

文章编号: 1000-5013(2012)02-0143-06

# 发光二极管辐射模型的快速建立与验证

董菁菁, 郭震宁, 林介本, 黄智炜, 黄明波, 李建功

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 基于 Source Property Generator 软件, 根据配光曲线图快速获得相应的光源数据, 提出运用非线性回归分析阻尼最小二乘(L-M)法, 由模拟公式得到的光源数据与由配光曲线(或测量)获得的光源数据之间的误差, 以寻求模拟公式参数的变化步长; 然后, 由误差均方根与归一化互相关两个判断标准来重建辐射模型的精确性. 结果显示: 误差均方根低于 1%, 归一化互相关接近 100%. 该方法只需提供光源的配光曲线图即可以获得相应的光强分布函数和辐射模型, 如果前面的函数设置没有出现错误, 一般只要一次就能通过验证; 而且只要改变某些要求参数, 即可便捷地设计出一系列同类型透镜的辐射模型函数.

**关键词:** 光学设计; 发光二极管; 辐射模型; 阻尼最小二乘法

**中图分类号:** TN 312. 802

**文献标志码:** A

目前, 对发光二极管(LED)真实光源设计的需求不断加强, 不仅体现在近场、中场、远场方面<sup>[1-4]</sup>, 而且在制作发光二极管透镜(包括一次光学设计与二次光学设计)或灯具时, 需根据不同光源的辐射模型来设计透镜或灯具以达到所需的照明效果<sup>[5-7]</sup>. 然而, 由于发光二极管芯片类型和发光二极管透镜形状的多样性, 导致建立其精确的辐射模型要比建立传统光源辐射模型更加困难. 发光二极管光源厂家提供的一般是发光二极管的配光曲线, 较少提供相应的光源数据和辐射模型. 发光二极管光源数据可以通过 CCD 对发光二极管光源进行检测获得<sup>[8-10]</sup>, 然后, 将光源数据导入光学仿真软件以获得发光二极管辐射模型. 但这不能确切地获取其辐射模型函数(也称强度分布函数), 给发光二极管光源模拟、发光二极管用作光纤传输的信号光源<sup>[11]</sup>、透镜设计、灯具制作, 以及发光二极管阵列设计等带来困难<sup>[2-4]</sup>. 因此, 快速获得发光二极管的光源数据并建立其辐射模型及相应函数是十分必要的. MORENO 等<sup>[12]</sup>提出根据厂商提供的光源数据, 通过逐个改变函数参数的方法获得发光二极管辐射模型函数, 其误差均方根(RMS)在 1%~5% 之间, 归一化互相关(NCC)在 99.84%~99.97% 之间. 本文为解决发光二极管辐射模型难建立的问题, 提出一种快速、有效地建立发光二极管辐射模型的方法.

## 1 设计原理

为了精确地演示发光二极管(LED)的光强分布和空间辐射模型, 必须考虑光发射面(芯片、芯片阵列、荧光面)经反射杯反射和封装透镜折射的光线分布. 在数学上, 这种模型可用若干个高斯函数或余弦函数来描述<sup>[12]</sup>.

当光源辐射模型旋转对称时, 发光二极管的强度模型为若干个高斯函数的总和, 有

$$I(\theta) = \sum_i g 1_i \cdot \exp(-\ln 2(\frac{|\theta - g 2_i|}{g 3_i})^2), \tag{1}$$

或者为若干个余弦函数的叠加, 有

**收稿日期:** 2011-04-19

**通信作者:** 郭震宁(1958-), 男, 教授, 主要从事半导体发光器件及其光学设计与应用研究. E-mail: znguo2003@yahoohoo.com.cn.

**基金项目:** 福建省科技计划重点项目(2009H0034); 福建省自然科学基金资助项目(2010J01338); 福建省厦门市科技计划重点项目(3502Z20093033); 福建省泉州市科技计划重点项目(2008G7)

$$I(\theta) = \sum_i c1_i \cdot \cos(|\theta| - c2_i)^{c3_i}. \tag{2}$$

式(1),(2)中: $I(\theta)$ 为强度,一给定方向上单位立体角的光通量; $\theta$ 为以发光二极管为中心的坐标系的极角; $g1_i, g2_i, g3_i$ 或  $c1_i, c2_i, c3_i$  为函数的参数.

对于旋转非对称封装导致在两垂直方位角方向上具有不同辐射模型的发光二极管,其强度角变化模型可为

$$I(\theta, \varphi) = \sum_i g1_i \cdot \exp[-(\ln 2)(|\theta| - g2_i)^2 (\frac{\cos^2 \varphi}{(g3_i)^2} + \frac{\sin^2 \varphi}{(g4_i)^2})], \tag{3}$$

或余弦函数为

$$I(\theta, \varphi) = \sum_i c1_i \cdot \cos[|\theta| - (c2_i \cos^2 \varphi + c3_i \sin^2 \varphi)]^{c4_i}. \tag{4}$$

式(3),(4)中: $\varphi$ 为方位角; $\theta$ 为以发光二极管为中心的坐标系的极角; $g1_i, g2_i, g3_i, g4_i$ 或  $c1_i, c2_i, c3_i, c4_i$  为函数的参数.

式(1)~(4)对大多发光二极管是相当精确的,可运用于建立普通发光二极管光源模型. 高斯函数或余弦函数的个数主要取决于发光二极管辐射模型的形状. 因此,采用误差均方根(RMS)和归一化互相关(NCC)<sup>[10]</sup>两个标准来判断所建模型的精确性. 即

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_j \sum_k [I(\theta_j, \varphi_k)_m - I(\theta_j, \varphi_k)_e]^2}, \tag{5}$$

$$\text{NCC} = \frac{\sum_j \sum_k [I(\theta_j, \varphi_k)_m - \bar{I}_m][I(\theta_j, \varphi_k)_e - \bar{I}_e]}{\sqrt{\sum_j \sum_k [I(\theta_j, \varphi_k)_m - \bar{I}_m]^2 \sum_j \sum_k [I(\theta_j, \varphi_k)_e - \bar{I}_e]^2}}. \tag{6}$$

式(5)~(6)中: $I(\theta_j, \varphi_k)_m, I(\theta_j, \varphi_k)_e$  分别为在  $(\theta_j, \varphi_k)$  点处模拟与实验测量得到的光强值; $\bar{I}_m, \bar{I}_e$  分别为模拟和实验测量得到的平均光强值; $j$  为以发光二极管为中心的坐标系的极角  $\theta$  的取样个数; $k$  为发光二极管方位角的取样个数; $N$  为总的  $(\theta_j, \varphi_k)$  点个数.

通常 RMS 用来度量曲线拟合的好坏,即 RMS 越小,说明曲线拟合得越好,参数选得越合理,误差 RMS 一般小于 5%<sup>[13]</sup>. NCC 表示模拟值与测量值的相似性,对于大多数运用,其值高于 99%<sup>[3]</sup>.

2 设计方法

发光二极管有很多种不同的辐射模型,以致其很难找到某一公式去确切定义. 因此,基于 Source Property Generator 软件,根据配光曲线获得相应的光源数据,运用相应的理论对其非线性回归分析,最后将所得到的光源模型进行实验验证. 文中以对称型高斯函数的模型为例.

2.1 函数个数的决定与参数的选取

运用方程(1),令  $i=1, g=[g1_1, g2_1, g3_1]=[1, 0^\circ, 30^\circ]$ , 且保持其他参数不变,只改变某一参数,其光强分布如图 1 所示.

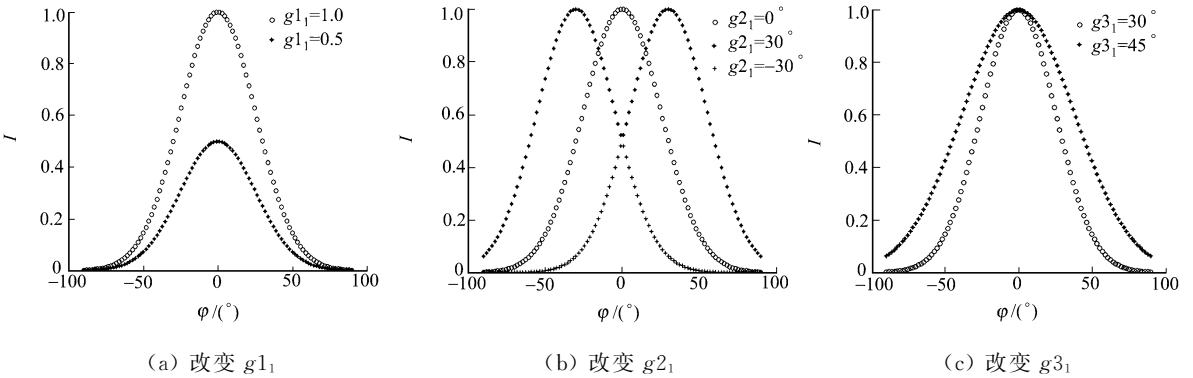


图 1 不同参数的光强分布示意图

Fig. 1 Intensity distribution schematic of different parameters

由图 1(a)可知: $g1_1$  决定模型的幅值,随着  $g1_1$  的增加,幅值随之增大;由图 1(b)可知:当  $g2_1$  为正

时,  $g_{2_1}$  决定模型的最大强度值处的辐射角( $\varphi$ );随着  $|g_{2_1}|$  的增加,两个最大峰分得越开;当  $g_{2_1}$  为负时,其模型为  $g_{2_1}$  为正时的补集.由图 1(c)可知: $g_{3_1}$  决定模型的半强度角,随着  $g_{3_1}$  的增加,辐射角的有效宽度增大.综合图 1 并根据已知的配光曲线来决定高斯函数或余弦函数的个数,同时得到参数  $g_{1_1}, g_{2_1}, g_{3_1}$  的初始值.

### 2.2 光源数据的获得

将配光曲线图复制到 Source Property Generator 软件中,根据配光曲线图选取相应的坐标系;然后,开始描点,最终获得辐射角及其相应的光强值.

### 2.3 模型的建立

根据函数个数与参数的初始设定,运用非线性回归分析阻尼最小二乘(Levenberg-Marquart,简称 L-M)法<sup>[14]</sup>,由模拟公式的光源数据与根据配光曲线图获得的光源数据(又称测量数据)之间的误差来寻求模拟公式参数变化的步长;同时,由 RMS 与 NCC 两个判断标准来重建辐射模型的精确性.

## 3 算法流程

阻尼最小二乘法可用下式求搜索方向,有

$$(J^T J + \mu I)h_{l,m} = -g, \quad g = J^T f, \quad \mu \geq 0. \tag{7}$$

式(7)中: $J=J(x), f=f(x)$ , 而  $f(x)$  为模拟数据与测量数据的差值; $f(x+h)=f(x)+J(x)h+O(\|h\|^2)$ ;  $J \in R^{m \times n}$  雅克比函数,  $(J(x))_{i,j} = \frac{\partial f_i}{\partial x_j}(x)$ ;  $h_{l,m}$  为步长; $\mu$  为阻尼因子,它可以控制  $h_{l,m}$  的大小方向.当  $\mu=0$  时,即为 Gauss-Newton 法;而当  $\mu$  趋于无穷时,  $I$  趋于零矢量,即为最速下降法.因此,只要给一个足够大的  $\mu$ ,  $f(x+h_{l,m}) < f(x)$  就始终为真,而即使遇到影响 Gauss-Newton 法有效性的病态二次项,也可通过阻尼因子  $\mu$  来控制. LM 法给出的是介于 Gauss-Newton 法和最速下降法之间的搜索方向.对于寻找最佳的函数系数,该法相对灵活、简单、快捷.

根据得到所需的函数、函数个数与函数参数  $g$  的初始值,运用优化标准 RMS, NCC 与非线性回归分析 L-M 法获得最佳参数  $g$ , 其流程图如图 2 所示.

## 4 实验分析与验证

### 4.1 基本模型

选择 3 个基本的旋转对称辐射模型,  $120^\circ$  的近似 Lambertian 型采用方程(2)计算( $i=1$ ), Batwing 型采用方程(2)计算( $i=2$ ), Side emitter 型采用方程(1)计算( $i=3$ ), 相关的参数设置如表 1 所示.

将辐射模型模拟光强分布公式的数据与测量数据进行比较,结果如图 3 所示.图 3(a), (b), (c) 中

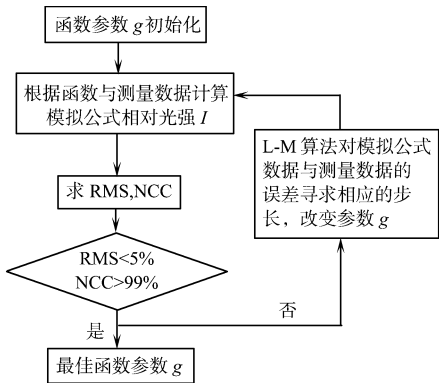
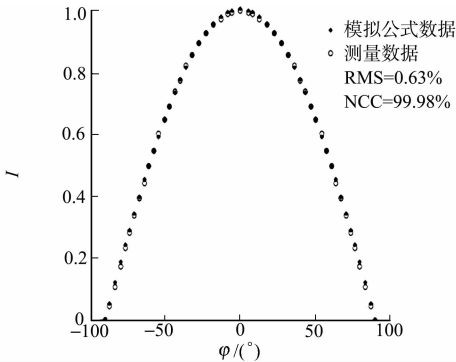
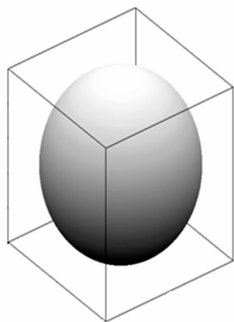


图 2 算法流程图  
Fig. 2 Arithmetic flow chart



(a)  $120^\circ$  的近似 Lambertian 型



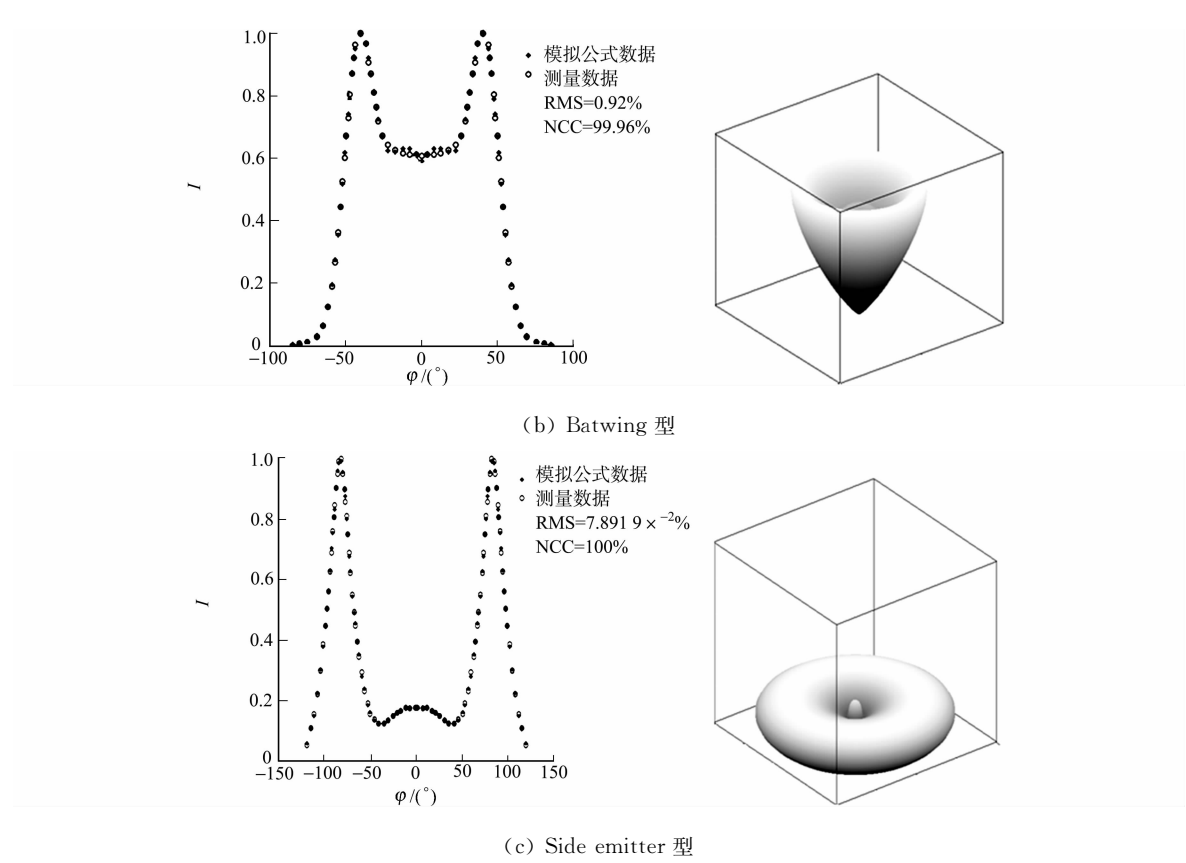


图 3 简单辐射模型的模拟数据与测量数据比较

Fig. 3 Comparison of simulated data with measured data of simple radiation patterns

的右图均为空间立体辐射模型,观看默认方位角为  $37.5^{\circ}$ ,俯角为  $30^{\circ}$ .

表 1 简单辐射模型的优化前后的函数参数

Tab.1 Function parameters of simple radiation patterns before and after optimization

项目	120°的近似 Lambertian 型			Batwing 型					
	$c1_1$	$c1_2$	$c1_3$	$c1_1$	$c2_1$	$c3_1$	$c1_2$	$c2_2$	$c3_2$
初始值	1	$0^{\circ}$	1	1	$40.2858^{\circ}$	30	$0.6122$	$8^{\circ}$	10
优化值	1.0058	$-9.9484 \times 10^{-5}$	0.9672	0.7180	$41.9692^{\circ}$	39.2408	0.6318	$9.4366^{\circ}$	4.9051

项目	Side emitter 型								
	$g1_1$	$g2_1$	$g3_1$	$g1_2$	$g2_2$	$g3_2$	$g1_3$	$g2_3$	$g3_3$
初始值	0.6	$82.1359^{\circ}$	$20^{\circ}$	0.4	$84.1359^{\circ}$	$10^{\circ}$	0.1744	$15^{\circ}$	$30^{\circ}$
优化值	0.6959	$83.6355^{\circ}$	$19.2181^{\circ}$	0.2902	$83.4212^{\circ}$	$7.3654^{\circ}$	0.1757	$5.2298^{\circ}$	$39.5256^{\circ}$

4.2 相对复杂模型

Nichia 的 NSPW345CS 发光二极管光强分布模型是非旋转对称的,所以用方程(3)计算( $i=2$ ); LUXEON Rebel DS56 暖白、中性白与冷白的发光二极管光强分布模型是旋转对称的,所以用方程(1)计算( $i=2$ ),相关参数设置如表 2 所示.

表 2 相对复杂辐射模型的优化前后的函数参数

Tab.2 Function parameters of complex radiation patterns before and after optimization

项目	Nichia 的 NSPW345CS 发光二极管							
	$g1_1$	$g2_1$	$g3_1$	$g4_1$	$g1_2$	$g2_2$	$g3_2$	$g4_2$
初始值	0.2	$45^{\circ}$	$20^{\circ}$	$20^{\circ}$	1	$0^{\circ}$	$35^{\circ}$	$20^{\circ}$
优化值	0.1343	$44.6220^{\circ}$	$20.2426^{\circ}$	$18.1570^{\circ}$	0.9974	$-0.1432^{\circ}$	$38.1762^{\circ}$	$22.0531^{\circ}$

项目	LUXEON Rebel DS56 的暖白、中性白与冷白发光二极管					
	$g1_1$	$g2_1$	$g3_1$	$g1_2$	$g2_2$	$g3_2$
初始值	1	$0^{\circ}$	$40^{\circ}$	0.2	$45^{\circ}$	$30^{\circ}$
优化值	0.9614	$-1.2949^{\circ}$	$37.7636^{\circ}$	0.3634	$47.6758^{\circ}$	$25.5539^{\circ}$

两个辐射模型的模拟光强分布公式的数据与测量数据比较,如图 4 所示. 图 4(a),(b)中的右图均为空间立体辐射模型.

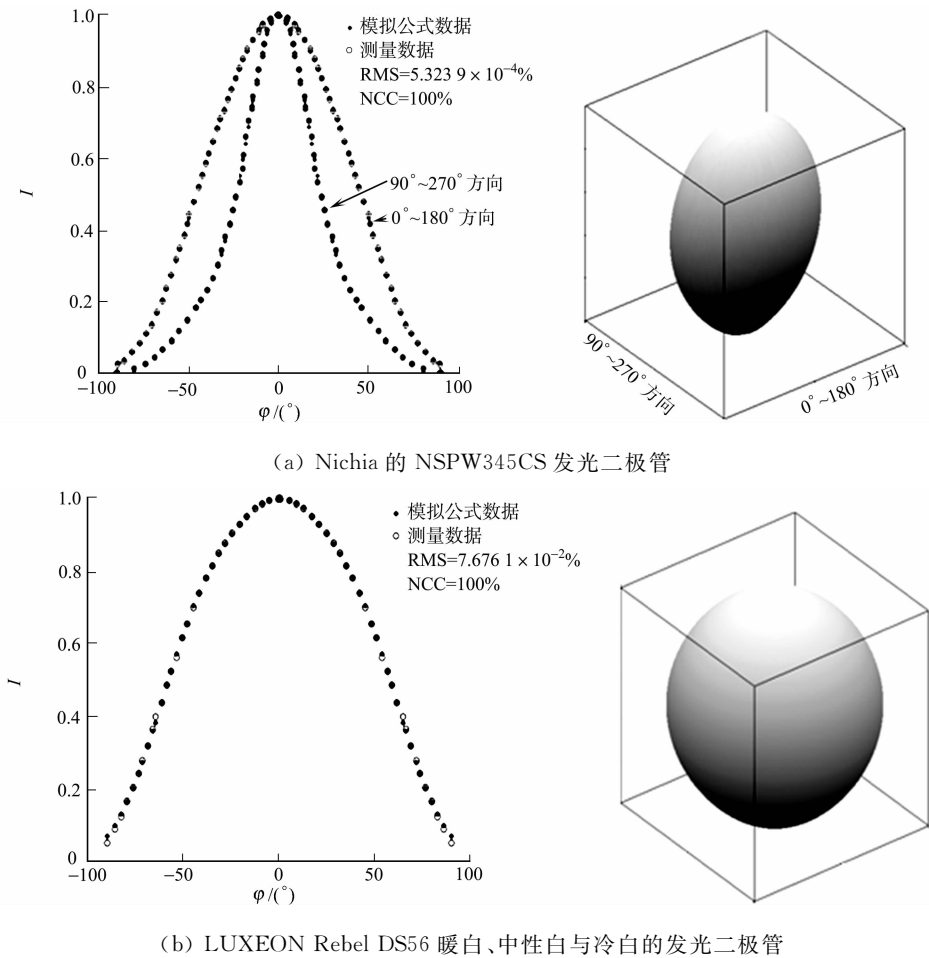


图 4 相对复杂辐射模型的模拟数据与测量数据比较

Fig. 4 Comparison of simulated data with measured data of complex radiation model

综上图 3,4 可得,所模拟的光强分布的精确度很高,RMS 与 NCC 远超过设计的所需精度,而且实际操作灵活、简单、方便.

### 5 结论

基于 Source Property Generator 软件,根据配光曲线图获得相应的发光二极管光源数据. 提出运用非线性回归分析(L-M)法,由模拟公式的光源数据与根据配光曲线图(或测量)获得的光源数据(又称测量数据)之间的误差来寻求模拟公式参数变化的步长,同时由 RMS 与 NCC 两个判断标准来重建辐射模型的精确性. 结果表明:RMS 低于 1%,NCC 接近 100%.

采用这种方法只需要光源的配光曲线图就可以获得相应的光强分布函数和辐射模型,如果前面的函数个数与参数设置没有出现错误,一般只要一次就能通过验证,这极大地节省了设计的周期;而且更重要的一点,只要改变某些要求参数,便可以轻而易举地设计出一系列的同类型透镜的辐射模型函数. 该法具有相对灵活、简单、方便和精确性较高等特点.

### 参考文献:

[1] MORENO I,TZONCHEV R I. Effects on illumination uniformity due to dilution on arrays of LEDs[J]. SPIE,2004, 5529:268-275.

[2] MORENO I,AVENDAÑO-ALEJO M,TZONCHEV R I. Designing light-emitting diode arrays for uniform near-field irradiance[J]. Applied Optics,2006,45(10):2265-2272.

[3] SUN Ching-cherng, LEE Tsung-xian, MA Shih-hsin, et al. Precise optical modeling for LED lightiing verified by cross correlation in the midfield region[J]. Optical Letters, 2006, 31(14):2193-2195.

[4] MORENO I, MUÑOZ J, LVANOV R. Uniform illumination of distant targets using a spherical light-emitting diode array[J]. Optical Engineering, 2007, 46(3):033001-1-033001-7.

[5] 刘旭, 李海峰. 现代投影显示技术[M]. 浙江: 浙江大学出版社, 2009: 84-113.

[6] WANG Kai, CHEN Fei, LIU Zong-yuan, et al. Design of compact freeform lens for application specific light-emitting diode packaging[J]. Optics Express, 2010, 18(2):413-425.

[7] 丁毅, 郑臻荣, 顾培夫. 实现 LED 照明的自由曲面透镜设计[J]. 光子学报, 2009, 38(6):1486-1489.

[8] CASSARLY W J. LED modeling: Pros and cons of common methods[J]. NASA Tech Briefs, 2002(4): II a-2a.

[9] MORENO I, SUN Ching-cherng. Three-dimensional measurement of light-emitting diode radiation pattern: A rapid estimation[J]. Measurement Science and Technology, 2009, 20(7):1-6.

[10] 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.

[11] 李玉权, 崔敏. 光波导理论与技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2002: 55-61.

[12] MORENO I, SUN Ching-cherng. Modeling the radiation pattern of LEDs[J]. Optics Express, 2008, 16(3):1808-1819

[13] DANIEL C, WOOD F S. Fitting equation to data: Computer analysis of multifactor data[M]. 2nd ed. New York: Wiley, 1999.

[14] MADSEN K, NIELSEN H B, TINGLEFF O. Methods for non-linear least squares problems[R]. 2nd ed. Copenhagen: Technical University of Denmark, 2004.

# Quickly Modeling of Light Emitting Diode Radiation Pattern and Certifying

DONG Jing-jing, GUO Zhen-ning, LIN Jie-ben,  
HUANG Zhi-wei, HUANG Ming-bo, LI Jian-gong

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

**Abstract:** According to the angular intensity distribution, light emitting diode (LED) intensity datasheets are obtained by using Source Property Generator software. This paper firstly offers the way using nonlinear regression Levenberg-Marquart method which seeks corresponding mutative step length of the parameter of simulating equation, according to the error between the intensity value of simulating equation and Measurement, and changes it. Meanwhile, using two estimation criterion, namely, root mean square (RMS) and normalized cross correlation (NCC), rebuild the accuracy of LED radiation pattern. Results show that RMS is less than 1%, NCC is near 100%. Only providing the map of LED source's the angular intensity distribution can gain corresponding intensity distribution equation and radiation pattern immediately, if there is not any wrong in function setting. Most important point is that a series of similar types of LENS' Radiation Pattern equations can be obtained by changing some parameters which need to be solved.

**Keywords:** optical design; light emitting diode; radiation pattern; levenberg-marquart method

(责任编辑: 钱筠      英文审校: 吴逢铁)