

doi: 10.3788/gzxb20144307.0730003

# 遗传算法在 LED 光源光谱匹配技术中的应用

甘汝婷, 郭震宁, 林介本, 曾茂进, 杨菲菲, 颜稳萍, 林木川

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:**为利用单色 LED 实现 CIE-D65 标准光源、AM1.5 标准太阳光目标光谱的匹配, 提出简单遗传算法作为光谱匹配算法, 通过求解超定方程组的非负最小二乘解, 优化不同峰值波长、峰值波长间隔、半高宽的单色 LED 匹配光源组合, 达到光源光谱匹配的目的. 仿真实验表明: 该算法拟合的相关指数达 0.99 以上, 模拟光谱与目标光谱基本吻合; 匹配光源的峰值波长间隔越小, 光谱拟合性越好, 但结合工程应用需要, 峰值波长要选取适中; 所提遗传算法运行速度快、效率高、拟合误差小, 可广泛应用于植物照明、医疗照明等特殊照明领域的光谱匹配仿真试验和工程实践.

**关键词:**LED; 光谱匹配优化; 遗传算法; 超定方程组; 非负最小二乘解; 相关指数; 峰值波长

**中图分类号:**TP391.75; O432

**文献标识码:**A

**文章编号:**1004-4213(2014)07-0730003-6

## The Genetic Algorithm in the Application of the LED Light Source Spectral Matching Technology

GAN Ru-ting, GUO Zhen-ning, LIN Jie-ben, ZENG Mao-jin, YANG Fei-fei,  
YAN Wen-ping, LIN Mu-chuan

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

**Abstract:** To realize the target spectrum matching of CIE-D65 standard illuminant and AM1.5 standard solar spectrum by employing monochromatic LED, a simple genetic algorithm as the spectral matching algorithm was proposed, by solving non-negative least square solution of overdetermined equations, the combination of monochromatic LED light source with different peak wavelength, peak wavelength interval and full width at half maximum was optimized, and the light source spectral matching was achieved. Simulation results show that the fitting correlation index is above 0.99, the fitting spectrum is consistent basically with the target spectrum. The smaller the interval of spectral matching peak wavelength is, the better the spectral fitting effect is, to meet the needs of engineering application, the peak wavelength needs to be selected moderately. The proposed algorithm runs fast, has high efficiency and small fitting error, and it can be widely used in the spectral matching simulation test and engineering practice for special lighting fields such as plants lighting, medical lighting and so on.

**Key words:** LED; Spectrum matching optimization; Genetic algorithm; Overdetermined equations; Non-negative least square solution; Correlation index; Peak wavelength

**OCIS Codes:** 230.3670; 300.6170; 150.1135; 300.6470

## 0 引言

随着光电技术的发展, 发光二极管 (Light Emitting Diode, LED) 的发光效率不断提高, 其单色性好、体积小、寿命长、能量消耗低、使用直流电、发热量低和控制灵活等特点<sup>[1]</sup>使 LED 光源在植物栽培、医

疗、机器视觉等特殊照明领域的研究受到广泛关注. 应用 LED 的窄波段特性, 能根据人们的需要采用不同波段的 LED 模拟产生各种形状的光谱分布, 因此光谱匹配技术的研究及应用也显得尤为重要. 在生物学领域, 光谱匹配能帮助研究人员进行不同光谱照射下生物生长的实验; 在医疗领域, 可以进行不同的光疗设备的研

基金项目: 福建省科技计划重点项目 (No. 2013I0004) 资助

第一作者: 甘汝婷 (1988-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为 LED 照明设计的应用与研究. Email: ganrutingmm@163.com

导师 (通讯作者): 郭震宁 (1958-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为光电子材料与器件. Email: znguo@hqu.edu.cn

收稿日期: 2013-10-25; 录用日期: 2014-01-14

<http://www.photon.ac.cn>

究;在机器视觉领域,光谱的匹配能用于多光谱图像的采集,使得工业产品的视觉检测可以基于多光谱图像来进行<sup>[2~4]</sup>.另外,光谱匹配技术还应用于太阳模拟器的光谱设计研究<sup>[5]</sup>.

利用LED来模拟所需光源的目标光谱已成为研究的热点.光谱匹配就是已知目标光谱,利用不同峰值波长和半高宽的LED匹配出所需要光源的目标光谱,也是光谱的反演<sup>[6]</sup>.如范铎<sup>[7]</sup>用一定数量的不同单色的LED阵列使发出的光充分混合,通过调节变阻器进而改变电流,来实现对LED的辐通量的调节,从而改变混合光中相应单色光的比例,来模拟太阳光谱;张译文<sup>[8]</sup>等利用最小二乘法和高斯分布数学模型为基础,实现了非均匀间隔峰值波长的LED模拟AM1.5标准太阳光谱分布;刘洪兴<sup>[9]</sup>等采用溴钨灯和恒流驱动的LED混合作为积分球内部光源并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.目前进行光谱匹配的方法主要是利用光谱匹配算法和通过改变电流进行动态可调的光谱匹配技术<sup>[7~11]</sup>,操作上比较复杂,成本较高.光谱匹配的算法主要采用的是最小二乘法<sup>[8]</sup>、模拟退火算法<sup>[9]</sup>、迭代法<sup>[10]</sup>等,算法比较复杂,运行速度较慢.所以,提出一种更简单、快捷、高效且适用范围更广的光谱匹配算法具有重要的意义.

本文基于光谱叠加理论,采用简单遗传算法(Simple Genetic Algorithm, SGA)<sup>[12]</sup>作为光谱匹配算法,通过求解超定方程组的非负最小二乘解,直接得到匹配目标光谱的最优LED组合比例,来进行光谱的合成,大大简化了通过改变电流来调节光谱匹配问题的流程.

## 1 光谱构造的原理

### 1.1 光谱匹配原理

光源发出的光通常是由各种波长组成的,每种波长具有不同的光谱辐射通量.光源总的辐射通量是各个波长的辐射通量之和.LED的光谱功率分布表示在LED的光辐射波长范围内各个波长的辐射功率分布.要得到复合的宽波段光谱,需要不同峰值波长、半高宽的LED共同作用.根据光谱的叠加原理可得到LED光谱合成的基本数学模型<sup>[13]</sup>为

$$\hat{S}(\lambda) = \sum k_i S_i(\lambda) \quad (1)$$

式中,  $S_i(\lambda) \propto S_\lambda$ ,  $S_i(\lambda)$  是单个LED的光谱分布,  $k_i$  为未知的LED的系数.

虽然实际光谱曲线是连续的,但实验测得的光谱数据都是对应特定波长的离散数据.假定有目标光谱的数据组  $\{\lambda_i, y_i\}$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ), 并用LED的相对光谱数据作为拟合基函数  $S_j(\lambda)$  ( $j=1, 2, \dots, n$ ), 若以  $f(\lambda) = k_1 S_1(\lambda) + k_2 S_2(\lambda) + \dots + k_n S_n(\lambda)$  来拟合此目标光谱数据组, 必须适当地选取拟合参数  $k_1, k_2, \dots, k_n$  才能提高拟合准确度.记向量  $\mathbf{S}_1 = (S_1(\lambda_1), S_1(\lambda_2), \dots,$

$S_1(\lambda_m))^T$ , 构造LED的光谱矩阵  $\mathbf{A} = (\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2, \dots, \mathbf{S}_n)$ , 目标光谱矩阵  $\mathbf{b} = (y_1, y_2, \dots, y_m)^T$ , 系数矩阵  $\mathbf{X} = (k_1, k_2, \dots, k_n)^T$ . 当  $m > n$  时, 得到超定方程组为

$$\mathbf{A}\mathbf{X} = \mathbf{b} \quad (2)$$

用矩阵形式表示, 则为

$$\begin{pmatrix} S_1(\lambda_1) & S_2(\lambda_1) & \cdots & S_{n-1}(\lambda_1) & S_n(\lambda_1) \\ S_1(\lambda_2) & S_2(\lambda_2) & \cdots & S_{n-1}(\lambda_2) & S_n(\lambda_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_1(\lambda_{m-1}) & S_2(\lambda_{m-1}) & \cdots & S_{n-1}(\lambda_{m-1}) & S_n(\lambda_{m-1}) \\ S_1(\lambda_m) & S_2(\lambda_m) & \cdots & S_{n-1}(\lambda_m) & S_n(\lambda_m) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_{n-1} \\ k_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_{m-1} \\ y_m \end{pmatrix} \quad (3)$$

通常情况下, 超定方程组是无解的, 但它的近似解是可以求得的. 超定方程组的最小二乘解是一种广义解, 是指使残差  $r = \mathbf{b} - \mathbf{A}\mathbf{X}$  的2-范数达到极小值时的解, 因此它可以使得总体误差较小. 即

$$\| \mathbf{b} - \mathbf{A}\mathbf{X}^* \|_2 = \min_{\mathbf{X} \in \mathbb{R}^n} \| \mathbf{b} - \mathbf{A}\mathbf{X} \|_2 \quad (4)$$

在实际应用中, 因为LED的转换系数  $k_i$  只能取非负值, 所以只希望得到超定线性方程组的非负最小二乘解  $\mathbf{X}^*$ . 如果求得了非负最小二乘解, 那么实际合成的光谱分布就为

$$\hat{\mathbf{S}} = \mathbf{A}\mathbf{X}^* \quad (5)$$

通过计算残差平方和(Residual Sum of Squares, RSS)和相关指数( $R^2$ ), 可定量评价光谱匹配拟合的效果. 残差平方和的定义为

$$\text{RSS} = \sum_{i=1}^m (\hat{y}_i - y_i)^2 \quad (6)$$

式中  $y_i$  表示目标数据,  $\hat{y}_i$  表示拟合的数据. 在回归分析中, RSS表示的意义是拟合的数据与目标数据的整体偏差的大小<sup>[13]</sup>. 相关指数的定义为

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2} \quad (7)$$

式中  $\bar{y}$  是目标数据组的数学期望. 相关指数的意义是在非线性回归分析中表征拟合曲线与原始数据的相似程度, 越接近于1, 表明拟合效果越好, 相应的解也就越精确. 对于光谱匹配而言, 相关指数越大, 目标光谱和拟合光谱相似度就越高.

### 1.2 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<sup>[14]</sup>. Michigan大学的J. Holland教授提出的简单遗传算法(Simple Genetic Algorithm, SGA)由编解码、个体适应度评估和遗传运算三大模块构成<sup>[12]</sup>. 其算法求解步骤为:

1) 随机产生十进制编码规模为100的初始群体;

2)以最小二乘误差平方和为目标,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,最后得到满意或最优解。

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。

## 2 模拟实验

通过matlab软件对波长为370~830 nm的LED进行光谱拟合,拟合函数<sup>[15]</sup>为

$$S(\lambda) = M \exp \left[ -3.2213 \left( \frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda} \right)^2 \right]$$

表1 峰值波长间隔为15 nm时单色LED的最优组合比例数据

Table 1 The optimal combination ratio data table of monochromatic LED with 15 nm peak wavelength intervals

Peak wavelength/ nm	FWHM/ nm	The optimal combination ratio of LEDs for CIE-D65	The optimal combination ratio of LEDs for AM1.5	Peak wavelength/ nm	FWHM/ nm	The optimal combination ratio of LEDs for CIE-D65	The optimal combination ratio of LEDs for AM1.5
375	25	37.004 5	0.010 5	600	20	36.8641	0.585 8
390	25	18.205 1	0.778 0	615	20	49.443 5	0.849 1
405	25	59.716 2	0.176 1	630	20	57.017 4	0.756 8
420	25	43.954 2	0.691 9	645	20	53.020 1	1.026 3
435	25	40.298 4	0.248 7	660	20	57.225 8	0.728 9
450	30	56.283 7	0.542 3	675	20	55.240 5	1.031 6
465	35	54.073 9	0.742 3	690	20	46.596 1	0.607 5
480	35	42.681 8	0.381 3	705	20	52.899 4	0.953 4
495	35	44.446 3	0.841 1	720	20	40.341 3	0.458 8
510	35	37.584 6	0.303 5	735	20	55.547 4	0.943 4
525	35	43.149 0	0.418 5	750	20	39.123 6	0.707 7
540	35	35.954 9	0.787 5	765	20	36.162 2	0.340 4
555	35	35.282 3	0.209 1	780	20	48.345 1	0.862 8
570	35	34.409 8	0.727 6	795	25	21.839 3	0.431 6
585	45	46.412 7	0.544 5	810	25	59.671 4	0.977 9

表2 峰值波长间隔为20 nm时单色LED的最优组合比例数据

Table 2 The optimal combination ratio data table of monochromatic LED with 20 nm peak wavelength intervals

Peak wavelength/ nm	FWHM/ nm	The optimal combination ratio of LEDs for CIE-D65	The optimal combination ratio of LEDs for AM1.5	Peak wavelength/ nm	FWHM/ nm	The optimal combination ratio of LEDs for CIE-D65	The optimal combination ratio of LEDs for AM1.5
375	25	36.932 2	0.207 4	615	20	59.855 5	0.926 5
395	25	44.899 7	0.511 6	635	20	74.855 4	1.187 5
415	25	72.531 3	0.723 5	655	20	71.807 2	1.091 7
435	25	45.898 6	0.474 8	675	20	73.674 3	1.187 8
455	35	82.632 7	0.801 3	695	20	63.991 5	1.065 1
475	35	54.812 5	0.794 3	715	20	60.628 0	0.918 7
495	35	57.680 1	0.669 7	735	20	68.148 6	1.077 7
515	35	53.026 9	0.734 4	755	20	48.414 4	0.787 0
535	35	52.941 2	0.627 8	775	25	56.709 9	0.813 9
555	40	54.503 8	0.701 6	795	25	42.671 2	0.795 8
575	35	42.091 0	0.694 7	815	25	56.851 3	0.818 2
595	35	59.656 7	0.809 2				

$$\exp \left( -0.3 \left| \frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda} \right| \right) \quad (8)$$

基于前述的光谱构造原理,将波长范围为370~830 nm的CIE-D65标准光和AM1.5标准太阳光谱作为目标光谱,利用不同峰值波长和半高宽的单色LED进行光谱匹配。已知采用峰值波长间隔分别为15 nm、20 nm、30 nm的波长范围在370~830 nm的LED的光谱作为式(2)的A,目标光谱的数据为b,利用简单遗传算法计算求非负最小二乘解,得出各个不同峰值波长和半高宽时单色LED的组合比例,详细数据见表1~表3,进而对单色LED进行匹配模拟。图1为CIE-D65标准光源进行匹配的结果。图2为AM1.5标准太阳光谱进行匹配的结果。

表 3 峰值波长间隔为 30 nm 时单色 LED 的最优组合比例数据

Table 3 The optimal combination ratio data table of monochromatic LED with 30 nm peak wavelength intervals

Peak wavelength/ nm	FWHM/ nm	The optimal combination ratio of LEDs for CIE-D65	The optimal combination ratio of LEDs for AM1.5	Peak wavelength/ nm	FWHM/ nm	The optimal combination ratio of LEDs for CIE-D65	The optimal combination ratio of LEDs for AM1.5
375	25	47.4620	0.4326	615	20	80.8759	1.2293
405	25	91.6252	0.8709	645	20	102.5012	1.6279
435	25	89.7456	0.9359	675	20	100.6658	1.6612
465	35	107.0312	1.1342	705	20	90.3295	1.5397
495	35	80.6906	1.1050	735	20	90.8329	1.3624
525	35	81.4838	0.9922	765	20	68.3870	0.9609
555	35	65.2408	0.8314	795	20	80.7109	1.3519
585	45	77.8984	1.1305				

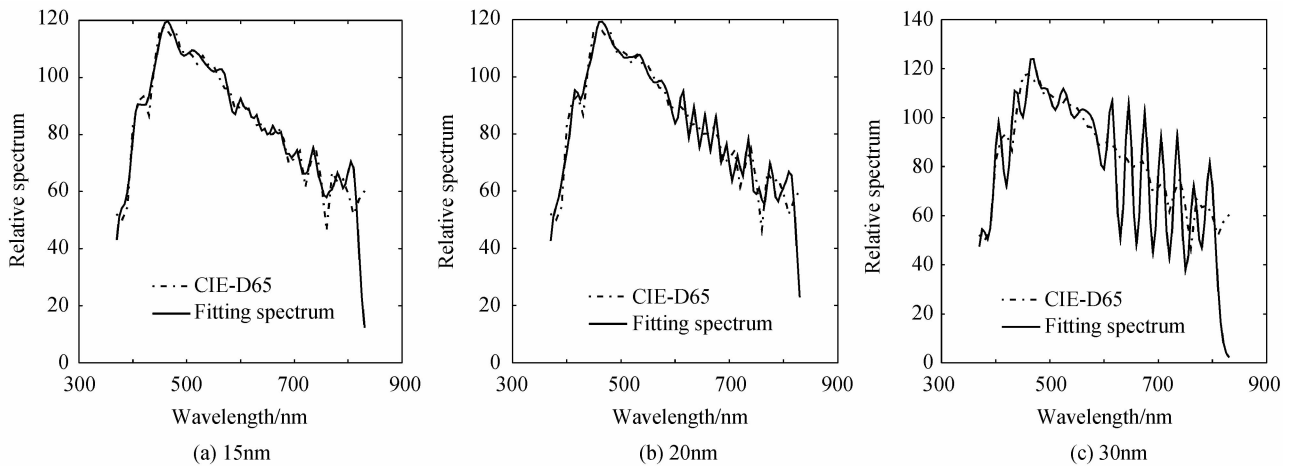


图 1 不同峰值波长间隔时的 CIE-D65 的光谱匹配图

Fig. 1 The spectrum matching diagram of CIE-D65 with different peak wavelength intervals

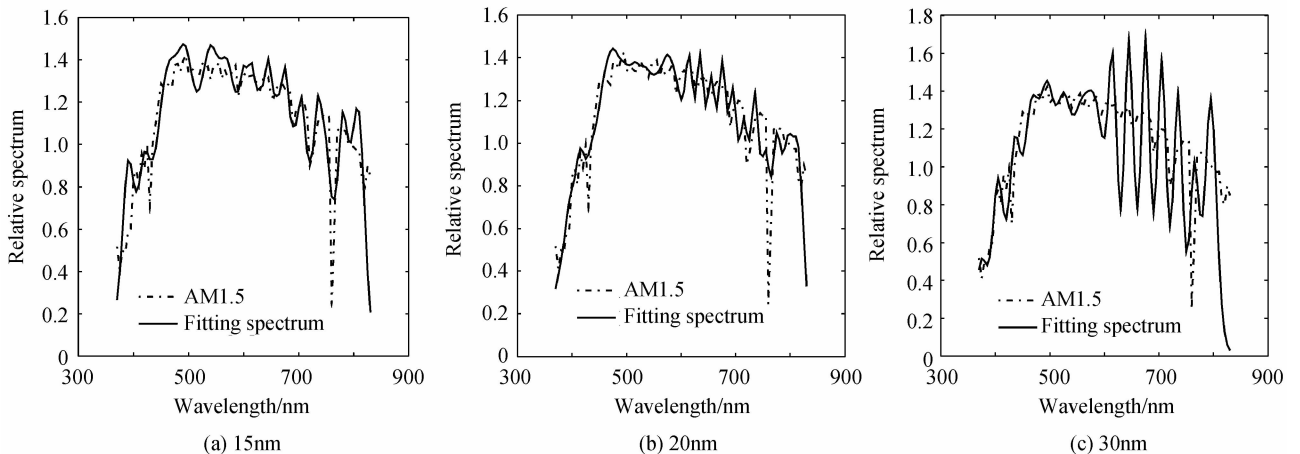


图 2 不同峰值波长间隔时的 AM1.5 的光谱匹配图

Fig. 2 The spectrum matching diagram of AM1.5 with different peak wavelength intervals

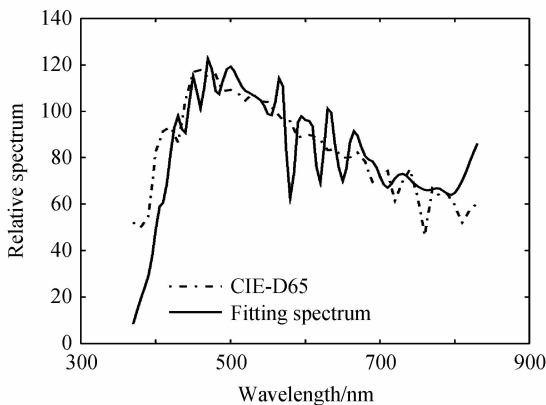
在工程实际应用中,LED 产品的峰值波长并不是等间隔的,有些波长的 LED 很难获得,为进一步说明算法的实用性,利用市面上 Epitex 品牌的 36 种单色 LED 在波长 370~830 nm 内分别对 CIE-D65 标准光和 AM1.5 标准太阳光谱进行目标光谱的匹配,每种

LED 光谱数据根据实测光谱的峰值波长和半高宽利用式(8)进行拟合得到.同样地,利用简单遗传算法可求得每种 LED 的最佳组合比例,具体详见表 4,目标光谱的匹配结果如图 3.

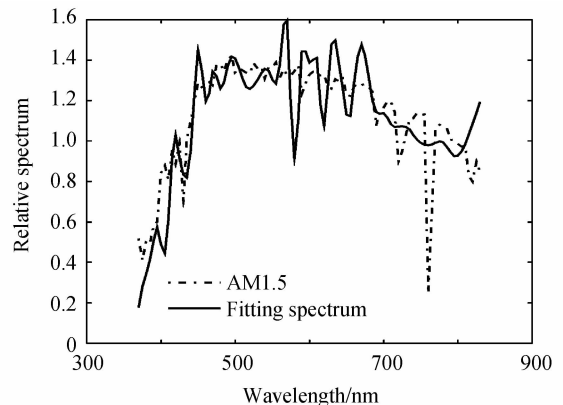
表4 不等峰值波长间隔的Epitex LEDs最优组合比例数据

Table 4 The optimal combination ratio data table of Epitex LEDs with different peak wavelength intervals

Peak wavelength/ nm	FWHM/ nm	The optimal combination ratio of LEDs for CIE-D65	The optimal combination ratio of LEDs for AM1.5	Peak wavelength/ nm	FWHM/ nm	The optimal combination ratio of LEDs for CIE-D65	The optimal combination ratio of LEDs for AM1.5
375	15	8.932 6	0.106 7	610	15	67.735 6	1.196 3
385	15	14.022 2	0.296 3	625	15	41.870 1	0.503 0
395	15	18.990 4	0.188 7	630	15	30.689 7	0.763 3
405	15	42.500 0	0.440 4	635	15	37.249 3	0.150 4
415	15	13.635 3	0.236 2	645	18	47.936 0	1.050 4
418	15	13.027 9	0.165 3	660	18	50.353 5	0.816 9
420	15	15.101 1	0.287 8	670	20	39.734 6	0.482 0
430	20	80.205 9	0.651 1	680	25	28.274 9	0.396 0
450	20	97.944 9	1.209 0	690	25	26.387 4	0.333 8
470	20	87.822 5	0.975 6	700	30	32.526 1	0.708 9
490	30	64.366 5	0.802 1	720	30	34.157 3	0.431 6
505	35	59.551 0	0.662 7	735	30	26.704 7	0.338 3
525	45	55.985 8	0.935 0	750	30	16.919 3	0.489 6
545	33	65.190 6	0.740 6	760	30	9.257 5	0.054 3
565	25	54.608 2	0.676 0	770	30	6.924 3	0.040 3
570	15	44.462 1	0.719 8	780	30	13.275 7	0.342 5
590	15	70.571 0	1.165 0	810	35	1.571 4	0.027 1
600	15	51.675 4	0.477 5	830	35	3.757 1	0.053 4



(a) CIE-D65



(b) AM1.5

图3 使用36种Epitex LEDs时CIE-D65和AM1.5的光谱匹配图

Fig. 3 The spectrum matching diagram with 36 kinds of Epitex LEDs for CIE-D65 and AM1.5

利用相关指数来评价目标光谱曲线和拟合曲线的相似程度,所有的相关指数均大于0.99,效果十分理想,其结果见表5.从图表结果可以看出,对于CIE-D65、AM1.5标准光而言,拟合的光谱和目标光谱十分

表5 利用LED对CIE-D65和AM1.5光谱拟合的相关指数

Table 5 The correlation index table of spectral fitting of CIE-D65 and AM1.5 with LEDs

Target spectrum	LED types	Correlation index( $R^2$ )
CIE-D65	370~830 nm, peak wavelength with 15 nm intervals	0.999 7
	370~830 nm, peak wavelength with 20 nm intervals	0.999 8
	370~830 nm, peak wavelength with 30 nm intervals	0.998 6
	Epitex LEDs	0.998 9
AM1.5	370~830 nm, peak wavelength with 15 nm intervals	0.999 4
	370~830 nm, peak wavelength with 20 nm intervals	0.999 5
	370~830 nm, peak wavelength with 30 nm intervals	0.997 9
	Epitex LEDs	0.999 2

近似,匹配度较高;利用简单遗传算法求得的最优 LED 组合比例可以进一步推得所需要的 LED 光源的组合数量,简化了光源匹配技术的流程.由图可知,当 LED 峰值波长间隔小时,光谱的纹波幅度较小,光谱曲线比较平滑;当峰值波长间隔太大时,相关指数也相应地减小,光谱图上出现的尖峰较多,光谱的平滑效果较差,匹配误差较大;而当峰值波长间隔太小时,虽然拟合的准确度较高,但需要的 LED 的种类数较多,工程上不易实现.因此,在光谱匹配时,需要选取适当的峰值波长间隔的 LED,峰值波长的间隔不能太大,也不能太小.另外,采用简单遗传算法所得的相关指数均好于采用最小二乘法<sup>[13]</sup>所得的结果,拟合准确度较高,利用简单遗传算法可以并行处理,运行较快,避免了模拟退火算法<sup>[9,14]</sup>、迭代算法<sup>[10]</sup>计算时收敛速度慢、效率低的缺点.因此,将该算法用于光谱匹配技术,具有重要的工程实践意义.

### 3 结论

从工程实践要求出发,提出了利用光谱匹配算法来实现目标光谱匹配的优化组合技术.引入 SGA 算法,以 CIE-D65 和 AM1.5 标准光的光谱为例,采用不同峰值波长和半高宽的单色 LED 及市面上现有的 Epitex 品牌的 LED 仿真目标光谱,计算最优的 LED 组合比例.仿真实验结果表明,两种光谱的拟合误差均比较小,说明单色的 LED 完全能够定量地匹配出所需光源的目标光谱,已知目标光谱的数据可以推测不同波长的单色光 LED 的数值比例,也可将一定数量的不同单色的 LED 发出的光充分混合,将混合的光谱与目标光谱比较并进行拟合,来实现对 LED 的辐亮度的调节,从而改变混合光中相应单色光的比例,最终改变混合光的光谱.此算法简单易操作、运行速度快、拟合效率高、失配误差小、准确度高,为基于 LED 光源的特殊照明灯具的开发提供了一种全新的方法.

#### 参考文献

- [1] 毛兴武,张艳雯,周建军,等.新一代绿色光源 LED 及其应用技术[M].北京:人民邮电出版社,2008.114-116.
- [2] MIAO Hong-li, ZHOU Xiao-guang, LIU Feng-xue, et al. Application of the spectrum of LED on growth of chaetoceros gracilis and platyomonas subcordiformis [J]. *Acta Optica Sincia*, 2010, **30**(4): 1101-1105.
- [3] 苗洪利,周晓光,刘逢学,等. LED 光谱对纤细角毛藻和亚心形扁藻生长的影响[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 1101-1105.
- [4] XIANG Hong-sheng, LI Ming, HUO Rong-ling, et al. The application and prospect of LED in phototherapy[J]. *Beijing Biomedical Engineering*, 2005, **24**(4): 311-315.
- [5] 项红升,李明,霍荣龄等. LED 应用于光疗的研究进展[J]. *北京生物医学工程*, 2005, **24**(4): 311-315.
- [6] CHEN Rui, CEN Song-yuan, JIN Shang-zhong. A machine vision illumination system based on simultaneous multiple surfaces design[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(8): 956-961.
- [7] 陈瑞,岑松原,金尚忠.基于同步多曲面法的发光二极管机器视觉照明设计[J]. *光子学报*, 2013, **42**(8): 956-961.
- [8] CHEN Wen-zhi, JIANG Lu-lin, JIANG Li, et al. Experimental research of spectral design of solar simulator[J]. *Acta Optica Sincia*, 2011, **31**(2): 02220021-02220026.
- [9] 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): 02220021-02220026.
- [10] NI Jun-xiong, BAI Ting-zhu, XU Ying-ying. The research on multi-spectral fitting of LED spectrum tunable light source[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, **32**(6): 1606-1610.
- [11] 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.
- [12] 范铎. LED 阵列模拟太阳光谱的理论研究[D]. 长春:长春理工大学,2012.25.
- [13] ZHANG Yi-wen, XU Lin, WAN Song. Synthesizing algorithm for LED standard solar spectrum lamp[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(5): 596-600.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] FRYC I, BROWN S W, EPELDAUER G P. LED-based spectrally tunable source for radiometric, photometric, and colorimetric applications[J]. *Optical Engineering*, 2005, **44**(11): 111309-111316.
- [18] FRYC I, BROWN S W, OHNO Y. Spectral matching with an LED-based spectrally tunable light source [C]. SPIE, 2005, **5941**: 594111.
- [19] 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.
- [20] 朱继亦.基于 LED 的光谱可调光源的研究[D].长春:长春光学精密机械与物理研究所,2010.23-35.
- [21] WANG Fu-chang. A solving method of overdetermined equations systems by genetic algorithms [J]. *Journal of Shaoguan University · Natural Science*, 2007, **28**(6): 15-17.
- [22] 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*, 2007, **28**(6): 15-17.
- [23] SHEN Hai-ping, FENG Hua-jun, PAN Jian-gen, et al. Mathematical model for LED spectra and application [C]. About CIE 26th China Illuminating Engineering Society Annual Meeting Proceedings, Beijing, China: Illuminating Engineering Society, 2005.83-85.