

# LED 准直器设计中复合抛物面同步多曲面方法

张 航 梁 雪 严金华 许周速 徐 军 陈 钢

(浙江工业大学应用物理系, 浙江 杭州 310023)

**摘要** 利用非成像光学中流线法和同步多曲面(SMS)法,设计一种具有发散角小、均匀度好和光效高的 LED 准直器。设计中由复合抛物面(CPC)完成初级配光,将朗伯光源 $\pm 90^\circ$ 的发散角缩小到 $\pm 45^\circ$ ,再以 SMS 法设计的多重自由反射曲面实现准直均匀配光,并由光学扩展量给出准直器的理论光效,最后引入平顶宽度、平顶光效和平顶均匀度等的定义,以更好地反映准直光束质量。光学仿真结果表明,准直器的发散角小于 $\pm 2.26^\circ$ ,整体光效达到 0.79,理论与仿真光效的误差小于 2.5%,在 0.9 平顶宽度范围内光斑均匀度大于等于 0.9,平顶光效为 0.56,效果良好。

**关键词** 几何光学;非成像光学;同步多曲面法;流线法;复合抛物面集光器

**中图分类号** O435 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201232.0922004

## Compound Parabolic Concentrator-Simultaneous Multiple Surfaces Design Methods for LED Collimators

Zhang Hang Liang Xue Yan Jinhua Xu Zhousu Xu Jun Chen Gang

(Department of Applied Physics, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China)

**Abstract** Based on the flow-line and simultaneous multiple surfaces (SMS) design method in nonimaging optics, a design method for LED collimator with low divergence angle, good uniformity and high luminous efficiency is presented. The divergence angle  $\pm 90^\circ$  of a Lambertian source is reduced to  $\pm 45^\circ$  by using the compound parabolic concentrator (CPC) reflector, and then the outgoing lights are collimated by the SMS reflector. A theoretical optical ratio is derived from the entrance of the collimator, and top width, top luminous efficiency and top uniformity are introduced to characterize the quality of the collimated lights. The simulation results show that the divergence of the collimator is less than  $\pm 2.26^\circ$ , the total luminous efficiency is up to 0.79, the luminous efficiency error is less than 2.5% compared with theoretical luminous efficiency, the 0.9 top-flat uniformity is more than 0.9, and the top-flat luminous efficiency is about 0.56, it has good results.

**Key words** geometric optics; nonimaging optics; simultaneous multiple surface methods; flow-line method; compound parabolic concentrator

**OCIS codes** 220.2740; 080.4298; 080.4035; 080.4225; 080.2175

## 1 引 言

作为新一代绿色光源,发光二极管(LED)具有尺寸小、寿命长( $5 \times 10^4$  h 以上)、电光效率高(80%~90%)和环保节能等优点。大功率 LED 的出现,将 LED 由最初简单的仪器仪表显示推广到了商用照明领域,并迅速抢占了液晶显示屏(LCD)背光板、交通信号灯、汽车照明、通用照明和景观照明市场<sup>[1]</sup>。

由于 LED 光源独特的空间光强分布特性,传统

照明灯具已经无法适应 LED 光源的配光需求,也无法完全发挥其优势,因此需要针对 LED 的发光特点进行光学设计以提高 LED 光源系统的性能。非成像光学理论为 LED 配光设计提供了有力的理论依据。在照明器件的设计中通常使用边缘光线原理以简化设计的复杂性<sup>[2~4]</sup>。当前照明器件设计主要采用折射型、反射型和折反混合型几种方式。无论是折射型还是反射型,其设计方法都是通过构建特定

**收稿日期:** 2012-02-12; **收到修改稿日期:** 2012-04-28

**基金项目:** 国家自然科学基金(60807011)资助课题。

**作者简介:** 张 航(1970—),男,博士,副研究员,主要从事非成像光学方面的研究。E-mail: physzhang@zjut.edu.cn

光学表面来改变光线空间分布,同步多曲面(SMS)方法可实现多个表面的同步设计<sup>[2]</sup>,已被用在LED准直器的设计中。

LED准直器能很好地满足投影仪、舞台射灯等对准直光源的需求,目前国内LED准直器设计已经取得了较好进展。荆雷等<sup>[5]</sup>设计的紧凑型准直镜光束发散角为 $5.4^\circ$ ,均匀性高达0.92,光效为0.52,另一款折射/全反射/反射/折射式(RIXR)结构的LED准直系统获得 $\pm 3.178^\circ$ 的光束发散角且光效达0.8以上<sup>[6,7]</sup>。吴仍茂等<sup>[8]</sup>设计的折射-全反射(TIR)准直系统光效也达到了0.91,但均匀度略低。为了进一步提高LED准直器的光束质量,本文基于边缘光线原理和光学扩展量守恒思想,引入复合抛物面和同步多曲面方法相结合,实现LED准直器设计,取得了较好的效果。

本文设计的准直器入射面直接跟LED荧光胶层相接触,可以省去上述设计中LED与准直器之间与空气相接的两个界面损耗。为减小准直器尺寸,利用流线法设计出复合抛物面集光器(CPC)来完成初级配光,将朗伯光源 $\pm 90^\circ$ 发散角缩小到 $\pm 45^\circ$ ,再以SMS法设计的多重自由反射曲面实现准直均匀配光。通过光学扩展量导出准直器的理论光效,并引入平顶宽度、平顶光效和平顶均匀度的定义,以更好地反映准直光束质量。

## 2 设计原理

### 2.1 边缘光线原理、光学扩展量守恒和流线理论

边缘光线原理是非成像光学中最为基础也是最重要的原理之一。边缘光线原理的内容可以简述为:来自光源边缘的光线经过若干个光学器件的偏折必定射向接收器的边缘,而来自光源内部的光线也将对应的射向接收器的内部<sup>[2,3]</sup>。应用这一原理,在设计过程中可以单纯的考虑光源边缘发出的一对光线,从而大大降低了设计难度。

光学扩展量守恒<sup>[2]</sup>是指对于一个理想的非成像光学器件,其出射光线的扩展量与进入到该器件的光线扩展量相等,应用这一理论可以进行光学器件口径、尺寸等相关参数的计算。

流线理论是非成像光学中的另一个重要理论。流线的本质是光学扩展量的矢量合成轨迹,其性质是在辐射场中放置一条反射性的流线,并不会改变辐射场的分布情况。由于流线的引入,为非成像光学设计带来了如下几个方面:1)改变光源的尺寸和位置;2)改变光源特性(如发散或汇聚);3)改变光源

配光特性(如光线发散角等)。Winston-Welford设计方法(或称流线设计法)可以针对光源形状和辐射场分布设计出特定的二次流线反射器形状,从而实现光源的初级配光<sup>[2,4]</sup>。

### 2.2 SMS面设计方法

SMS设计方法来源于其允许对多个光学表面同时进行设计的性质<sup>[2,4]</sup>。由Winston-Welford设计方法设计出来的非成像光学器件都以边缘光线原理为基础,即来自光源的一条边缘光线经反射镜反射改变方向后必将射向接收器的边缘。一般的设计方法都以点光源为基础,不考虑光源的尺寸,这可以大大降低设计难度,但是在实际应用中多采用扩展光源,从而导致实际效果与设计预期效果存在偏差。

在SMS设计方法中情况并非如此,光学表面按顺序的反射或折射全部来自扩展光源端点发出的边缘光线。当光源尺寸确定以后,首先选定两个表面的起始点及其对应的法线方向,在保证光学扩展量守恒的前提下,由起点开始顺序的应用折射或反射定律以确定光线的入射点和该点处的法线方向<sup>[2,4,9,10]</sup>。根据这一机理,可以在计算机程序的辅助下逐次得到两个待定表面上的参数点,这些点构成了上下两条“点链”,再由样条曲线的拟合最终同步的确定曲面形状。

SMS设计方法可以设计出如下几种光学器件:

- 1) 折射/折射(RR)器件;
- 2) 折射/反射(RX)器件;
- 3) 反射/折射(XR)器件;
- 4) 折射/反射/全反射(RXI)器件<sup>[2,11]</sup>。

## 3 CPC与自由曲面反射器设计

设计中选用功率为1W、直径为 $\sqrt{2}$  mm的白光LED,由于未进行任何初级配光,因此该光源可看作是一个朗伯发光体,其光强分布遵循

$$I(\theta) = I_0 \cos \theta, \quad (1)$$

式中 $\theta$ 为光线与光源法线的夹角, $\theta \in (0, \pi/2)$ 。二维(2D)情况下,平面光源发出的光线,其光学扩展量 $U$ 可以表示为<sup>[2]</sup>

$$U = \int_{-a_0/2}^{a_0/2} \int_{-\theta_m}^{\theta_m} n \cos \theta d\theta da = 2na_0 \sin \theta, \quad (2)$$

式中 $a_0$ 为平面光源尺寸, $n$ 为反射器内部介质折射率。根据光学扩展量守恒,理想非成像光学器件出口出射的光线其光学扩展量也为 $U$ 。因此在光学器件的出口处可以得到

$$U = \int dU = \int_{\sigma_1-\beta}^{\sigma_2+\beta} nc(\sigma) \cos \theta d\theta d\sigma, \quad (3)$$

式中  $\beta$  为出射光线的半发散角,  $c(\sigma)$  为光学器件出口的参数化曲线函数,  $c(\sigma_1)$  和  $c(\sigma_2)$  为曲线  $c(\sigma)$  的两个端点  $Q_1, Q_N$ , 如图 1 所示。由(3)式可知, 当系统光学扩展量确定后, 出射光线的发散角越小, 出射面的尺寸越大。对于 LED 光源, 必须令反射/反射 (XX) 器件的尺寸足够大以提供较小的光线发散角。利用 RIXR 的设计方法, 可以最大限度地覆盖光源的发散角, 并减小准直器尺寸<sup>[6]</sup>。但是, RIXR 结构所采用的多个自由曲面对加工要求极高, 特别是全反射区域的自由曲面成型和抛光难度大。因此考虑对 LED 芯片进行初级配光以改变光线发散角度, 从而减小 XX 器件的尺寸和自由曲面数量, 降低设计难度。

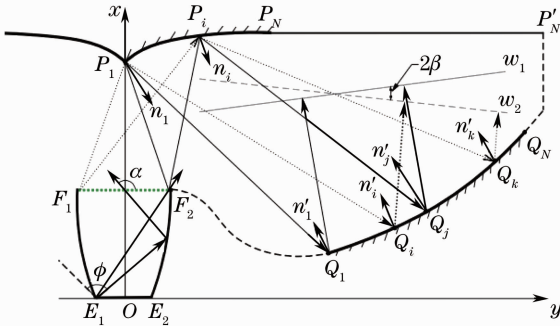


图 1 CPC-XX 反射器结构示意图

Fig. 1 Structure of the CPC-XX reflector

### 3.1 初级配光:CPC 设计

CPC 最初设计用来汇聚由无限远处光源发出的包含在某一立体角内的光线<sup>[2]</sup>。根据光路可逆原理, 可以将 CPC 逆向使用作为 LED 的配光器件。

在图 1 中, 以 LED 中心为坐标原点, 对角线的两侧端点分别为  $E_1(-\sqrt{2}/2, 0)$  和  $E_2(\sqrt{2}/2, 0)$ 。由  $E_1$  发出的边缘光线在 CPC 出口处反射后仍为边缘光线, 其与水平方向的夹角为  $\alpha$ 。CPC 侧壁具有这样的性质: 由光源端点发出的全部边缘光线经侧壁反射后均变为与水平方向夹角为  $\alpha$  的平行光线。对于给定焦点  $E_1$ , 对称轴偏离水平方向角度为  $\alpha$  且经过  $E_2$  点的抛物线可表示为

$$\frac{|E_2 - E_1| - (E_2 - E_1)(\cos \alpha, \sin \alpha)}{1 - \cos \phi} \times [\cos(\phi + \alpha), \sin(\phi + \alpha)] + (-\sqrt{2}/2, 0), \quad (4)$$

式中  $\phi$  为  $E_1$  发出的某光线与抛物线对称轴(图 1 中过  $E_1$  的虚线)之间的夹角。由(4)式建立的抛物线经过镜像和截取, 最终得到一个 2D 情况下的 CPC

(图 1 中  $E_1E_2F_2F_1$ )。若考虑  $\alpha = 145^\circ$ , 则经过该 CPC 初级配光后的配光曲线如图 2 所示。

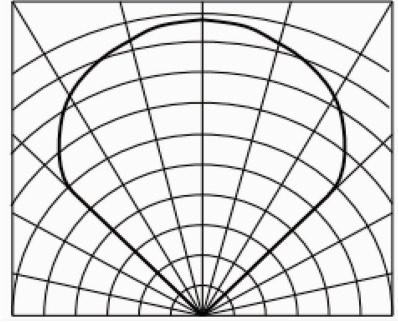


图 2 经 CPC 配光后 LED 的配光曲线

Fig. 2 Intensity distribution curve after reflected by the CPC

通过 CPC 的配光, 将光源光线的发散角控制在  $\pm 45^\circ$  之间, 从而控制 XX 反射器件的尺寸。

### 3.2 次级配光:XX 自由曲面反射器设计

现在可以将 CPC 的出口看作是一个新光源  $F_1F_2, F_1F_2$  的长度(CPC 的口径)约为 2 mm。以该光源为基础同步进行多个反射曲面的设计。

应用 SMS 设计方法需要首先确定如下几个变量: 1) 上下反射表面的起始点位置  $P_1, Q_1$ ; 2) 最终由反射器出射光线的半发散角  $\beta$ ; 3)  $P_1$  点处反射表面的法矢量  $n_1$ 。如图 1 所示,  $w_1, w_2$  分别为光源端点  $F_2$  和  $F_1$  发出的边缘光线经多表面反射器反射后的对应波前, 两波前之间夹角即为出射边缘光线的发散角。由于  $n_1$  已知, 故光线  $F_1P_1$  关于法线  $n_1$  的反射光线方向也可以确定。在该方向上的适当位置选择一点  $Q_i$ , 则可以根据  $F_1P_1 \rightarrow P_1Q_i \rightarrow Q_iw_2$  确定光源左端点到波前  $w_2$  的光程。根据非成像光学理论, 在非成像光学器件设计过程中需要满足光学扩展量守恒<sup>[2,12]</sup>。对于光源端点发出并射向  $P_1$  点的两条边缘光线有

$$\begin{cases} [F_2, P_1] + [P_1, Q_1] + [Q_1, w_1] = \Gamma_1 \\ [F_1, P_1] + [P_1, Q_i] + [Q_i, w_2] = \Gamma_2 \end{cases}, \quad (5)$$

(5)式中  $[A, B]$  表示点 A、B 之间的光程,  $\Gamma$  为边缘光线到达对应波前的光程。该系统中, 光学扩展量可以用光程差的形式表示为<sup>[2]</sup>

$$U = \Gamma_2 - \Gamma_1. \quad (6)$$

为保证系统光学扩展量守恒, 对于 SMS 上的任意点  $P_i$  和相邻的点  $Q_i, Q_j, Q_k$  应满足

$$U = \{[F_1, P_i] + [P_i, Q_k] + [Q_k, w_2]\} - \{[F_2, P_i] + [P_i, Q_j] + [Q_j, w_1]\}. \quad (7)$$

为了取得最佳的准直效果, 准直器光线的发散角应尽可能小。目前国内相关研究所能取得的最小

半发散角  $\beta$  为  $3^\circ$ ，实验中的设计就从  $3^\circ$  开始逐渐减小设计角度，不同的  $\beta$  值也对应了不同的 SMS 表面形状。当  $\beta < 1.5^\circ$  时点链曲线的光滑性和连续性遭到破坏且产生较严重的遮挡，综合考虑光效和发散角后选定半发散角  $\beta = 1.5^\circ$ 。根据(7)式所示的关系可以同步计算出上下表面的坐标点链，再通过曲线拟合最终得到 XX 反射器的结构。

2D 情况下对于光源  $F_1F_2$ ，其光线发散角为  $\pm 45^\circ$ ，则根据(2)式可以计算出光源光线的扩展量  $U_s = 2F_1F_2 \sin 45^\circ \approx 2.828 \text{ mm}$ 。若考虑理想器件则由(3)式可得到光出射面参数化曲线  $c(\sigma)$  的积分长度。本设计中出射光线的半发散角  $\beta = 1.5^\circ$ ，因此  $c(\sigma)$  的积分长度约为  $27.013 \text{ mm}$ ，该值为出射面参数化曲线的理论长度值。而程序拟合出来的出射反射面曲线  $Q_1Q_N$  长度约为  $25.245 \text{ mm}$ ，这与理论值存在一定差异。

## 4 光学仿真及结果分析

### 4.1 光学仿真及结果

在建模软件中将设计出来的 CPC-XX 轮廓结构绕对称轴(图 1 中  $y$  轴)旋转  $360^\circ$  可得到该反射器的实体模型，其半径为  $34.5 \text{ mm}$ ，最厚处的厚度为  $15 \text{ mm}$ 。将该实体模型导入光学仿真软件，为了支撑 SMS 反射面并且方便加工，将反射器内部介质设定为 BK7 玻璃，这种设定并不会破坏光学扩展量守恒。CPC 和 SMS 表面设为反射率  $96\%$  的镜面，光源设定为  $1 \text{ W}$ 。考虑到仅在出射面上发生折射会引入色散现象，然而对出射光的入射角  $\beta < 2^\circ$ ，其色散可以忽略，故不失一般性实验中设定仿真波长为  $546.1 \text{ nm}$ ，并设追迹光线  $100$  万条。分别在距反射器  $0.2, 0.5, 1, 4, 100, 200 \text{ m}$  处插入检测平面，检测结果如图 3 所示。

由图 3 (a)可知，在距离反射器  $0.1 \text{ m}$  处，检测平面上光斑的辐照度分布为外圈直径约  $0.12 \text{ m}$  的一个亮环。随着距离的增大，该亮环的中心暗斑逐渐消失并缓慢变亮[如图 3 (b)、(c)所示]。图 3(d)、(e)、(f)为远场处检测平面上的辐照度分布情况。实验中定义光斑全宽为辐照度值下降至峰值辐照度  $10\%$  时的光斑宽度，在  $4, 100, 200 \text{ m}$  处检测平面上光斑全宽分别约为  $0.5, 8.8, 16.7 \text{ m}$ ，同时由于距离的增大光斑的均匀度也随之提升。在  $200 \text{ m}$  处检测平面接收到的光效约为  $0.79$ 。

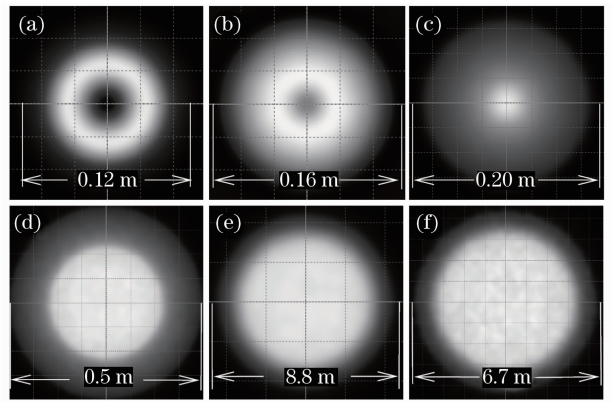


图 3 不同距离处检测平面辐照度分布。(a)  $0.2 \text{ m}$ ；(b)  $0.5 \text{ m}$ ；(c)  $1 \text{ m}$ ；(d)  $4 \text{ m}$ ；(e)  $100 \text{ m}$ ；(f)  $200 \text{ m}$   
Fig. 3 Irradiance distribution of target plane at different distances. (a)  $0.2 \text{ m}$ ；(b)  $0.5 \text{ m}$ ；(c)  $1 \text{ m}$ ；(d)  $4 \text{ m}$ ；(e)  $100 \text{ m}$ ；(f)  $200 \text{ m}$

### 4.2 辐照度分布特性及系统光效分析

由 CPC-XX 结构可知，某一截面上光源发出的光线经过 XX 结构的反射被分为左右两部分出射。由于光束发散角较小因此在距离光源较近的区域光强主要集中在两个独立的峰值曲线上。

图 4 是距离光源分别为  $0.2, 0.5, 1, 4 \text{ m}$  处的光强分布曲线  $c_1, c_2, c_3$  及  $c_4$ 。在距离光源较近的检测平面上得到的辐照度成“双峰”分布(图 4 中  $c_1$ )。随着距离的逐渐增加，峰值曲线逐渐展宽( $c_2$ )。曲线的峰值则由于光线能量的分散而逐渐减小。当两个峰值曲线展宽到某一程度后开始互相叠加，根据光强叠加原理则光斑内部的光强逐渐增加，暗斑缓慢变亮。 $c_3$  所示为距离光源  $4 \text{ m}$  处的光斑辐照度分布曲线，由图 4 中可知在该距离处，光斑辐照度逐渐均匀化而非近场处的“双峰”分布。这是由曲线两个峰值展宽叠加过程中的“补偿”效应导致的(见图 5)。

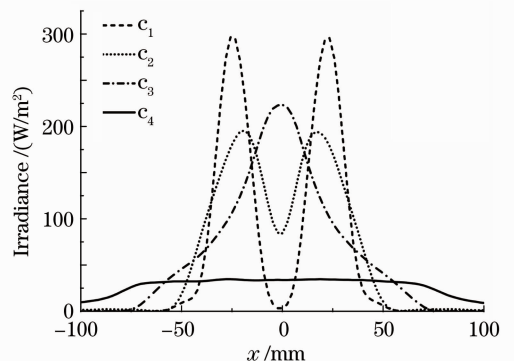


图 4 不同距离处的峰值分布曲线  
Fig. 4 Peak curves with different distances

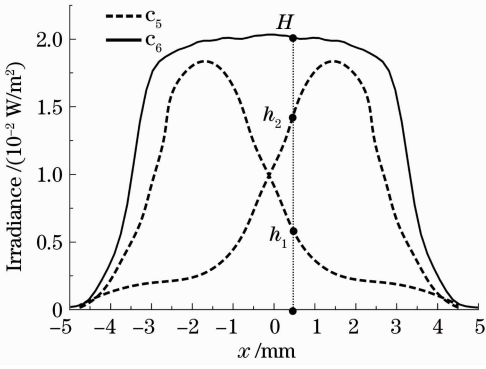


图5 峰值曲线叠加

Fig. 5 Superposition of the peak curves

在图5中水平轴  $x$  是检测平面上光斑的径向方向, 垂直轴为辐照度值。径向上某点处在两个峰值曲线上的对应辐照度值分别为  $h_1$  和  $h_2$ , 若  $h_1$  和  $h_2$  均为  $x$  的函数, 则根据叠加原理有

$$\int_{x_m}^{x_M} [h_1(x) + h_2(x)] dx = \int_{x_m}^{x_M} H(x) dx, \quad (8)$$

式中  $H(x)$  为叠加后对应点  $x$  处的辐照度值。 $x_M$  和  $x_m$  为光斑的几何边界值, 在图5中该值约为  $\pm 5$  m。因此, 由于双峰叠加的补偿, 叠加后的辐照度呈现较均匀的分布。考虑到光源发出光线具有一定的发散角, 因此两条峰值曲线在展宽过程中其间距也逐渐增大, 因此叠加辐照度的均匀化面积也随之增大。

在图3中, 远场 100 m 和 200 m 处的光斑全宽  $w'_1$ 、 $w'_2$  约为 8.8 m 和 16.7 m, 该反射器的远场发散角可计算得

$$\beta_f = \arctan\left(\frac{w'_2 - w'_1}{2 \times 100}\right) \approx 2.262^\circ. \quad (9)$$

BK7 玻璃折射率  $n$  约为 1.519, 吸收率约为  $2 \times 10^{-4} \text{ mm}^{-1}$ 。由于玻璃介质的存在, 由 SMS 下表面反射的光线将在反射器出口处发生折射 (见图6)。考虑到入射角  $\beta$  极小, 由折射引起的色散和能量损失可以忽略。

(9)式中已经给出了远场发散角度值  $2.262^\circ$ , 根据折射定律可计算出图6中入射角值  $\beta \approx 1.489^\circ$ , 该值即为 SMS 下表面反射光线的实际发散角。已经得到出射反射面曲线  $Q_1 Q_N$  长度为 25.245 mm, 可计算出反射器出射面处的实际 2D 光学扩展量  $U_E \approx 2.624 \text{ mm}$ 。又由于通过一个光学器件的辐射通量与光学扩展量遵循关系为  $\Phi = L^* U$ , 其中  $\Phi$  为辐射通量,  $L^*$  为基本辐射亮度 (在热力学中  $L^*$  仅与环境温度有关)<sup>[2]</sup>。理想情况下系统温度保持不变,

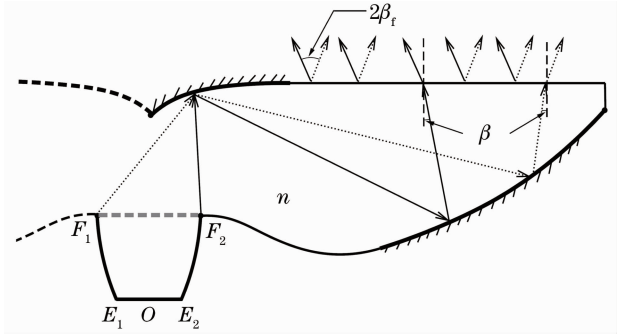


图6 出射光线的折射

Fig. 6 Refraction of the exiting rays

故光源和光出射面的基本辐射亮度相等。综上所述, 完全反射情况下系统的光效为

$$\eta = \frac{\Phi_E}{\Phi_S} = \frac{L^* U_E}{L^* U_S} \approx 0.928, \quad (10)$$

式中  $\Phi_S$  和  $\Phi_E$  分别为光源输入系统的辐射通量与出射的辐射通量。在实际情况下光源发出的光线在 CPC 和 SMS 结构内共发生三次不完全反射, 若同时考虑玻璃介质对光线的吸收, 则系统的实际光效  $\eta'$  为

$$\eta' = \gamma^3 (1 - \delta l) \eta, \quad (11)$$

(11)式中  $l$  为光线在反射器介质内的平均传播距离, 镜面反射率  $\gamma = 0.96$ , 介质吸收系数  $\delta = 2 \times 10^{-4} \text{ mm}^{-1}$ 。则可以计算出的系统的实际光效约为 0.81, 这与光学仿真得到的结果 0.79 基本相近, 相对误差小于 2.5%。

#### 4.3 平顶宽度、平顶光效与平顶均匀度分析

为了更好地评价准直器设计的性能和准直光束的质量, 实验中引入平顶光学量概念: 平顶宽度  $w_r$ 、平顶光效  $\eta_r$  和平顶均匀度  $\xi_r$ , 其中下标  $r$  表示归一化截止辐照度值。平顶宽度  $w_{0.9}$  指辐照度分布图中两边辐照度值下降至峰值的 90% 时的光斑宽度, 平顶均匀度  $\xi_{0.9}$  指  $w_{0.9}$  内最低辐照度与最高辐照度之比, 而平顶光效  $\eta_{0.9}$  的定义为

$$\eta_{0.9} = \frac{\Phi_{0.9}}{\Phi_S}, \quad (12)$$

其中  $\Phi_{0.9}$  为  $w_{0.9}$  内的辐射通量。

图7中  $c_7$  和  $c_8$  分别为 100 m 和 200 m 处光斑的归一化辐照度曲线, 可知  $c_7$  的平顶宽度  $w_{0.9}$  约为 5.6 m, 平顶均匀度  $\xi_{0.9} \geq 0.9$ , 平顶光效  $\eta_{0.9}$  约为 0.56, 同样可知  $c_8$  的  $w'_{0.9}$  约为 11 m,  $\xi'_{0.9} \geq 0.9$ ,  $\eta'_{0.9}$  约为 0.57。由此可得, 准直光束随着距离的增大平顶宽度也逐渐增大, 平顶光效基本维持在 0.56 左右, 效果良好。

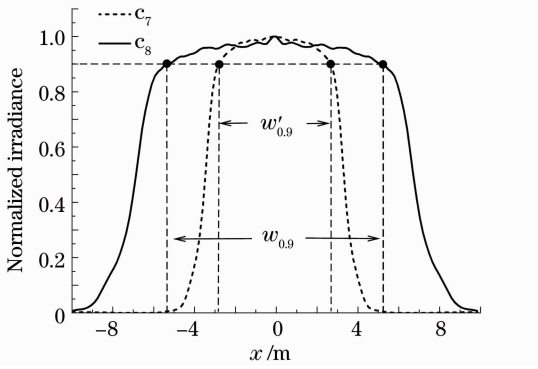


图7 归一化辐照度曲线的平顶宽度

Fig.7 Top width of the normalized irradiance curve

## 5 结 论

本文基于 SMS 设计方法及非成像光学中的相关理论,设计了一种新型的 CPC-XX 反射器。该反射器针对扩展光源,通过 CPC 结构将 LED 光源的光线发散角控制在  $45^\circ$  范围内,再由 SMS 结构将光束发散角进一步降低至  $\pm 2.26^\circ$  以内,且可以在远场处得到十分均匀的辐照度分布。由于主要光学表面全部采用反射结构,因此有效遏制了色散的产生同时降低了加工的难度,具有节能、高光效且准直性好的优点,适用于投影灯、聚光灯和探照灯等照明器件。实验中还提出了一种根据光学扩展量评估系统光效的方法,对比结果表明该方法所得结果基本与仿真结果相同。此外,该准直器在远场处平顶宽度内的辐照度均匀性高达 0.90 以上,光效高达 0.79 以上,0.9 平顶光效接近 0.56,可在大功率投影光源设计上发挥重要作用。

## 参 考 文 献

1 Zhou Zhimin, Ji Aihua. Design and Application of High Power LED Illumination Technology [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011. 1~10

周志敏, 纪爱华. 大功率 LED 照明技术设计与应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2011. 1~10

2 J. Chares. Introduction to Nonimaging Optics [M]. New York: CRC Press, 2008. 55~116, 271~324, 471~474

3 Harald Ries, Ari Rabl. Edge-ray principle of nonimaging optics [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(10): 2627~2632

4 Roland Winston, Juan C. Miñano, Pablo Benítez. Nonimaging Optics [M]. London: Elsevier Academic Press, 2005. 184~221

5 Jing Lei, Liu Hua, Zhao Huifu *et al.*. Compact collimator design for high-brightness light-emitting diode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(12): 122201

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): 122201

6 Zhao Huifu, Liu Hua, Sun Qiang *et al.*. Design of RIXR LED collimating system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, **19**(7): 1472~1479

赵会富, 刘 华, 孙 强等. 基于折射/全反射/反射/折射结构的 LED 准直系统的设计 [J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(7): 1472~1479

7 Luo Xiaoxia, Liu Hua, Lu Zhenwu *et al.*. Automated optimization of free-form surface lens for LED collimation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(9): 1351~1355

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

8 Wu Rengmao, Tu Dawei, Huang Zhihua *et al.*. Design of LED directional illumination based on simultaneous multiple surface [J]. *Optical Technique*, 2009, **35**(4): 561~565

吴仍茂, 屠大维, 黄志华等. 一种基于同步多曲面方法的 LED 定向照明设计 [J]. *光学技术*, 2009, **35**(4): 561~565

9 Pablo Benítez, Juan C. Miñano, Jose Blen *et al.*. Simultaneous multiple surface optical design method in three dimensions [J]. *Opt. Engng.*, 2004, **43**(7): 1489~1502

10 Oliver Dross, Rubén Moledano, Pablo Benítez *et al.*. Review of SMS design methods and real world applications [C]. *SPIE*, 2004, **5529**: 35~47

11 Juan C. Miñano, Juan C. González, Pablo Benítez. A high gain, compact nonimaging concentrator—RXI [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(34): 7850~7856

12 Luo Tao, Qian Keyuan, Luo Yi. Research on luminous-per-étendue of LED array designed for projector light source [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2008, **29**(1): 41~45

罗 滔, 钱可元, 罗 毅. 面向投影仪的 LED 阵列单位 Etendue 光通量的研究 [J]. *半导体光电*, 2008, **29**(1): 41~45

栏目编辑: 韩 峰