

用于 LED 光源准直的紧凑型光学系统设计

苏宙平 阙立志 朱焯炜 孙晓鹏 李磊

(江南大学理学院, 江苏 无锡 214122)

摘要 设计了一种光学系统,用于发光二极管(LED)光源准直,并通过 TracePro 软件仿真进行了验证。该系统采取了折射和反射式自由曲面的组合,使 LED 光源的发散角从 70° 减少到约 4° ,效率在约 85%,系统的高度为 7.65 mm,口径为 8.73 mm。分析了折射和反射的最佳分界角区域是 $41^\circ\sim 45^\circ$,最佳分角比例因子是 0.4~0.5。

关键词 光学设计;发光二极管;自由曲面;准直系统;分界角

中图分类号 O435 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP49.022203

Optical System Design of the Compact Collimator for LED Source

Su Zhouping Que Lizhi Zhu Zhuowei Sun Xiaopeng Li Lei

(School of Science, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract A compact collimator for light-emitting diode (LED) source is designed. The collimator is a catadioptric rotational system. The refraction part is used to collimate the rays with small view angle, and the reflection part is used to collimate the rays with large view angle. The design results are verified by optical simulation software TracePro. The results show that the divergence angle can be reduced to about 4° from 70° by the collimator with the optical efficiency of 85%. The height and diameter of the system are 7.65 mm and 8.73 mm, respectively. The optimal separation angle range is $41^\circ\sim 45^\circ$, and the optimal proportion factor range of refraction angle is 0.4~0.5.

Key words optical design; light-emitting diode; free-form surface; collimator; separation angle

OCIS codes 220.2945; 220.4298; 220.0220

1 引言

发光二极管(LED)具有省电、使用寿命长、低压直接驱动、发热量较少等优点,是一种节能、环保的新型光源^[1~7]。随着白光 LED 技术的不断发展,LED 在较低工作电流下,色温可媲美日光灯,且演色性接近高性能的日光灯。因此,LED 广泛应用在各种照明领域,如路灯、车灯、投影仪及显示器中的背光源等。很明显,随着成本的不断降低,LED 必将成为主流的照明光源^[4]。

然而 LED 光源的发散角比较大(通常为 $\pm 70^\circ$),在远距离照明时,能量比较分散,使得照明面上的照度比较低,因此在应用于手电筒、港口或码头用的信号投射灯时,需要对 LED 输出光进行准直^[3]。采用单个反光杯或者自由曲面透镜都可以对 LED 光源进行准直。如果采用反光杯,对于发散角比较大的区域的光线可以很好地准直,而发散角比较小的区域的光线要打到反光杯上,需要把发反光杯做得很深,导致反光杯的体积很大,使用不便。如果采用自由曲面透镜,小角度区域的光线可以很好地准直,为使大角度光线能够打到自由曲面透镜上,透镜的口径要比较大。为了设计出紧凑型的 LED 准直系统,本文采取了折射、反射混合式设计,小角度区域的光线采用折射式的自由曲面透镜准直,而大角度区域的光线则采用自由曲面反光杯准直,有效地减小了准直系统的体积。该系统能够把 LED 光源的发散角减小到约 4° ,而系统的高度为 7.65 mm,口径为 8.73 mm。

收稿日期: 2011-09-29; 收到修改稿日期: 2011-10-12; 网络出版日期: 2011-12-23

基金项目: 国家自然科学基金(60908041)和中央高校基本科研业务费专项资金(JUSRP31005)资助课题。

作者简介: 苏宙平(1978—),男,博士,讲师,主要从事发光二极管照明光学和半导体激光光束质量控制等方面的研究。

E-mail: szpciomp@yaboo.com.cn

2 面形设计理论

2.1 折射部分自由曲面的设计

对于发散角比较小的光线采用折射式的准直系统,这里使用由双自由曲面构成的透镜,如图 1 所示。初始设计采用点光源。为了简化设计,可以认为 LED 光源光强分布是旋转对称的,因此可以先设计一个二维(2D)结构,然后旋转对称得到透镜的三维(3D)模型。透射部分由两个自由曲面 S_1 和 S_2 构成。 S_1 面上各点坐标为 $e_i(x_{1i}, y_{1i})$, S_2 面上各点 $E_i(x_{2i}, y_{2i})$, e_1 点和 E_1 点的纵坐标分别为 $y_{11} = h$, $y_{21} = H$, 其中下标中的第 1 个数字表示面的序号,而第 2 个数字表示该面上的坐标点的序号,以下规定类似。计算过程所选光源为点光源,光线从 O 点发出,按等角度间隔取一系列的光线,这些光线与光轴的夹角分别为 A_1, A_2, \dots, A_i 。这些光线与自由曲面 S_1 的交点为 e_1, e_2, \dots, e_i , 经过 S_1 折射后与自由曲面 S_2 的交点为 E_1, E_2, \dots, E_i 。经过 S_1 折射后的光线与光轴夹角分别为 B_1, B_2, \dots, B_i 。经过 S_2 出射后的夹角分别为 C_1, C_2, \dots, C_i , 其中 C_i 按等角度依次递减,计算方法为 $C_i = C_1 - (i-1) \frac{(C_1 - 0)}{m}$ 。为了使最终输出的光发散角比较小,要求 $C_1 \leq 6^\circ$ 。这里 $B_i = \xi(A_i + C_i)$, 其中 ξ 为分角比例因子,关于分角比例因子 ξ 的选取将在后面讨论。 S_3 面是一个照明面,位置可以任意选取,又因为 C_i 已知,因此 S_3 面上各点的坐标容易获得。

构建面形 S_1 和 S_2 就是获得 e_1, e_2, \dots, e_i 以及 E_1, E_2, \dots, E_i 一系列点的坐标过程,为此需要先计算一些已知量。光线 Oe_i 是光源直接发出的光线,其斜率为

$$l_{1i} = \tan\left(\frac{\pi}{2} - A_i\right). \quad (1)$$

光线 Oe_i 经过 S_1 面上 e_i 点折射后的光线的斜率为

$$l_{2i} = \tan\left(\frac{\pi}{2} - B_i\right). \quad (2)$$

光线 Oe_i 经过 e_i 点折射后,折射角为 B_i , e_i 点处的法线矢量为 \mathbf{N}_{1i} , 根据折射定律的矢量形式^[8,9]

$$[1 + n^2 - 2n(\mathbf{R}_{\text{out}} \cdot \mathbf{R}_{\text{in}})]^{1/2} \cdot \mathbf{N} = \mathbf{R}_{\text{out}} - n\mathbf{R}_{\text{in}}, \quad (3)$$

其中

$$\begin{cases} \mathbf{R}_{\text{out}-1i} = \left[\frac{x_{2i} - x_{1i}}{\sqrt{(x_{2i} - x_{1i})^2 + (y_{2i} - y_{1i})^2}} \mathbf{i}, \frac{y_{2i} - y_{1i}}{\sqrt{(x_{2i} - x_{1i})^2 + (y_{2i} - y_{1i})^2}} \mathbf{j} \right] \\ \mathbf{R}_{\text{in}-1i} = \left(\frac{x_{1i}}{\sqrt{x_{1i}^2 + y_{1i}^2}} \mathbf{i}, \frac{y_{1i}}{\sqrt{x_{1i}^2 + y_{1i}^2}} \mathbf{j} \right) \\ \mathbf{N}_{1i} = (-dy_i, dx_j) \end{cases}, \quad (4)$$

可以求得过 e_i 点的切线的斜率为

$$k_{1i} = \frac{[n(x_{2i} - x_{1i}) / \sqrt{(x_{2i} - x_{1i})^2 + (y_{2i} - y_{1i})^2}] - (x_{1i} / \sqrt{x_{1i}^2 + y_{1i}^2})}{(y_{1i} / \sqrt{x_{1i}^2 + y_{1i}^2}) - [n(y_{2i} - y_{1i}) / \sqrt{(x_{2i} - x_{1i})^2 + (y_{2i} - y_{1i})^2}]} \quad (5)$$

同理可以求得过 E_i 点的切线的斜率为

$$k_{2i} = \frac{[(x_{3i} - x_{2i}) / \sqrt{(x_{3i} - x_{2i})^2 + (y_{3i} - y_{2i})^2}] - [n(x_{2i} - x_{1i}) / \sqrt{x_{2i}^2 + y_{2i}^2}]}{[n(y_{2i} - y_{1i}) / \sqrt{x_{2i}^2 + y_{2i}^2}] - [(y_{3i} - y_{2i}) / \sqrt{(x_{3i} - x_{2i})^2 + (y_{3i} - y_{2i})^2}]} \quad (6)$$

计算面形的过程,先从边缘光线开始计算,光线 Oe_1 斜率已知并且过原点,可以求出该直线的方程。过 e_1 点的切线的斜率已知,可以获得过 e_1 点切线方程。这两条直线的交点为 e_2 , 作为自由曲面 S_1 上的第 2 点。依此类推可以求解 S_1 面上其他各点的坐标。 S_2 面上各点 E_1, E_2, \dots, E_i 求解方法也基本类似。这种通过求交点

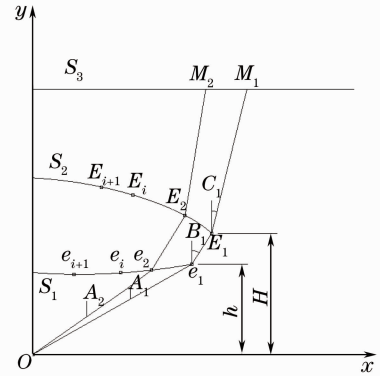


图 1 透射部分示意图

Fig. 1 Schematic diagram of transmission system

来确定面形的方法,在构建曲面中使用比较广泛^[4,9]。为了保证面形的精度,需要多分割一些角度来计算。为了方便使用程序计算,推导了坐标计算公式:

$$\begin{pmatrix} y_{1i} \\ x_{1i} \\ y_{2i} \\ x_{2i} \end{pmatrix} = (l_{1i} \quad 1 \quad 1 \quad 1) \left\{ \prod_{i=2}^m \begin{pmatrix} 0 & \frac{l_{1i-1} - k_{1i-1}}{l_{1i} - k_{1i-1}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{l_{1i-1} - k_{1i-1}}{l_{1i} - k_{1i-1}} & 0 & 0 \\ \frac{-k_{2i-1}}{l_{2i} - k_{2i-1}} & \frac{l_{2i}k_{2i-1}}{l_{2i} - k_{2i-1}} & \frac{l_{2i}}{l_{2i} - k_{2i-1}} & \frac{-l_{2i}k_{2i-1}}{l_{2i} - k_{2i-1}} \\ \frac{-1}{l_{2i} - k_{2i-1}} & \frac{l_{2i}}{l_{2i} - k_{2i-1}} & \frac{1}{l_{2i} - k_{2i-1}} & \frac{-k_{2i-1}}{l_{2i} - k_{2i-1}} \end{pmatrix} \right\} \begin{pmatrix} y_{11} \\ x_{11} \\ y_{21} \\ x_{21} \end{pmatrix} \quad (7)$$

根据(7)式容易计算 S_1 和 S_2 面上各点的坐标。

2.2 反射部分自由曲面的设计

计算了透射部分的两个面之后,继续计算反射部分的面形。这里假设透射部分光线的角度范围为 $0 \sim A_1$,而反射部分光线的角度范围为 $A_1 \sim P_1$ 。

如图2所示,小角度区域的光线经过折射透镜输出,而角度大的光线先射到 S_4 面折射后到 S_5 ,经 S_5 反射后,最终经 S_6 出射。假设由 S_6 出射的光线是平行的。 S_1 的下面是个圆柱形的空腔,可以用来放 LED 光源。第 i 条光线 OF_i 打到第4个面上的点的坐标为

$$x_{4i} = d, \quad y_{4i} = d \tan\left(\frac{\pi}{2} - P_i\right), \quad (8)$$

式中 d 为圆柱形空腔的半径, $d = h \tan \alpha$, P_i 为光源发出的光线与 y 轴的夹角。令 $m_{4i} = \tan\left(\frac{\pi}{2} - P_i\right)$ 。

光线 OF_i 经过 S_4 面折射后打到 S_5 面,根据折射定律有

$$n_0 \sin\left(\frac{\pi}{2} - P_i\right) = n_1 \sin Q_i, \quad (9)$$

式中 Q_i 为从 S_4 面出射的光线 $F_i f_i$ 与过 F_i 点法线矢量的夹角, n_0 和 n_1 分别为空气和介质的折射率。第1条光线 OF_1 经过 S_4 面折射后打到 S_5 面的起始点 f_1 ,要保证从 f_1 点出射的光线刚好通过 S_2 边缘点,因此 f_1 的坐标为

$$x_{51} = x_{21}, \quad y_{51} = d \cot P_1 + (x_{21} - d) \tan Q_1. \quad (10)$$

光线 OF_i 经过 S_4 面折射后,入射到 S_5 面上,设该入射光线的方向矢量 I_{5i} 入射到 S_5 面的 f_i 点上,经其反射之后的出射光线方向矢量为 O_{5i} ,曲面点 f_i 处的法向矢量为 N_{5i} ,矢量 O_{5i} 平行 y 轴。 I 、 O 以及 N 三者满足反射定律^[10]:

$$\sqrt{2 - 2(\mathbf{O} \cdot \mathbf{I})} \cdot \mathbf{N} = \mathbf{O} - \mathbf{I}. \quad (11)$$

根据这一关系可以求出过 S_5 面上 f_i 点的切线斜率

$$p_{5i-1} = \frac{(x_{5i-1} - x_{4i-1}) / \sqrt{(x_{5i-1} - x_{4i-1})^2 + (x_{5i-1} - x_{4i-1})^2 m_{4i-1}^2}}{1 - [(x_{5i-1} - x_{4i-1}) m_{4i-1} / \sqrt{(x_{5i-1} - x_{4i-1})^2 + (x_{5i-1} - x_{4i-1})^2 m_{4i-1}^2}]}. \quad (12)$$

经过推导可以获得 S_5 面上第 i 个点的坐标为

$$\begin{pmatrix} y_{5i} \\ x_{5i} \\ y_{4i} \\ x_{4i} \end{pmatrix} = \left\{ \prod_{i=1}^n (p_{5i-1} - m_{4i})^{-1} \begin{pmatrix} -m_{4i} & p_{5i-1} m_{4i} & p_{5i-1} & -p_{5i-1} m_{4i} \\ 1 & -p_{5i-1} & -1 & m_{4i} \\ 0 & 0 & p_{5i-1} - m_{4i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{5i-1} - m_{4i} \end{pmatrix} \right\} \begin{pmatrix} y_{51} \\ x_{51} \\ x_{41} m_{41} \\ x_{41} \end{pmatrix}. \quad (13)$$

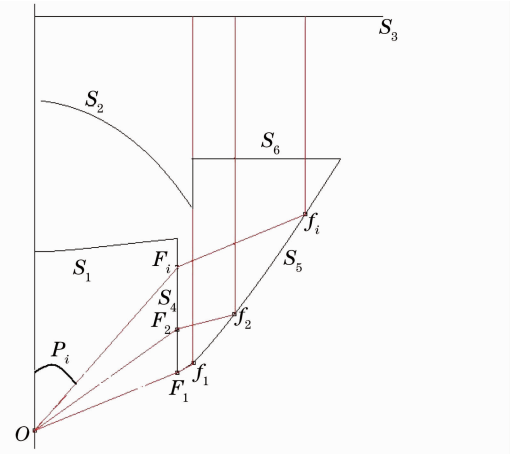


图2 反射部分示意图

Fig.2 Schematic diagram of reflection system

3 光学系统的光线追迹与仿真

根据面形设计理论,选取初始结构的参数,设计一个准直系统。设计过程中,选取的初始结构参数如下:分界角 $\alpha=45^\circ$,LED 最大发散角 70° ,分角比例因子 $\xi=0.5$; e_1 点的纵坐标 $y_{11}=4$, E_1 点的纵坐标 $y_{21}=4.8$ 。

准直光学系统 2D 轮廓如图 3 所示。运用光学仿真分析软件 TracePro 进行光线追迹分析,如图 4 所示,可以看出经过光学系统以后光线准直性比较好。

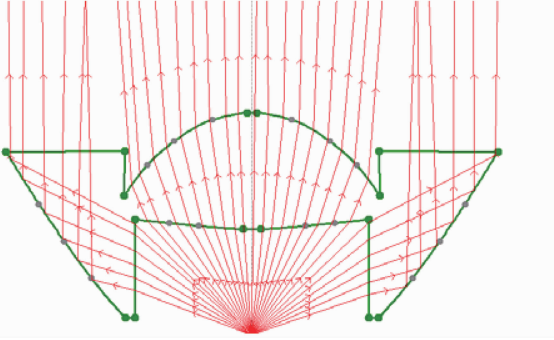


图 3 光学系统的 2D 轮廓

Fig. 3 2D layout of collimating system

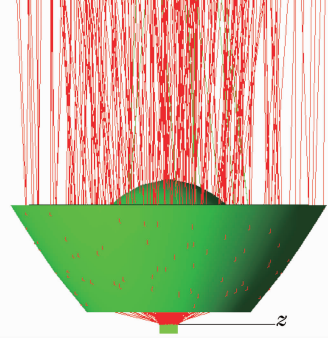


图 4 光学系统的 3D 结构光线追迹图

Fig. 4 3D layout of collimating system with ray tracing

光线追迹过程中使用的 LED 尺寸为 $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}$,是朗伯光源,其直接输出光强的配光曲线如图 5(a) 所示。从图中可以看出,发散角(半角)约为 70° 。当 LED 光源发出的光线经过准直系统后,其光强分布配光曲线如图 5(b) 所示,可以看出,LED 发光的发散角(半角)减小至 3.8° 。

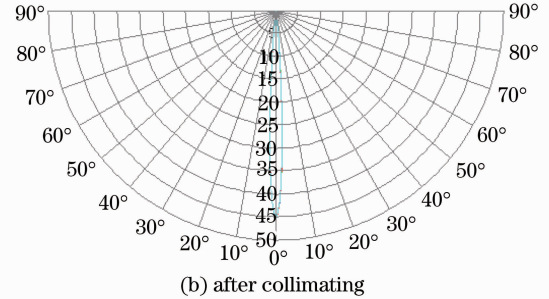
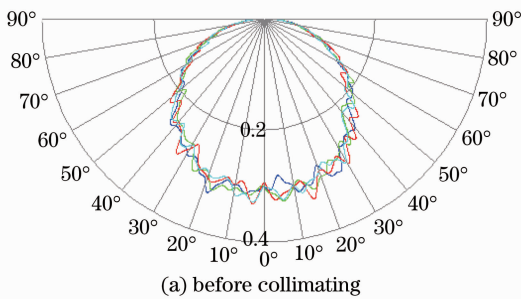


图 5 配光曲线图

Fig. 5 Candela plot

前面的设计部分,实现了对 LED 输出光的准直。然而,角度是按等间隔分割的,并没有考虑照明面上的照度分布。在实际照明过程中,在照明面上获得均匀的照度分布是非常重要的。这样就既要考虑减小发散角,又要在照明面上获得比较好的均匀度。光源产生的光通量被 N 个相等的立体角分成 N 等分^[11]:

$$\Delta\phi = \int_{A_i}^{A_{i+1}} 2\pi I_0 \cos\theta \sin\theta d\theta = \frac{1}{N} \int_0^{A_{\max}} 2\pi I_0 \cos\theta \sin\theta d\theta. \quad (14)$$

这样可以获得一系列的角度

$$\sin A_i = \sqrt{\frac{i}{N}} \sin A_{\max}. \quad (15)$$

在照明面上用 N 个同心圆分成 N 个等面积的圆环,每个圆的半径为

$$x_{3,i} = \sqrt{\frac{i}{N}} R. \quad (16)$$

为保证在照明面上获得比较好的均匀度,每份光通量进入照明面上对应的圆环内。角度和照明面都好以后,可以根据第 2 节的设计理论来获得自由曲面的轮廓,

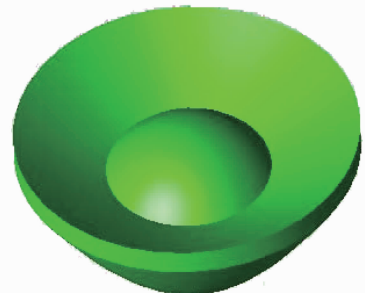


图 6 可以同时实现 LED 均匀和准直的自由曲面透镜

Fig. 6 Free-form lens for LED uniformity and collimating

如图 6 所示。

选取照明面半径为 1.1 m,自由曲面透镜距照明面的距离为 10 m,照明面上的照度分布如图 7 所示。经过自由曲面透镜折射后,光线的发散角小于 6° 。

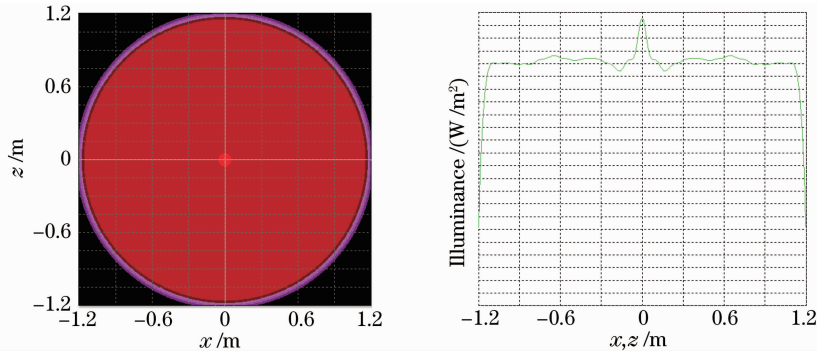


图 7 LED 光源经过自由曲面透镜后的照明特性。(a)照度图;(b)照度轮廓图

Fig. 7 Illumination performance of freeform lens with LED. (a) Illuminance distribution; (b) illuminance profile

4 最佳分界角与分角比例因子的选取

在设计实例中,选取了分界角 45° ,分角比例因子 $\xi=0.5$,接下来分析这两个参数对设计结果的影响。

4.1 最佳分界角

在研究分界角对设计结果的影响时,先选取一个固定的比例因子 $\xi=0.5$ 。临界角的选择从以下几个方面来考虑:准直效果,在预定照明面上的效率,光学系统尺寸大小。光学系统的尺寸主要通过两个参数来描述,即高度和口径。

表 1 表示了折、反分界角分别为 $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 三种情况的性能比较。从中可以看出,系统的尺寸随分界角的增大逐渐增加,特别是当分界角从 45° 变化到 60° 时,系统尺寸的增加比较明显。为了讨论效率的问题,图 8 给出了折、反分界角为 30° 和 60° 的 2D 轮廓图。

表 1 折、反分界角对系统性能的影响

Table 1 Dependence of system performance on separation angle

Separation angle / ($^\circ$)	Divergence angle / ($^\circ$)	Efficiency / %	Height / mm	Diameter / mm
30	4.63	84.5	7.12	7.03
45	3.8	87	7.65	8.73
60	4.9	85.2	11.97	11.26

从图 8 可以看出,在分界角为 30° 时,反射部分高于中间透射部分[图 8(a)],这样从 S_2 面出射的光线有一小部分又进入反射部分,而不能到达预定的照明面,引起了光效率的下降。当分界角大于 45° 时,系统尺寸将会迅速增加。因此, $41^\circ \sim 45^\circ$ 是最佳的分界角范围

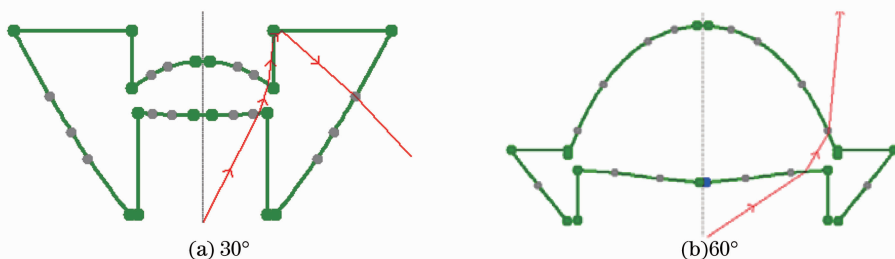


图 8 不同分界角的结构

Fig. 8 Layout with different separation angles

4.2 最佳分角比例因子

对于折射准直部分,经过 S_1 面折射后光线与光轴夹角为 $B_i, B_i = \xi(A_i + C_i), \xi$ 为分角比例因子,应该满

足条件

$$C_i < \xi(A_i + C_i) < A_i, \quad (17)$$

式中 $C_i = C_1 - (i-1) \frac{C_1}{m}$, $A_i = A_1 - (i-1) \frac{A_1}{m}$, 由此可以获得比例因子的范围为

$$\frac{C_1}{A_1 + C_1} < \xi < \frac{A_1}{A_1 + C_1}. \quad (18)$$

假设折、反分界角为 $A_1 = 45^\circ$, 最大出射角 $C_1 = 6^\circ$, 可以得出 $0.11 < \xi < 0.88$ 。在此主要考虑不同的 ξ 对准直效果光效率及系统尺寸的影响。运用光学仿真软件 TracePro 分析, 结果如图 9, 10 所示。图 9 为光效率随比例因子的变化曲线, 发现当 ξ 在 $0.3 \sim 0.6$ 之间时, 光效率都在 85% 以上, 特别是 $\xi = 0.5$ 时, 光效率为 87%。图 9 为发散角随比例因子的变化曲线, 当 ξ 在 $0.4 \sim 0.6$ 之间时, 发散角(半角)小于 4° 。此外, 容易证明随着比例因子的增加系统尺寸也在增加。因此, 综合考虑, 选择 ξ 在 $0.4 \sim 0.5$ 之间是比较合适的。

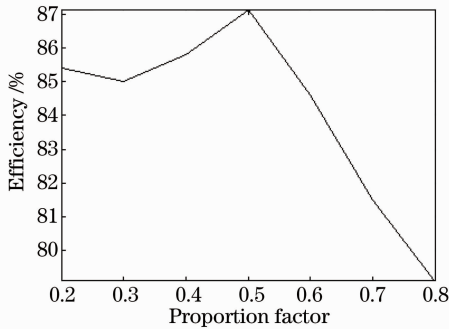


图 9 光效随比例因子的变化曲线

Fig. 9 Optical efficiency versus proportion factor

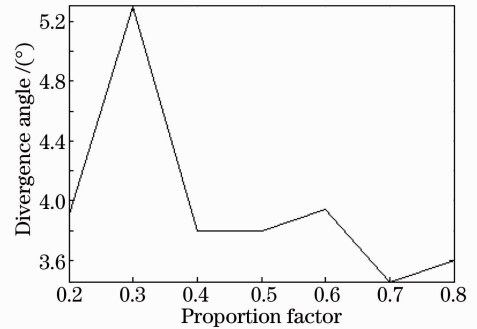


图 10 发散角随比例因子的变化曲线

Fig. 10 Divergence angle versus proportion factor

5 结 论

设计了一种折、反射式光学系统, 用于 LED 光源的准直, 其中透射部分采取了两个自由曲面, 反射部分采用了一个自由曲面。根据折射和反射定律的矢量形式, 通过入射光线和出射光线矢量, 计算自由曲面上各点的法向矢量, 根据初始点的坐标, 得出自由曲面上一系列点的坐标, 从而构建了自由曲面。设计好的准直光学系统, 用 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的 LED 作为光源, 在光学仿真软件 TracePro 中进行了验证, 结果表明 LED 光源的发散角从 70° 减少到约 4° , 光效率在约 85%, 系统高度 7.65 mm, 口径为 8.73 mm。折射和反射的最佳临界角区域是 $41^\circ \sim 45^\circ$, 而最佳分角比例因子为 $0.4 \sim 0.5$ 。

参 考 文 献

- 1 C. -C. Sun, C. -Y. Chen, H. -Y. He *et al.*. Precise optical modeling for silicate-based white LEDs[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(24): 20060~20066
- 2 C. -C. Sun, W. -T. Chien, I. Moreno *et al.*. Analysis of the far-field region of LEDs[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(16): 13918~13927
- 3 Luo Yi, Zhang Xianpeng, 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
- 4 Deng Yuanding. Design Uniform Illumination Systems by Surface-Tailored Lens and Configurations of LED Arrays[D]. Taipei: National Taiwan University of Science and Technology, 2006
邓元鼎. 运用 ST 透镜与 LED 阵列的配置设计均匀的照明系统[D]. 台北: 国立台湾科技大学, 2006
- 5 C. C. Sun, T. -X. Lee, S. -H. Ma *et al.*. Precise optical modeling for LED lighting verified by cross correlation in the midfield region[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(14): 2193~2195
- 6 Zongyuan Liu, Kai Wang, Xiaobing Luo *et al.*. Precise optical modeling of blue light-emitting diodes by Monte Carlo ray-tracing[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(9): 9398~9412
- 7 Zexin Feng, Yi Luo, Yanjun Han. Design of LED freeform optical system for road lighting with high luminance/illuminance ratio[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(21): 22020~22031

- 8 Hao Xiang, Zheng Zhenrong, Liu Xu *et al.*. Freeform surface lens design for uniform illumination[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2008, **10**(7): 075005
- 9 Kai Wang, Sheng Liu, Fei Chen. Freeform LED lens for rectangularly prescribed illumination[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2009, **11**(10): 105501
- 10 Ding Yi, Gu Peifu. 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
- 11 Byungwook Kim, Hokwan Kim, Shinill Kang. Reverse functional design of discontinuous refractive optics using an extended light source for flat illuminance distributions and high color uniformity[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(3): 1794~1807