

基于自由曲面透镜结构的紫外发光二极管 固化系统光学设计

李梦远 孙伽略 张大伟 李柏承

(上海理工大学上海市现代光学系统重点实验室, 教育部光学仪器与系统工程中心, 上海 200093)

摘要 传统印刷业中用于固化的光源多采用高压水银灯和金属卤素灯等, 传统光源的紫外固化技术已经趋于成熟, 不过由于光源本身和光学系统的局限, 它们会聚出来的线形光线辐照度较低, 且光场均匀度不够高, 因此固化效率不够高。提出一种自由曲面透镜的设计方法, 将发光二极管灯源和自由曲面透镜结合, 可以有效实现光线聚焦的效果, 提高光效和均匀性。使用三维机械设计软件 SolidWorks 设计透镜的初始结构, 将透镜模型导入光学优化软件 LightTools 中对透镜进行光线追迹模拟。通过建立目标函数, 执行优化方案, 对出射光的均匀度、辐照度不断进行优化, 实现出射光为高亮度、高均匀度的线形光。

关键词 光学设计; 自由曲面; 紫外; 发光二极管; 紫外固化

中图分类号 TN23 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.1222003

Optical System Design for Ultraviolet-LED Curing Based on the Structure of Freeform Surface

Li Mengyuan Sun Jialue Zhang Dawei Li Baicheng

(Shanghai Key Laboratory of Modern Optical System, Optical Instrument and Systems Engineering Center of the Ministry of Education, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract In the traditional printing, curing light source always uses high pressure mercury lamp, metal halide lamp and so on. The traditional light source of ultraviolet curing technology has been matured. But because of the light source itself and the limitations of the optical system, the linear light radiation intensity of illumination is low. And the uniformity of the light field is not high enough. This paper provides a design of freeform surface which makes the emergent light of ultraviolet-LED becoming a linear light source effectively. The SolidWorks software is used to design initial structure of the lens. And then the structure is imported into LightTools software to simulate the light. The light is optimized by establishing the objective function and changing the parameters, so that the emergent light can present high brightness and high linear light evenness.

Key words optical design; freeform surface; ultraviolet; light emitting diode; ultraviolet curing

OCIS codes 220.4830; 040.7190; 080.2740; 080.4295; 230.3670

1 引 言

紫外固化技术是一个多学科的研究领域, 涉及到机械学、电学、光学、化学及热学等相关学科。紫外固化是指利用紫外固化设备发出的高强度紫外线照射所要固化的物体, 使固化物体发生一定的光化

学反应实现交联固化, 使液态的单体、低聚物的混合物快速聚合成固体, 最终成膜的一种技术。紫外固化的对象一般为环境友好型的紫外光固化油墨及涂料, 它们在固化过程中不产生挥发性有机气体^[1], 这也正是紫外固化技术得到提倡和大力发展的原因

收稿日期: 2014-06-03; 收到修改稿日期: 2014-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(61378060, 61205156)、国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ14014704)、上海市教委曙光项目(11SG44)

作者简介: 李梦远(1989—), 女, 硕士研究生, 主要从事 LED 光学照明及设计方面的研究。E-mail: lmyusst@163.com

导师简介: 张大伟(1977—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光学薄膜、亚波长光栅和微纳光学等方面的研究。

E-mail: usstoe@163.com(通信联系人)

之一。目前紫外固化技术已广泛应用于包装、广告、印刷、电子、通讯、建材、汽车、航空、航天、计算机仪器仪表以及防伪、医疗、消毒净化等众多领域。

紫外固化系统主要由三大部分组成,分别为光学设计部分,电路驱动部分和散热处理部分。其中光学设计部分尤为关键,它直接影响固化效果的优劣。光学设计部分又可分为两个步骤:1)光源的选择;2)透镜结构的设计。

传统的固化光源主要是汞灯和卤素灯,其有效的紫外谱段只占四分之一左右,很大一部分以可见光和红外辐射的形式损耗掉^[2],不仅能量利用率比较低,而且在工作过程中很容易产生大量的热,这可能致使固化系统的寿命缩短,同时使某些热敏器件在固化时变形。目前新型的紫外发光二极管(UV-LED)固化光源,它的光谱半宽很窄,能量相对集中^[3],这样的紫外光源作用于固化材料时,有非常高的能量利用率。

当前的紫外固化系统逐渐开始采用 UV-LED 光源,并用半圆柱体石英透镜对光线进行会聚,实现

固化效果。此方案设计简单,易于生产加工,但由于 UV-LED 的辐射发散角比较大,且柱透镜的厚度较大,使得目标面上的能量利用率较低,会聚后光线的均匀度、辐照度都不能很好地满足紫外固化的需求。本文提出一种自由曲面透镜设计方案,通过光线模拟,与传统的柱透镜设计方案进行对比,体现出了自由曲面透镜设计方案的优越性。

2 紫外固化系统光学设计与分析

2.1 紫外固化系统光源布局

单颗 LED 的辐射功率有限,在实际运用中不能完全满足固化的要求,且印刷面具有一定宽度,固化时采用线形光照射更为方便,所以目前紫外固化光源系统大多采用 LED 阵列式排布,这样可以在一定程度上提高光源的辐照度和均匀性。参考许文海等^[4]提出的空间阵列排布实现能量叠加的线光源技术方案和谢军等^[5]提出的光固化快速成形中的 UV-LED 光源系统实验研究方案,可以归纳出一种常见的阵列式布局,如图 1 所示。

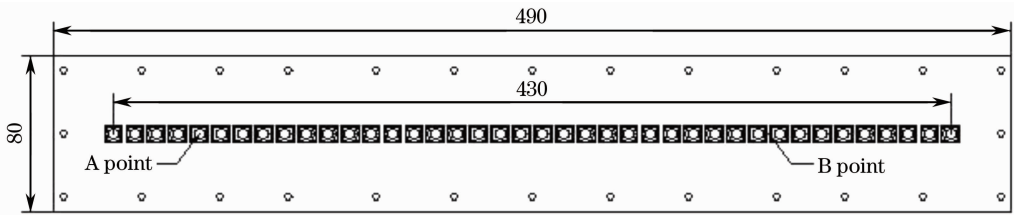


图 1 基板 LED 分布(单位:毫米)

Fig. 1 Distribution of LED on the plate (unit: mm)

基板上 UV-LED 的布局及其具体指标参数如表 1 所示。

表 1 UV-LED 的布局及其具体指标参数

Table 1 Layout and parameter of UV-LED

Parameter	Value
LED chip size /mm	11
Chip dimension /mm	9×9
Overall luminous length /mm	430
Emitting surface size /mm	1×1
Center wavelength /nm	395
Spectral half width /nm	±10
Divergence angle /(^{\circ})	±60
Rated radiated power /mW	200

LED 为面光源,在与其垂直的发光面上的辐射呈朗伯分布,且有 $p(\theta) = p_0 \cos \theta$,由于 LED 具有较大的发散角,作为光源仿真时不能以点光源代替,为了达到和实际相近的模拟效果,建立了如图 2 所示的 LED 模型,参数设计见表 1。

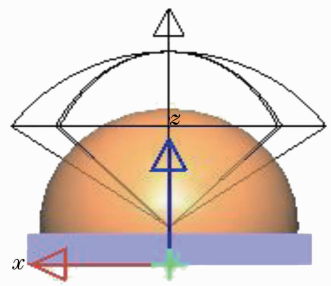


图 2 LED 模型

Fig. 2 LED model

LED 的阵列式排布虽然提高了目标面的辐照度和均匀性,但仍不能对光束进行有效整形,无法满足某些设备极细光束极高效率的要求,因此透镜的设计也是固化系统中极为重要的一个环节。在光源布局完全相同的条件下,接下来将展开两种不同透镜的设计方案,并对其效果进行仿真模拟。

由于大多数光学玻璃对紫外波段的光有较强的

吸收,所以采用对紫外光有高透射率的石英作为透镜材料。

2.2 半圆柱体透镜设计方案

用 SolidWorks 软件构建半圆柱体透镜模型,并按表 2 数据设置透镜参数,其中长度 450 mm,截面半径 20 mm,材料为石英,其折射率为 1.45845。

把初始模型导入 LightTools 软件中。其中接收面到透镜的距离设置为 100 mm,并按照上述预定的光源布局摆放和设置 UV-LED 的各项参数,运

表 2 半圆柱体透镜相关参数

Table 2 Parameter of cylinder lens

Lens type	Lens length /mm	Lens section radius /mm	Lens material	Refractive index
Semi-cylindrical lens	450	20	Quartz	1.45845

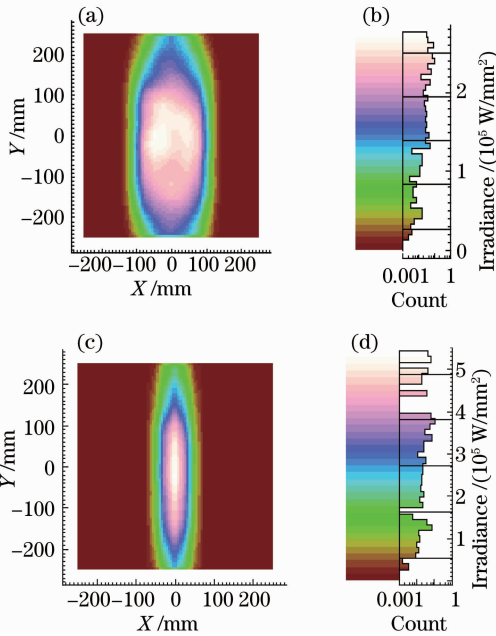


图 3 光栅图表。(a)优化前的光栅图表;

(b)优化后的光栅图表

Fig. 3 Raster chart. (a) Chart before optimization;

(b) chart after optimization

将接收面到透镜的距离设置为优化变量,添加聚焦评价函数,运行 LightTools 中的优化功能,再次得到对应的光栅图表,如图 3(c)和(d)所示。

对比优化前后的光栅图,可以发现优化前,光源的辐照度分布在横轴(-100 mm,100 mm)范围内,经过优化,光源的辐照度分布在横轴(-50 mm,50 mm)范围内,宽度比优化前缩短一半,优化后的辐照度分布明显更加集中。

为了更好地反映出光线的分布特征,查看分析菜单中照度的散射体图表,如图 4 所示。图 4 表示运行蒙特卡洛光线追迹功能后,在 X-Y 二维接

行蒙特卡洛光线追迹功能,可以在分析菜单下得到照度的光栅图表,如图 3(a)和(b)所示。图 3(a)和(c)表示在 X-Y 二维接收面上接收到的辐照度,X 和 Y 坐标均以毫米为单位,表征光斑的位置;图 3(b)和(d)对应衡量辐照度水平的柱状图,不同的颜色代表不同的辐照强度。从光栅图可以看出,光源通过半圆柱体透镜后在接收面上得到的光斑线形聚光效果不佳,照明区域宽度过大,为了达到固化的要求,还需要对系统进行优化。

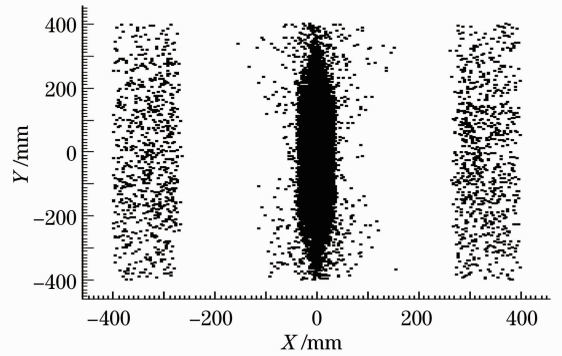


图 4 散射体图表

Fig. 4 Scatterer chart

收面上接收到的光线分布,X 和 Y 坐标均以毫米为单位,表征接收到的光线的位置,黑点越密集的地方表示接收的光线条数越多。从图 4 中可以看出,光线主要分布在三个区域,其中 $X = 0$ 附近区域光线分布最为集中。

2.3 自由曲面透镜结构设计

在成像系统中,物空间的点和像空间的点满足一一对应关系,对于自由曲面也不例外。如果知道了物点与像点的对应关系,相当于知道了入射光线和它对应的出射光线的方向和路径。根据边缘光线原理及光源的扩展度守恒原理^[6],建立光源与照明区域的拓扑关系^[7]。即通过自由曲面边缘的那部分光线,经过映射后,对应于目标的边缘,自由曲面中间连续的部分,经过映射后,也在目标中间形成连续的分佈。结合龙格-库塔法^[8]设计所需的自由曲面透镜。按照表 3 所示数据设置透镜的基本参数。

从蒋金波等^[9]提出的自由曲面 LED 路灯透镜的设计以及夏勋力等^[10]提出的矩形光场 LED 一次透镜光学设计中可以获悉,若要将 LED 的出射光设

计为矩形光场或是线形光场,自由曲面透镜的配光应类似于蝙蝠翼型^[11]。将 X 方向数据按照表 3 所示进行设置, Y 方向初始截面模型定为类蝙蝠翼配

表 3 自由曲面透镜的相关参数

Table 3 Parameter of freeform surface lens

Lens type	Lens length /mm	Lens material	Refractive index
Free-form surface lens	450	Quartz	1.45845

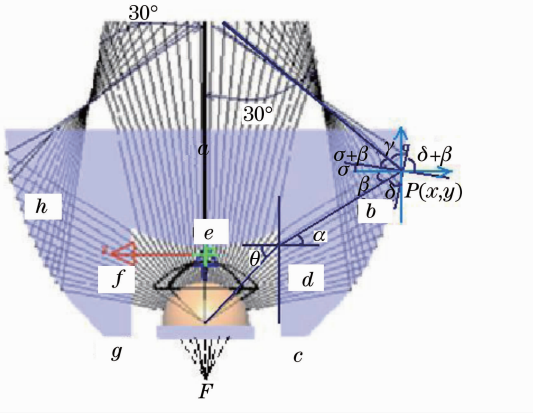


图 5 Y 方向初始截面模型

Fig. 5 Initial sectional drawing along Y direction

从图 5 中可以得出

$$\sigma + \beta + \delta = \pi/2, \quad (1)$$

以及

$$(\sigma + \beta) + \sigma + \gamma = \pi/2, \quad (2)$$

根据平行线的基本定律有:

$$\alpha = \beta, \quad (3)$$

在 P 点处有:

$$\tan(\beta + \delta) = dy/dx, \quad (4)$$

式中 dy 和 dx 为反射面 b 中 P 点处在 Y 和 X 方向的微元。

根据在 P 点位置的斯涅尔定律,有如下关系

$$\sin \theta = n \sin \alpha, \quad (5)$$

联合(1)~(5)式,通过数学模型的积分迭代法可以知道 θ 角从 30° 变化到 60° 的过程中, P 点坐标的位置以及光线的出射方向。

Y 方向截面图的配光原理如图 5 所示,从 LED 发出的中间部分的光,经自由曲面 e 进行会聚,会聚后所有输出光线的反向延长线交于一虚焦点“ F ”,这部分再经过上表面 a 之后,分布在角度 $\pm 30^\circ$ 之内。剩下从 LED 发出的往侧面部分的光,则由侧面的全反射面 b, h 进行配光。经入射面 f, d 入射到外侧全反射面 b, h 的光线,再经过上面的输出面 a 折射之后,这部分光也分布均匀在 $\pm 30^\circ$ 之内^[12]。

虽然 Y 截面可以将朗伯型光源 LED 原来 $\pm 60^\circ$ 的散角集中到 $\pm 30^\circ$ 以内,但仍然无法很好地满足

光的透镜结构,如图 5 所示。透镜由 8 个面组成,其中 a, d, f 为全透射平面, b, c, g, h 为全反射面, e 为自由曲面。

固化所需光束的要求,接下来再次对透镜模型进行优化,在上表面 a 添加自由曲面,并将 d, f 优化为自由曲面,此时运行光线追迹功能,在距离透镜底端 100 mm 的接收面得到了非常理想的会聚光斑,如图 6 所示。

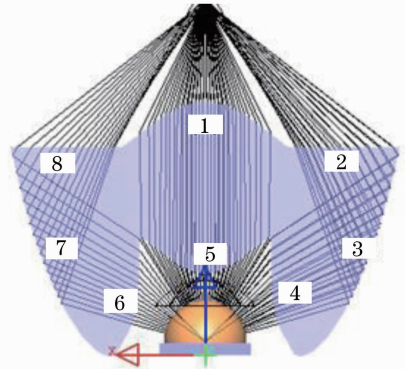


图 6 优化后 Y 方向的透镜截面图

Fig. 6 Sectional drawing along Y direction after optimization

图 6 表示经过再次优化后 Y 方向的透镜截面图,曲面 1、4、5、6 为自由曲面部分,曲面 3、7 为全反射面,2、8 为全透射平面。透镜整体高度为 25 mm,根据边缘光线原理和斯涅尔折射定律,可以得到曲面 1 在和曲面 2 接触处的切线与对称轴夹角为 $48^\circ 52'$,曲面 3 在和曲面 2 接触处的切线与水平线的夹角为 $77^\circ 53'$,曲面 3 在和曲面 4 接触处的切线与水平线的夹角为 0.11° ,曲面 5 在和曲面 4 接触处的切线与对称轴的夹角为 $52^\circ 66'$ 。

将其中的自由曲面的曲率设置为变量,并添加相应的评价函数,执行优化功能后得到透镜的三维立体形状如图 7 所示。

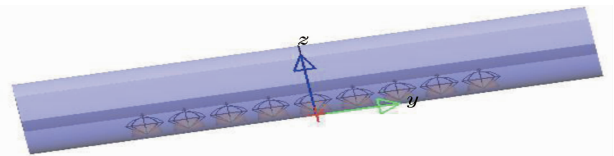


图 7 整体透镜形状

Fig. 7 Overall shape of lens

接下来在图 7 透镜形状的基础上,按照半圆柱

体透镜设计方案中的光源布局,将 UV-LED 放置于透镜下方的凹槽中,并将 UV-LED 的所有参数设置的和半圆柱体透镜设计方案一致。在执行光线追迹功能之后,查看分析菜单下的照度的光栅图表,如图 8 所示。

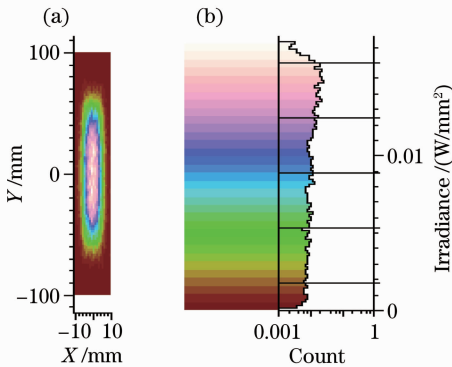


图 8 光栅图表

Fig. 8 Raster chart

图 8(a)表示在 X-Y 二维接收面上接收到的辐照度,图 8(b)对应衡量辐照度水平的柱状图,不同的颜色代表不同的辐照强度。从图中可以看出辐照度分布在横轴(-5 mm, 5 mm)范围内,光线分布十分集中。

为了便于和半圆柱体透镜设计方案进行对比,再次生成照度的散射体图表,如图 9 所示。

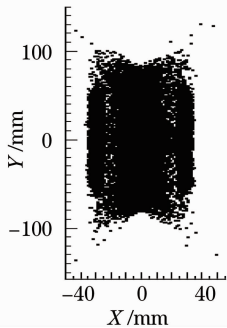


图 9 散射体图表

Fig. 9 Scatterer chart

图 9 表示运行蒙特卡洛光线^[10]追迹功能后,在 X-Y 二维接收面上接收到的光线分布,黑点越密集的地方表示到达的光线条数越多。从图 9 中可以看出所有光线基本都分布在横轴(-30 mm, 30 mm)的范围内,相对来说分布非常均匀。

3 结果分析

在紫外固化的过程中,若要实现快速固化,必须保证高的辐照强度和高的光场均匀度。在光源功率给定的情况下,必须尽可能地使更多的光线得到有效

的利用,且会聚后的光束越细,其辐照强度也会越高。

从图 3(b)可以看出 UV-LED 的光线经过半圆柱体透镜后其辐照度分布在 60 mm 的范围之内,能量分布不够集中;由图 8 中的光栅图表可以看出完全相同的 UV-LED 发出的光线经过自由曲面透镜后,其辐照度分布在 10 mm 左右的狭小区域内,能量集中,相比半圆柱体透镜其会聚效果更好。

接下来将图 4 中的散射体图表与图 9 进行对比,从图 4 中可以看出出射光线主要集中在三个区域,在横轴上 $X=0$ 附近集中的光线比较多,其他两个区域的光线条数相对较少;从图 9 中不难发现几乎所有的光线都集中在了横轴 $X=0$ 附近的区域,且从整体来看,整个光斑也更加均匀和规则。

以上对比可以清楚地看出采用自由曲面透镜^[13-16]的设计方案比采用半圆柱体透镜设计方案更加优越,自由曲面透镜的设计方案的辐照度分布更加集中,光场的均匀性分布也更好,也更加接近于线光源的分布。所以如果采用自由曲面透镜的设计方案的话,作为紫外固化的光源将极大地提高能量的利用率,因而可以更好地改善固化的效果,使固化速度得到提高。

4 结 论

讨论了在紫外固化系统中两种不同的光学设计方法,通过机械设计软件 SolidWorks 构建透镜模型,导入到光学优化软件 LightTools 中对光线进行蒙特卡洛光线追迹模拟。根据边缘光线原理及光源的扩展度守恒原理,建立光源与照明区域的拓扑关系,得到初级透镜模型,在此基础上添加评价函数,对聚光效果不断进行优化,以获得更好的光束分布。并在分析菜单下得到辐照度的光栅图表及散射体图表,通过对比证明了自由曲面透镜设计方案的优越性。本文的目的在于给出一种自由曲面透镜的设计方法,将 UV-LED 的出射光更好地会聚为线形光,最大限度地满足光场均匀度和能量利用率对于固化的要求。当然对于这一设计方法美中不足的是,自由曲面的高精度加工比半圆柱体透镜的加工要复杂和困难的多,但是随着计算机控制光学表面成型技术的不断发展,以及自由曲面透镜误差修正加工算法的不断优化,自由曲面透镜的快速成型将成为可能。

参 考 文 献

- Li Lin, Wang Guangzhen, Wang Lili, *et al.*. Achieve uniform illumination LED system design approach [J]. Acta Optical Sinica, 2012, 32(2): 0222002.

- 李 林, 王光珍, 王丽莉, 等. 实现均匀照明的 LED 系统设计方法[J]. 光学学报, 2012, 32(2): 022202.
- 2 Zhang Hang, Liang Xue, Yan Jinhua, *et al.*. LED collimator design method of simultaneous multi-compound parabolic surface [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.
- 3 Li Yun, Xing Tingwen. Using non-uniform rational B-spline surfaces extend optics surface type error [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(7): 0722001.
- 李 云, 邢廷文. 采用非均匀有理 B 样条曲面延展光学元件面形误差[J]. 光学学报, 2012, 32(7): 0722001.
- 4 Xu Wenhai, Zhao Huan, Lu Yongjun. Design of an optical system for UV curing source with LED array [J]. Optical and Precision Engineering, 2007, 15(7): 1032–1037.
- 许文海, 赵 欢, 芦永军. LED 阵列式紫外固化光源光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2007, 15(7): 1032–1037.
- 5 Xie Jun, You Lide, Hou Wenjie, *et al.*. The research of a novel light-curing rapid prototyping equipment [J]. Mechanical Science and Technology, 2010, 29(1): 28–31.
- 谢 军, 游立德, 候文杰, 等. 一种新颖的光固化快速成形设备开发研究[J]. 机械科学与技术, 2010, 29(1): 28–31.
- 6 Wang Shaohui, Sun Quanshe, Huanggang. Research on the modulation characteristic of UV LED [J]. Modern Electronics Technique, 2013, 36(21): 15–17.
- 王少水, 孙权社, 黄 刚. 紫外 LED 调制特性研究[J]. 现代电子技术, 2013, 36(21): 15–17.
- 7 Jiang Jinbo, Du Xue, Li Rongbin. Optical design of freeform lens for LED street light [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2008, 19(4): 60–65.
- 蒋金波, 杜 雪, 李荣彬. LED 路灯透镜的二次光学设计介绍[J]. 照明工程学报, 2008, 19(4): 60–65.
- 8 Ching-Cherng Sun, Tsung-Xian Lee, Shih-Hsin 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.
- 9 Jiang Jinbo, To Sandy, Lee W B. Optical design of freeform lens for LED streetlight [J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2008, 23(5): 589–594.
- 蒋金波, 杜 雪, 李荣彬. 自由曲面的 LED 路灯透镜的设计[J]. 液晶与显示, 2008, 23(5): 589–594.
- 10 Xia Xunli, Yu Binhai, Liang Lifang. Design of LED lens for rectangular light field [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2010, 31(5): 690–693.
- 夏勋力, 余彬海, 梁丽芳. 矩形光场 LED 一次透镜光学设计[J]. 光电器件, 2010, 31(5): 690–693.
- 11 Liu Zhengquan, Sun Yaojie, Lin Yandan. Freeform reflector design for rectangular illuminance distribution based on differential geometry [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1022006.
- 刘正权, 孙耀杰, 林燕丹. 基于微分几何的矩形照度分布自由曲面反射器设计[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1022006.
- 12 Xin Di, Liu Hua, Lu Zhenwu, *et al.*. Optical design of the LED illumination system with adjustable view angle [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0522003.
- 辛 迪, 刘 华, 卢振武, 等. 可变视场角 LED 照明光学系统设计[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0522003.
- 13 Ding Deqiang, Ke Xizheng. Research on generalized mathematic radiation model for white LED [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2536–2540.
- 丁德强, 柯熙政. 一种通用白光 LED 数学发光模型研究[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2536–2540.
- 14 Sun Xutao, Zheng Zhenrong, Liu Xu, *et al.*. Etendue analysis and measurement of light source with elliptical reflector [J]. Displays, 2006, 27(2): 56–61.
- 15 Xia Xunli, Yu Binhai, Mai Zhenqiang. Design on approximate Lambertian LED opto lens configuration [J]. Electro-Optic Technology Application, 2010, 25(1): 22–25.
- 夏勋力, 余彬海, 麦镇强. 近朗伯光型 LED 透镜的光学设计[J]. 光电技术应用, 2010, 25(1): 22–25.
- 16 Hao Xiang, Zheng Zhenrong, Liu Xu, *et al.*. Freeform surface lens design for uniform illumination [J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2008, 10(7): 075005.

栏目编辑: 韩 峰