

文章编号: 1000-7032(2018)06-0862-08

# 基于有效集算法的大功率单色 LED 太阳光谱模拟仿真

张玉宝<sup>1</sup>, 董 礼<sup>1\*</sup>, 张国英<sup>2</sup>

(1. 内蒙古科技大学 机械工程学院, 内蒙古 包头 014010;

2. 鄂尔多斯市莱福士光科技有限公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

**摘要:** 利用单色 LED 实现对 AM1.5 标准太阳光谱可见光(380 ~ 780 nm)波段和标准光源 CIE-D65 的匹配, 提出了通过有效集算法作为目标光谱的匹配算法, 将 Epitex 公司的大功率单色 LED 的峰值波长和半高全宽数据作为有效集, 并建立了一个数据库。将相关指数  $R^2$  最大作为优化目标, 通过 MATLAB 编程求解超定方程组的最小二乘解求出拟合所需要的单色 LED 的种类和数量。拟合 AM1.5 可见光的最佳组合中使用 24 种单色 LED, 相关指数  $R^2$  高达 0.850 2, 拟合标准光源 CIE-D65 的最佳组合中使用 25 种单色 LED, 相关指数  $R^2$  高达 0.940 5。进行了增加 LED 和减少 LED 的优化实验。得出的结果对工程实践中单色 LED 拟合太阳光谱的研究提供了理论基础。

**关键词:** AM1.5; 单色 LED; 光谱拟合; 最佳组合; 相关指数

中图分类号: TP391.9; O433.4 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20183906.0862

## Simulation of High Power Monochromatic LED Solar Spectrum Based on Effective Set Algorithm

ZHANG Yu-bao<sup>1</sup>, DONG Li<sup>1\*</sup>, ZHANG Guo-ying<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;

2. Erdos City Raffles Light Technology Co. Ltd., Ordos 017000, China)

\* Corresponding Author, E-mail: yuzubinglei@163.com

**Abstract:** The matching of AM1.5 standard solar spectrum in visible light (380 – 780 nm) with standard light source of CIE-D65 was realized using monochromatic LED, and the matching algorithm of the target spectrum was put forward using active set algorithm. The peak wavelength and FWHM of Epitex's high-power monochromatic LED were used as the effective data set, and a database was established. The maximum correlation index  $R^2$  was used as the optimization objective. The least squares solution of overdetermined equations was solved by MATLAB programming, and the type and quantity of monochromatic LED needed for fitting were obtained. 24 kinds of monochromatic LED are used in the best combination of AM1.5 visible light fitting, and the correlation index  $R^2$  is as high as 0.850 2. 25 kinds of monochromatic LED are used in the best combination of standard light source CIE-D65 fitting, and the correlation index  $R^2$  is as high as 0.940 5. The optimization experiments of increasing and reducing LED numbers were carried out too. The results provide a theoretical basis for the study of monochromatic LED fitting solar spectrum in engineering practice.

**Key words:** AM1.5; monochromatic LED; spectral fitting; optimum combination; correlation index

收稿日期: 2017-10-20; 修订日期: 2018-02-28

基金项目: 2016 年国家火炬计划(2015GH051184)资助项目

Supported by 2016 National Torch Program(2015GH051184)

## 1 引言

太阳光是最重要的自然光源,具有光照比较连续、光谱失配度好、辐照均匀性好、准直性高等优点,但存在光照强度受时间和气候的影响比较大、光谱分布不均匀、总的辐照度不能调节等缺点。许多学者都在研究太阳光谱模拟技术。在卫星姿态控制和热平衡实验中,专门研制了中小型太阳模拟器<sup>[1]</sup>。在建材行业中,材料的耐辐照老化实验也会用到太阳模拟器。农业科学中的植物发育和培育良种以及人体健康保健也离不开太阳模拟技术<sup>[2]</sup>。但是之前并没有非常准确的标准来定义太阳光光谱分布,国际组织(IEC)规定AM1.5<sup>[3]</sup>为标准太阳光谱辐射,其波长范围是300~1 100 nm,总的辐照度为1 000 W/m<sup>2</sup><sup>[4]</sup>。单色LED较传统的汞灯表现出抗压能力强、体积小、光效高、使用寿命长、波长可以覆盖可见光部分<sup>[5]</sup>、单色性能好、半高全宽窄、发光为非相干光的优点<sup>[6]</sup>。目前单色LED叠加拟合太阳光谱主要有以下两个研究方向:一是范铎等<sup>[7]</sup>将不同单色的LED排成阵列,改变经过LED的电流的方法,如朱继亦等用程控技术控制每个LED的开合以及驱动电流<sup>[8]</sup>。该方法操作繁琐,不停地改变通过LED的电流会使LED的发热严重,造成峰值波长和半高全宽(FWHM)产生偏移。二是甘汝婷等<sup>[9]</sup>通过反演法,在原有光谱拟合的前提下加入适当的判别条件,根据光谱特性对仿真的目标光谱进行分析判别,反演得到所需要的最佳LED波段和最小的LED单元数。该方法虽然准确,但是得到的LED的单元数都不是整数,不适用于实际工程中,并且目前的技术还不能研制出等波长间隔的半高全宽非常窄的单色LED。徐广强等<sup>[10]</sup>采用LED内部光子在二维空间内联合态密度函数作为辐射模型基于最小二乘解求出拟合精度最高的LED的种类和数量,该方法拟合模型虽然准确,但是却将影响LED的重要参数半高全宽拟合了,实际上没有用到半高全宽的具体数值。

本文主要侧重于工程实践,利用市面上Epitex公司SMBB系列的大功率单色LED并建成大功率单色LED的数据库,将已知的LED峰值波长和半高全宽作为已知数据,拟合AM1.5标准太阳光谱中可见光波长的光谱。采用修正高斯模型

为单色LED的发光模型,基于有效集算法通过求解超定方程组的最小二乘解筛选有效集中的数据,得到拟合精度最高的LED的种类和数目。并且使用的单色LED的半高全宽并不相同,这样就可以灵活地找到目标光谱的波峰和波谷的位置,然后再根据残差图分析拟合的精度和拟合模型的精度,并且为了验证模型和方法的合理性进行了优化验证实验。拟合精度虽然没有反演法的精度高,但是具有很高的可行性,并为实际的工程实践提供了理论指导。

## 2 光谱构造原理及拟合方法

### 2.1 LED的光谱辐射模型

根据LED光源的物理特性可知,对于单个LED在其光轴方向上单位立体角内的辐射功率随光谱的分布模型可用修正高斯函数<sup>[11]</sup>来近似,具体关系式如下:

$$S(\lambda) = C \exp \left[ -3.2213 \left( \frac{\lambda - \lambda_c}{\Delta\lambda} \right)^2 \exp \left( -0.3 \left| \frac{\lambda - \lambda_c}{\Delta\lambda} \right| \right) \right], \quad (1)$$

其中 $S(\lambda)$ 是单个LED辐射强度, $\lambda_c$ 是峰值波长, $\Delta\lambda$ 是半高全宽, $C$ 是相对振幅。

### 2.2 光谱的匹配

由于太阳光光谱可以看成是多个单色LED叠加而成的,不同的单色LED叠加的数学模型可表示为:

$$f(\lambda) = \sum_{i=1}^i k_n S_n(\lambda), \quad (2)$$

式中 $f(\lambda)$ 为目标光谱曲线, $S_n(\lambda)$ 表示不同单色LED的光谱, $k_n$ 为拟合系数。

为了方便计算记向量 $\mathbf{S}^1 = [S_1(\lambda_1), S_1(\lambda_2), S_1(\lambda_3), \dots, S_1(\lambda_i)]^T$ ,LED的光谱矩阵可以改写成 $\mathbf{A} = (\mathbf{S}^1, \mathbf{S}^2, \mathbf{S}^3, \dots, \mathbf{S}^n)$ ,记系数矩阵 $\mathbf{X} = (k_1, k_2, k_3, \dots, k_n)^T$ ,目标光谱矩阵为 $\mathbf{Y} = [f(\lambda_1), f(\lambda_2), f(\lambda_3), \dots, f(\lambda_i)]^T$ ,将其表示成矩阵的形式为:

$$\begin{bmatrix} S_1(\lambda_1) & S_2(\lambda_1) & \cdots & S_n(\lambda_1) \\ S_1(\lambda_2) & S_2(\lambda_2) & \cdots & S_n(\lambda_2) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \vdots \\ S_1(\lambda_i) & S_2(\lambda_i) & \cdots & S_n(\lambda_i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(\lambda_1) \\ f(\lambda_2) \\ \vdots \\ f(\lambda_i) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

将其简化表示成:

$$AX = Y, \quad (4)$$

实际中目标 AM1.5 太阳光谱在 380 ~ 780 nm 波长范围内有 34 个散点, 即  $\lambda_i$  为 34。若计算得出的  $k$  的数值小于 34, 那么该问题就属于非线性的超定方程问题<sup>[12]</sup>。非线性超定方程一般没有解析解, 但是可以求出它的广义最小二乘解  $X^*$ , 使其满足:

$$\|Y - AX^*\|_2 = \min \|Y - AX\|_2 \text{ 且 } x \in R^*, \quad (5)$$

在非线性最小二乘问题中常用相关指数  $R^2$  来评价拟合情况的好坏, 相关指数是一个取值在 0 ~ 1 之间的数, 越接近 1 表示拟合的精度越高, 拟合的方案越好, 其定义为:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_a - y)^2}{\sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2}, \quad (6)$$

其中  $y$  为准确值,  $y_a$  为估计值,  $\bar{y}$  为期望值。

误差可以由误差的平方和 SSE (Sum of squares for error,  $\sigma_{\text{SSE}}$ ) 和残差 (Residual,  $e$ ) 表示, 计算公式如下:

$$\sigma_{\text{SSE}} = \sum_{i=1}^n (y_a - y)^2, \quad (7)$$

$$e = y - y_a. \quad (8)$$

### 3 有效集法

现实中存在很多有界约束优化问题, 模型如下:

$$\min f(x) \quad \text{s.t.} \quad l \leq x \leq u, \quad (9)$$

其中  $f(x)$  是优化的目标函数,  $l$  为下界,  $u$  为上界。

有效集法是求解式(9)的一种十分成功的方法, 求解时定义在点  $x^*$  (最优解点) 处的有效集为:

$$S(x^*) = L(x^*) \cup U(x^*), \quad (10)$$

其中

$$L(x^*) = \{i: x_i^* = l_i\}, \quad U(x^*) = \{i: x_i^* = u_i\}. \quad (11)$$

有效集法<sup>[13]</sup>的基本思想就是从问题的某个初始点  $x^0$  出发, 随着算法的进行, 在每一步迭代产生一个有效集的估计值  $S(x^k)$ , 将问题转化为等式约束问题, 即进行寻优迭代过程, 通过反复多次筛选, 使得  $S(x^k) \rightarrow S(x^*)$ , 获得问题的最优

解。有效集法是一种增量的迭代方法, 迭代的过程就是不断地在识别有效集和工作集的过程, 当工作集和有效集都被识别时, 优化问题得到了最优解<sup>[14]</sup>。有效集方法的最大难点就是初始点的选择, 初始点选取的好坏会直接影响到迭代的次数和结果, MATLAB 软件能很好地解决这一问题。

首先导入已知的 AM1.5 可见光波段数据  $\lambda$  和  $f(\lambda)$ , 将调研得到的 Epitex 公司的大功率单色 LED 峰值波长  $\lambda_p$  和半高全宽  $\Delta\lambda$  导入数据库作为有效集, 然后将已知的大功率单色 LED 的峰值波长  $\lambda_p$  半高全宽  $\Delta\lambda$  带入拟合公式(1), 将相关指数  $R^2$  最大写成最优化函数的优化目标。由于解的结构是非负的, 定义初始值  $x^0$  (非负), 利用 MATLAB 编程得出满足  $R^2$  最大的解, 输出最优解  $x^*$  和相应使用的大功率 LED 的峰值波长  $\lambda_p$  和半高全宽  $\Delta\lambda$ 。

### 4 最佳拟合结果及其分析

通过 MATLAB 软件对 AM1.5 可见光波段进行光谱拟合, 得到最优的 LED 的峰值波长、半高全宽和拟合系数( $P$ ), 数据如表 1 所示。

最优的比例组合采用 24 种单色 LED, 其中紫色 4 种、蓝色 4 种、绿色 4 种、橙色 2 种、红色 10 种, 得出残差平方和 SSE 为 0.364 3, 相关指数  $R^2$  为 0.850 2。图 1 和图 2 为最优解下的单色 LED 匹配 AM1.5 的光谱图和残差图。

在图 1 上可以清楚地看出, 空心圆圈为已知的 AM1.5 的散点, 实心圆点为拟合求出的数据点, 曲线为拟合曲线。众所周知, 拟合曲线是由无数的拟合点连接得到的, 拟合点的精确程度决定了拟合曲线的精确程度。以往研究者的模型都比

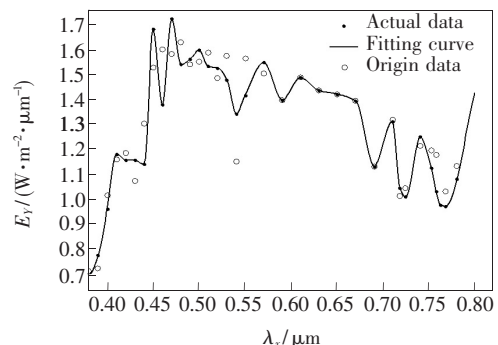


图 1 最佳 24 种单色 LED 的光谱匹配图

Fig. 1 Spectral matching diagram of the best 24 monochromatic LED

表1 最优解的24种LED的组合比例

Tab.1 Ratio of the 24 LED combinations of the optimal solution

颜色	$\lambda_p/\text{nm}$	$\Delta\lambda/\text{nm}$	$P$	颜色	$\lambda_p/\text{nm}$	$\Delta\lambda/\text{nm}$	$P$
紫光	375	18	0.642 6	橙光	600	15	3.972 2
紫光	395	20	0.652 4	橙光	610	15	0.204 2
紫光	405	12	0.513 6	红光	630	16	1.388 4
紫光	415	15	0.852 3	红光	645	20	0.098 5
蓝光	430	20	0.987 3	红光	660	16	3.590 7
蓝光	450	18	1.447 1	红光	690	25	0.177 8
蓝光	470	20	1.277 7	红光	700	21	1.523 3
蓝光	490	30	1.054 9	红光	720	20	0.422 1
绿光	505	30	0.574 2	红光	735	25	0.222 9
绿光	525	35	1.032 3	红光	740	21	0.314 1
绿光	545	36	0.589 4	红光	750	28	0.402 0
绿光	565	25	1.522 5	红光	780	30	0.287 0

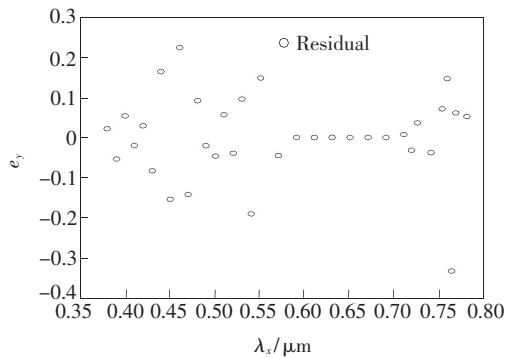


图2 各波长处的残差图

Fig.2 Residual plots of each wave's merit

较复杂,没有精确到某一个波段或是某一点,本文将AM1.5标准太阳光谱可见光数据作为已知,画出散点,可以清楚地看出每一个波长对应的光谱辐照度,也求出了每一个散点波长对应的拟合数据,这样做出来的曲线更加真实可信。

根据已知的AM1.5散点可大致分成三段:第一段在380~550 nm波段,相邻小波段间峰起伏变化比较突出,且峰值间隔较小,急促的起落使得目标曲线中出现许多难以复制的个性细节。该波段内AM1.5呈现明显的上升趋势,且上升的速度比较快,在390~400 nm上升的幅度最大,到了450~550 nm趋于平稳状态,在480 nm达到了最大光谱辐照度,且在530~540 nm下降最快。该波段的仿真误差较大,有两种原因造成这样的结果:一方面,AM1.5作为目标谱线其中包含众多明显峰以及不明显的隐藏峰,这些峰的高低起伏

影响到拟合光谱的准确性;另一方面,由于相邻波长间隔较小,且波峰波谷的起落较大,拟合曲线不能同时满足较大的跳动程度。此外,380~550 nm波段内使用了11种大功率单色LED,在450~550 nm误差较大的波段使用的单色LED的半高全宽都比较大,说明在光谱变化比较陡峭的波段不适合使用半高全宽值较大的LED。进而再看该波段内的残差图,残差值都分布在 $0.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 范围内,在460 nm左右的误差较大,这是由于440~460 nm急剧上升的目标光谱导致的。第二段为550~690 nm波段,该波段内的散点分布比较均匀,没有急促的上升或者下降,拟合的效果最好。另外从残差图可以看出,该波段内的残差也非常小,有的残差逼近于0,说明拟合点和目标点基本没有误差。在550~690 nm波段使用了7种单色的LED,并且这7种单色LED的半高全宽值较小,说明光谱变化平稳的波段更适合使用半高全宽较小的单色LED,组合中LED的半高全宽越小越有利于呈现目标光谱的细节变化。另外使用橙色600 nm半高全宽15 nm和红色660 nm半高全宽16 nm的单色LED数量较多,但却没有影响到拟合的精度,说明拟合的精度并不会受使用的单色LED数量的影响。第三段为690~780 nm波段,该波段内的散点分布比较密集,在750 nm处出现了聚堆的现象,且在760 nm处达到了最低的光谱辐射强度。由残差图分析可知,该波段的拟合情况居中,共使用了6种单色LED,

使用最大的 LED 的波长值为 780 nm。在 762.5 nm 拟合的误差较大,达到了  $0.314 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ,由拟合的结果可知在 760 nm AM1.5 骤降,并且在 767.5 nm 又骤升,这种急促的骤降和骤升使拟合结果出现了较大的误差。但是该程序为了保证整体拟合效果最佳,权衡了整体和局部的关系,以牺牲 762.5 nm 的部分细节来保证整体的拟合达到最优。

接下来对标准光源 CIE-D65<sup>[15]</sup> 也进行了拟合分析,在 380 ~ 780 nm 可见光范围内,每隔 10 nm 选一个散点作为目标散点,由结果可知使用了 25 种大功率的单色 LED,如表 2 所示,共用 5 种紫光、4 种蓝光、4 种绿光、1 种黄光、2 种橙

光、9 种红光。得出残差平方和 SSE 为 0.091 0,相关指数  $R^2$  高达 0.940 5。表 2 为模拟 D65 标准光源所用到的最优的 LED 的峰值波长、半高全宽和拟合系数( $P$ )。图 3 和图 4 分别为最优解下的单色 LED 匹配标准光源 D65 的光谱图和残差图。

采用的单色 LED 数据库与 AM1.5 的相同,这一次的拟合指数高达 0.940 5,说明目标光谱的变化程度直接影响着拟合的准确程度,且使用了 25 种单色 LED,使用的单色 LED 的种类越多拟合精度越高。由残差图分析可知在 380 ~ 500 nm 波段的误差比较大,在 500 ~ 720 nm 波段的误差最小,在 720 ~ 780 nm 误差居中。由误差分析可知 D65 和 AM1.5 在 450 nm 左右的误差都比较大,

表 2 最优解的 25 种 LED 的组合比例

Tab. 2 Ratio of the 25 LED combinations of the optimal solution

颜色	$\lambda_p/\text{nm}$	$\Delta\lambda/\text{nm}$	$P$	颜色	$\lambda_p/\text{nm}$	$\Delta\lambda/\text{nm}$	$P$
紫光	375	18	0.435 7	黄光	570	15	0.053 5
紫光	395	20	0.512 8	橙光	600	15	2.547 3
紫光	405	12	0.466 1	橙光	610	15	0.080 6
紫光	415	15	0.624 2	红光	630	16	0.807 1
紫光	420	16	0.006 7	红光	645	20	0.045 0
蓝光	430	20	0.816 0	红光	660	16	2.017 6
蓝光	450	18	1.112 7	红光	690	25	0.202 3
蓝光	470	20	0.920 2	红光	700	21	0.698 6
蓝光	490	30	0.759 8	红光	720	20	0.242 4
绿光	505	30	0.390 0	红光	735	25	0.109 6
绿光	525	35	0.667 7	红光	740	21	0.281 6
绿光	545	36	0.581 3	红光	770	25	0.032 6
绿光	565	25	0.818 4				

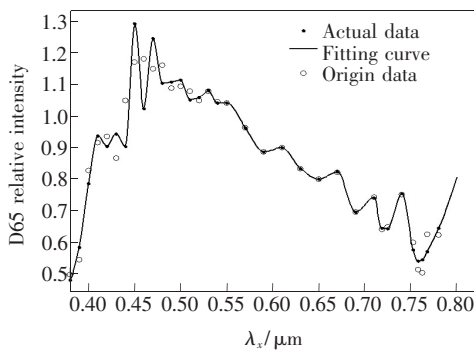


图 3 D65 与 25 种单色 LED 的光谱匹配图

Fig. 3 Spectral matching diagram between D65 and 25 monochromatic LED

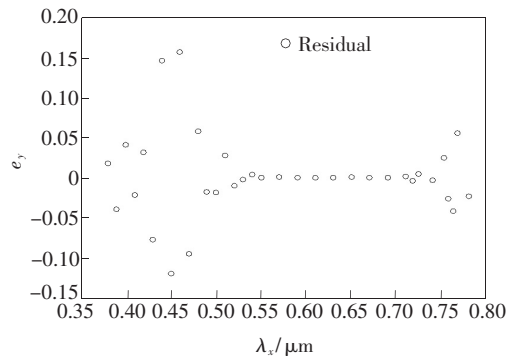


图 4 D65 各波长处的残差

Fig. 4 Residual plots of D65 wave strengths

且在 450 nm 使用 LED 种类也相同,可能是单色 LED 峰值波长和半高全宽数据不全造成的。接下来为了验证最佳组合的可靠性和可优化性,进行如下优化分析实验。

### 5 优化拟合实验分析

最佳的单色 LED 组合虽然能很好地拟合 AM1.5 和标准光源 D65,但是使用的单色 LED 种类较多,另外为了验证最佳组合的可靠性和方案的可优化性,分别在最佳组合中依次增加或减少单色 LED 的种类,每次增加或减少单色 LED 的种类为 1 种。增加试验中添加的单色 LED 种类为随机,但与最佳组合中已选用的单色 LED 种类不重复,减少试验中,每次删除拟合中对整体贡献最小的单色 LED,添加或减少 LED 后运行优化程序,得到相关指数与 LED 种类变化的关系见图 5。

在递增实验中,随机增加不同种类的单色 LED 并没有提高相关指数  $R^2$  的值,说明在最优解的条件下随机增加单色 LED 并不能改变混合光谱对 AM1.5 光谱的拟合效果。在递减实验中,从 24 种单色 LED 减少到 14 种单色 LED,LED 种类数与相关指数  $R^2$  符合 Logit 函数分布,而 Logit 函数模型可以预测模型和方案的准确性,说明利用大功率单色 LED 模拟 AM1.5 方案是可行的。具

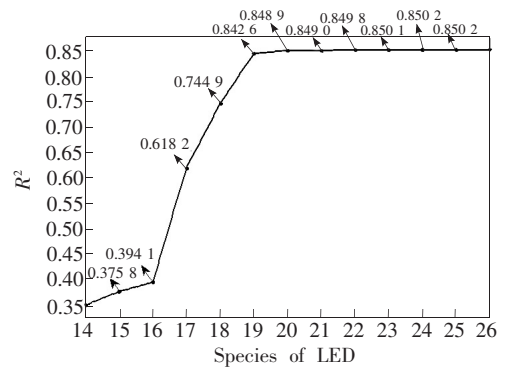


图 5 递增和递减实验中相关指数与 LED 种类变化的关系  
Fig. 5 Relationship between correlation index and species variation of LED in increasing and descending experiments

体在递减实验中,当减少的 LED 的种类较少时,对拟合的影响比较小。图 6 中的 (a) ~ (d) 给出了在最优的组合减少到 22 种、20 种、17 种、16 种时,混合光谱对 AM1.5 拟合情况。从拟合结果可以发现最佳组合的 24 种 LED 直到减少到 19 种时,拟合指数  $R^2$  变为 0.8426,仅仅减小了 0.0076,拟合情况基本与最优解相近,能很好地呈现目标光谱的细节变化。但是在接下来 19 种继续往下减时,每减少一种单色 LED,  $R^2$  的值都有明显的降低,最严重的是从 17 种减少到 16 种时,  $R^2$  的值从 0.6182 下降到 0.3941,下降了 0.2241。而且在 16 种 LED 以

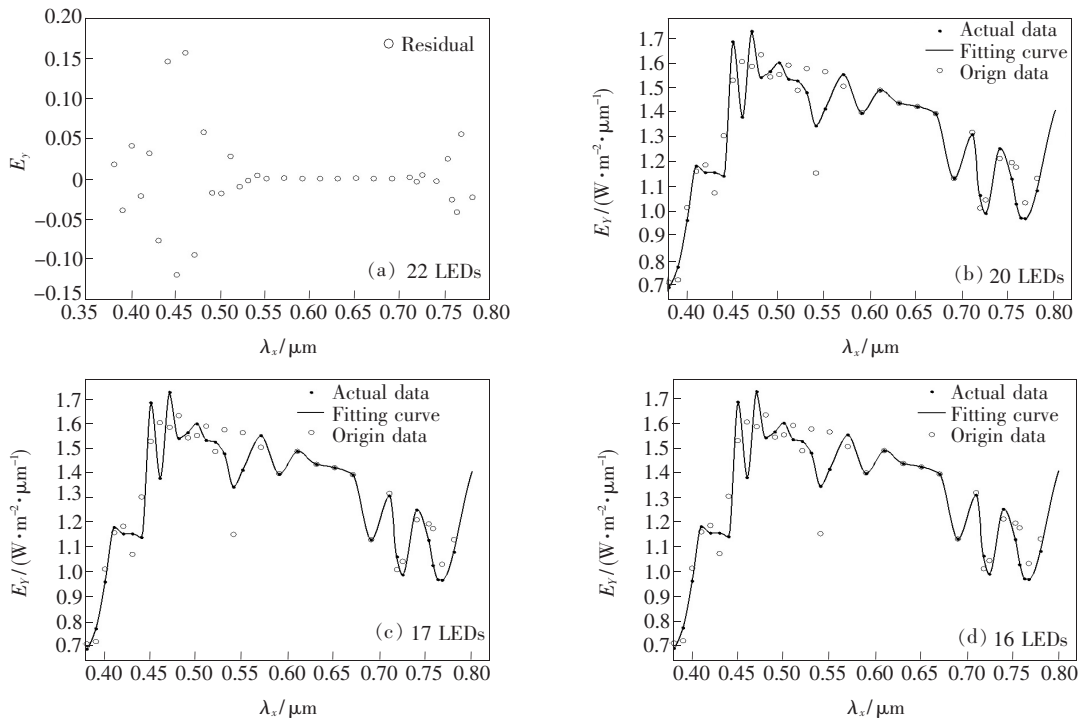


图 6 递减实验中不同组合拟合 AM1.5 光谱图

Fig. 6 AM1.5 spectra of different combinations in the descending experiment

后,拟合的相关指数  $R^2$  只有 0.35 左右,已经不能很好地拟合 AM1.5,混合光谱只能在整体的变化趋势上满足 AM1.5 光谱,对目标光谱没有呈现任何的细节变化。对比这几种拟合情况还可以发现在 540 nm 和 760 nm 的拟合情况都不好,残差值都比较大,综合本方案考虑,本方案为了满足整体的拟合效果最好,权衡整体和局部的关系,牺牲部分细节处来保证整体拟合效果最好。

仿真实验结果表明:虽然市场上的大功率单色 LED 还存在着部分波长的缺失,大功率 LED 的数据库还不够完善,受制造水平的限制也不能制造出任意半高全宽的单色 LED,但仿真结果表明应用现有的单色 LED 峰值波长和半高全宽的数据库已经可以很好地模拟出 AM1.5 标准太阳光谱和 D65 标准光源,这对今后进行人工健康照明和植物生长补光有着重要的意义。

## 6 结 论

本文主要从工程实践的角度出发,调研了 Epitex 公司的大功率单色 LED 的峰值波长和半高全宽的数据。将得到的大功率单色 LED 峰值波长和半高全宽数据做成一个数据库。利用修正的高斯模型作为拟合模型,求出单个 LED 拟合数据,将目标的 AM1.5 和标准光源 D65 的光谱辐照度作为目标散点,最后将相关指数  $R^2$  最大作为优化目标,通过有效集算法控制拟合的系数为非负,利用 MATLAB 软件编程来求解超定方程组,求出  $R^2$  最大时的最小二乘解(即为最优的单色 LED 种类组合)。得出了最优解下的拟合图形和残差图;在拟合优化实验中增加和减少单色 LED 的种类,得出了不同的拟合图形,其主要结论如下:

(1)采用现有的单色大功率 LED 可以实现对

目标光谱 AM1.5 和标准光源 D65 很好的拟合。在拟合 AM1.5 中最佳组合包含 24 种不同种类的 LED,拟合得到的相关指数达到了 0.850 2,在拟合标准光源 D65 中最佳组合包含 25 种不同种类的 LED,拟合的相关指数高达 0.940 5。通过拟合图形和残差图对 AM1.5 进行分段分析,得到在光谱变化比较平稳的波段适合半高全宽较小的 LED,在光谱变化比较陡峭的波段不适合半高全宽较大的 LED。

(2)为了验证方案的可行性和可优化性,对拟合方案进行了优化分析,通过增加和减少 LED 实验看出不同的单色 LED 种类决定了拟合效果的好坏。增加实验中,增加最优组合以外的单色 LED 并不能提高拟合指数。在减少实验中,当 LED 种类从 24 种减少到 19 种时,  $R^2$  值变为 0.842 6,仅仅减小了 0.007 6;在从 17 种减少到 16 种 LED 时,  $R^2$  的值从 0.618 2 下降到 0.394 1,此时 16 种单色 LED 已经不能很好地拟合出目标光谱。优化实验中,LED 种类数目与相关指数  $R^2$  符合 Logit 函数分布,进一步说明利用大功率单色 LED 模拟 AM1.5 方案是可行的。

在实际工程中,应该根据实际的精度需要来调整 LED 的种类和数量,尽量只通过改变 LED 点亮的个数来调整拟合光谱,仅在必要时使用电流作为微弱的调整。频繁地调整电流会使 LED 的温度升高,会对拟合光谱的形状造成很大的影响。本文使用的有效集算法在求解约束优化问题中具有高效性和收敛速度较快的特点,对大规模的支持向量机和高效算法有重要的意义。相信随着科技的进步,基于 LED 的类日光照明技术将越来越完善,能更好地满足人类日常生活和生产的需要。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] 张译文,徐林,万松. 基于 LED 标准太阳光谱灯拟合算法 [J]. 光子学报, 2013, 42(5):506-600.  
ZHANG Y W, XU L, WAN S. LED standard solar spectrum lamp and your algorithm [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2013, 42(5):506-600. (in Chinese)
- [ 2 ] 周卫华,周汉昌. LED 太阳模拟器的研究 [J]. 红外, 2009, 30(3):46-48.  
ZHOU W H, ZHOU H C. LED solar simulator research [J]. *Infrared*, 2009, 30(3):46-48. (in Chinese)
- [ 3 ] 国家标准化管理委员会. SJ/T 10174-91. AM1.5 稳态太阳模拟器 [S]. 中华人民共和国机械电子工业部, 1991.  
Standardization Administration of the People's Republic of China. SJ/T 10174-91. AM1.5 *Steady State Solar Simulator* [S]. People's Republic of China Ministry of Machine and Electronics Industry, 1991. (in Chinese)
- [ 4 ] 王猛,钱维,莹孙健,等. 一种小型固体光源太阳模拟器的研究与实现 [J]. 中国照明电器, 2011(10):6-9.

- WANG M, QIAN W, YING J S, *et al.*. Research and implementation of a small solid light source solar simulator [J]. *China Illumin. Appl.*, 2011(10):6-9. (in Chinese)
- [5] WAFER J. LEDs-continue to advance [J]. *Photon. Spectra*, 2005, 3(1):60-62.
- [6] NATHAN M I. The blue laser diode. GaN based light emitters and lasers [J]. *Science*, 1997, 532(2277):46-47.
- [7] 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.  
FAN D. *Theoretical Study of LED Array Simulation of Solar Spectra* [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [8] 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.*. Spectral distribution synthesis of tunable light source based on LED [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2010, 31(6):882-887. (in Chinese)
- [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.  
GAN R T, GUO Z N, LIN J B, *et al.*. Application of genetic algorithm in spectral matching of LED light source [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2014, 43(7):172-177. (in Chinese)
- [10] 徐广强, 张竞辉, 曹冠英, 等. 大功率单色LED拟合日光光谱[J]. *真空与技术学报*, 2016, 36(1):1-5.  
XU G Q, ZHANG J H, CAO G Y, *et al.*. High power monochromatic LED fitting sunlight spectrum [J]. *Vac. Technol. J.*, 2016, 36(1):1-5. (in Chinese)
- [11] 沈海平, 冯华君, 潘建根, 等. LED光谱数学模型及其在应用[C]. 26届中国照明学会学术年会, 北京, 2005:83-85.  
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. (in Chinese)
- [12] 李宝家, 刘昊阳. 超定方程组的一种解法[J]. *沈阳工业大学学报*, 2002, 24(1):76-77.  
LI B J, LIU H Y. A method for solving overdetermined equations [J]. *J. Shenyang Univ. Technol.*, 2002, 24(1):76-77. (in Chinese)
- [13] 闫秀娟, 王永丽, 贺国平. 求解界约束优化问题的有效集算法综述[J]. *数学的实践与认识*, 2012, 42(3):100-107.  
YAN X J, WANG Y L, HE G P. The understanding and practice of solving bound constrained optimization problems in effective algorithms [J]. *Mathematics*, 2012, 42(3):100-107. (in Chinese)
- [14] 丁晓剑, 赵银亮, 李远成. 基于SVM的二次下降有效集算法[J]. *电子学报*, 2011, 39(8):1766-1770.  
DING X J, ZHAO Y L, LI Y C. The two descent efficient set algorithm based on [J]. *Acta SVM Sinica*, 2011, 39(8):1766-1770. (in Chinese)
- [15] 国家标准化管理委员会. GBT 20146-2006 色度学用CIE标准照明体[S]. 中国国家标准化管理委员会, 2006:6-11.  
Standardization Administration of The People's Republic of China. *CIE Standard Illuminant for GBT 20146-2006 Colorimetry* [S]. China National Standardization Management Committee, 2006:6-11. (in Chinese)



张玉宝(1962-),男,内蒙古包头人,教授,1993年于东北大学获得硕士学位,主要从事LED光电传感器技术的研究。  
E-mail: yuzubinglei@163.com



董礼(1993-),男,辽宁沈阳人,硕士研究生,2016年于沈阳建筑大学获得学士学位,主要从事光谱学与光谱分析的研究。  
E-mail: btzyb@126.com