

doi: 10.3788/gzxb20164502.0222002

# 用于 LED 广告灯箱的自由曲面大角度透镜设计与仿真

潘诗发, 郭震宁, 颜稳萍, 廖炫, 甘汝婷, 林木川

(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)

**摘 要:** 基于能量守恒定律和网格划分法, 设计了一种实现 LED 阵列近场均匀照明的自由曲面大角度透镜, 其内曲面为椭圆形曲面、外曲面为自由曲面. 根据能量守恒定律建立映射关系, 对光源和目标面进行网格划分, 并结合折射定律, 迭代求解出外自由曲面数据点. 分析了椭圆形内曲面的长短轴比值对透镜菲涅耳损耗和照度均匀性的影响. 结果表明: 短轴与长轴的比值在 0.35~0.55 时, 出光效率和照度均匀性最佳. 通过反馈优化法对 LED 阵列进行优化, 重新划分网格, 使叠加部分光照度减弱, 提高了整体光照均匀性. 仿真结果表明: 仅对透镜外自由曲面的面型数据点进行优化, 在目标面高度为 80 mm, 透镜出光角度为 157° 时, 优化后的整体光照均匀度由优化前的 0.40 提高到 0.84, 出光效率大于 0.9.

**关键词:** LED; 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(2016)02-0222002-7

## Design and Simulation of Freeform-surface Large Angle Lens for LED Advertising Light Boxes

PAN Shi-fa, GUO Zhen-ning, YAN Wen-ping, LIAO Xuan, GAN Ru-ting, LIN Mu-chuan  
(Key Laboratory of Light Propagation and Transformation of Fujian Province, College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China)

**Abstract:** Based on the law of conservation of energy and the mesh generation method, the freeform-surface large angle lens was designed to achieve a near-field uniform illumination of LED array, whose inner surface is elliptical, the outer is freeform-surface. According to the mapping relations established by the law of conservation of energy, the mesh generation of the light source and the target surface was realized. Then, the refraction law was combined with the iteration to solve the freeform-surface data points. We analyzed the influence of the short axis and long axis ratio of the elliptical inner surface on the lens Fresnel loss and uniform illumination. The researches show that it can be obtained a high light efficiency and an optimum uniformity of illumination when the ratio is in the range of 0.35~0.55. Through the feedback optimization method to optimize the LED array and redivide the grid, the light intensity superimposed part is weakened and the overall illumination uniformity is improved. The simulation results show that when the height of target plane is 80mm and light angle is 157°, the illumination uniformity can be increased from 0.40 to 0.84 after the optimization of the freeform-surface data points, and the efficiency is greater than 0.9.

**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)和光传输与变化福建省重点实验室开放课题(No. 2014201)资助

第一作者: 潘诗发(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为半导体照明光学设计. Email: 171107678@qq.com

导师: 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: 2015-08-22; 录用日期: 2015-12-07

## 0 引言

相比传统照明光源,发光二极管(Light Emitting Diode, LED)具有耗电量少、发光效率高、使用寿命长、环保节能、体积小、重量轻、安装维护简单及可靠性高等优点,被广泛应用于广告灯箱、平板灯和显示器等设计中<sup>[1-3]</sup>.

传统户外广告灯箱多采用荧光灯作为光源,但荧光灯在安装维护和使用寿命方面存在缺陷. LED光源是荧光灯照明的理想替代品,通常采用两种方法给大型双面广告灯箱提供光源,第一种是使用两块网点相对放置的导光板,采用侧入式入光方式,LED光源经过网点散射后从两个出光面射出,实现双面出光,但是这种方法需要导光板,其结构复杂、成本高、耦合效率低,且当制作大尺寸广告箱时,使用导光板的方式,光照均匀度达不到要求. 第二种是传统直下式入光方式,将多个LED紧密排布在一起以叠加方式来实现照明,但该方式容易造成大量的热量积聚,稳定性差且成本高<sup>[3-5]</sup>.

在LED阵列照度均匀性研究中, I. Moreno等<sup>[6]</sup>得出LED阵列近场照明的解析式,并根据光源的出光角,给出了LED间距与高度的约束条件,即当距高比较小时,目标面的照度均匀性可以达到一个较高值;陈新睿等<sup>[7]</sup>分别对三角形、环形、蜂窝型LED阵列进行研究,结果表明三角形阵列照度分布均匀的范围比较广,适合在照射面较大的照射领域;Qin等<sup>[8]</sup>改进I. Moreno方法,采用大角度透镜,实现近场均匀照明;Hu等<sup>[9]</sup>计算出能实现均匀照明的配光曲线,并根据配光曲线设计了一种大角度透镜.

本文基于边缘光线理论和网格划分法,采用内曲面为椭圆型曲面、外曲面为自由曲面的透镜对LED光源光线控制,为提高LED阵列的照明均匀性,对网格重新划分,让叠加部分的光照度减弱,最后仿真得到照明均匀性更好和出光效率更高的LED阵列.

## 1 透镜设计原理

要实现LED阵列的近场大角度均匀照明,需要对光线进行偏折,但仅靠传统的单自由曲面透镜,会在自由曲面上发生全反射以及产生菲涅耳损耗,影响出光效率和照明均匀性,因此本文采用内曲面I为椭圆形曲面、外曲面O为自由曲面的结构透镜对出光角度和出光效果进行改进和优化. 内曲面I先将LED的光线发散,再通过外自由曲面O来控制光线的偏折,使之照射到目标区域<sup>[9]</sup>.

### 1.1 原理

假设LED为Lambert型点光源,其光强分布<sup>[6]</sup>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

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

将LED的光能量平均分为N份,每个角度里的光通量为

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

式中, $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i (i=1, 2, \dots, N)$ 为等光通量角度的大小,联立式(1)~(3)求出 $\theta_i$ 的角度.

LED阵列采用三角形排列方式,如果每个LED经过透镜后形成一个均匀圆形光斑,则光斑叠加部分照度较高,未叠加部分照度低,这样影响整体照度均匀性.图1(b)为采用三角形阵列排列时,光斑在目标面上的一个单元里的分布示意图.在一个LED阵列单元里A、B、C位置各放置一个LED光源,如图(a),以A点为例,LED的照度分为两部分,第一部分,在半径小于 $R_1$ 范围内,其目标面网格以相同等份的面积进行划分,对应LED光源按相同等份光通量划分的角度,等量光通量的光入射在目标面面积相同的网格内,即照度分布均匀;第二部分,网格面积以一定面积比例系数来划分,网格面积逐渐变大,而在每个网格面积内的光通量相等,即在A、B、C的光斑相互叠加的地方,其照度值是递减的.

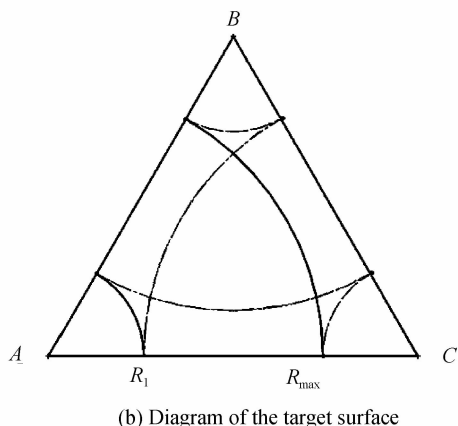
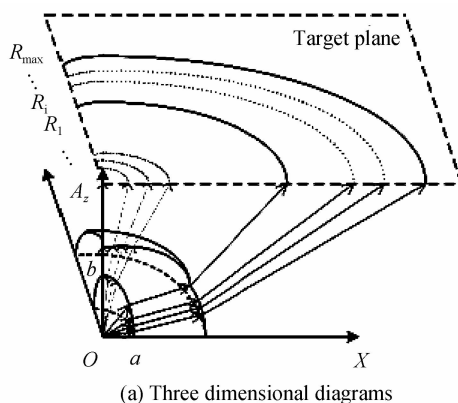


图1 三角形阵列的示意图

Fig.1 Schematic diagram of triangular array

LED光源经过自由曲面透镜后不是一个圆形的均匀光斑,而是一个在 $R_1$ 范围内照度均匀的光斑,而后照度值递减至零.因此,对于目标面的网格划分也不同于以往将圆形目标面面积等分为 $N$ 份,对于 $R_i < R_1$ ,即

$$\int_{r_i}^{r_{i+1}} E_0 2\pi r dr = \frac{E_0 \pi R_1^2}{N_1} \quad (4)$$

式中, $i=1,2,3,\dots,N_1$ , $E_0$ 为平均照度;当 $R_i > R_1$ ,则

$$\int_i^{r_{i+1}} E(r_i) \cdot 2\pi r dr = \alpha_i \int_{r_{i+1}}^{r_{i+2}} E(r_{i+1}) \cdot 2\pi r dr \quad (5)$$

式中, $\alpha_i$ 为面积比例系数, $\alpha_i$ 越小,划分的面积变大越快,照度值递减越快,另外根据能量守恒定律,则

$$\int_0^R E_0 2\pi r dr + \int_R^R E(r) 2\pi r dr = \Phi_{total} \quad (6)$$

由式(4)~(6)可得到各个与光源网格对应的目标面半径,并且在后文的反馈优化中,将面积比例系数 $\alpha_i$ 和各个目标面半径作为优化对象.

如图2,以 $O$ 点为原点, $Z$ 轴为中心轴,设计过程中将LED视为朗伯型点光源,光线从光源位置 $O$ 点发射,先经过内曲面 $I$ 折射,再经过外自由曲面 $O$ 折射至目标区域<sup>[12]</sup>.

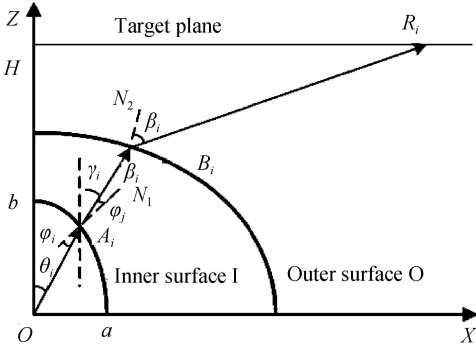


图2 透镜设计原理

Fig. 2 The principle diagram of lens

内曲面 $I$ 为椭圆,其中椭圆方程为

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1 \quad (7)$$

式中, $a < b$ ,即沿着 $Z$ 轴方向为长轴, $X$ 轴方向为短轴方向,其中内曲面 $(x, z)$ 满足

$$\tan \theta_i = \frac{x}{z} \quad (8)$$

得到内曲面后,根据边缘光线理论设计外自由曲面 $O$ ,将内曲面 $I$ 折射的光线进一步折射至目标区域.根据折射定律

$$\begin{cases} n_1 \sin \varphi_i = n_2 \sin \varphi_j \\ n_2 \sin \beta_i = n_1 \sin \beta_j \end{cases} \quad (9)$$

其向量形式为

$$\begin{cases} n_1 \frac{\mathbf{OA}}{\mathbf{OA}} \times \mathbf{N}_1 = n_2 \frac{\mathbf{AB}}{\mathbf{AB}} \times \mathbf{N}_1 \\ n_2 \frac{\mathbf{AB}}{\mathbf{AB}} \times \mathbf{N}_2 = n_1 \frac{\mathbf{BR}}{\mathbf{BR}} \times \mathbf{N}_2 \end{cases} \quad (10)$$

根据光源发光角度 $\theta_i$ 与目标面半径 $R_i$ 的对应关系,迭代求解出外自由曲面 $O$ 的曲面数据点,如图2,在 $XZ$ 平面中, $\theta_0 \sim \theta_i$ 所对应的光线经过内外曲面的折射后,对应于目标面上的点 $R_0 \sim R_i$ .设 $\theta_0$ 对应的初始光线为沿着 $z$ 轴正向传播的光线,在它的传播路径上选择一个初始点 $B_0(0,0,z_0')$ 作为光学表面起始点,初始光线经过光学表面的折射后对应于目标面上的点 $R_0(r_0,0,H)$ ,由这两点的坐标可以求出光线在外曲面的入射矢量和出射矢量,由折射定律求出自由曲面初始点的法向矢量为

$$\mathbf{N}_0 = n \frac{\mathbf{A}_0 \mathbf{B}_0}{\mathbf{A}_0 \mathbf{B}_0} - \frac{\mathbf{B}_0 \mathbf{R}_0}{\mathbf{B}_0 \mathbf{R}_0} \quad (11)$$

式中, $n$ 为透镜所用材料折射率,由 $\mathbf{N}_0$ 和 $B_0$ 可以求出切平面 $T_0$ ; $\theta_1$ 对应的光线经过传播与切平面 $T_0$ 的交点位置 $B_1(0,0,z_1')$ ,结合目标面上的对应点 $R_1(r_1,0,H)$ 求出出射矢量,由折射定律求出自由曲面初始点的法向矢量为

$$\mathbf{N}_1 = n \frac{\mathbf{A}_1 \mathbf{B}_1}{|\mathbf{A}_1 \mathbf{B}_1|} - \frac{\mathbf{B}_1 \mathbf{R}_1}{|\mathbf{B}_1 \mathbf{R}_1|} \quad (12)$$

根据上述步骤迭代,可以求出外自由曲面的离散数据点 $B_0, B_1, \dots, B_N$ 及每一点对应的法向矢量 $\mathbf{N}_0, \mathbf{N}_1, \dots, \mathbf{N}_N$ , $N$ 值越大,计算的外自由曲面与预期目标曲面越接近.

## 1.2 $a/b$ 值对菲涅耳损耗的影响

根据菲涅耳公式,光线在内曲面 $I$ 与外曲面 $O$ 上的菲涅耳损耗为<sup>[9]</sup>

$$f_{1i} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\sin^2(\varphi_i - \varphi_j)}{\sin^2(\varphi_i + \varphi_j)} + \frac{\tan^2(\varphi_i - \varphi_j)}{\tan^2(\varphi_i + \varphi_j)} \right] \quad (13)$$

$$f_{2i} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\sin^2(\beta_i - \beta_j)}{\sin^2(\beta_i + \beta_j)} + \frac{\tan^2(\beta_i - \beta_j)}{\tan^2(\beta_i + \beta_j)} \right] \quad (14)$$

则对于一条通过透镜的光线,其总的菲涅耳损耗为

$$f(\theta_i) = I(\theta_i) [f_{1i} + (1 - f_{1i}) \cdot f_{2i}] \quad (15)$$

计算所有的光线的菲涅耳损耗为

$$f_{total} = \sum_{i=1}^N \int_{\theta_i}^{\theta_{i+1}} f(\theta) \sin \theta d\theta \quad (16)$$

$$\eta = \frac{f_{total}}{\Phi} = \frac{f_{total}}{2\pi I_0} \quad (17)$$

设置面积比例系数 $\alpha_i$ 为1,短轴 $a$ 为2 mm,然后按照一定的比例取 $b$ 的值,根据式(14)和式(15),利用MATLAB编写程序计算相应的菲涅耳损耗,如图3,内曲面椭圆方程的长短轴 $a, b$ 参数的设置对自由曲面透镜的菲涅耳损耗有很大的影响,随着 $a/b$ 比值的增大,自由曲面透镜的菲涅耳损耗变大,由于菲涅耳损耗与部分光线发生全反射,使得照射到目标区域的光能量减弱了,因此其照度均匀性也随着 $a/b$ 比值的增大而降低.

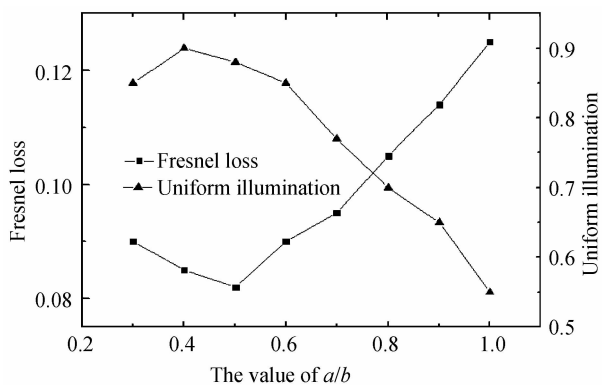
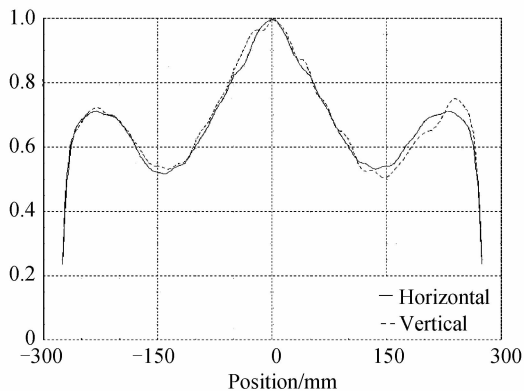
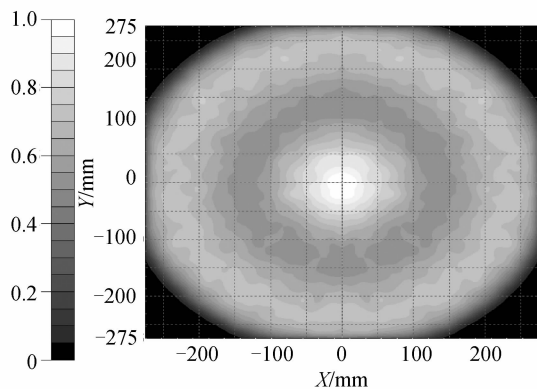


图3 菲涅耳损耗的计算结果

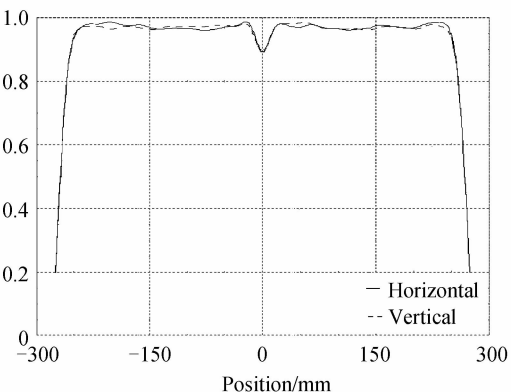
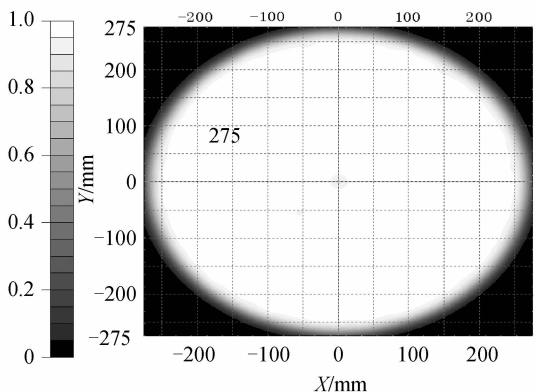
Fig. 3 Calculation results of Fresnel lose

图4为当 $a/b$ 的比值为1, $a/b$ 的比值为4/9时的光学模拟仿真结果,透镜材料采用聚甲基丙烯酸甲酯(Polymethylmethacrylate, PMMA),其折射率为1.4938,仿真过程中考虑透镜的材料吸收和菲涅耳损耗, $a/b$

比值为1时,即内曲面为圆形,其照度均匀性为0.55,出光效率为82%,不能满足近场大角度均匀照明的要求,而随着 $a/b$ 比值的减小, $a/b$ 的比值为4/9时,即内曲面变为椭圆形,其照度均匀性0.88,出光效率为91.6%,均匀性和出光效率都得到了很大的提高,结果与菲涅耳损耗的计算结果相符。 $a/b$ 比值的减小实质是内椭圆曲面的离心率的增大,入射到内曲面的光线的入射角 $\varphi_i$ 增大,光线经过内曲面的后的偏折角度 $\varphi_i - \varphi_j$ 也增大,分担外自由曲面偏折光线的压力;然而,入射角 $\varphi_i$ 增大引起光线在内曲面上的菲涅耳损耗增大,所以 $a/b$ 比值小于0.4时,在内曲面上的损耗变大,影响照度均匀性与出光效率.并且,由于短轴 $a$ 要大于一定值,便于放置LED芯片,如果 $a/b$ 比值太小,会造成透镜尺寸很高,不利于实际应用.因此 $a/b$ 比值在0.35~0.55时,出光效率和照度均匀性最佳.



(a) Illumination distribution of  $a/b=1$



(b) Illumination distribution of  $a/b=4/9$

图4 照度分布图

Fig. 4 Illumination distribution

## 2 设计实例与分析

### 2.1 设计实例的模拟仿真

传统的 $3\text{ m} \times 2\text{ m}$ 双面出光的大型户外广告灯箱,采用雷士照明公司的NFL20-T4直管荧光灯作为光源,每根荧光灯的功率为15.6 W,一共12根,总功率

为187.2 W,满足光照要求.如图5,根据户外广告照明标准,对于大型户外广告灯箱,其照度标准为 $400\text{ lx} \sim 1\ 200\text{ lx}$ ,照度均匀度需要满足0.65以上,如图6,用LED光源来替代,按照三角形阵列的排布方式,目标面距离为80 mm,一共用了38颗LED光源,LED光源采用欧司朗公司的LED光源,型号为GW CSSRM1.

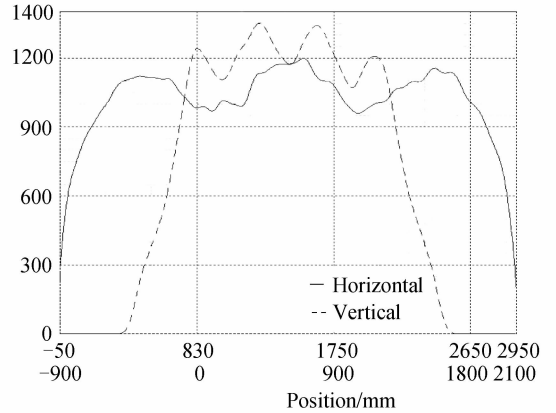
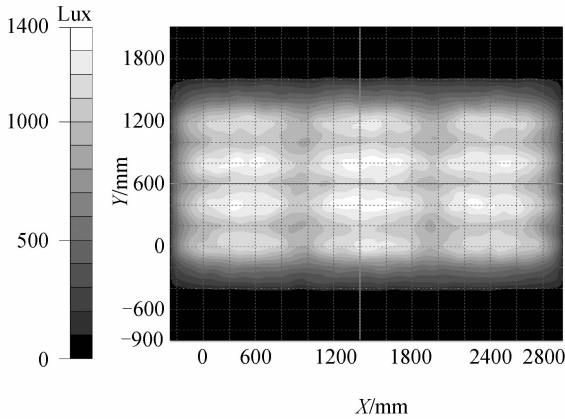
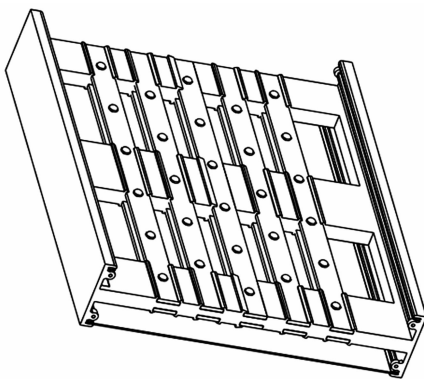
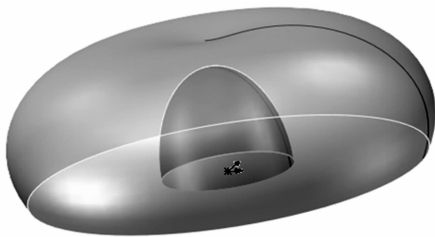


图5 采用荧光灯光源的目标面照度分布

Fig. 5 The distribution of target surface illumination with fluorescent lamp



(a) Schematic diagram of LED array



(b) 3D model of lens

图6 LED阵列排布和透镜3D模型

Fig. 6 Schematic diagram of LED array and 3D model of lens

CC,其典型功率为2 W,典型光通量为178 lm,显色指数为90,满足户外广告灯箱照明标准<sup>[15]</sup>,整个LED灯箱的总功率为152 W,相较于荧光灯光源,节能效果明显。

根据图6(a)LED阵列排布方式,目标面为3 m×2 m的矩形,目标面高H为80 mm,光斑的半径 $R_1 = R_{max} = 220$  mm,网格划分时,面积比例系数 $\alpha_i$ 为1,透镜初始高为6 mm,设置 $a = 2.25$  mm, $a/b$ 的比值为4/9,由此,求解出内外曲面的离散点数据,导入到Solidworks中得到了自由曲面大角度透镜的3D模型,如图6(b)。

将得到的自由曲面透镜模型导入到TracePro中,设置透镜材料为PMMA,透镜材料的折射率 $n$ 为1.493 8,光源发光面积3 mm×3 mm,通过光学模拟仿真,其结果如图7,在这种排列方式下,利用自由曲面来实现LED光源的大角度近场均匀照明;在三角形阵列的排列方式中,均匀光斑相互叠加的部分光照度较大,未叠加的部分光照度小,所以整体均匀性低,均匀性只有0.40,因此需要进一步优化。

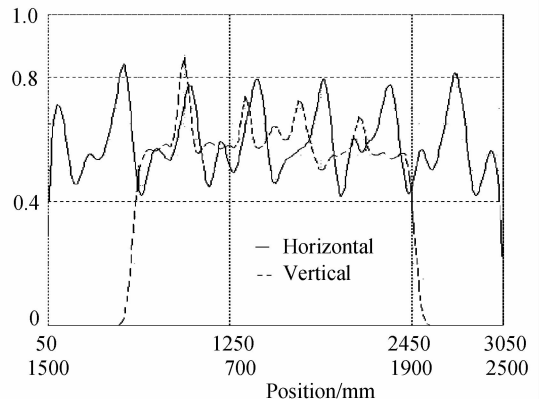
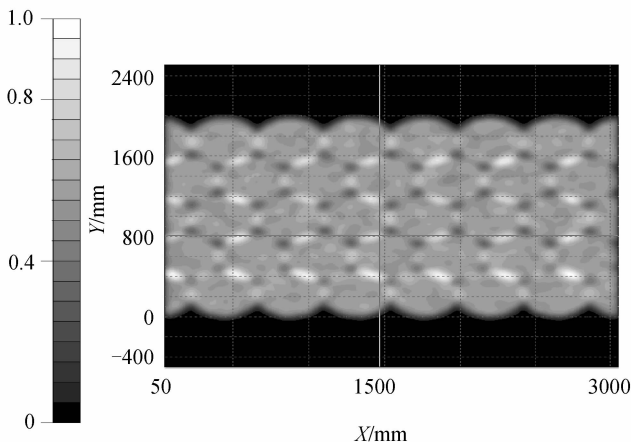


图7 LED阵列在目标面上的照度分布图

Fig. 7 Illumination distribution on the target surface of LED array

## 2.2 反馈优化自由曲面

反馈优化法<sup>[10-13]</sup>是先利用光学软件模拟分析目标面的照度分布情况与理论预期照度值的差距,再重新划分目标面网格,使得目标照度分布趋于理想值,本文反馈优化面积比例系数为 $\alpha_i$ ,重新划分目标网格的单元面积,重新划分网格后的半径为

$$R_{ji} = \sqrt{\frac{\alpha_i S_{(j-1)i}}{\pi}} \quad (18)$$

式中, $j$ 表示优化的次数,系数 $\alpha_i$ 为优化系数,即

$$\alpha_{ji} = \frac{E_{(j-1)i}}{E_0} \quad (19)$$

式中, $E_{(j-1)i}$ 为优化 $j-1$ 次后目标面的照度值, $E_0$ 为平均照度,其优化过程如图8.

设置 $R_1 = 150 \text{ mm}$ ,  $R_{\max} = 230 \text{ mm}$ ,初始比例系数 $\alpha_i$ 为1,经过多次优化后,最终优化光学模拟仿真结果如图9.将透镜的配光曲线导入到DIALux软件中进行户外照明仿真,得到如图10的效果图.优化后的LED阵列在工作面上的照度值和照度均匀性均满足户外广告照明标准,如表1,优化后LED阵列的方式其总功率为136 W,而传统采用荧光灯方式的功率187.5 W,因

此节能效果明显;并且照度均匀性从0.70提高到0.88,可以使广告图画更清晰,看起来更舒适,广告灯箱的厚度也减少了80 mm,降低了生产成本.

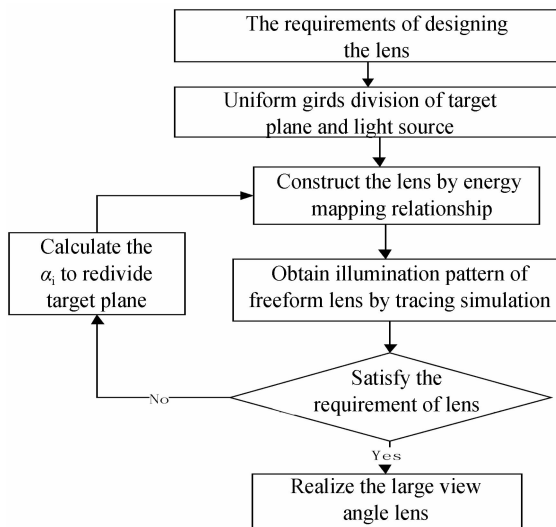


图8 反馈优化法流程图

Fig. 8 Flow chart of feedback optimization method

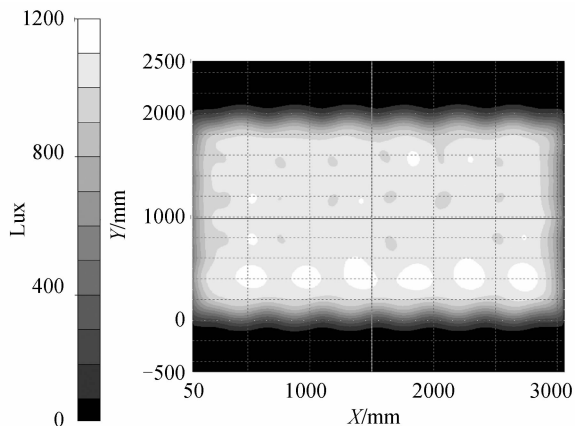


图9 优化后LED阵列在目标面上的照度分布图

Fig. 9 The illumination distribution on the target surface of the optimized LED array

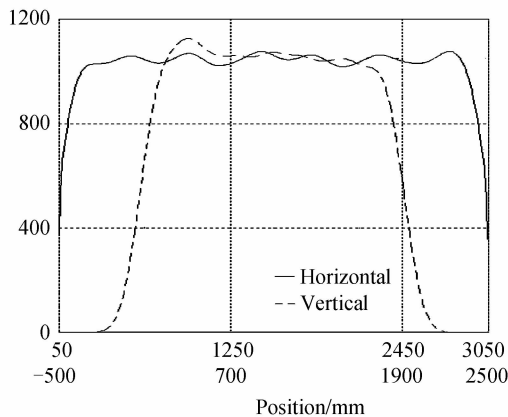


图10 广告灯箱的模拟仿真效果

Fig. 10 Simulation results of advertisement light box

表1 优化后LED阵列与采用传统荧光灯的性能对比  
Table 1 Performance comparison of optimized LED array and traditional fluorescent lamp

| Type             | H /mm | Power /W | Luminous flux/lm | Average illumination/lux | Illumination uniformity |
|------------------|-------|----------|------------------|--------------------------|-------------------------|
| LED array        | 80    | 152      | 13 490           | 998                      | 0.88                    |
| Fluorescent lamp | 120   | 187.2    | 13 200           | 873.6                    | 0.70                    |

## 3 结论

基于能量守恒定律和网格划分法,设计了自由曲

面透镜,其内曲面为椭圆形曲面、外曲面为自由曲面,实现了近场大角度均匀照明。研究了在短轴、长轴不同比值的情况下,透镜的非涅耳损耗和其照度均匀性的变化,得出短轴与长轴比值  $a/b$  在  $0.35 \sim 0.55$  时,出光效率和照度均匀性最佳。在广告灯箱中,LED阵列按三角形矩阵的排列方式,利用自由曲面来实现LED光源的大角度近场均匀照明,但在该排列方式中,均匀光斑相互叠加的部分光照度较大,未叠加的部分光照度小,所以整体均匀性低。通过反馈优化法,对网格重新划分,让叠加部分的光照度减弱,以提高整体的光照均匀性,仿真结果表明,当仅对透镜外自由曲面的面型数据点进行优化,在目标面高度为  $80 \text{ mm}$ ,透镜出光角度为  $157^\circ$ ,即距高比( $D/H$ )为  $5:1$  的情况下,优化后的整体光照均匀度由优化之前的  $0.40$  提高到  $0.84$ ,出光效率大于  $0.9$ 。因此,采用内曲面为椭圆形曲面、外曲面为自由曲面大角度透镜,可以实现广告灯箱的近场均匀照明,具有较高的照度均匀性和出光效率。

#### 参考文献

- [1] WANG Hong, WU Yue-feng, ZHONG Jion-sheng, *et al.* Fabrication of high voltage led chips with lateral columnar structure[J]. *Journal of Optotronics • Laser*, 2013, **24**(10): 1906-1910.  
王洪, 吴跃峰, 钟炯生, 等. 具有侧面柱状结构的高压LED芯片制备[J]. *光电子·激光*, 2013, **24**(10): 1906-1910.
- [2] CHEN E-zhen, GUO Zhen-ning, ZHI Jia-jun, *et al.* Study on dot shape for the light guide plate of back-light [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] LIANG De-juan, ZHUANG Orren, ZHI Jia-jun, *et al.* Design and realization of edge-lighting LED flat panel light without LGP[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2014, **25**(3): 465-471.  
梁德娟, 庄其仁, 智佳军, 等. 侧入式无导光板LED平板灯的设计与实现[J]. *光电子·激光*, 2014, **25**(3): 465-471.
- [4] WANG Kai, WU Dan, QIN Zong, *et al.* New reversing design method for LED uniform illumination [J]. *Optics Express*, 2011, **19**(10): A830-A810.
- [5] WU Feng-tie, HANG Qi-lu. A precise model of LED lighting and its application in uniform illumination system[J]. *Optoelectronics Letters*, 2011, **7**(5): 334-336.
- [6] MORENO I, AVENDA O M, TZONCHEV R I. Designing lightemitting diode arrays for uniform near-field irradiance[J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(10): 2265-2272.
- [7] CHEN Xin-rui, HAN Jing-hua, LI Hong-ru, *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.
- [8] 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.
- [9] HU Run, GAN Zhi-qiang, LUO Xiao-bing, *et al.* Design of double freeform-surface lens for LED uniform illumination with minimum Fresnel losses[J]. *Optic-International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, **124**(19): 3895-3897.
- [10] WU Ren-mao, ZHENG Zhen-rong, LI Harfeng, *et al.* Optimization design of irradiance array for LED uniform rectangular illumination[J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(13): 2257-2263.
- [11] 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 Optic*, 2013, **52**(17): 3998-4005.
- [12] YAN Wen-ping, GUO Zhen-ning, LIN Jie-ben, *et al.* Direct-down LED panel light design for uniform illumination [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2014, **25**(10): 1879-1885.  
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): 1879-1885.
- [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] DING Shu-shu, YU Gui-ying, HAO Wen-wen. A free-form surface lens for indoor uniform illumination [J]. *Laser&Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(4): 118-123.  
丁纾姝, 余桂英, 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.
- [15] GB 50034-2004, 建筑照明设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.