

应用于 Mini-LED 背光的双自由曲面透镜设计

冯奇斌¹, 杨玲², 张乐², 靳鹏³, 王梓¹, 吕国强^{2*}¹合肥工业大学特种显示与成像技术安徽省技术创新中心, 特种显示技术国家工程实验室, 光电技术研究院, 安徽 合肥 230009;²合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009;³安徽芯瑞达科技股份有限公司, 安徽 合肥 230601

摘要 提出了一种单个透镜目标面照度分布的设计方法, 根据背光中 Mini-LED 光源数量及阵列排布间距、混光距离、目标面光斑半径等信息, 建立了背光目标面上照度值与单颗透镜目标面照度分布之间的映射矩阵, 通过 LSQLIN 迭代优化算法得到单颗透镜目标面照度分布, 最后采用光源-目标面能量映射法设计双自由曲面透镜。以 Mini-LED 阵列排布间距为 39 mm × 30 mm、混光距离为 6 mm 且目标面光斑半径为 40 mm 为例进行设计。仿真结果表明, 所设计的透镜阵列应用于光源数为 5 × 5 的 Mini-LED 背光时, 目标面照度均匀性达到 87.45%, 对比常用的均匀分布及高斯分布分别提升 6.24% 和 3.34%。本方法在确保背光照度均匀性的前提下降低了透镜设计的计算复杂度, 无需大量的后续优化工作, 为 Mini-LED 背光中双自由曲面透镜的设计提供了一种实用有效的方法。

关键词 光学设计; 背光模组; 双自由曲面透镜; 目标面照度分布; 迭代优化算法

中图分类号 TN141.9

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221633

1 引言

液晶显示器件运用广泛, 逐渐向更薄、功耗更低的方向发展。由于液晶自身不发光, 需要背光模组提供照明光线^[1-4]。目前主流的背光光源是 LED, 随着半导体技术的发展, LED 发光芯片的尺寸缩小到几百微米, 出现 Mini-LED^[5]。采用 Mini-LED 作为光源的背光模组能够有效减小混光距离(OD), 且发光效率高、重量轻, 因此 Mini-LED 成为超薄化背光模组的理想光源。

在背光模组中, 通常采用双自由曲面透镜(简称透镜)调控芯片发出的光线并减小 OD^[6]。目前针对透镜的设计方法主要包括光源-目标面能量映射法^[7-10]、同步多曲面法^[11-12]及反馈优化法^[13-14]等。

在现有的基于点光源的设计中, 透镜匀光效果在扩展光源下劣化程度较大^[15-16], 需要大量的后期优化工作, 过程繁琐复杂; 和 LED 相比, Mini-LED 尺寸小, 透镜在扩展光源下的匀光效果劣化程度大大降低, 因此能够将 Mini-LED 假设为点光源进行简化设计。在光源-目标面能量映射法中, 需要根据输入的单颗透镜目标面照度分布(简称目标面照度分布)对透镜进行设计^[17-19], 目标面照度分布直接决定了透镜的面型, 对于

整个透镜的开发具有重要影响。通常将目标面照度分布直接设置为均匀分布或高斯分布, 由于未完全考虑光线叠加对背光的影响, 设计出的透镜阵列应用于一定 OD 上的背光模组时, 目标面上均匀性较差, 这对实际应用造成很大困扰。

为了解决此问题, 本文提出一种单颗透镜目标面照度分布的设计方法, 建立了在一定 OD 上的背光模组目标面照度值与单颗透镜目标面照度分布之间的映射矩阵, 并通过 LSQLIN 迭代优化算法计算出在以光斑半径 R 进行设计时的理想目标面照度分布。在已知光源及目标面照度分布的情况下^[20], 采用光源-目标面能量映射法设计出双自由曲面透镜。

2 基于映射矩阵的目标面照度分布设计方法

图 1 为直下式 Mini-LED 背光模组示意图, 从下到上分别是反射板、印刷电路板(PCB)、Mini-LED 光源、双自由曲面透镜及扩散膜。其中光源为水平间距为 $\Delta_{pitch,x}$ 和垂直间距为 $\Delta_{pitch,y}$ 的阵列排布。

如图 2 所示, 在背光模组中, 单个 Mini-LED 光源出射的光线经双自由曲面调控后入射到 OD 为 H 的目标面上, 形成半径为 R 的圆形光斑。将 R 离散为 D

收稿日期: 2022-08-23; 修回日期: 2022-09-20; 录用日期: 2022-10-08; 网络首发日期: 2022-10-18

基金项目: 安徽省科技重大专项(202103a05020028)

通信作者: *guoqianglv@hfut.edu.cn

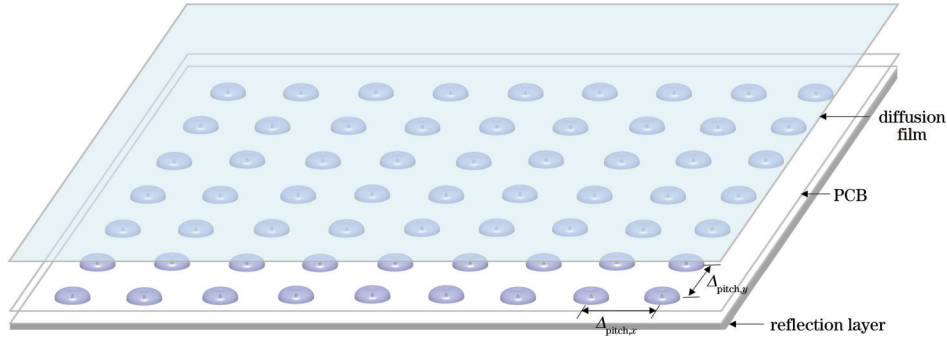


图 1 直下式 Mini-LED 背光模组结构

Fig. 1 Structure of direct-lit Mini-LED backlight module

个等分点, 每个点到圆心的距离表示为出射半径 $r_d (d = 1, 2, \dots, D)$, 其对应的目标面上照度值为 e_d ,

其中 $r_D = R$; 以不同半径出射的光线对应的目标面上照度值组成单颗透镜目标面照度分布。

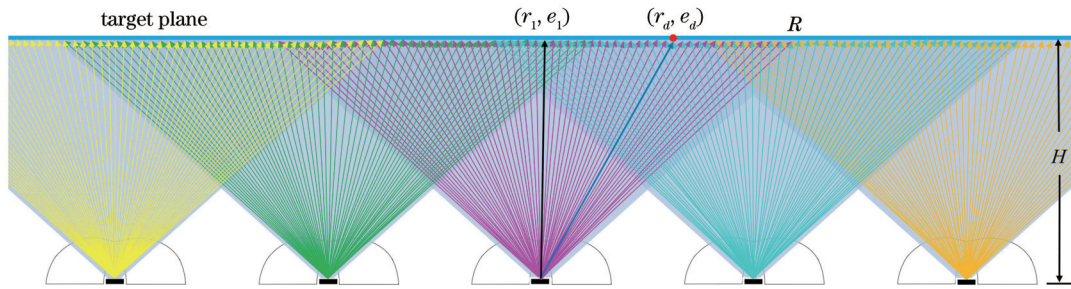


图 2 Mini-LED 光源光线出射情况

Fig. 2 Mini-LED light source output situation

对于其中单个 Mini-LED 而言, 出射的光线入射到目标面的不同位置, 也就是说在目标面同一位置, 有来自不同 Mini-LED 的光线入射。Mini-LED 背光模组的基本模型可以认为是相互之间具有一定阵列间距 $\Delta_{pitch,x}$ 和 $\Delta_{pitch,y}$ 的多个 Mini-LED 光源经透镜调控后的出射光线在一定 OD 上的叠加, 单个透镜光斑叠加后形成 Mini-LED 背光模组目标面上的面光源, 为确保面光源均匀, 单颗透镜在目标面上的照度分布非常重要。因此对出射光线对应的目标面照度值 e_d 进行合理设计, 就能确保背光模组在一定 OD 上照度均匀分布。

将一定 OD 上的背光模组目标面上照度值作为目标, 记为矩阵 I ; 将单颗透镜目标面照度分布记为向量 X , 记录了不同半径 r_d 对应的照度值 e_d ; W 为映射矩阵, 记录了 Mini-LED 光源的光线出射信息。将上述求解 e_d 的问题转化为在已知目标面上照度值的情况下求解单颗透镜目标面照度分布, I 、 W 及 X 之间关系的问题, 可表示为

$$I = WX, \tag{1}$$

$$X = [e_1 \ e_2 \ \dots \ e_D]^T. \tag{2}$$

建立映射矩阵 W 后, 由式(1)便可得到单颗透镜的目标面照度分布 X 。对于 X 的求解实际上是一个线性方程组的不定解问题, 本文由 LSQLIN 迭代优化算法对向量 X 进行计算^[21]。

由上述方法计算得到单颗透镜目标面照度分布后, 由光源-目标面能量映射法对透镜进行设计。在光源-目标面能量映射法设计中, 首先需要确定目标面光斑半径 R , 其对于透镜面型的生成至关重要。在 Mini-LED 背光模组中, 为满足均匀照明需求, R 至少需要完全覆盖 Mini-LED 的阵列间距, 其大小为

$$R \geq \frac{1}{2} \sqrt{\Delta_{pitch,x}^2 + \Delta_{pitch,y}^2}. \tag{3}$$

2.1 背光模组目标面上照度值矩阵 I 的建立

在 Mini-LED 背光模组中, Mini-LED 芯片尺寸小且密集排布, 若对整个目标面上照度值进行计算, 工作量巨大且计算复杂。为了降低计算复杂度, 选取目标面上相邻 4 个 Mini-LED 光源形成的区域作为照度值计算区域^[22], 其尺寸为 $\Delta_{pitch,x} \times \Delta_{pitch,y}$ 。

如图 3 所示, 将此区域划分为 $M \times N$ 个混光区域。每个混光区域的中心点坐标表示为 (m, n) , 其中: $m = 1, 2, \dots, M$; $n = 1, 2, \dots, N$ 。不同混光区域对应一个照度值 $E_{m,n}$, 得到维度为 $M \times N$ 的照度值矩阵 B ; 为方便后续计算, 将矩阵 B 沿列方向从上到下、从左到右依次排列^[23], 得到目标面照度值矩阵 I :

$$B = \begin{bmatrix} E_{1,1} & E_{1,2} & \dots & E_{1,N} \\ E_{2,1} & E_{2,2} & \dots & E_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ E_{M,1} & E_{M,2} & \dots & E_{M,N} \end{bmatrix}, \tag{4}$$

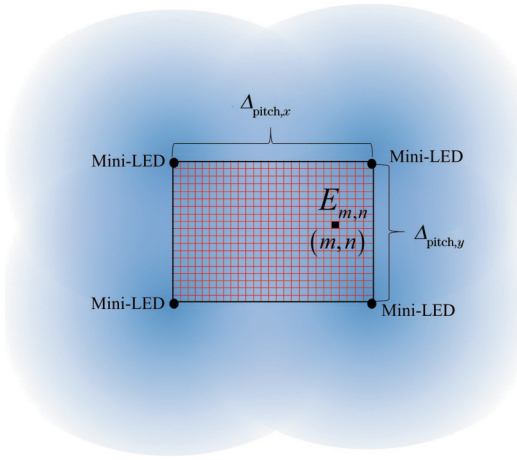


图 3 混光区域划分示意图
Fig. 3 Mixing light area division diagram

$$I = \begin{bmatrix} E_{1,1} \\ E_{1,2} \\ \vdots \\ E_{m,n} \\ \vdots \\ E_{M,N} \end{bmatrix} \quad (5)$$

在式(1)中,背光模组目标面照度值矩阵 I 为设计目标,理想情况下 I 内各值相同,本文以 I 内值均为 1 进行设计。

2.2 映射矩阵 W 的构建

矩阵 W 对于求解目标面照度分布向量 X 至关重要,其对 Mini-LED 光源的光线出射信息进行了记录。对 Mini-LED 光源出射半径 r_d 及对应的权重系数 $\omega_d(m, n)$ 进行计算,构建权重系数 $\omega_d(m, n)$ 与 r_d 之间的映射矩阵 W ,其中权重系数 $\omega_d(m, n)$ 表示出射半径为 r_d 的光线对混光区域 (m, n) 照度值 $E_{m,n}$ 的影响程度。

如图 4 所示,假设背光中 Mini-LED 数量为 $P \times Q$,其在目标面上的坐标为 (x_i, y_j) , i 和 j 分别为该 Mini-LED 在水平及垂直方向的位置,其中: $1 \leq i \leq P$; $1 \leq j \leq Q$ 。单个 Mini-LED 光源到目标面上混光区域 (m, n) 的距离 r_a 可表示为

$$r_a = \sqrt{(x_i - m)^2 + (y_j - n)^2} \quad (6)$$

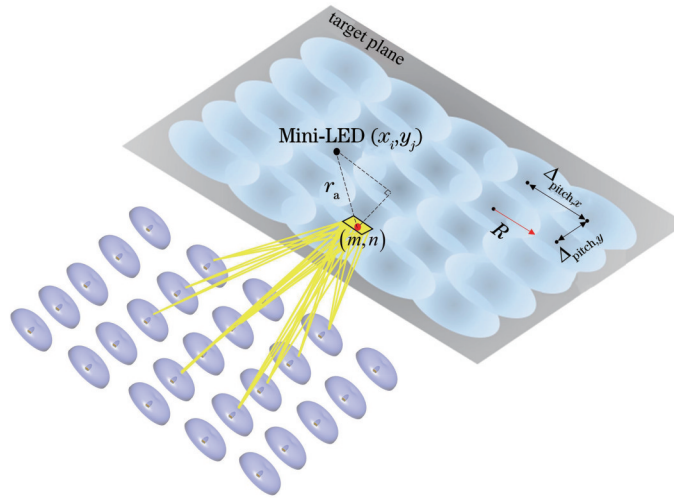


图 4 混光区域光线入射情况
Fig. 4 Incidence of light in mixed light area

由于 Mini-LED 光源出射光线半径不大于 R ,需要判断此光源出射的光线能否到达混光区域 (m, n) 内,进而对其照度值产生影响,判断方法为

$$\varphi_a(m, n, i, j) = \begin{cases} 1, & r_a \leq R \\ 0, & r_a > R \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\varphi_a(m, n, i, j)$ 为影响系数。当 $r_a \leq R$ 时,表明此光源以半径 r_a 出射的光线能入射到混光区域内,进而对其照度值 $E(m, n)$ 产生影响,则 r_a 对应的的影响系数 $\varphi_a(m, n, i, j) = 1$; 当 $r_a > R$ 时,表明此光源出射光线不能入射到混光区域内,对应的的影响系数 $\varphi_a(m, n, i, j) =$

0。

在光源数为 $P \times Q$ 的背光中,混光区域 (m, n) 可能受多个 Mini-LED 光源出射光线的影响,当不同 Mini-LED 光源到混光区域 (m, n) 的距离为 r_a 且满足 $r_a \leq R$,表明共有 $\sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^Q \varphi_a(m, n, i, j)$ 条半径为 r_a 的光线入射到混光区域 (m, n) 中;对于朗伯分布的点光源,光强可以表示为

$$I(\theta) = I_0 \cos \theta, \quad (8)$$

式中: I_0 为以 0° 出射光线的光强大小; θ 为光源出射角度,其与出射半径之间的关系可表示为

$$\theta = \arctan \frac{r_a}{H} \quad (9)$$

由于以不同半径出射的光线带有的能量不同,为简化设计,以光线对应的光强大小代表其能量大小。对背光中所有 Mini-LED 光源的光线出射位置信息依次进行记录,则出射半径为 r_a 的光线对混光区域 (m, n) 照度值的影响程度可由对应的权重系数 $\omega_a(m, n)$ 表示:

$$\omega_a(m, n) = \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^Q \varphi_a(m, n, i, j) I_0 \cos \theta \quad (10)$$

同理,记录在 $M \times N$ 个不同混光区域内以半径 $r_d (d=1, 2, \dots, D)$ 入射的光线数量,建立权重系数 $\omega_d(m, n)$ 与 r_d 的映射矩阵 W :

$$W = \begin{bmatrix} \omega_1(1, 1) & \omega_2(1, 1) & \dots & \omega_D(1, 1) \\ \omega_1(1, 2) & \omega_2(1, 2) & \dots & \omega_D(1, 2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \omega_1(m, n) & \omega_2(m, n) & \dots & \omega_D(m, n) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \omega_1(M, N) & \omega_2(M, N) & \dots & \omega_D(M, N) \end{bmatrix} \quad (11)$$

得到映射矩阵 W 后,矩阵 W 、向量 X 及矩阵 I 的关系可表示为

$$\begin{bmatrix} E_{1,1} \\ E_{1,2} \\ \vdots \\ E_{m,n} \\ \vdots \\ E_{M,N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_1(1, 1) & \omega_2(1, 1) & \dots & \omega_D(1, 1) \\ \omega_1(1, 2) & \omega_2(1, 2) & \dots & \omega_D(1, 2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \omega_1(m, n) & \omega_2(m, n) & \dots & \omega_D(m, n) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \omega_1(M, N) & \omega_2(M, N) & \dots & \omega_D(M, N) \end{bmatrix} X \quad (12)$$

本文采用 MATLAB 高维度线性最小二乘

法-LSQLIN 算子进行求解^[24],其通过不断迭代对向量 X 进行优化,最后计算出 X 。

2.3 基于目标面照度分布的双自由曲面透镜设计

采用上述方法得到目标面照度分布后,由光源-目标面能量映射法设计双自由曲面透镜,设计流程图如图 5 所示。

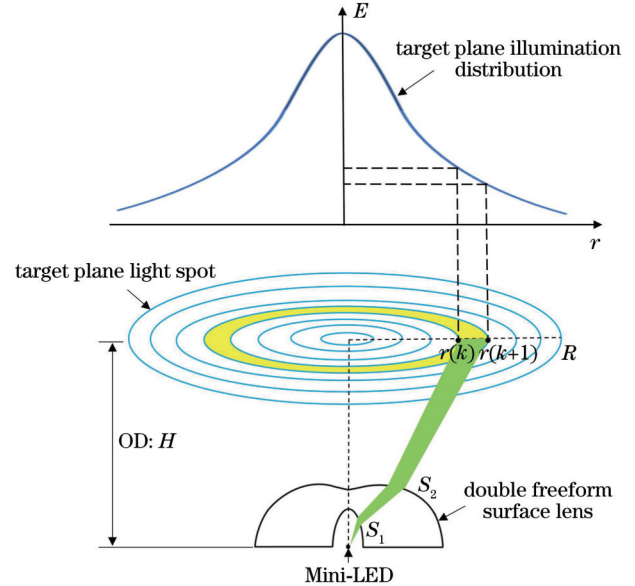


图 5 基于目标面照度分布的透镜设计流程图

Fig. 5 Flow chart of lens design based on target plane illumination distribution

图 6 为光源和目标面划分及二者的对应关系,对于朗伯分布的点光源,光强满足 $I(\theta) = I_0 \cos \theta$ 。光源总光通量为 ϕ_{total} ,将光源光通量 D 等分,则有

$$2\pi \int_{\theta_k}^{\theta_{k+1}} I(\theta) \sin \theta d\theta = \frac{\phi_{total}}{D} = \frac{2\pi}{D} \int_0^{\frac{\pi}{2}} I(\theta) \sin \theta d\theta \quad (13)$$

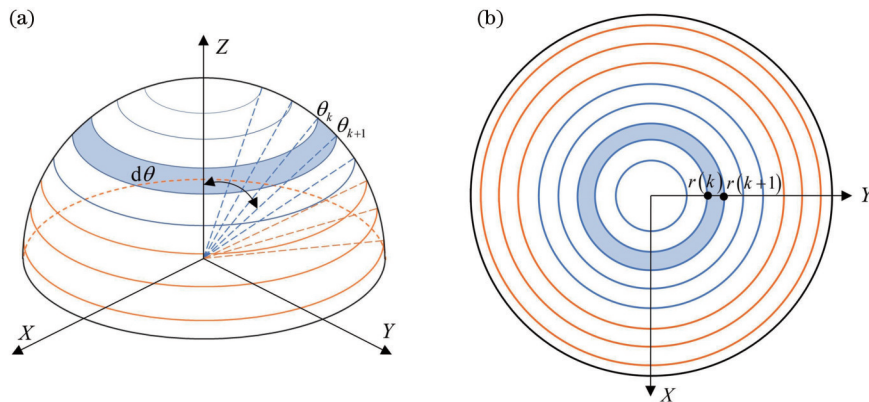


图 6 光源和目标面划分及二者的对应关系。(a)光源按等光通量划分;(b)目标面按照度分布划分

Fig. 6 Division of light source and target plane and corresponding relation between them. (a) Divide luminous flux of light source equally; (b) divide area of target plane according to illuminance distribution

在光源目标面能量映射法中,首先根据目标面照度分布对光斑半径 R 进行划分。将目标面划分为 D 个同心圆环,每个圆环面积为 $S(k)$,其中, $k =$

$0, 1, \dots, D - 1$ 。Mini-LED 光源的总光通量为 ϕ_{total} ,假设光线经透镜调控后入射到每个圆环内的光通量 ϕ 都相同,由光通量守恒定律可得

$$\begin{cases} \phi_{\text{total}} = E_{\text{avg}} S_{\text{total}} = E_{\text{avg}} \pi R^2 = D\phi \\ \phi_{\text{total}} = \sum_{k=0}^{D-1} E(k) S(k) \\ S(k) = \pi r(k+1)^2 - \pi r(k)^2 \end{cases}, \quad (14)$$

式中: E_{avg} 、 $E(k)$ 分别为入射到面积单元的平均照度值及每个圆环内的照度值, 其中 $E(k)$ 的值等于计算得到的目标面照度值; $r(k)$ 为圆环半径。以 $r_0=0$ 进行迭代计算, 得到每个圆环的半径 $r(k)$, 进而完成对目标面光斑半径 R 的重新分配。由于选择的点光源发光强度呈旋转对称分布, 目标面照度分布同样呈旋转对称分布, 因此设计的透镜结构也呈旋转对称结构。因此对于旋转对称透镜的设计, 仅需设计一条母线, 通过旋转对称就得到了透镜实体模型。双自由曲面透镜设计示意图如图 7 所示, 根据 Snell 定律可迭代计算出透镜内外母线上的采样点^[7-8]。

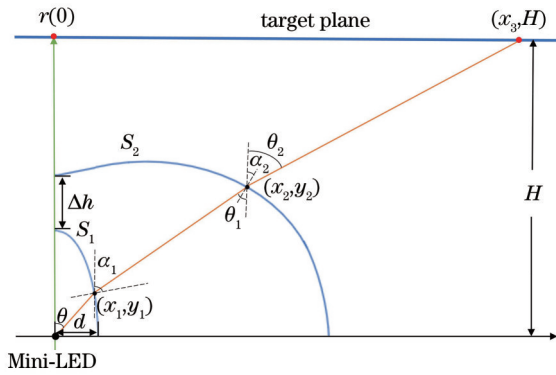


图 7 双自由曲面透镜设计示意图

Fig. 7 Schematic of design of double freeform surface lens

$$\begin{cases} n_1 \sin[\alpha_1(k) - \theta(k)] = n_2 \sin[\alpha_1(k) - \theta_1(k)] \\ n_2 \sin[\theta_1(k) - \alpha_2(k)] = n_1 \sin[\theta_2(k) - \alpha_2(k)] \\ \tan \theta(k) = \frac{x_1(k)}{y_1(k)} \\ \tan \theta_1(k) = \frac{x_2(k) - x_1(k)}{y_2(k) - y_1(k)} \\ \tan \theta_2(k) = \frac{x_3(k) - x_2(k)}{H - y_2(k)} \\ \tan \alpha_1(k) = -\frac{y_1(k+1) - y_1(k)}{x_1(k+1) - x_1(k)} \\ \tan \alpha_2(k) = \left| \frac{y_2(k+1) - y_2(k)}{x_2(k+1) - x_2(k)} \right| \\ \theta(k) = m \cdot \alpha_1(k) \end{cases}, \quad (15)$$

式中: n_1 为空气的折射率; n_2 为透镜材料的折射率; θ_1 、 θ_2 分别为 S_1 、 S_2 上垂直线与出射光线之间的夹角; α_1 、 α_2 分别为 S_1 、 S_2 上的采样点法线与垂直线的夹角。根据式 (15), 确定 $x_1(0)$ 及 $y_1(0)$, 即可迭代计算出透镜内、外母线上采样点的坐标。将采样点导入

SolidWorks 中进行 360° 旋转, 得到 3D 实体模型, 完成透镜设计。

3 分析及讨论

由于在 Mini-LED 背光模组中, 光源芯片数量多且光线出射情况复杂, 由式 (3) 可知, 当 $R = \sqrt{\Delta_{\text{pitch},x}^2 + \Delta_{\text{pitch},y}^2} / 2$ 时, 影响混光区域照度值的 Mini-LED 数量为 2×2 , 随着 R 的增大, 对其产生影响的 Mini-LED 数量增多; 在以 $\sqrt{\Delta_{\text{pitch},x}^2 + \Delta_{\text{pitch},y}^2} / 2 \leq R \leq \sqrt{\Delta_{\text{pitch},x}^2 + \Delta_{\text{pitch},y}^2}$ 的设计中, 为确保目标面上照度值向量 I 内 $M \times N$ 个混光区域的照度值完全受周围 Mini-LED 的影响, 选择 5×5 阵列进行分析来简化设计。现基于本文方法设计一款双自由曲面透镜, 设计指标为: Mini-LED 芯片尺寸为 $0.254 \text{ mm} \times 0.711 \text{ mm} \times 0.150 \text{ mm}$, $\Delta_{\text{pitch},x} = 39 \text{ mm}$, $\Delta_{\text{pitch},y} = 30 \text{ mm}$, OD 为 6 mm , 以目标面光斑半径 $R = 40 \text{ mm}$ 进行设计。

在光学仿真软件 LightTools 中建模并进行仿真, 如图 8 所示。

3.1 不同设计方法的仿真对比

为了更好地进行分析比较, 本文基于 5×5 阵列, 同时对目标面照度分布为均匀分布和高斯分布的透镜进行了设计。其中, 在基于高斯分布的设计中, 单颗透镜目标面照度分布满足高斯函数:

$$E_d(i, j) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{[r_d(x, y) - \mu]^2}{2\sigma^2} \right\}, \quad (16)$$

式中: $E_d(i, j)$ 为 Mini-LED 出射半径为 $r_d(i, j)$ ($d=1, 2, \dots, D$) 的光线对应的目标面照度值, i 和 j 分别为该 Mini-LED 在水平及垂直方向的位置, $1 \leq i \leq 5$, $1 \leq j \leq 5$; μ 为高斯分布的期望值; σ 为高斯分布的标准差, 两者均为未知数。在式 (16) 中, 确定未知数 μ 和 σ 便可得到目标面照度分布, 在之前基于高斯分布的研究中, 通过对照度值计算区域半对角线上 G 个离散参考点的照度值 $E(c)$ ($c=1, 2, \dots, G$) 进行计算, 得到当均方根误差 (E_{RMS}) 取得最小值时的目标面照度分布, 其中 E_{RMS} 的求解式为

$$E(c) = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 E_d(i, j), \quad (17)$$

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{G} \sum_{c=1}^G [E(c) - \bar{E}]^2}, \quad (18)$$

式中: \bar{E} 为 G 个离散参考点的照度平均值。当 E_{RMS} 取最小值时计算得到 μ 和 σ , 进而确定目标面照度分布。当 $R = 40 \text{ mm}$ 时, 计算得到 $\mu = 0.8$, $\sigma = 19$ 。

对三种方法以 $R = 40 \text{ mm}$ 进行设计, 对计算出的照度值进行归一化处理, 得到目标面照度分布如图 9 所示。由于高斯分布是由高斯函数拟合得到, 因此得到的目标面照度分布为一平滑曲线; 而本文方法设计得到的

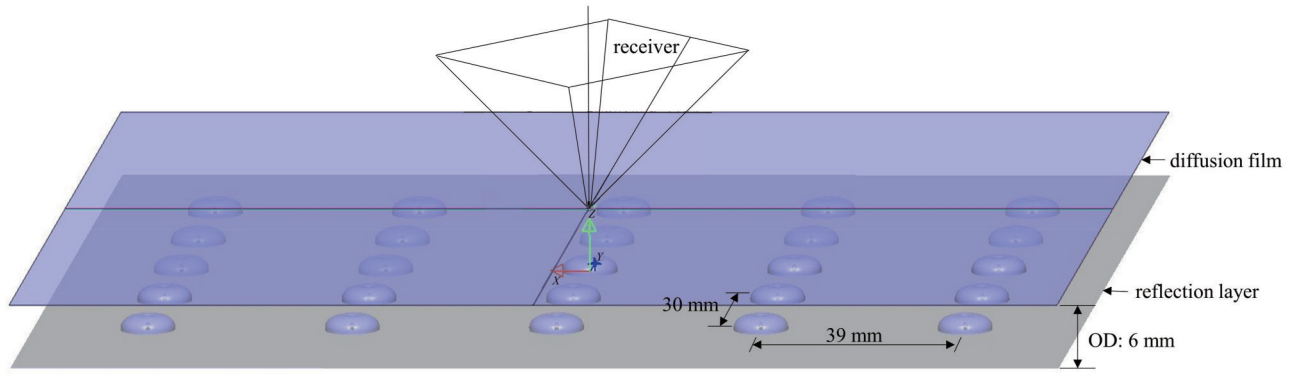


图 8 Mini-LED 的 5 × 5 阵列仿真模型

Fig. 8 5 × 5 array simulation model of Mini-LED

出射半径为 $r_d (d = 1, 2, \dots, D)$ 的光线对应的目标面上照度值为 D 个离散数据, 不需要通过拟合方法得到, 因此由离散照度值组成的曲线为非光滑曲线。

由于设计中需满足芯片能放置于透镜内的条件,

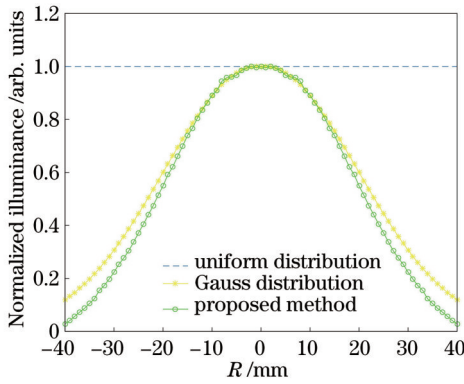


图 9 三种方法计算得到的目标面照度分布

Fig. 9 Illuminance distribution of target plane calculated by three methods

因此透镜内曲面直径需大于等于芯片尺寸, 透镜内曲面半径 d 需满足条件: $d \geq \sqrt{0.254^2 + 0.711^2} / 2 \text{ mm} \approx 0.378 \text{ mm}$, 取内曲面半径 $d = 0.450 \text{ mm}$ 进行设计, 以 $x_1(0) = 0.45 \text{ mm}$ 、 $y_1(0) = 0 \text{ mm}$ 作为初始值并且以 $m = 0.45$ 对内外母线采样点进行迭代计算。图 10 是三种方法设计得到的透镜外形图, 可以看出: 当以 $R = 40 \text{ mm}$ 进行设计时, 以本文方法设计得到的透镜半径为 3.7 mm 、高度为 1.97 mm , 透镜整体尺寸小于均匀分布及高斯分布, 满足 Mini-LED 背光轻薄化的要求。目前业内通常采用注塑法大批量生成透镜, 根据设计图纸采用超精密车床对模具进行微纳加工; 模具加工完成后利用注塑机对模具进行打样注塑成型, 生成透镜, 因此透镜能否加工与透镜形貌并无太大关系。透镜注塑加工时需保证内外表面的高度差在 0.8 mm 以上, 本文以内外表面高度差 $\Delta h = 1.0 \text{ mm}$ 对透镜进行设计, 能保证注塑过程顺利进行。

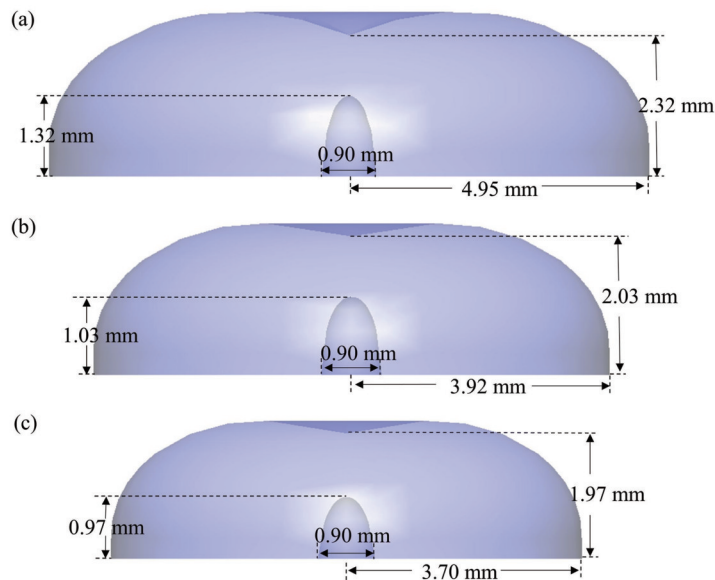


图 10 三种方法设计得到的透镜外形图。(a)均匀分布;(b)高斯分布;(c)本文方法

Fig. 10 Lens profiles obtained by three design methods. (a) Uniform distribution; (b) Gaussian distribution; (c) proposed method

图 11 给出了三种方法设计得到的透镜分别在点光源、扩展光源及扩展光源阵列情况下的仿真照度分布图。可以看出:在点光源下设计的透镜,在扩展光源下

进行仿真时,匀光效果出现劣化;采用均匀分布设计的透镜对比另外两种方法劣化程度严重;本文方法设计得到的透镜劣化程度最低,能有效保证阵列照度均匀性。

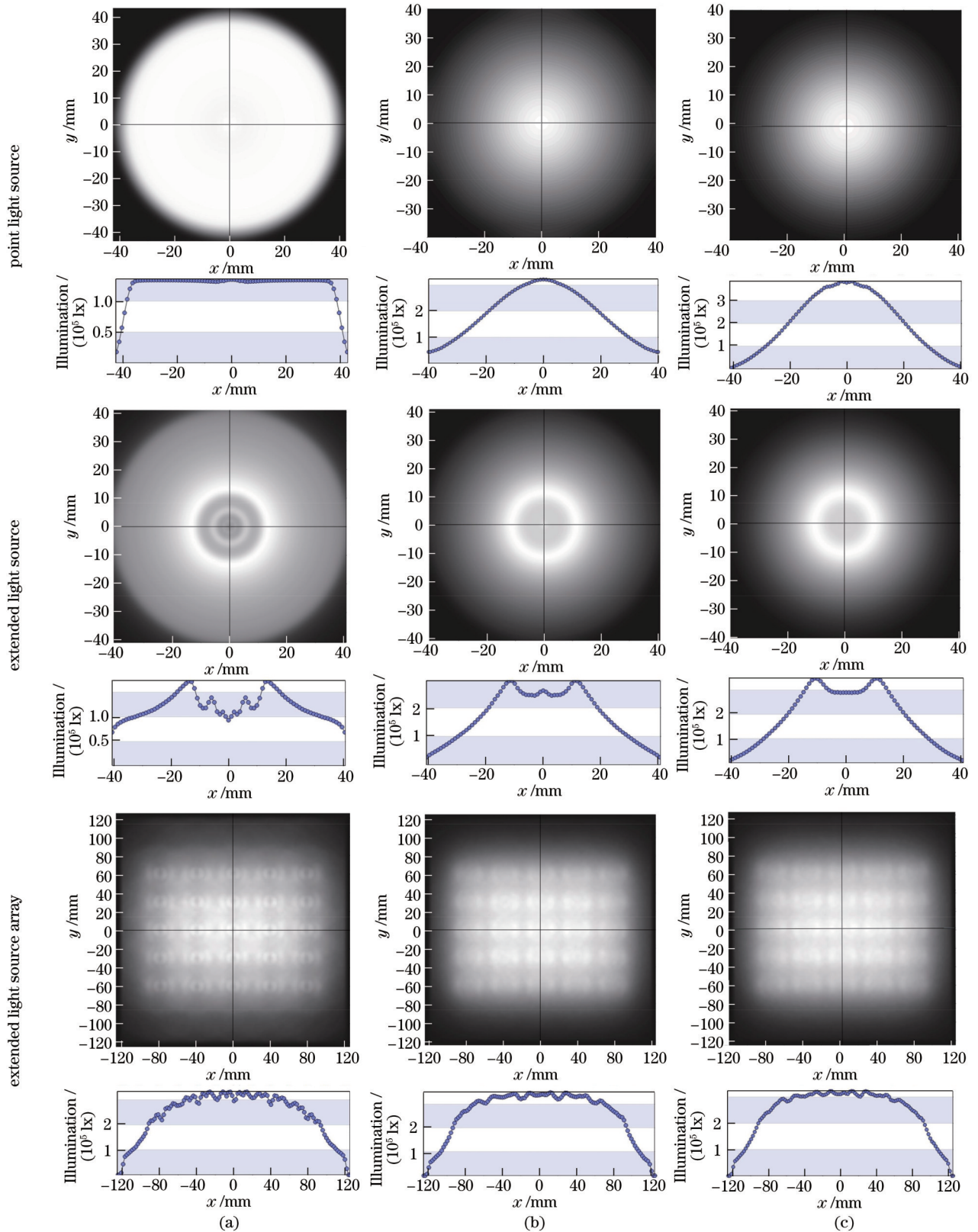


图 11 $R = 40 \text{ mm}$ 的透镜仿真照度分布图。(a)均匀分布;(b)高斯分布;(c)本文方法

Fig. 11 Simulated illumination distributions of lens at $R = 40 \text{ mm}$. (a) Uniform distribution; (b) Gaussian distribution; (c) proposed method

为了定量地评估扩展光源阵列情况下的照度均匀性,选取图 12 所示的 5×5 阵列仿真照度图中 3×3 区

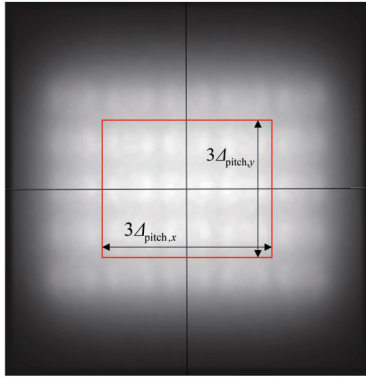


图 12 扩展光源阵列仿真均匀性计算区域

Fig. 12 Calculation area of extended light source array simulation uniformity

域(方框区域)内的最小照度值 E_{\min} 及最大照度值 E_{\max} 进行计算,均匀性 U 可表示为

$$U = \frac{E_{\min}}{E_{\max}} \times 100\% \quad (19)$$

在以 $R = 40 \text{ mm}$ 进行设计时,本文方法设计得到的透镜阵列情况下的目标面照度均匀性为 87.45% ,均匀分布、高斯分布的均匀性计算结果分别为 82.31% 、 84.62% 。

3.2 目标面光斑半径 R 的分析

在上面的设计方法中,目标面光斑半径 R 对设计结果有重要影响,为探究以不同 R 设计的透镜效果,同时对 R 进行了分析。图 13 给出了以不同 R 进行计算并归一化处理后得出的高斯分布及本文方法下的目标面照度分布。对设计得到的透镜进行阵列仿真并计算照度均匀性,结果如表 1 所示。

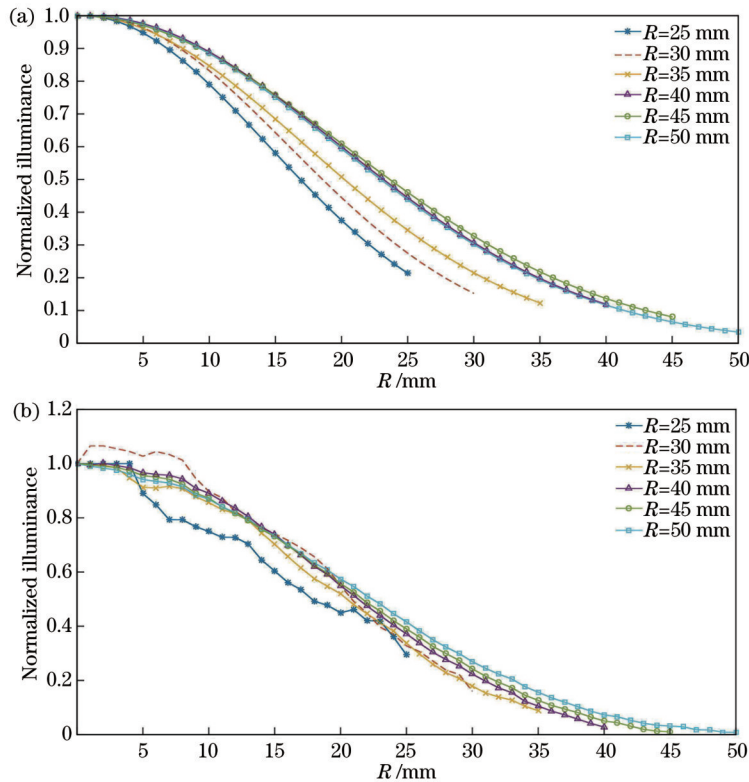


图 13 不同 R 下计算得到的目标面照度分布。(a)高斯分布;(b)本文方法

Fig. 13 Illuminance distributions of target plane obtained under different R . (a) Gaussian distribution; (b) proposed method

由表 1 可以看出,由于均匀分布在设计时并未考虑光线叠加对混光区域照度值的影响,其仿真照度均匀性小于高斯分布及本文方法。基于高斯分布的方法是在考虑 OD 值、 $\Delta_{\text{pitch},x}$ 、 $\Delta_{\text{pitch},y}$ 的前提下,以区域内半对角线上参考点照度均匀性为目标得到单颗透镜目标面照度分布,考虑了光线叠加的影响,因此阵列均匀性高于均匀分布;但在高斯分布方法中,目标面照度分布是由高斯曲线拟合得到,只需要确定相应的 μ 和 σ 后便得到目标面照度分布,目标面上实际照度值与基于高斯分布的拟合值之间存在误差。对比前面 2 种方法,本

文方法在充分考虑 Mini-LED 光源数量、 $\Delta_{\text{pitch},x}$ 、 $\Delta_{\text{pitch},y}$ 及 OD 值并且完全考虑到不同光源出射光线叠加影响的前提下,以混光区域内照度均匀性为目标,通过建立相应的映射矩阵计算出目标面照度分布;由于得到的目标面上照度值 e_d 为 D 个离散数据且不需要通过拟合方法得到,因此本方法设计得到的目标面照度分布不存在拟合误差,在以不同 R 进行设计时阵列照度均匀性 U 高于均匀分布及高斯分布方法,并且本文方法设计的透镜在扩展光源下的劣化程度明显降低,有效提升了阵列照度均匀性。

表 1 阵列仿真均匀性
Table 1 Array simulation uniformity unit: %

Target plane spot radius R /mm	U		
	Uniform distribution	Gaussian distribution	Proposed method
25	64.50	66.59	69.98
30	71.93	74.61	75.27
35	76.54	76.35	78.12
40	82.31	84.62	87.45
45	71.85	87.00	88.39
50	70.57	85.79	87.60

4 结 论

提出一种单个透镜目标面照度分布的设计方法, 根据背光中 Mini-LED 光源数量及阵列排布间距 $\Delta_{pitch,x}$ 和 $\Delta_{pitch,y}$ 、OD 值、目标面光斑半径 R 等信息, 建立了背光目标面照度值与单颗透镜目标面照度分布之间的映射矩阵, 并通过迭代优化算法得到单颗透镜目标面照度分布曲线。对比传统均匀分布及高斯分布, 本方法设计出的透镜具有尺寸小、应用于背光模组时目标面均匀性高的优点。本方法降低了透镜设计的计算复杂度, 且不需要大量的后续优化工作, 具有较强的实用性。

参 考 文 献

- [1] Chen B T, Pan J W. High-efficiency directional backlight design for an automotive display[J]. Applied Optics, 2018, 57(16): 4386-4395.
- [2] Leiner C, Nemitz W, Wenzl F P, et al. Ultrathin free-form micro-optical elements for direct-lit applications with a large distance-height ratio[J]. OSA Continuum, 2018, 1(4): 1144-1157.
- [3] Zhu Z B, Yan Y M, Wei S L, et al. Compact freeform primary lens design based on extended Lambertian sources for liquid crystal display direct-backlight applications[J]. Optical Engineering, 2019, 58(2): 025108.
- [4] Zhang R. Directional backlighting system using a light guide with paired microstructures[J]. Applied Optics, 2017, 56(24): 6735-6741.
- [5] 冯奇斌, 肖慧丽, 杨玲, 等. 用于超薄 MiniLED 背光模组的光学膜设计[J]. 光学精密工程, 2021, 29(11): 2548-2555.
Feng Q B, Xiao H L, Yang L, et al. Design of optical film for ultra-thin MiniLED backlight modules[J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(11): 2548-2555.
- [6] 周彦辰, 郭亮, 陈志涛, 等. 基于全内反射结构的多自由曲面准直透镜设计[J]. 光学学报, 2021, 41(4): 0422003.
Zhou Y C, Guo L, Chen Z T, et al. Design of collimating lens with multiple freeform surfaces based on total internal reflection structure[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(4): 0422003.
- [7] Babadi S, Ramirez-Iniguez R, Boutaleb T, et al. Symmetric and asymmetric freeform lens to produce uniform illumination[J]. Optical Engineering, 2020, 59(1): 015102.
- [8] 黄丹, 冯奇斌, 唐天, 等. 基于扩展光源的曲面能量映射优化

设计方法[J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1222003.

Huang D, Feng Q B, Tang T, et al. Design method for surface energy mapping optimization based on extended light source[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12): 1222003.

- [9] 赵伟, 刘旭, 李海峰. 基于自由曲面阵列的激光投影显示照明系统设计[J]. 光学学报, 2018, 38(6): 0622001.
Zhao W, Liu X, Li H F. Design of laser projection display illumination system based on freeform surface array[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(6): 0622001.
- [10] Wang G Z, Wang L L, Li L, et al. Secondary optical lens designed in the method of source-target mapping[J]. Applied Optics, 2011, 50(21): 4031-4036.
- [11] Gimenez-Benitez P, Miñano J C, Blen J, et al. Simultaneous multiple surface optical design method in three dimensions[J]. Optical Engineering, 2004, 43(7): 1489-1502.
- [12] Grabovičkić D, Benítez P, Miñano J C. Free-form V-groove reflector design with the SMS method in three dimensions[J]. Optics Express, 2011, 19(S4): A747-A756.
- [13] Li Z T, Yu S D, Lin L W, et al. Energy feedback freeform lenses for uniform illumination of extended light source LEDs[J]. Applied Optics, 2016, 55(36): 10375-10381.
- [14] Chen J J, Huang Z Y, Liu T S, et al. Freeform lens design for light-emitting diode uniform illumination by using a method of source-target luminous intensity mapping[J]. Applied Optics, 2015, 54(28): E146-E152.
- [15] Wu R M, Chang S Q, Zheng Z R, et al. Formulating the design of two freeform lens surfaces for point-like light sources[J]. Optics Letters, 2018, 43(7): 1619-1622.
- [16] Wu D, Wang K, Chigrinov V G. Feedback reversing design method for uniform illumination in LED backlighting with extended source[J]. Journal of Display Technology, 2014, 10(1): 43-48.
- [17] Zhao Z L, Zhang H H, Zheng H, et al. New reversing freeform lens design method for LED uniform illumination with extended source and near field[J]. Optics Communications, 2018, 410: 123-129.
- [18] Kuo S H, Chen C F. Design of direct LED backlighting based on an analytical method of uniform illumination[J]. Journal of Display Technology, 2016, 12(10): 1089-1096.
- [19] Lee T X, Chen B S. High uniformity and tolerance design for direct-lit LED backlight illumination using Lagrange interpolation [J]. Journal of Display Technology, 2016, 12(11): 1403-1410.
- [20] 张航, 陈嘉文, 胡月姣, 等. 基于深度学习和程能映射的自由配光设计[J]. 光学学报, 2022, 42(10): 1022003.
Zhang H, Chen J W, Hu Y J, et al. Freeform light distribution design based on deep learning and length-energy mapping[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(10): 1022003.
- [21] 周云峰, 徐良, 李海峰, 等. 多层光场三维显示及其图像计算的优化[J]. 光子学报, 2018, 47(6): 0610003.
Zhou Y F, Xu L, Li H F, et al. Tomographic 3D display and imaging optimization[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(6): 0610003.
- [22] Ding Z H, Liu Y L, Ma Y G, et al. Direct design of thin and high-quality direct-lit LED backlight systems[J]. IEEE Photonics Journal, 2021, 13(2): 8200210.
- [23] 冯奇斌, 苏凯, 王梓, 等. 基于视角补偿的双层液晶显示图像分割算法研究[J]. 光学学报, 2021, 41(10): 1005001.
Feng Q B, Su K, Wang Z, et al. Viewing-angle-compensation-based image segmentation algorithm for dual-layer LCDs[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(10): 1005001.
- [24] Lee S, Jang C, Moon S, et al. Additive light field displays: realization of augmented reality with holographic optical elements [J]. ACM Transactions on Graphics, 2016, 35(4): 60.

Double Freeform Surface Lens Design for Mini-LED Backlight

Feng Qibin¹, Yang Ling², Zhang Le², Jin Peng³, Wang Zi¹, Lü Guoqiang^{2*}

¹*Special Display and Imaging Technology Innovation Center of Anhui Province, National Engineering Laboratory of Special Display Technology, Academy of Photoelectric Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China;*

²*School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China;*

³*Anhui Coreach Technology Co. Ltd., Hefei 230601, Anhui, China*

Abstract

Objective Liquid crystal displays (LCDs) have been widely employed in various applications, keeping moving towards thinner thickness and lower power consumption. As liquid crystal does not emit light, backlight modules are required to provide illumination rays. Mini light-emitting diodes (Mini-LEDs) have been considered promising light sources for ultra-thin direct-lit backlight modules. In the backlight module, double freeform surface lenses are usually employed to redistribute rays emitted by the chip and further reduce the optical distance (OD), further reducing the backlight module thickness. The common design of the lens is based on a point light source with the rays regulated by the lens to form a spot on the target plane and multiple spots superimposed to form the surface light source on the target plane of the Mini-LED backlight module. Therefore, the illuminance distribution of a single lens on the target plane is very important for the illuminance uniformity of the backlight module. Usually, the illuminance distribution of the target plane is directly set to uniform distribution or Gaussian distribution. However, in previous methods and algorithms, the simultaneous deterioration effects related to the number of Mini-LED chips, the distance between two adjacent lenses, and the optical distance have been ignored at the same time. The illuminance uniformity of the backlight module adopting the traditional method decreases, which causes troubles to the practical application. Therefore, it is necessary to reasonably design the illuminance value of the target plane based on a given array configuration and array pitches for ensuring the uniform illuminance distribution of the backlight module on a certain OD.

Methods This paper proposes a design method to achieve uniform illumination with a high distance-height ratio (DHR). The principle of the method can obtain the illuminance distribution of a single lens on the target plane. The design is carried out in a backlight module with a Mini-LED number of $P \times Q$ and an array of $\Delta_{pitch,x} \times \Delta_{pitch,y}$ ($\Delta_{pitch,x}$ is pitch in x direction, and $\Delta_{pitch,y}$ is pitch in y direction). Firstly, on the target plane, the 2×2 Mini-LED array of the backlight module on a certain OD is divided into $M \times N$ mixing areas. A matrix I is employed to represent the illuminance values in the mixing areas and the illuminance distribution of a single lens on the target plane is represented by a vector X . By recording the amount of ray incident in each mixing area and the amount of energy carried by the rays, the method constructs the mapping matrix W between matrix I and vector X with a target plane spot radius R . Then, an ideal target plane illuminance distribution calculated by the LSQLIN iterative optimization algorithm is obtained. With this distribution, the light source-target plane energy mapping method is finally adopted to design a double freeform surface lens, which could obtain the double freeform surface lens profile. To verify the effectiveness of the proposed method, this paper generates the lens based on the traditional uniform distribution and Gaussian distribution methods for comparison and calculates the illumination uniformity of the array with the designed lens.

Results and Discussions The design is carried out in a backlight module with a Mini-LED number of 5×5 , an array of $39 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$, and an optical distance of 6 mm. Then, the illuminance distribution of the single lens with a spot radius $R=40 \text{ mm}$ is designed. The illuminance distribution of the target plane by this method and the Gaussian distribution are obtained (Fig. 9). The illuminance distribution of the target plane obtained by this method is composed of discrete illuminance values, which is a non-smooth curve. This paper respectively designs the lens with uniform distribution, Gaussian distribution, and distribution based on this proposed method. The shape of the lens obtained from the three distribution designs shows that the overall size of the lens obtained from this design is the smallest (Fig. 10). The model is built in LightTools for array simulation, and the simulation results show that the lens designed by this method has the lowest degradation under the extended light source (Fig. 11). In the array configuration, the target plane illumination uniformity reaches 87.45%, which is 6.24% and 3.34% improvement over the commonly employed uniform and Gaussian distributions respectively. In addition, the simulation uniformity of the lens array designed by this method is higher than that of the methods based on uniform distribution and Gaussian distribution when the spot radius R of different

target planes is designed (Table 1).

Conclusions In this paper, a design method for a double freeform surface lens in Mini-LED backlight module is proposed to achieve uniform illumination. Based on a given array configuration and array pitches, the mapping matrix between the illuminance value of the target plane and the illuminance distribution of the single lens is established. The ideal target plane illuminance distribution is calculated by the LSQIN iterative optimization algorithm. Then, with a spot radius R , a double freeform surface lens is designed by the light source-target plane energy mapping method. The lens could regulate the rays emitted from the Mini-LED chips to achieve uniform illumination on the target plane. A direct-lit Mini-LED backlight with an array of $39\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ and an optical distance of 6 mm is simulated to verify the proposed method. With $R = 40\text{ mm}$, the simulation results show that the illumination uniformity of 5×5 array with the designed lens reaches 87.45% , which realizes uniform illumination on the target plane. Compared with commonly employed uniform and Gaussian distributions, the uniformity improves by 6.24% and 3.34% respectively. At the same time, the smaller designed lens size can help manufacturers to save the generation cost. Consequently, the proposed method is an efficient way to design a double freeform surface lens in Mini-LED backlight module without extensive subsequent optimization work, which may open up an avenue for producing an ultra-thin and high illuminance uniformity direct-lit Mini-LED backlight module.

Key words optical design; backlight module; double freeform surface lens; target plane illuminance distribution; iterative optimization algorithm