

与 LED 发光面平行平面上多向准直光束的研究

程治明¹ 曾平¹ 张志海¹ 胡燕²

(¹ 中节能晶和照明有限公司, 江西 南昌 330029)
² 鹰潭市第一中学, 江西 鹰潭 335000)

摘要 提出发光二极管(LED)多向准直透镜的设计方法,利用多个自由曲面的全反射实现多向准直。基于 LED 的朗伯型配光展开研究,采用光学透镜配光,运用 Matlab 软件进行数值计算,得到自由曲面上的多个点坐标值,结合 3D 软件及 TracePro 设计出多向准直透镜。所得多向准直光束在同一个平面,该平面与 LED 发光面平行,各准直光束发散角均仅约 3°。

关键词 几何光学;发光二极管;透镜;配光;多向准直

中图分类号 TN312+.8 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1008001

Research on Multi-Direction Collimation Beam on the Plane Parallel with LED Lighting Plane

Cheng Zhiming¹ Zeng Ping¹ Zhang Zhihai¹ Hu Yan²

(¹ China Energy Conservation and Environmental Protection Group Latticelighting Co., Ltd.,
Nanchang, Jiangxi 330029, China
² Yingtan First Middle School, Yingtan, Jiangxi 335000, China)

Abstract Multi-direction collimation lens based on light emitting diode (LED) is proposed, the total internal reflection multi-freeform surface is employed to realize multi-direction collimation. Lambert type light distribution of LED is researched, and lens are used to change the light distribution. The coordinate value of points on freeform surface is calculated by Matlab software. Combined with the 3D software and TracePro software, multi-direction collimation lens are designed. Multi-direction collimation beams are in the same plane which is parallel with the light-emitting plane of LED. Each divergence angle of collimation beam is merely 3°.

Key words geometric optics; light emitting diode; lens; light distribution; multi-direction collimation

OCIS codes 080.2740; 080.2720; 080.3630

1 引 言

经过三十多年的飞速发展,发光二极管(LED)作为固态光源,凭借体积小、光效高、寿命长、耐振动、易调光、可靠性高等固有优点^[1-2],广泛应用于各大领域,如室内及户外照明、信号指示灯、显示屏、背光源^[3]等,单色 LED 甚至被用来作为贝塞尔光束与激光作比较^[4]。LED 的空间光强近似朗伯型分布,被照明面上的照度会随出射角度的增大迅速减小,使得 LED 直接用于照明时即做不好大面积照明也不能完成小区域的局域照明,直接用于照明需要

将 LED 进行阵列^[5]。LED 用作信号灯、指示灯、手电、舞台灯^[6]等这些需要小角度高强度照明的灯具时需要特殊的光学系统将光束准直。准直光学系统可以把 LED 发出的光集中在一个较小的立体角内出射,可大幅度提高光能量密度和光利用率,准直后光束局域照明能力增强,增加照明距离,LED 的准直研究具有极其广阔的前景。

近年来国内外研究人员都对 LED 准直展开了大量研究。2013 年,Ge 等^[7]将非球面反射器、复合透镜、凹透镜等融合为一个整体,形成复合光学系

收稿日期: 2014-05-29; 收到修改稿日期: 2014-06-05

基金项目: 国家 863 计划(2013AA03A105)

作者简介: 程治明(1987—),男,硕士,工程师,主要从事 LED 配光设计方面的研究。E-mail: tkgg_8795@sina.com

统,把 7.6 W 的 LED 光准直后传播到 25 m 仍有较高照度。LED 光学系统的设计方法主要是经验法和数值法^[8-11];经验法是设计者根据经验在 3D 软件中建模后用光学软件分析;数值法是通过解方程等方法得到建模所需数据,然后再建模分析。经验法适用于经验丰富的设计者,数值法对设计者数学功底及编程能力有一定要求。张航等^[10]采用数值解法并设定程序对透镜自动优化得到光束发散角在 $\pm 0.1^\circ$,荆雷等^[13]也在数值分析的基础上设计出小尺寸准直透镜。

诸多学者在 LED 准直透镜领域展开了深入研究,但所研究的都是向前、单方向准直,效果是把光束在原来的传播方向上的大发散角压缩为小发散角,传播方向没有改变,准直后只有一束准直光。目前在多向准直方面还缺乏研究,双向准直可用于飞机跑道指示,双向、多向准直光束装修饰品、景观照明等。本文设计了一种透镜,能够将光准直为在同一平面的多束准直光束,且该平面与光原传播方向垂直,原光束沿 Z 轴传播,经透镜准直后得到多束在 XY 平面方向传播的准直光束。Matlab 软件数值计算得到透镜全反射面,运用所得数据在 SolidWorks 软件中建立模型,最后导入 TracePro

软件里检验设计结果。计算中光源模型为点光源,在 TracePro 中光线追迹时光源设置为边长为 1 mm 的正方形面光源,在透镜尺寸远大于光源尺寸时,光源可视为点光源,此时模拟结果与理论计算结果相符。先计算得到双向准直透镜的模型,将原来以 Z 轴为传播中心轴呈朗伯分布的光准直为沿 $\pm X$ 轴两个相反的方向,随后将双向准直透镜变形为三向、四向准直透镜,准直后的光束同样是在 XY 平面内,即准直后光束与 LED 发光面平行,各向光束发散角仅为 3° ,效率达 90% 以上。此类准直透镜不仅限于二、三、四向,还可以演化为更多向准直,拓宽了 LED 准直透镜的应用范围,丰富了 LED 配光类型。

2 传统准直光束

LED 出光为朗伯型,以主传播轴 Z 轴上光强最大,与主传播轴夹角越大,光强越小,呈余弦分布:

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

式中 θ 为光线与 Z 轴的夹角, I_0 为 Z 轴上即 $\theta = 0^\circ$ 时的光强。用配光曲线可表示如图 1 所示,图 2 为朗伯型光源在 10 m 处的辐照度图。

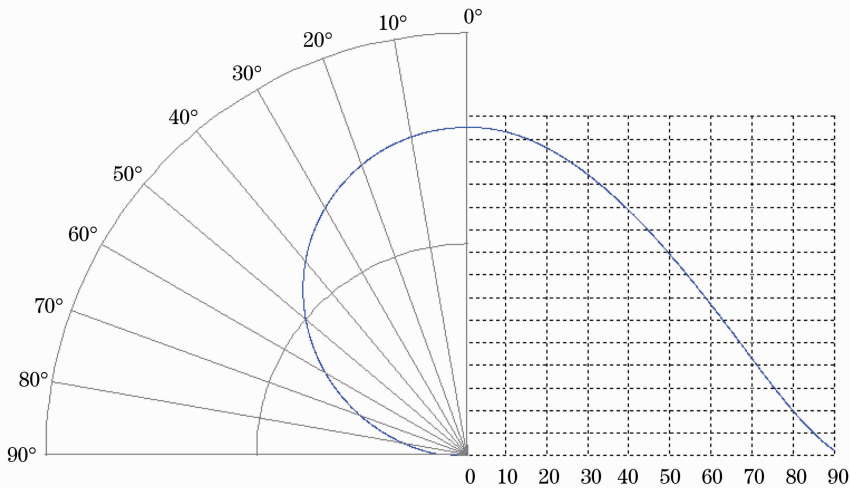


图 1 朗伯型配光曲线

Fig. 1 Lambert type light distribution curve

准直光束的特点是光束能量高度集中、发散角极小、局域照度极大,可实现远距离照明、指示等。为得到准直光束,设计者们进行了大量研究,将原光束压缩在很小的光束角内,准直后的光束仍在原主传播方向上,图 3 为准直前后光束对比,图 3(a)为一边长为 1 mm 的正方形面光源,出光为朗伯型,从

图中可以看出朗伯型出光覆盖了半个球面,能量不集中;图 3(b)中为准直光束,是用一个准直透镜配光后的结果,光线经过配光后几乎为平行光,沿 Z 轴传播,能量高度集中,可用于远距离照明及信号指示等。

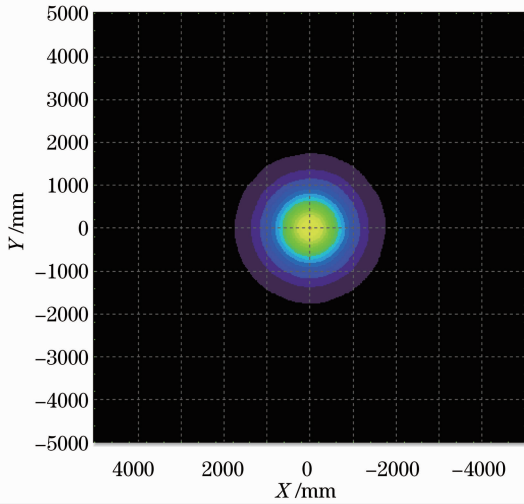


图 2 10 m 处照度图

Fig. 2 Illuminance diagram at 10 m

3 双向准直光束

设计的目标是得到一组反向准直光束,均与原

光束的传播方向垂直。即若原光束沿 Z 轴传播,目标为得到 XY 平面内两束互为反向的准直光束。

准直光束主要用全反射实现,图 3(b)中也为全反射(TIR)透镜。以图 4 中二维示意图分析,光线经透镜界面反射后沿 X 方向及 $-X$ 方向传播,可先设计全反射面的对应曲线。

令光源处于原点处,光线入射到全反面上的入射向量用 \mathbf{I} 表示,经反射后的出射光线向量用 \mathbf{O} 表示,折反定律的矢量式为

$$P \cdot \mathbf{N} = n \cdot \mathbf{I} - n_0 \cdot \mathbf{O}, \quad (2)$$

式中 P 为系数, $P = \sqrt{n^2 + n_0^2 - 2m_0 \cos\langle \mathbf{I}, \mathbf{O} \rangle}$, \mathbf{N} 为曲面法向量, n_0 为光线出射后介质折射率,一般空气取 1, n 为透镜折射率,若计算反射光线取 1。设计目标是将光线反射为与 X 轴平行的准直光线,因此光线出射向量为 $\mathbf{O} = (1, 0, 0)$ 。令曲线上的点 Q 的坐标为 $(x, 0, z)$, 则光线入射向量为 $\mathbf{I} = (x, 0, z)$ 。

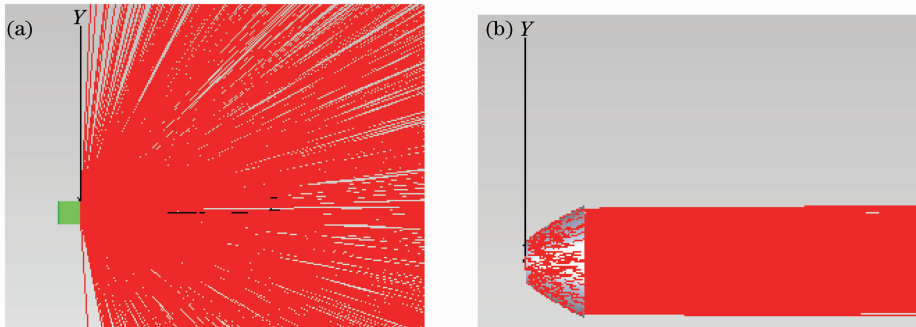


图 3 (a)准直前;(b)准直后

Fig. 3 (a) Before collimation; (b) after collimation

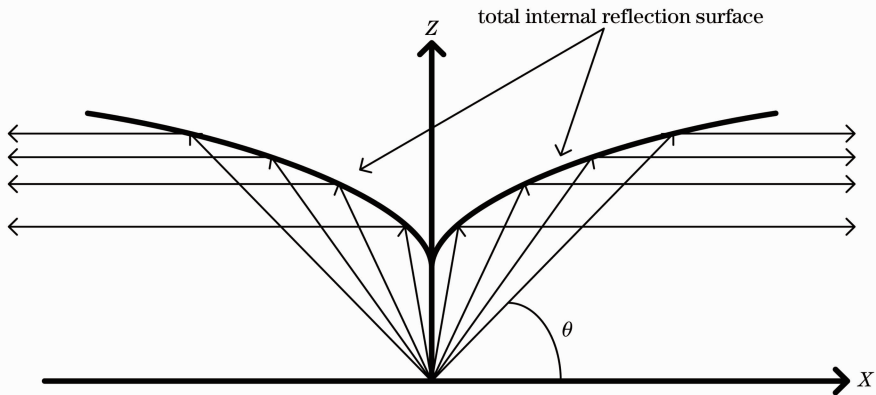


图 4 二维双向准直示意图

Fig. 4 Diagram of two-direction collimation

要从(2)式中求出曲面母线上点 Q 的坐标,求出 \mathbf{I} 即可, n 、 n_0 、 \mathbf{O} 均为已知量, \mathbf{N} 未知。根据(2)式

无法求出坐标 Q 的解析解,但可设定初始点采用迭代计算法将曲线上的点逐一求出。先设定曲线与 z

轴相交的点 A 坐标为 $(h, 0, 0)$, h 为透镜的初始计算点的高度, 为确定值。根据迭代法便可计算出曲线上的多个点:

1) 将角度 θ 离散化为 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i$;

2) 令反射曲面上点的位置为 $(x_1, 0, z_1), (x_2, 0, z_2), \dots, (x_i, 0, z_i)$, 求出光线入射透镜外曲面的向量 $\mathbf{I}_1, \mathbf{I}_2, \dots, \mathbf{I}_i$, 光线经反射后的出射向量 $\mathbf{O}_1, \mathbf{O}_2, \dots, \mathbf{O}_i$ 均为 $(1, 0, 0)$;

3) 根据(2)式及定义的初始值可求出 \mathbf{N}_1 , 若曲线上的两点间距足够小, 两点的连线可视为曲线的切向量, 即切向量 $\mathbf{Q}_1 = (x_2 - x_1, 0, z_2 - z_1)$, 又知曲线上的切向量与法向量垂直, 可知 $\mathbf{N}_1 \cdot \mathbf{Q}_1 = 0$, 又有三角关系 $\tan \theta = z/x$, 解方程组可求出点 $(x_2, 0, z_2)$, 继而根据(2)式可求得 \mathbf{N}_2 。

4) 重复步骤 3) 可依次求出曲线上各点坐标, 从而确定曲线。

设定初始计算点的高度 h 为 4 mm, 折射率 $n =$

1.59[聚碳酸酯(PC)材料折射率], 计算得到曲线如图 5 所示, 将数据点导入 SolidWorks 建 3D 模型, 再把模型导入 TracePro 进行光线追迹, 透镜材料设为 PC, 设置朗伯型光源, 光线 100000 条, 得到图 6 中的效果。图 6(a) 为追迹的部分光线, 可以看出光线不再沿 Z 轴传播, 改为在 XY 平面传播; 配光曲线如图 6(b) 所示。

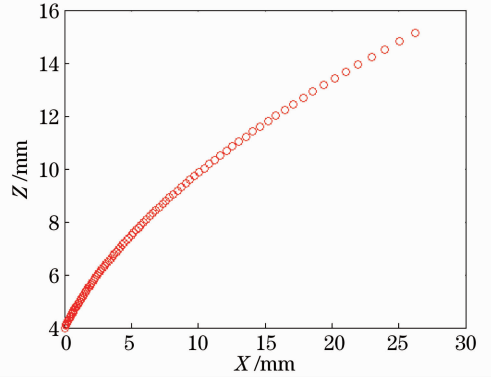


图 5 曲线数据点

Fig. 5 Data points on curve

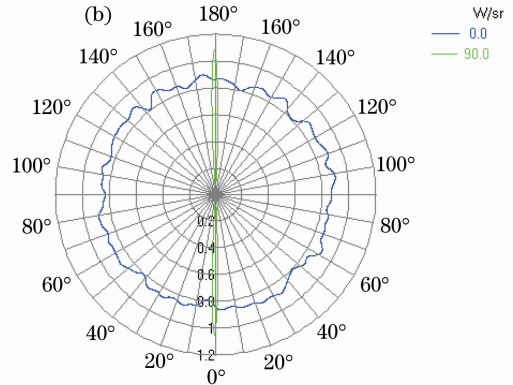
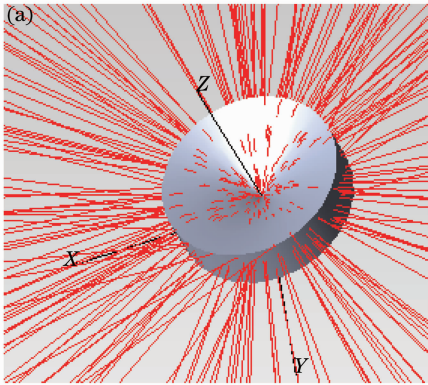


图 6 (a) 光线追迹结果; (b) 配光曲线

Fig. 6 (a) Result of ray tracing; (b) light distribution curve

光线已经在 XY 平面传播, 但还没有被约束在 X 轴上。用迭代算法按以上求曲线的方法, 增加 Y 轴与 Z 轴的角度 φ , 将 φ 也离散化, 在三维空间中求出表面上的坐标点, 从而可确定全反射曲面, 曲面呈贝状, 可将光线准直在一个方向。图 7(a) 为半全反射曲面数据点, 导入 SolidWorks 建立 3D 模型, 为使准直光线在两个相反的方向, 将模型设计成两个反向对称的结构, 如图 7(b) 所示, 透镜长 52.51 mm, 高 15.16 mm, 宽 16.68 mm。将模型导入 TracePro 进行光线追迹, 透镜材料设为 PC, 图 8(a) 为追迹后的部

分光线, 绝大部分光线都被约束在 X 轴上, 分别向 X 与 $-X$ 两个相反的方向传播; 图 8(b) 为双向准直光束的配光曲线, 所定义的法向量为 $(1, 0, 0)$, 指上向量为 $(0, 1, 0)$; 设置两个平板垂直于 X 轴, 分别位于 X 轴 ± 1000 mm 的位置, 单个平板接收到的能量为光源辐射能量的 47%, 如图 8(c) 示, 可知两平板接收到的总能量是光源辐射能量的 94%。双向准直透镜使原本以 Z 轴为传播中心轴呈朗伯分布的光线在透镜的自由曲面发生全反射, 将光线准直在两个与 Z 轴垂直并相互反方向传播。

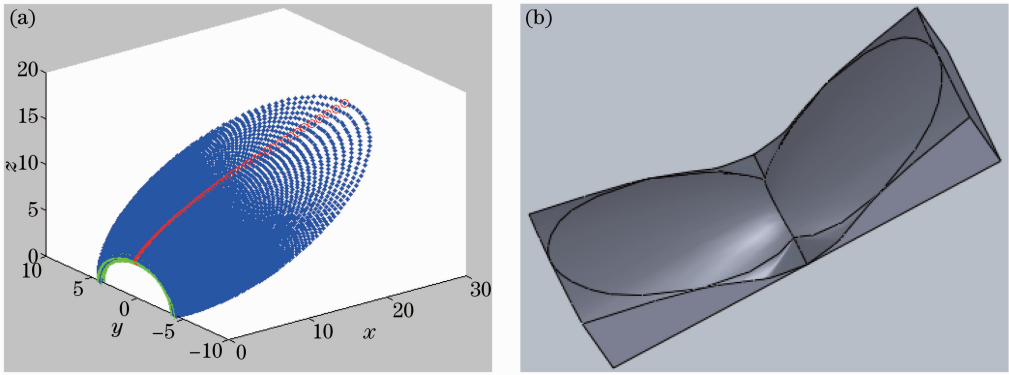


图 7 (a) 曲面数据点; (b) 3D 模型

Fig. 7 (a) Data points on surface; (b) 3D model

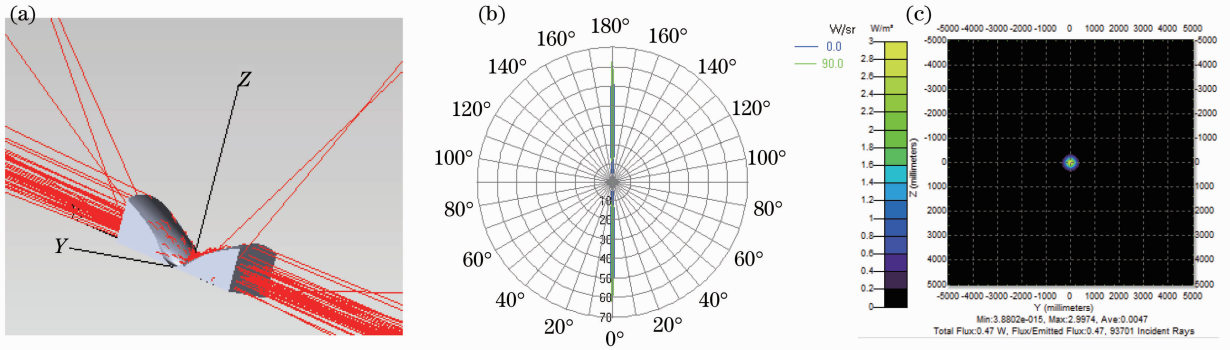


图 8 (a) 光线追迹; (b) 配光曲线; (c) 照度分布

Fig. 8 (a) Ray tracing; (b) light distribution curve; (c) illuminance distribution

4 多向准直光束

研究得到的透镜不仅限于双向准直,可将模型演化实现多向准直。按照图 7(a)中计算出的数据点,建出模型后绕 Z 轴等角度圆周排列,可得到多向准直透镜。图 9 为三向准直透镜的光线追迹及配光曲线图,三向准直透镜在 XY 平面绕 Z 轴等角度排列,角度间距为 120° ,如图 9(a)示,所得配光曲线

与模型对应,呈现三个方向的小角度光束,分别在与 X 轴夹角为 $0^\circ, \pm 120^\circ$ 的方向,每两个方向角度间距也为 120° 。四向准直透镜按相同的方式排列得到,如图 10 所示,四个方向分别在 $\pm X$ 轴及 $\pm Y$ 轴上,光线追迹后得到的配光曲线也显示光线被准直在与 X 轴夹角为 $0^\circ, \pm 90^\circ$ 及 180° 的方向,与模型十分吻合。三向、四向准直光束的发散角均仅为 3° 。

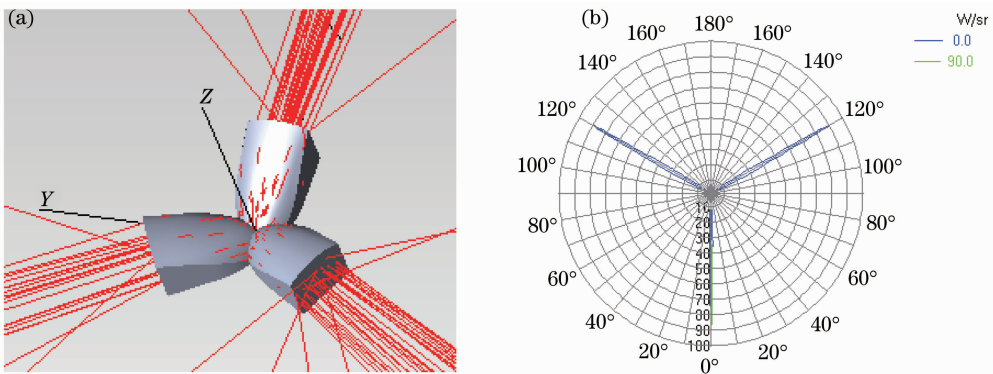


图 9 (a) 三向准直; (b) 配光曲线

Fig. 9 (a) Treble-direction collimation; (b) light distribution curve

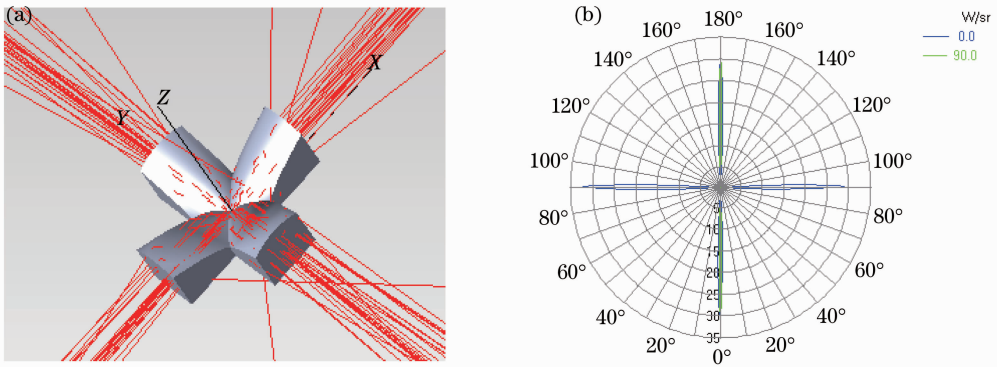


图 10 (a)四向准直; (b)配光曲线

Fig. 10 (a) Four-direction collimation; (b) light distribution

5 结 论

通过初步光学分析,确定透镜轮廓,基于光线折反定律用 Matlab 进行迭代计算,精确计算出曲面形状,得到双向准直透镜,并将模型演化为三向、四向等多向准直透镜,所得准直光束均在与 LED 发光面平行的平面上传播,发散角仅 3° ,效率达 90% 以上。

参 考 文 献

- David G Pelka, Kavita Patel. An overview of LED applications for general illumination [C]. SPIE, 2003, 3781: 15–26.
- F M Steranka, J Bhat, D Collins, *et al.*. High power LEDs technology status and market applications [J]. Physical Status Solid (A) Applied Research, 2002, 194(2): 380–388.
- Chihung Lee. Angularly positioned LED-based spatial temporal color separation system [J]. Opt Express, 2012, 20(17): 19109–19118.
- Fang Xiang, Wu Fengtie, Cheng Zhiming. Effects of incoherent monochromatic LED light source on formation of Bessel beam [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0205001.
方 翔, 吴逢铁, 程治明. 非相干单色 LED 光源对贝塞尔光束形成的影响 [J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0205001.
- Huang Qilu, Wu Fengtie. Investigation of uniform illumination of near-field targets using a conic light-emitting diode array [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(10): 3039–3043.
黄启禄, 吴逢铁. 基于近场均匀照明的 LED 二次曲线阵列的研究 [J]. 光学学报, 2010, 30(10): 3039–3043.
- Ivan Moreno, Nayeli Rodriguez, Jose Carlos Basilio. Simultaneous color-mixing and collimation within LED package

[C]. SPIE, 2013, 8841: 884102.

- Aiming Ge, Wei Wang, Zhengqing Du, *et al.*. Design of an LED-based compound optical system for a driving beam system [J]. Appl Opt, 2013, 52(12): 2688–2693.
- Zhenjie Liu, Peng Liu, Feihong Yu. Parametric optimization method for the design of high-efficiency free-form illumination system with a LED source [J]. Chin Opt Lett, 2012, 10(11): 112201.
- Ding Yi, Zheng Zhenrong, Gu Peifu. Freeform lens design for LED illumination [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(6): 1486–1490.
丁 毅, 郑臻荣, 顾培夫. 实现 LED 照明的自由曲面透镜设计 [J]. 光子学报, 2009, 38(6): 1486–1490.
- Zhang Hang, Liang Xue, Yan Jinhua. Compound parabolic concentrator-simultaneous multiple surfaces design methods for LED collimators [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.
- H Ries, J Muschaweck. Tailored freeform optical surfaces [J]. J Opt Soc Am A, 2002, 19(3): 590–595.
- 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.
- Jing Lei, Liu Hua, Zhao Huifu, *et al.*. Compact collimator design for high-brightness light-emitting diode [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(12): 1222001.
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): 1222001.

栏目编辑: 韩 峰