

doi:10.3788/gzxb20134205.0596

基于 LED 的标准太阳光谱灯拟合算法

张译文, 徐林, 万松

(上海交通大学 物理系 太阳能研究所, 上海 200240)

摘 要:在测量领域中需要使具有高稳定性及良好光谱匹配性的人工模拟太阳光谱标准灯. 本文提出一种基于多种不同峰值波长 LED 光源的方法来准确模拟 AM1.5 的光谱分布. 以最小二乘法和高斯分布数学模型为基础, 在理论上实现了非均匀间隔峰值波长的光谱拟合, 从而指导 LED 的种类选择及其所需的驱动电流值, 并通过实验论证其可行性. 结果表明: 在 300~1100nm 的范围内, 使用较少 LED 种类的情况下, 此方法光谱失配误差小于 $\pm 2.76\%$. 此算法可精确地分辨标准太阳光谱 AM1.5 的吸收谷, 且应用于 AM0 的拟合时获得小于 $\pm 1.67\%$ 的光谱失配度. 在工程实践中, 该算法对快速、准确获得标准太阳光谱灯具有良好的指导意义.

关键词:LED 太阳模拟器; 光谱拟合; 最小二乘法; 高斯分布; 非均匀峰值间隔

中图分类号: O439; TH74

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)05-0596-5

Synthesizing Algorithm for LED Standard Solar Spectrum Lamp

ZHANG Yi-wen, XU Lin, WAN Song

(Solar Energy Institute, Physics Department, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In order to achieve a LED-based solar simulator or a standard spectrum lamp with high stability and good spectral matching that can be used in measurement, a method is proposed to accurately simulate the spectral power distribution (SPD) of AM1.5 by adopting many different peak wavelength LEDs. Least square (LS) method and the characteristics of Gaussian distribution are considered during the process of simulation. This approach theoretically achieves a spectral synthesise in order to guide the LED types selection and the drive current value. Experimental result proves its feasibility and show that: in the range of 300~1100 nm, the spectral mismatch error is less than $\pm 2.76\%$, and less LED species are adopted. This algorithm can accurately distinguish the absorption valleys of standard solar spectrum AM1.5. When applied to AM0, it results in the spectral mismatch less than $\pm 1.67\%$. For engineering application, the algorithm gives a good guiding significance to access standard solar spectrum lamp.

Key words: LED-based solar simulator; Spectral synthesis; Least square(LS) method; Gaussian distribution; Non-uniform spectral peak intervals

0 引言

太阳模拟技术是利用人工光源模拟太阳光辐照特性的一门技术, 其应用领域非常广泛, 例如光伏产业中太阳电池的检测与标定、卫星的热平衡试验、植物发育和良种培育、材料的耐辐照老化和高分子的

固化测试等. 由于测量准确度的需要, 模拟光源的光谱分布必须与实际太阳光谱分布之间具有极小的误差. 因此, 对标准太阳光谱需要一个标准灯来精确描述太阳光谱(AM0 或 AM1.5), 以确保人工太阳模拟光源光谱的一致性. 然而, 唯一的标准设备不便于传递和使用. 采用太阳模拟器可以在一定程度上解

第一作者: 张译文(1988-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为太阳能电池检测. Email: zyw0119@gmail.com

导师(通讯作者): 徐林(1971-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为太阳能电池检测、光伏系统、半导体材料等. Email: xu-lin@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2012-11-19; 录用日期: 2012-12-10

决标准设备的缺点.

传统太阳模拟器采用氙灯或卤素灯作为光源,其光谱匹配度较差且光源具有寿命短、光谱不可调等缺点.发光二极管(Light Emitting Diode, LED)拥有很多传统光源不具备的优点,如寿命长(实际寿命大于 5 万小时)、发光效率高、光强稳定、可精确控制、启动时间短(可达微秒之内)、不同峰值波长产品丰富等.因此,通过准确地选择峰值波长的组合,理论上可获得基于 LED 光源的标准太阳光谱灯.

近年来,基于 LED 的稳态及脉冲太阳模拟器已有相关研究^[1-4].通过使用多种峰值波长的 LED 来合成所需的标准太阳光谱,来实现具有一定辐照稳定性和辐照均匀性的太阳模拟器.然而,虽然这些研究中采用的 LED 种类较少,但其光谱失配度较高,且对于 750 nm 和 950 nm 等处的吸收谷处不具备良好的分辨率. S. W. Brown, I. Fryc^[5-6] 等学者的研究表明,采用 7 等间隔峰值波长 LED 的组合,通过调节驱动电流的方式可获得基于 LED 的可调光源,且 LED 种类越多,其光谱匹配度就越好.但实际的 LED 产品的峰值波长并不是等间隔的.本文提出基于最小二乘算法的非均匀 LED 峰值波长来合成 AM1.5 光谱,此方法不仅应用的 LED 种类较少且仿真结果表明,吸收峰均获得较好的分辨.

1 基于 LED 标准太阳光源设计

光伏器件的测试条件需满足由国际组织 IEC (International Electrotechnical Commission) 规定的地面标准测试标准(STC):光谱分布 AM1.5, 1 000 Wm⁻², 25 °C 测试温度等.由于太阳电池的光谱响应范围为 300~1 100 nm,因此,本文选取此范围进行曲线拟合.

1.1 LED 光谱辐射模型

AM1.5 作为目标曲线可被看作是多种不同峰值波长 LED 的光谱合成.为选择最佳的 LED 组合,必须选取合适的 LED 光谱分布函数对目标光谱进行曲线拟合.根据 LED 光源辐射特性可知,对于单色 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仑兹分布函数来近似.高斯函数式(1)适用于较平缓的谱峰;洛仑兹函数式(2)适用于较尖锐的谱峰.

$$f(x) = ae^{-(x-b)^2/c^2} \quad (1)$$

$$f(x) = \frac{1}{\pi} \left[\frac{\gamma}{(x-x_0)^2 + \gamma^2} \right] \quad (2)$$

本文采用高斯函数进行拟合.结合 LED 的光谱性质,将式(1)进行简单变换,得到式(3).

$$I(\lambda) = \alpha I_0 * \exp \left[-4 \ln 2 (\lambda - \lambda_c)^2 / \omega^2 \right] \quad (3)$$

式中 $I(\lambda)$ 为单个 LED 在光轴方向上的辐射强度; 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_c 为峰值波长; ω 为 LED 光谱分布的半高全宽(Full-Width Half-Maximum, FWHM).实验数据表明^[7],驱动电流的改变和节温的升高均会使 λ_c 和 FWHM 产生小于 10 nm 的漂移.因此在设计电路时需要考虑电流的驱动方式和散热等问题.在实验仿真中,暂且认为单个 LED 的 λ_c 和 FWHM 为常量.对于大多数 LED,其光谱分布为 FWHM 是 15~45 nm 的窄带高斯分布函数.因此在 AM1.5 的仿真中,采用 FWHM 为 20 nm.

在实际应用中,LED 的光谱辐射分布并不是严格对称的高斯函数模型.为使仿真结果更加准确,针对已知光谱分布的 LED 可采用非对称光谱分布函数模型来进行曲线拟合.可采用峰值波长左端为高斯分布函数、右端为洛仑兹分布函数的分段函数模型,如式(4);也可采用峰值波长左端为洛仑兹分布函数、右端为高斯分布函数的分段函数模型.也可针对不同种类 LED,采用两边是不等 FWHM 的高斯分布如式(5),或者洛仑兹分布的非对称函数模型.根据实际 LED 种类不同,可选择相对应的函数模型以减小计算过程中产生的误差.

$$I(\lambda) = \begin{cases} \alpha I_1 * \exp \left[\frac{-4 \ln 2 (\lambda - \lambda_c)^2}{\omega_1} \right] & (\lambda < \lambda_c) \\ \beta I_2 * \frac{2\omega_2}{4(\lambda - \lambda_c)^2 + \omega_2} & (\lambda \geq \lambda_c) \end{cases} \quad (4)$$

$$I(\lambda) = \begin{cases} \alpha I_0 * \exp \left[\frac{-4 \ln 2 (\lambda - \lambda_c)^2}{\omega_1} \right] & (\lambda < \lambda_c) \\ \beta I_0 * \exp \left[\frac{-4 \ln 2 (\lambda - \lambda_c)^2}{\omega_1} \right] & (\lambda \geq \lambda_c) \end{cases} \quad (5)$$

式(4)和式(5)中, $\omega = (\omega_1 + \omega_2) / 2$.

1.2 曲线拟合法

最小二乘算法是曲线拟合中最常用的回归算法,已广泛应用于化学检测等多门学科的图谱分析^[8-9].设 y 与自变量 x 及参量 θ 之间具有函数关系 $y = f(x, \theta)$,当 θ 与 y 之间不存在线性关系时,就属于非线性最小二乘法的范畴.问题归结于求解参量 θ ,使误差平方和 $R(\theta)$ 最小,如式(6)

$$R(\theta) = \sum_{x=1}^n \omega_x [y_i - f(x_i, \theta)]^2 = \min \quad (6)$$

式中 ω 为 x 的权重,在仿真中设定为 1; (x_i, y_i) , $i = 1, 2, \dots, n$ 为观测值,本文中为 AM1.5 标准光谱.根据叠加原理,LED 光谱合成的简单数学模型如式(7)

$$\Phi = \sum A_i I_i(\lambda) \quad (7)$$

Φ 为最终光谱合成的曲线; $I_i(\lambda)$ 是单个 LED 在额定驱动电流下的光谱辐照函数,通过 Matlab 编程可

计算出满足 $R(\theta)$ 最小的参量 $A(A = \alpha I_0)$ 及参量 $B(B = \lambda_c)$, 从而准确获得驱动电流值以及应选取的 LED 峰值波长。

结合高斯分布模型(如图 1^[10]), 函数曲线下 68.27% (34.1% \times 2) 的面积在平均数左右的一个标准差范围内; 95.45% 的面积在平均数左右两个标准差 2σ 的范围内; 99.73% 的面积在平均数左右三个标准差 3σ 的范围内。结合本文的问题(FWHM = 20 nm), 标准差 σ 约为 8.5 nm, 因此单个 LED 中, 95.45% 的辐射强度集中在 34.0 nm 的范围内。因此, 当两个相邻谱峰间距大于 30 nm 时, 可认为它们在相互叠加时彼此不会受到影响。据此, 在谱线拟合时可对峰值波长进行准确搜寻。例如, 设定第一个中心波长 λ_c 为 λ_1 , 基于最小二乘算法在 $\lambda_1 + 15$ 到 $\lambda_1 + 30$ 的范围内搜寻第二个峰值波长, 以此类推搜寻第三个峰值波长, 这样, 既保证了第三个高斯函数的叠加效果不会作用于第一个高斯函数, 又确保了 LED 光谱连续叠加不产生失真。

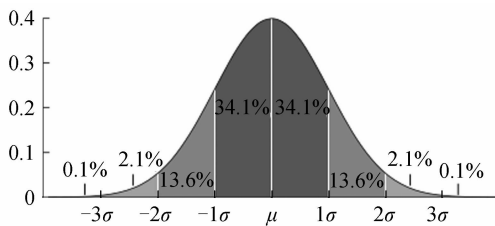


图1 高斯分布数学模型

Fig. 1 Gaussian distribution model

1.3 仿真结果及实验验证

Matlab 中的 cftool 虽然可以完成一些较简单的曲线拟合功能, 但不能满足所有的拟合准确度要求, 本节是基于 Matlab 软件来编程的曲线拟合基本流程^[11-12]。

首先, 根据 IEC 标准, 画出目标曲线 AM1.5 在 300~1 100 nm 波长范围内的散点图; 其次, 设定第一个峰值波长 $\lambda_c = B_0$, 令 FWHM = 20 nm; 再次, 基于最小二乘算法依次搜寻 A 和 B 直到获得完整的

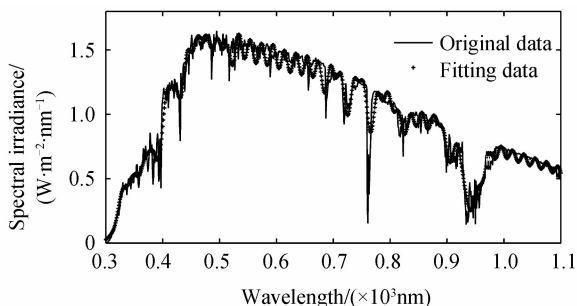


图2 非均匀间隔峰值波长的拟合结果

Fig. 2 Simulation with non-uniform LED spectral peak intervals

LED 合成光谱。图 2 是采用非均匀间隔峰值波长的

拟合算法所取得的拟合结果。此算法较好地分辨出了 750 nm 和 950 nm 附近的吸收谷。

为验证算法可行性, 根据拟合结果所获得的驱动电流系数参考值以及各个峰值波长的数据, 本文选取 LUMILEDS 品牌下 LUXEON 系列的 7 种单色大功率 LED 以及深圳希兰光电公司所提供的 4 种单色大功率 LED 产品, 来合成 350~650 nm 可见光波段范围内的光谱。但考虑到繁多的 LED 种类会对以后光谱辐照均匀性设计带来麻烦, 因此, 为应尽量减少 LED 种类数目, 本实验特选取了一种带宽较宽的白光 LED 来替代部分窄带单色 LED 种类 (LUXEON Warm-White)。

实际测量结果表明, 通过改变 LED 的驱动电流可调整光谱辐照强度, 图 3 为将驱动电流从 100 mA 增加到 600 mA 所测得的光谱辐照度变化。因此结合拟合算法获得的驱动电流系数参考值, 可获得较好的光谱匹配结果。图 4 为本实验所选取的 12 种 LED 单独测量出的光谱数据。

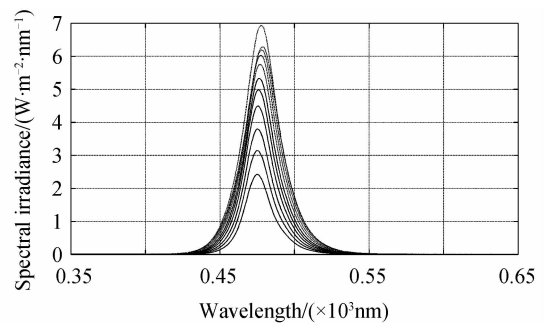


图3 光谱辐照强度随驱动电流变化实验结果(LUXEON Blue)

Fig. 3 Spectral irradiance for blue-LED operating at different forward currents

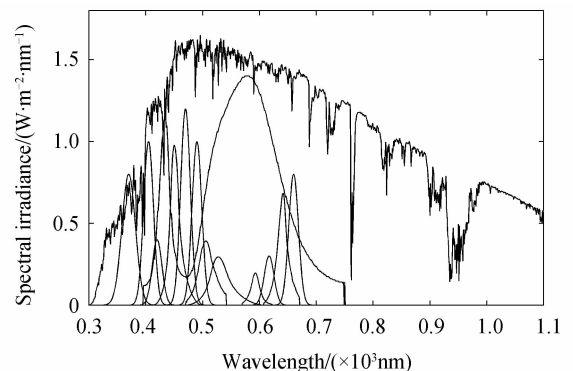


图4 实验所选取的 12 种 LED 单独测量出的光谱数据

Fig. 4 Spectral power distributions of 12 LEDs chosen to use

实验结果如图 5 所示, 可以看出, 在可见光区域波段, 多种 LED 合成的光谱曲线与目标光谱的相似度较高。因此, 此算法对于指导实践中 LED 的选取以及驱动电流的调节具有可行性。

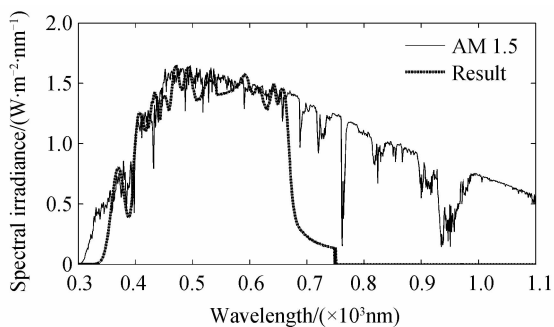


图 5 可见光区域光谱合成实验结果

Fig. 5 Experimental result for visible region spectrum

2 拟合优度评价

本文引入 IEC^[13] 标准中规定的标准光谱辐照度分布定义来评价拟合优度. 表 1 为 AM1.5 标准光谱辐照度分布; 表 2 为太阳模拟器等级分类的定义.

表 1 AM1.5 标准辐照度分布 (IEC 60904)

Table 1 Global reference solar spectral irradiance distribution given in IEC 60904

No.	Wavelength range/ μm	Percentage of total irradiance in the wavelength range/(%)
1	0.3~0.4	--
2	0.4~0.5	18.40
3	0.5~0.6	19.90
4	0.6~0.7	18.40
5	0.7~0.8	14.90
6	0.8~0.9	12.50
7	0.9~1.1	15.90

表 2 太阳模拟器等级分类

Table 2 Definition of solar simulator classifications

Classification	Spectral match to all intervals specified in Table 1
A	0.75~1.25
B	0.6~1.4
C	0.4~2.0

光谱失配误差 = 实际测试的总辐照度的百分比 / 标准光谱辐照度分布的百分比 (表 1 中列出)

由表 3 可以看出, 失配误差远远高于 IEC 中 A 级太阳模拟器的定义范围. 理论上达到 $\pm 2\%$ 的失配误差, 应用于实践中可获得失配度在 $\pm 5\%$ 以内的 LED 太阳模拟器或标准太阳光谱灯. 表 4 列出了英国、日本、德国和丹麦四国相关研究的光谱^[1-4]. 依据 IEC 标准, 波长范围是以 100 nm 为一个区间对太阳模拟器等级分类, 因此日本研究者^[2]所应用的方法比其他三国研究者所用的方法具有更好的匹配度. 若把积分区间减小至 50 nm 或者更小的范围, 日本研究者^[2]所提供的方法就不能准确地模拟标准太阳光谱.

表 3 非均匀间隔光谱拟合失配误差及等级分类

Table 3 Spectral mismatch error and classifications of the simulation with non-uniform LED spectral peak intervals

Wavelength range/ μm	Spectral mismatch error	Classification
0.3~0.4	--	--
0.4~0.5	1.027 62	A
0.5~0.6	0.983 02	A
0.6~0.7	0.981 57	A
0.7~0.8	1.004 64	A
0.8~0.9	1.010 04	A
0.9~1.1	0.998 37	A

表 4 对比相关研究 (图 1) 的光谱失配误差

Table 4 The comparison to the goodness of other researches (Fig. 6)

Wavelength range/ μm	Our approach	Fig. 6(a)	Fig. 6(b)	Fig. 6(c)	Fig. 6(d)
0.4~0.5	1.028	0.997	1.004	0.950	0.463
0.5~0.6	0.983	1.128	1.014	1.010	0.521
0.6~0.7	0.982	1.117	0.984	1.060	0.677
0.7~0.8	1.005	0.661	0.936	0.990	0.965
0.8~0.9	1.010	0.762	0.980	0.970	1.327
0.9~1.1	0.998	1.213	--	1.010	--

3 AM₀ 光谱拟合结果及优度评价

将此方法应用于 AM₀ (空间测试太阳辐照度光谱分布) 的光谱拟合实验中, 如图 6. 由于 AM₀ 在 600~1 100 nm 的光谱范围幅度变化较平缓, 可选用 FWHM 较大的 LED 种类. 结合实际 LED 产品, 在 600~1 100 nm 波段本实验选取 50 nm 进行近似拟合. 对于存在较多尖峰的光谱拟合, 应选用 FWHM 小的 LED, 而对于较平滑的位置, 则可根据市场上可提供的实际产品选取 FWHM 较大的 LED. 结合 IEC 60904 标准, 计算光谱失配误差 (表 5). 光谱失配误差小于 $\pm 2\%$, 表明此方法同样适用于 AM₀ 的光谱拟合.

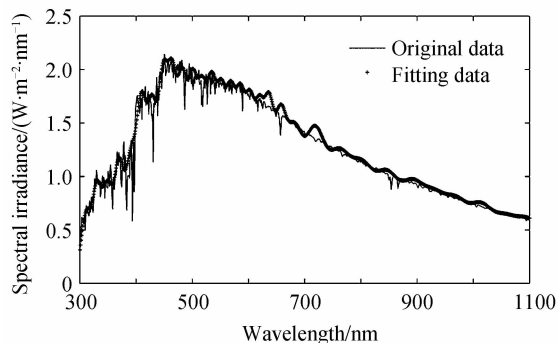


图 6 非均匀间隔光谱拟合应用于 AM₀ 的光谱拟合结果

Fig. 6 The synthesis result of AM₀ by adopting non-uniform LED spectral peak intervals method

表5 AM₀ 光谱拟合的失配误差
Table 5 Spectral mismatch error of AM₀

Wavelength range/ μm	Percentage of total irradiance in the wavelength range/(%)	Spectral mismatch error
0.3~0.4	9.35	1.016 7
0.4~0.5	18.47	0.990 9
0.5~0.6	18.54	1.001 8
0.6~0.7	15.98	1.004 8
0.7~0.8	12.70	1.000 2
0.8~0.9	10.13	0.995 3
0.9~1.1	14.91	0.996 6

4 结论

本文设计了一种 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 LED 产品种类, 实现非均匀间隔峰值波长的 LED 拟合 AM1.5 和 AM₀. 两种光谱的拟合优度范围为 0.26%~2.76%. 改变 LED 电致发光层结构及合金组分比例等可获得任意峰值波长的 LED, 结合拟合结果, 可以选取对应的峰值波长及调整对应的驱动电流值, 获得精确的标准太阳光谱. 在实际应用中, 温度的变化会对谱峰位置和 FWHM 造成较大影响, 因此在设计电路时应考虑散热和控温等问题.

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、美容美容、昆虫捕捉、植物的培育等领域. 本文通过对比拟合优度, 说明非均匀间隔拟合方式的优势及准确度, 为基于 LED 光源的标准太阳光谱灯的实现奠定了基础.

参考文献

- [1] BLISS M, BETTS T R, GOTTSCHALG R. An LED-based photovoltaic measurement system with variable spectrum and flash speed[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2009, **93**(6-7): 825-830.
- [2] FUJIWARA K, YANO A. Controllable spectrum artificial sunlight source system using LEDs with 32 different peak wavelengths of 385~910 nm[J]. *Bioelectromagnetics*, 2011, **32**(3): 243-252.
- [3] BÖTTCHER A, PROROK A, FERRETTI N, *et al.* Flasher tolerances of power measurement on micromorph tandem modules [C]. 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition / 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 6-10 September 2010, Valencia, Spain, 2010: 3161-3164.
- [4] KREBS F C, SYLVESTER-HVID K O, JØRGENSEN M. A self-calibrating led-based solar test platform[J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2011, **19**(1): 97-112.
- [5] BROWN S W, SANTANA C, EPELDAUER 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.
- [6] 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): 111309-111308.
- [7] LIU Li-ming, ZHENG Xiao-dong. Measurements of LEDs spectral characteristics and junction temperature [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(5): 1069-1073.
刘立明, 郑晓东. LED 结温与光谱特性关系的测量[J]. *光子学报*, 2009, **38**(5): 1069-1073.
- [8] FENG Wei-wei, LI Ling-wei, LI Wei-ran, *et al.* On-line monitoring technology for chemical oxygen demand based on full-spectrum analysis[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(8): 883-887.
冯巍巍, 李玲伟, 李未然, 等. 基于全光谱分析的水质化学耗氧量在线监测技术[J]. *光子学报*, 2012, **41**(8): 883-887.
- [9] LUO Xiao-xia, LIU Hua, LU Zhen-wu, *et al.* Automated optimization of free-form surface lens for LED collimation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(9): 1352-1355.
罗晓霞, 刘华, 卢振武, 等. 实现 LED 准直照明的优化设计[J]. *光子学报*, 2011, **40**(9): 1352-1355.
- [10] Standard deviation diagram [DB/OL]. (2007-04-07) [2012-11-16]. http://zh.wikipedia.org/wiki/File:Standard_deviation_diagram.svg.
- [11] 周建兴, 岂兴明. MATLAB 从入门到精通[M]. 3 版. 北京: 人民邮电出版社, 2009.
- [12] 中国科学技术大学数学系. 曲线拟合的最小二乘法[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2004.
- [13] IEC 60904-9 Ed. 2: Photovoltaic devices-Part 9: Solar simulator performance requirements.