

doi: 10.3788/gzxb20154402.0222001

基于大功率 LED 扩展光源的均匀光斑光 辐射模拟器设计

李鹏¹, 郑毅¹, 范江兵¹, 赵加凯¹, 许伟忠², 朱宝龙², 郑尧元², 胡森²

(1 防化研究院, 北京 102205)

(2 杭州电子科技大学 通信工程学院, 杭州 310018)

摘 要: 基于边缘光线原理和光学扩展量守恒思想, 结合复合抛物面聚光器和轴对称自由曲面透镜, 设计并研制了大功率发光二极管扩展光源的反射/折射准直器. 运用 Tracepro 软件对系统进行光束追迹模拟仿真和实验, 研制出均匀光斑的光辐射模拟器. 模拟器出发散角为 $\pm 12^\circ$ 光束, 测量距离出射面 50 cm 处光屏的光斑, 在尺寸为 $14\text{ cm} \times 14\text{ cm}$ 的光照范围内, 测得光斑水平方向中心线上的光度均匀度优于 4.1%, 竖直方向中心线上的光度均匀度优于 3.8%.

关键词: 光源与照明; LED 扩展光源; 光学扩展量; 复合抛物面聚光器; 自由曲面透镜; 均匀度; 发散角

中图分类号: O432

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)02-0222001-6

Design of Squared Uniform Illumination Based on High Power LED Extended Objects

LI Peng¹, ZHENG Yi¹, FAN Jiang-bing¹, ZHAO Jia-kai¹, XU Wei-zhong²,
ZHU Bao-long², ZHENG Yao-yuan², HU Miao²

(1 Research Institute of Chemical Defense, Beijing 102205, China)

(2 College of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Based on principle of edge ray and etendue conservation ideas, the compound parabolic concentrator and freeform lens collimator were designed for high power Light Emitting Diode extended source. By using TracePro software for ray tracing simulation and experimental guidance, a light radiation simulator with uniform illumination output was developed. The divergence angle of simulator output light beam is measured as ± 0.2 rad. In the lightscreen of 50 cm distance the beam horizontal uniformity is measured better than 4.1%, and longitudinal uniformity better than 3.8%, within $14\text{ cm} \times 14\text{ cm}$ size illuminated area.

Key words: Light sources and lighting; Extended LED source; Optical etendue; Compound parabolic concentrator; Freeform lens; Uniformity; Divergence angle

OCIS Codes: 220.1770; 220.2945; 220.3620; 220.4610

0 引言

随着半导体技术的发展, 发光二极管 (Light Emitting Diode, LED) 逐渐在各领域取代传统光源^[1-2]. LED 作为新型光源在结构、尺寸和寿命等方面有很大优势; 但是朗伯体的空间发光特性, 使得传统光学系统

无法满足其配光需求^[3-5]. 根据 LED 的发光特点, 如何通过光学设计提高系统光学性能、拓宽其应用场合是目前 LED 光源研究的关键问题.

非成像光学理论从光源的发光特性和最终所要求的系统光学参量指标出发, 考虑能量传输的匹配问题, 为 LED 光源配光设计提供了有力的理论依据^[6-7]. 目

基金项目: 浙江省自然科学基金 (No. LQ13F010012) 资助

第一作者: 李鹏 (1979—), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为核监测技术. Email: myddp@126.com

通讯作者: 胡森 (1982—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为大功率 LED 技术、激光技术. Email: miao_hu@foxmail.com

收稿日期: 2014-06-11; 录用日期: 2014-09-28

<http://www.photon.ac.cn>

前非成像点光源的光学系统设计可以直接通过数学模型求解,如荆雷等采用 TracePro 软件设计了紧凑型 LED 点源准直镜,最终系统发射的光束发散角为 6° ,均匀性高达 92%^[8]. 针对非成像扩展光源的光学系统设计主要是采用同步多曲面 (Simultaneous Multiple Surface, SMS) 法^[6,9],如赵会富等采用 Zemax 软件设计的折射/全反射/反射/折射式结构的 LED 准直系统,获得 $\pm 3.178^\circ$ 的光束发散角且整体光效(系统输出光通量与 LED 源总光通量之比)达 83.48%^[10];吴仍茂等采用 Zemax 软件设计的折射/全反射准直系统整体光效达到了 91%,但均匀度略低^[11];张航等采用复合抛物面同步多曲面方法,通过 Tracepro 设计 LED 准直器获得小于 $\pm 2.26^\circ$ 的光束发散角,并使整体光效达到 0.79^[12];此外,王尚等报道了均匀度大于 60% 的 LED 阵列自由曲面光学系统设计^[13]. 本文基于边缘光线原理和光学扩展量守恒思想,通过设计非成像低聚焦度的器件^[14-15] 复合抛物面聚光器 (Compound Parabolic Concentrator, CPC) 和基于自由曲面设计^[16] 的自由曲面透镜 (Freeform Lens, FL),实现大功率 LED 扩展光源的均匀化方形光斑输出. 采用 Tracepro 实现光束追迹模拟仿真并指导实验,利用 CPC 对 LED 实现初级配光,再以自由曲面透镜实现准直均匀配光,最终获得良好均匀度的方形光斑. 这种高均匀度输出的光斑可以用于微型投影仪的光引擎或者光度、辐射仪器的计量^[17].

1 原理分析

光学扩展量理论是设计 LED 扩展光源的非成像光学系统的有力工具. 光学扩展量描述了光束所通过的面积和所占有立体角的积分;对于理想的光学系统,光源所发出的光束经光学系统后的光学扩展量守恒. 在非成像光学系统设计中,光学扩展量匹配是最重要的考虑因素之一. 对于 LED 光源要求光学扩展量越小越好,而对于光学元件则要求光学扩展量越大越好,同时考虑可能引起系统复杂度增加,因此需要合理设计光学系统^[3].

本文采用 CPC 和轴对称 FL 对 LED 扩展光源的出射光进行光学变化;其中方形 CPC 的截面曲线基于边缘原理 (Edge-ray principle) 获得^[18]. 边缘光线原理是非成像光学的基础原理之一. 具体方法即将扩展光源的边缘光线通过 CPC 等光学器件,反/折向预定发射角区域的边缘;而将来自扩展光源内部的光线也对应地射向预定发射角区域的内部. 应用该定理,设计过程中可以仅考虑光源边缘发出的光线. 根据使用要求,将固定面积的扩展光源发出的光线经过反射/折射后,约束在一个固定的出光角内,具体示意如图 1.

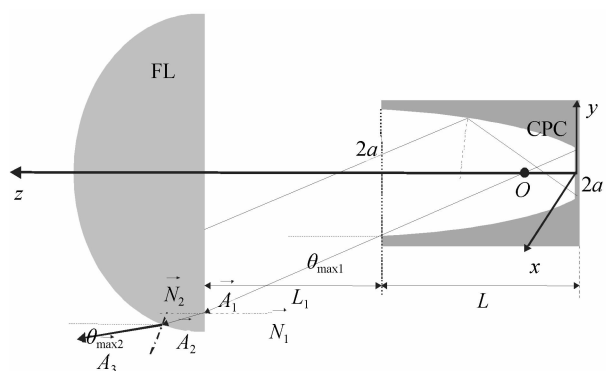


图1 边缘原理示意图
Fig. 1 Edge-ray principle

图1中,建立以LED扩展光源中心为O点的三维笛卡尔坐标系,仅考虑系统中间截面的光线几何关系. LED扩展光源放置在 xoy 平面, z 轴为发光面法线. LED方形扩展光源的边长为 $2a'$,考虑经CPC光学变化后LED出射光边线的最大出射角为 $\theta_{\max 1}$,因此二维复合壁面的截面曲线可表示为

$$\left[(\sqrt{x^2 + y^2} + a') \cos \theta_{\max 1} + z \sin \theta_{\max 1} \right]^2 = 4a'(1 + \sin \theta_{\max 1})(z \cos \theta_{\max 1} - \sqrt{x^2 + y^2} \sin \theta_{\max 1} + a') \quad (1)$$

按照图1所示,容易获得CPC的口径 $2a$ 及长度 L 为

$$\begin{cases} 2a = 2a' / \sin \theta_{\max 1} \\ L = (a + a') \cot \theta_{\max 1} \end{cases} \quad (2)$$

根据式(1)通过Matlab数值求解计算获得CPC的二维剖面曲线;采用Solidworks软件绘制三维CPC结构图,并通过数控机床加工拼接获得CPC准直器.

LED经过CPC之后可视为新的光源,最大发散角为 $2\theta_{\max 1}$ (全角). 采用光学扩展量守恒原理和同步多表面设计法(SMS)设计轴对称FL作为LED扩展光源的次级配光方案. 如图1所示,FL正对CPC的入光面为平面,正对光屏的出光面为自由曲面. 假设从CPC出射的边缘光线的单位方向矢量为 \mathbf{A}_1 ,经FL平面折射后的方向单位矢量为 \mathbf{A}_2 ,光线穿过FL再经自由曲面折射后的方向单位矢量为 \mathbf{A}_3 . 其中FL平面的法向单位矢量为 \mathbf{N}_1 ,自由曲面的法向单位矢量为 \mathbf{N}_2 . 根据惠更斯折射定律,上述单位矢量满足以下关系

$$\begin{cases} \mathbf{N}_1 \times \mathbf{A}_1 = n \mathbf{N}_1 \times \mathbf{A}_2 \\ n \mathbf{N}_2 \times \mathbf{A}_2 = \mathbf{N}_2 \times \mathbf{A}_3 \end{cases} \quad (3)$$

根据式(3)可知,当已知入射矢量 \mathbf{A}_1 、出射矢量 \mathbf{A}_3 、法向矢量 \mathbf{N}_1 和FL的折射率 n 的前提下,可以求得法向矢量 \mathbf{N}_2 以及FL的自由曲面曲线方程,然后根据边界条件来求所需的曲面. 最终通过计算获取边缘光线经过CPC和FL变化之后的最大发散角为 $2\theta_{\max 2}$.

2 数值仿真

针对发光面积为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的扩展LED光源设计光学系统,通过上述理论数值计算获得CPC和

FL 的参量. 在数值计算模型中对扩展光源采用朗伯体发光模型;为了匹配输出方形光斑,CPC 采用四片曲面拼接的方形结构;为了便于后续加工,FL 采用有机材料轴对称结构. 如图 2 所示,整体系统自左往右依次为:散热器、LED 光源、CPC、FL. 支架将以上部件在预定的位置固定,光源、CPC 及光轴同心.

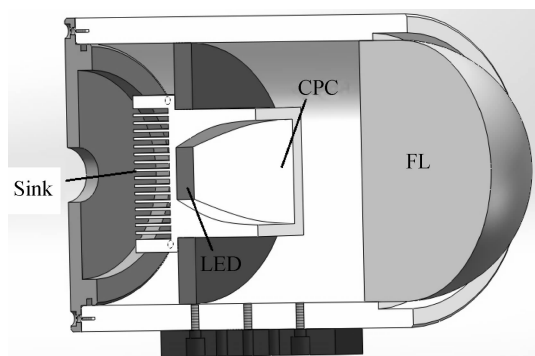


图 2 实验装置图
Fig. 2 Experimental setups

整体 LED 光辐射模拟器系统的设计要求为最大发散角为 $\theta_{\max 2} = \pm 10^\circ$,光屏面有效区域的光度均匀度优于 8%,LED 光源出光处到目标屏光斑处的整体光效优于 40%.

图 2 实验装置图中,轴对称 FL 的总厚度为 74 mm,直径为 100 mm;CPC 的口径为 38 mm×38 mm,长度为 46 mm;CPC 出光面中心与 FL 进光面中心距离 57 mm.

图 3(a)、(b)、(c)、(d)是采用 tracepro 软件 300 万

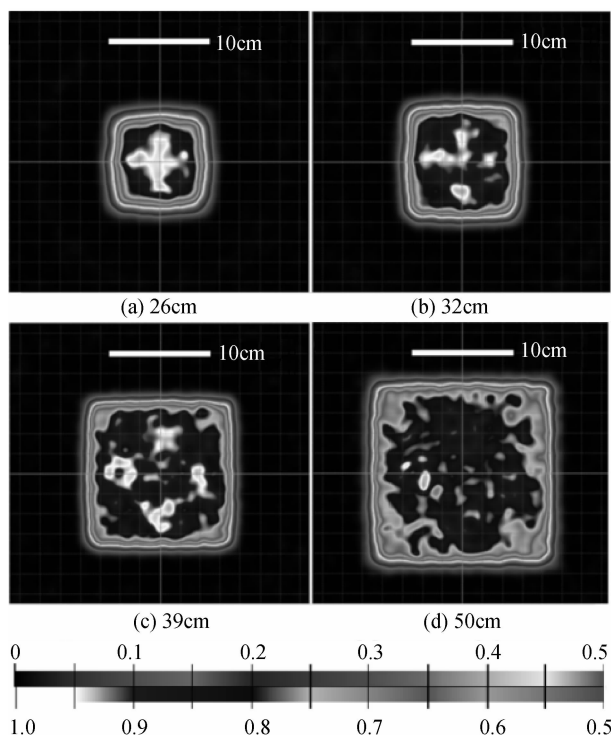


图 3 不同距离处的模拟光强分布图
Fig. 3 Simulated luminosity distribution of different distance lightscreen with 121 W drive power

条光线模拟的距离光学系统(FL 自由曲面最前端) 26 cm、32 cm、39 cm、50 cm 处光屏的光度分布图. 如图 3 所示,考虑光斑边缘是归一化光度为 0.2 的位置. 因此图(a)中光斑尺寸约为 10 cm×10 cm,中心存在明显的白色十字亮斑,即光斑并不均匀;图(b)、(c)的光斑尺寸分别为 12 cm×12 cm 和 14.5 cm×14.5 cm,光斑内部中也存在明显的亮斑;图(d)光斑光度比较均匀,其中光斑尺寸大约为 18.2 cm×18.2 cm,其中均匀度优于 5%的中心区域尺寸约为 14 cm×14 cm.

根据图 3 中光斑尺寸和光屏的相对位置可以计算光学系统的出射光束的发散半角约为 0.17 rad,约合 10° .

3 实验结果分析

实验中根据 tracepro 确定的光学系统参量,采用 ABS 塑料经数控机床(Computer Numerical Control, CNC)加工成型结构,并将内表面涂覆高反射率铝膜层形成 CPC 反射器,反射率约为 80%. 自由曲面透镜采用聚甲基丙烯酸甲酯经 CNC 加工而成,折射率为 1.49,透光率约为 80%. 光源采用发光面积为 20 mm×20 mm 大功率白光 LED 扩展光源,内部采用 121 颗 1 W 的 LED 芯片经过 11×11 串并联而成,总输出功率为 121 W,光效 86 lm/W,总光通量约为 10 000 lm.

实验过程中,对光屏上的光斑图样采用光度计进行逐点采样,光度计采用的杭州远方光电有限公司的 PHOTO-2000F 快速存储光度计,量程为 1 Lux~150 Klux,传感器探头为直径 10 mm 的圆形光敏面.

对不同距离光屏上的光斑,对 20 cm×20 cm 范围内每隔 1 cm 对水平和垂直中心线进行采样,采样点示意图如图 4.

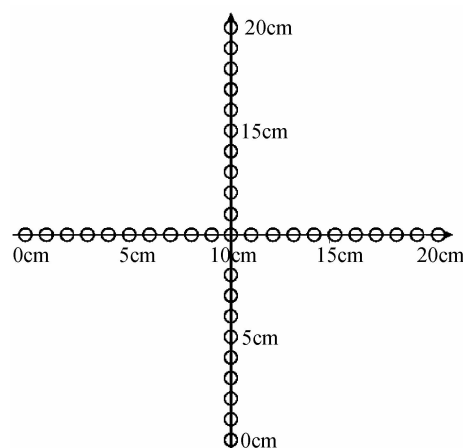
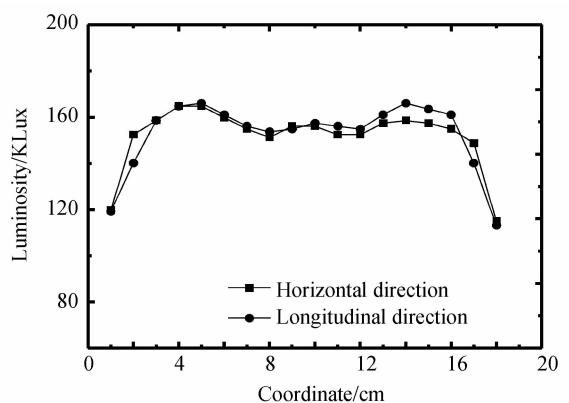


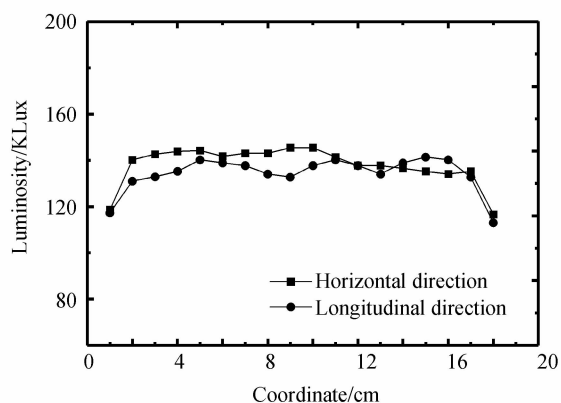
图 4 光学采样区示意图

Fig. 4 The sketch map of sampling site in illuminated region

图 5 是当 LED 光源的驱动功率为 121 W 时,实验获得的光度值图. 图 5(a)为距离 LED 光源前端面 44 cm 处的光度曲线图;图 5(b)为距离 LED 光源前端面 50 cm 处的光度曲线图. 图中方点线表示水平方向中心线上的



(a) Luminosity distribution in 44 cm distance lightscreen



(b) Luminosity distribution in 50 cm distance lightscreen

图5 实验 121 W 输入时不同距离光屏上的光度图

Fig. 5 Experimental luminosity distribution of different distance lightscreen with 121 W drive power

光度分布,圆点线表示竖直方向中心线上的光度分布.

图 5(a)中在 $14\text{ cm} \times 14\text{ cm}$ 区域范围内,水平方向中心线上的平均光度值为 141.45 KLux ,最大值为 148.35 KLux (在距离起点 4 cm 位置处),均方差为 3.55 KLux ;竖直方向中心线上的平均光度值为 143.75 KLux ,最大值为 149.46 KLux (在距离起点 5 cm 位置处),均方差为 3.72 KLux .在图 5(b)中在 $14\text{ cm} \times 14\text{ cm}$ 区域范围内,在水平方向中心线上的平均光度值为 126.81 KLux ,最大值为 130.95 KLux (在距离起点 9 cm 位置处),均方差为 3.33 KLux ;竖直方向中心线上的平均光度值为 123.60 KLux ,最大值为 127.32 KLux (在距离起点 15 cm 位置处),均方差为 2.55 KLux .可以看出图 5(a)中的平均光度值略大于图 5(b),而图 5(b)的均方差优于图 5(a).

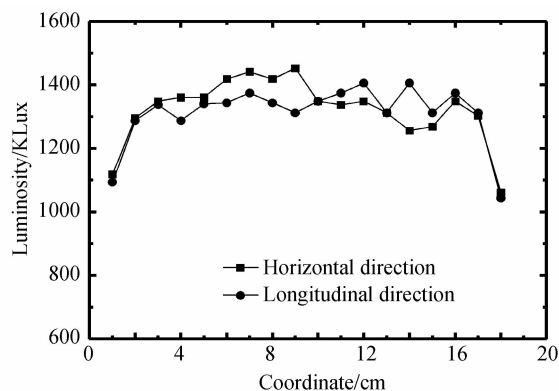
观察图 5(a)发现,最大光度值出现在围绕光斑中心一圈的环带位置,中心出现暗斑;相比而言图 5(b)中,光度值分布比较均匀,混光效果较好.光度均匀度计算公式为

$$\sigma = (L_{\max} - L_{\min}) / (L_{\max} + L_{\min}) \quad (4)$$

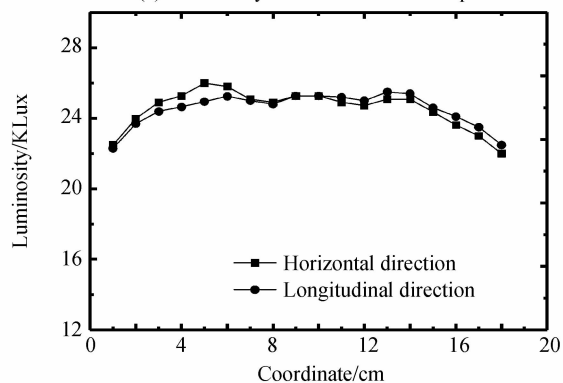
式中 L_{\max} 为最大光度值, L_{\min} 为最小光度值.在 $14\text{ cm} \times 14\text{ cm}$ 的区域范围内,图 6(a)中的水平方向中心线上的光度均匀度优于 4.28% ,竖直方向中心线上的光度均

匀度优于 3.85% ;图(b)水平方向中心线上的光度均匀度优于 4.10% ,竖直方向中心线上的光度均匀度优于 3.80% .在更大的区域范围,图(b)相对于图 6(a)的均匀度优势会更加明显.

图 6(a)、(b)是当 LED 扩展光源的驱动功率分别为 1 W 和 20 W 时实验获得的光度值图.图 6(a)是当 LED 输入功率为 1 W 时距离系统前端面 50 cm 处的水平、竖直方向中心线上的光度曲线图;图 6(b)当 LED 输入功率为 5 W 时水平、竖直方向中心线上的光度曲线图.图 6(a)中在 $14\text{ cm} \times 14\text{ cm}$ 区域范围内,水平平均光度值为 1.35 KLux ,最大值为 1.45 KLux (在距离起点 9 cm 位置处),均方差为 56.27 Lux ;竖直方向上的平均光度值为 1.34 KLux ,最大值为 1.40 KLux (在距离起点 14 cm 位置处),均方差为 34.44 lux .在图 6(b)中在 $14\text{ cm} \times 14\text{ cm}$ 区域范围内,在水平方向上的平均光度值为 25.02 KLux ,最大值为 26.00 KLux (在距离起点 5 cm 位置处),均方差为 0.55 KLux ;竖直方向上的平均光度值为 24.95 KLux ,最大值为 25.50 KLux (在距离起点 12 cm 位置处),均方差为 34.44 lux .



(a) Luminosity distribution with 1 W power



(b) Luminosity distribution with 20 W power

图6 不同驱动功率下 50 cm 处光屏上的实验光度分布图
Fig. 6 Experimental luminosity distribution with different drive power in 50 cm distance lightscreen

根据光度平均值计算公式(4),图 6(a)中的水平方向中心线上光度的均匀度优于 7.23% ;竖直方向中心线上光度均匀度优于 4.41% .图(b)水平方向中心线上光度均匀度优于 4.81% ;竖直方向中心线上光度均匀

度优于 2.82 %。图 5(a)中的均匀度较低,这是由于当驱动功率较低时,扩展光源中的 11×11 的 LED 芯片处于 LED 伏安曲线的不稳定区导致的;当驱动功率增加至 20 W 时,出光均匀性明显增加,并与 121 W 驱动功率时输出的光度均匀度区别不大。

将图 4(a)、(b)中的光度计逐点测量的结果进行二维细分插值,获得二维光度分布图。如图 7 所示,图 4(b)为二维细分插值之后的光度分布图,其中在 $14 \text{ cm} \times 14 \text{ cm}$ 的区域范围内整体的二维光度均匀度约为 5.6%。以图 4(a)和(b)细分插值之后的归一化光度 0.2 为光斑的边界,可以分别得到光斑尺寸为 $15.3 \text{ cm} \times 15.3 \text{ cm}$ 和 $17.8 \text{ cm} \times 17.8 \text{ cm}$,经过计算光束发散角约为 $\pm 0.208 \text{ rad}$,约合 $\pm 12^\circ$,整体光效约为 41.1%。实验测得结果略差于理论设计要求和模拟仿真结果。

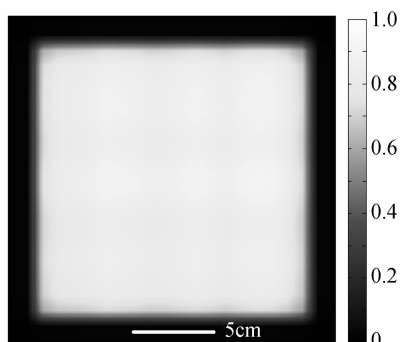


图 7 根据实验结果模拟的 121 W 驱动功率下二维光度分布平面图

Fig. 7 Simulated intensity distribution based on experimental results

光辐射模拟器的光学系统中的透镜为轴对称镜,加工难度不大;但是 CPC 为轴对称镜,加工难度较大。在加工过程中,分别采用了整体加工和分块加工拼接两种手段获得 CPC 元件,其中整体加工是利用数控机床整体成型。采用 CCD 相机分别对两种 CPC 的光斑图样进行拍摄比较。由于 CCD 无法作为光度的计量仪器,因此只能获得定性结论。

图 8 左为整体加工 CPC 的光斑图样,右为分块加工拼接的 CPC 的光斑图样。整体加工的 CPC 相比于分块加工拼接 CPC(四角处光度较小)在光度均匀和光斑

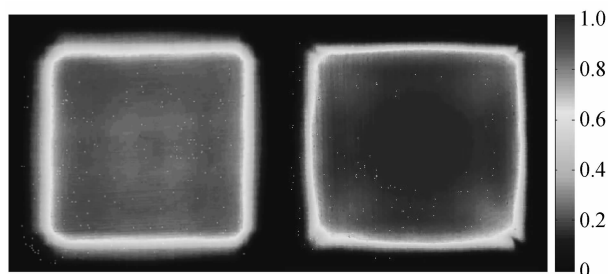


图 8 整体加工的 CPC 和分块加工拼接 CPC 的光斑图
Fig. 8 The intensity distribution from overall processed and block splicing processed CPC

形状上改善较大。对分块加工拼接 CPC 的整体光效测量得 42.3%,略高于整体加工 CPC,但差别不大。

4 结论

采用 CPC 和轴对称 FL 对大功率 LED 扩展光源进行非成像光学变化,获得了二维光度均匀度优于 5.6%,尺寸大于 $14 \text{ cm} \times 14 \text{ cm}$,发散角约为 $\pm 12^\circ$ 的光源。这种白光辐射源在小型投影仪、光度/辐射度计量等方面有良好的应用前景。

参考文献

- [1] HAMM M, HUHN W. Design claims and technical solution steps generating the world first full LED headlamp[R]. SAE Technical Paper, 2008.
- [2] YU Xing-Jie, HO Y L, TAN L, *et al.* LED-based projection systems[J]. *Journal of Display Technology*, 2007, **3**(3): 295-303.
- [3] YANG Guo-dong. Study on secondary optical system design for high-power LED integrated source [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2013.
闫国栋. 大功率 LED 集成光源的二次光学系统设计方法研究[D]. 广州:广东工业大学, 2013.
- [4] JING Lei, WANG Yao, ZHAO Hui-fu, *et al.* Design of uniform-irradiance concentrator for concentration photovoltaics system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(2): 72-77.
荆雷, 王尧, 赵会富, 等. 实现均匀照度光伏聚光镜设计[J]. *光学学报*, 2014, **34**(2): 72-77.
- [5] YU Gui-ying, JIN Ji, NI Xiao-wu, *et al.* Design for LED uniform illumination reflector based on etendue[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2297-2301.
余桂英, 金骥, 倪晓武, 等. 基于光学扩展量的 LED 均匀照明反射器的设计[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2297-2301.
- [6] CHAVES J. Introduction to nonimaging optics [M]. Rochester: CRC Press, 2008.
- [7] WINSTON R, MINANO J C, BENITEZ P. Nonimaging optics[M]. Chicago: Academic Press, 2005.
- [8] JING Lei, LIU Hua, ZHAO Hui-fu, *et al.* Compact collimator design for high-brightness light-emitting diode[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(12): 194-199.
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): 194-199.
- [9] CHEN Ji-long, SHI Zhi-wei, TAN Ji-zhi, *et al.* Optical design for uniform illumination with LED extended source in road lighting application[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2014, **25**(5): 857-863.
陈继龙, 石智伟, 谭吉志, 等. 一种面向 LED 扩展光源的道路配光设计[J]. *光电子·激光*, 2014, **25**(5): 857-863.
- [10] ZHAO Hui-fu, LIU Hua, SUN Qiang, *et al.* Design of RIXR LED collimator system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 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.
- [11] WU Reng-mao, TU Da-wei, HUANG Zhi-hua, *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.

- [12] ZHANG Hang, LIANG Xue, YAN Jin-hua, *et al.* Compound parabolic concentrator-simultaneous multiple surfaces design methods for LED collimators [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(9): 240-245.
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): 240-245.
- [13] WANG Shang. Freeform optical and control system for LED array [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2009.
王尚. 基于LED阵列的自由曲面光学系统与控制系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [14] FANG Jing-yue, CHANG Sheng-li, QIN Shi-qiao, *et al.* Receiving antenna of optical communication based on compound parabolic concentrator [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(9): 87-91.
方靖岳, 常胜利, 秦石乔, 等. 基于复合抛物面聚光器的光通信接收天线[J]. 光电工程, 2009, **36**(9): 87-91.
- [15] NIU Li-hong, LIAO Hua, ZHANG Jin-song, *et al.* Optimization design of compound parabolic concentrator in the weak light detector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(12): 3079-3083.
牛丽红, 廖华, 张劲松, 等. 弱光探测器中复合抛物面聚光镜[J]. 光子学报, 2009, **38**(12): 3079-3083.
- [16] SUN Xiu-hui, DU Jing-lei, YIN Shao-yun, *et al.* Free-form lens design method based on the modulation of the aspheric inner surface for uniform illumination [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(1): 163-166.
孙秀辉, 杜惊雷, 尹韶云, 等. 非球面内表面调制的自由曲面配光透镜设计方法[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(1): 163-166.
- [17] XIANG Zhen, YE Guan-rong, ZHAO Tian-dong. Application of planar array CCD to the measurement of automotive vehicle headlamps [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1999, **26**(5): 48-52.
项震, 叶关荣, 赵田冬. 面阵CCD在机动车前照灯测量中的应用[J]. 光电工程, 1999, **26**(5): 48-52.
- [18] ZHOU Xiao-li, LIU Mu-qing, ZHU Shao-long, *et al.* Study on LED'S luminous flux measurement using a compound parabolic concentrator [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2009, **20**(9): 1137-1140.
周小丽, 刘木清, 朱绍龙, 等. 基于复合抛物面收集器的LED光通量测量的研究[J]. 光电子·激光, 2009, **20**(9): 1137-1140.