

LED 扩展光源均匀照明的透镜设计

陈俄振, 郭震宁, 智佳军

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 提出一种用发光二极管(LED)扩展光源设计旋转对称透镜的简易方法,并建立旋转对称的光学模型.根据边缘光线原理,反向延长扩展光源边缘与透镜边缘的光线交于一点,定义该点作为点光源,并结合 Snell 折射定律矢量形式和逐次逼近法,建立光源与接收面的对应关系.设定透镜自由曲面的初始点坐标,用 Matlab 软件逐一算出其余各个点坐标,最后连接各个点成为透镜的自由曲面,通过 Light Tools 光学软件建模与蒙特卡罗光线追击.结果表明:此方法设计出的旋转对称透镜可在 1 m 距离处,实现半径为 578 mm 的均匀圆形光斑.

关键词: 光学设计;发光二极管;扩展光源;透镜;边缘光线原理

中图分类号: TN 312.8; O 439

文献标志码: A

发光二极管(LED)以它固有的优势成为继白炽灯、荧光灯、高强度放电(HID)灯之后的第四代新光源^[1-2].2012年7月,为推进我国半导体照明科技创新,科技部颁布了《半导体照明科技发展“十二五”专项规划》,目前国际上大功率白光 LED 产业化的光效水平已经超过 $130 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$,实验室 LED 光效超过 $200 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$.但是,大功率的 LED 往往伴随着大尺寸,这给设计者带来了诸多的麻烦.当 LED 的尺寸大于光学系统尺寸的 $1/5$ 时,往往不能简单地把大尺寸的 LED 当作点光源,而应把这类大尺寸 LED 定义为扩展光源.基于扩展光源设计的光学系统有相当大的难度,一种针对扩展光源设计的方法——多表面同步(simultaneous multiple surface, SMS)设计法,可同时针对多个折射或反射面进行设计.2004年, Benitez 等^[3-4]在 SMS 2D 的基础上又提出了 SMS 3D 设计方法.该方法同时使用两个自由曲面对入射光进行偏折成为出射光,可有效控制扩展光源的光束,减少损失.2009年, Fournier 等^[5]基于扩展光源提出利用多片椭球面设计的自由反射曲面.2010年,王洪等^[6]根据 LED 光源各向均匀亮度的性质设计一种旋转对称透镜.以上的几种方法都能得到 LED 扩展光源的自由曲线,不足之处是计算过程极其繁琐,不易把控.本文针对旋转对称透镜,根据边缘光线原理^[7-13]和能量守恒定律,研究基于扩展光源设计的一种透镜.

1 实验方法

1.1 光学模型

以半径为 r 的圆作为 LED 扩展光源来设计透镜,光强分布是朗伯型,其旋转对称的光学系统截面图如图 1 所示.设计透镜目的是在接收面上达到照度为 E 的圆形均匀光斑,光斑半径为 R_{\max} .透镜的入射面为平面,透镜的出射面是要设计的自由曲面,光线经透镜两个界面发生折射,接收面距离光源的出射面 L' .

边缘光线原理指出:光源的边缘 a 发出的光线照在透镜的边缘 a' ,经过透镜两次折射后照在接收

收稿日期: 2012-12-15

通信作者: 郭震宁(1958-),男,教授,主要从事半导体发光器件及光学设计的研究. E-mail: znguo2003@yahoo.com.cn.

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

面的 $a''^{[14]}$, 这时, 边缘光线入射/出射角度最大, 定义为 θ_{\max} ; 光源的另一端边缘 b 的光线照在透镜的另一端边缘 b' , 经过透镜两次折射后照在接收面的 b'' ; 由于系统是完美地旋转对称, 光源的中心点发出的光线必定照在透镜的中心点处, 穿透透镜后光线不发生偏移, 照在接收面的中心处. 光源的其余部分发出的光线依次照在透镜入射面的相应位置, 两次折射后照在接收面的相应位置, 最终使得接受面上的照度均为 E , 实现均匀照明的效果.

1.2 理想点光源设计透镜原理

如果把扩展光源分成无限多个点光源, 每个点光源对应一个透镜, 而每个透镜都会产生均匀光斑, 需要无限多个透镜. 这正是所谓的复眼透镜法(即重叠法), 但其过程的计算相当复杂. 这里, 借助边缘光线原理具体说明设计透镜的方法. 如图 1 所示, 反向延长扩展光源发出的光线交于 O 点, 可以认为 O 点发出孔径角为 $2 \times \theta_{\max}$ 的光都照在透镜上, 将 O 点定义为无限小尺寸的点光源, 光强分布同样是朗伯型. 化繁为简, 可以根据 O 点处的点光源设计透镜.

LED 光强分布函数 $I(\theta) = I_0 \times \cos \theta$, 其中 I_0 为 LED 法向方向的光强, θ 为出射光线与 LED 法向方向的夹角. 根据能量守恒定律, 为使 LED 发出光能均匀的分布在接收面上, 假设入射角度为 θ 的光线折射到接收面 R 点, 则有

$$\int I(\theta) \times 2\pi \times \sin \theta d\theta = \int E \times 2\pi \times R dR, \tag{1}$$

且入射角 $\theta = \theta_{\max}$ 的光线折射到接收面的 $R = R_{\max}$ 处, 入射角 $\theta = 0$ 的光线折射到 $R = 0$ 处. 经化简可得

$$R = R_{\max} \times \frac{\sin \theta}{\sin \theta_{\max}}. \tag{2}$$

这里, 将 θ_{\max} 平均分成 n 等份, 则入射角 $\theta_i = \theta_{\max} \times i/n, i = 0, 1, 2, \dots, n$. θ_i 对应接收面 R_i 的位置. Snell 定律的矢量形式为

$$\sqrt{n_i^2 + n_o^2 - 2n_i n_o (\mathbf{O} \times \mathbf{I})} \times \mathbf{N} = n_o \mathbf{O} - n_i \mathbf{I}. \tag{3}$$

式(3)中: \mathbf{I} 和 \mathbf{O} 分别表示入射光线的单位矢量和出射光线的单位矢量; \mathbf{N} 表示折射(或反射)界面的法向向量; n_i 表示入射光线 \mathbf{I} 所在介质的折射率; n_o 表示出射光线 \mathbf{O} 所在介质的折射率.

透镜入射面的折射光线 \mathbf{O}' 作为透镜出射光线的入射光线 \mathbf{I}' , 透镜的入射面各点的矢量均是 $\mathbf{N} = (0, 1)$, 求解透镜出射面各点步骤为

1) 当入射光线 $\mathbf{I}_0 = (\sin \theta_0, \cos \theta_0) = (0, 1)$ 时(即 $\theta = 0$), 出射光线 $\mathbf{O}_0 = (0, 1)$, 设定透镜出射面的第一点坐标为 $P_0 = (0, d)$, 这是透镜的初始点.

2) 当入射光线 $\mathbf{I}_1 = (\sin \theta_1, \cos \theta_1)$ 时, 根据式(3), 可得 $\mathbf{O}'_1 = (\frac{\sin \theta_1}{n}, \frac{\sqrt{n^2 - (\sin \theta_1)^2}}{n})$, $\mathbf{I}'_1 = \mathbf{O}'_1$, 利用逐次逼近法求近似解^[15] \mathbf{I}'_1 , 交 P_0 的切平面于 P_1 点, 当 θ_1 很小时可把 P_1 作为透镜自由曲面的第二个点坐标.

3) 结合式(2)和式(3)可求得 P_1 点的出射光线 \mathbf{O}_1 的坐标, 也能求得 P_1 的法向向量, 得出 P_1 点切平面. 利用逐次逼近法求近似解, 第三条光线 \mathbf{I}_1 交 P_1 点的切平面于 P_2 , 当 θ_2 很小时可以把 P_2 当作自由曲面的第三点坐标.

4) 依此类推, 可算出自由曲面一系列的点坐标 P_0, P_1, \dots, P_n , 连接各个点即得透镜的自由曲面.

2 建模与仿真

欲使光线经透镜折射后最大张角 30° , 即设置接收面距离透镜的距离 $L' = 1\ 000\ \text{mm}$, 光斑的半径 $R_{\max} = 578\ \text{mm}$, LED 扩展光源的直径 $10\ \text{mm}$, 距离透镜的 $L = 25\ \text{mm}$, 边缘最大入射角度 $\theta_{\max} = 45^\circ$, 可

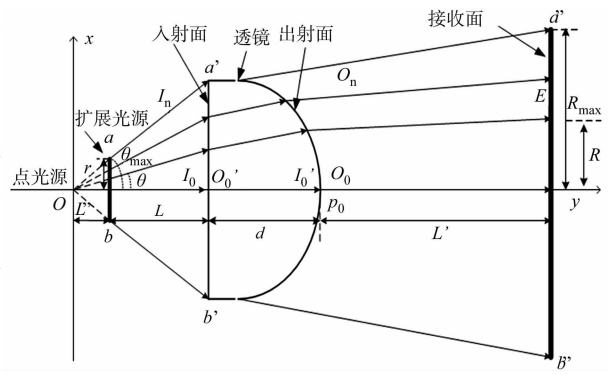


图 1 旋转对称光学系统的横截面及光路走向示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the cross-section of rotationally symmetric optical system and light path

得出 $L''=5\text{ mm}$. 以坐标原点为电光源, 则透镜的初始点 P_0 的 y 轴坐标位置等于 $L''+L+d=40\text{ mm}$, 用 Matlab 计算软件可以求出一系列各点, 连接各个点成一条自由曲线, 如图 2 所示. 设置透镜的厚度 $d=10\text{ mm}$, 导入 3D 软件 Pro/E 旋转使其变为实体, 并导入到 Light Tools 光学软件中, 透镜材质设为 PMMA, 进行蒙特卡罗光线追迹, 如图 3 所示. 图 4 为其仿真照度图. 图 4 中: E 为照度; s 为位置.

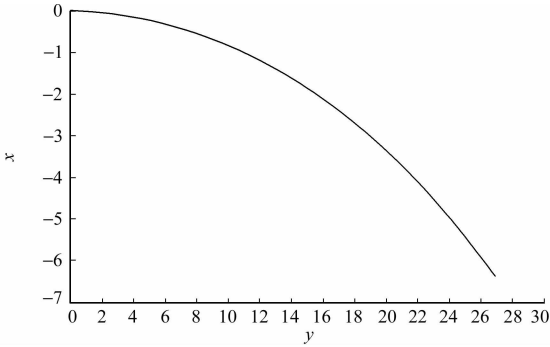


图 2 透镜自由曲线的坐标示意图
Fig.2 Schematic diagram of coordinates
of lens free curve

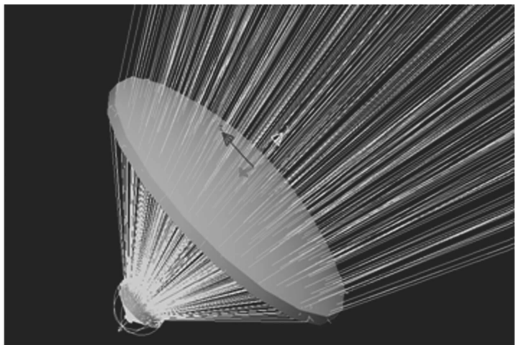
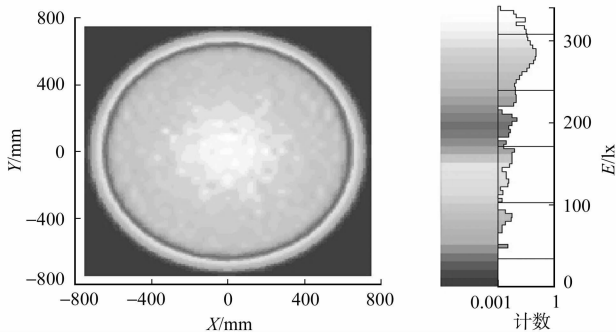
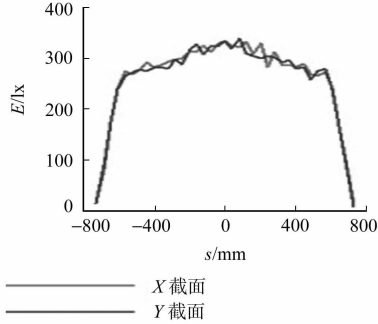


图 3 蒙特卡罗光线追击的光学模型示意图
Fig.3 Schematic diagram of optical model
with monte carlo ray tracing



(a) 接收面上的照度分布图



(b) 照度分布的横截面

图 4 仿真照度图
Fig.4 Illuminance distribution of simulation

从仿真结果可知:接收面上光斑基本落在 $(-578,578)$ 的范围内,在这个范围之外几乎没有光照;横截面照度图基本呈现“门”字型,且在 $(-578,578)$ 的范围内照度曲线趋于平坦,仿真结果与理论结算相符合.从图 4(a)可知:在接收面的中心处其照度值要高些,两边有所稍微有所下降.这是由于旋转对称的透镜是根据点光源来设计,实际仿真用的是扩展光源,必然有所差异,并且在求解透镜自由曲线的各个点时, n 值越大,仿真的效果会越好,但是计算时间会越长.

3 结束语

针对扩展光源均匀照明的光学设计难题,提出了一种 LED 扩展光源的透镜设计方法.根据边缘光线原理,技巧性地将扩展光源转换为点光源,利用成熟理论计算出透镜的自由曲线,仿真模型后得到“门”字型的均匀光斑.对于扩展光源的透镜设计,这种方法不需要复杂的计算过程,可以满足一定环境的照明需要.其缺点是此方法只是适用于旋转对称的透镜,对于偏轴的透镜难于实现均匀光斑.在今后工作中,借鉴于方法设计的透镜,进一步研究 LED 扩展光源的旋转对称的反射杯设计.

参考文献:

[1] 毛兴武,张艳雯,周建军,等.新一代绿色光源 LED 及其应用技术[M].北京:人民邮电出版社,2008:25-52.
[2] 李建功,郭震宁,董菁菁,等.一种圆形导光板散射网点的设计与仿真[J].华侨大学学报:自然科学版,2013,33(5): 495-498.
[3] DROSS O,MOHEDANO R,BENITEZ P,et al. Review of SMS design methods and real world applications[J]. Proc

- SPIE,2004,5529:35-47.
- [4] BENITEZ P,MINANO J C,BLEN J,et al. Simultaneous multiple surface optical design method in three dimensions[J]. Optical Engineering,2004,43(7):1489-1502.
- [5] FOURNIER F R,CASSARLY W J,ROLLAND J P. Designing freeform reflectors for extended sources[J]. Proc SPIE,2009,7423:742302(1-12).
- [6] WANG Hong,WANG Hai-hong,DU Nai-feng,et al. Study on optical design method for LED extended sources[J]. Proc SPIE,2010,7655:765536(1-6).
- [7] RICH H,RABL A. Edge-ray principle of nonimaging optics[J]. Optical Society of America,1994,11(10):2627-2632.
- [8] RIES H R,WINSTON R. Tailored edge-ray reflectors for illumination[J]. Optical Society of America,1994,11(4):1260-1264.
- [9] SUN Xu-tao,ZHENG Zhen-rong,LIU Xu,et al. Etendue analysis and measurement of light source with elliptical reflector[J]. Displays,2006,27(2):56-61.
- [10] WINSTON R,MINANO J C,BZNITEZ P,et al. Nonimaging optics[M]. New York:Elsevier-Academic Press,2005:112-118.
- [11] 罗毅,张贤鹏,王霖,等. 半导体照明中的非成像光学及其应用[J]. 中国激光,2008,35(7):963-971.
- [12] MORENO I,TZONCHEV R I. Effects on illumination uniformity due to dilution no arrays of LEDs[J]. Proc SPIE,2004,5529:268-275.
- [13] ONG P T,GORDON J M,RABL A,et al. Tailored edge-ray design for uniform illumination of distant targets[J]. Opt Eng,1995,34(6):1726-1737.
- [14] 蒋金波,杜雪,李荣彬. 自由曲面 LED 路灯透镜设计[J]. 液晶与显示,2008,23(5):589-594.
- [15] 张以谟. 应用光学[M]. 北京:电子工业出版社,2010:203-205.

Lens Design with Uniform Illumination of the LED Extended Sources

CHEN E-zhen, GUO Zhen-ning, ZHI Jia-jun

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

Abstract: This paper propose a simple design method for rotationally symmetric lens which use light-emitting diode (LED) extended sources and establish the rotationally symmetric optical model. According to the edge-ray theory, reversedly extend the ray lines of the surce edge and the lens edge to intersect at one point, then define this point as point source. Combining with the snell law of refraction in vector form and the successive approximation method, establish the corresponding relation between the light source and the receiving surface, then set the initial point position of the lens free-form surface, and calculate out the other points position by matlab software, at last, connect all the points in turn and form the lens free-form surface. Through the Light Tools software modeling and ray tracing by monte carlo theory, the results show that the method of designing the rotationally symmetric lens can realize a uniform circular facula which radius is 578 mm in the 1 m distance to the lens.

Keywords: optical design; light-emitting diode; extended source; lens; edge-ray theory

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:吴逢铁)