

# 超薄直下式 LED 平板灯的大角度透镜设计与仿真

李建鹏<sup>1</sup>, 郭震宁<sup>1,2</sup>, 林介本<sup>2</sup>, 张佳宁<sup>1</sup>, 杨玉龙<sup>1</sup>, 薛冬冬<sup>1</sup>, 陈中行<sup>1</sup>, 黄学铃<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 华侨大学信息科学与工程学院 福建省光传输与变换重点实验室, 福建 厦门 361021;

<sup>2</sup> 泉州市世芯智能照明技术研究院有限公司, 福建 泉州 362302

**摘要** 基于能量守恒定律和网格划分法,设计了一款用于超薄直下式发光二极管(LED)平板灯的大角度透镜。以朗伯型发光 LED 在高度为 96 mm 下的目标面照度分布作为期望照度分布,对大角度 LED 透镜进行反馈优化,使其在高度为 25 mm 的目标面上就形成具有期望照度分布的光场。为探究优化后的大角度 LED 透镜对直下式 LED 平板灯的厚度减薄程度,将目标面高度分别设为 20, 25, 30 mm, 方形 LED 阵列的间距分别设为 96, 82, 75 mm, 利用 LightTools 软件模拟分析了直下式 LED 平板灯的目标面照度均匀度。研究表明,当目标面高度为 25 mm、方形 LED 阵列的间距为 82 mm 时,目标面上的照度均匀度最好,其值(照度最小值除以照度最大值)达至 0.8756,符合国家 LED 室内照明应用技术要求。

**关键词** 光学设计; 平板灯; 反馈优化; 自由曲面; 大角度 LED 透镜; 均匀照明

**中图分类号** O439      **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.112203

## Design and Simulation of Large Angle Lens for Ultra-Thin Direct-Down LED Panel Light

Li Jianpeng<sup>1</sup>, Guo Zhenning<sup>1,2</sup>, Lin Jieben<sup>2</sup>, Zhang Jianing<sup>1</sup>, Yang Yulong<sup>1</sup>,  
Xue Dongdong<sup>1</sup>, Chen Zhonghang<sup>1</sup>, Huang Xueling<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Fujian Key Laboratory of Optical Beam Transmission and Transformation, College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China;

<sup>2</sup> Fujian Quanzhou Sigo LED Lighting Technology Co., Ltd., Quazhou, Fujian 362302, China

**Abstract** Based on the law of conservation of energy and the mesh generation method, a lens with large view angle for ultra-thin direct-down LED panel light is proposed. The illumination distribution of the target plane of the Lambertian type LED at a height of 96 mm is used as the desired illumination distribution to optimize the feedback of the large angle LED lens, and form a light field with a desired illumination distribution on a target plane with a height of 25 mm. To investigate the influence of the large angle LED lens after optimization on the thickness reduction degree of the straight down LED flat lamp, the height of the target surface is set to be 20, 25, 30 mm respectively, and then the spacing of the square LED arrays is set to be 96, 82, 75 mm respectively. The software LightTools is used to simulate and analyze the uniformity of the target illumination of the direct LED flat lamp. The results show that when the target plane height is 25 mm and the pitch of the square LED array is 82 mm, the illumination uniformity of the target plane is the best. And the value (the minimum illumination is divided by the maximum illuminance) is 0.8756, which meets the national technical requirements for the application of LED indoor lighting.

**收稿日期:** 2017-04-17; **收到修改稿日期:** 2017-05-28

**基金项目:** 福建省科技计划引导性重点项目(2016H0022)、泉州市科技计划项目(2015TZ31, 2016T002)、南安市科技计划重点项目(G2016Y04)、华侨大学研究生科研创新能力培育项目(1511301011)、华侨大学国家级大学生创新训练项目(201610385057)

**作者简介:** 李建鹏(1991—),男,硕士研究生,主要从事 LED 光学设计方面的研究。E-mail: 531333809@qq.com

**导师简介:** 郭震宁(1958—),男,博士,教授,主要从事 LED 光学设计与散热设计方面的研究。

E-mail: znguo@hqu.edu.cn(通信联系人)

**Key words** optical design; panel light; feedback optimization; freeform surface; LED lens with large view angle; uniform illumination

**OCIS codes** 220.2945; 220.3620; 230.3670; 240.6700

## 1 引言

发光二极管(LED)作为第4代新型光源,具有体积小、高光效、耐振动及寿命长等优点,已被广泛应用于平板灯、广告灯箱、道路照明、医疗照明以及植物照明等领域<sup>[1-4]</sup>。LED平板灯以其高显色指数和发光均匀柔和的特点,成为一种广受欢迎的室内照明灯具<sup>[5]</sup>。目前,LED平板灯分为侧入式和直下式两种类型。侧入式LED平板灯借助导光板实现了超薄面发光,导光板技术是其进一步发展的关键。直下式LED平板灯通过LED的矩阵排列实现均匀出光,与侧入式相比,在亮度和光效等方面有很大的优势。但由于LED是类朗伯发光体<sup>[6]</sup>,实现均匀的面发光需要足够的混光距离<sup>[7-8]</sup>,故目前直下式LED平板灯的厚度基本上都在40~60 mm,限制了其进一步发展和应用。所以,本文主要通过LED二次光学透镜的研究和设计来进一步减薄直下式LED平板灯的厚度。

在光照度均匀性研究中,陈新睿等<sup>[9]</sup>对菱形、环形和蜂窝状等三种典型LED阵列的近场光照度分布进行了分析研究,发现菱形的LED阵列排布方式在目标面上可获得较大的光照均匀区域。在大角度LED透镜的研究中,Hu等<sup>[10]</sup>设计出了一款具有较小菲涅耳损耗的双自由曲面透镜,分析了其和单自由曲面透镜的光照度均匀性,得出双自由曲面透镜可以实现较高的照度均匀度和较小的菲涅耳损耗。潘诗发等<sup>[11]</sup>以椭圆型内曲面和自由外曲面为结构设计了一款大角度LED透镜,并分析出可使透镜菲涅耳损耗最小的椭圆长短轴比值。

本文以椭圆型内曲面和自由外曲面为结构,设计了一款大角度LED透镜,并以朗伯型发光的LED在高度为96 mm下的目标面照度分布作为期望照度分布,对大角度LED透镜的自由外曲面进行反馈优化,使其在高度25 mm的目标面上形成与期望照度分布相近的光场。然后,设置不同的目标面高度和不同的方形LED阵列间距,模拟分析该透镜对直下式LED平板灯的目标面照度均匀性影响和厚度减薄情况。

## 2 大角度LED透镜初始结构设计

以网格划分法和能量守恒定律设计的大角度LED透镜,通过椭圆型内曲面发散LED出射光线,再通过自由外曲面控制光线输出,实现较好的出光效果<sup>[11]</sup>。

### 2.1 LED光通量与目标面面积的网格划分

透镜的初始结构设计以目标面实现照度均匀的圆形光斑为目标,所采用LED光源与圆形光斑均为旋转对称,故只在二维平面内计算内曲面 $S$ 和外曲面 $P$ 。若LED为朗伯光源,则其光强分布为

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

式中 $\theta$ 为光轴与LED辐射光线的夹角, $I_0$ 为LED的轴向光强。

将LED光源的光通量按辐射角度 $\theta$ 等分为 $N$ 份,划分后的各个辐射角为

$$2\pi \int_0^{\theta_i} I(\theta) \sin \theta d\theta = (i-1) \frac{\Phi_{\text{total}}}{N}, \quad (2)$$

式中 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i (i=1, 2, \dots, N+1)$ 为等光通量划分后的各辐射角,其中 $\theta_1$ 为光轴方向的光源辐射角, $\Phi_{\text{total}}$ 为LED的总光通量,即:

$$2\pi \int_0^{\theta_{\text{max}}} I(\theta) \sin \theta d\theta = \Phi_{\text{total}}, \quad (3)$$

式中 $\theta_{\text{max}}$ 为LED最大出光角度。联立(1)~(3)式可求得 $\theta_i$ 的数值。

令垂直于LED光轴方向的目标面与LED光源的距离为 $H$ ,圆形目标面最大半径为 $T_{\text{max}}$ 。对圆形目标面接半径等面积划分为 $N$ 份,划分后的各个半径 $r$ 为

$$\int_0^{T_{ix}} E_i 2\pi r dr = (i-1) \frac{E_1 \pi T_{\text{max}}^2}{N}, \quad (4)$$

式中 $T_{1x}, T_{2x}, \dots, T_{ix} (i=1, 2, \dots, N+1)$ 为等面积划分后的各个半径值,其中 $T_{1x}$ 为圆形目标面的圆心位

置;  $E_i$  为圆形目标面上的平均照度。将相等的  $N$  份光通量分别映射到相应的  $N$  份目标面网格单元上,可在目标面上实现照度均匀的圆形光斑。

## 2.2 透镜内外曲面的数值计算

将 LED 放置在原点位置,以 LED 发光面的法线方向(光轴)为  $Z$  轴方向,建立如图 1 所示的直角坐标系。计算时,对 LED 进行点光源近似<sup>[12]</sup>,即认为所有的光线都来自于空间中某个确定的点。LED 光源在  $\theta_i$  方向的辐射光线与内曲面  $S$  相交于点  $S_i(S_{ix}, 0, S_{iz})$ ,产生和  $Z$  轴夹角为  $\theta'_i$  的折射光线  $\overrightarrow{S_i P_i}$ 。

椭圆内曲面的方程为

$$\frac{S_{ix}^2}{a^2} + \frac{S_{iz}^2}{b^2} = 1, \quad (5)$$

式中  $a < b$ , 即长轴  $b$  与  $Z$  轴共线,短轴  $a$  与  $X$  轴共线。内曲面点  $S_i$  的坐标和光源辐射角  $\theta_i$  的关系为

$$\tan \theta_i = S_{ix} / S_{iz}, \quad (6)$$

通过(5)、(6)式可求得内曲面  $S$  的曲面数据,进而可求折射光线  $\overrightarrow{S_i P_i}$  与  $Z$  轴的夹角  $\theta'_i$ 。

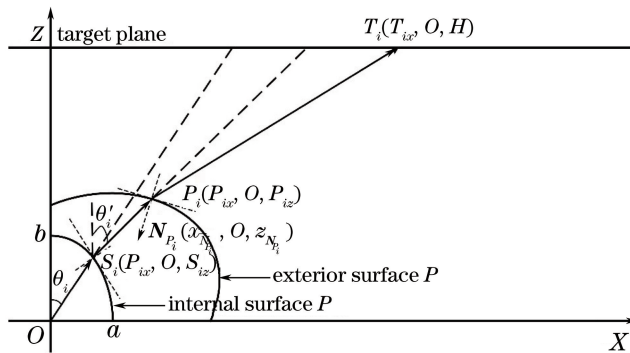


图 1 自由曲面大角度 LED 透镜的原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of LED lens with freeform surface and large view

根据边缘光线理论,折射光线  $\overrightarrow{S_i P_i}$  与透镜外曲面  $P$  相交于点  $P_i(P_{ix}, 0, P_{iz})$ ,产生和目标面相交于点  $T_i(T_{ix}, 0, H)$  的折射光线  $\overrightarrow{P_i T_i}$ 。根据折射定律可得:

$$\mathbf{N} = (n_2 \mathbf{O} - n_1 \mathbf{I}) / \sqrt{n_1^2 + n_2^2 - 2n_1 n_2 (\mathbf{O} \cdot \mathbf{I})}, \quad (7)$$

式中  $n_1$  和  $n_2$  分别为透镜和空气的折射率,  $\mathbf{N}$  为外曲面  $P$  的单位法向矢量,  $\mathbf{I}$  和  $\mathbf{O}$  分别为入射光线和出射光线的单位矢量。令外曲面点  $P_i$  对应的法线矢量为  $\mathbf{N}_{P_i}(x_{N_{P_i}}, 0, z_{N_{P_i}})$ 。则外曲面  $P$  的微分方程由下式可得:

$$\frac{dP_{iz}}{dP_{ix}} = -\frac{x_{N_{P_i}}}{z_{N_{P_i}}}. \quad (8)$$

另外,根据图 1 所示的几何关系,内曲面点  $S_i(S_{ix}, 0, S_{iz})$  和外曲面点  $P_i(P_{ix}, 0, P_{iz})$  的坐标关系有:

$$\tan(\theta'_i) = \frac{P_{ix} - S_{ix}}{P_{iz} - S_{iz}}, \quad (9)$$

结合(7)~(9)式可迭代求得外曲面  $P$  的曲面数据。将获得的内外曲面数据导入到 SolidWorks 软件,建模得到大角度 LED 透镜的初始结构模型。

## 3 超薄直下式 LED 平板灯的大角度透镜反馈优化

### 3.1 反馈优化

将大角度 LED 透镜初始结构模型配合 LED 光源进行模拟时,目标面上的照度分布并不符合研究的实际需要。为使透镜在目标面上的光场呈现出期望的照度分布,需要对透镜进行反馈优化调整。

反馈优化法<sup>[13]</sup>是将模拟得到的目标面照度分布与期望照度分布做比较,再对目标面网格重新划分,使

得目标面照度分布趋于期望照度分布。重新划分后的各个目标面网格半径可由下式得到:

$$\pi T_{jix}^2 = \sum_{l=1}^i M_{jl} = \sum_{l=1}^i k_{jl} M_{(j-1)l}, \quad (10)$$

式中  $T_{jix}$  为用于第  $j$  次优化的第  $i$  个目标面网格的半径值。 $j$  为优化次数,  $M_{jl}$  为第  $j$  次优化后的第  $l$  个目标面网格单元面积,  $k_{ji}$  为反馈优化系数, 即:

$$k_{ji} = E_{(j-1)i} / E_{ep}, \quad (11)$$

式中  $E_{(j-1)i}$  为第  $j-1$  次优化后的第  $i$  个目标面网格单元的照度值,  $E_{ep}$  为期望照度分布值。

### 3.2 直下式 LED 平板灯厚度的减薄方案

研究将减薄厚度后的直下式 LED 平板灯称为超薄直下式 LED 平板灯。图 2 为减薄直下式 LED 平板灯厚度的设计思路图。其中,  $D_w$  为方形 LED 阵列的间距;  $H$  和  $H_w$  分别代表超薄直下式 LED 平板灯和传统直下式 LED 平板灯的目标面高度(厚度); ID1 指 LED1 在高度  $H_w$  的目标面照度分布; ID2 指 LED1 经过大角度 LED 透镜后在高度  $H$  的目标面照度分布。

如图 2 所示, 对大角度 LED 透镜的反馈优化使 LED1 在高度  $H$  的目标面照度分布 ID2 和 ID1 相同, 实现了将直下式 LED 平板灯的目标面高度  $H_w$  减薄到高度  $H$  ( $H < H_w$ )。

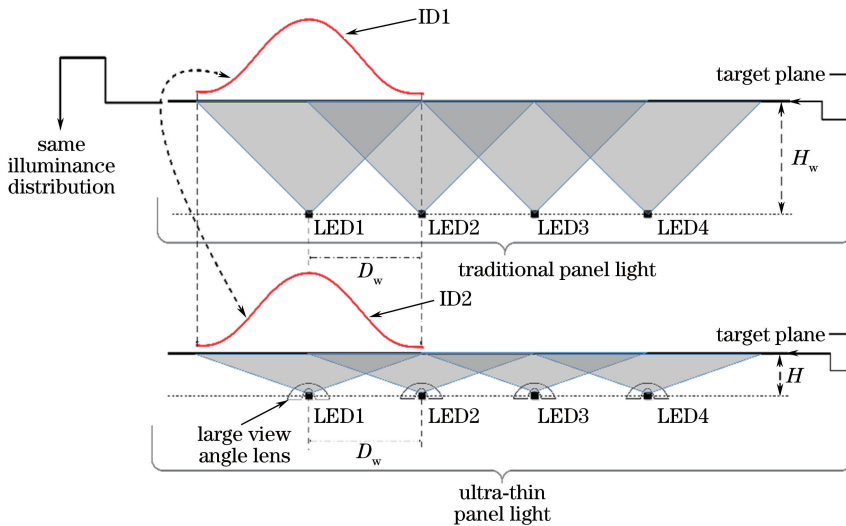


图 2 超薄直下式 LED 平板灯的设计示意图

Fig. 2 Design schematic diagram of ultra-thin direct-down LED panel light

有研究证明<sup>[14]</sup>, 在传统直下式 LED 平板灯的设计中, 若 LED 为朗伯光源, 为使目标面的照度均匀度大于 0.8<sup>[15]</sup>, 方形 LED 阵列下的最大距高比不会超过 1.41。因而, 研究将图 2 中传统直下式 LED 平板灯的距高比  $D_w/H_w$  设为 1。由图 2 可推知, 若 ID2 和 ID1 相同, 则超薄直下式 LED 平板灯的目标面照度均匀度也会大于 0.8。

### 3.3 用于透镜反馈优化的期望照度分布计算

根据 3.2 节的思路, 对大角度 LED 透镜的自由外曲面进行反馈优化时, 以 ID1 作为期望照度分布。由图 2 所示, 假设 LED1 为朗伯发光体, 并在计算时对 LED1 做点光源近似<sup>[12]</sup>。则 ID1 与光源辐射角  $\theta$  的关系为<sup>[16]</sup>

$$E(\theta) = \frac{I(\theta) \cos \theta}{R^2}, \quad (12)$$

式中  $R$  代表 LED 光源与被照位置的距离;  $E(\theta)$  代表 LED 光源在不同光源辐射角下的照度值,  $\theta$  为 LED 出射光线和其光轴的夹角;  $I(\theta)$  由(1)式确定。

根据几何关系, 由图 2 可看出:

$$\cos \theta = \frac{H_w}{R} = \frac{H_w}{\sqrt{r^2 + H_w^2}}, \quad (13)$$

式中  $r$  为 LED 在目标面上以光轴为圆心的光斑半径。

联立(1)、(12)和(13)式可得期望照度分布  $E_{ep}(r)$ ：

$$E_{ep}(r) = \frac{I_0}{H_w^2} \cdot \frac{H_w^4}{(r^2 + H_w^2)^2} = E_0 \frac{H_w^4}{(r^2 + H_w^2)^2}, \quad (14)$$

式中  $E_0$  为 LED 在光轴方向上的目标面照度。因为  $D_w/H_w$  设为 1,  $H_w$  由方形 LED 阵列间距  $D_w$  确定。根据能量守恒定理,  $E_0$  可由下式确定：

$$\Phi_{total} = \int_0^{\infty} E_{ep}(r) dr, \quad (15)$$

式中  $\Phi_{total}$  为(2)式中所描述的 LED 总光通量。

在透镜设计和反馈优化时,研究预先将方形 LED 阵列的间距  $D_w$  设置为 96 mm,目标面高度  $H$  设为 25 mm,旨在将直下式 LED 平板灯的目标面高度减薄到 25 mm。则由(14)式获得研究用于透镜反馈优化的期望照度分布,图 3 为归一化后的期望照度分布曲线。

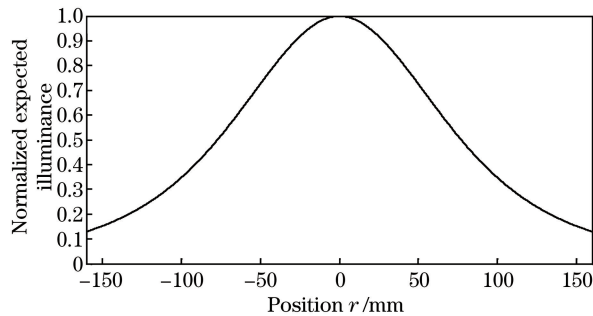


图 3 归一化后的期望照度分布曲线图

Fig. 3 Normalized expected illuminance distribution graph

## 4 大角度 LED 透镜的设计与优化仿真

在大角度透镜初始结构设计时,光斑最大半径  $T_{max}$  设置为与  $D_w$  相同的数值,减小透镜自由曲面优化的幅度,使后续的透镜反馈优化更易于进行。根据文献[11],研究还将透镜外曲面中心轴上的初始点高度设为 4 mm,椭圆内曲面的长轴  $b$  为 3.2 mm,短轴  $a$  为 1.9 mm。

表面光源要替代光源文件(.ray),须满足一定的透镜光源直径比<sup>[17-18]</sup>。为使模拟结果更贴近实际,仿真采用 Osram 3528 光源文档(.ray),发光面直径为 2.5 mm,光通量设为 131 lm。透镜材料为聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),其折射率为 1.4938。

参数设定完毕后,借助 MATLAB 数值计算得到大角度 LED 透镜初始结构的内外曲面数据。将该数据导入到 SolidWorks 软件修补并旋转,建立大角度 LED 透镜初始结构的 3D 实体模型。再将该模型导入到 LightTools 软件进行光线追迹,获得透镜初始结构模型的目标面照度分布图及数据。对这些数据插值计算获得各个目标面网格单元相对应的照度值,进而求得相对应的反馈优化系数。求得反馈优化系数后,借助 MATLAB 进行大角度 LED 透镜的第一次反馈优化。第一次透镜反馈优化后,便可获得透镜新的内外曲面数据。按照上述步骤重新建模并仿真,得到新的目标面照度分布数据以及新的反馈优化系数,再次进入下一步反馈优化,如此依次循环直至获得满意结果为止。

在进行透镜反馈优化时,每优化一次,边缘的目标面网格单元半径会扩大。当边缘的目标面网格单元半径扩大到  $1.5H_w$  时,结束反馈优化。一方面,超过半径  $1.5H_w$  范围内的照度值相对弱得多,可以忽略不计;另一方面,透镜的尺寸随着优化次数的增加而增大,会增加菲涅耳损耗,使反馈优化逐渐失去作用。因此,本研究只将反馈优化后的目标面照度分布做到与期望照度分布相接近。图 4(a)和(b)分别为反馈优化后的大角度 LED 透镜内外曲面数据和透镜 3D 模型。

将反馈优化后的大角度 LED 透镜导入 LightTools 软件进行蒙特卡罗光线追迹,可得其在目标面上的照度分布,如图 5(a)所示。图 5(b)为目标面上沿 X 轴和 Y 轴的照度分布曲线。对比图 3 和图 5(b)可知,经

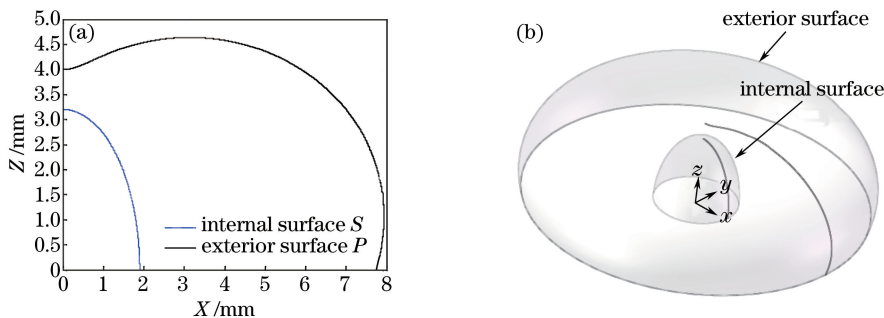


图 4 (a) 优化后内外曲面的曲线;(b)优化后透镜的 3D 实体模型

Fig. 4 (a) Curves of the optimized internal and exterior surface; (b) 3D model of the lens after optimization

过反馈优化后的目标面照度分布接近于期望照度分布。图 6 为大角度 LED 透镜的相对光强分布,经过优化后大角度透镜的辐射角度为  $155^\circ$ ,光强分布为蝙蝠翼型。

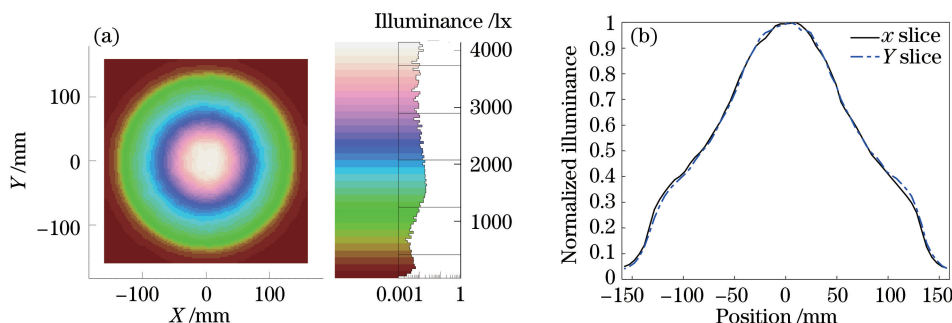


图 5 优化后目标面上的(a)照度分布和(b)归一化照度分布

Fig. 5 (a) Illuminance distribution and (b) normalized illumination distribution on the target plane after optimization

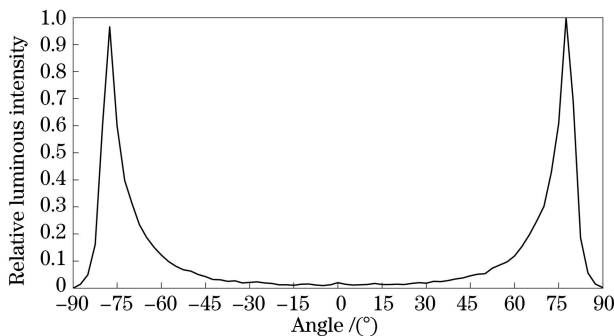
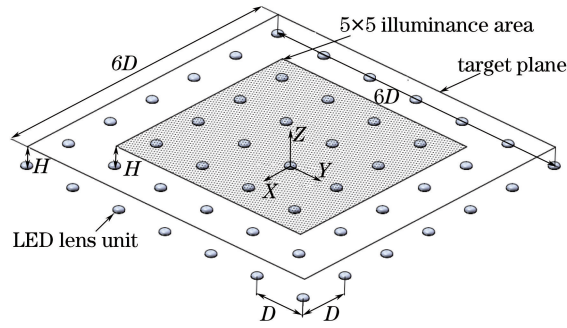


图 6 大角度 LED 透镜的相对光强分布

Fig. 6 Relative luminance intensity distribution of the LED lens with large view angle

## 5 超薄直下式 LED 平板灯的仿真与分析

设计出用于超薄直下式 LED 平板灯的大角度透镜后,因为其照度分布与期望的照度分布仍有差异,还需对该透镜对 LED 平板灯的实际效果做进一步验证。以发光面尺寸为  $560\text{ mm} \times 560\text{ mm}$  的直下式 LED 平板灯为例,共做了 9 组直下式 LED 平板灯的目标面照度均匀度仿真实验。其中,将目标面高度  $H$  分别设为 20, 25, 30 mm, 并设置了  $8 \times 8$ ,  $7 \times 7$  和  $6 \times 6$  的 LED 方形阵列,对应阵列间距  $D$  分别设置为 75, 82, 96 mm ( $D_w$ )。为方便简述,将加装了大角度 LED 透镜的方形 LED 阵列称为 LED 透镜单元阵列。为便于仿真分析,将直下式 LED 平板灯的模拟简化为对 LED 透镜单元阵列的模拟,即不考虑灯箱及扩散板。在简化模拟中,LED 阵列的边缘光缺少灯箱反射,边缘照度会相应减弱。故在照度均匀度计算时,只考虑  $6 \times 6$ 、 $7 \times 7$  和  $8 \times 8$  LED 阵列对应中间的  $4 \times 4$ 、 $5 \times 5$  以及  $6 \times 6$  LED 阵列照明单元<sup>[19]</sup>。图 7 为  $7 \times 7$  LED 透镜单

图7  $7 \times 7$  LED 透镜单元阵列与  $5 \times 5$  照明单元示意图Fig. 7 Schematic of  $7 \times 7$  LED lens unit array and  $5 \times 5$  illumination unit

元阵列和其对应的  $5 \times 5$  LED 阵列照明单元示意图, 其中  $6 \times 6$  和  $8 \times 8$  LED 阵列及其对应的  $4 \times 4$  和  $6 \times 6$  LED 阵列照明单元可做同样类比。

根据国家 LED 平板灯照明标准<sup>[15]</sup>, LED 平板灯的目标面照度均匀度必须达到 0.8 以上。研究中照度均匀度  $U$  采用照度最小值  $E_{\min}$  除以照度最大值  $E_{\max}$ , 照度的最值从仿真接收面上得到的各个网格点照度值中提取。另外, 为了使光斑过渡更加柔和自然, 且使 LED 阵列在目标面上的光场分布更加柔和均匀, 研究在透镜底部做了微结构处理。

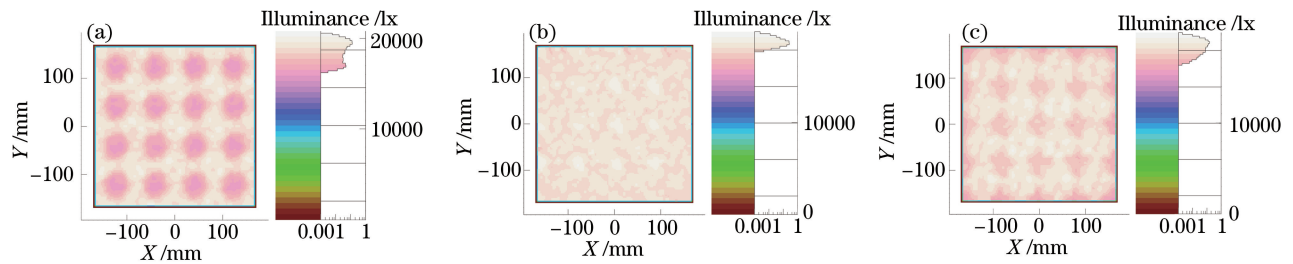


图8  $7 \times 7$  LED 透镜单元阵列下的目标面照度分布图。(a)  $H=20$  mm,  $D=82$  mm,  $U=0.7743$ ; (b)  $H=25$  mm,  $D=82$  mm,  $U=0.8756$ ; (c)  $H=30$  mm,  $D=82$  mm,  $U=0.7901$

Fig. 8 Illuminance distributions of the  $7 \times 7$  LED lens unit array on the target plane. (a)  $H=20$  mm,  $D=82$  mm,  $U=0.7743$ ; (b)  $H=25$  mm,  $D=82$  mm,  $U=0.8756$ ; (c)  $H=30$  mm,  $D=82$  mm,  $U=0.7901$

目标面高度  $H$  分别为 20, 25, 30 mm 时,  $7 \times 7$  LED 透镜单元阵列的目标面照度分布图如图 8 所示。在目标面高度  $H$  为 25 mm 时,  $7 \times 7$  LED 透镜单元阵列的照度均匀度最好, 均匀度值达到了 0.8756, 明显高于 0.8, 达到了国家规定的 LED 平板灯照明标准。

目标面高度  $H$  分别为 20, 25, 30 mm 时,  $6 \times 6$  LED 透镜单元阵列的目标面照度分布图如图 9 所示。在目标面高度  $H$  为 30 mm 时,  $6 \times 6$  LED 透镜单元阵列的照度均匀度最好, 均匀度值为 0.8082, 恰好达到国家标准。

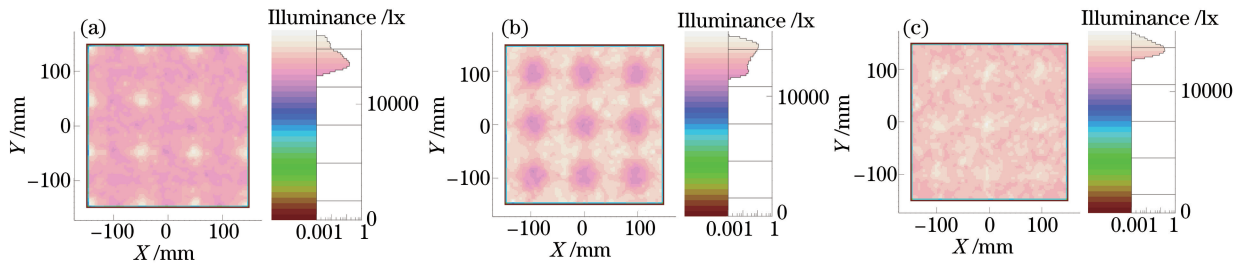


图9  $6 \times 6$  LED 透镜单元阵列下的目标面照度分布图。(a)  $H=20$  mm,  $D=96$  mm,  $U=0.7584$ ; (b)  $H=25$  mm,  $D=96$  mm,  $U=0.7397$ ; (c)  $H=30$  mm,  $D=96$  mm,  $U=0.8082$

Fig. 9 Illuminance distributions of the  $6 \times 6$  LED lens unit array on the target plane. (a)  $H=20$  mm,  $D=96$  mm,  $U=0.7584$ ; (b)  $H=25$  mm,  $D=96$  mm,  $U=0.7397$ ; (c)  $H=30$  mm,  $D=96$  mm,  $U=0.8082$

目标面高度  $H$  分别为 20, 25, 30 mm 时,  $8 \times 8$  LED 透镜单元阵列的目标面照度分布图如图 10 所示。在目标面高度  $H$  分别为 25 mm 和 30 mm 时,  $8 \times 8$  LED 透镜单元阵列的照度均匀度都在 0.8 以上, 尤其是高度  $H$  为 25 mm 时, 其目标面上的照度均匀度最佳, 均匀度值为 0.8563。

从图 8~图 10 的分析可以发现: 在目标面高度  $H=20$  mm 时,  $6 \times 6, 7 \times 7, 8 \times 8$  LED 透镜单元阵列的照度均匀度都低于 0.8; 在目标面高度  $H=25$  mm 时,  $7 \times 7$  LED 透镜单元阵列的照度均匀度明显高于  $6 \times 6$  和  $8 \times 8$  LED 透镜单元阵列的照度均匀度, 均匀度值达到了 0.8756; 在目标面高度  $H=30$  mm 时,  $6 \times 6$  和  $8 \times 8$  LED 透镜单元阵列的照度均匀度都高于 0.8。

另外, 在目标面高度  $H$  分别为 25 mm 和 30 mm 时, 目标面上的照度均匀度并没有随着 LED 透镜单元间距  $D$  的增大而单调减小。有研究表明<sup>[20]</sup>, 在蝙蝠翼型光强分布的 LED 透镜中, 目标面照度均匀度不会随 LED 间距的增大而单调减小, 而会随着其 LED 间距的增大而出现波浪式下降。研究中透镜是在目标面高度  $H=25$  mm 时进行反馈优化, 且光斑的照度分布与优化的目标照度分布仍有差异, 故而不符合朗伯型光源阵列的照度分布均匀性规律<sup>[9]</sup>。

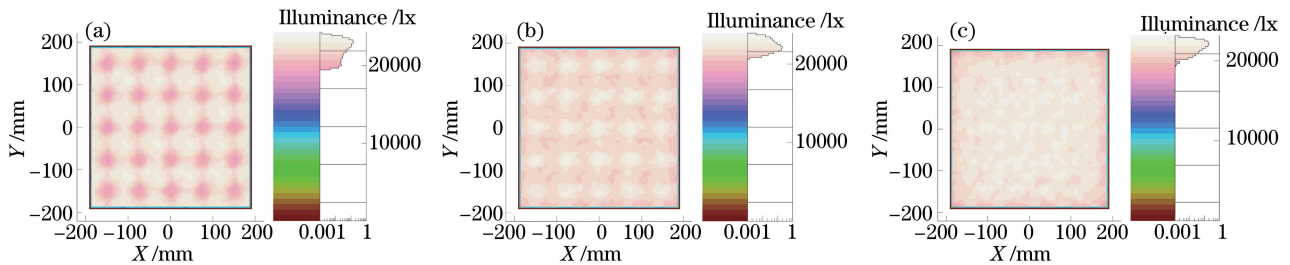


图 10  $8 \times 8$  LED 透镜单元阵列下的目标面照度分布图。(a)  $H=20$  mm,  $D=75$  mm,  $U=0.7970$ ; (b)  $H=25$  mm,  $D=75$  mm,  $U=0.8563$ ; (c)  $H=30$  mm,  $D=75$  mm,  $U=0.8320$

Fig. 10 Illuminance distributions of the  $8 \times 8$  LED lens unit array on the target plane. (a)  $H=20$  mm,  $D=75$  mm,  $U=0.7970$ ; (b)  $H=25$  mm,  $D=75$  mm,  $U=0.8563$ ; (c)  $H=30$  mm,  $D=75$  mm,  $U=0.8320$

比较以上 9 组 LED 透镜单元阵列的照度均匀度,  $6 \times 6$  LED 透镜单元阵列在高度  $H=25$  mm 的目标面照度均匀度最差, 而  $7 \times 7$  LED 透镜单元阵列在高度  $H=25$  mm 的目标面照度均匀度最好。为验证上述优化设计的 LED 透镜的效果, 研究还模拟仿真了传统直下式 LED 平板灯(不加装透镜), 相邻 LED 间距  $D=52$  mm, 目标面高度  $H=52$  mm, 以  $11 \times 11$  的 LED 方形阵列进行排布, 其照度均匀度情况见表 1。由于仿真时主要考虑目标面的照度均匀度, 且每个光源的光通量都设定为 131 lm, 所以表 1 中两阵列的目标面照度值会差别明显。由表 1 可知, 所设计的  $7 \times 7$  LED 透镜单元阵列在高度  $H=25$  mm 的目标面照度均匀度要优于  $11 \times 11$  LED 方形阵列的传统直下式 LED 平板灯的目标面照度分布均匀度, 研究所优化设计的透镜在保证平板灯的目标面照度均匀度的同时, 还将目标面高度缩小到了 25 mm。

表 1 不同设计条件下的平板灯的照度均匀度

Table 1 Illumination uniformity for panel light with different design conditions

Type	Distance $D$ /mm	Height $H$ /mm	Minimum	Maximum	Illumination uniformity $U(E_{\min}/E_{\max})$
			illumination $E_{\min}/\text{lx}$	illumination $E_{\max}/\text{lx}$	
$7 \times 7$ LED lens unit array	82	25	17329.0685	19790.7747	0.8756
$11 \times 11$ LED array	52	52	42766.6771	49589.7516	0.8624

## 6 结 论

基于网格划分法和边缘光线理论, 设计了一款自由曲面结构的大角度 LED 透镜, 其内曲面为椭圆型曲面, 外曲面为自由曲面。以朗伯型发光的 LED 在 96 mm 高度上的目标面照度分布作为期望照度分布, 对大角度 LED 透镜的自由外曲面进行反馈优化, 使 LED 在高度为 25 mm 的目标面上形成具有期望照度分布的光场。结合发光面尺寸为  $560 \text{ mm} \times 560 \text{ mm}$  的直下式 LED 平板灯结构, 将目标面高度分别设置为 20, 25, 30 mm, 将方形 LED 阵列间距分别设置为 75, 82, 96 mm, 配合优化后的大角度 LED 透镜模拟分析了 9 组直



下式 LED 平板灯的目标面照度均匀性, 研究表明: 在 LED 阵列间距为 82 mm 和目标面高度为 25 mm 时, LED 透镜单元阵列在目标面上的照度均匀性最好, 均匀度值达到 0.8756。相较于当前市面上厚度 40 mm 左右的直下式 LED 平板灯, 本研究采用反馈优化法所获得的大角度 LED 透镜使直下式 LED 平板灯的目标面均匀度高于国家标准的同时, 还将目标面高度缩小到 25 mm, 该结果对超薄直下式 LED 平板灯的进一步研究和应用拓展具有一定的参考意义。

### 参 考 文 献

- [1] Pan Hao, Chen Guoqing, Du Bojun. 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.
- [2] Wu R, Hua H. Direct design of aspherical lenses for extended non-Lambertian sources in three-dimensional rotational geometry[J]. *Optics Express*, 2016, 24(2): 1017-1030.
- [3] Cao Yanting, Chen Chao, Liang Pei, *et al.* Effect of different packaging of phosphor on the encapsulation efficiency of multi-chips LED[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(7): 0723003.  
曹艳亭, 陈超, 梁培, 等. 荧光粉封装方式对多芯片阵列 LED 封装效率的影响[J]. *光子学报*, 2016, 45(7): 0723003.
- [4] Yan Wenping, Guo Zhenning, Lin Jieben, *et al.* LED street lamp lens with high energy efficiency utilization based on reverse optimization design[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 0422008.  
颜稳萍, 郭震宁, 林介本, 等. 基于逆向优化设计的高能量利用率 LED 路灯透镜[J]. *光学学报*, 2015, 35(4): 0422008.
- [5] Lai Liping, Zhuang Qiren, Liu Shiwei, *et al.* Design of freeform lens for uniform illumination on panel of LED flat light [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 561-566.  
赖丽萍, 庄其仁, 刘士伟, 等. 用于 LED 平板灯面板均匀照明的自由曲面透镜设计与实现[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(2): 561-566.
- [6] Wu H, Zhang X M, Ge P. Design method of a light emitting diode front fog lamp based on a freeform reflector[J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 72: 125-133.
- [7] Yan Wenping, Guo Zhenning, Lin Jieben, *et al.* Design of double freeform-surface lens with large view angle for uniform illumination of the near-field[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(1): 0122002.  
颜稳萍, 郭震宁, 林介本, 等. 实现近场均匀照明的双自由曲面大角度透镜设计[J]. *光子学报*, 2015, 44(1): 0122002.
- [8] Xiao Xiao, Wen Shangsheng, Chen Jianlong, *et al.* Optical performance of secondary lightguide-diffusive component in direct LED backlight module[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2013, 24(4): 679-686.  
肖箫, 文尚胜, 陈建龙, 等. 直下式 LED 背光源模组第二扩散导光板光学特性分析[J]. *光电子·激光*, 2013, 24(4): 679-686.
- [9] Chen Xinrui, Han Jinghua, Li Hongru, *et al.* Optimal design of LED arrays for near-field uniform illumination[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(1): 122-127.  
陈新睿, 韩敬华, 李洪儒, 等. 基于近场均匀照明的 LED 阵列的优化设计[J]. *应用光学*, 2014, 35(1): 122-127.
- [10] Hu R, Gan Z, Luo X, *et al.* Design of double freeform-surface lens for LED uniform illumination with minimum Fresnel losses[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, 124(19): 3895-3897.
- [11] Pan Shifa, Guo Zhenning, Yan Wenping, *et al.* Design and simulation of freeform-surface large angle lens for LED advertising light boxes[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(2): 0222002.  
潘诗发, 郭震宁, 颜稳萍, 等. 用于 LED 广告灯箱的自由曲面大角度透镜设计与仿真[J]. *光子学报*, 2016, 45(2): 0222002.
- [12] Shi Chenyang, Wen Shangsheng, Chen Yingcong. Study on curved surface LED array illumination problem based on Taguchi method[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, 36(3): 348-354.  
史晨阳, 文尚胜, 陈颖聪. 基于 Taguchi 方法的曲面 LED 阵列照度问题研究[J]. *发光学报*, 2015, 36(3): 348-354.
- [13] Wang Kai. Free-form optics study for high power LED packages and applications[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011: 22-76.

- 王恺. 大功率 LED 封装与应用的自由曲面光学研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011: 22-76.
- [14] Whang J W, Chen Yiyung, Teng Yuanting. Designing uniform illumination systems by surface-tailored lens and configurations of LED arrays[J]. Journal of Display Technology, 2009, 5(3): 94-103.
- [15] GB/T 31831-2015, Technical requirements for application of LED indoor lighting [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- GB/T 31831-2015, LED 室内照明应用技术要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [16] Yan Wenping, Guo Zhenning, Lin Jieben, *et al.* Direct-down LED panel light design for uniform illumination[J]. Journal of Optoelectronics•Laser, 2014, 25(10): 1878-1885.
- 颜稳萍, 郭震宁, 林介本, 等. 直下式 LED 平板灯的均匀照明设计[J]. 光电子·激光, 2014, 25(10): 1878-1885.
- [17] 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): 0222003.
- 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): 0222003.
- [18] Qian Keyuan. Near field optical modeling of LED and design optimization for direct-type backlight optical system[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 35(5): 0522001.
- 钱可元. LED 近场光学模型与直下式背光源透镜的设计优化[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0522001.
- [19] Wang K, Wu D, Qin Z, *et al.* New reversing design method for LED uniform illumination[J]. Optics Express, 2011, 19(S4): A830-A840.
- [20] Qin Z, Wang K, Chen F, *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.