

doi:10.3788/gzxb20154401.0122002

# 实现近场均匀照明的双自由曲面大角度透镜设计

颜稳萍<sup>1</sup>, 郭震宁<sup>1</sup>, 林介本<sup>1,2</sup>, 甘汝婷<sup>1</sup>, 林木川<sup>1</sup>

(1 华侨大学 信息科学与工程学院 光传输与变换福建省重点实验室, 福建 厦门 361021)

(2 福建泉州世光照明科技有限公司, 福建 泉州 362302)

**摘 要:**针对 LED 单自由曲面透镜近场大角度照明均匀性不足和出光效率低等问题, 基于边缘光线理论和网格划分法, 设计了内曲面为椭圆型, 外曲面为自由曲面的 LED 双自由曲面大角度透镜. 透镜内曲面对 LED 入射光线进行发散, 外曲面对出射光线方向进行控制, 实现大角度均匀照明, 并减少全反射损失, 提高出光效率. 采用扩展光源文件对透镜模型进行光学仿真, 并利用反馈优化法对外曲面进行优化, 提高近场的照度均匀性. 研究表明: 在相同近场距离条件下, 出光角度为  $143^\circ$ 、 $151.8^\circ$  时, 单自由曲面透镜照度均匀性为 0.55 和 0.40, 出光效率为 92.0% 和 80%, 而所设计的双自由曲面透镜照度均匀性为 0.84 和 0.85, 出光效率为 98.8% 和 95.0%, 照明效果明显改善.

**关键词:** LED; 双自由曲面透镜; 大角度; 均匀照明; 出光效率

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)01-0122002-6

## Design of Double Freeform-surface Lens with Large View Angle for Uniform Illumination of the Near-field

YAN Wen-ping<sup>1</sup>, GUO Zhen-ning<sup>1</sup>, LIN Jie-ben<sup>1,2</sup>, GAN Ru-ting<sup>1</sup>, LIN Mu-chuan<sup>1</sup>

(1 College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Key Laboratory of Light Propagation and Transformation of Fujian Province, Xiamen, Fujian 361021, China)

(2 Fujian Quanzhou SIGOLED Lighting Technology Co., Ltd, Quanzhou, Fujian 362302, China)

**Abstract:** Aim at the lacks of uniformity for large view angle illumination in the near-field and low efficiency of single freeform-surface lens of LED, based on the edge-ray theory and grid partition method, a double freeform-lens with large view angle of LED was designed, the inner surface was elliptic and the outer surface was freeform. The incident rays of LED diverge from the inner surface of the lens, and the direction of the emergent rays were controlled by the outer surface, which realized large view angle uniform illumination and reduces losses of total reflection, thus, improving the luminous efficiency. The extended source ray-file was employed to do optical simulation for the lens model, the feedback optimization method was used to optimize the outer surface and improve uniformity of near-field illumination. The results show that under the condition of same near-field distance, with the beam angles at  $143^\circ$  and  $151.8^\circ$ , respectively, the corresponding illumination uniformity values of single freeform-surface lens are 0.55 and 0.40, and the efficiency values are 92.0% and 80%. While the proposed double freeform-surface lens greatly improve illumination effects, with 0.84 and 0.85 illumination uniformity and 98.8% and 95.0% efficiency.

**Key words:** LED; Double freeform-surface lens; Large view angle; Uniform illumination; Light efficiency

**OCIS Codes:** 220.2945; 220.3630; 230.3670; 240.0240

基金项目: 福建省科技计划重点项目(No. 2013I0004)、光传输与变换福建省重点实验室开放课题(No. 2014201)、南安市中小企业创新基金(No. 201101)和南安市科技计划重点项目(No. G201212)资助

第一作者: 颜稳萍(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为半导体照明光学设计. Email: wp.yan@qq.com

导师(通讯作者): 郭震宁(1958-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为半导体发光器件及光学设计与应用. Email: znguo@hqu.edu.cn

收稿日期: 2014-06-11; 录用日期: 2014-08-07

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

## 0 引言

LED具有高效率、光色性能好和能耗低等特点,被广泛应用于平面发光式面板灯、广告灯箱和显示器等<sup>[1-5]</sup>. LED平面发光有侧入式和直下式两种照明方式. 侧入式照明LED需要与导光板进行结合,存在耦合效率低、发光面尺寸小和成本高等问题. 由于LED光源近似朗伯型发光体,在近场目标面的照度值呈高斯函数形式迅速下降,所以直下式照明往往需要LED高密度排布才能形成均匀出光效果,但成本较高,且容易造成高热量积聚. 为了减少直下式照明LED的使用数量降低成本,保证出光面照度均匀,需设计一种大角度透镜,来提高整体的稳定性和性价比.

Qin等<sup>[6]</sup>改进I. Moreno近场均匀照明的解析式<sup>[7]</sup>,得出采用大角度透镜时LED在不同排布方式下的最优间距,实现近场均匀照明. Wang等<sup>[8]</sup>采用逆向设计方法,根据已给出的距高比,算出均匀照明优化配光曲线,进而对优化配光曲线的大角度透镜进行设计,实现不同距高比直下式背光均匀照明. Hu等<sup>[9]</sup>先定义照度分布,计算实现均匀照明的优化配光曲线,根据优化配光曲线设计大角度透镜,模拟出不同距高比的近场照明效果. 这些设计方法都采用内曲面为半球面、外曲面为自由曲面的单自由曲面进行设计,且都针对点光源或者尺寸为 $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ 的光源,模拟结果与实际结果相差较大<sup>[10]</sup>,应用范围较小. 在使用扩展光源时,采用单自由曲面在大角度出射情况下光难以分布均匀,并且容易在外曲面发生全反射.

本文基于边缘光线理论和网格划分法,采用内外双自由曲面结构设计大角度透镜. 透镜内曲面为椭圆将入射光线进行发散,外曲面为自由曲面对出射光线方向进行控制,实现近场大角度均匀照明. 仿真实验采用大功率ray光源文件进行模拟,减小仿真结果与实际效果的误差. 仿真结果结合反馈优化程序优化透镜外曲面,实现近场大角度均匀照明,即出光角度不小于 $140^\circ$ .

## 1 透镜设计理论

由于仅仅依靠单自由曲面透镜难以实现近场大角度均匀照明,所以采用双自由曲面结构透镜对出光角度和出光效果进行改进和优化. 为了更好地控制出射光线以获得较佳的大角度出光效果,内曲面需要将LED的光线均匀发散,再通过外曲面控制入射光线. 在光学设计中常引入二次曲面,椭圆面相对于抛物面和双曲面离心率较小,曲率变化平缓,当椭圆焦点位于Z轴方向上时,对LED出射光线具有均匀发散作用,因此透镜采用内曲面A为椭圆,外曲面B为自由曲面<sup>[11]</sup>. 透镜为内外双自由曲面旋转对称结构,如图1. 二维透镜模型以O点为原点,Z轴为中心轴. 设计过程中将光源

视为朗伯型点光源,光源从O点发出的光线经过内曲面A折射后,远离中心光轴Z进行发散,再经过外曲面B折射至目标区域.

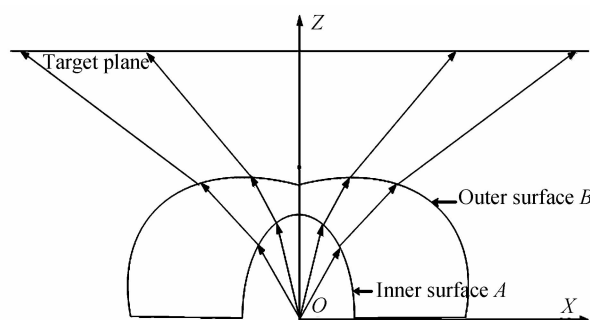


图1 双自由曲面大角度透镜结构

Fig. 1 Framework diagram of double freeform-surface lens with large view angle

双自由曲面大角度透镜曲面的设计主要基于边缘光线理论. 首先,通过对光源和目标面进行网格划分,形成一一对应的关系;其次,通过Snell公式推导出外曲面B的微分方程,采用差分法求解外曲面B的曲面数据. 通过对双自由曲面大角度透镜光学仿真,结合反馈优化法,优化外曲面B,提高目标面的照度均匀性.

### 1.1 LED光源与目标面的网格划分

由于设计双自由曲面大角度透镜为旋转对称结构,因此主要对二维平面的内曲面A和外曲面B进行计算. 将光源和目标面划分为N份,形成对应关系,使等面积上的圆环带光通量相等<sup>[12]</sup>. 假设LED为朗伯型点光源,其光强分布为

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

式中 $\theta$ 为入射光线与Z轴的夹角, $I_0$ 为沿着Z轴光源的法向光强.LED的总光通量为

$$\Phi_{\text{total}} = \int I(\theta) d\Omega = 2\pi \int_0^{\theta_{\text{max}}} I(\theta) \sin \theta d\theta \quad (2)$$

式中 $\theta_{\text{max}}$ 为最大光强度角. 将LED光源光通量平分为N份后,单元光通量为

$$2\pi \int_{\theta_i}^{\theta_{i+1}} I(\theta) \sin \theta d\theta = \frac{\Phi_{\text{total}}}{N} \quad (3)$$

式中 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i (i=1, 2, \dots, N)$ 为等光通量角度的大小,联合式(1)~(3)通过差分法可解得 $\theta_i$ 的角度,其中Z轴方向 $\theta_1=0$ .

同时对圆形目标面进行网格划分,距离光源H的圆形目标面最大半径为 $T_{\text{max}}$ . 将圆形目标平面面积等分为N份,圆形目标面的单元面积光通量为

$$\int_{T_{ix}}^{T_{i+1x}} E_0 2\pi r dr = \frac{E_0 \pi T_{\text{max}}^2}{N} = \frac{\Phi_{\text{total}}}{N} \quad (4)$$

式中 $T_{1x}, T_{2x}, \dots, T_{ix} (i=1, 2, \dots, N)$ 为单元面积的半径, $E_0$ 为平均照度. 由式(4)可得各单元面积圆环半径 $T_{ix}$ ,其中 $T_{1x}=0$ 为圆形目标面的中心.

### 1.2 数值计算内外曲面

首先,对内曲面A进行计算. 其中内曲面A为椭

圆,如图 2. 入射光线经过内曲面 A 以较大的角度进行发散. 椭圆方程为

$$\frac{x_{ai}^2}{a^2} + \frac{z_{ai}^2}{b^2} = 1 \quad (5)$$

式中  $(x_{ai}, 0, z_{ai})$  为内曲面  $A_i$  点的坐标, 其中  $a < b$ , 即沿着 Z 轴方向为长轴方向, X 轴方向为短轴方向. 其中  $A_i$  点的坐标满足

$$\tan \theta_i = \frac{x_{ai}}{z_{ai}} \quad (6)$$

联合式(5)、(6)可求得内曲面 A 的曲面数据.

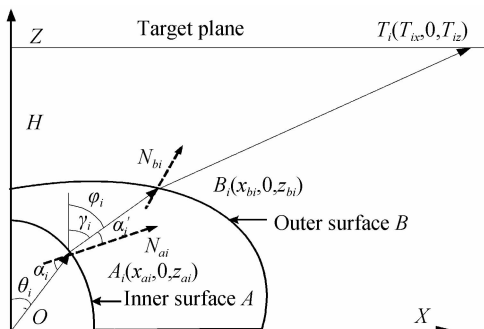


图 2 双自由曲面大角度透镜设计原理

Fig. 2 Principle diagram of the design for double freeform-surface lens with large view angle

计算出内曲面 A 后, 根据边缘光线理论, 设计外曲面 B, 将内曲面 A 折射出的光线再进行折射至目标位置. 根据 Snell 定律

$$[1 + n^2 - 2n(\mathbf{O} \cdot \mathbf{I})]^{1/2} \cdot \mathbf{N} = \mathbf{O} - n\mathbf{I} \quad (7)$$

式中  $n$  为透镜的折射率,  $\mathbf{O}$  和  $\mathbf{I}$  分别为出射光线和入射光线的矢量,  $\mathbf{N}$  为曲面法向矢量. 外曲面点  $B_i$  对应的入射光线为  $\overrightarrow{A_i B_i}$ , 出射光线为  $\overrightarrow{B_i T_i}$ , 外曲面 B 法向矢量为  $\mathbf{N}_{bi}$ , 由式(7)推导出外曲面 B 的微分方程为

$$\frac{dz_{bi}}{dx_{bi}} = -\frac{O_x - nI_x}{O_z - nI_z} \quad (8)$$

式中

$$\begin{cases} I_x = \frac{x_{bi} - x_{ai}}{\sqrt{(x_{bi} - x_{ai})^2 + (z_{bi} - z_{ai})^2}} \\ I_z = \frac{z_{bi} - z_{ai}}{\sqrt{(x_{bi} - x_{ai})^2 + (z_{bi} - z_{ai})^2}} \\ O_x = \frac{T_{ix} - x_{bi}}{\sqrt{(T_{ix} - x_{bi})^2 + (H - z_{bi})^2}} \\ O_z = \frac{H - z_{bi}}{\sqrt{(T_{ix} - x_{bi})^2 + (H - z_{bi})^2}} \end{cases} \quad (9)$$

根据几何关系,  $B_i$  点有

$$\tan(\gamma_i) = \frac{x_{bi} - x_{ai}}{z_{bi} - z_{ai}} \quad (10)$$

$$\gamma_i = \varphi_i - \alpha'_i = \arccos(\mathbf{N}_{ai} \cdot \overrightarrow{OZ}) - \arcsin(\sin(\arccos(\mathbf{N}_{ai} \cdot \overrightarrow{OA'_i}))/n) \quad (11)$$

式中  $\gamma_i$  为  $A_i$  点出射光线与垂直轴夹角,  $\alpha'_i$  为点  $A_i$  的法向量  $\mathbf{N}_{ai}$  与  $\overrightarrow{A_i B_i}$  的夹角. 联合式(5)~(11), 用差分法

可得到外曲面 B 的曲面数据.

### 1.3 反馈优化外曲面

由于设计过程中将 LED 光源视为朗伯型点光源, 而实际 LED 光源的发光面均大于 1 mm, 应视为扩展光源. 且在构造自由曲面中, 将连续切线点视为理想曲面, 存在一定的误差. 因此, 当采用扩展光源进行模拟时, 透镜的照明效果会劣化. 为了提高透镜在目标面的照度均匀性, 引入反馈优化法, 主要针对外自由曲面 B 的优化.

反馈优化法<sup>[13-15]</sup>是先模拟分析目标面的照度分布情况与预期照度值的差距, 再重新划分目标面网格, 使目标面照度分布趋于理想值. 重新划分目标网格后单元面积的半径为

$$T_{jix} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^N A_{ji}}{\pi}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^N \beta_{ji} A_{(j-1)i}}{\pi}} \quad (12)$$

式中  $j$  表示优化的次数,  $\beta_{ji}$  为优化系数

$$\beta_{ji} = \frac{E_{(j-1)i}}{E_e} \quad (13)$$

$E_{(j-1)i}$  为优化  $j-1$  次之后目标面的照度值,  $E_e$  为期望照度值即平均照度  $E_0$ .  $A_{ji}$  为优化  $j$  次之后的单元面积

$$A_{ji} = (\beta_{1i} \beta_{2i} \beta_{3i} \cdots \beta_{(j-1)i} \beta_{ji}) \frac{\pi T_{\max}^2}{N} \quad (14)$$

双自由曲面大角度透镜设计流程如图 3.

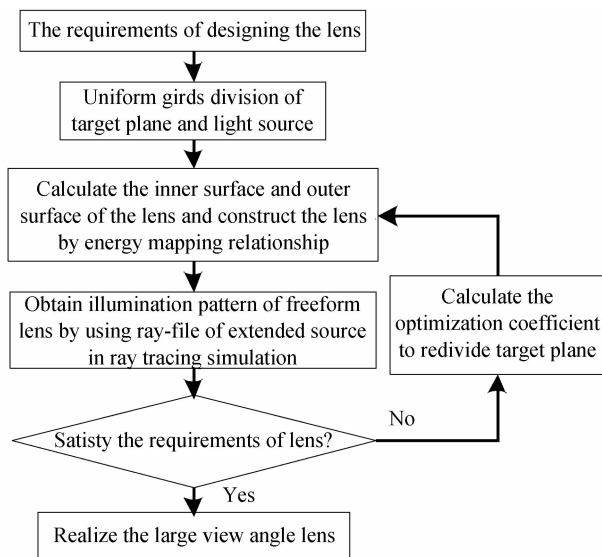


图 3 双自由曲面大角度透镜设计流程

Fig. 3 Flow diagram of design for double freeform-surface lens with large view angle

## 2 设计实例与分析

为了更好地体现单自由曲面透镜和双自由曲面透镜的大角度照明效果, 在设置光源与目标面的距离  $H = 30$  mm 时,  $T_{\max}$  分别设置为 90 mm 和 120 mm, 对应的出光角度为  $143^\circ$  和  $151.8^\circ$ . 透镜材料采用聚甲基丙烯酸甲酯 (Polymethylmethacrylate, PMMA), 其折射率为

1.493. 由于实际光源发光面较大且透镜尺寸较小,光源无法视为点光源.表面光源也只有满足一定的透镜光源直径比时才能替代 ray 光源文件.为了减小模拟结果与实际结果的误差,仿真过程中采用 Osram 1 W 3528 ray光源文档,发光面直径为 2.5 mm<sup>[10]</sup>.建立 3D 实体模型,导入 Lighttools 进行模拟仿真.其中,照度均匀性以  $E_u = E_{\min}/E_{\max}$  作为评价.

设计单自由曲面透镜时,设置中心轴上初始点高度为 4 mm,经过多次优化后,出光角度为 143°,单自由曲面透镜照度均匀性为 0.55,出光效率为 92%,如图 4.当单自由曲面透镜出光角度为 151.8°时,照度均匀性为 0.4,出光效率为 84.0%.这些数据表明单自由曲

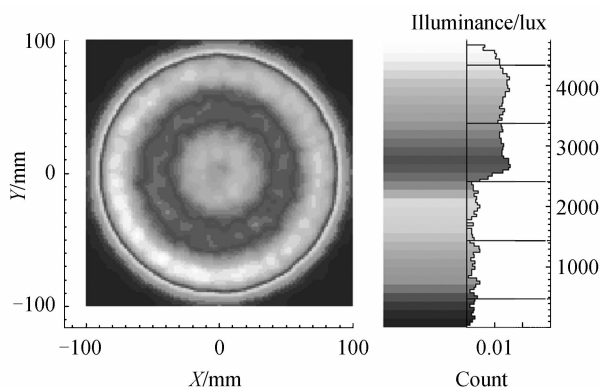


图 4 单自由曲面透镜目标面照度分布图  $\theta=143^\circ$   
 Fig. 4 Illumination on the target plane with single freeform-surface lens at  $\theta=143^\circ$

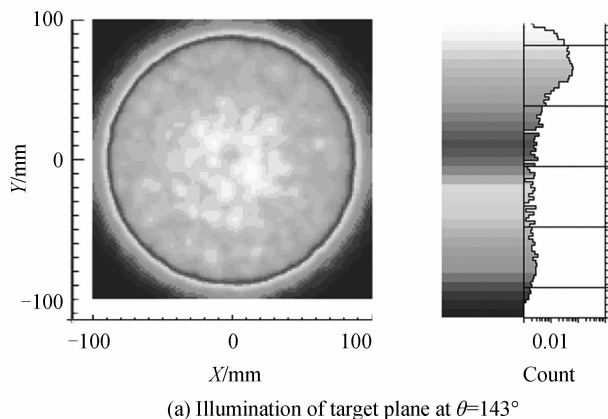


图 5 优化后内曲面 A 和外曲面 B 的曲线图  
 Fig. 5 Curve graph of the inner surface A and outer surface B optimized

面透镜完全不能满足近场大角度均匀照明的要求.

因此基于式(5)~(11)的理论,同样设置外曲面中心轴上初始点为高度 4 mm,取  $a = 1.9$  mm,  $b = 3.2$  mm,透镜初始模型照度分布较为均匀,有利于后续优化.通过数值计算得到大角度透镜内外自由曲面坐标数据,之后对初始模型多次优化,最终得到内曲面 A、外曲面 B 的曲面数据和透镜的 3D 模型,如图 5、6.

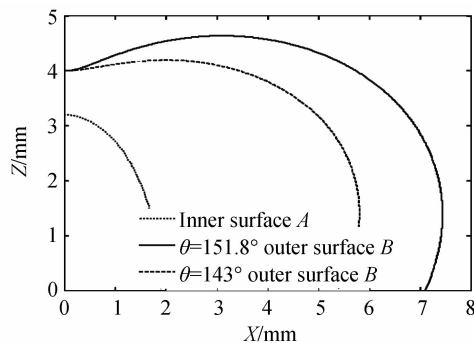
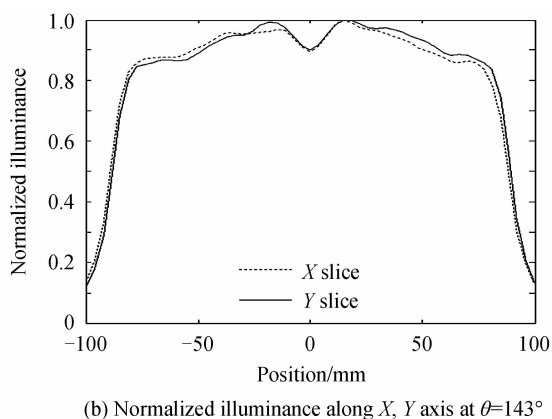


图 6 双自由曲面大角度透镜 3D 模型  
 Fig. 6 3D model of the double freeform-surface lens with large view angle

模拟仿真过程考虑透镜材料吸收和非涅尔损耗,基于点光源设计的双自由曲面大角度透镜经多次优化,当出光角度为 143°和 151.8°时,在近场目标面上照度均匀性分别为 0.84 和 0.85,出光效率分别为 98.8% 和 95.0%,如图 7.由于透镜是大角度出光,两种双自



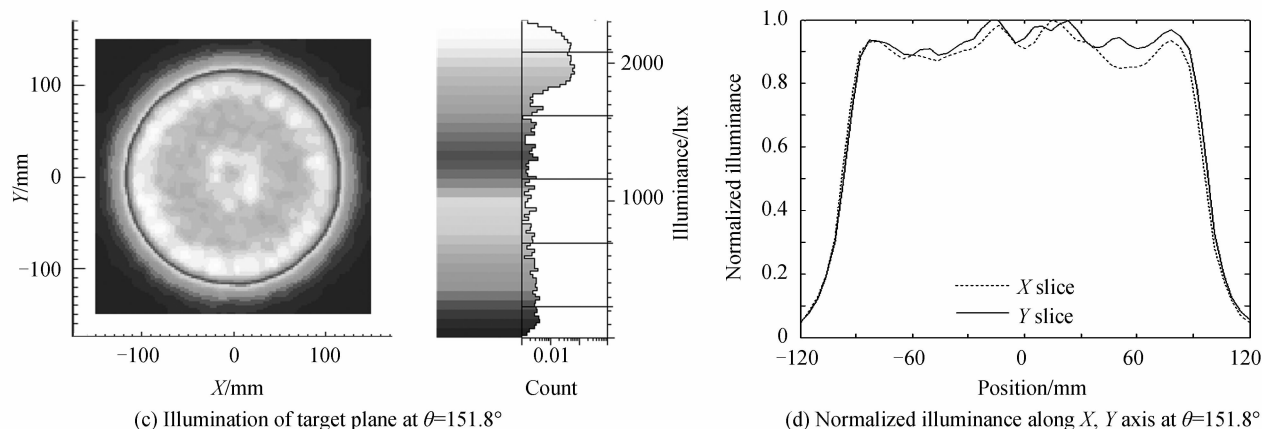


图 7 双自由曲面透镜目标面照度分布图

Fig. 7 Illumination on target plane of double freeform-surface lens

由曲面大角度透镜呈边缘光强强、中心光强弱分布趋势,如图 8.

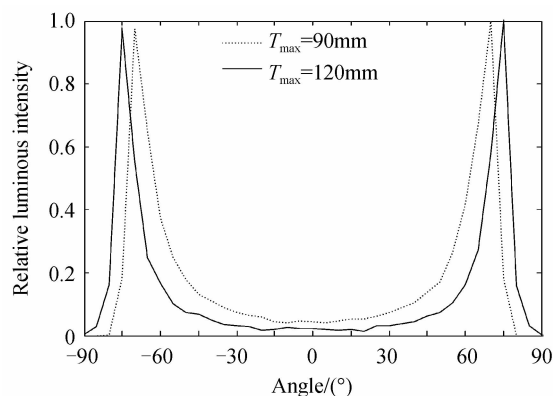


图 8 双自由曲面大角度透镜归一化光强分布图

Fig. 8 Normalized luminous intensity distribution of double freeform-surface lens with large view angle

双自由曲面透镜与单自由曲面透镜的出光效果对比如表 1. 仿真结果表明:单自由曲面透镜在小范围区域均匀照明基本能满足需求,但是当单自由曲面透镜出光角度大于 120°时,照度均匀性和出光效率会因外自由曲面的全反射和非涅尔损耗大幅度下降,难以满足近场大角度均匀照明和出光效率的要求. 与单自由曲面透镜相比,双自由曲面透镜对于近场的照度均匀性和出光效率有很大的提高,完全满足近场大角度均匀照明的要求.

表 1 双自由曲面透镜与单自由曲面透镜效果对比

Table 1 Performance comparison between the double freeform-surface lens and single freeform-surface lens

Type	$T_{max}$ /mm	Beam angle/(°)	Uniformity	Efficiency /%
Double freeform-surface lens	90	143	0.84	98.8
	120	151.8	0.85	95.0
Single freeform-surface lens	90	143	0.55	92.0
	120	151.8	0.40	84.0

### 3 结论

基于边缘光线理论和网格划分法,设计了双自由曲面结构透镜,其内曲面为椭圆型曲面,外曲面为自由曲面. 该双自由曲面大角度透镜可根据实际要求将 LED 的出光角度提升至 140°以上,并提高透镜大角度近场照度均匀性和出光效率. 研究表明:当双自由曲面大角度透镜出光角度为 143°和 151.8°时,其照度均匀性分别为 0.84 和 0.85,出光效率分别为 95.0%和 98.8%,照度均匀性和出光效率均远高于单自由曲面透镜. 当透镜出光角度大于 160°时,基于能量守恒定律,需将靠近 LED 中心光强方向的出射光线角度扩大 30°~50°,出射光线的大角度折射使光线在透镜内外曲面产生较大的菲涅尔反射损耗,造成目标面的照度均匀性和出光效率大幅度下降. 因此,采用内曲面为椭圆的方法设计出光角度小于 160°的透镜才能取得较好的照度均匀性和出光效率. 本文设计的双自由曲面大角度透镜,能实现不同高度下的近场大角度均匀照明,可广泛应用于直下式背光产品,如 LED 面板灯、LED TV 背光源、LED 超薄灯箱等,具有一定的实用价值.

#### 参考文献

- [1] LIN Jie-ben, GUO Zhen-ning, CHEN Li-bai, et al. Watt-level high power InGaN-based blue LED photometric, chromatic and electric characteristics [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2009, **30**(3): 379-384.  
林介本, 郭震宁, 陈丽白, 等. 瓦级大功率 InGaN 蓝光 LED 的光色电特性[J]. *发光学报*, 2009, **30**(3): 379-384.
- [2] CHEN E-zhen, GUO Zhen-ning, ZHI Jia-jun, et al. Study on dot shape for the light guide plate of backlight[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, **50**(3): 161-166.  
陈俄振, 郭震宁, 智佳军, 等. 背光源导光板散射网点形状的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, **50**(3): 161-166.
- [3] DING Shu-shu, YU Gui-ying, HAO Wen-wen. A freeform surface lens for indoor uniform illumination [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(4): 118-123.  
丁纾姝, 桂英, 郝雯雯. 用于室内照明的自由曲面均匀配光透镜设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(4): 118-123.

- [4] ZHENG Jin-bo, QIAN Ke-yuan. Designing single LED illumination distribution for direct-type backlight[J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(28): 7022-7027.
- [5] LAN Ming-qiang, WANG Min, CHEN Xue-mei. High evenness and low glare LED lamp light distribution design and simulation analysis[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(3): 288-292.  
兰明强,王敏,陈雪梅. 高均匀低眩光 LED 台灯配光设计及仿真分析[J]. 光子学报. 2013, **42**(3): 288-292.
- [6] QIN Zong, WANG Kai, CHEN Fei, *et al.* Analysis of condition for uniform lighting generated by array of light emitting diodes with large view angle[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(16): 17460-17476.
- [7] IVAN M, MAXIMINO A A, RUMEN I T. Designing light-emitting diode arrays for uniform near-field irradiance [J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(10): 2265-2272.
- [8] WANG Kai, WU Dan, QIN Zong, *et al.* New reversing design method for LED uniform illumination [J]. *Optics Express*, 2011, **19**(14): A830-A840.
- [9] HU Run, ZHENG Huai, JI Chuan-gang, *et al.* A method to design freeform lens for uniform illumination in direct-lit LED backlight with high distance-height ratio [J]. *Electronic Packaging Technology and High Density Packaging*, 2012, **13**: 1474-1478.
- [10] DONG Li, LIU Hua, WANG Yao, *et al.* Reliability of light source modeling for distribution design on compact LED[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(2): 44-48.  
董丽, 刘华, 王尧, 等. 紧凑型 LED 配光设计中光源模型可靠性研究[J]. 光子学报, 2014, **43**(2): 44-48.
- [11] ZHANG Hang, HE Ye-mei, LI Dong, *et al.* Design for fresnel reflectors of uniform light LED tubes based on ellipse flow-line methods with equipartition and foci map[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(4): 421-424.  
张航, 贺叶美, 李栋, 等. 基于均分配焦椭流线法的 LED 匀光管菲涅尔反射器设计[J]. 光子学报, 2012, **41**(4): 421-424.
- [12] CHEN Fei, LIU Sheng, WANG Kai, *et al.* Free-form lenses for high illumination quality light-emitting diode MR16 lamps [J]. *Optical Engineering*, 2009, **48**(12): 123002.
- [13] LUO Yi, FENG Ze-xin, HAN Yan-jun, *et al.* Design of compact and smooth free-form optical system with uniform illuminance for LED source[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(9): 9055-9063.
- [14] LUO Xiao-xia, LIU Hua, LU Zhen-wu, *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.
- [15] LIU Peng, WANG Hui-hui, WU Reng-mao, *et al.* Uniform illumination design by configuration of LEDs and optimization of LED lens for large-scale color-mixing applications[J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(17): 3998-4005.