

doi: 10.3788/gzxb20144302.0222003

# 紧凑型 LED 配光设计中光源模型可靠性研究

董丽, 刘华, 王尧, 孙强, 刘英, 辛迪, 荆雷

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 光电技术研发中心, 长春 130033)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 针对现有 LED 光源建模适用条件及可靠性不确定性的问题, 对紧凑型 LED 配光设计中光源建模可靠性进行了研究. 通过优化设计具有不同透镜光源直径比模型的方法, 对点光源、表面光源、ray 文件光源三种建模方式在系统中的差异进行分析对比. 整体设计以 ray 文件光源模型为基准, 以常规紧凑型全反射式透镜为二次配光元件, 对不同透镜光源直径比(光束角分别为  $\pm 15^\circ$ 、 $\pm 10^\circ$ 、 $\pm 5^\circ$ ) 的光学系统进行优化设计和分析计算. 结果表明: 在能量利用率误差为  $\pm 2\%$  的范围内, 光束角为  $\pm 15^\circ$ , 透镜光源直径比大于 36 : 2 时, 表面光源建模可代替 ray 文件光源建模; 光束角  $\pm 10^\circ$ , 透镜光源直径比为 44 : 2 时, 表面光源建模可代替 ray 光源建模; 光束角为  $\pm 5^\circ$ , 透镜光源直径比为 82 : 2 时, 表面光源建模可代替 ray 文件光源建模. 但是在  $\pm 2\%$  误差范围内, 点光源无论在何种透镜光源直径比, 任何光束角下均不能代替 ray 文件光源. 这一结果为紧凑型系统设计中光源模拟提供了依据, 同时解决了采用 ray 文件光源建模进行辅助优化设计耗时较长的问题, 为相关研究提供了参照依据.

**关键词:** 非成像光学; LED; 光源模型; 光学仿真; 点光源; 表面光源; ray 光源

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)02-0222003-5

## Reliability of Light Source Modeling for Distribution Design on Compact LED

DONG Li, LIU Hua, WANG Yao, SUN Qiang, LIU Ying, XIN Di, JIN Lei

(1 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 10033, China)

(2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 10049, China)

**Abstract:** To overcome disadvantages of modeling application and uncertainties of the reliabilities of the existing LED light source model and others, the reliability of light source modeling was studied for distribution design on compact LED. By optimizing different models with different lens and LED diameters ratio, the difference of three modeling methods including point light source model, surface light source model and ray-file light source model in the system was compared and analyzed. Taking the ray-file light model as the standard, an optimal design and analysis computation of the optical element were carried out when the beam angle was  $\pm 15^\circ$ ,  $\pm 10^\circ$ ,  $\pm 5^\circ$  for different lens and LED diameter ratio, by choosing the conventional compact total-reflection lens as the second optical element and using three modeling methods including point light source model, surface light source model and ray-file light source model. Experimental results indicate that surface light model can take place of the ray-file light model when the deviation of utilization of energy is within  $\pm 2\%$ , the beam angle is  $\pm 15^\circ$  meanwhile lens and LED diameter ratio is more than 36 : 2. It happens too when the beam angle is  $\pm 10^\circ$  while the lens and

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划项目 (No. 2012C13227101)、中科院三期创新项目和吉林省科技发展计划项目 (No. 20130206018GX) 资助

**第一作者:** 董丽 (1989-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为 LED 光源模拟. Email: 957576921@qq.com

**通讯作者:** 刘华 (1976-), 女, 副研究员, 博士, 主要研究方向为光学检测、光学设计、衍射光学. Email: girlluhua@sohu.com

**导 师:** 孙强 (1971-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为衍射光学、红外光学、光学系统设计、非成像光学和光学检测. Email: sunq@ciomp.ac.cn

**收稿日期:** 2013-06-03; **录用日期:** 2013-07-11

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

LED diameter is 44 : 2. In the case that the beam angle is  $\pm 5^\circ$ , and the lens and LED diameter ratio is 82 : 2, the ray-file light source model can also be taken place by the surface light source model. However, the ray-file light source model cannot be replaced by the point light source model in any case when the deviation range falls into  $\pm 2\%$ . The results provide basis for the system design and solve the problem of time wasting of assisting optimal design by using ray light source model, which will be of great benefit to the future research.

**Key words:** Non-imaging optics; LED; Light source model; Optical simulation; Point source; Surface source; Ray-File source

**OCIS:** 220.4298; 220.3620; 240.0240

## 0 引言

紧凑型 LED 配光透镜是 LED 二次光学设计的发展方向<sup>[1-4]</sup>. LED 光源(即 LED 芯片)作为系统的组成部分,其光源建模的准确性直接影响目标面的光场及能量分布,同时它也是整个光学系统的设计、辅助优化的基础,因而光源准确建模是 LED 灯具技术研究的重点之一.

目前,常用的光源建模方法有三种:ray 文件光源(简称 ray 光源)建模法、点光源建模法、表面光源建模法. ray 光源模型是由 LED 生产商提供的光源实际测试数据构建的,具有较高的准确度.但是这种方式存在两个普遍的问题:1)芯片种类繁多,许多芯片生产商并未提供实际的测试数据;2)用 ray 光源建模法进行二次配光、优化辅助型设计时历时较长,设计效率低.点光源建模法和表面光源建模法较为方便简单,是目前 LED 配光设计中最为常用的建模方法,并且二次配光元件的初始模型都是基于点光源建立的<sup>[5-7]</sup>,辅助设计优化大部分采用表面光源建立<sup>[4,8]</sup>.但这两种建模方法的可靠性如何,能否在一定条件下替换 ray 光源建模,是该领域设计者最为关心的问题.为此,Thoger Krai 等<sup>[9]</sup>人以小角度透镜为例对点光源、ray 光源两种建模方式进行了分析,获得了点光源模型替代 ray 光源模型的条件.但是,前人的研究仅仅局限于点光源和 ray 光源在小角度情况下的替代关系,难以满足现在 LED 灯具设计的实际应用需求.

基于以上问题,本文针对常用光源建模方法在不同光束角内可靠性问题进行了具体研究.采用非成像光学理论,以 ray 光源模型作为对比标准,以全反射式透镜为例,通过优化不同比例透镜光源模型的方法,对点光源、表面光源、ray 光源建模三种建模方式分别在大( $\pm 15^\circ$ )、中( $\pm 10^\circ$ )、小( $\pm 5^\circ$ )三种不同光束角度系统中的差异及可靠性进行分析对比.最终得出光束角  $\pm 15^\circ$ ,模型比达到 36 : 2 时,表面光源建模与 ray 光源建模之间的差异才可忽略,表面光源建模是可靠的;在光束角为  $\pm 10^\circ$ ,该模型比为 44 : 2;在光束角为  $\pm 5^\circ$ ,该模型比为 82 : 2.而对于点光源建模与 ray 光源模型相比始终存在一定的差异,在紧凑型 LED 配光设计中

不宜采用点光源建模.这一结果为紧凑型系统设计中光源模拟提供了参考依据.

## 1 研究方法

本文选择常用的紧凑型全反射式二次配光元件作为初始模型,其二维模型如图 1.其中, $\theta$ 为光束角,透射面①和全反射面②都为自由曲面,通过能量守恒及斯涅尔定律计算得到.为了研究方便定义模型比为透镜直径  $D$  与芯片大小  $d$  之比.

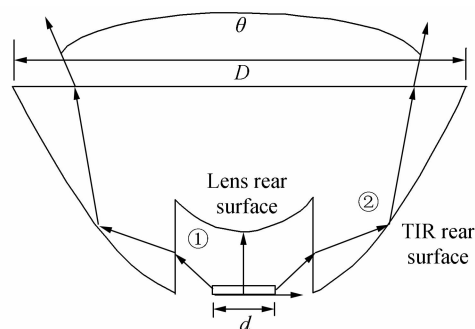


图 1 透镜模型  
Fig. 1 Lens model

点光源建模即将光源视为一点,只包含光强信息.表面建模是将 LED 光源文档提供的发光强度和波长分布曲线(亮度信息)输入到特定的建模工具中,然后通过描点取样后获得,最后将其赋予发光面导出. ray 光源建模主要描述 LED 光线的出射模式,同时包含发射点坐标、发射方向、光线强度和波长等信息.

只有在点光源、表面光源、ray 文件光源三种典型空间分布光线<sup>[10]</sup>高度相似的前提下,三种建模方式的差异比较才是有意义的,从而才可以研究它们之间的替换性.本文用 NCC<sup>[11]</sup>来表示三种建模方式之间的相似度.通过计算得出,点光源、表面光源与实际 ray 光源之间的 NCC 值均大于 98%.由于这三种建模方式由光源发出光线的典型空间分布误差达到 2%,所以在确定模型比下,光源和系统配合并且目标面上三种建模方式之间的能量利用率之差在  $\pm 2\%$  之间时,可认为它们之间是可以相互替换的.

图 2 为三种建模方式可靠性分析流程图.建模设计验证的过程包括:1)建立初始透镜模型;2)在一定模

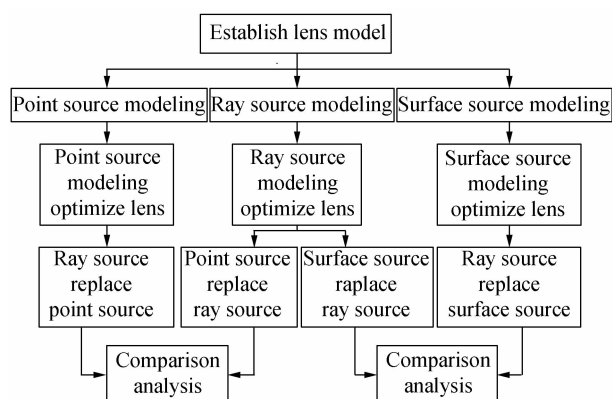


图2 三种建模方式可靠性分析流程

Fig. 2 Flowcharts of reliability analysis of three different modeling methods

型比下,用点光源、ray光源和表面光源分别优化透镜;3)互换建模:在一定模型比下,互换点光源与ray光源建模、表面光源与ray光源建;4)对比分析,以目标面的能量利用率为评价标准获得点光源、表面光源与ray光源在能量利用率误差为 $\pm 2\%$ 之内的可替换性。

## 2 仿真分析

### 2.1 最优透镜设计及分析

整体优化<sup>[12]</sup>以自由曲面上点的位置作为优化变量,以目标面上最大光通量和实际光通量之差作为优化函数,用 $\Delta\Phi$ 表示, $\Delta\Phi$ 值越小,说明自由曲面透镜的光能利用率越好。光线在经过每个面时会发生折反射,当光线垂直入射时菲涅尔损失达到目标面最大的光通量为92.2%。ray光源采用cree xml-cw,芯片大小 $2 \times 2 \text{ mm}^2$ 。点光源、表面光源、ray光源建模三种建模方式在每个模型比下迭代次数为2700次。最终以 $\Delta\Phi$ 最小的透镜模型作为每种建模方式的最优透镜配合光源进行分析。

由于考虑到光斜入射时菲涅尔损失比垂直入射大,因此以目标面上目标有效能量达到 $91.9 \pm 0.2\%$ 的透镜结构为最优透镜。优化结果显示,点光源建模在不同光束角下优化透镜在目标面的能量均在91%左右。为便于表示,用直线代替,如图3。

光束角为 $\pm 5^\circ$ 时,模型比从14:2增至82:2,ray光源建模在目标面的能量从16%增加到91%;表面光源建模在目标面的能量从32%增加到91%。

光束角为 $\pm 10^\circ$ 时,模型比从14:2增至44:2,ray光源建模在目标面的能量从52%增加到91%;表面光源建模在目标面的能量从32%增加到91%。

光束角为 $\pm 15^\circ$ 时,模型比从12:2增至32:2,ray光源建模在目标面的能量从68%增加到91%;表面光源建模在目标面的能量从84%增加到91%。

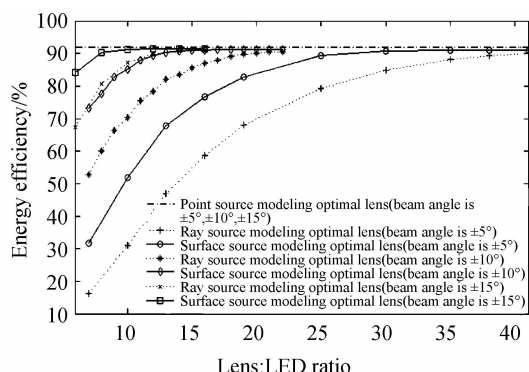


图3 点光源、表面光源、ray光源建模在各个模型比下分别优化后目标面的能量利用率

Fig. 3 The energy utilization ratio of point source, ray source, surface source optimized under each model at the target surface, respectively

### 2.2 替换建模

在同一光束角、某一模型比下,验证点光源建模可靠性的条件:点光源建模最优透镜、ray光源建模最优透镜、点光源用ray光源替换、ray光源用点光源替换四种建模方式,在目标面上的能量差值之差在 $\pm 2\%$ 之间。在此时点光源即可替换ray光源同时说明点光源是可靠的。验证表面光源的可靠性原理与点光源相同。

#### 2.2.1 ray光源建模和点光源建模相互替换

点光源用ray光源替换,结果如图4中虚曲线。随着模型比的增大,光束角为 $\pm 5^\circ$ 时,点光源用ray光源替换后在目标面上的能量值从13.8%逐渐增加到84%。光束角为 $\pm 10^\circ$ ,该能量值从41%增加到86.8%;光束角为 $\pm 15^\circ$ ,该能量值从53.9%增加到87%。

ray光源用点光源替换,结果如图4中实曲线。随着模型比的增大,光束角为 $\pm 5^\circ$ 时,ray光源用点光源替换后在目标面上的能量值从74.6%逐渐增加到91%;光束角为 $\pm 10^\circ$ 时,该能量值从86.3%增加到91%;光束角为 $\pm 15^\circ$ 时,该能量值从90.6%增加到91%。

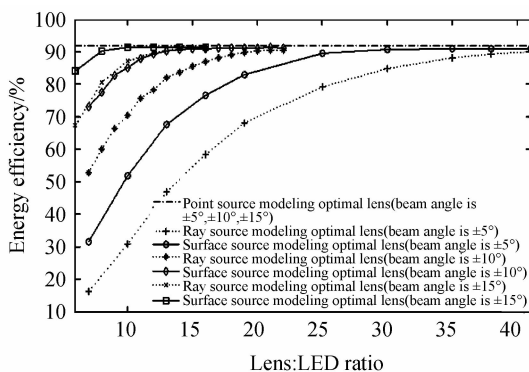


图4 ray光源建模、点光源建模在各个模型比下分别相互替换后目标面上的能量利用率

Fig. 4 The energy utilization ratio of point source, ray source after replacing each other under each model at the target surface, respectively

对点光源建模与 ray 光源建模进行比较,结合图 3 和图 4,可看出:无论在何种模型比下,点光源用实际 ray 光源建模替换后目标面上的能量值普遍低于 ray 光源建模最优透镜在目标面上的能量值.当光束角为  $\pm 5^\circ$  时,随着模型比从 14:2 增加到 82:2,以点光源配合 ray 光源建模最优透镜,目标面上的能量值从 74.6% 增加到 91%;以 ray 光源配合点光源建模最优透镜,目标面上的能量值从 13.8% 增加到 84%. 后者的能量值始终低于前者,说明在光束角为  $\pm 5^\circ$  时,此模型比下点光源均无法代替 ray 光源进行系统的建模.这一结论与 Thoger Krai 采用其他模型时得出的结论相似.

当光束角为  $\pm 10^\circ$  时,随着模型比的增大,以点光源配合 ray 光源建模最优透镜,目标面上的能量值从 41% 增加到 86.8%;以 ray 光源配合点光源建模最优透镜,目标面上的能量值从 86.3% 增加到 91%. 后者的能量值与前者相比仍存在差异,且该差异并不在允许范围内.当光束角为  $\pm 15^\circ$  时,也能得到相同的结论.因此,在系统中,点光源建模与实际 ray 光源建模相比仍存在一定误差,在设计透镜时不建议用点光源进行建模.

### 2.2.2 ray 光源建模和表面光源建模相互替换

ray 光源用表面光源替换,结果如图 5 中实曲线所示.随着模型比的增大,光束角为  $\pm 5^\circ$  时,ray 光源用表面光源替换后在目标面上的能量值从 31.6% 增加到 91%;光束角为  $\pm 10^\circ$ ,该能量值从 73% 增加到 91%;光束角为  $\pm 15^\circ$ ,该能量值从 84.1% 增加到 91.3%.

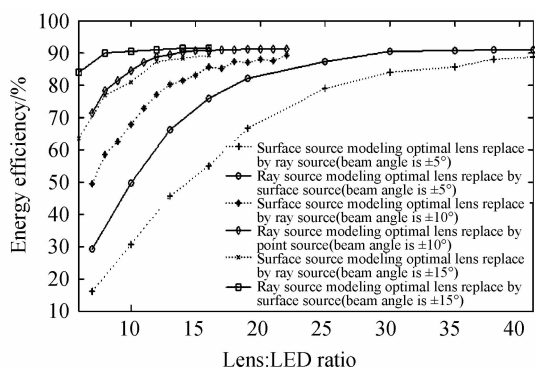


图 5 ray 光源建模、表面光源建模载各个模型比下分别相互替换后目标面的能量利用率

Fig. 5 The energy utilization ratio of surface source, ray source after replacing each other under each model at the target surface, respectively

表面光源用 ray 光源替换,结果如图 5 中虚曲线所示.随着模型比的增大,光束角为  $\pm 5^\circ$  时,ray 光源用表面光源替换后在目标面上的能量值从 16.1% 增加到 89.2%;光束角为  $\pm 10^\circ$  时,该能量值从 49.3% 增加到 89%;光束角为  $\pm 15^\circ$  时,该能量值从 63.5% 增加

到 90%.

将对表面光源建模和 ray 光源建模进行比较,结合图 3,图 5,可看出:在光束角为  $\pm 5^\circ$ ,模型比为 14:2 时,表面光源、ray 光源、表面光源用 ray 光源替换、ray 光源用表面光源替换四种建模方式在目标面上的能量值分别为 31.6%、16.2%、16.1%、29.2%. 四种建模方式的能量差距值最大为 16%. 当模型比增至 82:2,四种建模方式在目标面的能量值均达到 90% 左右.此时,可认定在光束角  $\pm 5^\circ$ 、模型比为 82:2 时,我们能表面光源建模的方式为系统找到所需的二次配光元件,从而说明在此模型比、此光束角下表面光源是可靠的.而在该模型比之前表面光源建模方法的准确度会大大降低.当光束角为  $\pm 10^\circ$ ,该模型比为 44:2;光束角为  $\pm 15^\circ$ ,该模型比为 32:2. 以上数据,可以为紧凑型 LED 配光设计提供依据,同时减少辅助设计时间,对后续工作的开展非常有利.

## 3 结论

本文基于 Tracepro 软件大量优化的结果,探讨点光源、表面光源、ray 光源三种建模方式与系统配合时的建模差异,从而找出它们之间替换的可行性.整体建模分析以 ray 光源建模为对比原型,分别以朗伯型点光源、实际发光曲线面光源导入,利用 matlab 软件对数据进行对比分析.最终发现,在光束角为  $\pm 5^\circ$ 、 $\pm 10^\circ$ 、 $\pm 15^\circ$ ,模型比从 12:2 增至 82:2 的过程中,点光源建模无法找到系统最优的配光元件,同时无法替代 ray 光源进行建模;表面建模在模型比为 82:2、44:2、32:2 之前可信度很低,只有达到这个比例后才可以代替 ray 光源进行建模.本文解决了无 ray 光源情况下的光源建模,并且避免了利用 ray 光源辅助设计的优化耗时问题.

### 参考文献

- [1] DOMHARDT A, WEINGAERTNER S, ROHLFING U, *et al.* TIR optics for non-rotationally symmetric illumination design[C]. SPIE, 2008, **7103**: 0401-0411.
- [2] JINBO J, S TO, LEE W B, *et al.* Optical design of a freeform TIR lens for LED streetlight[J]. *Elsevier*, 2009, **121**: 1761-1765.
- [3] LUO Xiao-xia, LIU Hua, LU Zhen-wu, *et al.* Freeform lens design for streetlight illumination[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(9): 1351-1355.
- [4] 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): 1351-1355.
- [5] CHEN J J, LIN C T. Freeform surface design for a light-emitting diode - based collimating[J]. *Optical Engineering*, 2010, **49**(9): 3001-3008.
- [6] SUN Li-wei, JIN Shang-zhong, CEN Song-yuan. Free-form Micro-lens design for solid state lighting[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(5): 860-865.
- [7] 孙理伟,金尚忠,岑松原. 用于固态照明的自由曲面微透镜设计[J]. *光子学报*, 2010, **39**(5): 860-865.
- [8] WANG G Z, WANG L L, LI F L, *et al.* Collimating lens for

- light-emitting-diode light source based on non-imaging optics [J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(11): 1654-1659.
- [7] HUANG K L, CHEN J J, WANG T Y, *et al.* Free-form lens design for LED indoor illumination[C]. SPIE, 2010, **7852**: 1D1-1D8.
- [8] HAO Jian, LIU Hua, Wang Yao, *et al.* Local optimization of freeform surface lens for uniform illumination of LED[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, **50**(7): 072202.  
郝剑,刘华,王尧,等.LED自由曲面匀光透镜的局部优化设计方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, **50**(7): 072202.
- [9] KARI T, GADEGAARD J, SONDERGARARD T, *et al.* Reliability of point source approximations in compact LED lens designs[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(s6): 1190-1195.
- [10] MORENO I, SUN C C. Modeling the radiation pattern of LEDs[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(3): 1808-1819.
- [11] SUN C C, CHIEN W T, MORENO I, *et al.* Analysis of the far-field region of LEDs[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(16): 13918-13927.
- [12] WU R M, LIU P, ZHENG Z R, *et al.* Optimized luminous intensity distribution for LED illumination[J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, **0049**: 1-13.
- [13] LUO Y, FENG Z X, HAN Y J, *et al.* Design of compact and smooth free-form optical system with uniform illuminance for LED source[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(9): 9055-9063.
- [14] WANG K, CHEN F, LIU Z Y, *et al.* Design of compact freeform lens for application specific light-emitting diode packaging[J]. *Optics Express*, 2012, **18**(2): 413-425.
- [15] KARI T, GADEGAARD J, JORGENSEN D T, *et al.* Compact lens with circular spot profile for square die LEDs in multi-LED projectors[J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(24): 4860-4867.
- [16] DING Yi, ZHENG Zhen-rong, GU Pei-fu. Freeform lens design for uniform illumination[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(6): 1486-1490.  
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): 1486-1490.