

文章编号 1004-924X(2011) 07-1472-08

基于折射/全反射/反射/折射结构的 LED 准直系统的设计

赵会富^{1,2}, 刘 华^{1*}, 孙 强¹, 王 鹤¹, 许家林¹, 荆 雷^{1,2}, 刘 英¹, 李也凡¹, 倪平涛³

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 光电技术研发中心, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 3. 空军航空大学, 吉林 长春 130022)

摘要: 设计并优化了高效且结构紧凑的折射/全反射/反射/折射式(RIXR) LED 准直系统, 用于收集大角度范围内的光线获得具有较小发散角的准直光束。首先, 根据非成像光学理论中的边缘光线原理以及多面同步(SMS)设计方法计算系统初始结构的面型; 然后, 利用 Zemax 光学设计软件对初始结构进行优化设计; 最终得到最佳结构的 LED 准直系统。优化设计得到的 RIXR 型准直系统的半口径为 20 mm、纵横比为 0.25、集光角为 200°。LED 准直系统经反向光线追迹得到边缘视场(3.178°)点列图的均方根半径 $< 2.1 \mu\text{m}$, 故边缘视场达到了很好的聚焦效果。充分考虑材料的吸收损失和界面的反射损失后, 光能利用率高达 83.48%。实验表明, 基于 RIXR 结构的 LED 准直系统具有光能利用率高、结构紧凑、体积小、便于应用等特点。

关 键 词: 非成像光学; 多面同步法(SMS); 自由曲面; RIXR 结构; LED 准直系统

中图分类号: TN312.8; TH703 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20111907.1472

Design of RIXR LED collimative system

ZHAO Hu-fu^{1,2}, LIU Hua^{1*}, SUN Qiang¹, WANG He¹,
XU Jia-lin¹, JING Lei^{1,2}, LIU Ying¹, LI Ye-fan¹, NI Ping-tao³

(1. Opto-electronic Technology Research Center, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

3. Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

* Corresponding author, E-mail: girllihua@sohu.com

Abstract: A high efficient, compact, Refractive / Total internal reflection / Reflective / Refractive (RIXR) collimating system was designed and optimized to collect a wide angle range light to emit the collimating beam with a small divergence angle. Firstly, the surface of the initial structure of the system was calculated according to the edge-ray principle and Simultaneous Multiple Surfaces (SMS) method based on the non-imaging optics theory. Then, the initial structure was optimized by using Zemax optical design software. Finally, the best LED collimating system was successfully designed. According to the results of the design, the semi-diameter of the RIXR collimating system is 20 mm,

收稿日期: 2010-07-06; 修订日期: 2010-11-16.

基金项目: 国家 973 重点基础研究发展规划资助项目(No. 2010CB227101)

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

aspect ratio is 0.25 and its collection angle is 200° . These results indicate that the system can completely collect the light emitted by LED sources. As the root mean square radius of a spot diagram for the edge field (3.178) obtained by the reverse ray tracing is less than 2.1 mm , the edge field shows an excellent focusing effect. Furthermore, when the light absorption loss of the material and reflection loss of the interface are fully considered, the light energy utilization rate is as high as 83.48% . Experiments demonstrate that the RIXR-type collimating system has advantages in a compact structure, high light energy utilization ratio and easy to use.

Key words: non-imaging optics; Simultaneous Multiple Surface(SMS); free-form surface; RIXR structure; LED collimating system

1 引言

由于发光二极管(Light Emitting Diode, LED)的节能环保效果显著、驱动电压低、体积小、重量轻、功耗低、寿命长、色调和定向性好等优点,其应用领域越来越广泛,特别是在舞台、商场、家居、广告照明、路灯等领域应用甚多。LED光源在照明应用中最令人关注的问题是如何提高光能的利用率以及光能量的分布来满足特定场合的配光要求。

目前LED照明还存在一些不足,如市场上现有的光路折叠式光学元件中采用的LED光源必须浸没元件介质内部,这需要使用光学级粘胶对LED的封装件与配光元件永久粘接,而粘胶对光的吸收、散射损失会使光能利用率降低,同时增加系统成本。另外,LED准直系统一般采用匀光棒来提高其照明均匀性,但这增加准直系统的重量,而且光线在匀光棒内表面多次反射,会使准直系统的光能利用率降低。为克服LED准直系统的上述不足,需要对其结构进行优化设计。

采用边缘光线原理可简化准直系统设计的复杂性,即对于一个光学系统,使通过入射口径的边缘光线对应着出射口径的边缘光线,保证入射光线全部通过准直系统变成出射光线,理论上可使能量传递率达到 100% ^[1]。利用非成像光学^[2]控制光辐射的传输,可以解决两大类问题。一是光能的收集问题,其关注焦点在于光能的收集效率;二是光能的分配问题,其关注焦点在于如何实现一定需求的光能分布。结构紧凑的折射/全反射/反射/折射(RIXR)型准直系统属于第二类问题。

在非成像应用领域内多采用自由曲面型

自由曲面为非常规面型,因此需要应用非成像光学理论中的多面同步(Simultaneous Multiple Surface, SMS)^[3]设计方法以及边缘光线原理^[4-5]自行设计自由曲面^[6-7]。现有的二维自由曲面设计实质上是由光线追迹得到一系列的离散点,然后将离散点拟合成曲线,再把曲线绕对称轴旋转来得到旋转对称的自由曲面。这是目前设计旋转对称自由曲面的常规方法。但由离散点拟合成曲线的过程中会引进拟合误差,导致目标面上照度分布的偏移。针对这个问题本文借助于Matlab编写程序追迹光线设计了由自由曲面构成的准直系统,准直系统采用了RIXR紧凑式结构,将其作为初始结构导入Zemax光学设计软件进行进一步优化设计,最终使光能利用率和目标面的均匀性均有所提高。

2 结构紧凑的RIXR型LED准直系统

2.1 RIXR型LED准直系统的结构

LED准直系统为旋转对称系统,准直系统的口径大小及厚度可以根据所要求的集光角度和装置的总体长度做相应的调整。常见的LED光源都是经过一次封装的,为提高LED的光能利用率,可以在其基础上进行二次配光设计。本文所设计的准直镜就是对LED进行二次配光来提高其能量利用率。准直系统剖面结构如图1所示:

设计中采用的LED光源的封装外壳是固定的半球形,无需再设计。二次配光器件由三个面组成:第一个面(二次配光器件下表面的中间凹陷部分)为入射面,第二个面(二次配光器件的上表

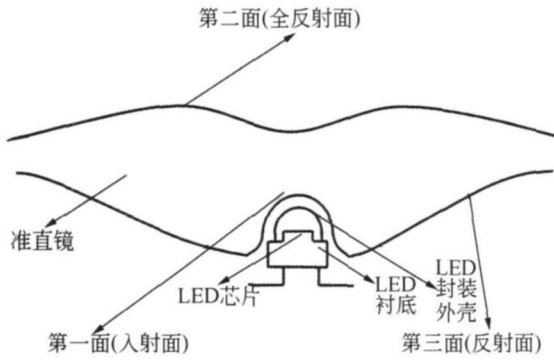


图 1 LED 准直系统

Fig. 1 Collimating system for LED

面)既作为全反射面又作为折射面,第三个面为反射后表面^[5]。

2.2 RIXR 型 LED 准直系统的设计

准直系统设计的关键技术在于 LED 准直透镜的设计,该设计的理论基础是非成像光学理论。要求入射光束的能量最大程度地传输到接收端,必须保证入射光束的光学扩展量 E_i 与出射光束的光学扩展量 E_o 相等^[6],即光学扩展不变量守恒。设计过程中应用了边缘光线原理和 SMS 设计方法^[8]。在设计过程中只考虑边缘光线,即只要保证光源发出的边缘光线对应出射光的边缘光线,那么光源发散角之内的光线对应的出射光线必定在正负最大出射角之内。

LED 准直透镜的设计基于二维计算,通过 Matlab 编写程序,对准直系统的前表面和反射后表面由边缘向中心同时计算,将得到的二维曲线绕其中心对称轴旋转得到旋转对称的自由曲面,旋转对称的自由曲面构成准直系统的初始结构。在开始设计之前,需要根据具体的使用要求计算和选择准直系统的初始参数:几何聚光比 C 、准直透镜材料(折射率为 n)、LED 芯片的口径 d 等。由光学扩展量守恒方程 $E_i = E_o$,可求得准直系统的发散角。其中 $E_i = 2\pi d \sin \theta_i$, $E_o = 2\pi D \sin \theta_o$, θ_i 为入射半角, θ_o 为出射半角, n_i 为入射介质的折射率, n_o 为出射介质的折射率, D 为准直镜的口径。为实现光能利用率达到理论极限,一般令 $\theta_i = \theta_o / 2$ 。选聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)为准直镜的材料。PMMA 材质较轻,折射率约为 1.49 (n_i)。准直系统选高效节能的 LED 作为光源:长和宽(d)均为 1.375 mm,高(h)为 0.1 mm,芯片的发散角为 200°。不仅 LED 的上表面发光,LED

的侧面也发光,光源的光学扩展不变量^[6]为

$$E_i = 2 \pi n_i \left[d + h + \frac{1}{2} h \sin(\theta_T) + \frac{1}{2} h \sin(\theta_B) \right], \quad (1)$$

式中 θ_T 为芯片侧面顶部边缘点的发光角度在水平线以下的部分, θ_B 为芯片侧面底部边缘点的发光角度在水平线以下的部分,芯片的发光半角为 100°,正常的情况下 θ_T, θ_B 均为 10°,但芯片的侧面发出的部分光线被 LED 的衬底遮挡,LED 芯片的侧面从上往下发光角度越来越小,根据所选用的 LED 的形状和尺寸计算得出 θ_T 为 10°, θ_B 为 5°,见图 2。由于光学扩展不变量守恒 $E_i = E_o$ 。得

$$\theta_o = \arcsin(E_o / 2D). \quad (2)$$

LED 芯片的口径为 1.375 mm,几何聚光比 C 选为 515,可得准直系统的口径为 40 mm;由公式(2)计算得出准直光束的发散角为 $\theta_o = 3.178^\circ$ 。图 2 为 LED 光源的相位-空间边缘光线示意图,图 2 中竖直方向坐标代表 $n \sin \theta$,水平方向 x 从 -0.7875 mm(左侧边缘)变化到 0.7875 mm(右侧边缘),其中 -0.7875 mm ~ -0.6875 mm 和 0.6875 mm ~ 0.7875 mm 区间为 LED 芯片的侧面横截面的坐标, -0.6875 mm ~ 0.6875 mm 代表 LED 芯片上表面横截面的坐标。LED 芯片有一定的厚度,不仅芯片的上表面发光,它的侧面也发光,图 2 中倾斜部分的线段代表 LED 芯片侧面的边缘光线,但侧面发出的光由于 LED 下面衬底(图 1 中的 3)的遮挡不能全部进入准直系统。芯片的侧面从上而下光线被遮挡的越来越多,也就相当于芯片的侧面从上而下光线的发散角越来越小,故芯片侧面从顶端到底端的过程中 $n \sin \theta$ 值随着发散角 θ 值的减小而减小,所以图中有两段倾斜线段。图 2 中外围矩形区域为 LED 芯片上表面的边缘光线;外围矩形区域两侧倾斜部分为 LED 芯片侧面的边缘光线在相位-空间的表现形式。

LED 光源发出的光线经过第一个面进入非成像准直系统,然后在第二个面发生内部全反射,光线被反射回来遇到第三个面,第三个面镀有反射膜使光线再次发生反射,最后光线又经过第二个面折射出准直系统变为发散角很小的准平行光,达到准直目的,见图 1。

LED 准直系统的设计流程如图 3 所示。SMS 设计方法要求先在系统边缘处选取一段初

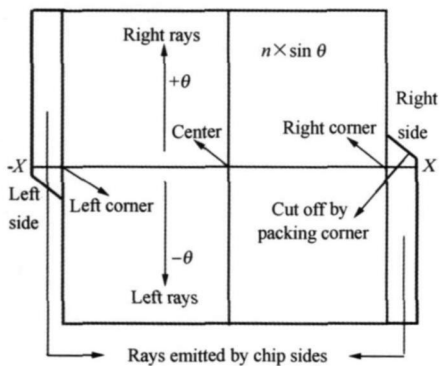


图 2 相位-空间 LED 的边缘光线

Fig. 2 Edge rays of LED in phase-space

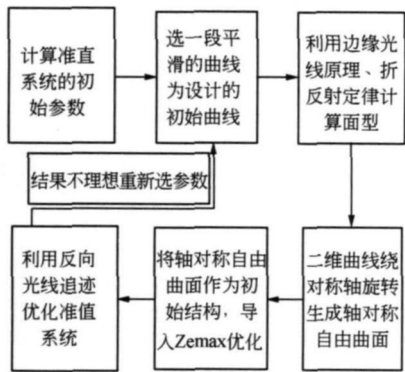


图 3 准直系统的设计流程图

Fig. 3 Design flow chart of collimating system

始曲线, 然后根据初始曲线由边缘向中心逐段递推, 同时得到上下两个自由曲面。初始曲线的选取很重要, 它和光源的尺寸及发散角共同决定着自由曲面的形状, 在光源已选定的情况下初始曲线决定着自由曲面的形状。为了面型的平滑起见, 根据设计经验初始曲线 AC 选为光滑的二次曲线。如图 4 所示, 一会聚球面波, 会聚点为 S , 从会聚球面波中选取两条边缘光线, 这两条边缘光线与竖直方向的夹角分别为 $-\theta$ 和 $+\theta$ 。两条边缘光线交曲线 AC 于 A 、 B 两点后折射, 再经过未知的准直镜下表面反射后交于 C 点。这个过程可以看作理想成像的过程, 即虚物点 S 发出的球面波经过准直镜的上表面和下表面后成像于 C 点, 根据等光程原理、折射定律和反射定律可求得 D 、 E 两点。LED 芯片的侧面也发光, 其右侧底部的边缘点发出的一部分光线由于被 LED 的衬底 (图 1 中的 3) 遮挡而不能被准直系统收集 (见图 2), 令其边缘光线 RP 通过 M 点折射后交于 C 点, 可求得 $RPMC$ 的光程, 根

据等光程原理和折射定律使 RO 折射后交于 C 点, 即 R 与 C 两点为物像关系, 故可求得 MO 段卵形线。同理可使 LED 芯片上表面左侧的边缘点 L 发出的边缘光线 LO 和 LN 折射后交于 C 点, 可求得 ON 段卵形线, 见图 4。

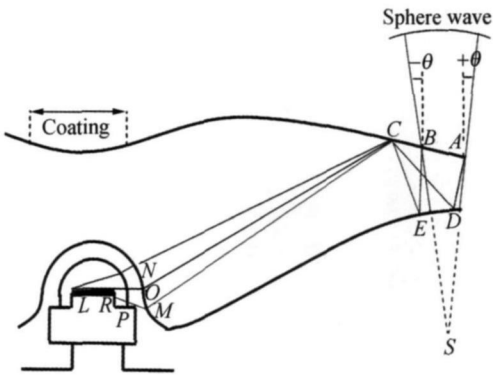


Fig. 4 Initial stage of design

基于上表面已经求出的 A 、 C 两点以及下表面的 E 、 D 两点, 利用等光程原理和折反射定律依次从边缘向中心递推, 分别得到上表面和下表面的一系列的离散点, 当上表面的一些离散点接近中心某一位置已经不满足全反射时, 为实现光线的反射, 将该区域镀反射膜, 依次类推直到计算到中心对称轴为止。此过程如图 5 所示。

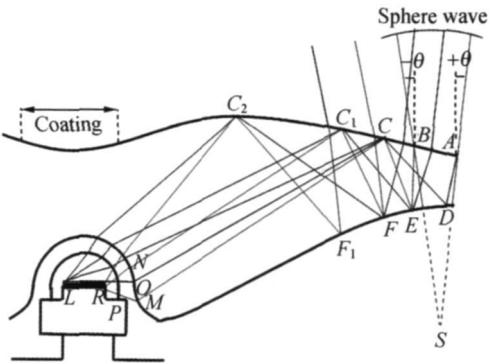


Fig. 5 Section ED , CC_1 and E_1E are generated from initial curve step by step

由上述计算过程可以得到一系列离散点, 然后将离散点拟合成光滑曲线^[9-10], 该曲线绕中心对称轴旋转成旋转对称的自由曲面^[11-12], 得到准直系统的初始结构。通过调节 A 、 C 、 M 、 S 点的坐标来调节准直镜的整体形状。在光学设计软件中建立初始系统结构模型, 对其进行光线追迹模拟

分析。结果显示,LED 准直系统初始结构的光能利用率为 79.95%,目标面上照度分布不是特别均匀,照度的峰值出现在 0 视场附近,其结果见图 6、图 7。

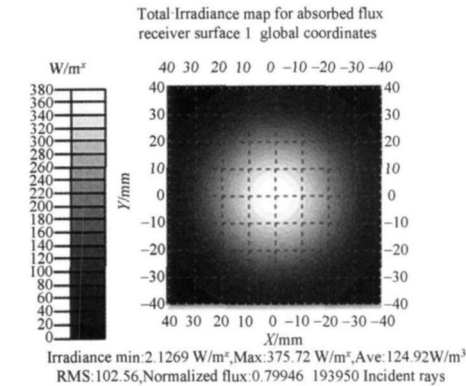


图 6 初始系统目标面上的照度分布
Fig. 6 Irradiance map on receiver surface of original system

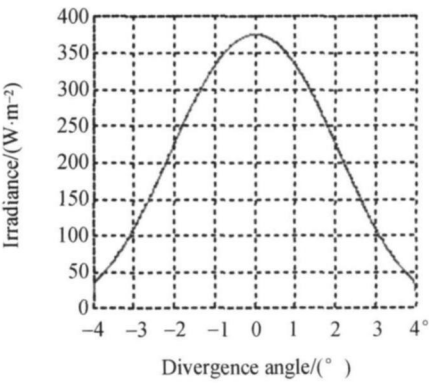


图 7 初始系统照度随发散角度的变化曲线
Fig. 7 Irradiance distribution curve with divergence angle in original system

3 准直系统初始结构的优化设计

由于 LED 准直系统初始结构的光能利用率不高,并且目标面上照度的均匀性也不好,因此需要对 LED 准直系统的初始结构进行优化来提高光能利用率和目标面上的照度均匀性。将设计准直系统得到的一系列离散点拟合成曲线,然后利用得到的曲线方程系数在 Zemax 光学设计软件中模拟曲面,建立准直系统的初始结构模型,利用 Zemax 光学设计软件对准直系统的初始结构进行优化设计。由于 LED 芯片边缘点发出的光线

经准直系统后为出射光的边缘光线,优化时可用反向追迹光线方法优化,根据边缘光线原理,即两束带有正负最大倾角(3.178)的平行光线逆向经过准直系统后分别聚焦^[13]于 LED 芯片的两个边缘点见图 8、图 9。为了保证两个边缘视场能完善聚焦,使边缘视场的光线会聚于同一点,本文利用光线追迹方法对准直系统进行优化设计。

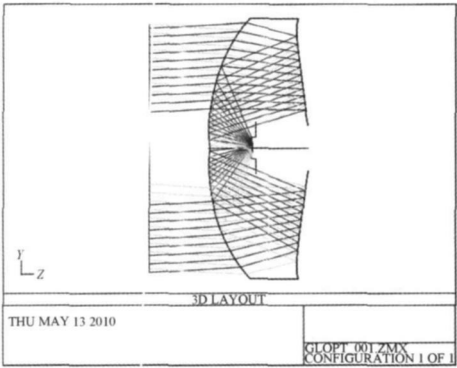


图 8 光线追迹示意图
Fig. 8 Diagram of ray tracing

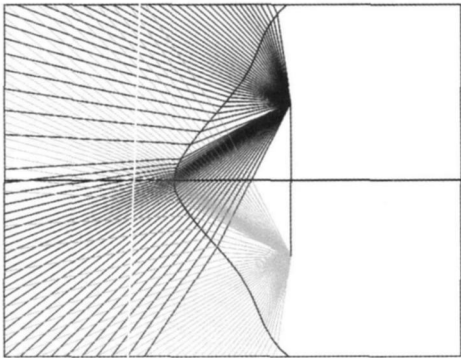


图 9 放大的光线追迹示意图(焦点为 LED 芯片两个边缘点)
Fig. 9 Amplified diagram of ray tracing

图 10、图 11 为像面两个边缘视场(3.178)的点列图,从图中可以看出均方根半径 < 2.1 m,系统设计满足了边缘视场完善成像的条件,即边缘视场的光线逆向经过准直系统后分别聚焦在 LED 芯片的两个边缘点上,满足边缘光线原理,符合设计要求。

根据光路可逆定理,LED 芯片的边缘点发出的光线经过准直系统后,出射光线为最大发散角的平行光线,满足了边缘光线原理。LED 芯片其它位置发出的光线经过准直系统^[14]后的发散角

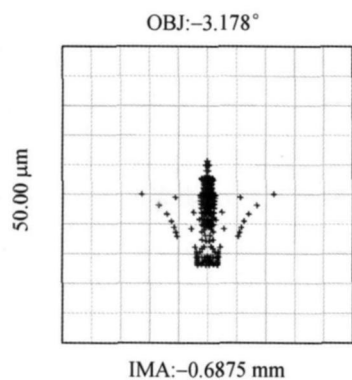


图 10 -3.178°视场的点列图
Fig. 10 Spot diagram of -3.178° field

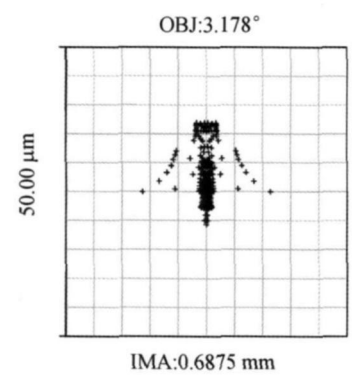


图 11 3.178°视场的点列图
Fig. 11 Spot diagram of 3.178° field

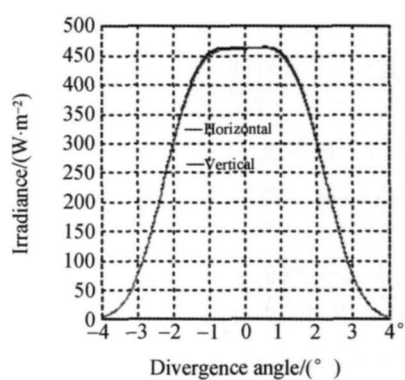


图 13 系统优化后照度随发散角度的变化曲线
Fig. 13 Irradiance distribution curve with divergence angle in optimized system

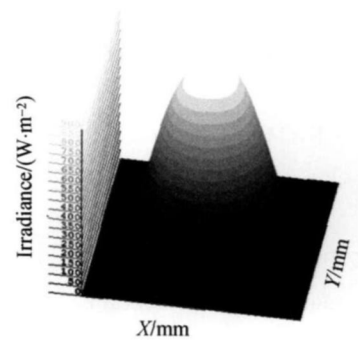


图 14 照度的三维立体分布
Fig. 14 Irradiance distribution in three dimensions

在最大发散角 3.178° 之间, 因此出射光线为比较均匀的准直光线, 模拟结果如图 12、图 13、图 14 所示:

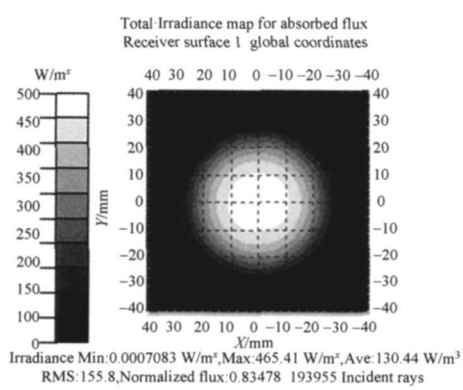


图 12 系统优化后目标面上的照度分布
Fig. 12 Irradiance map on receiver surface of optimized system

出, 在考虑了材料对光的吸收损失和界面的反射损失的情况下, 系统的初始结构经优化后, 光能利用率由原来的 79.95% 提高到 83.48% (见图 6、图 12); 目标面上照度的峰值出现在中心区域, -1 视场到 1 视场之间的照度值最大且分布均匀, 从 1 视场照度值开始下降, 到 2 视场时照度值降到最高值的 66.67%, 可见目标面上照度均匀性也有明显的提高 (见图 7、图 13)。光线在经过准直系统的过程中一共经过 4 个空气和介质的交界面, 其中两个折射面、一个全反射面、一个反射面, 折射面的光能损失至少为 4%, 反射面光能的损失为 5.5% 左右, 全反射面光能无损失。材料的吸收损失为 2% 左右, 综合分析以上各种光能损失后, 理想的效率为 85.35%, 而软件模拟得到的效率为 83.48%。可见, 准直系统的初始结构通过优化后的效率已接近理想效率。因此, 通过优化结果可以证实这种自由曲面构造方法以及准直系统的设计优化方法的正确性与可行性。

对优化后系统的模拟结果 (图 12、图 13) 与初始系统的模拟结果 (图 6、图 7) 对比分析可以得

4 结 论

本文根据非成像光学的设计思想,采用 SMS 设计方法以及边缘光线原理,利用 Matlab 编写程序设计了 RIXR 型 LED 准直系统的初始结构。在设计得到准直系统的初始结构的基础上,进一步利用 Zemax 光学设计软件对初始结构进行优化设计,提高其效率和均匀性,最终得到了理想的准直效果。该准直系统能够收集大角度范围内的

光线(集光角为 200°),产生发散角为 3.178° 的准直光束,光能利用率高达 83.48%;同时系统能够控制 LED 芯片发出的光线在目标面得到特定尺寸和形状的光斑,从而满足特殊的照明要求。RIXR 型 LED 准直系统使光路发生两次折叠,大大减小了系统的体积,有助于实现光学系统的小型化。这种 RIXR 型 LED 准直系统的设计优化方法对提高照明系统的效率和均匀性具有重要的理论意义和实用价值。

参考文献:

- [1] WELFORD W T, WINSTON R. *High Collection Non-imaging Optics* [M]. New York: Academic Press, 1989.
- [2] WINSTON R, MINANO J C, BEN TEZ P. *Non-imaging Optics* [M]. Elsevier Academic Press, 2004.
- [3] BEN TEZ P, MINANO J C, BLEN J, *et al.*. Simultaneous multiple surface optical design method in three dimensions[J]. *Opt. Eng.*, 2004, 43, 1489-1502.
- [4] HARALD R, ARI R. Edge-ray principle of nonimaging optics [J]. *Opt. Soc. Am. A.*, 1994, 11 (10): 2627-2632.
- [5] MINANO J C, GONZ LEZ J C, BEN TEZ P. A high-gain, compact, nonimaging concentrator: RXI [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(34): 7850-7856.
- [6] MINANO J C, BEN TEZ P. Compact folded-optics illumination lens: US[P]. April 15th, 2004.
- [7] PARKYN B, MUNOZ F, MINANO J C, *et al.*. Edge-ray design of compact etendue-limited folded-optic collimators[J]. *SPIE*, 2004, 5185: 6-17.
- [8] MINANO J C, BEN TEZ P, GONZ LEZ J C. RX: a nonimaging concentrator[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(13): 2226-2235.
- [9] PIEGL L, TILLER W. *The NURBS Book* [M]. 2nd ed. Springer, 1996.
- [10] CHASE H. Optical design with rotationally symmetric NURBS[J]. *SPIE*, 2002, 4832: 10-24.
- [11] 刘华, 卢振武. 可横向分光的大接收角非成像式聚光系统[J]. *光学 精密工程*, 2009, 17(12): 2881-2886.
- LIU H, LU ZH W. Lateral splittable nonimaging concentrators with large acceptable angles [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(12): 2881-2886. (in Chinese)
- [12] 朱瑞, 卢振武, 刘华, 等. 基于非成像原理设计的太阳能聚光镜[J]. *光子学报*, 2008, 31(8): 45-47.
- ZHU R, LU ZH W, LIU H, *et al.*. The solar concentrator design method based on nonimaging optics[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 31(8): 45-47. (in Chinese)
- [13] 孙明磊, 宗光华, 毕树生. 基于照度优化的自动聚焦技术[J]. *光学 精密工程*, 2008, 16(8): 1508-1514.
- SUN M L, ZONG G H, BI SH SH. Automatic focusing technique based on illumination optimum [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(8): 1508-1514. (in Chinese)
- [14] 史亚莉, 高云国, 张磊, 等. 提高 CCD 激光自准直测角精度的硬件方法[J]. *光学 精密工程*, 2008, 16(4): 726-732.
- SHI Y L, GAO Y G, ZHANG L, *et al.*. Improvement of measuring accuracy of CCD laser autocollimator by changing hardware parameters [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(4): 726-732. (in Chinese)

作者简介:



赵会富(1983-),男,吉林长春人,博士研究生,主要从事太阳能聚光、光伏发电、LED配光设计和检测方面的研究。E-mail: zhfcioomp@hotmail.com



刘华(1976-),女,辽宁抚顺人,博士,副研究员,主要从事光学检测、光学设计、非成像光学方面的研究。Email: girlliuhua@sohu.com



孙强(1971-),男,研究员,博士生导师,2003年于南开大学获得博士学位,2006年于长春光机所博士后出站,主要从事现代红外光学仪器方面的研究。E-mail: sunq@ciomp.an.cn



王鹤(1983-),男,毕业于大连理工大学,硕士学位。主要研究方向:网络控制技术,智能检测技术,嵌入式应用技术。



许家林(1984-),男,东南大学硕士,机械电子专业,从事微电机控制和驱动器设计等嵌入式开发工作。



荆雷(1983-),男,天津静海人,博士,2006年于山东大学获得学士学位,主要从事太阳能聚光光伏系统设计、检测,太阳能热发电技术及照明系统设计、检测等方面的研究。E-mail: 100jinglei100@163.com



刘英(1980-),女,山东滨州人,助理研究员,2005年于山东师范大学获得学士学位,2010年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事红外光学方面的研究。E-mail: liuy613@163.com



李也凡(1958-),男,硕士,副研究员,主要从事光电子和应用物理学方面的工作。



倪平涛(1985-),男,吉林长春人,主要研究方向为飞行仿真光学显示。