

基于新型 LED 准直系统的自由曲面均匀照明设计

朱民, 楼俊, 潘玉珏, 谢成宝

中国计量大学光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018

摘要 根据非成像光学理论,提出了一种基于准直系统的自由曲面设计方法。以几何光学为理论基础,设计了一种关于中心轴旋转对称的新型发光二极管(LED)准直系统。准直系统的集光角约为 236° ,出射光半发光角度小于 1° 。基于几何光学和能量守恒定律,在准直系统的出射平面上设计了自由曲面,并给出了“多对一”的能量拓扑关系和均匀矩形光斑的照明设计方法。借助 Matlab 软件,对自由曲面的面型数据进行求解,并在曲线曲面的非均匀有理 B 样条(NURBS)曲面的理论上,采用 SolidWorks 软件搭建模型,并通过光学设计软件 LightTools 进行模拟分析。仿真结果表明:新型准直系统能够实现大角度光线的准直,基于准直系统的自由曲面设计方法实现了均匀的矩形光斑。

关键词 光学设计; 非成像光学; 自由曲面; 发光二极管准直系统

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0422002

Design of Freeform Surface with Uniform Illumination Based on New LED Collimation System

Zhu Min, Lou Jun, Pan Yujue, Xie Chengbao

College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

Abstract According to the non-imaging optics theory, a freeform surface design method based on collimation system is proposed. With the geometrical optics as the theoretical foundation, a new type of light-emitting diode (LED) collimation system is designed based on the rotational symmetry of the central axis. The light collecting angle of the collimating system is about 236° , and the semi-luminous angle of the emitted light is less than 1° . Based on geometrical optics and the law of energy conservation, a freeform surface is designed on the exit plane of the collimating system. The ‘many-to-one’ topological relation of energy and the illumination design method of uniform rectangular spot are presented. The surface data of freeform surface is solved by Matlab software. The model of this surface is built on the basis of non-uniform rational B-splines (NURBS) surface theory by SolidWorks software. Simulation analysis is carried out by LightTools software of optical design. The simulation results show that the new collimating system can collimate the light of large angle, and the design method of the freeform surface based on the collimating system can achieve uniform light spot of rectangle.

Key words optical design; non-imaging optics; freeform surface; light-emitting diode collimating system

OCIS codes 220.4298; 220.3620; 220.2945

1 引 言

作为第 4 代光源,发光二极管(LED)光源与传统的白炽灯、荧光灯等照明光源相比,具有电光效率高、耗电量低、寿命长、体积小、环保等优势。以 LED 作为光源的自由曲面照明设计是非成像光学

研究的热点和难点,具有极高的设计自由度,被广泛应用于圆形均匀照明、投影系统中的矩形照明、汽车照明、道路照明和光刻离轴照明等^[1-9]。Schruben 等^[1]于 1974 年提出常微分方程(ODE)方法,设计了一种能在给定目标面实现预定圆形照明的自由曲面透镜,但该方法只适用于旋转对称结构的照明问

收稿日期: 2017-10-12; 收到修改稿日期: 2017-11-27

基金项目: 浙江省自然科学基金(LY18F050008)

作者简介: 朱民(1992—),女,硕士研究生,主要从事 LED 照明方面的研究。E-mail: zhumi92@163.com

导师简介: 楼俊(1979—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事光学照明及光电检测方面的研究。

E-mail: loujun@cjl.u.edu.cn(通信联系人)

题。Ding 等^[2]于 2008 年提出了一种面向点光源的基于一阶偏微分方程组的自由曲面设计方法,通过数值求解自由曲面的方程组来获得自由曲面的离散面型数据,但曲面连续性不佳,需借助离散子面拼接构建自由曲面,才能获得矩形均匀照明光斑。Wu 等^[3]于 2012 年提出了一种优化设计方法,以自由曲面的离散控制点为优化变量,以目标面上实际光线落点与预设值之间的偏差为评价函数进行优化,最终实现矩形均匀照明,但设计优化的时间长,计算编程比较困难。刘正权等^[4]于 2012 年提出了一种基于微分几何的矩形照度分布自由曲面反射器的设计方法,通过推导方程、数值计算和软件仿真,在被照面上基本实现了矩形的照度分布,但被照面的照度分布不均匀,对角线上照度呈现峰值,不利于实际应用。

本文结合自由曲面和反射/全反射准直的设计方法,设计了一种新型 LED 准直系统。所提方法具有较好的准直效果,集光角可达到 236°。对于出射面准直光线的分布不均匀,无法实现特定照明要求的问题,本文根据几何光学、能量守恒定律和设计要求,推导出了柱坐标系下的自由曲面方程,并给出了具体的准直系统出射平面和目标照明面之间的能量拓扑关系,再利用 Matlab 软件编写程序解出自由曲面面型数据。最后,将 SolidWorks 软件建好的实体模型导入到光学设计软件 LightTools 中进行仿真,在目标照明面上实现了均匀矩形照度分布。该设计获得的自由曲面连续性好,无需进行优化设计,设计难度低。

2 设计原理

2.1 准直系统的设计过程

本文设计的新型 LED 准直系统为旋转对称的系统,其剖面结构如图 1 所示。设计中将 LED 视为点光源,位于抛物面的焦点,集光角约为 236°,不但可以实现一般的发光角度小于 180°的 LED 出射光线的准直,而且可以准直发光角度约 236°的广角免封装芯片发出的光线。整个准直系统包括两个部分:反射面和特殊的圆锥透镜,准直系统的这两部分可通过注塑技术制作为一个整体,再在反射面部分镀上反光材料;也可将这两部分分开制作,再进行组合。其中,反射面的剖面为抛物线,左半部分抛物线的对称轴与 x 轴夹角为 30°,将左半部分的抛物线绕中心对称轴旋转一周即为完整的反射面;特殊的圆锥透镜的剖面近似为一个等边三角形,但与一般

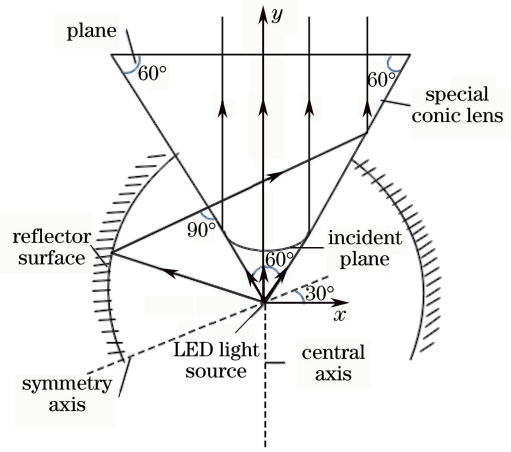


图 1 新型 LED 准直系统的剖视图

Fig. 1 Section view of new LED collimation system

圆锥透镜不同的是,其顶点被自由曲面入射面所截。

当光源发出的光线与 y 轴正方向的夹角小于等于 30°时,采用自由曲面的设计方法进行准直^[10-11]。自由曲面入射面的设计过程如图 2 所示。入射光线经自由曲面出射,到达照明面。入射光线、出射光线和自由曲面法矢量分别为 \mathbf{I} 、 \mathbf{O} 和 \mathbf{N} 。自由曲面上的任意一点满足矢量形式的折射定律,即

$$n_o \mathbf{O} - n_i \mathbf{I} = [n_o^2 + n_i^2 - 2n_o n_i (\mathbf{O} \cdot \mathbf{I})]^{\frac{1}{2}} \times \mathbf{N}, \quad (1)$$

式中, n_i 和 n_o 分别为入射光线和出射光线所处介质的折射率,特殊圆锥透镜的材料为聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),故 $n_i = 1, n_o = 1.49$ 。根据实际意义有 $\mathbf{O} = [0, 1], \mathbf{I} = [\sin \alpha, \cos \alpha]$,其中, α 为入射光线法矢量 \mathbf{I} 与 y 轴的正方向的夹角,且 $\alpha \in [0^\circ, 30^\circ]$ 。

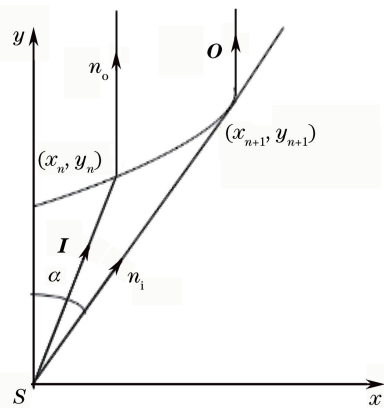


图 2 自由曲面入射面的设计过程

Fig. 2 Design process of incident plane of freeform surface

如图 2 所示,当点 (x_n, y_n) 与点 (x_{n+1}, y_{n+1}) 之间的距离很小时,两入射光线法向量的夹角 $\Delta\alpha = \alpha_{n+1} - \alpha_n$ 很小,点 (x_{n+1}, y_{n+1}) 处切线的斜率可以近似表示为

$$k = \frac{y_{n+1} - y_n}{x_{n+1} - x_n} \quad (2)$$

根据(1)~(2)式可以求出 $\mathbf{N} = (N_x, N_y)$, 则点 (x_{n+1}, y_{n+1}) 处切线的斜率亦可表示为

$$k = -N_x / N_y \quad (3)$$

根据几何关系和(3)式, 点 (x_{n+1}, y_{n+1}) 可以表示为

$$\begin{cases} x_{n+1} = y_{n+1} \tan \alpha_{n+1} \\ y_{n+1} = \frac{y_n - kx_n}{1 - k \tan \alpha_{n+1}} \end{cases} \quad (4)$$

给出初值 (x_0, y_0) 和 $\Delta\alpha$, 根据(3)~(4)式, 通过迭代可求出任意点 (x_n, y_n) 的坐标, 即可求出旋转对称式的自由曲面入射面。

如图 3 所示的是利用 Matlab 软件经 5000 次迭代所得的自由曲面入射面的轮廓数据。因自由曲面为旋转对称曲面, 故先将图 3 所示数据导入到 SolidWorks 软件拟合为曲线, 再绕 y 轴旋转一周即可得到完整的自由曲面。

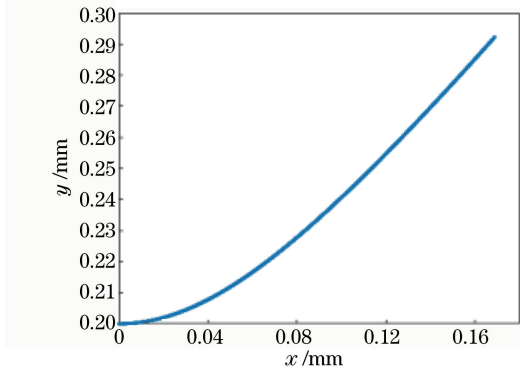


图 3 自由曲面入射面的坐标点

Fig. 3 Coordinate points of incident surface of freeform surface

当光源发出的光线与 y 轴正方向的夹角大于 30° 且小于 118° 时, 需先经过反射面反射, 然后垂直于特殊的圆锥透镜的母线入射到透镜, 最后经过全反射, 以准直光的形式出射。反射面为抛物线的一部分绕中心对称轴旋转所得, 极坐标下的表达式为

$$\rho = \frac{10}{1 - \cos\left(\theta - \frac{\pi}{6}\right)} \quad (5)$$

如图 4 所示, 利用 Matlab 软件计算(5)式得到 5000 个抛物线数据, 将其导入到 SolidWorks 软件拟合并旋转得到完整的反射面。根据上述内容, 利用 Matlab 软件编程计算得到相应的数据, 再利用 SolidWorks 软件设计出新型 LED 准直系统。系统的最大直径为 20 mm, 高度为 19.82 mm, 如图 5 所示。

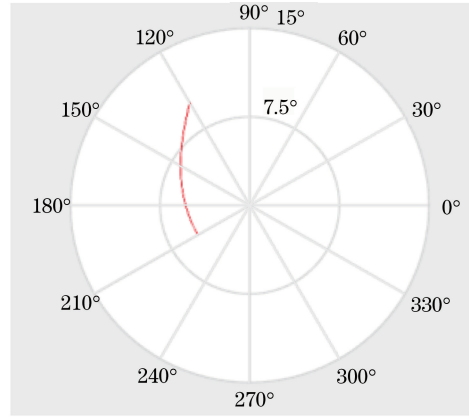


图 4 反射面的坐标数据

Fig. 4 Coordinate data of reflector

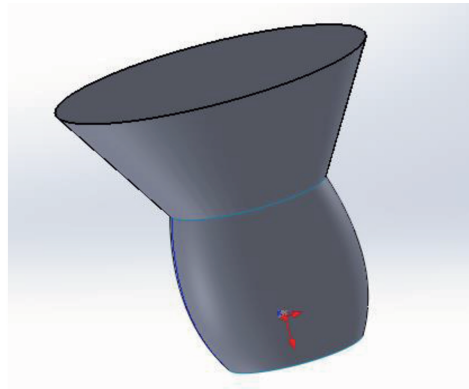


图 5 准直系统实体模型

Fig. 5 Entity model of the collimation system

2.2 自由曲面的设计过程

准直系统的出射光即为自由曲面的入射光, 强度分布为圆对称结构。本文在新型 LED 准直系统的出射面上, 根据照明要求, 设计了一个自由曲面, 自由曲面的口径与准直系统的口径一致。为简化自由曲面的设计过程, 选取柱坐标系来表示自由曲面, 并根据矢量形式的折射定律和能量守恒定律确定了自由曲面的面型。如图 6 所示, 在空间柱坐标系下, 光源位于原点 O 。入射光束与 z 轴平行, 单位方向矢量为 $\mathbf{I}_i = [0, 0, 1]$ 。自由曲面上的任意一点 P , 在 xOy 平面的投影与原点之间的距离为 r , 投影点与原点的连线关于 x 轴正方向的夹角为 φ 。光线经自由曲面上任意一点 $P[r, \varphi, z(r, \varphi)]$ 折射后, 照射到目标面上点 $T(t_x, t_y, t_z)$ 位置, 出射光矢量用 $\mathbf{O}_f = \frac{(t_x - P_x, t_y - P_y, t_z - P_z)}{\sqrt{(t_x - P_x)^2 + (t_y - P_y)^2 + (t_z - P_z)^2}}$ 表示。 P 点的位置矢量为 $\mathbf{P} = [r \cos \varphi, r \sin \varphi, z(r, \varphi)]$, P 点的单位法矢量为 $\mathbf{N}_f = \frac{\mathbf{P}_r \times \mathbf{P}_\varphi}{|\mathbf{P}_r \times \mathbf{P}_\varphi|}$, 将上述各矢量代入(1)式并整理得

$$\begin{cases} z_r(r, \varphi) = -\frac{n_{of}[(t_x - P_x)\cos\varphi + (t_y - P_y)\sin\varphi]}{n_{of}(t_z - P_z) - n_{if}\sqrt{(t_x - P_x)^2 + (t_y - P_y)^2 + (t_z - P_z)^2}} \\ z_\varphi(r, \varphi) = \frac{n_{of}r[(t_x - P_x)\sin\varphi - (t_y - P_y)\cos\varphi]}{n_{of}(t_z - P_z) - n_{if}\sqrt{(t_x - P_x)^2 + (t_y - P_y)^2 + (t_z - P_z)^2}} \end{cases}, \quad (6)$$

式中 n_{if} 和 n_{of} 分别为入射光线和出射光线所处介质的折射率,自由曲面透镜的材料为 PMMA,故 $n_{if}=1.49, n_{of}=1$ 。

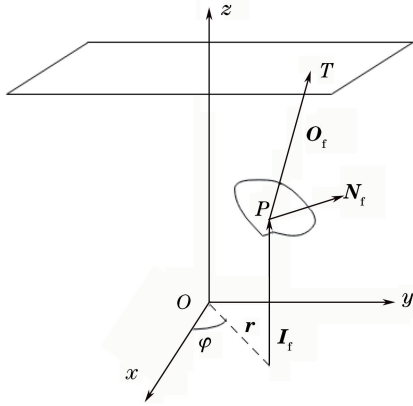


图 6 柱坐标系下自由曲面与光线的关系

Fig. 6 Relationship between freeform surface and the light beam in cylindrical coordinate

2.3 自由曲面的边界条件

根据准直系统出射面微元与目标照明面微元之间的对应关系推出“多对一”的能量拓扑关系。在无能量损失的情况下,根据能量守恒定律可知

$$\iint_{S_i} I_{fi} ds = \iint_T E dt, \quad (7)$$

式中, E 为照明面 T 上的照度分布, I_{fi} 为准直系统出射面 S_i 内的出射光强。

具体地,如图 7(a)所示,准直系统的出射面与目标照明面之间“多对一”的能量拓扑关系。准直系统出射面的光线为圆对称的,在圆形出射面上建立直角坐标系,将出射面划分为 i 份, S_i 为圆环(当内半径等于零时,为中心圆),每个 S_i 内的光线入射到整个目标照明面 T ,对应的出射光强为 I_{fi} 。根据边缘光线原理, S_i 的内环光线对应到 T 的中心, S_i 的外环光线对应到 T 的边界。为保证曲面的连续性,将 S_{i+1} 的内环光线对应到 T 的边界, S_{i+1} 的外环光线对应到 T 的中心。 S_i 的外半径为 R_i ,内半径为 R_{i-1} ,将 $\Delta r = R_i - R_{i-1}$ 分成 j 份。目标照明面的长为 $2t_{xm}$ 、宽为 $2t_{ym}$ 。与圆形和环形光斑不同,矩形光斑非旋转对称,但为轴对称图形,先考虑第一象限内的情况,再通过轴对称即可。如图 7(b)所示,第一象限内目标面矩形光斑半长和宽分别为 $2t_{xm}$ 和

$2t_{ym}$,将其分成 j 份。 β 为 S_i 内任意一点和原点的连线与 x 轴正方向的夹角,将其分成 k 份。对于 S_i ,根据(7)式有

$$\begin{cases} t_x(j) = t_{xm} \sqrt{\frac{r_i(j)^2 - R_{i-1}^2}{R_i^2 - R_{i-1}^2}} \\ t_y(j) = t_{ym} \sqrt{\frac{r_i(j)^2 - R_{i-1}^2}{R_i^2 - R_{i-1}^2}} \end{cases} \quad \beta = \frac{\pi}{4}, \quad (8)$$

$$\begin{cases} t_x(j) = t_{xm} \sqrt{\frac{r_i(j)^2 - R_{i-1}^2}{R_i^2 - R_{i-1}^2}} \\ t_y(k) = \frac{4\beta(k)}{\pi} t_{ym} \sqrt{\frac{r_i(j)^2 - R_{i-1}^2}{R_i^2 - R_{i-1}^2}} \end{cases} \quad 0 \leq \beta < \frac{\pi}{4}, \quad (9)$$

$$\begin{cases} t_x(k) = \left[2 - \frac{4\beta(k)}{\pi}\right] \times \\ t_{xm} \sqrt{\frac{r_i(j)^2 - R_{i-1}^2}{R_i^2 - R_{i-1}^2}} \\ t_y(j) = t_{ym} \sqrt{\frac{r_i(j)^2 - R_{i-1}^2}{R_i^2 - R_{i-1}^2}} \end{cases} \quad \frac{\pi}{4} < \beta \leq \frac{\pi}{2}, \quad (10)$$

式中 $\beta(k) = kh_\beta, h_\beta$ 为步长。

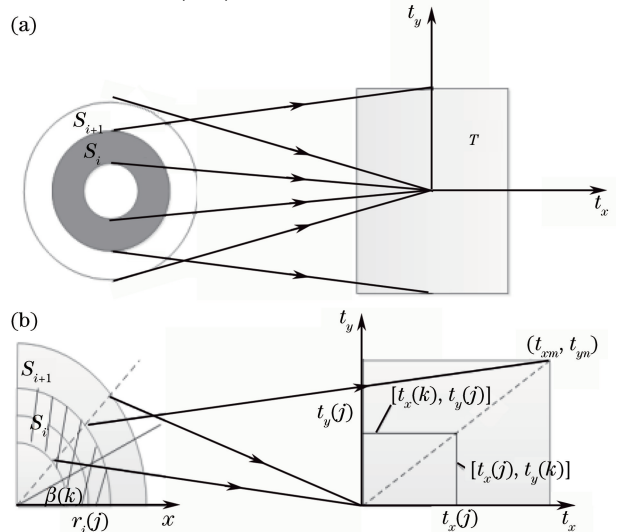


图 7 能量拓扑关系图。(a)均匀矩形光斑能量拓扑关系图;

(b)第一象限内均匀矩形光斑下的能量拓扑关系图

Fig. 7 Topological relation of energy. (a) Topological relation of energy under uniform rectangular spot;

(b) topological relation of energy under uniform rectangular spot in the first quadrant

3 仿真与分析

3.1 准直系统的光学仿真与分析

将图 5 所示的准直系统导入 LightTools 软件进行光学仿真与分析,得到光线追迹图 8(a)、光强分布曲线图 8(b)和照度分布图 8(c)。结果显示,准直系统的出射光半发光角度小于 1° ,能量利用率为 99.975%,但接收面上光斑不均匀,中心照度高。

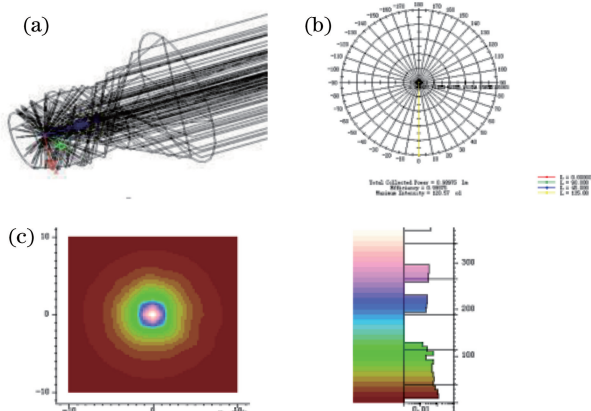


图 8 (a)光线追迹模拟图;
(b)光强分布曲线图; (c)照度分布图
Fig. 8 (a) Diagram of ray tracing simulation;
(b) curve of light intensity distribution;
(c) diagram of illumination distribution

3.2 自由曲面的仿真与分析

给定初值,在边界条件(8)~(10)式下,采用差分法求解(6)式^[12]。在 Matlab 软件中对方程进行编程求解,得到第一象限内自由曲面的面型数据,如图 9 所示;再利用 SolidWorks 软件进行建模,得到

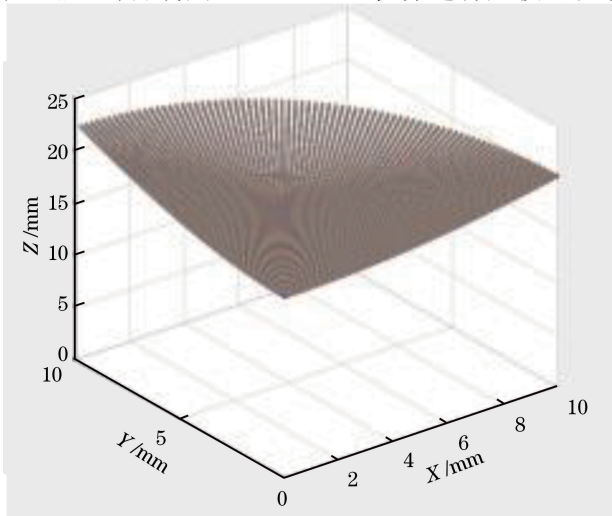


图 9 第一象限内自由曲面的坐标数据
Fig. 9 Coordinate data of freeform surface in the first quadrant

的自由曲面实体透镜如图 10 所示;最后将其导入 LightTools 软件进行光学仿真与分析,得到光线追迹图 11 和照度分布图 12。目标面的照度分布呈均匀矩形,纵向均匀度约为 88%,横向均匀度约为 92%。此外,目标面矩形光斑 4 个直角出现一定的钝化,主要是因为差分法解方程存在误差;目标面中心纵向边缘均匀度不高,主要是因为 SolidWorks 软件进行曲面拟合时引入了误差。在实际装配时,可将抛物反射面、圆锥透镜和自由曲面透镜利用注塑技术制作作为一个整体;也可单独制作自由曲面透镜,再利用镜框固定。对于不同的准直系统,不同的照明要求,可设计出不同的自由曲面透镜,然后,在准直系统上更换不同的自由曲面透镜就可实现不同的照明效果。

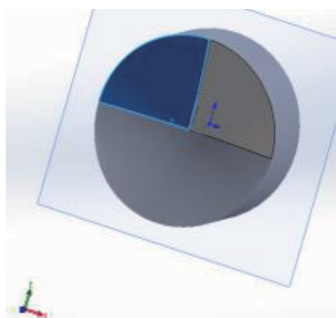


图 10 自由曲面的实体模型
Fig. 10 Entity model of freeform surface

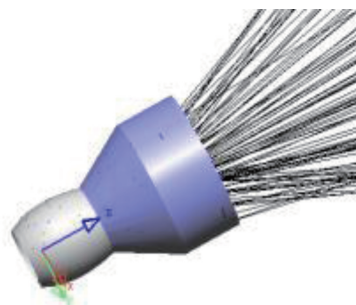


图 11 光线追迹模拟图
Fig. 11 Diagram of ray tracing simulation

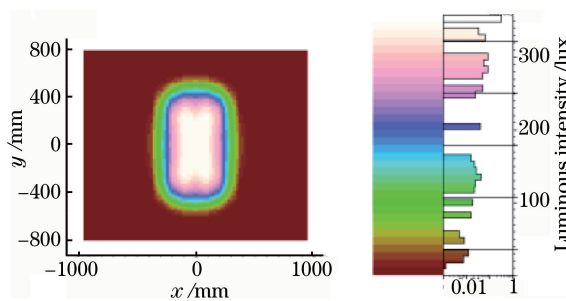


图 12 照度分布图
Fig. 12 Diagram of luminous intensity distribution

4 结 论

基于几何光学理论和能量守恒定律,提出了一种基于准直系统的自由曲面设计方法。与现有的准直系统相比,该新型 LED 准直系统具有更大集光角和更好的准直性。在准直系统的出射面设计自由曲面透镜的过程无需优化,照明面上矩形光斑的均匀度和系统的能量利用率相比于现有的系统均有所提高。对于不同的准直系统和照明需求,更换不同的自由曲面透镜即可,该自由曲面透镜的利用率高,适用范围广。

参 考 文 献

- [1] Schruben J S. Analysis of rotationally symmetric reflectors for illuminating systems[J]. Journal of the Optical Society of America, 1974, 64(1): 55-58.
- [2] Ding Y, Liu X, Zheng Z R, *et al.* Freeform LED lens for uniform illumination[J]. Optics Express, 2008, 16(17): 12958-12966.
- [3] Wu R, Zheng Z, Li H, *et al.* Optimization design of irradiance array for LED uniform rectangular illumination[J]. Applied Optics, 2012, 51(13): 2257-2263.
- [4] Liu Z Q, Sun Y J, Lin Y D. Freeform reflector design for rectangular illumination 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.
- [5] He Z H, Dong Q M, Wang S L, *et al.* LED freeform lens design for street uniform illumination[J]. China illuminating Engineering Journal, 2014, 25(4): 85-89.
贺志华, 董前民, 王少雷, 等. 用于道路均匀照明的 LED 自由曲面透镜设计[J]. 照明工程学报, 2014, 25(4): 85-89.
- [6] Cvetkovic A, Dross O, Chaves J, *et al.* Etendue-preserving mixing and projection optics for high-luminance LEDs, applied to automotive headlamps[J]. Optics Express, 2006, 14(26): 13014-13020.
- [7] Xing S S, Wu R M, Li H F, *et al.* Freeform-surface design of off-axis illumination in projection lithography[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(3): 0322002.
邢莎莎, 吴仍茂, 李海峰, 等. 应用于投影光刻离轴照明的自由曲面设计[J]. 光学学报, 2011, 31(3): 0322002.
- [8] Zeng D, Peng D S, Jiang Y. LED freeform lens design for roundabout crossing illumination[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(7): 072202.
曾丹, 彭冬生, 蒋月. 用于环形交叉路口照明的 LED 自由曲面透镜设计[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(7): 072202.
- [9] Pan H, Chen G Q, Du B J. Design of double freeform surface lens for LED uniform illumination based on cubic splines[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(3): 032201.
潘浩, 陈国庆, 杜伯钧. 基于三次样条的双自由曲面 LED 匀光透镜设计[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(3): 032201.
- [10] Chen J J, Wang T Y, Huang K L, *et al.* Freeform lens design for LED collimating illumination[J]. Optics Express, 2012, 20(10): 10984-10995.
- [11] Zhao H, Li C G, Chen Z T, *et al.* Design of collimating lens with uniform illumination for LED based on double freeform surface[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(4): 0422001.
赵欢, 李长庚, 陈志涛, 等. 基于双自由曲面的 LED 均匀照明准直透镜设计[J]. 光学学报, 2017, 37(4): 0422001.
- [12] John H, Kurtis D. Numerical methods using Matlab[M]. Zhou L, Chen Y, Qian F, *et al.*, Transl. 4th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 376-387.
约翰, 柯蒂斯. 数值方法(Matlab 版)[M]. 周璐, 陈瑜, 钱方, 等, 译. 4 版. 北京: 电子工业出版社, 2005: 376-387.