

# 大面型LED紧凑型匀透镜优化设计

徐超 高淑梅 钱维莹 刘诚 高培丽

江南大学理学院, 江苏 无锡 214000

**摘要** 通常的商用和民用LED照明都期望照明器件小型化,同时具有高光通量和照明均匀度。近年市场出现的板上芯片(COB)-LED可以具有较高的光通量,但在有限的区域实现特定的照度分布就需要通过二次光学设计来实现。针对大面型COB-LED加紧凑型自由曲面透镜的小型照明器件,提出了一种在圆形照明区域内实现均匀照明的快速优化设计方法。优化设计时,以等弧长方法有效减少优化点的选取,提高优化效率。结合三次样条插值理论和自定义优化函数,在TracePro软件二次开发环境中实现了目标区域的均匀照明,照明均匀性和光能利用率分别达到90%和95%以上。该方法还适用于COB-LED芯片一次封装匀透镜的设计。

**关键词** 光学设计;板上芯片;自由曲面;紧凑型透镜;优化设计;均匀照明

中图分类号 O432 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.042201

## A Optimization Design of Compact Uniform Lens for Large-Size LED

Xu Chao Gao Shumei Qian Weiying Liu Cheng Gao Peili

School of Science, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214000, China

**Abstract** The miniaturization of LED lamp with high luminous flux and light uniformity is the pursuit of LED lighting, including commercial and civil lighting. The chips on board (COB)-LED appeared recent years has high flux. However, special secondary optics still need to generate the required irradiance distribution. For small lighting device with compact freeform surface lens on large size COB-LED, a fast optimization design method to achieve the goal of uniform illumination in circular region is proposed. During the optimization, equal arc-length method is applied to reduce the number of optimization points, thus optimization efficiency is enhanced substantially. Combining the cubic spline interpolation and custom merit function, uniform illumination on the target area with light angle at range of  $30^\circ$  to  $50^\circ$  is realized in secondary development environment of TracePro software. The illumination uniformity and light energy utilization rate of the target plane reach more than 90% and 95% respectively. This method is also suitable for the design of uniform lens for COB-LED package.

**Key words** optical design; chips on board; freeform surface; compact lens; optimization design; uniform illumination

**OCIS codes** 220.2945; 220.4298; 220.3620; 220.4830

## 1 引言

LED照明是21世纪重要的节能战略之一,很多国家和地区包括中国、欧洲、北美等已经开始全面或部分禁止白炽灯,在商业照明中,用LED光源代替传统光源已经成为一种趋势。目前应用于普通商业照明中的LED的发光效率约120 lm/W<sup>[1]</sup>,单芯片LED的光通量已经无法满足人们对高光通量的照明需求。很多厂家采用单芯片LED加透镜组合并阵列的模式来实现高光通量<sup>[2]</sup>,这种模式却增大了照明器件结构,且容易出现照明光色不匀等问题。为保证LED灯具的小型化,简化照明器件结构,常以高功率的板上芯片(COB)型LED为光源,只使用单一自由曲面透镜就可实现高光通量的照明需求。然而由于COB-LED光源面积较大,要实现光色均匀,又不增大照明器件,减小透镜高度是设计紧凑型透镜的关键<sup>[3-4]</sup>。因为当光源直径与透

收稿日期: 2014-09-29; 收到修改稿日期: 2014-11-19; 网络出版日期: 2015-02-10

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK2012548)

作者简介: 徐超(1989—),男,硕士研究生,主要从事光学设计方面的研究。E-mail: xuchao198910@163.com

导师简介: 高淑梅(1961—),女,博士,教授,主要从事光学成像与光谱技术方面的研究。

E-mail: gaosm@jiangnan.edu.cn

镜高度比例大于1:5时(如1:3),属于扩展光源配光设计的范畴,不能直接运用基于点光源设计所得的配光器件,否则容易存在照明区域出现暗斑或暗环的问题<sup>[6]</sup>。

国、内外针对LED扩展光源的配光问题进行了诸多研究,Benitez等<sup>[6]</sup>提出SMS方法来控制扩展光源的边缘光线;Bortz等<sup>[7-8]</sup>将扩展光源离散成多个点光源设计,得到实现均匀照明的透镜组的广义函数;Fournier等<sup>[9-10]</sup>将反射器表面离散成多个椭圆曲面来优化扩展光源在目标面上的照明分布;Luo等<sup>[11-12]</sup>通过反复对比预期照度值与实际照度值进行修正的方法,对LED一次封装型路灯透镜进行了优化设计研究。但上述方法的设计难度和复杂性都较大,优化时间较长,不适用于一般的光学设计人员。而且其中一些方法需要用到多透镜或者非连续自由曲面透镜,大大增加了加工的难度。

因此,本文提出一种简捷有效的快速优化设计方法来实现扩展光源系统的均匀照明效果,针对大面型COB-LED光源,拟通过只采用单一连续自由曲面透镜设计,即可获得高均匀性和高光能利用率的照明器件,并通过有效地减少优化点的方法达到快速优化设计的目的。

## 2 设计与优化原理

根据点光源设计的理论<sup>[13-19]</sup>,结合能量守恒和斯涅耳定律迭代计算透镜的初始结构。通过有效减少优化点的选取和三次样条进行照明器件的重构,运用TracePro软件中宏语言建立优化函数,完成自动优化设计。

### 2.1 透镜的初始结构

对于光源直径为 $d$ 的面型LED光源,将其简化为点光源处理,建立面型LED光源与目标平面的能量对应关系,如图1所示。假设LED光源中心位于原点 $O$ 处,目标面与原点距离为 $H$ , $O$ 点出射光线与光轴( $z$ 轴)的夹角为 $\theta_i$ ( $\theta_0=0$ )。设透镜高度为 $h$ ,则自由曲面透镜顶点为 $P_0(0,0,h)$ 。

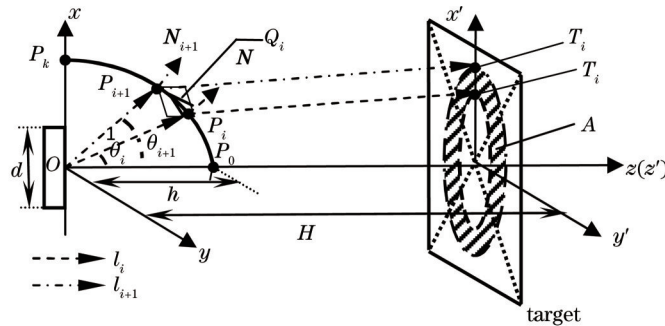


图1 LED光源与目标面能量拓扑关系图

Fig.1 Energy topological diagram between LED source and target plane

将LED光源的光通量分为 $k$ 等份 $\Phi_0$ 。设目标面照明半径为 $R_{\max}$ ,并将其也划分为 $k$ 份等面积 $A_0$ ,设每个圆环的半径为 $R_i$ ,则 $\Phi_0$ 与 $A_0$ 可描述为

$$\Phi_0 = 2\pi \int_{\theta_i}^{\theta_{i+1}} I_0 \cos \theta \sin \theta d\theta = \frac{2\pi}{k} \int_0^{\pi/2} I_0 \cos \theta \sin \theta d\theta, \quad (1)$$

$$A_0 = \pi R_{i+1}^2 - \pi R_i^2 = \pi R_{\max}^2 / k, \quad (2)$$

式中 $I_0$ 为中心光强, $i=0,1,\dots,k-1$ , $R_0=0$ 。因此, $A_0$ 上的平均照度均为 $E_0=\Phi_0/A_0$ ,从而实现目标面的均匀照明。

已知 $P_0$ 处单位法向量 $N_0$ 为 $(0,0,1)$ ,令光线 $l_i$ ( $i=1\sim k$ )经自由曲面上 $P_i$ 点折射后到达目标面上 $T_i$ 点,则根据折射定律矢量公式,可知 $P_i(x_i,0,z_i)$ 处单位法向量:

$$N_i = \frac{O_{\text{out}-i} - nN_{\text{in}-i}}{\sqrt{1+n^2-2(O_{\text{out}-i} \cdot N_{\text{in}-i})}}, \quad (3)$$

式中 $O_{\text{out}-i} = \frac{\{T_i(R_i,0,H) - P_i(x_i,0,z_i)\}}{\|T_i(R_i,0,H) - P_i(x_i,0,z_i)\|}$ ,  $N_{\text{in}-i} = \frac{\{P_i(x_i,0,z_i) - O(0,0,0)\}}{\|P_i(x_i,0,z_i) - O(0,0,0)\|}$ ,  $i=0,1,\dots,k$ 。由此可得 $P_i$ 处切平面 $Q_i$ ,则 $P_{i+1}(x_{i+1},0,z_{i+1})$ 为光线 $l_{i+1}$ 经过传播与切平面 $Q_i$ 的交点,以此迭代出 $P_1(x_1,0,z_1)\sim P_k(x_k,0,z_k)$ 。

### 2.2 优化设计

如直接将面型LED光源运用到基于点光源计算所得的初始透镜中,会出现照明恶化的问题<sup>[6]</sup>,故需要对

所设计的初始结构进行优化,以实现面型LED光源下的均匀照明。所设计的自由曲面透镜为轴对称性,因此只需对透镜轮廓 $\widehat{P_0P_k}$ 进行优化。透镜的轮廓通过三次样条插值来控制,其离散坐标点可以在优化过程中进行调整。为保证透镜的紧凑性,其高度 $h$ 应保持不变,故将 $P_0$ 设为恒定点,再进行优化点的选取。

通常优化点的选取方式有三种,如图2所示。图2(a)为直接选取计算所得的 $P_1\sim P_k$ 全部作为优化点。这种方法计算透镜初始结构时, $k$ 值通常很大( $k>1000$ 甚至 $k>10000$ ),要将初始轮廓的 $k$ 个离散点全部进行优化,会大大增加优化时间。因此,为提高优化搜索的效率,从 $k$ 个离散点中选取少量的优化点 $S_1\sim S_m$ ( $P_k$ )进行优化,这时 $m\ll k$ 。图2(b)和(c)分别为基于光源中心的等角度和等弧长方法选取少数离散点,分别满足:

$$\angle S_0OS_1 = \angle S_1OS_2 = \angle S_jOS_{j+1} = \angle S_{m-1}OS_m, \quad (4)$$

$$\widehat{S_0S_1} = \widehat{S_1S_2} = \widehat{S_{j-1}S_j} = \widehat{S_{m-1}S_m}. \quad (5)$$

可以看出,当选取的优化点数较少时,等角度方法会导致点的分布不均匀,如图2(b)中, $\widehat{S_{j-1}S_j} > \widehat{S_0S_1}$ 。此时通过三次样条插值建立的透镜轮廓将与初始轮廓出现较大的偏差,从而导致重构透镜的照明效果变差。图3为点光源下三种选取优化点方法重构透镜照明度图。显然,选择全部离散点重构透镜的图3(a)照明模拟结果达到了均匀照明的目标。而对等角度和等弧长选取优化点方法,当选取优化点数 $m=10$ 时,等弧长重构透镜结构的均匀度优于等角度的模拟结果,如图3(b)和(c)所示,图3(b)更接近图3(a)的照明效果。因此,综合考虑优化效率性和照明效果,以等弧长的方法选取优化点。

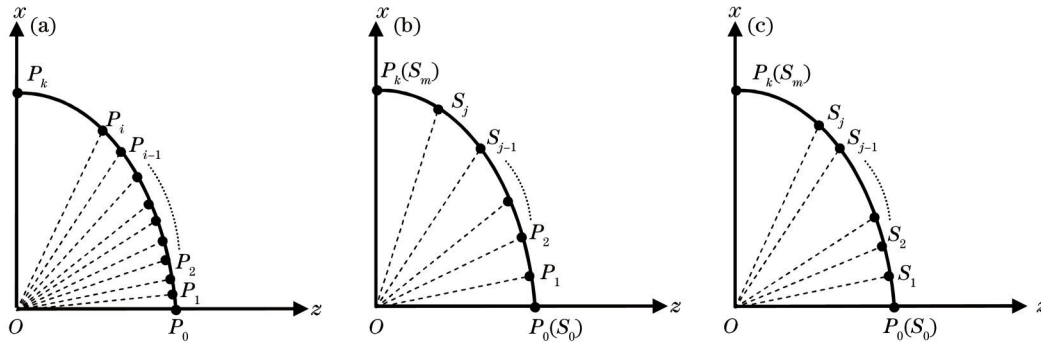


图2 优化点选取方法。(a)全部离散点;(b)等角度少数离散点;(c)等弧长少数离散点

Fig.2 Selection method of optimized points. (a) Total points; (b) few points by equal angle; (c) few points by equal arc-length

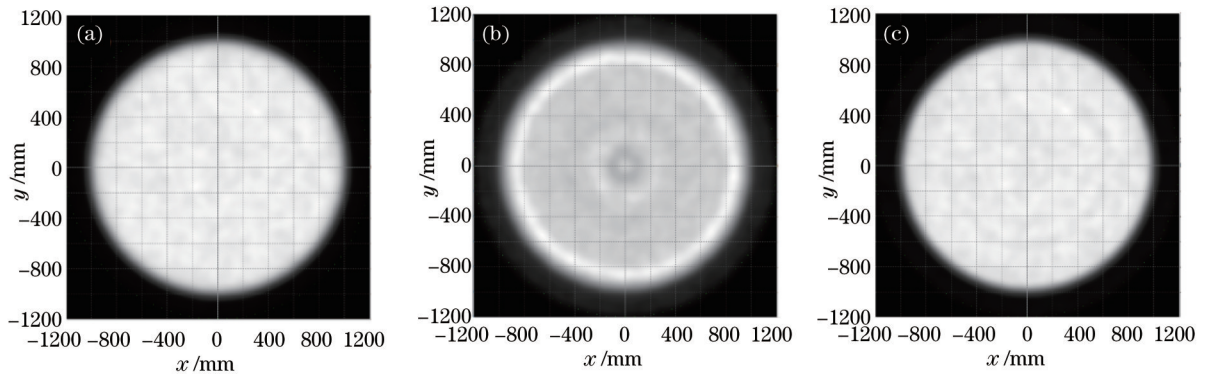


图3 不同优化点选取方法( $m=10$ )下的点光源照明度对比图

Fig.3 A comparison of irradiance map with point source with different selection methods of optimized points ( $m=10$ )

在对透镜进行重构时,考虑到三次样条易于实现曲线的光滑连接、控制和修改,常被用于描述自由曲面轮廓的形状<sup>[20]</sup>,故以优化点为基础,运用三次样条插值原理,如图4所示,对每小段( $j=1,2,\dots,m$ )进行三次样条的数学形式 $f_j$ 的拟合:

$$f_j = (1-t)y_{j-1} + ty_j + t(1-t)[a_j(1-t) + b_jt], \quad (6)$$

式中  $t = \frac{x-x_{j-1}}{x_j-x_{j-1}}$ ,  $x_{j-1} \leq x \leq x_j$ ,  $a_j = k_{j-1}(x_j-x_{j-1}) - (y_j-y_{j-1})$ ,  $b_j = -k_j(x_j-x_{j-1}) + (y_j-y_{j-1})$ ,  $j=1,2,\dots,m$ 。

为保证相邻曲线段实现等曲率的光滑连接,曲线段 $f_{j-1}$ 在点 $S_{j-1}$ 的斜率应等于曲线段 $f_j$ 在 $S_{j-1}$ 的处斜率,在

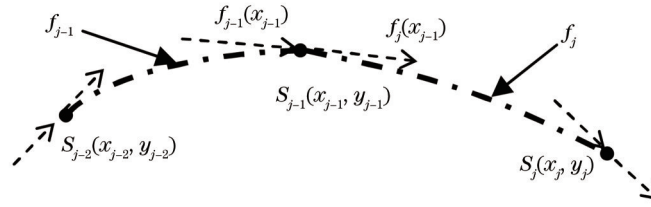


图4 三次样条曲线插值原理

Fig.4 Principle of cubic spline curve interpolation

$S_j$ 处的弯曲程度也应相等,即:

$$f'_{j-1}(x_{j-1}) = f'_j(x_{j-1}), \quad (7)$$

$$f''_{j-1}(x_{j-1}) = f''_j(x_{j-1}). \quad (8)$$

### 2.3 优化函数的建立

定义接收面的照明均匀度函数为  $U_{e-q}$  和光能量利用率函数为  $U_{\phi-q}$ , 即

$$\begin{cases} U_{e-q} = \frac{E_{\text{aver}-q}}{E_{\text{max}-q}}, \\ U_{\phi-q} = \frac{\Phi_{g-q}}{\Phi_{s-q}}, \end{cases} \quad (9)$$

式中  $E_{\text{max}-q}$  表示接收面上的照度最大值,  $E_{\text{aver}-q}$  表示接收面上的照度平均值。  $\Phi_{g-q}$  表示指定区域内的光通量,  $\Phi_{s-q}$  表示光源发出的光通量。

设  $S_1 \sim S_m(P_k)$  数据组为  $C_j (j=1 \sim m)$ , 为消除扩展光源引起目标面上的照度不均, 在  $C_j$  中的  $x_j$  项和  $z_j$  项前分别引入优化修正系数  $a_j$  和  $b_j$ , 则有  $C'_j = (x'_j, 0, z'_j)$ , 其中

$$\begin{cases} x'_j = a_j x_j, \\ z'_j = b_j z_j, \end{cases} \quad (10)$$

式中  $a_j$  和  $b_j$  通常是一个上升序列, 根据照度反馈数据在优化过程中进行适当调整。

进而, 为提高照明均匀度和光能利用率, 定义一个优化函数:

$$F_M = \max(w_e U_{e-q} + w_\phi U_{\phi-q}), \quad (11)$$

其中  $w_e$  和  $w_\phi$  为权重, 且  $w_e > w_\phi$ ,  $q=1, 2, \dots, N$ ,  $N$  取决于  $a_j$  和  $b_j$  的范围, 即  $N$  由  $a_j$  和  $b_j$  的变化范围和步长及  $a_j$  和  $b_j$  的个数决定。

最后, 在 TracePro 二次开发环境 (Scheme Editor) 中, 建立以  $R_{\text{max}}$  为半径、距离光源为  $H$  的圆形接受面。根据  $P_0$  和  $C'_j$  数据, 实现透镜轮廓的三次样条拟合, 再旋转生成透镜实体进行光线追迹优化。

## 3 实例设计与仿真分析

作为商用照明中常见筒灯的一个设计实例, 设计了一个应用于 COB-LED (光源为朗伯发光) 的紧凑型匀光透镜。光源直径与透镜厚度比为 1:3, 照明距离为 1000 mm, 照明范围为半径 1000 mm 的圆, 透镜材料为聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) ( $n=1.4935$ ), 相关光学参数见表 1。

表 1 光学设计参数

Table 1 Optical design parameter

Parameter	Value
$d/h$	1:3
$n$	1.4935
$m$	10
$H/\text{mm}$	1000
$R_{\text{max}}/\text{mm}$	1000
$d/\text{mm}$	10



根据(1)~(3)式,通过迭代计算可得匀光透镜初始轮廓线,以等弧长的选取方法选取优化点,优化完成后,以100万光线追迹来减小蒙特卡罗方法的统计误差。透镜的照度图如图5所示,图5(a)和(b)分别为点光源和为大面型COB-LED光源下初始透镜的照明模拟效。显然,后者在照明区域中出现了明显的照明暗斑,照明边界较为模糊,整体均匀度不足70%。图5(c)是优化后透镜在大面型COB-LED光源下的照明模拟效果,显然COB-LED光源的光能量在接受面上实现了等照度分布,照明均匀性在90%以上,且光能利用率高,达到了96.67%。

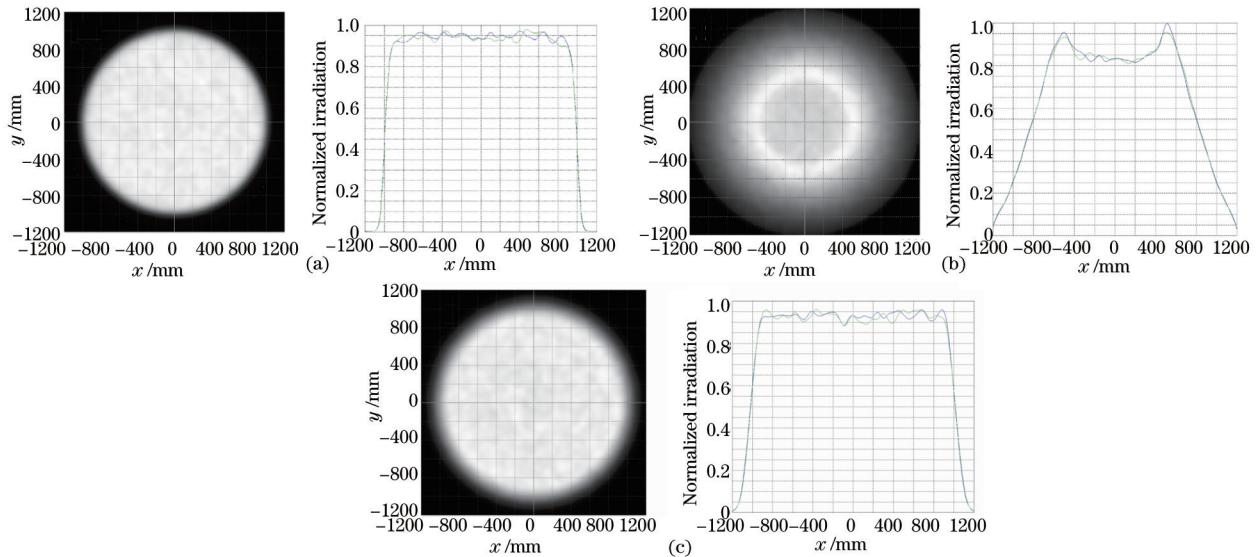


图5 接收面照度分布。(a)初始透镜;(b)优化前;(c)优化后

Fig.5 Illuminance distribution of the target plane. (a) Initial lens; (b) before optimization; (c) after optimization

通常,针对均匀照明,期望照明均匀性和光能利用率分别保持在85%和90%以上。因单自由曲面对面型LED光源的控制能力有限,还研究了光源直径与透镜厚度比为1:1,1:2和1:4的优化情况。图6(a)、(b)、(c)、(d)分别给出了光源直径与透镜厚度比例为1:1,1:2,1:3和1:4均匀照明优化后的照度对比图,分析可知,当光源直径与透镜厚度比为1:1时,以连续的单自由曲面较难实现理想的均匀照明分布,整体均匀性下降到73%,照明的边界变得很模糊,照明区域会出现微弱的暗环,且光能利用相对率低,仅有80%;当光源直径与透镜厚度比为1:2时,能勉强实现照明区域内的均匀照明,但其照明边界变得较为模糊,照明中心会存在微弱的暗斑问题,整体均匀性在85%左右,光能利用率在90%左右;当光源直径与透镜厚度为1:3和1:4时,能较好地实

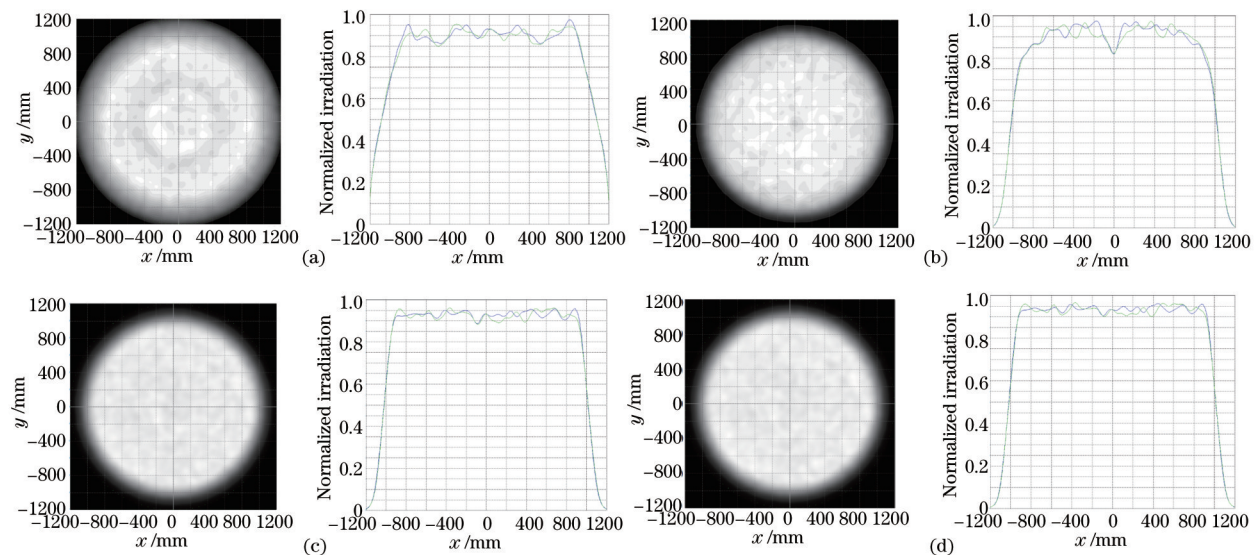


图6 不同光源直径与透镜厚度比例下照度图。(a)1:1;(b)1:2;(c)1:3;(d)1:4

Fig.6 Illuminance distribution with different rates of source diameter and lens height. (a) 1:1; (b) 1:2; (c) 1:3; (d) 1:4

现照明区域内的均匀照明,整体均匀性和光能利用率均在90%以上。因此,在实际设计连续的单自由曲面紧凑型匀透镜时,如追求高质量照明(均匀性大于90%),建议光源直径与透镜厚度比例不大于1:3。

此外,为验证该优化设计方法的一般性,以光源直径与透镜厚度比1:3为例,设计了同距离下( $H=1000$  mm),不同照明范围( $R_{\max}$  为1200,1000,800,600 mm)下的自由曲面匀透镜,设计结果相关参数见表2。分析可知,均匀性均保持在85%以上,光能利用率均达到95%以上,说明了该优化方法的准确性与可靠性。

表2 不同照明范围下透镜的照明参数

Table 2 Uniformity and efficiency of lens with different illumination zones

$R_{\max}$ /mm	Uniformity /%	Efficiency /%
1200	86.12	95.43
1000	92.54	96.67
800	88.33	97.15
600	85.65	97.22

## 4 结 论

为满足商用照明日益增长的对高光通量和高均匀照明度的需求,针对大型面 COB-LED,采用单一透镜设计紧凑型照明器件,可以达到照明均匀度大于90%和光能利用率大于95%;优化设计时,采用有效地减少优化点进行三次样条插值重构透镜的方法,可以明显提高优化效率;三种优化点选取方式中,等弧长方式选取优化点重构透镜方法能更好地快速实现均匀照明效果;对比分析了光源直径与透镜比例为1:1,1:2,1:3和1:4的均匀照明优化情况,要保证较高的均匀性,需要将比例控制在1:3以内。

本研究结果不仅适用于 COB 型 LED 为光源的照明器件设计,还可以用于 COB-LED 芯片一次封装匀透镜的设计。设计工作量少、优化时间短、缩小照明器件,节约成本是本设计的优势所在。

## 参 考 文 献

- 1 Qian Lü. Philips introduced premium economy LED floodlighting solution named Tango G2 [J]. *Science & Technology of Ports*, 2013, 12: 35.  
千 绿. 飞利浦推出 Tango G2 超值经济型 LED 泛光照明解决方案[J]. *港口科技*, 2013, 12: 35.
- 2 Kuang Lunghuang. Free-form lens design for LED indoor illumination [C]. *SPIE*, 2010, 7852: 78521D.
- 3 Zhang Qihui. Optical Design Method of High-Power LED Lighting System [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010. 34-38.  
张奇辉. 大功率 LED 照明系统光学设计方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010. 34-38.
- 4 Wang Hong, Wang Haihong, Du Naifeng, *et al.*. Study on optical design method for LED extended sources [C]. *SPIE*, 2010, 7655: 765536.
- 5 Wang Hong, Zhang Xiaofan, Du Naifeng, *et al.*. Reflector design method of integrated high-power LED light source [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1282-1286.  
王 洪, 张小凡, 杜乃锋, 等. 面向大功率 LED 集成光源的反射器设计方法[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(7): 1282-1286.
- 6 P Benitez, J C Minano, J Blen, *et al.*. Simultaneous multiple surface optical design method in three dimensions [J]. *Opt Eng*, 2004, 43(7): 1489-1502.
- 7 J Bortz, N Shatz. Generalized functional method of nonimaging optical design [C]. *SPIE*, 2006, 6338: 633805.
- 8 J Bortz, N Shatz. Iterative generalized functional method of nonimaging optical design [C]. *SPIE*, 2007, 6670: 66700A.
- 9 F R Fournier, W J Cassarly, J P Rolland, *et al.*. Optimization of single reflectors for extended sources [C]. *SPIE*, 2008, 7103: 710301.
- 10 F R Fournier, W J Cassarly, P Jannick, *et al.*. Fast freeform reflector generation using source-target maps [J]. *Opt Express*, 2010, 18(5): 5295-5304.
- 11 Yi Luo, Zexin Feng, Yanjun Han, *et al.*. Design of compact and smooth free-form optical system with uniform illuminance for LED source [J]. *Opt Express*, 2010, 18(9): 9055-9063.
- 12 Kai Wang, Fei Chen, Zongyuan Liu, *et al.*. Design of compact freeform lens for application specific light-emitting diode packaging [J]. *Opt Express*, 2010: 18(2): 413-425.

- 13 Ding Yi, Liu Xu, Zhen Zhenrong, *et al.*. Freeform LED lens for uniform illumination [J]. Opt Express, 2008, 16(17): 12958–12966.
- 14 Wang Kai. Free-Form Surface Optics Research on High-Power LED Package and Application [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011. 22–36.  
王 恺. 大功率LED封装与应用的自由曲面光学研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011. 22–36.
- 15 Luo Yi, Zhang Xianpen, Wang Lin, *et al.*. Non-imaging optics and its application in solid state lighting [J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(7): 963–971.  
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.
- 16 Luo Yi, Feng Zexin, Han Yanjun, *et al.*. Optics in solid state lighting [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900117  
罗 毅, 冯泽心, 韩彦军, 等. 面向半导体照明的光学[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900117.
- 17 Xin Di, Liu Hua, Lu Zhenwu, *et al.*. Optical design of the LED illumination system with adjustable view angle [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0522003.  
辛 迪, 刘 华, 卢振武, 等. 可变视场角LED照明光学系统设计[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0522003.
- 18 Li Mengyuan, Sun Jialue, Zhang Dawei, *et al.*. Optical system design for ultraviolet-LED curing based on the structure of freeform surface [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1222003.  
李梦远, 孙伽略, 张大伟, 等. 基于自由曲面透镜结构的紫外发光二极管固化系统光学设计[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1222003.
- 19 R Winston, J C Minano, P Benitez, *et al.*. Nonimaging Optics [M]. Amsterdam: Elsevier, 2005. 300–350.
- 20 L Pieg, W Tiller. The NURBS book [M]. New York: Springer, 1997. 10–50.

栏目编辑: 韩 峰