LED 合成 AM1.5 的光谱分布,该方法较好地分辨吸收谷. 虽然该算法简单高效,但会消耗大量不同峰值波长的 LED. 基于此,本文利用光谱叠加原理,用白光 LED 取代部分单色 LED,通过简单遗传算法(simple genetic algorithm,SGA)^[10]和求解构造的超定方程得到 LED 组合比例,进而合成所需光谱.

1 光谱构造

1.1 LED 光谱辐射模型

目标曲线 AM1.5 是连续的,可用多种不同峰值波长 LED 的光谱叠加获得. 为了得到良好的光谱匹配度和最佳的 LED 组合,合适的 LED 光谱分布函数十分重要. 单色 LED 在其光轴方向上单位立体角内的辐射强度随波长的分布,可用高斯分布函数或洛伦兹分布函数来近似. 采用高斯分布模型^[11],即

$$I(\lambda) = A \exp[-3.2213(\frac{\lambda - \lambda_c}{\Delta\lambda})^2 \exp(-0.3|\frac{\lambda - \lambda_c}{\Delta\lambda}|)]. \tag{1}$$

式(1)中: $I(\lambda)$ 是单个 LED 的辐射强度; λ_c 是峰值波长; A 是相对振幅; $\Delta\lambda$ 是半高宽.

1.2 光谱匹配

日常接触到的光谱曲线都是连续的,但只要横坐标取足够小,仍然可以通过离散光谱数据对其进行拟合. 可将目标光谱写为^[9]

$$f(\lambda_j) = \sum_{1 \leq j \leq m} \hat{S}(\lambda_j). \tag{2}$$

式(2)中: λ_j 表示不同峰值波长. 由式(2)可作出目标光谱曲线.

记向量 $\mathbf{S}^i = (S_1(\lambda_1), S_1(\lambda_2), \dots, S_1(\lambda_m))^T$, 则 LED 的光谱矩阵可写为 $\mathbf{A} = (\mathbf{S}^1, \mathbf{S}^2, \dots, \mathbf{S}^m)$. 记系数矩阵 $\mathbf{X} = (k_1, k_2, \dots, k_n)^T$, 目标光谱矩阵 $\mathbf{Y} = (\hat{S}(\lambda_1), \hat{S}(\lambda_2), \dots, \hat{S}(\lambda_m))^T$. 当 $m > n$ 时,得超定方程组

$$\mathbf{A}\mathbf{X} = \mathbf{Y}. \tag{3}$$

通过矩阵可以表示为

$$\begin{bmatrix} S_1(\lambda_1) & S_2(\lambda_1) & \cdots & S_n(\lambda_1) \\ S_1(\lambda_2) & S_2(\lambda_2) & \cdots & S_n(\lambda_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_1(\lambda_m) & S_2(\lambda_m) & \cdots & S_n(\lambda_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{S}(\lambda_1) \\ \hat{S}(\lambda_2) \\ \vdots \\ \hat{S}(\lambda_m) \end{bmatrix}. \tag{4}$$

由于超定方程组通常情况没有精确解析解,但是可以通过数学方法求得其近似解. 在超定方程组中,其最小二乘解通常是一种广义解,指的是使残差 $\mathbf{Y} - \mathbf{A}\mathbf{X}$ 的 2-范数能达到极小值时的解,此时,可以使总体误差保持在较小水平. 即

$$\|\mathbf{Y} - \mathbf{A}\mathbf{X}^*\|_2 = \min_{\mathbf{X} \in \mathbb{R}^n} \|\mathbf{Y} - \mathbf{A}\mathbf{X}\|_2. \tag{5}$$

结合实际情况,比例系数 k_i 只能是大于或者等于 0,所以只需求超定线性方程组的非负最小二乘解 \mathbf{X}^* ^[12]. 此时,实际合成的光谱分布为

$$\hat{\mathbf{S}} = \mathbf{A}\mathbf{X}^*. \tag{6}$$

非线性回归分析中,通过相关指数表征拟合曲线与原始数据的相似程度,越接近 1 表明拟合效果越好,相应的解就越精确. 这里用它来评价光谱匹配度,其定义为^[13]

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{S}(\lambda_i) - S(\lambda_i))^2}{\sum_{i=1}^n (S(\lambda_i) - \bar{S}(\lambda))^2}. \tag{7}$$

式(7)中: $\bar{S}(\lambda)$ 是目标数据组的数学期望.

1.3 光谱匹配算法

遗传算法是一种借鉴生物界自然选择和遗传机制的高度并行、随机、自适应的全局优化概率搜索算法^[14]. 其标准算法流程,如图 1 所示.

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.采用遗传算法作为光谱匹配算法,可以得到匹配目标光谱的最优 LED 的组合比例.按照 SGA 算法的一般原则,结合上述问题,给出用 SGA 算法求解的步骤^[14]:1) 初始群体的产生,利用随机方法产生十进制编码规模为 200 的初始群体;2) 通过以最小二乘误差平方和为目标,在此基础上建立评价群体优劣的适应度函数;3) 在适应度的基础上,反复对群体进行遗传运算,得到满意或最优解,即为所需要的 LED 比例系数.

2 模拟仿真及评价

2.1 光谱匹配算法

通过 Matlab 软件对波长为 300~1 100 nm 的 LED 进行光谱拟合.以式(1)拟合函数,基于光谱构造原理,将波长为 300~1 100 nm 的 AM1.5 标准太阳光谱作为目标光谱.采用市面上 35 种某品牌的单色 LED,根据厂家给出光谱的峰值波长(λ_c)和半高宽($\Delta\lambda$)数据,利用式(1)拟合每种 LED 光谱,把得到的 LED 光谱作为式(5)中的 **A**,目标光谱为式(5)中的 **Y**,根据简单遗传算法求得每种 LED 的最佳组合比例(**R**),如表 1 所示.

表 1 峰值波长间隔不等的 LEDs 及相应的比例系数

Tab. 1 Different peak wavelength interval ranging LEDs and its optical combination ratio

λ_c/nm	$\Delta\lambda/\text{nm}$	<i>R</i>	λ_c/nm	$\Delta\lambda/\text{nm}$	<i>R</i>	λ_c/nm	$\Delta\lambda/\text{nm}$	<i>R</i>
365	15	0.566 839	570	15	1.296 106	780	26	0.891 174
375	18	0.526 261	590	20	1.308 695	805	30	0.840 230
395	20	0.814 542	600	20	1.215 108	820	25	0.635 065
415	15	0.814 331	620	18	1.265 933	830	35	0.572 429
430	20	1.116 216	635	15	1.078 869	850	40	0.133 498
450	20	1.254 356	645	18	1.153 498	870	40	0.251 113
470	20	1.056 011	660	16	0.829 126	885	75	0.236 465
490	30	1.130 823	680	25	1.311 307	900	40	0.501 621
505	20	0.466 939	700	20	0.860 748	950	70	0.149 302
520	21	1.205 688	720	20	0.817 009	1 000	70	0.510 442
545	23	0.717 348	735	20	0.454 531	1 050	50	0.176 435
565	25	1.200 738	770	30	0.856 959			

光谱的匹配结果,如图 2 所示.图 2 中: λ 为波长; S_r 为相对的光谱.由图 2 可知:在一定范围内,拟合光谱和目标光谱在 750 和 950 nm 两个吸收谷处具有同样良好的分辨能力.

采用某公司的白光 LED,用远方 PMS0910 测得其光谱数据,导入 Matlab 可得该白光 LED 的光谱图,如图 3 所示.用它分别取代 1~4 种单色 LED,选取被替换的单色 LED 的原则是:光谱叠加的过程

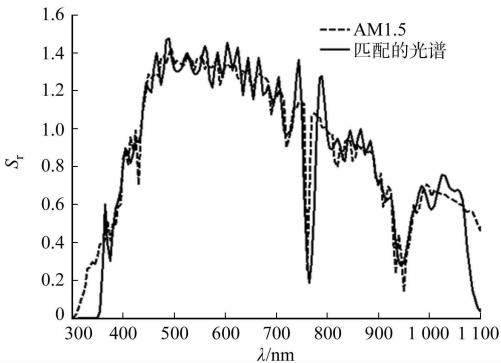


图 2 35 种单色 LED 的 AM1.5 光谱匹配图

Fig. 2 AM1.5 spectrum matching diagram of 35 kinds of LEDs

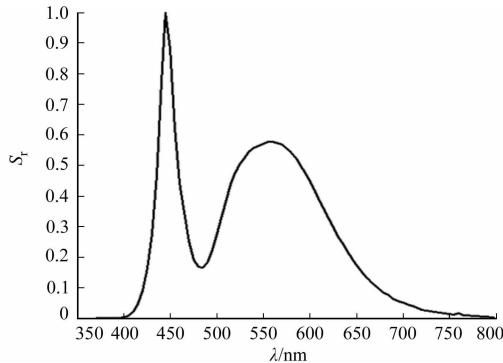


图 3 白光 LED 光谱图

Fig. 3 Spectrum diagram of white LED

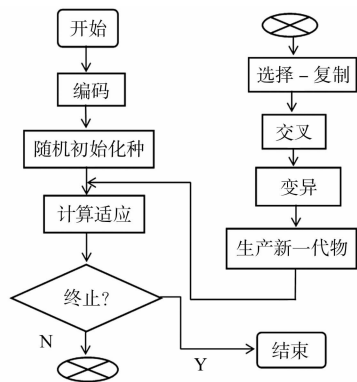


图 1 遗传算法基本流程

Fig. 1 Basic genetic algorithm flow chart

中,被取代单色 LED 的峰值波长应位于白光峰值波长和主波长附近(图 3 中相对光谱较高的部分),这样白光其他相对光谱较低部分对光谱拟合影响会相对小些,采用遗传算法模拟出来的太阳光谱匹配度较高,通过模拟即可验证.

4 种情况模拟所用 LED 的具体参数,分别如表 2~5 所示. 表 2~5 中列出了经遗传算法优化后得到的各种 LED 的比例系数. 光谱的匹配结果,如图 4 所示.

表 2 白光 LED 代替 1 种单色 LED 数据及相应比例系数($\lambda_c=450\text{ nm}$)

Tab. 2 Optimal combination ratio of white LED replace one kind of LEDs ($\lambda_c=450\text{nm}$)

λ_c/nm	$\Delta\lambda/\text{nm}$	R	λ_c/nm	$\Delta\lambda/\text{nm}$	R	λ_c/nm	$\Delta\lambda/\text{nm}$	R
365	15	0.553 815	590	20	0.968 612	805	30	0.792 700
375	18	0.451 919	600	20	1.061 298	820	25	0.725 507
395	20	0.851 327	620	18	1.157 492	830	35	0.519 330
415	15	0.838 161	635	15	1.060 025	850	40	0.106 695
430	20	1.064 546	645	18	1.097 891	870	40	0.239 252
470	20	0.930 996	660	16	0.811 816	885	75	0.099 859
490	30	0.878 567	680	25	1.281 785	900	40	0.657 502
505	20	0.399 988	700	20	0.850 241	950	70	0.114 922
520	21	0.515 408	720	20	0.850 342	1 000	70	0.324 547
545	23	0.469 470	735	20	0.408 565	1 050	50	0.480 139
570	15	1.108 794	780	26	0.853 228	W-LED	—	0.994 542
565	25	0.979 901	770	30	0.995 828			

表 3 白光 LED 代替 2 种单色 LED 数据及相应比例系数($\lambda_c=450,570\text{ nm}$)

Tab. 3 Optimal combination ratio of white LED replace two kinds of LEDs ($\lambda_c=450,570\text{ nm}$)

λ_c/nm	$\Delta\lambda/\text{nm}$	R	λ_c/nm	$\Delta\lambda/\text{nm}$	R	λ_c/nm	$\Delta\lambda/\text{nm}$	R
365	15	0.658 336	600	20	1.053 642	820	25	0.799 636
375	18	0.531 032	620	18	1.092 715	830	35	0.536 957
395	20	0.825 018	635	15	1.053 380	850	40	0.149 266
415	15	0.740 559	645	18	1.119 973	870	40	0.211 696
430	20	1.077 504	660	16	0.861 453	885	75	0.275 288
470	20	0.936 171	680	25	1.257 737	900	40	0.456 663
490	30	0.991 152	700	20	0.872 122	950	70	0.272 412
505	20	0.828 272	720	20	0.800 726	1 000	70	0.444 316
520	21	0.297 182	735	20	0.450 059	1 050	50	0.308 056
545	23	0.695 339	770	30	0.876 450	W- LED	—	0.998 221
565	25	0.867 817	780	26	0.846 422			
590	20	0.927 603	805	30	0.795 068			

表 4 白光 LED 代替 3 种单色 LED 数据及相应比例系数($\lambda_c=450,560,590\text{ nm}$)

Tab. 4 Optimal combination ratio of white LED replace three kinds of LEDs ($\lambda_c=450,560,590\text{ nm}$)

λ_c/nm	$\Delta\lambda/\text{nm}$	R	λ_c/nm	$\Delta\lambda/\text{nm}$	R	λ_c/nm	$\Delta\lambda/\text{nm}$	R
365	15	0.553 561	600	20	0.976 991	805	30	0.979 618
375	18	0.505 035	620	18	1.079 293	820	25	0.591 342
395	20	0.851 797	635	15	1.171 152	830	35	0.594 198
415	15	0.622 852	645	18	1.022 034	850	40	0.188 685
430	20	1.351 944	660	16	0.871 743	870	40	0.318 954
470	20	0.875 847	680	25	1.209 282	885	75	0.424 083
490	30	0.894 034	700	20	0.856 872	900	40	0.350 541
505	20	0.704 800	720	20	0.827 248	950	70	0.179 689
520	21	0.589 855	735	20	0.461 607	1 000	70	0.529 402
545	23	0.708 326	770	30	0.739 061	1 050	50	0.253 648
570	15	0.863 912	780	26	0.777 547	W-LED	—	0.921 897

为了便于比较以上 4 种情况,将表 2~5 比例系数同时放大 10 倍后,四舍五入取整相加得到所用

LED 的总数,几个关键因素如表 6 所示.

表 5 白光 LED 代替 4 种单色 LED 数据及相应比例系数($\lambda_c=450,560,590,620\text{ nm}$)

Tab. 5 Optimal combination ratio of white LED replace three kinds of LEDs ($\lambda_c=450,560,590,620\text{ nm}$)

λ_c/nm	$\Delta\lambda/\text{nm}$	R	λ_c/nm	$\Delta\lambda/\text{nm}$	R	λ_c/nm	$\Delta\lambda/\text{nm}$	R
365	15	0.504 692	600	20	1.122 343	820	25	0.643 550
375	18	0.521 688	635	15	0.980 575	830	35	0.517 581
395	20	0.855 200	645	18	1.104 094	850	40	0.152 145
415	15	0.576 071	660	16	0.830 600	870	40	0.162 539
430	20	1.603 249	680	25	1.253 836	885	75	0.251 048
470	20	0.955 621	700	20	0.883 308	900	40	0.522 691
490	30	0.720 978	720	20	0.842 133	950	70	0.173 451
505	20	0.537 256	735	20	0.402 316	1 000	70	0.435 487
520	21	0.717 211	770	30	0.841 493	1 050	50	0.304 421
545	23	0.962 896	780	26	0.825 177	W-LED	—	0.687 645
570	15	0.877 687	805	30	0.855 576			

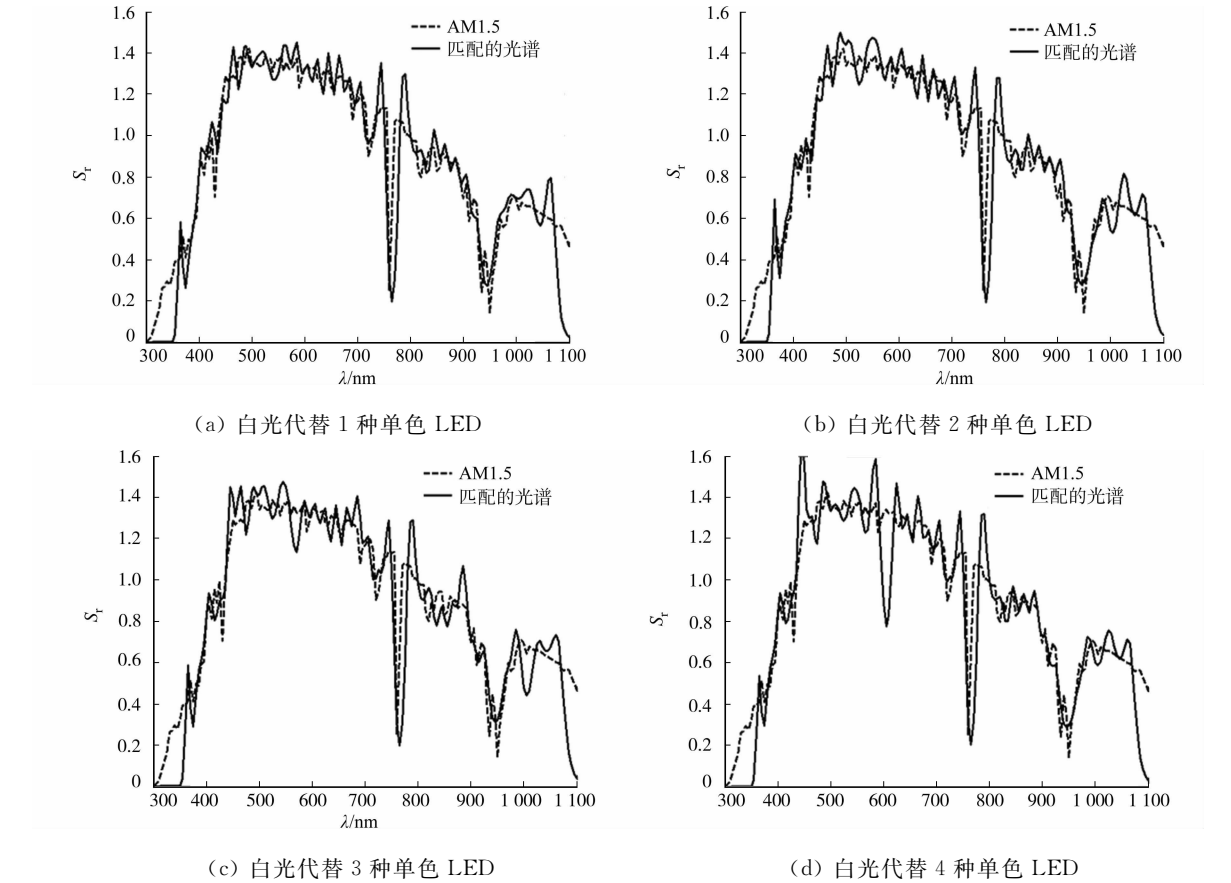


图 4 白光 LED 替换不同种类 LED 的光谱图

Fig. 4 Spectrum diagram of white LED replace different kinds of LEDs

表 6 白光 LED 代替几种单色 LED 数据表及相关指数

Tab. 6 Correlation index table of white LED replace different kinds of LEDs

代替种类	LED 总个数	减少个数比例	相关指数
0	282	0%	0.921 7
1	255	9.6%	0.914 2
2	249	11.7%	0.912 9
3	238	15.6%	0.903 5
4	226	19.9%	0.843 5

由表 6 可以发现:随着白光 LED 代替其他单色 LED 种类的增多,其光谱失配越明显(即光谱匹配

度越来越差),实际所用的 LED 总个数会相应减少.当白光 LED 取代其中 4 种单色 LED 时,相关指数从 0.921 7 减少到 0.843 5,下降了将近 8%.此时,由图 4(d)可知:在波长为 500~600 nm 间,会出现一个吸收谷.出现该吸收谷的原因是:在基于遗传算法的光谱匹配过程中,所用的白光 LED 光谱不足以同时弥补多种被取代的单色 LED 光谱引起的缺失.

在实际选用白光 LED 取代部分单色 LED 过程中,既要保证较高的匹配度又要尽可能地减少使用的 LED 总数,这样才能在保证产品质量的前提下降低成本.权衡两者情况,当白光 LED 取代其中 3 种不同单色 LED 时,该算法拟合的相关指数为 0.903 5,LED 个数减少 15.6%,所得结果较佳.

3 结 论

研究了一种 LED 标准太阳光谱灯的拟合算法.以高斯分布函数为 LED 光谱辐照模型,结合实际的 LED 种类,不仅实现非均匀间隔峰值波长的 LED 拟合标准太阳光谱,还实现了运用白光 LED 代替部分单色 LED 对标准太阳光光谱的光谱拟合,并且详细讨论了白光 LED 最多可取代其中几种单色 LED.

结果表明:该方法在保证高光谱拟合优度的同时,减少了 LED 的种类及数量;其中,种类最多可减少 3 种,此时光谱匹配度为 0.903 5,所用 LED 数量可减少 15.6%,有利于后期制作太阳光光谱灯的灯珠排布,同时也可以降低成本.该方法简单易操作,运算速度快,拟合效率高,为基于 LED 光源的标准太阳光谱灯的实现奠定了基础.这种用 LED 的组合方式可获得光谱可调的特种光源,适用于牙科治疗、美容、昆虫捕捉、植物的培育等领域.

参考文献:

[1] 刘洪波. 太阳模拟技术[J]. 光学精密工程,2001,9(2):177-181.

[2] 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):226-231.

[3] 张勇. 浅谈 LED 特点及应用[J]. 中国新技术新产品,2012(16):162-162.

[4] 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):175-181.

[5] 周卫华,周汉昌. LED 太阳模拟器的研究[J]. 红外,2009,30(3):46-48.

[6] 刘洪兴,孙景旭,刘则洵,等. 氙灯和发光二极管作光源的积分球太阳光谱模拟器[J]. 光学精密工程,2012,20(7):1447-1454.

[7] 苏拾,张国玉,付芸,等. 太阳模拟器的新发展[J]. 激光与光电子学进展,2012,49(7):21-28.

[8] 范铎,白素平. LED 模拟太阳光谱的理论研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版),2011,34(3):16-18.

[9] 甘汝婷,郭震宁,林介本,等. 遗传算法在 LED 光源光谱匹配技术中的应用[J]. 光子学报,2014,43(7):172-177.

[10] 卓金武,魏永生,秦建,等. MATLAB 在数学建模中的应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2011:37-59.

[11] 沈海平,冯华君,潘建根,等. LED 光谱数学模型及其应用[C]//26 届中国照明学会学术年会. 北京:中国照明学会,2005:83-85.

[12] 王福昌. 遗传算法在求解超定方程组中的应用[J]. 韶关学院学报(自然科学版),2007,28(6):15-17.

[13] 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):882-887.

[14] 吉根林. 遗传算法研究综述[J]. 计算机应用与软件,2004,21(2):69-73.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:吴逢铁)