

# 一种主次镜组合 LED 准直照明系统设计与分析

杨帆, 何川, 张旭升\*

北京理工大学光电学院, 精密光电测试仪器及技术北京市重点实验室, 北京 100081

**摘要** 为使 LED 光源实现特定范围内的均匀照明, 提出了一种由复合抛物面集光器和自由曲面透镜结合的主次镜两级准直照明设计方法。该方法可将照明系统出射角控制在 $\pm 5^\circ \sim \pm 15^\circ$ 范围内, 并在目标区域内实现均匀照明。仿真结果显示: 系统出射角在 $\pm 5^\circ \sim \pm 15^\circ$ 范围内, 理想情况下该系统的能量利用率和照明均匀度均可达 85% 以上; 同时, 系统的照明均匀度不会随照明距离的改变发生显著变化, 在实际应用中可通过改变照明距离来改变光斑大小和光斑照度。

**关键词** 光学设计; 非成像光学; 复合抛物面集光器; 同步多表面法; 自由曲面透镜

中图分类号 O435

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.082201

## Design and Analysis of a Primary-Secondary System for LED Collimating Illumination

Yang Fan, He Chuan, Zhang Xusheng\*

Beijing Key Lab for Precision Optoelectronic Measurement Instrument and Technology, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

**Abstract** A primary-secondary collimating illumination design method based on compound parabolic concentrator and freeform lens is proposed in order for using LED light source to achieve uniform illumination within a specific region. This method can confine the exit angle of the system in the range of  $\pm 5^\circ \sim \pm 15^\circ$  and achieve a uniform illumination in the target region. Simulation results show that when the exit angle of the emit light is between  $\pm 5^\circ$  and  $\pm 15^\circ$ , both of the energy efficiency and the illumination uniformity can exceed 85% under the ideal conditions. Also, the illumination uniformity of the system will not change significantly with the alter of illumination distance, and we can change the illumination distance to change the spot size and spot brightness in practice.

**Key words** optical design; nonimaging optics; compound parabolic concentrator; simultaneous multiple surface method; freeform lens

**OCIS codes** 220.4298; 220.2945; 080.2740

## 1 引言

对于发光特性呈朗伯分布且发光角为 $\pm 90^\circ$ 的 LED 扩展光源, 需要对其进行特定的配光设计才能使其更好地适用于实际应用。LED 配光设计的目标是产生指定的辐照分布, 并尽可能提高能量效率和照明均匀度。近年来, 国内外在 LED 配光方面取得了不少成果<sup>[1-9]</sup>; 丁毅等<sup>[3]</sup>提出了一种实现均匀照明的自由曲面反射器的设计方案, 可使系统照明均匀度接近 90%; 荆雷等<sup>[4]</sup>提出的紧凑型高亮度发光

二极管准直镜可使照明均匀度达到 92%, 其能效为 52.11%; 张航等<sup>[5]</sup>设计的 LED 准直器实际能效可达 79%; Grabovičkić 等<sup>[6]</sup>设计的 TIR-RXI 聚光器在理想情况下可以达到 75% 的能效; Moiseev 等<sup>[7]</sup>设计的 TIR 透镜针对小尺寸 LED 光源可以达到 90% 以上的照明均匀度, 但不适用于较大尺寸的 LED; 潘浩等<sup>[8]</sup>基于三次样条曲线进行设计的自由曲面透镜可以达到 80% 以上的能效; 赵欢等<sup>[9]</sup>提出了用于均匀照明的双自由曲面透镜, 可以达到 80% 以上的均匀性和能效。在上述的设计方案中, 高能

收稿日期: 2018-01-12; 修回日期: 2018-02-01; 录用日期: 2018-02-10

基金项目: 国家自然科学基金(61405011)、北京理工大学基础研究基金(20140442003)

\* E-mail: zhangxs@bit.edu.cn

效和高照明均匀度往往不能同时实现。为解决此难题,本文结合非成像光学中的扩展量守恒原理及针对扩展光源的同步多表面设计法(SMS)<sup>[10]</sup>等,提出了一种可在 $\pm 5^\circ \sim \pm 15^\circ$ 出射角范围内实现高能效和高照明均匀度的LED准直设计方案,并使用光学仿真软件LightTools对其进行了建模仿真及照明效果分析。

## 2 方案设计

### 2.1 总体方案

在LED的配光设计中,主要考虑的设计指标是出射角、能量效率以及照明均匀性。如图1所示,对于反射镜结构来说,它可以有效收集从光源出射的大角度光线,并使其进入照明面,但是位于光线 $r_1$ 和光线 $r_2$ 之间的光线就无法进入照明面,这将会降低系统的能量效率。理论上可通过延长反射镜来收集位于 $r_1$ 和 $r_2$ 之间的光线,但这样会使反射镜过长、过大,不具有实际应用价值。对于透镜结构来说,它可以收集角度小于 $\theta$ 的光线,并使其进入照明面,但角度大于 $\theta$ 的光线无法通过透镜并进入照明面,因此会降低系统的能量效率。

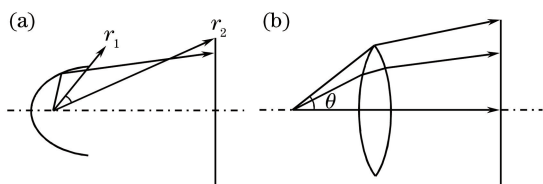


图1 (a)反射镜模型和(b)透镜模型

Fig. 1 (a) Reflector model and (b) lens model

部分LED具有较大的发光角。为有效控制LED照明光学系统的出射角,并提高系统能量利用率,需要对LED出射光进行合理配光,以达到最佳的设计效果。考虑到以上两种系统各自的优缺点,本研究采用两种结构相结合的方式设计:先使用复合抛物面集光器(CPC)将发光角接近 $\pm 90^\circ$ 的LED出射光调整为出射角为 $\pm \theta_1$ 的光束;再利用自由曲面透镜将出射角进一步收缩为 $\pm \theta$ ( $\theta < \theta_1$ )。总体设计原理如图2所示,其中:LED光源位于CPC的小口端;透镜以CPC出口为二次光源,透镜的口径、位置等设计满足扩展量守恒原则,以达到尽可能高的能效。

### 2.2 CPC反射镜设计

图3为CPC的基本原理和设计原理。如图3(a)所示,LED出射光经CPC后,其出射角将变为 $\pm \theta_1$ 。在图3(b)中,AB段抛物线以D点为焦点,

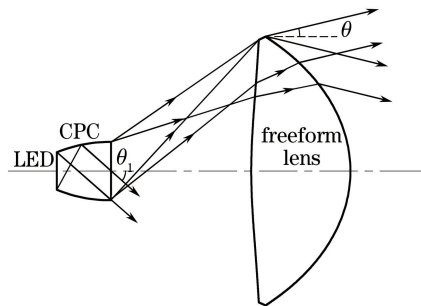


图2 系统设计原理

Fig. 2 Design principle of the system

直线 $L$ 为其轴线,且直线 $L$ 与 $x$ 轴正方向所成夹角为 $\alpha = \theta_1 + 90^\circ$ ,由此可得到抛物线方程为

$$\begin{cases} x = \frac{t}{1 - \cos \phi} \cos(\alpha + \phi) + D_x \\ y = \frac{t}{1 - \cos \phi} \sin(\alpha + \phi) + D_y \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $t = \sqrt{(\mathbf{B} - \mathbf{D}) \cdot (\mathbf{B} - \mathbf{D})} - (\mathbf{B} - \mathbf{D}) \cdot (\cos \alpha, \sin \alpha)$ , $\mathbf{B}$ 和 $\mathbf{D}$ 分别为 $B$ 点和 $D$ 点的矢量; $D_x$ 和 $D_y$ 分别为 $D$ 点的横坐标和纵坐标; $\phi$ 为抛物线焦点和抛物线上计算点所成的矢量与抛物线轴线所成的夹角; $x$ 和 $y$ 分别为抛物线上点的横坐标和纵坐标。设CPC下端口径为 $a$ ,光线出射角为 $\theta_1$ ,根据抛物线的性质可得其上端口径 $b$ 为

$$b = \frac{a}{\sin \theta_1}. \quad (2)$$

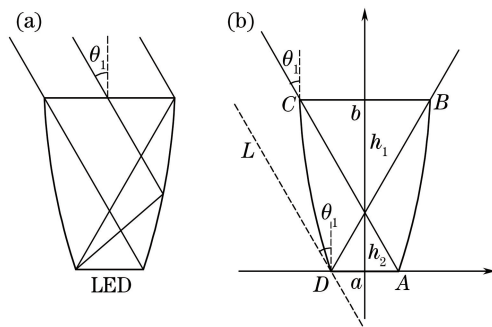


图3 (a)CPC基本原理和(b)CPC设计原理

Fig. 3 (a) Basic principle of CPC and (b) design principle of CPC

同时,可得CPC的高度 $h$ 为

$$h = h_1 + h_2 = b \frac{1 + \sin \theta_1}{2 \tan \theta_1}. \quad (3)$$

因此,可得 $A$ 、 $B$ 、 $D$ 三点的坐标分别为 $(a/2, 0)$ 、 $(b/2, h)$ 、 $(-a/2, 0)$ 。将这些点坐标代入(1)式所示的抛物线方程中,就可以计算得到 $AB$ 段抛物线的坐标数据,再将所得数据导入建模软件,根据旋转对称性即可得到设计的出射角为 $\pm \theta_1$ 的CPC。

### 2.3 自由曲面透镜设计

光学扩展量是描述光学系统通光能力的一个参数。对于一个理想的光学系统而言,其光学扩展量是守恒的。对于一个二维系统来说,光学扩展量的公式<sup>[10]</sup>为

$$U = 2n \times a \times \sin \theta, \quad (4)$$

式中: $n$ 为折射率; $a$ 为系统通光口径; $\theta$ 为半出射角。在非成像光学设计中,利用光学扩展量守恒原理可以得到几乎没有能量损失的理想光学系统,进而最大限度地提高系统的能量效率。

如图4所示,设计一个以 $E_1E_2$ 为光源、出射角为 $\pm\theta$ 的准直型自由曲面透镜,使光源边缘点 $E_1$ 、 $E_2$ 发出的光经透镜后形成准直光束,对应的波面分别为 $w_2$ 、 $w_1$ 。设计时首先根据扩展量守恒确定透镜的初始点。由扩展量定义[(4)式]可得 $E_1E_2$ 的扩展量值为 $U_1 = 2 \times E_1E_2 \times \sin \theta_1$ ,透镜的扩展量为 $U_2 = 2 \times NM \times \sin \theta$ ,根据扩展量守恒有 $U_1 = U_2$ ,可求得 $NM$ 的值,从而可以确定透镜的口径。考虑到透镜需要有一定的边缘厚度以及透镜前后表面之间的扩展量耦合关系, $N$ 应位于高度为 $NM/2$ 的水平线 $l$ 上, $X$ 则应位于由 $E_1$ 、 $E_2$ 和扩展量 $U_1$ 所确定的双曲线 $\text{hyp}_{E_1E_2}$ 上。

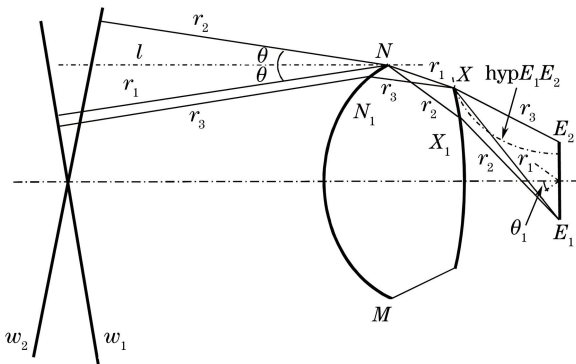


图4 自由曲面透镜的设计原理

Fig. 4 Design principle of the freeform lens

然后根据初始点 $N$ 和 $X$ 计算出点 $N_1$ 和 $X_1$ ,并得到SMS链 $NN_1$ 和 $XX_1$ 。由点 $N$ 和 $X$ 以及光线 $r_1$ 可计算出透镜表面点 $N$ 和 $X$ 处的法线,光线 $r_2$ 在经过 $N$ 点与 $X_1$ 点折射之后到达 $E_1$ 点。根据光线 $NXE_1$ 和 $NX_1E_1$ 的光程相等,可计算得到点 $X_1$ 的坐标及其法线。再由经过 $N$ 点并且介于 $r_1$ 和 $r_2$ 方向之间的光线可以计算得到SMS链 $XX_1$ 。同时,可根据从波面 $w_1$ 出射的光线到点 $X$ 的光程相等,使用与上述相同的计算方法可以计算得到SMS链 $NN_1$ 。

最后,根据等光程原理,由上一步得到的SMS链 $NN_1$ 和 $XX_1$ 来迭代计算出自由曲面透镜的上半部轮廓曲线,并根据旋转对称性可得到完整的自由曲面透镜。

### 3 建模仿真与结果分析

本研究选用型号为CLU700-1002B8的LED,其圆形发光面直径为6 mm,发光特性呈朗伯分布且发光角为 $\pm 90^\circ$ ,设计目标是实现 $\pm 8^\circ$ 的出射角。应用上述设计方法分别得到CPC与自由曲面透镜的结构参数,此时CPC光线出射角为 $\pm 40^\circ$ ,且其对应的抛物线方程[(1)式]中的各项系数为: $t = 6.4840$ , $\alpha = 130^\circ$ , $D_x = -3$ , $D_y = 0$ 。在得到上述结果后,采用LightTools对系统进行建模,可得如图5所示的系统模型。

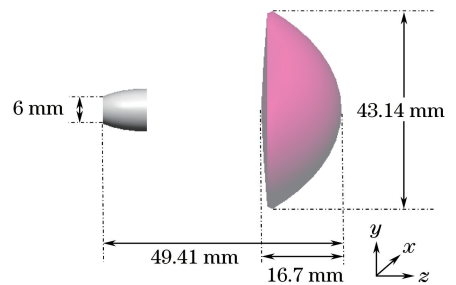


图5 光学系统模型

Fig. 5 Optical system model

然后采用蒙特卡罗光线追迹法,在不考虑界面光损失、光线数为 $2.5 \times 10^7$ 的条件下对系统的照明效果进行了仿真,得到如图6所示的仿真结果。

由图6(a)可见:组合光学系统的出射角为 $\pm 8^\circ$ ,与设计目标一致。在不考虑界面损失的理想情况下,系统的能量利用率可达93.5%;在将反射面反射率设置为96%且透镜折射面设置为菲涅耳损耗后,能量利用率仍有81.7%。

表1显示了接收面照明距离为2~5 m之间时所对应的照明均匀度。该结果表明,随着照明距离的改变,接收面上的照明均匀度并无显著变化,在应用中可根据实际需求来改变照明距离。

表1 接收面位于不同照明距离处的照明均匀度

Table 1 Illumination uniformity of the receive plane at different illumination distances

Illumination distance / m	2	3	4	5
Illumination uniformity / %	93.37	92.84	92.75	92.48

考虑到该系统由两个光学元件组合而成,在装配时会有误差,这里给出了如表2所示的装配公差及其对应的仿真结果。

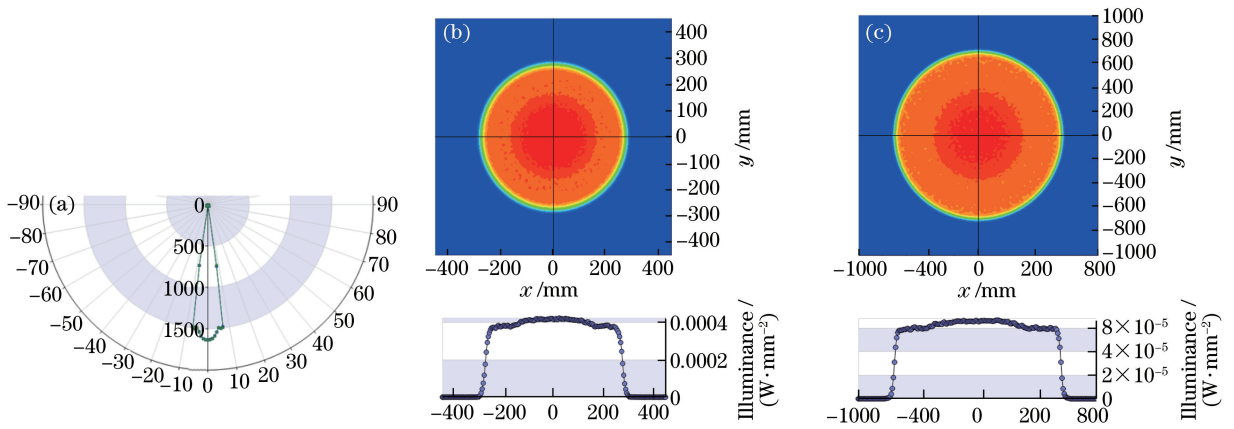


图 6 (a)出射光线的角度分布;(b) 2 m 处的照度分布;(c) 5 m 处的照度分布

Fig. 6 (a) Angle distribution of the exiting rays; (b) illuminance distribution at 2 m; (c) illuminance distribution at 5 m

表 2 出射角为  $8^\circ$  时的公差分析

Table 2 Tolerance analysis when exit angle is  $8^\circ$

Tolerance		Energy efficiency / %	Illumination uniformity at 5 m / %
No tolerance		93.5	92.5
Lens	Offset $z$ : $-0.5$ mm	94.5	91.5
	Offset $z$ : $+0.5$ mm	92.5	92.8
	Offset $y$ : $\pm 0.5$ mm	93.5	92.2
	Tilt $z$ : $\pm 0.5^\circ$	93.4	91.5
CPC	Offset $z$ : $\pm 0.1$ mm	91.7	92.0
	Offset $y$ : $\pm 0.1$ mm	91.6	92.1
	Tilt $z$ : $\pm 0.5^\circ$	92.2	92.4

由表 2 可知,在上述所给公差范围内,系统的能效没有明显变化,照明均匀度也没有明显变化。

此外,还对其他出射角进行了设计与仿真计算,结果如表 3 所示。

表 3 不同出射角对应的能量效率和照明均匀度

Table 3 Energy efficiency and illumination uniformity corresponding to different exit angles

Exit angle / ( $^\circ$ )	Lens aperture / mm	Lens thickness / mm	Energy efficiency / %	Illumination uniformity at 5 m / %
$\pm 3$	114.7	44.7	96.9	95.6
$\pm 5$	68.9	28.4	95.6	94.2
$\pm 8$	43.1	16.7	93.5	92.5
$\pm 10$	34.6	13.7	92.3	90.7
$\pm 12$	28.9	11.5	90.8	89.3
$\pm 15$	23.2	9.0	88.7	85.1
$\pm 20$	17.6	6.8	85.4	75.9

结果表明:在出射角小于  $\pm 15^\circ$  时,系统的能量效率和 5 m 处的照明均匀度都在 85% 以上;当出射角大于  $\pm 15^\circ$  时,系统的均匀度指标将降低至 85% 以下,此情况下若对均匀性有较高要求,可考虑在设计过程中采用均匀性修正算法;当出射角小于  $\pm 5^\circ$  时,透镜口径、厚度过大,实用价值不高。因此,本设计方案主要适用于出射角为  $\pm 5^\circ \sim \pm 15^\circ$  的情形;当出射角大于  $\pm 15^\circ$  时,若对照明均匀度没有很高的要求,仍可选用该方案。

## 4 结 论

提出了一种由 CPC 和自由曲面透镜组合而成的主次镜配光设计方案。通过主次镜两级光线收束的方法,将 LED 朗伯光源  $\pm 90^\circ$  的大发光角高效地调整为  $\pm 8^\circ$  左右的小出射角,其特点是:应用扩展量守恒原理最大限度地提高了能量效率,理论能效可达 85% 以上;在出射角为  $\pm 5^\circ \sim \pm 15^\circ$  的配光设计中,即使不特别考虑均匀性修正也能达到优于 85%

的辐照均匀度;应用边缘光线原理进行准直设计,照明均匀性不随照明距离的改变而发生显著变化。该设计方案结构紧凑、高效,可适用于多种照明场合,并可根据实际需求灵活地调整工作距离,以改变照明光斑的大小。

### 参 考 文 献

- [1] Zeng C L, Liao W Z. Secondary optical lens design for LED to achieve angular deflection [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(2): 022204.  
曾赤良, 廖文哲. 实现角度偏转的LED二次光学透镜设计 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(2): 022204.
- [2] Hua H, Mao X L, Tan J H, *et al.* Dynamic illumination design method based on LED array [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(10): 102202.  
花卉, 毛祥龙, 谭家海, 等. 基于LED阵列的动态照明设计方法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(10): 102202.
- [3] Ding Y, Gu P F. Freeform reflector for uniform illumination [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(3): 540-544.  
丁毅, 顾培夫. 实现均匀照明的自由曲面反射器 [J]. *光学学报*, 2007, 27(3): 540-544.
- [4] Jing L, Liu H, Zhao H F, *et al.* Compact collimator design for high-brightness light-emitting diode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(12): 1222001.  
荆雷, 刘华, 赵会富, 等. 紧凑型高亮度发光二极管准直镜设计 [J]. *光学学报*, 2011, 31(12): 1222001.
- [5] Zhang H, Liang X, Yan J H, *et al.* Compound parabolic concentrator-simultaneors multiple surfaces design methods for LED collimators [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0922004.  
张航, 梁雪, 严金华, 等. LED准直器设计中复合抛物面同步多曲面方法 [J]. *光学学报*, 2012, 32(9): 0922004.
- [6] Grabovičkić D, Benítez P, Miñano J C. TIR RXI collimator [J]. *Optics Express*, 2012, 20(S1): A51-A61.
- [7] Moiseev M A, Doskolovich L L. Design of TIR optics generating the prescribed irradiance distribution in the circle region [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2012, 29(9): 1758-1763.
- [8] Pan H, Chen G Q, Du B J. Design of double freeform surface lens for LED uniform illumination based on cubic splines [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(3): 032201.  
潘浩, 陈国庆, 杜伯钧. 基于三次样条的双自由曲面LED匀光透镜设计 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(3): 032201.
- [9] Zhao H, Li C G, Chen Z T, *et al.* Design of collimating lens with uniform illumination for LED based on double freeform surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(4): 0422001.  
赵欢, 李长庚, 陈志涛, 等. 基于双自由曲面的LED均匀照明准直透镜设计 [J]. *光学学报*, 2017, 37(4): 0422001.
- [10] Chaves J. *Introduction to nonimaging optics* [M]. Boca Raton: CRC Press, 2015.