

基于近场侧面均匀照明的 LED 投射器研究

赖丽萍 庄其仁 梁德娟 周业鹏 庄琳玲 王巨锋

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要 在 LED 双面平板照明灯具中,为实现侧入式近场均匀照明,研究了一种 LED 柱面透镜阵列自由曲面投射器。根据非成像光学理论中的边缘光线原理,采用直接法和重叠法设计投射器的表面形状,利用反射旋转面和折射旋转面以及柱面透镜阵列将 LED 光源发出的朗伯光重新分配。建立侧面近场均匀照明的柱面透镜阵列自由曲面投射器模型,用 TracePro 软件对所设计的模型进行光线追迹仿真,结果表明,当不考虑反射损耗时投射器的出光效率达到 96.03%,在投射器侧面的面板上面积为 240 mm×360 mm 的照度均匀度达到 95.6%。

关键词 光学设计;双面 LED 平板灯;LED 投射器;柱面透镜阵列;均匀照明

中图分类号 O435 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0322002

Investigation of Uniform Illumination of the Near-Field on the Lateral Panels Using LED Projectors

Lai Liping Zhuang Qiren Liang Dejuan Zhou Yepeng Zhuang Linling Wang Jufeng

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China)

Abstract In order to meet the requirements of uniform illumination of near-field on the lateral panels for double side LED light box and double side LED flat light, a free-form LED projector with cylindrical lens array is presented. According to the edge-ray principle based on the non-imaging optics theory, the surface shape of the projector is designed by using the direct method and overlapping, and the Lambert light source of the LED is redistributed under the action of the reflection rotation surface, refraction rotation surface and the cylindrical lens array. The cylindrical lens array free-form surface projection model of the lateral near-field uniform illumination is established, and TracePro software is used to simulate the designed model for ray tracing. The results show that the luminous efficiency is 96.03% without considering the reflection loss, and the uniform illumination with the projector of the lateral panel sized 240 mm×360 mm is 95.6%.

Key words optical design; double side LED flat light; LED projector; cylindrical lens array; uniform illumination

OCIS codes 220.1250; 220.4610; 220.2945; 230.3670

1 引言

双面 LED 灯箱和双面 LED 照明平板灯广泛应用于机场、车站、酒店等公共场所。目前双面 LED 灯箱和双面 LED 照明平板灯一般采用侧入式导光板结构^[1]使光均匀分布在灯箱的两个主面板上,但导光板结构存在耦合效率低、损耗大、成本高等问题,因此无导光板结构的双面 LED 灯箱和双面 LED 照明平板灯需要一个能替代导光板的特殊

LED 投射器,才能达到双面照度均匀分布的目的。

实现均匀照明的 LED 投射器主要类型有自由曲面反射式投射器^[2-4]、自由曲面折射式投射器^[5-8]、平面或曲面阵列投射器^[9-11]和折射反射复合式投射器^[12]。如余桂英等^[2]研究了一种用于体视显微镜的 LED 照明反射式投射器,在目标面上获得 90.6%的照度均匀性。刘正权等^[3]基于微分几何理论和折射定律研究了矩形照度分布自由曲面反

收稿日期: 2013-08-14; 收到修改稿日期: 2013-09-17

基金项目: 福建省科技计划重点项目(2012H0029)

作者简介: 赖丽萍(1988—),女,硕士研究生,主要从事 LED 照明方面的研究。E-mail: lplai78@163.com

导师简介: 庄其仁(1960—),男,教授,主要从事光电传感与检测技术和半导体照明技术方面的研究。

E-mail: qrzhuang@hqu.edu.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

射器,在矩形被照面横向照度均匀度达到 90%。荆雷等^[13]设计了结构紧凑的非涅耳复合式投射器,在接收屏上的光斑照度均匀性达到 92%。可见无论是反射式投射器、折射式投射器还是复合式投射器均能获得较高的照明均匀度。一般而言,折射反射复合式投射器的照明均匀性优于其他类型的 LED 投射器,但目前 LED 投射器的研究均基于正面均匀照明的目的,不能直接用于无导光板 LED 平板灯中实现侧面均匀照明。

本文研究一种柱面透镜阵列自由曲面复合式 LED 投射器,采用直接法^[14]对自由曲面投射器的入射旋转折射面和入射全反射旋转面进行设计,利用 Matlab 工具编程求出入射旋转折射曲线和入射全反射旋转曲线上的点,再依据重叠法^[11]的基本思想,将光源的光强分布与照明目标面的照度分布加以匹配,根据投射器侧面近场均匀照明的要求设计 LED 投射器的外部曲面形状为柱面透镜阵列,对所

设计的模型进行模拟仿真。结果表明,将投射器应用于双面无导光板 LED 平板灯中,在 LED 平板灯的两个面板上均可获得很高的照度均匀性,且出光效率较高。

2 原 理

用于 LED 平板灯双面照明的无导光板投射器原理图如图 1 所示,其中投射器入射面包括自由曲面折射旋转面部分和自由曲面反射旋转面部分,出射面为自由曲面柱面透镜阵列,并将 LED 光源看作朗伯光型。投射器的作用是将 LED 光源发出的朗伯型发散光束转换为在投射器两侧两个平行平板上均匀分布的特殊光束,并使出光效率达到最高。入射旋转折射面和入射全反射旋转面先将 LED 光源发出的发散光束变换为准直光束,再经柱面透镜阵列变换为扩展光束。

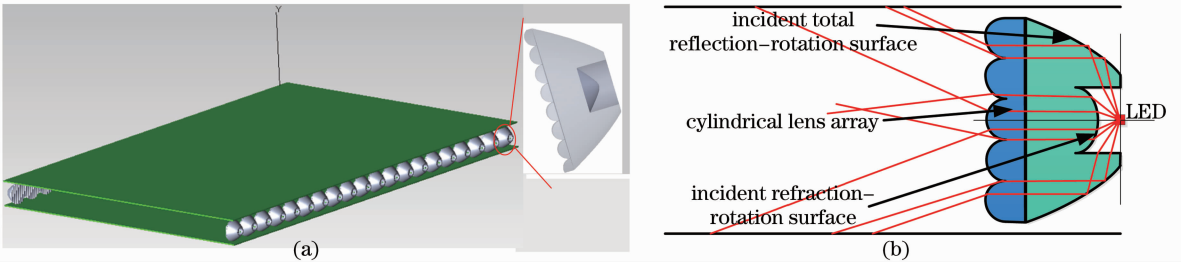


图 1 (a) 双面照明 LED 平板灯和 (b) 投射器结构示意图

Fig. 1 Structure diagrams of (a) double side LED flat light and (b) projector

投射器外形曲面的设计根据非成像光学理论中的光学扩展量守恒概念^[15-18],采用直接法^[14]进行自由曲面投射器入射旋转折射面和入射全反射旋转面设计,利用 Matlab 工具编程求出投射器入射旋转折射曲线和入射全反射旋转曲线上的离散点,再导入到 SolidWorks 软件中对其进行曲线拟合得到投射器横截面曲线并旋转得到三维(3D)模型。根据平板灯面板光照均匀分布特点,基于重叠法的基本思想,将光源的光强分布与面板照明目标面的照度分布加以匹配,设计相应的 LED 投射器的出射柱面透镜阵列以实现目标面照度均匀分布。

2.1 入射旋转折射面设计原理

自由曲面入射旋转折射面位于投射器的入射面靠近 LED 光源的中心部位,光源的光线经过该自由曲面折射后全部变换为平行于 z 轴的光线,根据边缘光线原理^[19-21],目标平面上任意一点的能量由边缘光线决定,所以入射旋转折射面的形状由光线的分布情况决定。由于投射器准直部分是旋转对称

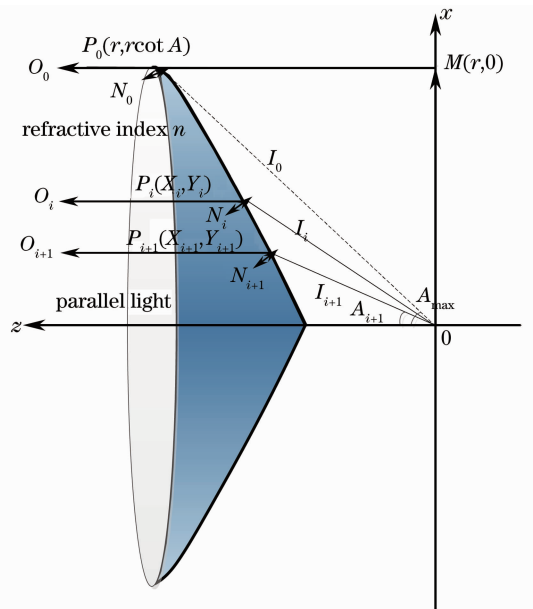


图 2 投射器折射旋转面设计原理图

Fig. 2 Design principle of the refraction-rotation surface of the projector

的,只需求出横截面上的曲线即可。以光源所在位置为原点建立坐标系,投射器中心轴线为 z 轴,径向为 x 轴,如图2所示。

设 \mathbf{I} 和 \mathbf{O} 分别表示入射光线和出射光线的单位矢量, \mathbf{N} 表示折射点的法向矢量。投射器材料的折射率为 n_1 ,折射旋转面最大半径为 r ,分界角为 A_{\max} 。

如图2所示,将 A_{\max} 均分为 N 等份,即 $A_i = A_{\max} - i \cdot A_{\max}/N$, $0 \leq i < N$ 。 P_0 点坐标为 $(r, r \cot A_{\max})$, $\mathbf{O}(0, r \cot A_{\max})$,由Snell定律可求 P_0 的法向矢量 $\mathbf{N}_0(Nx_0, Nz_0)$ 。

$$\sqrt{1+n_1^2-2 \cdot n_1 \cdot (\mathbf{O} \cdot \mathbf{I})} \cdot \mathbf{N} = n_1 \cdot \mathbf{O} - \mathbf{I} \quad (1)$$

$P_1(x_1, z_1)$ 表示入射角度为 A_1 的光线与过 P_0 点的切平面之间的交点。

$$\begin{cases} Nx_0(x_1 - x_0) + Nz_0(z_1 - z_0) = 0 \\ \frac{z_1}{x_1} = \cot A_1 \end{cases} \quad (2)$$

由(1)式和(2)式可得 P_1 点的坐标。依法计算曲线上后续任意点 P_{i+1} 的坐标 (x_{i+1}, z_{i+1}) ,即

$$\begin{cases} Nx_i(x_{i+1} - x_i) + Nz_i(z_{i+1} - z_i) = 0 \\ \frac{z_{i+1}}{x_{i+1}} = \cot A_{i+1} \end{cases} \quad (3)$$

2.2 入射全反射旋转面设计原理

自由曲面入射全反射旋转面位于投射器的入射面远离LED光源的外侧部位,光源的光线经过该自由曲面反射后全部变换为平行于 z 轴的光线,以光源所在位置为原点建立坐标系,如图3所示。

光线在入射全反射旋转面发生全反射,根据反

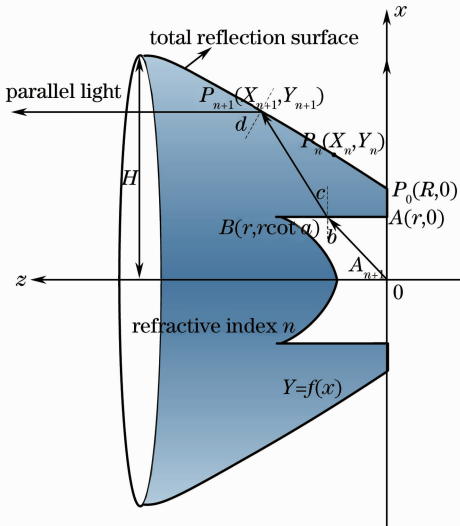


图3 自由曲面全反射旋转面设计原理图

Fig.3 Design principle of the free-form total reflection-rotation surface

射定律, P_n 点所在的切线方程为

$$z = \tan \left[\frac{\frac{\pi}{2} + \arcsin \left(\frac{\cos A_n}{n_1} \right)}{2} \right] \cdot (x - x_n) + z_n \quad (4)$$

当曲面分割足够细时,可认为 P_n 的后一点 P_{n+1} 也在该切线上。

P_{n+1} 所在的入射光线方程为

$$z = \tan \left[\arcsin \left(\frac{\cos A_{n+1}}{n_1} \right) \right] \cdot (x - r) + r \cdot \cot A_{n+1} \quad (5)$$

曲线上任意点 P_{n+1} 的坐标位于(4)式和(5)式确定的两直线的交点上,可通过求解方程组获得。细分图3中的角度 A 为 $A_0, A_1, \dots, A_{\max}$ 。将 P_0 坐标 $x_0 = R$, $z_0 = 0$ 和 $A_0 = 90^\circ$ 代入(4)式,将 $A_1 = 89^\circ$ 代入(5)式,可求出 $P_1(x_1, z_1)$ 的坐标,以此类推,求出一系列 P 点坐标。用Matlab编程求解,再导入到SolidWorks中画出3D模型。投射器折射率需大于1.414,才能满足全反射条件。

2.3 柱面透镜阵列设计原理

柱面透镜阵列位于投射器的出射端,平行紧密排列,柱面透镜横截面为半圆形,半径为 ρ ,当柱面透镜曲率半径与投射器半径相比足够小时,可认为平行入射到柱面透镜出射表面的光线在 x 方向是均匀分布的,这里所谓的“足够小”是相对的,与投射器准直输出面的光能量均匀度有关,只要中心主要部位的那些柱面透镜内光能量均匀度大于85%,就可认为柱面透镜曲率半径足够小。对于能量均分的投射器,柱面透镜曲率半径与投射器半径的比值小于0.2就可以满足要求。

将扩散板(均光板)置于目标平面上,则透过扩散板测量到的光强分布与照度分布情况是一样的,因此以下均直接采用目标面的光强均匀分布为条件进行设计。柱面透镜阵列设计原理如图4所示,柱面透镜 L_1 和 L_2 的入射光强度可分别表示为 I_1 和 I_2 ,由于光束只在 x 方向发散,在 y 方向仍然保持准直不变,所以目标面上的光强度与距离成反比。设柱面透镜 L_1 和 L_2 的边缘光线在接受面板上的投射点分别为 P_1 和 P_2 ,则 P_1 和 P_2 处的光强度为

$$I_{P_1} = \frac{f}{z_1 - f} I_1, \quad I_{P_2} = \frac{f}{z_2 - f} (I_1 + I_2),$$

式中 f 为柱面透镜的焦距, z_1 和 z_2 分别为面板上 P_1 和 P_2 点与柱面透镜阵列原点的距离, $z_1 = \frac{f}{r} \cdot x_0 +$

$f, z_2 = \frac{f}{\rho} \cdot (x_0 + 2\rho) + f$,其中 x_0 为柱面透镜 L_1 中

心到接受面板的垂直距离, r 为柱面透镜的曲率半径。

以此类推, 当投射器包含 N 个柱面透镜时, 则第 n 个柱面透镜 L_n 的边缘光线在接受面板上的投射点 P_n 处的光强度为

$$I_{P_n} = \sum_{i=1}^n \frac{f}{z_n - f} I_i, \quad (n \leq N), \quad (6)$$

$$z_N = \frac{f}{\rho} \cdot [x_0 + 2(N-1)\rho] + f. \quad (7)$$

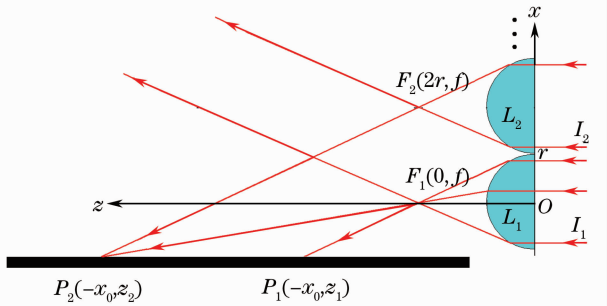


图 4 柱面透镜阵列设计原理图

Fig. 4 Design principle of the cylindrical lens array

对于如图 1(a) 所示的双侧面入式无导光板 LED 平板灯结构, (6) 式中还应增加对面投射器的照射强度项, 表达式为

$$I_{P_n} = \sum_{i=1}^n \frac{f}{z_n - f} I_i + \sum_{i=1}^N \frac{f}{W - z_n - f} I_i, \quad (n \leq N), \quad (8)$$

式中 $W = 2 \cdot z_N$ 为两边投射器出射面之间的距离, 约等于平板灯面板的宽度。

设计柱面透镜参数时, 可令 $I_{P_1} = I_{P_2} = \dots = I_{P_N}$, 求解方程组获得柱面透镜焦距 f , 从而求出曲率半径 $\rho = (n_1 - 1)f$ 。

3 仿真与结果分析

本文的设计方法是将光源的光强分布与照明目标面的照度分布加以匹配, 从而得到具有高目标面照度均匀度时投射器的外部曲面形状。设计过程如下: 1) 设计投射器准直部分的横截面曲线, 为了具有普遍意义, 将 LED 光源看作朗伯光型, 设其光强分布由发光角度的余弦方程 $I(\alpha) = I_0 \cos \alpha$ 决定。对 LED 出射光线按照极向角 A 的度数作一定数目的区域分割(如图 2 和图 3 所示), 将准直输出面对应分成相同数目的区域, 这些区域的面积大小、比例取

决于各区域光线的光通量 $\phi_i = \int_0^{2\pi} \int_{A_i}^{A_{i+1}} I(\alpha) \sin \alpha d\alpha$

之比。这样所有光线能量(即光通量)和准直输出面的几何区域就建立一一对应关系, 准直输出面上的照度大小等于投射到该区域的光通量除以该区域的面积, 设为常数, 即均匀分布。用 Matlab 编程求解得到各个极向角 A_i , 再根据 2.1 节和 2.2 节介绍的方法求出投射器准直部分横截面上的曲线。2) 将设计好的投射器准直部分用 TracePro 进行优化, 使出光效率达到最高, 并得到输出面的光强度分布曲线。3) 根据准直部分输出面的光强度分布曲线和 2.3 节介绍的方法设计柱面透镜阵列。

根据上述设计原理和过程设计了用于宽 240 mm, 长 360 mm 的平板灯均匀照明投射器, LED 平板灯仿真模型如图 1(a) 所示, LED 投射器分布于平板灯的两侧, 光源 LED 大小为 1 mm × 1 mm, 每两颗 LED 灯珠之间的间距为 19 mm, LED 灯珠总光通量 400 lm。投射器采用聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 材料, 折射率为 1.49, 投射器剖面最大直径为 19 mm, 高 6 mm(不包括柱面透镜), 设计后的 LED 柱面透镜阵列投射器 3D 模型如图 5 所示, 最后将设计好的模型导入 TracePro 软件进行光线追迹仿真, 得到目标接受面的光强或照度分布和出光效率。

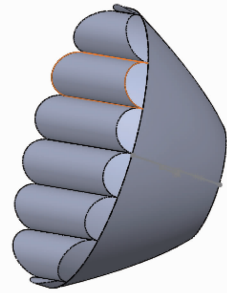


图 5 柱面透镜阵列投射器 3D 模型图

Fig. 5 3D model of the cylindrical lens array projector

3.1 参数的验证和优化

由于理论模型中采用了较多近似处理, 如 LED 光源采用理想的点光源模型, 而实际的 LED 光源为扩展光源, 模型中将投射器内的光束看作准直光束, 而实际上投射器内的光束具有一定的发散角, 模型中将柱面透镜看作理想成像系统, 出射光线均经过焦点, 而实际半圆形柱面透镜存在像差, 对出射光线的方向有一定影响。因此, 理论计算得到的投射器参数还需经过验证和优化, 下面分别讨论准直器参数的优化和柱面透镜阵列参数的优化。

3.1.1 准直器参数 A_{\max} 、 r 、 R 和 H

准直器仿真模型如图3所示,主要参数有分界角 A_{\max} 、折射旋转面最大半径 r 、反射旋转面最小半径 R 以及反射旋转面最大半径 H 。根据LED芯片大小和 H 的最大尺寸,确定 A_{\max} 值为 40° 和 $r=3.5$ mm。根据(3)式计算一系列折射面上的点,确定旋转折射面。由(4)式和(5)式求解得到全反射面上的一系列点得到旋转反射面,同时得到 $R=5.0$ mm。

对上述参数的优化是通过 TracePro 软件对设计模型进行光线追迹仿真,微调设计参数,比较仿真结果,选出最佳参数组。表1给出了当 $A_{\max}=40^\circ$ 时,微调参数 R 、 r 和 H 对出光效率的影响。从表1可以看出,根据计算模型设计的准直器其光线追迹仿真的出光效率都在96%以上,减小准直器尺寸同时也降低了出光效率,但影响不大,说明了计算模型的正确性。根据设计平板灯厚度最小原则,优化的参数为 $r=3.0$ mm, $R=4.0$ mm 和 $H=9.1$ mm。

为说明选择分界角 $A_{\max}=40^\circ$ 的正确性,模拟了

A_{\max} 为 38° 和 40° 时的准直器输出光强分布如图6(a)和图6(b)所示, $A_{\max}=38^\circ$ 时出光效率为95.82%, $A_{\max}=40^\circ$ 时出光效率为96.03%,可见增大分界角 A_{\max} 的值可提高出光效率,但同时也使光束发散角增大,降低了准直性能。采用单一变量法,由仿真结果可知,折射旋转面最大半径 r 和反射旋转面最小半径 R 一定时,随着 A_{\max} 由 40° 减小为 38° 时,投射器的 H 分别为 9.078 mm 和 9.429 mm,反射旋转面最大半径 H 随之变大,当 $A_{\max}=25^\circ$ 时投射器的出光效率为96.37%,对应的反射旋转面最大半径 $H=12.45$ mm,因此优化后的分界角 $A_{\max}=40^\circ$ 。

表1 $A_{\max}=40^\circ$ 时 R 、 r 和 H 的变化对出光效率的影响

Table 1 Influence of R , r and H on the luminous efficiency with $A_{\max}=40^\circ$

| r /mm | R /mm | H /mm | Luminous efficiency /% |
|---------|---------|---------|------------------------|
| 4.0 | 6.2 | 13.6 | 96.49 |
| 3.5 | 5.0 | 11.2 | 96.46 |
| 3.0 | 4.0 | 9.1 | 96.03 |

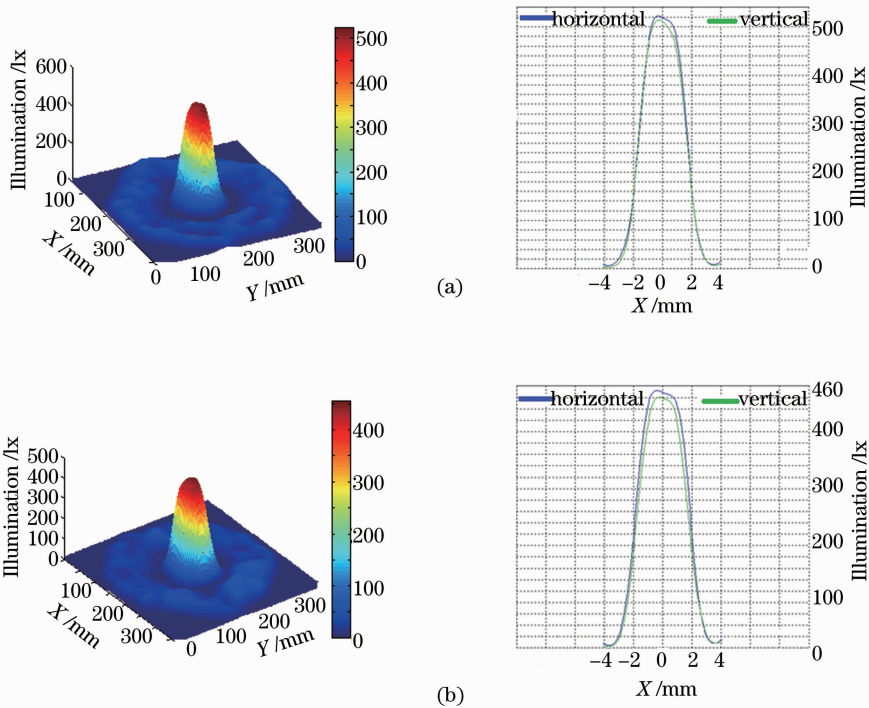


图6 LED在分界角分别为(a) 38° 和(b) 40° 时经透镜准直后的光强分布图

Fig. 6 Intensity distributions of the LED collimated by the lens with the boundary angle of (a) 38° and (b) 40°

3.1.2 柱面透镜阵列参数 ρ

柱面透镜阵列用于重新分配LED光线的能量分布,使到达投射器侧面接受面板的光线具有重叠区域而实现均匀照明,重叠区域的大小主要取决于半圆柱面透镜的曲率半径 ρ ,不同曲率半径 ρ 对照

明灯均匀性的影响如图7所示,可以看到不同曲率半径的柱面透镜阵列对LED平板灯面板的照度均匀性影响很大,当曲率半径为1.45 mm时,LED平板灯在面积 240 mm \times 360 mm 的范围内照度均匀值只有88.04%,而当曲率半径为1.3 mm时,其照

度均匀值达 95.28%。优化后的柱面透镜阵列曲率半径 $\rho=1.3$ mm。

3.2 仿真结果

将优化后的单个投射器进行仿真,得到在侧入式目标平面上的照度分布图和配光曲线如图 8 所示。优化后的仿真参数 $r=3.0$ mm, $R=4.0$ mm, $H=9.1$ mm, 柱面透镜阵列曲率半径 $\rho=1.3$ mm。在 LED 平板灯中按照图 1(a) 所示排列投射器, 仿真得到目标面的照度分布图和配光曲线如图 9 所示。可以看到投射器正面 (0° 时) 光强度为 0, 光能量主要分布在两个侧面, 并且均匀性较好。

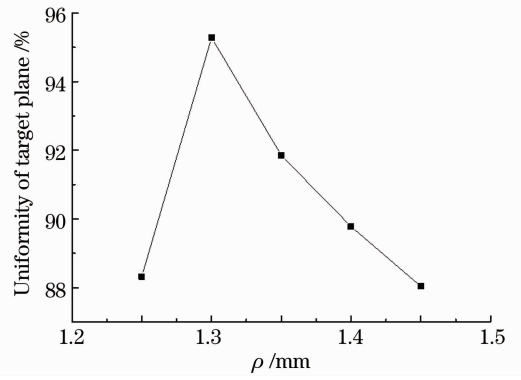


图 7 不同曲率半径 ρ 对照明灯均匀性的影响
Fig. 7 Influence of different curvature radiuses ρ on the uniformity of the LED flat light

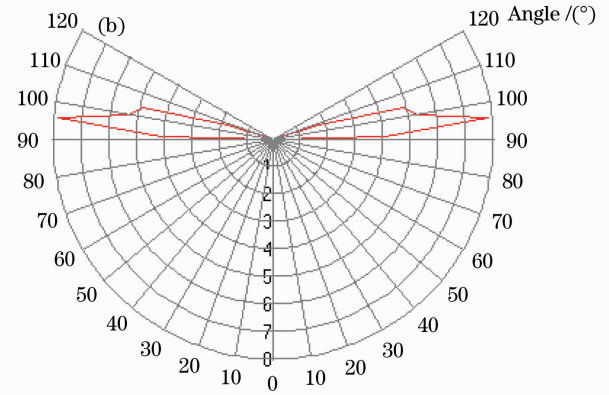
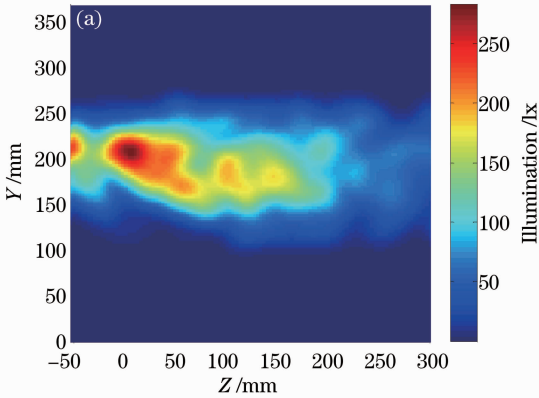


图 8 单个投射器的目标平面照度分布图和配光曲线

Fig. 8 Illumination distribution and distribution curve in the target plane with a single projector

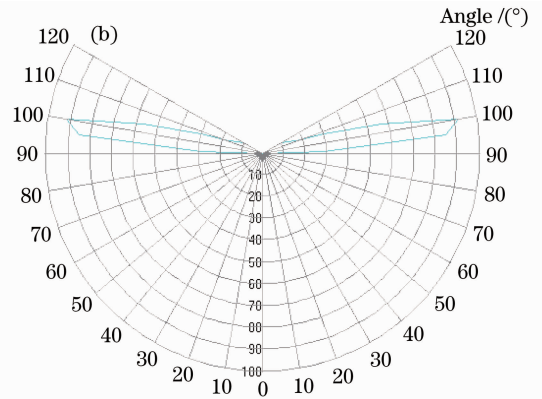
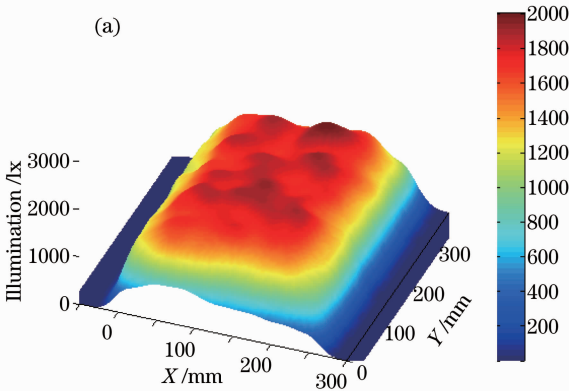


图 9 投射器应用于 LED 平板灯中目标面的照度分布图和配光曲线

Fig. 9 Illumination distribution and distribution curve in the target plane of the LED flat light with projectors

4 结 论

基于非成像光学的边缘光线原理和 Snell 定律,通过对投射器自由曲面入射旋转折曲面、入射全反射旋转面和柱面透镜阵列的光线分析,采用直接

法和重叠法导出了投射器准直自由曲面设计方程组和柱面透镜设计方程组,运用 Matlab 工具编程求出投射器自由曲面上的离散点,再导入到 SolidWorks 软件中对其进行曲线拟合并旋转得到 3D 模型,最后通过 TracePro 软件对设计模型进行光线追迹模

拟。结果表明参数优化后的LED柱面透镜阵列自由曲面投射器在面积 $240\text{ mm}\times 360\text{ mm}$ 的LED平板灯面板上的照度均匀性达到 95.6% ，自由曲面投射器(即准直器)的出光效率为 96.03% 。菲涅耳反射在简单光学透镜中是难以克服的，模拟时暂不考虑，而对LED双面灯板可通过设计特殊扩散板来减小界面的菲涅耳反射并实现均匀透射，将在另文讨论。该设计方法和LED投射器可用于无导光板结构的双面照明LED平板灯和LED灯箱，将公式稍加处理也可以应用于无导光板结构的单面照明LED平板灯和LED灯箱，具有普遍应用价值。

参 考 文 献

- 1 Luo Jianzhong, Chen Zhe, Zhang Yonglin, *et al.*. Design and simulation analysis of scattering netted dots on edge-lighting flat light guide plate [J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2006, 21(3): 206—213.
骆健忠, 陈哲, 张永林, 等. 侧光平板式导光板散射网点设计及仿真分析[J]. 液晶与显示, 2006, 21(3): 206—213.
- 2 Yu Guiying, Jin Ji, Ni Xiaowu, *et al.*. Design for LED uniform illumination reflector based on tendue [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(8): 2297—2301.
余桂英, 金骥, 倪晓武, 等. 基于光学扩展量的LED均匀照明反射器的设计[J]. 光学学报, 2009, 29(8): 2297—2301.
- 3 Liu Zhengquan, Sun Yaojie, Lin Yandan. Freeform reflector design for rectangular illuminance 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.
- 4 Ding Yi, Gu Peifu. Freeform reflector for uniform illumination [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(3): 540—544.
丁毅, 顾培夫. 实现均匀照明的自由曲面反射器[J]. 光学学报, 2007, 27(3): 540—544.
- 5 Y Ding, X Liu, Z Zheng, *et al.*. Freeform LED lens for uniform illumination [J]. Opt Express, 2008, 16(17): 12958—12966.
- 6 Z R Zheng, X Hao, X Liu. Freeform surface lens for LED uniform illumination [J]. Appl Opt, 2009, 48(35): 6627—6634.
- 7 L Domjan, L Kocsanyi, P Richter, *et al.*. Illuminator based on LED array and parabolic mirror for active triangulation sensors used on mobile robots [J]. Opt Eng, 2000, 39(11): 2867—2875.
- 8 Lu Jianing, Yu Jie, Tong Yuzhen, *et al.*. Secondary optical design for light emitting diodes lens with wide range and high uniformity illumination [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2012, 33(3): 334—337.
芦佳宁, 余杰, 童玉珍, 等. 实现大范围均匀照明的LED透镜二次光学设计[J]. 半导体光电, 2012, 33(3): 334—337.
- 9 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.
- 10 I Moreno, M Avendaño-Alejo, R I Tzonchev. Designing light-emitting diode arrays for uniform near-field irradiance [J]. Appl Opt, 2006, 45(10): 2265—2272.
 - 11 R Wu, H Li, Z Zheng, *et al.*. Freeform lens arrays for off-axis illumination in an optical lithography system [J]. Appl Opt, 2011, 50(5): 725—732.
 - 12 Wu Rengmao, Tu Dawei, Huang Zhihua, *et al.*. Illuminative uniformity design of a LED illumination system [J]. Optical Technique, 2009, 35(1): 74—76.
吴仍茂, 屠大维, 黄志华, 等. LED照明系统的光照均匀性设计[J]. 光学技术, 2009, 35(1): 74—76.
 - 13 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.
 - 14 Li Cheng, Li Nong. The research of nonimaging optics in LED lighting design [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2011, 22(5): 90—94.
李澄, 李农. 非成像光学应用于LED照明的研究[J]. 照明工程学报, 2011, 22(5): 90—94.
 - 15 Yan Xingtao, Yang Jianfeng, Zhang Guoqi. Design of freeform surface LED reflectors for uniform illumination based on compensation method [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(3): 718—723.
闫兴涛, 杨建峰, 张国琦. 基于补偿法的均匀照明自由曲面LED反光杯设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(3): 718—723.
 - 16 Jin Ji, Yu Guiying, Lin Min. Research of high light collection efficiency of LED parabolic reflector based on non-imaging optics [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(3): 680—684.
金骥, 余桂英, 林敏. 基于非成像光学的LED高收光率的抛物反射器研究[J]. 中国激光, 2010, 37(3): 680—684.
 - 17 Luo Yi, Zhang Xianpeng, Wang Lin, *et al.*. Non-imaging optics and its application in solid state lighting [J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(7): 963—971.
罗毅, 张贤鹏, 王霖, 等. 半导体照明中的非成像光学及其应用[J]. 中国激光, 2008, 35(7): 963—971.
 - 18 A V Arcchi, T Messadi, R J Koshel. Field Guide to Illumination [M]. Bellingham: SPIE Press, 2007.
 - 19 Yan Jie, Ye Bing. The method of lens design for LED uniform illumination [J]. Advanced Dispaly, 2012, 23(2): 38—42.
颜杰, 叶兵. 实现LED均匀照明的透镜设计[J]. 现代显示, 2012, 23(2): 38—42.
 - 20 H Ries, A Rabl. Edge-ray principle of nonimaging optics [J]. J Opt Soc Am A, 1994, 11(10): 2627—2632.
 - 21 Wang Yao, Liu Hua, Jing Lei, *et al.*. Light distribution optimization of LED luminaries for road lighting [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(7): 1463—1468.
王尧, 刘华, 荆雷, 等. 发光二极管道路照明的配光优化设计[J]. 光学精密工程, 2012, 20(7): 1463—1468.

栏目编辑：张 腾