

基于折射率预补偿方法的扩展光源匀光照明 二次光学设计

康学亮^{1*}, 姚海兵¹, 刘启隆¹, 王丽^{1,2}, 张白¹, 陈科²

¹北方民族大学电气信息工程学院, 宁夏 银川 750021;

²合肥工业大学机械工程学院, 安徽 合肥 230009

摘要 扩展光源的二次光学设计对于开拓大功率发光二极管(LED)在照明领域的应用具有重要意义。分析扩展光源条件下匀光配光系统照明效果的退化原因,提出一种折射率预补偿方法,并基于该方法针对 8 mm 口径的扩展光源设计匀光配光透镜。仿真结果表明:经该透镜配光后,目标面上的光斑塌边长度大幅减小,陡边性变好;有效照明区域增大,有效照明区域平均照度提升,归一化均方根进一步减小,照度均匀性明显改善;光线能量更集中于有效照明区域,照明效率显著提高。该方法原理简单,效果显著,为扩展光源实现匀光照明提供了一种新思路。

关键词 光学设计; 非成像光学; 均匀照明; 折射率预补偿; 扩展光源

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.152202

Secondary Optical Design for Uniform Illumination of Extended Sources Based on Refractive Index Pre-Compensation Method

Kang Xueliang^{1*}, Yao Haibing¹, Liu Qilong¹, Wang Li^{1,2}, Zhang Bai¹, Chen Ke²

¹School of Electrical & Information Engineering, North Minzu University, Yinchuan, Ningxia 750021, China;

²School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China

Abstract The study of secondary optical design of extended sources is significant in the applications of high-power light-emitting diodes in the lighting field. Herein, first, the causes of degradation in the illumination effect in light distribution systems for uniform illumination under extended source conditions are analyzed. Then, a refractive index pre-compensation method is proposed. Based on this method, a light distribution lens for uniform illumination is designed for extended sources with aperture of 8 mm. Simulation results show that the length of the collapse edge of the spot significantly decreases such that the slope improves with respect to the light distribution lens, and thus, the effective illumination area on the target surface increases. Consequently, the average illuminance of the target area increases. The normalized root-mean-square of the effective illumination area further decreases, and the uniformity of illuminance improves. The illumination efficiency improves because the light energy is able to further concentrate on the effective illumination area. This method provides a new approach to realize uniform illumination for extended source.

Key words source optical design; non-imaging optics; uniform illumination; refractive index pre-compensation; extended source

OCIS codes 220.3620; 080.4295; 350.4600

1 引言

发光二极管(LED)作为一种半导体光源,具有

能效高、响应速度快、寿命长等优点,广泛应用于道路照明、室内照明、液晶显示背光及特种照明等领域^[1-3]。在绝大多数场合,LED 直接辐射形成的照

收稿日期: 2019-02-19; 修回日期: 2019-03-05; 录用日期: 2019-03-11

基金项目: 国家自然科学基金(11564001)、宁夏高等学校一流学科建设(电子科学与技术学科 NXYLXK2017A07)

* E-mail: wnkanger@163.com

度分布并不能满足使用需求,为此需要对 LED 进行二次光学设计,即配光设计^[4-5]。

小功率 LED 的发光芯片面积小,可近似为点光源,其二次光学设计较容易且技术较成熟^[6-9]。基于自由曲面的二次光学设计方法几乎可以完美地解决近似点光源的配光问题^[8-9]。单颗小功率 LED 所形成的照度太低,在需要高照度的应用场合,往往采用小功率 LED 阵列,但其热管理困难,可靠性不高。近几年,随着技术工艺的完善以及成本的下降,大功率 LED 应运而生,其应用范围也在逐步扩展。大功率 LED 发光芯片的尺寸较大,在配光设计中不能直接以点光源近似,否则,所设计配光系统的实际照明效果将会严重偏离预期,故大功率 LED 在配光设计中需以扩展光源看待。

关于扩展光源匀光照明的二次光学设计问题,已有科研工作者提出了多种方法^[10-18]。同步多曲面(SMS)法^[10-12]可针对扩展光源直接进行二次光学设计,一次即可获得配光元件的最终结构,但该方法只能对扩展光源的边缘光线实现有效约束,无法对目标区域的照度分布进行精细控制,其以波前概念为理论基础,难度和复杂度较大;在点光源二次光学设计的基础上加入反馈优化,可以实现扩展光源的匀光照明二次光学设计。例如,在照度偏移量累加反馈优化算法^[13]中,先针对点光源设计获得目标照度分布的初始透镜面型结构,再利用实际扩展光源替代点光源进行光学追迹仿真,获得实际照度分布后,以其与目标照度分布的照度偏移量累加到目标照度分布上进行修正,通过 2~5 次迭代优化即可得到满足设计要求的扩展光源配光元件面型数据。李登高等^[14]提出的自由曲面反馈方法针对点光源设计匀光配光透镜的初始面型结构,对目标面进行等面积子区域划分后,根据扩展光源特性对每个子区域光线能量的权重进行优化,有效改善了扩展光源配光系统目标面照度的均匀性;而基于轮廓重叠的自由曲面构建方法^[15]通过对多个点光源分别进行二次光学设计,提取所获得的配光透镜重叠部分的边缘轮廓,构造适用于扩展光源的自由曲面配光系统,并通过照度反馈优化得到最佳设计方案;采用基于自然选择的粒子群算法^[16-17]为扩展光源设计匀光透镜时,以点光源匀光配光透镜模型作为优化对象,引入平滑约束条件及粒子群算法对其进行多参量优化,最终也可实现扩展光源匀光照明。但该类优化算法较复杂,计算量普遍较大。

将扩展光源进行处理后再以点光源对待,从而

把扩展光源的二次光学设计转化为技术成熟的点光源二次光学设计,是扩展光源匀光照明二次光学设计所采用的另一种思路。例如,将扩展光源边缘与透镜边缘连线延长后的交点作为扩展光源的等效点光源,据此进行配光元件设计^[18]。此方法操作简单,计算量小,可在一定程度上提高目标照度的均匀性,但提升程度有限。

本文以点光源自由曲面二次光学设计为基础,提出一种折射率预补偿方法,以优化扩展光源的匀光配光效果。首先,按照点光源的匀光设计方案设计自由曲面配光透镜;然后,通过分析不同偏移位置处的点光源在目标面上形成的照度分布,探索扩展光源条件下目标面照度均匀性退化的原因,并据此提出折射率预补偿方法,优化扩展光源的匀光照明效果;最后,基于折射率预补偿方法设计一款针对扩展光源的配光透镜,并通过仿真研究配光效果各量化指标的改善程度。

2 点光源的匀光照明配光设计与仿真

基于自由曲面配光技术可对点光源(或近似点光源,如小功率 LED 等)实现理想的匀光照明效果。若仅需在某一目标面上获得匀光照明,则单自由曲面配光透镜足以实现该功能。为简单起见,当配光系统对光源的光线收集角度较小时,一般将前表面设为平面,后表面作为待求解的自由曲面。

假设配光透镜材料的折射率为 n ,透镜前表面 S_1 为平面,透镜后表面 S_2 为待求解的自由曲面。点光源置于坐标原点 O 处,与透镜前表面 S_1 的距离为 a ,透镜中心处的厚度为 b ,透镜可收集点光源发出的平面角为 $2\theta_{\max}$ 立体角内的光线,要求经配光后在与点光源距离为 c 的目标面 S_3 上半径为 R 的圆形区域内实现匀光照明。由于配光系统呈旋转对称,选对称轴(光轴)为 z 轴,则可将问题简化至二维 zOx 平面内,如图 1 所示。

根据光通量守恒,找出光源光线角度 θ 与其在照明目标面上对应点与 z 轴距离 r 之间的映射关系。若不计各种损耗,则经配光元件后,平面角为 $2\theta_{\max}$ 的立体角内点光源的光通量将全部均匀分布于半径为 R 的圆形区域内,即有

$$\int_{\theta=0}^{\theta_{\max}} I(\theta) 2\pi \sin \theta d\theta = E \pi R^2, \quad (1)$$

式中: θ 为点光源光线与 z 轴的夹角; $I(\theta)$ 为点光源的配光曲线; E 为目标面上形成的光照度。根据对称性,假设平面角为 2θ 的立体角内点光源的光通量

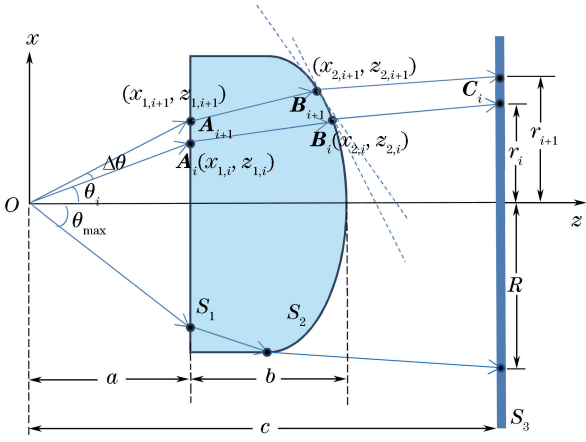


图 1 单自由曲面透镜配光原理示意图
Fig. 1 Diagram of light distribution principle of single free-form surface lens

将全部均匀分布在半径为 r 的圆形区域内,即

$$\int_{\theta=0}^{\theta} I(\theta)2\pi\sin\theta d\theta = E\pi r^2. \quad (2)$$

(1)式与(2)式相比,有

$$\frac{\int_{\theta=0}^{\theta} I(\theta)2\pi\sin\theta d\theta}{\int_{\theta=0}^{\theta_{\max}} I(\theta)2\pi\sin\theta d\theta} = \frac{r^2}{R^2}. \quad (3)$$

(3)式给出了光源光线发散角 θ 与该光线经配光透镜后在探测面上的径向坐标 r 之间的关系,对其进行离散,可得 θ_i 与 r_i 的关系。

若已知第 i 条光线在配光透镜前后表面 S_1 和 S_2 上对应的点坐标分别为 $A_i(x_{1,i}, z_{1,i})$ 和 $B_i(x_{2,i}, z_{2,i})$,以及后表面 S_2 在点 $B_i(x_{2,i}, z_{2,i})$ 处的切线斜率为 $k_{2,i}$,则对于第 $i+1$ 条光线(入射光线),角度为 $\theta_{i+1} = \theta_i + \Delta\theta$,其与透镜前表面 S_1 的交点坐标 $A_{i+1}(x_{1,i+1}, z_{1,i+1})$ 可表示为

$$\begin{cases} x_{1,i+1} = a \tan \theta_{i+1} \\ z_{1,i+1} = a \end{cases}. \quad (4)$$

入射光线在前表面 S_1 的入射角为 θ_{i+1} ,设其折射角为 θ'_{i+1} ,根据折射定律,二者满足

$$\sin \theta_{i+1} = n \sin \theta'_{i+1}, \quad (5)$$

故经前表面 S_1 折射后的光线(折射光线)的斜率为

$$k_{12,i+1} = \tan \theta'_{i+1}. \quad (6)$$

假设折射光线经过透镜后表面 S_2 上的点 $B_{i+1}(x_{2,i+1}, z_{2,i+1})$,则一方面由折射光线斜率可得

$$k_{12,i+1} = \frac{x_{2,i+1} - x_{1,i+1}}{z_{2,i+1} - z_{1,i+1}}. \quad (7)$$

另一方面,当离散间隔足够小时,可认为 $B_{i+1}(x_{2,i+1}, z_{2,i+1})$ 在后表面 S_2 过前一采样点 $B_i(x_{2,i}, z_{2,i})$ 的切线上,故

$$k_{2,i} = \frac{x_{2,i+1} - x_{2,i}}{z_{2,i+1} - z_{2,i}}, \quad (8)$$

联立(4)~(8)式,即可求得 B_{i+1} 点的坐标 $x_{2,i+1}$ 和 $z_{2,i+1}$ 。

求出 B_{i+1} 的坐标后,结合(3)式,可以确定折射光线的单位矢量 $\mathbf{A}_{i+1}\mathbf{B}_{i+1}$ 与其经透镜后表面 S_2 再次折射后的出射光线的单位矢量 $\mathbf{B}_{i+1}\mathbf{C}_{i+1}$,分别为

$$\mathbf{A}_{i+1}\mathbf{B}_{i+1} = (x_{2,i+1} - x_{1,i+1}, z_{2,i+1} - z_{1,i+1}) / \sqrt{(x_{2,i+1} - x_{1,i+1})^2 + (z_{2,i+1} - z_{1,i+1})^2}, \quad (9)$$

$$\mathbf{B}_{i+1}\mathbf{C}_{i+1} = (r_{i+1} - x_{2,i+1}, c - z_{2,i+1}) / \sqrt{(r_{i+1} - x_{2,i+1})^2 + (c - z_{2,i+1})^2}. \quad (10)$$

设 $B_{i+1}(x_{2,i+1}, z_{2,i+1})$ 处法线的单位矢量为

$$\mathbf{N}_{2,i+1} = (x_{N2,i+1}, z_{N2,i+1}), \quad (11)$$

式中:下角标 N 表示法线。在后表面 S_2 上应用矢量形式的折射定律,可得

$$\sqrt{1 + n^2 - 2n(\mathbf{B}_{i+1}\mathbf{C}_{i+1} \cdot \mathbf{A}_{i+1}\mathbf{B}_{i+1})} \mathbf{N}_{2,i+1} = \mathbf{B}_{i+1}\mathbf{C}_{i+1} - n\mathbf{A}_{i+1}\mathbf{B}_{i+1}. \quad (12)$$

根据(12)式可解出点 B_{i+1} 处的法线矢量 $(x_{N2,i+1}, z_{N2,i+1})$,故点 B_{i+1} 处的切线斜率为

$$k_{2,i+1} = -z_{N2,i+1} / x_{N2,i+1}. \quad (13)$$

上述过程实现了后表面 S_2 上点 $B_i(x_{2,i}, z_{2,i})$ 及其切线斜率 $k_{2,i}$ 到点 $B_{i+1}(x_{2,i+1}, z_{2,i+1})$ 及其切线斜率 $k_{2,i+1}$ 的全部迭代。确定初始结构之后,就可得到迭代起始点 $B_0(0, a+b)$ 及其切线斜率 $k_{2,0} = \infty$,经过多次迭代,可求出透镜后表面 S_2 上各采样点的坐标,依次连接采样点,得到所设计匀光配光透镜后表面 S_2 的剖面母线,将其绕 z 轴旋转一周,即可获得透镜后表面 S_2 的面型结构。

透镜材料选用聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),由于人眼对绿光最敏感,故对于白光 LED,选取波长 $\lambda = 550 \text{ nm}$ 对应的折射率 $n = 1.493$ 。配光系统的结构如图 1 所示,具体参数分别为 $a = 8 \text{ mm}$ 、 $b = 8.5 \text{ mm}$ 、 $c = 300 \text{ mm}$,目标照明区域为半径 $R = 175 \text{ mm}$ 的圆形区域。简单起见,假设 LED 为朗伯光源,配光曲线符合余弦定律,且可视为理想点光源。配光透镜可收集 LED 在 $\pm 60^\circ$ 角以内的光线,角度离散间隔为 0.25° 。

通过 MATLAB 软件编程求解上述迭代关系式,可得到后表面 S_2 上各离散点的坐标数据,图 2(a)所示为透镜的剖面母线图,图 2(b)给出了透镜的匀光原理。从图 2 可以看出,经透镜前后表面折射后,发散角较小的光线向照明区域的边缘行进,目标面上的照度分布趋于均匀,不再是中心照度大

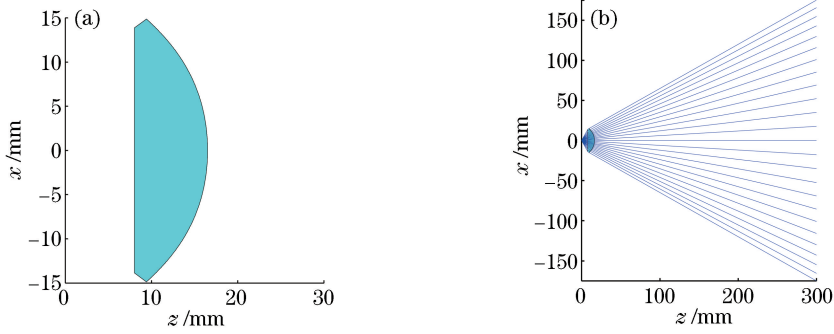


图 2 点光源实现匀光照明的二次光学设计。(a)配光透镜的剖面母线图;(b)匀光原理示意图

Fig. 2 Secondary optical design of point source for uniform illumination. (a) Profile of light distribution lens; (b) diagram of uniform illumination principle

边缘照度小的情形。

将透镜前后表面的点坐标数据导入仿真软件 TracePro 进行实体建模,所得三维立体模型如图 3 所示。透镜材料设为有机玻璃 (PPMA),在 原点处建立半径为 0.01 mm 的圆形表面光源 (点光源),光强为朗伯分布,波长为 550 nm,光通量为 100 lm。在 $z=300$ mm 处 (照明目标面) 设置一探测器,监测照度分布。选 100 万条光线进行追迹,并对配光元件的照明效果进行仿真。

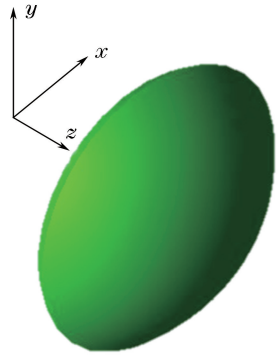


图 3 点光源条件下所设计配光透镜的三维实体模型

Fig. 3 Three-dimensional solid model of light distribution lens designed for point source

图 4 给出了仿真照度分布结果。图 4(a)为二维分布图,具有中心对称性;图 4(b)为过照明区域中心点的一维照度分布。

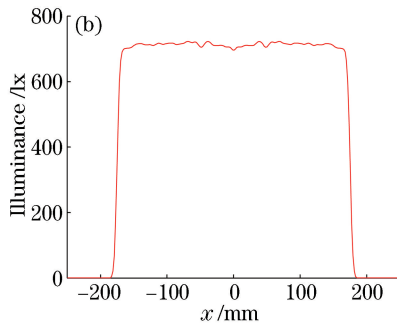
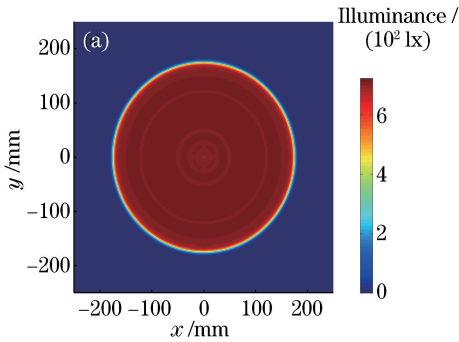


图 4 近似点光源条件下的照度分布。(a)二维分布;(b)一维分布

Fig. 4 Illuminance distributions of approximate point source. (a) Two-dimensional distribution; (b) one-dimensional distribution

从图 4(a)可以看出,近似点光源经匀光配光后,在目标面上实现了圆形区域的匀光照明,均匀性和陡边性均较好。该透镜的视场角为 60° ,故对于朗伯点光源,其光线收集效率为 75.0%,仿真中到达目标面的光通量为 68 lm,因而光通量利用率为 68.00%,这是因为在仿真中已考虑透镜前后表面的反射损耗 (约为 8%)。仿真未考虑透镜材料的吸收损耗,但由于 PMMA 的透光率较高 (可达

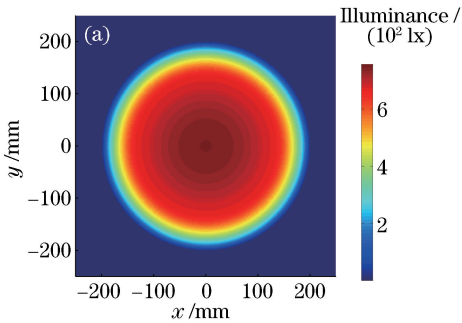
92%),且选用的透镜厚度较小,因此仿真结果足够精确。

为了对照明区域的照明效果进行精细化评价,以照明区域边缘处照度降为最大值的 90% 时对应的半径为有效照明半径 R_{eff} ,从图 4(b)可以看出, $R_{\text{eff}}=170$ mm 与设计值 $R=175$ mm 较吻合,差别来源于光源具有一定尺寸以及探测器的像素设置。若以照度由最大值的 90% 降到 10% 在目标面上对

应的径向距离定义光斑塌边长度 L , 则 $L = 9.3 \text{ mm}$, 陡边性较好。有效照明半径以内的区域(有效照明区域)中, 平均照度为 711.2 lx , 光通量为 64.5 lm 。若以有效照明区域的光通量与探测面上总光通量的比值定义照明效率, 则其值为 94.5% , 这说明经配光透镜后, 光线基本分布在照明目标面上的有效照明区域内, 能被有效利用。以有效照明区域照度的归一化均方根(RMS)评价光斑的均匀性,

定义 $r_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (E_i - \bar{E})^2 / M}{\bar{E}}}$, 其中 M 为有效照明区域内的照度采样点个数, E_i 为第 i 个采样点的照度, \bar{E} 为有效照明区域内所有采样点照度的平均值。 $r_{\text{RMS}} = 1.3\%$ 说明照度分布足够均匀。

综上所述, 对于近似点光源, 单自由曲面配光透镜可完美解决匀光二次光学设计问题。



3 扩展光源的照明效果退化及原因分析

将匀光照明系统中的近似点光源直接替换为直径为 8 mm 的圆形扩展光源, 其余所有参数不变, 在软件中进行光线追迹仿真, 可得探测面上的照度分布, 结果如图 5 所示。可以看出, 目标面上的照明均匀性明显退化, 主要表现在三个方面: 有效照明半径由设计值 175.0 mm 减小至 111.5 mm , 光斑塌边长度增大至 84.0 mm , 陡边性明显变差; 有效照明区域的平均照度为 716.2 lx , 光通量为 27.8 lm , 照明效率仅为 41.5% , 比点光源条件下的该值减小 53% , 即目标面上的大多能量没有集中于有效照明区域内; 有效照明区域的 $r_{\text{RMS}} = 2.6\%$, 比点光源条件下的该值增大了一倍, 表面照明均匀性也发生退化。

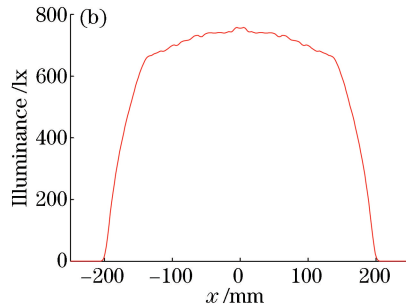


图 5 扩展光源条件下的照度。(a)二维分布;(b)一维分布

Fig. 5 Illuminance distributions of extended source. (a) Two-dimensional distribution; (b) one-dimensional distribution

在仿真中还发现, LED 发光芯片尺寸越大, 各照明指标退化程度越严重。此时若不进行任何处理, 继续将该扩展光源直接视为点光源进行匀光照明的二次光学设计, 则所设计配光元件的实际照明效果与设计目标之间存在较大偏差。因此, 需要采用其他方法进行扩展光源的二次光学设计, 本文先探究扩展光源条件下匀光照明系统照明效果退化的原因。

在图 4 对应的配光系统中, 保持其他参数不变, 对光源在垂直于系统光轴方向上分别平移不同距离(沿 y 轴正向分别偏移 $1, 2, 3 \text{ mm}$)后的系统进行仿真, 得到目标面上的照度分布如图 6 所示。从图 6 可以看出, 当近似点光源向上偏移时, 目标面照明光斑整体向下平移, 形貌基本不变, 由于透镜上边缘外部的反射和下边缘内部的全反射效应, 光斑上边缘变暗, 下边缘处产生较明显的亮沿。根据对称性易知, 当近似点光源向下偏移时, 目标面照明光斑下边缘变暗, 上边缘处产生明显的亮沿, 与近似点光源向

上偏移时形成的照度分布呈互补状态。通过仿真发现, 光源经系统配光后, 向上或向下偏移且偏移量相同的两个近似点在目标面上形成的照度叠加呈平顶分布。因此, 可认为近似点光源在垂直于光轴的方向上发生(较小)偏移时, 经系统配光后在目标面上形成的照度分布形貌基本保持不变, 但整体向光源偏移的反向平移。综合分析图 6(a)~(c)可知, 近似点光源沿 y 轴正向每平移 1 mm , 照明光斑反向平移约 9.8 mm 。

可以将扩展光源视为由无数个点光源在空间连续分布构成, 而照明系统中目标面上任一位置处接收的光辐射为所有点光源在该点形成的光辐射的叠加。

如图 7 所示, 对扩展光源进行采样, 将其划分成多个近似点光源, 其中扩展光源中心处的采样点光源 O 的光辐射经配光系统后在目标面处形成均匀的照度分布。 P 和 Q 为扩展光源上与 O 呈等间距排列的两个采样点光源, 根据图 6 所得结论, 可认为

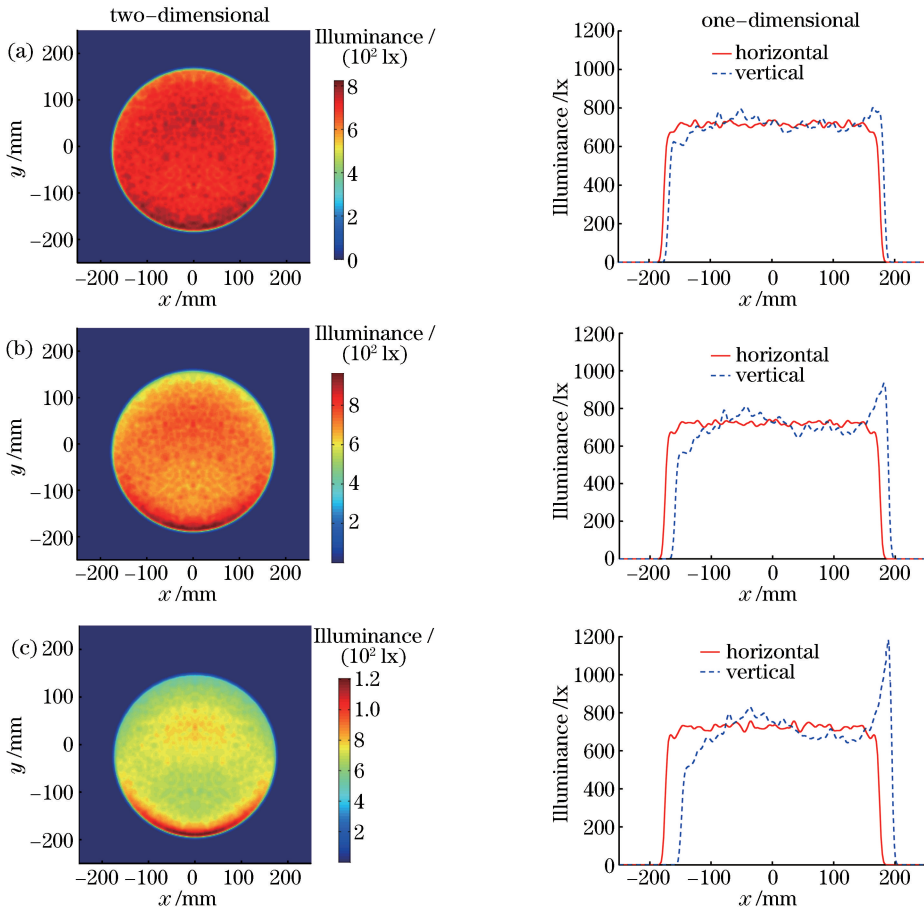


图 6 近似点光源沿 y 轴正向偏移不同距离后照度的二维分布与过光斑中心的一维分布。
(a) 偏移 1 mm; (b) 偏移 2 mm; (c) 偏移 3 mm

Fig. 6 Two-dimensional and one-dimensional illuminance distributions of approximate point source with different shifts in positive direction of y axis. (a) Shift of 1 mm; (b) shift of 2 mm; (c) shift of 3 mm

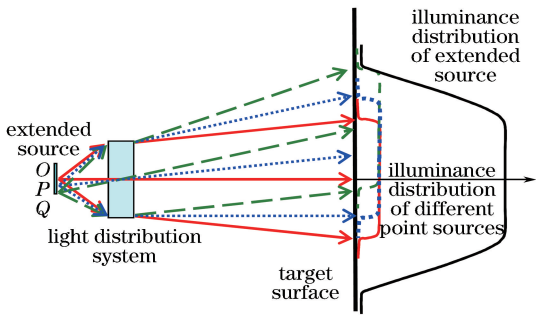


图 7 扩展光源条件下照明效果退化的原因
Fig. 7 Degradation reasons of illumination effect of extended source

它们各自通过配光透系统后在目标面上分别形成同样的均匀照明,只是照明区域的中心位置发生了不同的偏移,偏移量和对应点光源与扩展光源中心 O 的偏离量成正比。这样,每个点光源对目标照明区域中心部分的光辐射都有贡献,但目标照明区域的边缘处,只有部分点光源的光辐射才能到达,例如图 7 中扩展光源下半部分对目标照明区域的上边缘所贡献

的光辐射小。这样,目标面光斑中心区域的照度仍会保持均匀,但边缘部分的照度将低于中心区域的照度,有效照明半径随之减小,光斑塌边长度大幅增加,陡边性变差,大量光能量分布在塌边区域,照明效率降低,照明效果退化,该结果与图 5 中的结果相符。

4 基于折射率预补偿方法的扩展光源匀光二次光学设计

点光源经配光系统后在目标面上所形成的照度如图 8 所示,呈凹形分布,则扩展光源经该配光系统后有可能形成均匀的照度分布。另一方面,朗伯点光源直接照射目标面时,照明区域中心附近照度大,边缘处照度小,图 2 中的配光透镜能获得均匀的照度是因为其对朗伯点光源辐射的光能量具有空间发散作用。为了使点光源获得中心凹陷的照度分布,即光线经配光透镜后向照明区域的边缘行进,必须增强配光透镜对光辐射的空间发散能力,即需要继续增大透镜中心与边缘的厚度差。为此,针对扩展光源

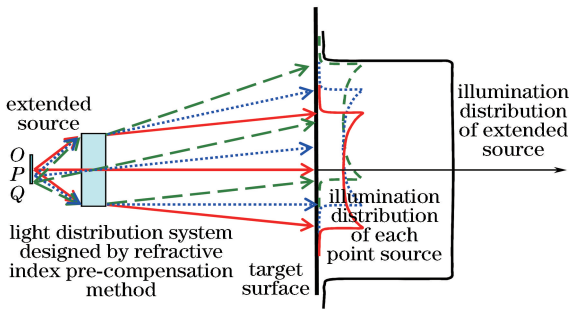


图 8 折射率预补偿方法中扩展光源实现匀光照明原理
Fig. 8 Principle of uniform illumination of extended source in refractive index pre-compensation method

进行二次光学设计以实现匀光照明时,将透镜材料的折射率设为一个较小值,并设计自由曲面配光透镜使点光源实现匀光照明,待透镜设计成型后,在仿真和实际加工制作时,选择折射率较大的材料作为透镜材料,即可使得点光源经该透镜配光后在目标面上形成凹陷形的照度分布,而扩展光源经透镜配光后可实现匀光照明。该方法可称为折射率预补偿方法。

根据折射率预补偿方法原理,保持其他设计参数与图 2 条件相同,折射率 n_{design} 取不同的值(小于所选取透镜材料 PMMA 的折射率 $n = 1.493$),根据自由曲面配光技术,对点光源进行匀光配光设计,

仿真发现,只有当设计折射率为 $n_{\text{design}} = 1.435$,配光透镜结构采用折射率 $n = 1.493$ 的 PMMA 材料制作时,才可对半径为 4 mm 的圆形扩展光源进行配光,实现匀光照明。此时配光透镜的面形如图 9 所示。

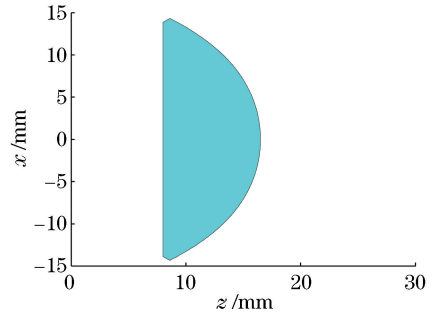


图 9 折射率预补偿修正后的配光透镜面形
Fig. 9 Profile of light distribution lens modified by refractive index pre-compensation method

仿真时,材料为 PMMA,波长 $\lambda = 550 \text{ nm}$ 对应的折射率为 1.493,先设置一半径为 0.01 mm 的圆形朗伯光源,选 100 万条光线进行追迹仿真,得到的目标面照度分布如图 10 所示,可以看出,照度分布确实呈图 8 中所预测的凹陷状。再将光源发光区域的半径改为 4 mm,并保持其余参数不变进行仿真,得到目标面照度分布如图 11 所示。

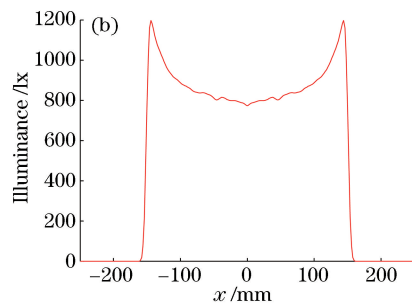
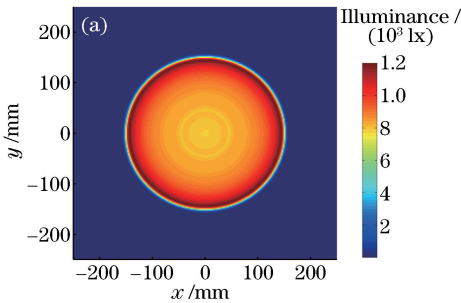


图 10 折射率预补偿修正后点光源条件下的照度。(a)二维分布;(b)一维分布
Fig. 10 Illuminances of point source after modifying by refractive index pre-compensation method.
(a) Two-dimensional distribution; (b) one-dimensional distribution

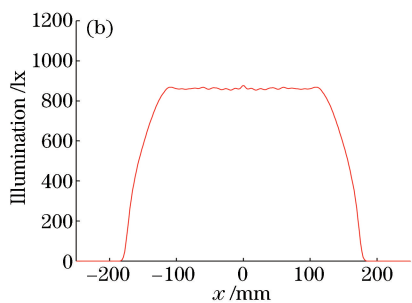
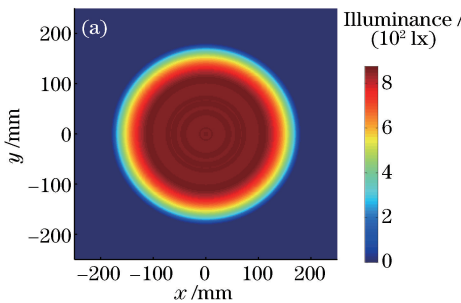


图 11 折射率预补偿修正后扩展光源条件下的照度。(a)二维分布;(b)一维分布
Fig. 11 Illuminances of extended source after modifying by refractive index pre-compensation method.
(a) Two-dimensional distribution; (b) one-dimensional distribution

由图 11(b)可以看出:有效照明半径为 128.3 mm,比修正前增大 16.8 mm;光斑塌边长度由原来的 84.0 mm 缩短为 47.4 mm,陡边性变好;有效照明区域的平均照度为 855.3 lx,比修正前增加 139.1 lx,且有效照明区域的光通量为 43.8 lm,照明效率为 65.6%,较修正前提高 24%,表明经透镜配光后大量光线能量集中于有效照明区域;有效照明区域的归一化 $r_{\text{RMS}} = 2.0\%$,比修正前减小 0.6%,说明照明均匀性得到大幅提高。与图 5 所示的照明效果相比,图 11 所示的折射率预补偿修正后的照明效果得到明显改善。

5 结 论

通过对近似点光源横向偏移后匀光配光系统的照度分布进行分析,揭示了扩展光源条件下目标面照度均匀性退化的原因,提出了一种针对扩展光源实现匀光照明的二次光学设计方法——折射率预补偿方法。该方法中以点光源实现匀光照明为设计目标,采用低折射率获得配光透镜的面形数据,在仿真或实验中选用高折射率材料的配光透镜,实现了扩展光源的匀光照明。

仿真结果表明,对于 8 mm 口径的圆形扩展光源,采用折射率预补偿方法所设计的纵向长度为 28.6 mm 的配光系统,可在距 LED 光源 300 mm 处的目标照明区域获得归一化 $r_{\text{RMS}} = 2.0\%$ 的照度分布,照明效率高达 65.6%,光斑陡边性与均匀性均得到大幅提升;对于更远照明距离的应用需求(如高杆灯),基于所提出的折射率预补偿方法设计的配光系统,亦可获得同样的照明性能改善。所提方法对于提高扩展光源匀光照明的照度均匀性、照明效率以及提升光斑的陡边性,均具有非常明显的效果,为大功率 LED 匀光照明设计提供了一种新思路。

参 考 文 献

- [1] Ge A M, Cai J L, Chen D H, *et al.* Optical design of a street lamp based on dual-module chip-on-board LED arrays [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(25): 5750-5754.
- [2] Wu T Z, Lin Y, Zhu H H, *et al.* Multi-function indoor light sources based on light-emitting diodes - a solution for healthy lighting [J]. *Optics Express*, 2016, 24(21): 24401-24412.
- [3] Rao F, Zhu X F, Xu A C, *et al.* Effect of retina illuminance, circadian rhythm and blue light hazard of LED backlight display on the human of different ages [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(4): 0417003.
- [4] Liu H, Hu L D, Jiang L F, *et al.* Optical design of a free-form lens for integrated package-type LED street light [J]. *Optical Technique*, 2010, 36(6): 820-824.
- [5] Ding Y. Design of freeform optical devices and their applications in illumination systems [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009: 22-119.
- [6] Yu G Y, Jin J, Ni X W, *et al.* Design for LED uniform illumination reflector based on etendue [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(8): 2297-2301.
- [7] Zhu X B, Cui H T, Qian L Y, *et al.* Study on night vision compatible backlight module of LED liquid crystal display [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(9): 091203.
- [8] Ding Y, Zheng Z R, Gu P F. Freeform lens design for LED illumination [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(6): 1486-1490.
- [9] Lu J N, Yu J, Tong Y Z, *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.
- [10] Chen R, Cen S Y, Jin S Z. A machine vision illumination system based on simultaneous multiple surfaces design [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(8): 956-961.
- [11] Zhang H, Liang X, Yan J H, *et al.* 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.
- [12] Miñano J C, Benítez P, Lin W, *et al.* An application of the SMS method for imaging designs[J]. *Optics Express*, 2009, 17(26): 24036-24044.
- [13] Liang W Y, Li Y X, Long Y B, *et al.* Design of freeform surface lens with chip on board LED sources for uniform illumination[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(1): 012202.
- 梁文跃, 李远兴, 龙拥兵, 等. 板上芯片型LED光源均匀照明自由曲面透镜设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(1): 012202.
- [14] Li D G, Yin S F, Ling Y S, *et al.* A feedback design method of freeform reflector for uniform illumination with extended sources [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(4): 0422001.
- 李登高, 殷松峰, 凌永顺, 等. 用于扩展光源均匀照明的自由曲面反馈设计[J]. *光子学报*, 2014, 43(4): 0422001.
- [15] Wang K, Han Y J, Li H T, *et al.* Overlapping-based optical freeform surface construction for extended lighting source[J]. *Optics Express*, 2013, 21(17): 19750-19761.
- [16] Li X, Huang Y F, Tan Y Q, *et al.* Optimization method for compact lighting system based on SelPSO algorithm[J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, 37(4): 595-601.
- 李潇, 黄逸峰, 谭叶青, 等. 基于SelPSO算法的紧凑型照明器件优化方法[J]. *应用光学*, 2016, 37(4): 595-601.
- [17] Wu T, Su Z P. Design of free-form lens for extended LED source based on weighted overlap algorithm[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(12): 122202.
- 吴涛, 苏宙平. 基于加权叠加法的扩展LED光源自由曲面透镜设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(12): 122202.
- [18] Chen E Z, Guo Z N, Zhi J J. Lens design with uniform illumination of the LED extended sources [J]. *Journal of Huaqiao University (Natural Science)*, 2013, 34(6): 632-635.
- 陈俄振, 郭震宁, 智佳军. LED扩展光源均匀照明的透镜设计[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2013, 34(6): 632-635.