

光学学报

基于自适应差分进化算法的 LED 光谱匹配

程真^{1,2}, 司赶上², 李振钢², 宁志强², 刘家祥², 黄文彪^{1,2}, 斯贝贝², 杨长平^{1,2}, 方勇华^{1,2*}

¹ 中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230026;

² 中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031

摘要 为实现用单色发光二极管(LED)合成所需要的各种目标光谱, 提出将自适应差分进化算法作为光谱匹配算法。以高斯修正模型表征单色 LED 的分布, 基于均匀分布的 LED, 模拟了标准 AM1.5 太阳光谱和植被光谱, 并采用相关指数和均方根误差作为评价标准。在此基础上, 利用实验室现有的 LED 进行了实验验证, 所提算法的拟合效果均比模拟退火算法和遗传算法好。实验结果表明, 提出的自适应差分进化算法可自动设置参数, 拟合效果好, 可以被广泛应用于各种 LED 光谱匹配仿真实验和工程实践中。

关键词 光谱学; 发光二极管; 光谱模型; 光谱匹配; 差分进化算法; 曲线拟合

中图分类号 O432 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.0930004

LED Spectral Matching Based on Adaptive Differential Evolution Algorithm

Cheng Zhen^{1,2}, Si Ganshang², Li Zhengang², Ning Zhiqiang², Liu Jiaxiang²,

Huang Wenbiao^{1,2}, Si Beibei², Yang Changping^{1,2}, Fang Yonghua^{1,2*}

¹ School of Environment Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;

² Key Laboratory of Environment Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China

Abstract An adaptive differential evolution algorithm is proposed as a spectral matching algorithm to synthesize various target spectra with monochromatic light-emitting diodes (LEDs). The gaussian correction model is used to characterize the distribution of monochromatic LEDs. The standard AM1.5 solar spectrum and vegetation spectrum are simulated based on equally distributed LEDs, and the correlation coefficient and root-mean-square error are used as evaluation criteria. On this basis, the LEDs in the laboratory are used for experimental verification, and the fitting effect of the proposed algorithm is better than the simulated annealing algorithm and the genetic algorithm. The experimental results show that the proposed adaptive differential evolution algorithm, with automatic setting of parameters and good fitting effect, can be widely used in the LED spectral matching simulation tests and engineering practices.

Key words spectroscopy; light emitting diode; spectral model; spectrum matching; differential evolution algorithm; curve fitting

1 引言

发光二极管(LED)作为最新的第四代照明光源^[1], 具有发光效率高、使用寿命长、性能稳定、波长种类丰富、单色性好、半峰全宽(FWHM)窄和能较

好地控制发光光谱等特性^[2-6], 这些特性为组合不同波段 LED 模拟产生连续分布的目标光谱提供了可能^[7]。目前已有许多学者对 LED 拟合光谱的方法进行了研究。美国国家标准与技术局(NIST)最先采用多个 LED 设计出光谱可调光源(STS)^[8], 采用

收稿日期: 2021-10-18; 修回日期: 2021-11-24; 录用日期: 2021-12-06

通信作者: *yhfang@aiofm.ac.cn

迭代法^[9]进行光谱匹配。陈风等^[10]通过最小二乘法利用多种 LED 组合模拟了不同的光谱分布。张译文等^[11]基于高斯函数建立了单个 LED 的数学模型, 利用最小二乘法求解实现了峰值波长非等间隔 LED 光谱的拟合。刘洪兴等^[12]采用模拟退火算法求解最优 LED 组合数目来拟合目标光谱。胡友丽等^[13]将 L-M 算法作为光谱匹配算法进行光谱拟合。甘汝婷等^[14]将简单遗传算法引入到了光谱匹配算法中。张玉宝等^[15]利用有效集成算法来求解超定方程组, 并得到了最优的 LED 种类和数目。目前光谱匹配技术主要是利用光谱匹配算法来求解对应的 LED 电流系数, 通过调节电流来动态匹配目标光谱。采用的算法主要是迭代法^[9]、最小二乘法^[10]、模拟退火算法^[12]和遗传算法^[14]等。然而, 这些算法比较复杂, 且存在一定的局限性, 例如: 利用最小二乘法来实现光谱匹配, 有时 LED 混合比例会出现负值; 模拟退火算法对参数设置比较敏感, 一旦参数不合理, 会出现难以收敛的情况; 遗传算法的编程实现比较复杂, 参数选择影响拟合的品质, 搜索速度比较慢, 且不能及时地反馈信息。因此, 找到一种更快捷简便的算法进行光谱匹配具有十分重要的意义。

基于光谱叠加原理, 本文将一种自适应差分进化(SADE)算法作为光谱匹配算法, 不需要进行繁琐的参数设置, 直接可以得到匹配目标光谱的最优 LED 组合比例, 对实际工程应用具有一定的理论指导意义。

2 光谱匹配原理

2.1 LED 光谱辐射模型

单色 LED 的光谱是一个典型的窄带单峰谱线, 其 FWHM 一般为 20~50 nm^[16]。根据 LED 光源光谱的辐射特性, 单个 LED 在光轴方向上单位立体角的辐射功率随波长的分布模型可以用修正高斯函数^[17]来近似描述, 单个 LED 在光轴方向上的辐射

强度 $I(\lambda)$ 的表达式为

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

式中: λ 为 LED 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 FWHM。

2.2 光谱匹配原理

光源发出的光是由多种不同颜色波长的光构成的混合光, 混合光的光照强度等于合成混合光的不同波长光的发光强度之和。要得到目标的宽波段光谱, 如太阳光谱, 就需要将不同峰值波长的 LED 按特定的电流比例或者数量组合起来。根据光谱分布的线性叠加原理, 可以得到 LED 合成宽波段光谱的数学模型^[18], 相应的表达式为

$$L(\lambda) = \sum_{i=1}^n S_i(\lambda) k_i, \quad (2)$$

式中: $S_i(\lambda)$ 是第 i 个单色 LED 的光谱分布函数; k_i 是第 i 个 LED 的系数; $L(\lambda)$ 为目标光谱曲线。

光谱曲线分布一般都是连续的, 但光谱仪测量的光谱数据都是对于某些特定波长的离散化数据。对目标光谱曲线 $L(\lambda)$ 进行离散化后取值, 可得离散化后的目标光谱的数据数组, 即 $\{\lambda_i, L(\lambda_i)\}$ ($i=1, 2, \dots, m$)。若用单色 LED 的相对光谱数据离散化后取值, 则可获得离散化后的单个单色 LED 的光谱数据数组, 即 $\{\lambda_i, S(\lambda_i)\}$ ($i=1, 2, \dots, m$)。为便于计算, 记单个单色 LED 的光谱数据向量为 $\mathbf{S}_i = [S_i(\lambda_1) \ S_i(\lambda_2) \ \dots \ S_i(\lambda_m)]^T$, 记 n 个单色 LED 的光谱数据矩阵为 $\mathbf{S} = [\mathbf{S}_1 \ \mathbf{S}_2 \ \dots \ \mathbf{S}_n]^T$, 记系数矩阵为 $\mathbf{K} = [k_1 \ k_2 \ \dots \ k_n]^T$, 记目标光谱数据矩阵为 $\mathbf{L} = [L(\lambda_1) \ L(\lambda_2) \ \dots \ L(\lambda_n)]^T$, 此时利用 LED 拟合光谱的方程组为

$$\mathbf{SK} = \mathbf{L}, \quad (3)$$

相应的矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} S_1(\lambda_1) & S_2(\lambda_1) & \cdots & S_{n-1}(\lambda_1) & S_n(\lambda_1) \\ S_1(\lambda_2) & S_2(\lambda_2) & \cdots & S_{n-1}(\lambda_2) & S_n(\lambda_2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ S_1(\lambda_{m-1}) & S_2(\lambda_{m-1}) & \cdots & S_{n-1}(\lambda_{m-1}) & S_n(\lambda_{m-1}) \\ S_1(\lambda_m) & S_2(\lambda_m) & \cdots & S_{n-1}(\lambda_m) & S_n(\lambda_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_{n-1} \\ k_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L(\lambda_1) \\ L(\lambda_2) \\ \vdots \\ L(\lambda_{n-1}) \\ L(\lambda_n) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

当目标光谱数据点大于 LED 个数时, 即 $m > n$

时, 方程组为超定方程组。因为超定方程组一般是

无法求解的,所以只能通过数学方法对其进行求近似解。在实际应用中,因为 LED 之间的比例系数只能是正值,所以该超定方程组的非负最小二乘解 $\hat{\mathbf{K}}$ 即为 LED 光谱组合的最优解,实际 LED 合成的光谱分布 $\hat{\mathbf{L}}$ 应为

$$\hat{\mathbf{L}} = \mathbf{S}\hat{\mathbf{K}}。 \quad (5)$$

2.3 光谱匹配评价指标

在非线性最小二乘求解问题中,常通过计算相关指数(R^2)的值来评价光谱拟合情况的优劣^[19]。 R^2 的大小体现了拟合光谱与目标光谱的匹配程度,其值越大越好。 R^2 的计算公式为

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [\hat{L}(\lambda_i) - L(\lambda_i)]^2}{\sum_{i=1}^n [L(\lambda_i) - \bar{L}(\lambda_i)]^2}, \quad (6)$$

式中: $\hat{L}(\lambda_i)$ 是拟合的光谱数据; $\bar{L}(\lambda_i)$ 是目标光谱数据组的数学期望。

均方根误差(RMSE, M_{RMSE})是衡量拟合值和实际值之间偏差的重要指标^[20],对于曲线拟合的结果也可以采用 RMSE 作为评价标准,RMSE 的值越小表明拟合值与实际值的偏差越小。RMSE 的计算公式为

$$M_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\hat{L}(\lambda_i) - L(\lambda_i)]^2}。 \quad (7)$$

3 光谱匹配算法

3.1 标准差分进化算法

差分进化(DE)算法^[21]是由 Storn 和 Price 提出的一种模拟生物进化过程的随机算法。将单色 LED 的比例系数 k 当成种群中的个体,将残差平方和 $M_{\text{RSS}} = \sum_{i=1}^n [\hat{L}(\lambda_i) - L(\lambda_i)]^2$ 作为评价种群优劣的适应度函数 f 。DE 算法进行光谱匹配的基本操作如下。

1) 种群初始化

生成初始种群,即 M_{NP} 个比例系数 $\mathbf{K}_i^{(M_{\text{gen}})} = [k_{i,1}^{(M_{\text{gen}})} \ k_{i,2}^{(M_{\text{gen}})} \cdots \ k_{i,n}^{(M_{\text{gen}})}]$,其中某一比例系数 $k_{i,j}^{(M_{\text{gen}})}$ 的生成表达式为

$$k_{i,j}^{(M_{\text{gen}})} = k_{\min} + \text{rand}(0,1) \cdot (k_{\max} - k_{\min}), \quad (8)$$

式中: $i=1,2,\dots,M_{\text{NP}}$; $\text{rand}(0,1)$ 表示区间 $(0,1)$ 中的随机数; k_{\max} 为搜索空间上界; k_{\min} 为搜索空间下界; M_{gen} 为当前迭代次数。

2) 变异操作

DE 算法通过差分策略实现种群个体变异,有多种不同的变异策略,本文中选择 DE/best/1 作为匹配算法的变异策略,具体表达式为

$$v_i^{(M_{\text{gen}}+1)} = k_{\text{best}}^{(M_{\text{gen}})} + F[k_{r_1}^{(M_{\text{gen}})} - k_{r_2}^{(M_{\text{gen}})}], \quad (9)$$

式中: $v_i^{(M_{\text{gen}}+1)}$ 为变异个体; $k_{\text{best}}^{(M_{\text{gen}})}$ 为第 M_{gen} 代中适应度最优的个体; F 为变异因子; r_1, r_2 为 $[1, M_{\text{NP}}]$ 之间互不相等的随机整数。

3) 交叉操作

对第 G 代个体与变异个体进行交叉操作,生成实验个体,具体表达式为

$$u_{i,j}^{(M_{\text{gen}}+1)} = \begin{cases} v_{i,j}^{(M_{\text{gen}}+1)}, & \text{rand}(0,1) \leq M_{\text{CR}} \text{ or } j = j_{\text{rand}}, \\ k_{i,j}^{(M_{\text{gen}})}, & \text{else} \end{cases}, \quad (10)$$

式中: $u_{i,j}^{(M_{\text{gen}}+1)}$ 表示生成的第 i 个实验个体的第 j 个比例系数的值; j_{rand} 为 $(1, n)$ 中的一个随机整数; M_{CR} 为交叉概率因子。

4) 选择操作

将新生成的实验个体与父代个体进行比较,选择适应度值好的个体作为下一个父代,具体表达式为

$$k_i^{(M_{\text{gen}}+1)} = \begin{cases} u_i^{(M_{\text{gen}}+1)}, & f[u_i^{(M_{\text{gen}}+1)}] \leq f[k_i^{(M_{\text{gen}})}], \\ k_i^{(M_{\text{gen}})}, & \text{else} \end{cases}, \quad (11)$$

式中: $k_i^{(M_{\text{gen}}+1)}$ 为选择操作后进入下一代种群的成员; $f[u_i^{(M_{\text{gen}}+1)}]$ 为实验个体 $u_i^{(M_{\text{gen}}+1)}$ 的适应度值; $f[k_i^{(M_{\text{gen}})}]$ 为目标个体 $k_i^{(M_{\text{gen}})}$ 的适应度值。

3.2 算法改进

由上述的 DE 算法的过程可知,算法的性能与变异因子 F 和交叉概率因子 M_{CR} 有很大的相关性,它们的值会直接影响下一代种群的搜索范围和搜索方向。为提高算法求最优解的性能,提出了自适应变异因子和交叉概率因子对算法进行改进。

3.2.1 变异因子优化

DE 算法中变异因子 F 一般取常数,但是它的取值会影响差分向量的大小,进而会影响算法的收敛和效率。由式(9)可知:当变异因子 F 较大时,收敛速度慢,求得全局最优解的精度低;当变异因子 F 较小时,收敛速度快,容易陷入局部最优解中。因此,提出了一种动态自适应变异因子,使 F 的值随迭代次数改变。 F 的表达式为

$$\begin{cases} F = F_{\min} + (F_{\max} - F_{\min}) e^{\delta} \\ \delta = 1 - \frac{G}{1 + G - M_{\text{gen}}} \end{cases}, \quad (12)$$

式中: F_{\max} 表示变异因子的最大值; F_{\min} 表示变异因子的最小值; G 为最大迭代次数。从式(12)中可以看出, 变异因子 F 呈现递减的趋势, 设置 F_{\max} 和 F_{\min} 的值分别为 1 和 0.1, 迭代次数为 1000, 得到变异因子 F 随迭代次数的变化曲线如图 1 所示。

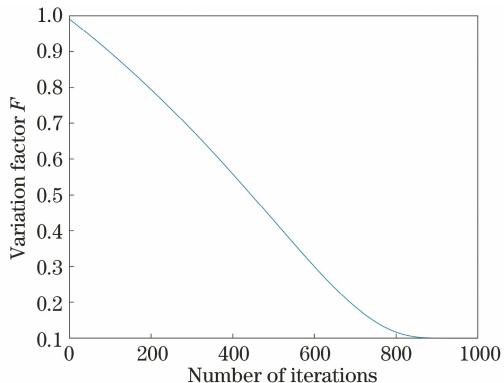


图 1 改进的变异因子 F 随迭代次数的变化

Fig. 1 Improved variation factor F varying with number of iterations

由图 1 可知: 算法开始时变异因子 $F=F_{\max}$ 为

$$M_{\text{CR}} = \begin{cases} M_{\text{CR}, M_{\text{gen}}} = \frac{1 + \cos \left[1 + \cos \left(6\pi \frac{M_{\text{gen}}}{G} \right) \right]}{2}, & M_{\text{gen}} \% 10 = 0, \\ M_{\text{CR}, M_{\text{gen}}}, & \text{else} \end{cases}, \quad (13)$$

式中: $M_{\text{CR}, M_{\text{gen}}}$ 为当前迭代次数下的交叉概率因子。

由式(13)可知, 交叉概率因子 M_{CR} 的值在 [0, 1] 之间。当交叉概率因子 M_{CR} 的值较大时, 变异个体对实验个体的贡献较多, 有利于保持种群的多样性, 且可加快收敛速度。当交叉概率因子 CR 的值较小时, 父代个体对实验个体的贡献较大, 当前种群信息容易被继承, 可保证算法搜索性能的稳定。设置迭代次数为 1000, 算法每迭代 10 次更新一次 M_{CR} 的值, 得到的交叉概率因子 M_{CR} 随迭代次数变化的曲线如图 2 所示。

从图 2 中可知: 交叉概率因子 M_{CR} 的值呈现振荡分布的形式; 算法初始阶段, 交叉概率因子 M_{CR} 的值较大, 能增加种群的多样性; 随着迭代次数的增加, 交叉概率因子 M_{CR} 的取值逐渐减小, 有利于继承优良的个体。如此反复几次, 有利于全局最优解的搜索。交叉概率因子 M_{CR} 的值不断变化, 实验个

最大值, 具有较大的变异率, 初始时期个体变化较快, 可以在进化初期保证种群的多样性, 避免算法陷入局部最优解; 随着算法迭代次数的增加, 变异因子 F 的值不断减小, 可避免最优解遭到破坏, 有利于保留优良的个体; 在算法后期, 当迭代次数为 900 左右时, 变异因子 F 递减到最小值 F_{\min} 处, 加快了算法后期的收敛速度, 提高了算法的搜索效率。因此, 变异因子 F 的动态自适应调整能有效地促进全局搜索和局部搜索达到平衡, 使得算法能快速准确地找到全局最优解。

3.2.2 交叉概率因子优化

由式(10)可知, 交叉概率因子 M_{CR} 决定了新生成的实验个体继承父代个体或变异个体的概率。 M_{CR} 值越大, 实验个体越容易继承变异个体的基因, 进而造成适应度好的个体被破坏。 M_{CR} 值越小, 越不易产生新的个体, 这会影响收敛过程。

DE 算法中交叉概率因子 M_{CR} 一般为常数, 这会影响算法的收敛能力, 使得算法容易陷入局部最优解中, 故动态地调整交叉概率, 能有效地优化收敛过程。根据肖鹏等^[22]提出的高动态自适应差分进化算法的思想, 提出了一种动态自适应交叉概率因子, 表达式为

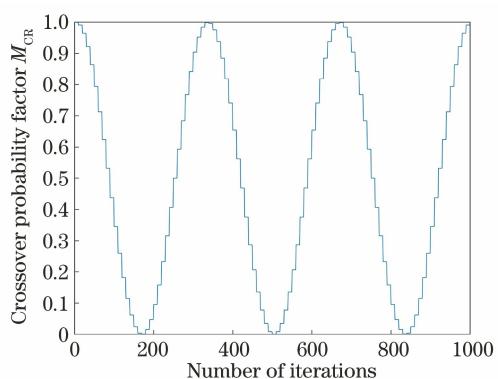


图 2 改进的交叉概率因子 M_{CR} 随迭代次数的变化

Fig. 2 Improved crossover probability factor M_{CR} varying with number of iterations

体能够随机继承变异个体和父代个体的基因, 既能保证全局搜索, 又能保持局部搜索, 可以提高算法的性能。

3.3 光谱匹配算法的实现

SADE 光谱匹配算法的具体实现流程如下：

1) 设定算法的参数初始值。设定种群大小 $M_{NP}=300$, 变异因子 F 设置如式(12)所示, 最大值为 $F_{max}=1$, 最小值为 $F_{min}=0.1$, 交叉概率因子 M_{CR} 设置如式(13)所示, 最大迭代次数为 $G=1000$, 当前迭代次数为 $M_{gen}=1$, 目标适应度值 M_{target} 设置为 0.0001, 搜索空间下界 k_{min} 的值一般取 0, 根据所要匹配的目标光谱的峰值改变搜索空间的上界 k_{max} 的值即可, 本文中 k_{max} 的值取 2;

2) 设置 LED 光谱与导入目标光谱。利用修正高斯函数设置 LED 光谱[式(3)中的 LED 光谱 S], 导入目标光谱[式(3)中的目标光谱 L], 并计算适应度初值 $f(M_{gen}=1)$;

3) 迭代次数 M_{gen} 加 1, 种群父代个体通过变异操作产生变异个体;

4) 种群父代个体与变异个体通过交叉操作产生实验个体;

5) 在实验个体和父代个体中选择适应度值好的作为下一代种群成员;

6) 若 $f(M_{gen}) \leq M_{target}$, 或者 $M_{gen} \geq G$, 则输出最优值对应个体。否则, 重复步骤 3)。

SADE 光谱匹配算法的流程图图 3 所示。

4 算法验证和评价

使用 MATLAB 软件, 编写了 SADE 算法的迭代程序。以光谱波段 380~800 nm 的 AM1.5 标准太阳光谱和 400~780 nm 的植被光谱作为目标光谱, 单色 LED 的光谱曲线用修正高斯函数表征, 利

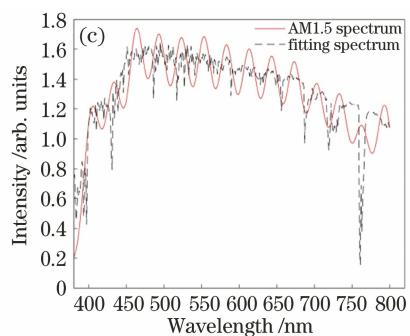
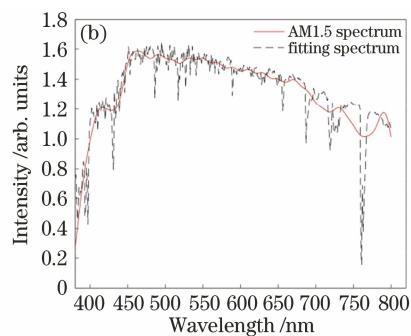
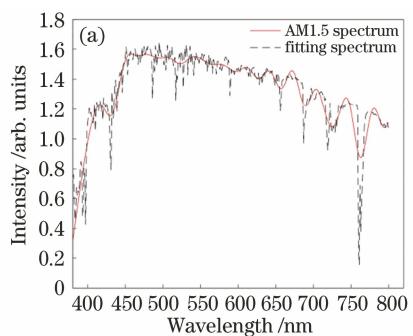


图 4 等间隔 LED 拟合 AM1.5 光谱。(a) 15 nm; (b) 20 nm; (c) 30 nm

Fig. 4 AM1.5 spectrum fitted by equally distributed LEDs. (a) 15 nm; (b) 20 nm; (c) 30 nm

采用波长范围 λ 在 395~795 nm 之间, FWHM $\Delta\lambda$ 同样为 30 nm, 峰值波长 λ_0 间隔相同, 分别为 15 nm(27 种 LED)、20 nm(21 种 LED)、30 nm(14 种 LED) 的单色 LED 光谱构成式(5)中的光谱数据

用不同峰值波长的 LED 进行光谱拟合。

4.1 等间隔 LED 仿真

采用波长范围 λ 在 375~825 nm 之间, FWHM $\Delta\lambda$ 为 30 nm, 峰值波长 λ_0 间隔分别为 15 nm(30 种 LED)、20 nm(23 种 LED) 和 30 nm(16 种 LED) 的单色 LED 光谱构成式(5)中的光谱数据矩阵 S , 将 AM1.5 标准太阳光谱作为目标光谱数据矩阵 L , 利用 SADE 算法计算方程系数矩阵 K 的非负最小二乘解。光谱匹配结果如图 4 所示。

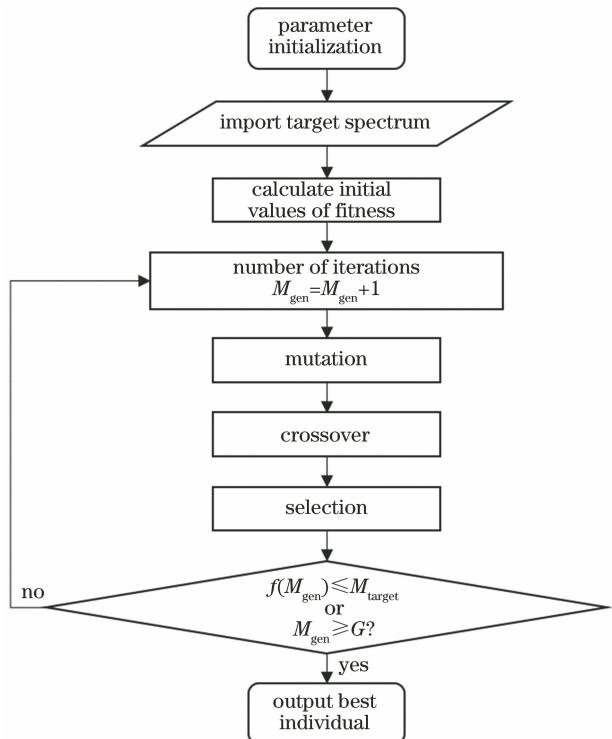


图 3 SADE 光谱匹配算法流程图

Fig. 3 Flow chart of SADE spectrum matching algorithm

矩阵 S , 将植被光谱作为目标光谱数据矩阵 L , 利用 SADE 算法计算方程系数矩阵 K 的非负最小二乘解。光谱匹配结果如图 5 所示。

从图 4 和图 5 中可以明显看出, 选用的单色

LED 峰值波长间隔越小, 所选用的 LED 种类越多, 与目标光谱的匹配度越高。

利用 R^2 和 RMSE 来评价 SADE 算法拟合的光谱曲线与目标曲线的匹配程度, 其拟合结果如表

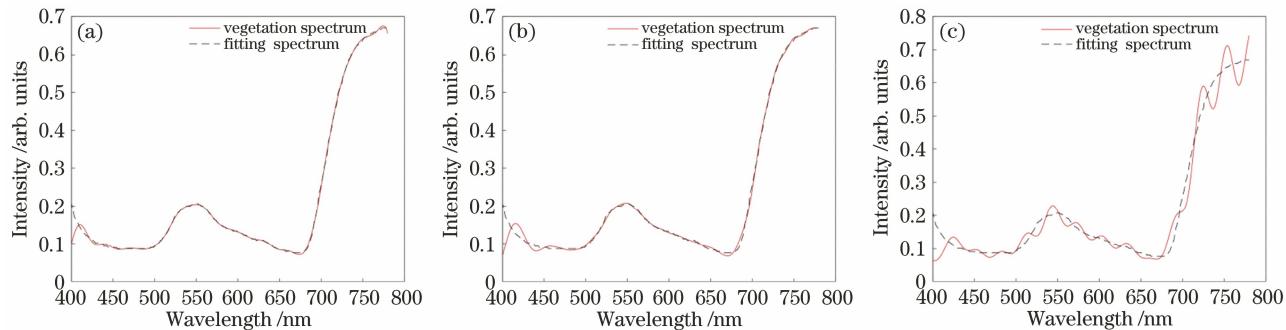


图 5 等间隔 LED 拟合植被光谱。(a) 15 nm;(b) 20 nm;(c) 30 nm

Fig. 5 Vegetation spectrum fitted by equally distributed LEDs. (a) 15 nm; (b) 20 nm; (c) 30 nm

表 1 SADE 算法拟合的光谱曲线的结果

Table 1 Results of spectral curves fitted by SADE algorithm

Target spectrum	Band range /nm	LED type	R^2	RMSE
AM1.5 spectrum	380~800	Peak wavelength with 15 nm interval	0.9934	0.1045
		Peak wavelength with 20 nm interval	0.9913	0.1197
		Peak wavelength with 30 nm interval	0.9824	0.1703
Vegetation spectrum	400~780	Peak wavelength with 15 nm interval	0.9978	0.0131
		Peak wavelength with 20 nm interval	0.9969	0.0154
		Peak wavelength with 30 nm interval	0.9849	0.0342

4.2 算法验证与比较

由于实际应用中的 LED 芯片的峰值波长并不是等间隔的, FWHM 也不是相等的, 因此从工程实现的角度来分析算法的实际使用性能。对 AM1.5 光谱曲线 380~800 nm 波段和植被光谱曲线 400~780 nm 波段, 进行间隔不相等的单色 LED 的实验。采用实验室已有的 25 种不同峰值波长和 FWHM 的 LED 进行光谱拟合, LED 参数如表 2 所示, 光谱拟合结果如图 6 所示。

从图 6(a)中可以看出, 使用 25 种不同峰值波长和 FWHM 的 LED 混合的太阳光谱曲线能很好地体现 AM1.5 目标太阳光谱的变化趋势。从拟合光谱中可以看出: 在 380~450 nm 波段之间, 光谱曲线很好地逼近目标光谱曲线, 说明在光谱曲线变化明显的波段适合选用 FWHM 值相对较小的 LED 进行混合; 在 450~580 nm 波段之间的拟合效果较好, 说明在光谱曲线变化较平缓的波段, 适合选用的是 FWHM 值相对较大的 LED 进行混合; 在 700~800 nm 波段拟合曲线出现骤降和骤升, 这是因为目标光谱曲线变化较大、波谷较多, 此时选用峰值间隔和 FWHM 较大的单色 LED 不能很好地满足其变

化趋势, 若增加 LED 数目, 利用峰值间隔接近且 FWHM 值小的单色 LED 应该能提高拟合的效果。

表 2 实验室 25 种 LED 的峰值波长和 FWHM

Table 2 Peak wavelengths and FWHMs of 25 kinds of LEDs in laboratory

Peak wavelength / nm	FWHM / nm	Peak wavelength / nm	FWHM / nm
380	10	560	40
395	15	590	20
400	17	600	15
410	17	610	15
420	16	630	15
430	19	645	17
450	20	660	17
460	22	680	20
480	26	700	22
500	25	730	22
520	30	760	24
530	30	780	25
545	40		

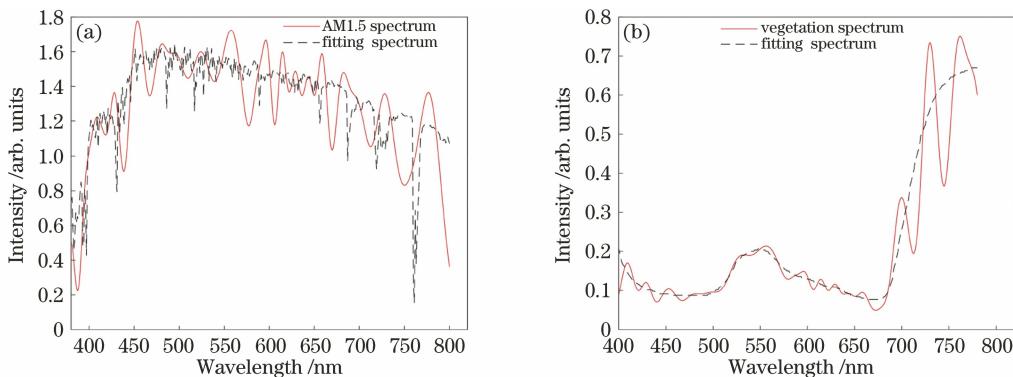


图 6 SADE 算法拟合 AM1.5 光谱和植被光谱。(a) AM1.5 光谱;(b)植被光谱

Fig. 6 AM1.5 spectrum and vegetation spectrum fitted by SADE algorithm. (a) AM1.5 spectrum; (b) vegetation spectrum

从图 6(b)中可以看出,利用 25 种 LED 拟合的光谱也能很好地体现植被光谱的变化趋势。在 400~700 nm 波段混合光谱曲线很好地贴近目标光谱曲线,在 700~780 nm 波段拟合的效果不是很好,这是因为选用的 LED 种类少、峰值间隔较大,不能很好地贴合目标光谱曲线的变化趋势。

为进一步说明 SADE 算法的性能,将其与模拟退火算法(SA)和遗传算法(GA)进行对比。由 3.3 节可知,SADE 算法中变异因子和交叉概率因子是自适应的,故只需根据目标光谱的峰值修改搜索上界的值即可。SA 算法中的初始温度、终止温度、降温速率和任意温度下的迭代次数等参数均需不断调整以达到较好的匹配效果。GA 算法中的编码长度、选择算子、交叉算子和变异算子等参数也需不断调整以达到较好的匹配效果。利用 SA 和 GA 算法对 AM1.5 光谱曲线 380~800 nm 波段和植被光谱曲线 400~780 nm 波段进行间隔不相等的单色 LED 的拟合实验,通过不断调整两种算法中的各种参数得到了较好的拟合结果,并与 SADE 算法进行

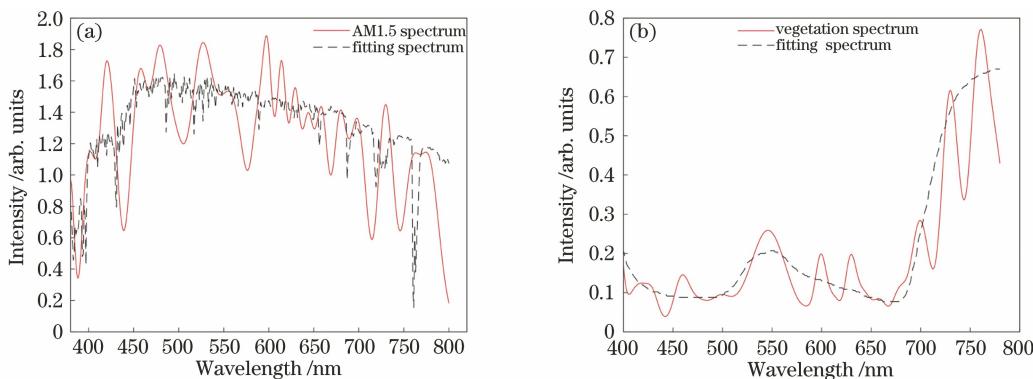


图 7 SA 算法拟合的 AM1.5 光谱和植被光谱。(a) AM1.5 光谱;(b)植被光谱

Fig. 7 AM1.5 spectrum and vegetation spectrum fitted by SA algorithm. (a) AM1.5 spectrum; (b) vegetation spectrum

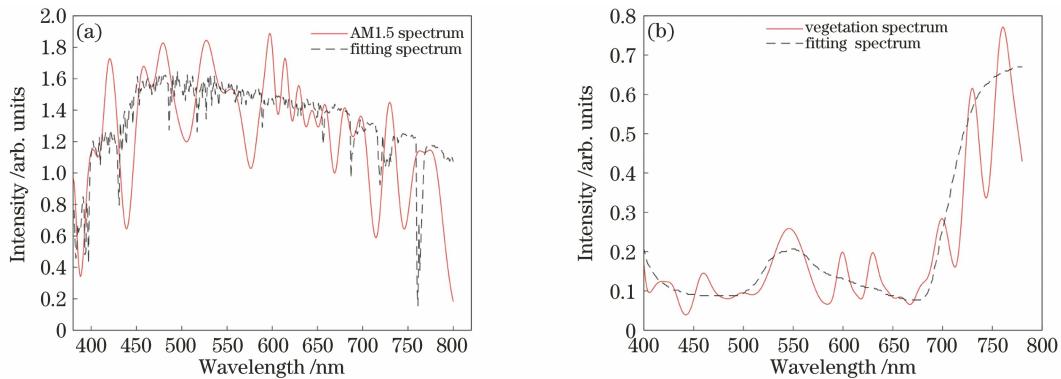


图 8 GA 算法拟合的 AM1.5 光谱和植被光谱。(a) AM1.5 光谱;(b)植被光谱

Fig. 8 AM1.5 spectrum and vegetation spectrum fitted by GA algorithm. (a) AM1.5 spectrum;
(b) vegetation spectrum

5 结 论

基于理论和实践的要求,提出了 SADE 算法,对 DE 算法中的两个关键参数——变异因子 F 和交叉概率因子 M_{CR} 进行了自适应优化,避免了 SA、GA 算法等参数靠经验设置的情况,提高了收敛的效率且可以防止算法陷入局部最优解,并将改进的算法用于 LED 的光谱匹配中。在仿真中将相关指数 R^2 和 RMSE 作为评价标准,采用峰值间隔分别为 15, 20, 30 nm 的等间隔单色 LED 拟合 AM1.5 标准太阳光谱和植被光谱,均达到了很好的匹配度。利用实验室现有的峰值波长间隔不等的单色 LED 进行最佳拟合求解实验,并与 SA 和 GA 算法进行了对比,发现所提算法结果较好。综上所述,所提的 SADE 光谱匹配算法不需要繁琐地设置相应参数,便可求解出不同波长单色 LED 的数值比例,故将其应用于光谱匹配过程中是可行的,具有一定的工程实践意义。

参 考 文 献

- [1] 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.
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.
- [2] 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.
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.
- [3] 迟楠,卢星宇,王灿,等. 基于 LED 的高速可见光通信[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0300001.
- Chi N, Lu X Y, Wang C, et al. High-speed visible light communication based on LED [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0300001.
- [4] 吴宝宁,李宏光,俞兵,等. LED 光学参数测试方法研究[J]. 应用光学, 2007, 28(4): 513-516.
Wu B N, Li H G, Yu B, et al. Measurement of optical parameters for LEDs [J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28(4): 513-516.
- [5] 丁天平,郭伟玲,崔碧峰,等. 温度对功率 LED 光谱特性的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(6): 1450-1453.
Ding T P, Guo W L, Cui B F, et al. The effect of temperature on the PL spectra of high power LED [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(6): 1450-1453.
- [6] 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, September 26-27, 2014, Trivandrum, India. New York: IEEE Press, 2014: 111-117.
- [7] 范铎,白素平,闫钰锋,等. 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.
Fan D, Bai S P, Yan Y F, et al. The theory research of solar spectrum simulated by LED [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2011, 34(3): 16-18.
- [8] Fryc I, Brown S W, Ohno Y. Spectral matching with an LED-based spectrally tunable light source [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5941: 59411I.
- [9] Brown S W, Santana C, Eppeldauer G P. Development of a tunable LED-based colorimetric source [J]. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 2002, 107(4): 363-371.
- [10] 陈风,袁银麟,郑小兵,等. LED 的光谱分布可调光

- 源的设计 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2060-2064.
- Chen F, Yuan Y L, Zheng X B, et al. Design of spectral tunable LED light source [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(11): 2060-2064.
- [11] 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.
- Zhang Y W, Xu L, Wan S. Synthesizing algorithm for LED standard solar spectrum lamp [J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(5): 596-600.
- [12] 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.
- Liu H X, Ren J W, Li B Y, 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.
- [13] 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.
- 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.
- [14] 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): 0730003.
- Gan R T, Guo Z N, Lin J B, et al. The genetic algorithm in the application of the LED light source spectral matching technology [J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(7): 0730003.
- [15] 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.
- 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.
- [16] 王宏民, 唐帆, 薛萍. 基于单色 LED 的太阳光谱合成方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(9): 093004.
- Wang H M, Tang F, Xue P. A solar spectrum synthesis method based on monochrome LED [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(9): 093004.
- [17] 沈海平, 冯华君, 潘建根, 等. LED 光谱数学模型及其应用 [C]//走近 CIE 26th——中国照明学会学术年会. 北京: 中国照明学会, 2005: 83-85.
- Shen H P, Feng H J, Pan J G, 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.
- [18] 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.
- Zhu J Y, Ren J W, Li B Y, et al. Synthesis of spectral distribution for LED-based source with tunable spectra [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2010, 31(6): 882-887.
- [19] 郑少林, 王霞, 金伟其, 等. 基于遗传算法的夜天光光谱匹配方法研究 [J]. 光子学报, 2016, 45(3): 0330002.
- Zheng S L, Wang X, Jin W Q, et al. Research of night sky radiation spectral matching method based on genetic algorithm [J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(3): 0330002.
- [20] 杨彦荣, 戴云. 基于均方根误差和相关系数评价人眼像差对视网膜像质的影响 [J]. 光学学报, 2017, 37(3): 0333001.
- Yang Y R, Dai Y. Evaluation of the effect on eye aberration on retinal imaging quality based on the root mean square error and correlation coefficient [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(3): 0333001.
- [21] Storn R, Price K. Differential evolution: a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces [J]. Journal of Global Optimization, 1997, 11(4): 341-359.
- [22] 肖鹏, 邹德旋, 张强. 一种高效动态自适应差分进化算法 [J]. 计算机科学, 2019, 46(S1): 124-132.
- Xiao P, Zou D X, Zhang Q. Efficient dynamic self-adaptive differential evolution algorithm [J]. Computer Science, 2019, 46(S1): 124-132.