

基于扩展光源的曲面能量映射优化设计方法

黄丹^{1,2}, 冯奇斌², 唐天^{1,2}, 王梓², 彭友³, 吴疆³, 王科³, 吕国强^{1,2*}

¹合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009;

²特种显示技术国家工程实验室, 现代显示技术省部共建国家重点实验室, 光电技术研究院, 安徽 合肥 230009;

³安徽芯瑞达科技股份有限公司, 安徽 合肥 230031

摘要 提出了一种基于曲面能量映射的反馈优化设计方法, 通过预先计算目标面能量分布趋势重新分配目标面网格单元, 构建新的自由曲面透镜面型。采用该方法设计并分析比较了一系列透镜, 仿真发现: 当目标面半径与目标面高的比值(DHR)为 2、透镜高和 LED 宽度的比值从 1:1 变化到 1.5:1 时, 照度非均匀性下降了 8.97%~11.95%; 当透镜高和 LED 宽度的比值为 1.5:1、DHR 从 1.8 变化到 2.2 时, 照度非均匀性下降了 7.60%~16.49%。所提方法能有效改善扩展光源下目标面的照度均匀性, 设计过程不依赖于仿真软件, 迭代次数少, 简便易行。

关键词 光学设计; 自由曲面透镜; 扩展光源; 反馈优化

中图分类号 TN141.9

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1222003

Design Method for Surface Energy Mapping Optimization Based on Extended Light Source

Huang Dan^{1,2}, Feng Qibin², Tang Tian^{1,2}, Wang Zi², Peng You³,

Wu Jiang³, Wang Ke³, Lü Guoqiang^{1,2*}

¹School of Instrumentation and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China;

²National Engineering Laboratory of Special Display Technology, National Key Laboratory of Advanced Display Technology, Academy of Photoelectric Technology, Hefei, Anhui 230009, China;

³Anhui Coreach Technology Co., Ltd., Hefei, Anhui 230031, China

Abstract A feedback optimization design method based on surface energy mapping is proposed herein. By pre-calculating the energy distribution on the target surface, the target surface mesh unit is redistributed to build a new free-form surface lens profile. A series of lenses is designed using this method, and the simulation results show that when the ratio of the target surface radius to height (DHR) is equal to 2 and ratio of the lens height to the LED width changes from 1:1 to 1.5:1, the nonuniformity is reduced by 8.97%-11.95%. Moreover, when the ratio of lens height to LED width is 1.5:1 and DHR changes from 1.8 to 2.2, the nonuniformity is reduced by 7.60%-16.49%. Thus, the proposed method can effectively improve the illumination under an extended light source. The design process does not depend on the simulation software utilized, and it is simple and easy. The number of iterations is small.

Key words optical design; free-form surface lens; extended light source; feedback optimization

OCIS codes 220.3620; 220.2945

1 引 言

液晶显示经过多年发展, 已成为主流的平板显示技术。液晶本身不发光, 需要背光模组提供照明光线。随着直下式背光模组朝着超薄化、低成本方

向发展, 背光模组中的 LED 颗数越来越少, LED 之间的间距越来越大, LED 到目标面的距离越来越短, 这就需要设计与 LED 配合使用的透镜, 对 LED 发出的光线进行调控, 以便在较短距离内形成较大面积的亮度均匀的照明光斑。

收稿日期: 2019-06-24; 修回日期: 2019-08-12; 录用日期: 2019-09-03

基金项目: 安徽省科技重大专项(18030901002)

* E-mail: guoqianglv@hfut.edu.cn

之前针对 LED 设计的透镜大都将 LED 芯片看作点光源,随着 LED 芯片尺寸的不断增大以及 LED 与目标面的距离不断缩小,基于点光源设计的透镜越来越不能满足要求。基于扩展光源的自由曲面透镜设计方法^[1-3]成为当下的研究热点。基于扩展光源的设计方法通常分为直接设计法和反馈优化设计法。直接设计法包括同步多曲面设计方法(SMS)等^[4-5],计算繁琐,且因只对边缘光线进行控制,难以满足整个区域内的均匀性要求,具有一定的局限性。反馈优化设计方法^[6]包括基于局部变量反馈的通用优化方法^[7]以及基于全局变量的优化算法,例如遗传算法、模拟退火算法以及粒子群算法^[8-10],其特点是基于透镜初始面型进行多次优化来改善照度的均匀性。一方面,部分反馈优化算法容易陷入局部最优解,亦或迭代收敛速度慢,迭代次数多,建立的反馈数据量大,导致运算出一个合适的结果往往需要大量时间。另一方面,每次进行优化时,需在计算软件与光学仿真软件之间反复多次传递大量数据^[11],过程繁琐,数据易缺失。

本文借鉴矩形光斑设计中源靶能量映射的思想^[12-13]提出了一种反馈优化设计方法,该方法有目的地计算目标面上的能量分布趋势并进行优化,所需迭代次数较少,可以快速收敛,简便易行,能够有效改善扩展光源下目标面的照度均匀性。

2 基于曲面能量映射的反馈优化算法

本文所提方法的原理如图 1 所示,以点光源设计方法得到自由曲面的初始面型,对初始面型进行采样。基于面型上各采样点(简称曲面采样点)接收到的扩展光源发出的入射光线的总能量(简称入射区域能量)映射关系,以及从各曲面采样点出射光线到目标面的总能量(简称出射区域能量)和映射区域的对应关系,将扩展光源的中心光线经过自由曲面面型后到达目标面上的点称为表征点,以该点来近似表示这一区域内照度的大小,进而得到各曲面采样点到目标面能量的分布趋势,根据此能量分布趋势对目标面网格单元重新进行划分,重新计算得到透镜的新面型。

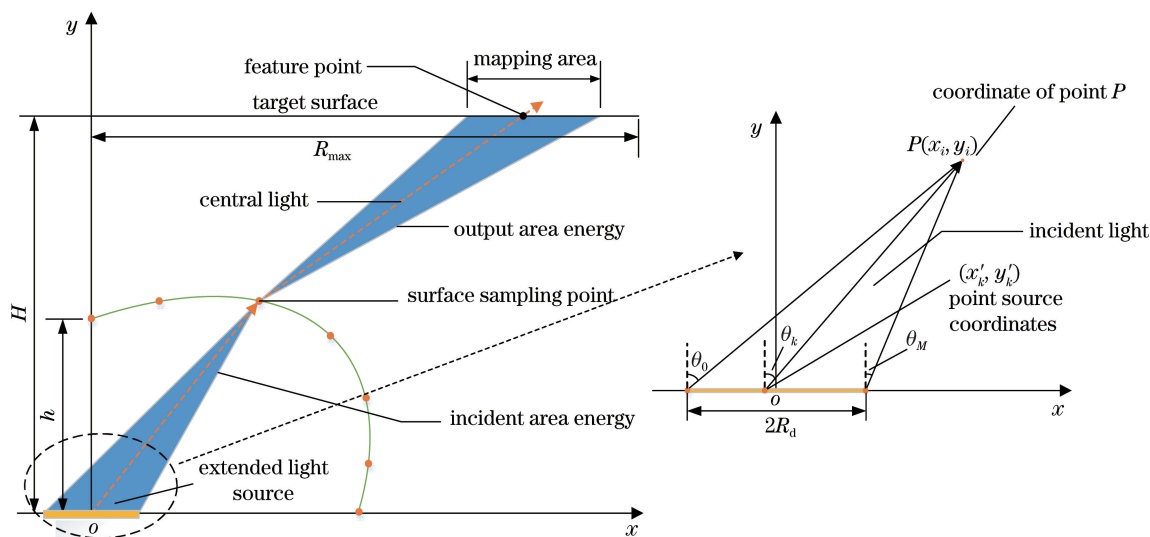


图 1 自由曲面采样点能量映射原理图

Fig. 1 Schematic of energy mapping of free-form surface sampling points

2.1 计算自由曲面面型上各采样点的能量映射关系

将扩展光源划分为多个子面源,每个子面源可近似看成是点光源,如图 1 所示。其中目标面高度为 H ,透镜中心高度为 h ,目标面上形成的光斑半径为 R_{\max} ,扩展光源宽度的一半是 R_d ,光强呈朗伯分布,则每个点光源亦可以看作是朗伯光源。在此基础上,将扩展光源等间距划分成 M 份,每个采样点对应的序号记为 k ,则每个点光源 $L(x'_k, y'_k)$ 的位置为

$$\begin{cases} x'_k = \frac{2R_d \cdot k}{M} - R_d, k = 0, 1, \dots, M. \\ y'_k = 0 \end{cases} \quad (1)$$

设自由曲面面型上的采样总点数为 N ,每个采样点对应的序号记为 i ,相较于前文提及的扩展光源采样序列,此处为透镜面型上的采样序列。点 P 的坐标为 (x_i, y_i) ,由相对坐标关系可计算得到各点光源的夹角 θ_k ,扩展光源两侧角度分别记为 θ_0 和 θ_M ,进而可以根据发光强度分布

$$I(\theta) = I_0 \cos \theta, \quad (2)$$

得到自由曲面面型上点 P 入射区域的能量 E_i 为

$$E_i = \sum_{k=0}^M I_0 \cos \left[\arctan \left(\frac{x_i - x'_k}{y_i - y'_k} \right) \right], i = 1, 2, \dots, N, \quad (3)$$

式中: θ 为视角; I_0 为垂直于光源面法线方向的发光强度分布。

由边缘光线原理和斯涅耳定律可知, 扩展光源两端点内的入射光线经过曲面采样点后的出射光线均在该映射区域内分布, 即映射区域的端点坐标由扩展光源的边缘光线决定。扩展光源左端点和右端点的边缘入射光线单位矢量的计算公式为

$$\begin{cases} \Delta x_{(i,t)} = x_i - x'_t \\ \Delta y_{(i,t)} = y_i - y'_t \\ N_{x(i,t)} = \frac{\Delta x_{(i,t)}}{\sqrt{\Delta x_{(i,t)}^2 + \Delta y_{(i,t)}^2}}, \\ N_{y(i,t)} = \frac{\Delta y_{(i,t)}}{\sqrt{\Delta x_{(i,t)}^2 + \Delta y_{(i,t)}^2}} \\ t = 0, M; i = 1, 2, \dots, N, \end{cases} \quad (4)$$

式中: t 表示扩展光源两个外侧采样点的序列; $\Delta x_{(i,t)}$ 和 $\Delta y_{(i,t)}$ 分别为序号 t 处的点光源与序号 i 处的透镜曲面采样点的横坐标之差和纵坐标之差; $N_{x(i,t)}$ 和 $N_{y(i,t)}$ 分别为出射光线单位矢量的横纵坐标。

$$\mathbf{J}_{\text{In}(i,t)} = [N_{x(i,t)} \quad N_{y(i,t)}], \quad (5)$$

$t=0$ 时, $\mathbf{J}_{\text{In}(i,t)}$ 为扩展光源左端点入射光线的单位矢量; $t=M$ 时, $\mathbf{J}_{\text{In}(i,t)}$ 为扩展光源右端点入射光线的单位矢量。联立(5)式和斯涅耳定律矢量关系

[(6)式]可得到出射光线的单位矢量 $\mathbf{J}_{\text{Out}(i,t)}$, 再由已知的两端边缘光线的出射单位矢量 $\mathbf{J}_{\text{Out}(i,t)}$ 和目标面高度 H 就可求得曲面采样点上的映射区域宽度 W_i , 公式分别为

$$\{1 + n^2 - 2n[\mathbf{J}_{\text{Out}(i,t)} \cdot \mathbf{J}_{\text{In}(i,t)}]\}^{1/2} \cdot \mathbf{N}_i = \mathbf{J}_{\text{Out}(i,t)} - n\mathbf{J}_{\text{In}(i,t)}, \quad (6)$$

$$\mathbf{J}_{\text{Out}(i,t)} = [x''_{(i,t)}, y''_{(i,t)}], t = 0, M, \quad (7)$$

$$W_i = (H - y_i) \cdot \left[\frac{x''_{(i,1)} - x''_{(i,2)}}{y''_{(i,1)} - y''_{(i,2)}} \right], i = 1, 2, \dots, N, \quad (8)$$

式中: \mathbf{N}_i 为各个曲面离散点上的法向矢量; n 为透镜材料的折射率; $x''_{(i,t)}$ 、 $y''_{(i,t)}$ 分别为出射单位矢量 $\mathbf{J}_{\text{Out}(i,t)}$ 的 x 方向和 y 方向分量。

2.2 生成新的自由曲面面型

如图 2 所示, 以点光源方法设计时, 目标面上的照度相等, 将点光源替换为扩展光源时, 目标面上的照度就不再相等, 分别对应图中照度曲线 1 和照度曲线 2。为了计算目标面上照度分布趋势以便重新分配目标面网格区域, 使目标面照度均匀, 需对每个映射区域的照度大小进行叠加。由于曲面上相邻采样点所对应的映射区域会有重叠, 不方便计算整个目标面的照度分布情况, 因此, 这里用表征点来表示映射区域。区别于点光源设计方法之处为, 该点处的能量不再是只由这一条中心光线决定, 而是取决于两个因素: 一是该映射区域的能量大小 E_i , 二是映射区域的宽度 W_i 。本文用能量系数来表示映射区域内的平均能量, 即

$$D_i = \frac{E_i}{W_i}, \quad (9)$$

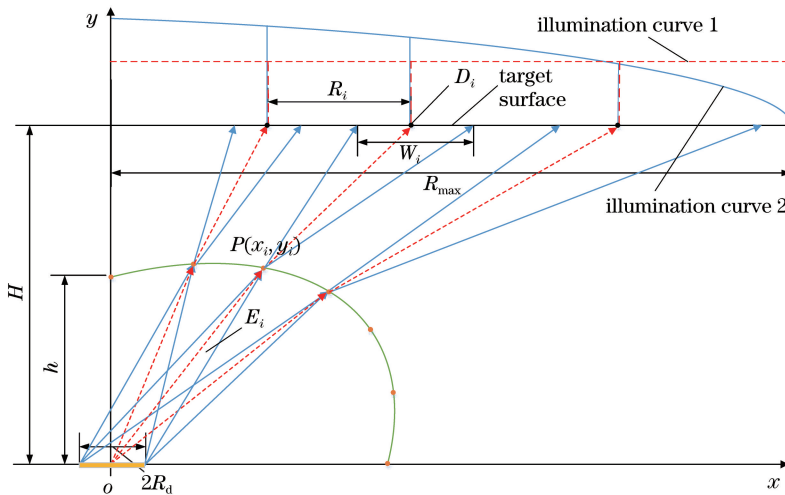


图 2 目标面照度曲线分析

Fig. 2 Analysis of illumination curve on target surface

以目标面上各表征点处的能量系数 D_i 来代替各映射区域的照度值。根据各表征点处的能量系数 D_i 重新对目标面上的网格单元按对应比例进行划分, 如图 2 中对 R_i 重新进行分配, 即

$$R_{i+1} = \sqrt{P_i \cdot R_{\max}^2 + R_i^2}, \quad (10)$$

其中,

$$P_i = \frac{D_i}{\sum_{i=1}^N D_i} \times 100\%, \quad (11)$$

式中: R_i 为对目标面进行网格划分的半径; R_{\max} 为光斑半径, 如图 2 所示。根据新的目标面网格半径分布重新计算得到新的自由曲面面型。整个反馈优化过程如图 3 所示。

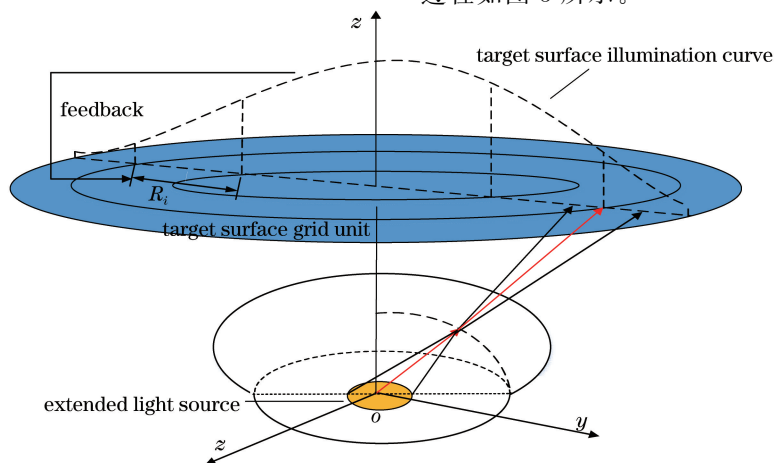


图 3 反馈优化过程示意图

Fig. 3 Diagram of feedback optimization process

2.3 基于全反射情况下的算法优化 (ELS)

在对上述方法即未基于全反射情况下的优化算法 (NELS) 进行论证和仿真时发现了如图 4 所示的情况, 即: 随着 DHR 的增大, 远离曲面采样点这一侧的扩展光源的部分光线由于光线入射角增大, 在透镜表面发生了全反射。为此, 本文引入一个全反射光束的判定条件, 在入射区域能量 (E_{IA}) 中, 发生全反射损耗 (E_{TRL}) 的光线能量不计入出射区域能量 (E_{OA}) 中且映射区域 (W) 要改变为实际区域 (W_A), 即

$$\begin{cases} E_{OA} = E_{IA} - E_{TRL} \\ W = W_A \end{cases}, \quad (12)$$

根据(12)式对(9)式进行改进, 得到总的能量系数为

$$D = \frac{E_{IA} - E_{TRL}}{W_A}. \quad (13)$$

3 仿真和结果分析

3.1 针对宽度为 2 mm 的 LED 芯片进行设计仿真

现设计一款中心高 $h = 3$ mm、LED 芯片半宽度 $R_d = 1$ mm 的透镜, 以验证本文提出的算法。设计目标为在高度 $H = 10$ mm 的目标面上产生的半径 $R_{\max} = 20$ mm 的均匀光斑, 如图 5 所示, 透镜材料为聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA), 其折射率为 1.49。

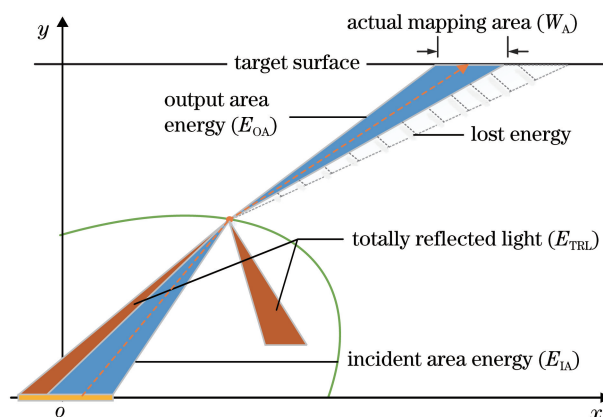


图 4 全反射能量损耗示意图

Fig. 4 Diagram of total reflection energy loss

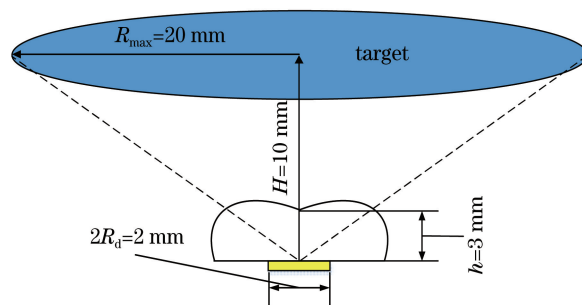


图 5 LED 照明系统各参数示意图

Fig. 5 Diagram of various parameters of LED lighting system

分别采用点光源方法(PLS)、未基于全反射情况的优化算法(NELS)以及基于全反射情况的优化算法(ELS)进行迭代后,将迭代后的面型数据导入到光学仿真软件 LightTools^[14-15]中建立物理模型,仿真时设置光线追迹数为 1000 万条,照度采样网格为 100×100。

这三种方法给出的透镜的数学模型是基于算法迭代后的采样点,利用 MATLAB 的拟合函数处理

采样点数据,生成拟合曲线,拟合曲线过每一个采样点,故模型误差可以忽略。在实际加工过程中,优化前后,曲面面型的表面形貌只有几十到几百微米的差距,因此需要高精度的精密加工设备,由图 6(a)可以看出,PLS 曲线和 ELS 曲线的偏差值为 30~500 μm,而精密加工设备的精度可达到 10 μm 级,在加工上可能会有一定难度,但影响不大。

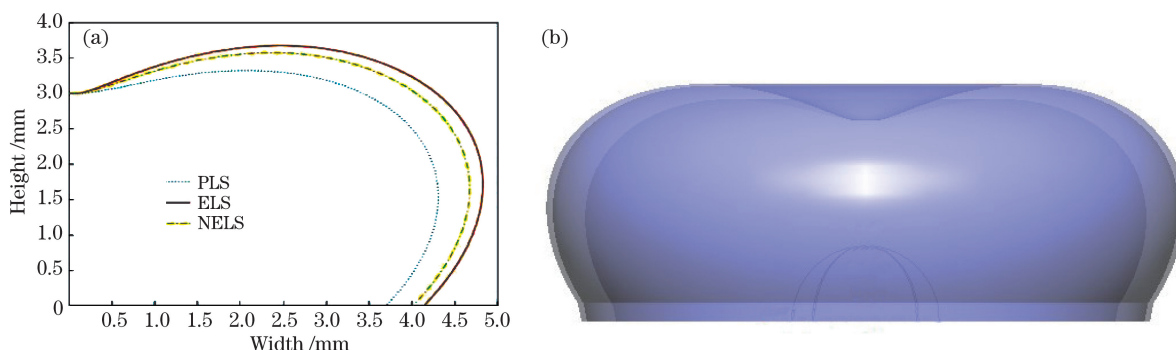


图 6 透镜结构示意图。(a)透镜轮廓曲线;(b)透镜物理模型

Fig. 6 Diagram of lens structure. (a) Lens profile; (b) lens physical model

3.2 仿真结果分析

仿真得到的照度分布如图 7 所示,从左到右分别 PLS、NELS 以及 ELS 的结果。由仿真结果可

知,ELS 算法得到的面型为最优面型,对应于如图 6(b)物理模型的最外围轮廓,其透镜模型中心高度 $h=3$ mm,最高处为 3.67 mm,最宽处为 4.83 mm。

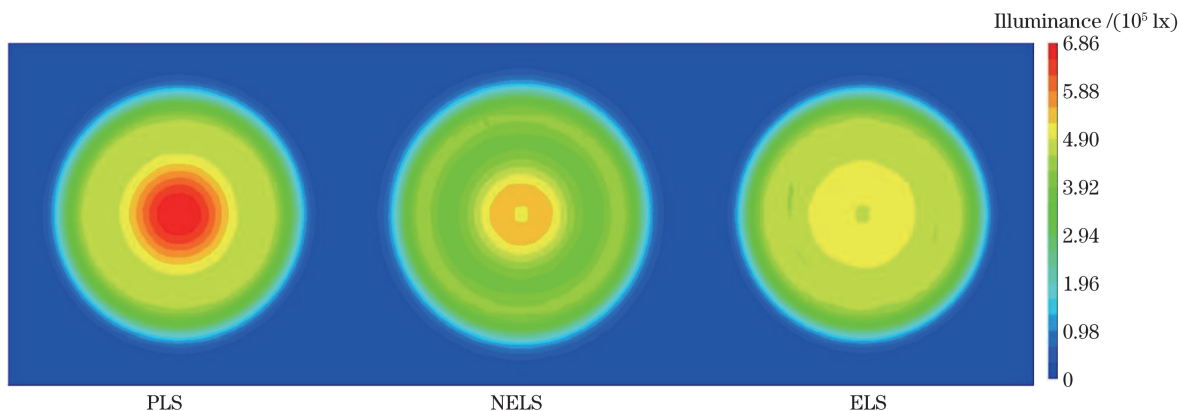


图 7 LightTools 照度仿真结果

Fig. 7 LightTools illuminance simulation results

由图 7 可以看出:中间图和右图的照度相对于左图都有所改善,且光斑半径没有收缩。其中,利用 NS 光线逆向追迹^[16]发现,中间剖切图两边的照度能量过低(是由于部分光线在透镜表面发生了全反射),而右图中没有此情况,照度均匀性的提升效果最明显。

为了进一步分析仿真结果,将以上照度数据生成图 8,并评估了曲面面型优化对非均匀性的改善程度以及由此带来的能量利用率的变化,结果如表 1 所示。其中,能量利用率 η 和非均匀性 D_{ev} 的计算式分别为

$$\eta = \frac{\Phi_{\text{Target}}}{\Phi_{\text{Total}}} \times 100\%, \quad (14)$$

$$D_{ev} = \frac{E_{\text{max}} - E_{\text{min}}}{E_{\text{max}} + E_{\text{min}}} \times 100\%, \quad (15)$$

式中: Φ_{Target} 为目标面接收到的总光通量; Φ_{Total} 为光源发出的总光通量; E_{max} 为目标面区域的最大照度值; E_{min} 为目标面区域的最小照度值。

从图 8 和对应的表 1 可以直观地看出:相对于 PLS 照度曲线,未基于全反射优化算法的一次迭代 NELS-1 和二次迭代 NELS-2 得到的结果存在光斑边缘照度低的问题,照度均匀性未得到明显改善,能

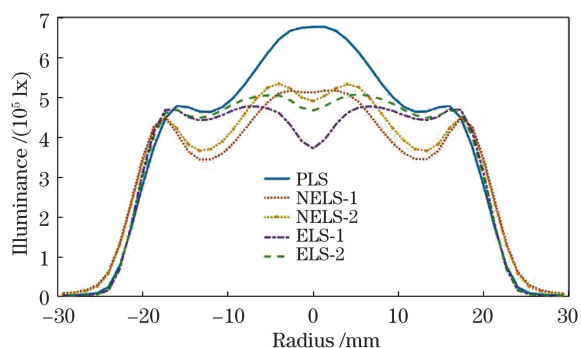


图 8 LightTools 照度曲线的对比

Fig. 8 LightTools illuminance curve comparison

表 1 不同设计方法的仿真结果对比

Table 1 Comparison of simulation results of different design methods %

| Corresponding method | Non-uniformity | Energy efficiency |
|----------------------|----------------|-------------------|
| PLS | 20.10 | 97.65 |
| NELS-1 | 19.42 | 92.71 |
| NELS-2 | 18.10 | 93.41 |
| ELS-1 | 15.47 | 94.10 |
| ELS-2 | 8.15 | 95.37 |

量利用率也略微下降;而基于全反射优化算法的一次迭代 ELS-1 和二次迭代 ELS-2 得到的照度均匀性提升明显,其中 ELS-2 的非均匀性在下降11.95%的同时能量利用率仅下降 2.28%,虽然能量略有损失,但相对于均匀性的提升,这部分能量损失是可以接受的。

4 迭代次数、LED 尺寸以及 DHR 等因素分析

本文提出的算法所需迭代次数较少,可以快速收敛。然而 LED 尺寸对均匀性的影响、迭代次数是多少才最佳以及 DHR 变化是否会对优化的次数即收敛速度产生影响,都是接下来要讨论的问题。

表 2 给出了针对 5 组不同尺寸的 LED 芯片采用不同算法得到的非均匀性结果,可以看出,在不同的芯片尺寸下,本文给出的基于扩展光源的设计方法可以大幅提升照度的均匀性,随着 LED 芯片尺寸增大,照度均匀性的提升效果虽然相对有所减弱,但提升效果依然明显,故针对大尺寸 LED 芯片的照明改善亦有很大帮助。

表 2 不同算法对不同 LED 尺寸芯片进行仿真得到的结果

Table 2 Simulation results of different algorithms for chips with different LED sizes %

| LED chip size /mm | Non-uniformity of PLS-based method | Non-uniformity of ELS-based method | Improvement of non-uniformity |
|-------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| 2.0 | 20.10 | 8.15 | 11.95 |
| 2.2 | 22.28 | 9.56 | 12.72 |
| 2.4 | 23.70 | 12.11 | 11.59 |
| 2.6 | 25.10 | 14.30 | 10.80 |
| 2.8 | 26.28 | 16.86 | 9.42 |
| 3.0 | 27.03 | 18.06 | 8.97 |

图 9 是目标面高度 $H = 10 \text{ mm}$ 、光斑半径 $R = 20 \text{ mm}$ 、LED 芯片宽度为 2 mm 情况下的仿真效果

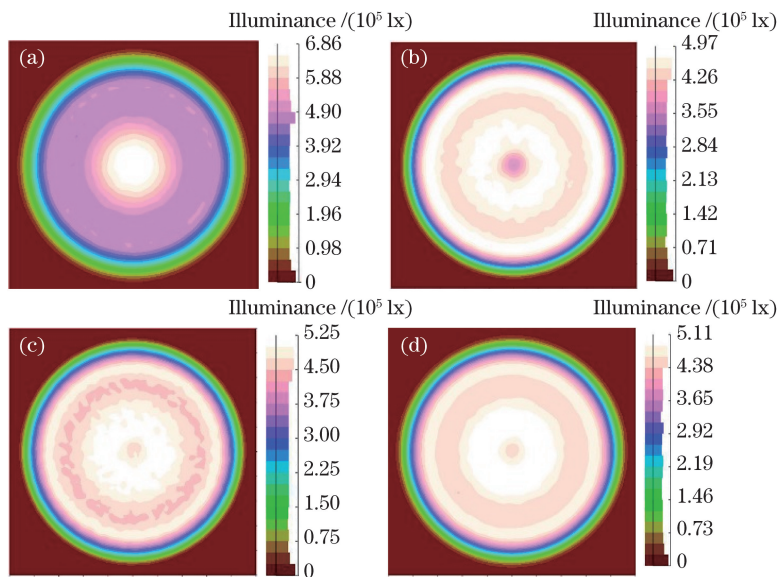


图 9 照度分布图。(a)初始照度;(b)一次优化照度;(c)二次优化照度;(d)三次优化照度

Fig. 9 Illumination distribution diagrams. (a) Initial illumination; (b) illumination after once optimization; (c) illumination after two optimizations; (d) illumination after three optimizations

图,其中图 9(a)是使用 PLS 得到的面型在扩展光源下的仿真照度图,而图 9(b)~(d)是使用本文中算法得到的仿真照度图,可以看出,在第二次优化时照度已取得比较好的效果。

图 10 是不同 DHR($H=10\text{mm}$)照明光斑进行优化的仿真结果。5 条曲线均表明,2 次迭代后,照度不均匀性就明显下降(下降幅度为 $7.60\% \sim 16.49\%$),说明本文方法的迭代次数少,收敛速度快,且 DHR 不对收敛速度产生影响。

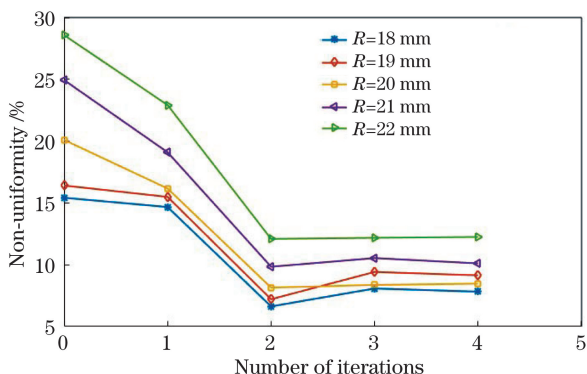


图 10 DHR 和迭代次数对非均匀性的影响

Fig. 10 Influences of DHR and number of iterations on non-uniformity

5 结 论

本文提出了一种基于曲面能量映射计算目标面能量分布趋势的反馈优化设计方法。该方法通过预先计算目标面能量分布趋势重新分配目标面网格单元,经过 2~3 次迭代即可将扩展光源下的照度非均匀性降至 15% 以下,无需通过仿真软件进行反馈,避免了数据在软件之间的传输和计算数据量大的问题。在实现大 DHR 和大 LED 芯片尺寸时,亦有比较好的改善效果。基于扩展光源的照明系统均可通过此方法快速优化其均匀性。然而需要指出的是,本文提出的方法是基于单曲面的一种设计方法,暂时不适用于双曲面设计,还有进一步改进的空间,这亦是下一步的研究重点。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Wang K, Chen F, Liu Z Y, *et al.* Design of compact freeform lens for application specific light-emitting diode packaging[J]. Optics Express, 2010, 18(2):

413-425.

- [3] Mao X L, Li H T, Han Y J, *et al.* A two-step design method for high compact rotationally symmetric optical system for LED surface light source[J]. Optics Express, 2014, 22(S2): A233-A247.
- [4] Benítez 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.
- [5] Dross O, Mohedano R, Benitez P, *et al.* Review of SMS design methods and real world applications[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5529: 35-47.
- [6] Wang T Y, Chen J J, Huang K L, *et al.* Freeform lens design using a complementary optimization method for uniform illumination with extended LED light sources[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9272: 927214.
- [7] 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.
- [8] Alatas B, Akin E, Ozer A B. Chaos embedded particle swarm optimization algorithms[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2009, 40(4): 1715-1734.
- [9] Chao S M, Whang A J W, Chou C H, *et al.* Optimization of a total internal reflection lens by using a hybrid Taguchi-simulated annealing algorithm [J]. Optical Review, 2014, 21(2): 153-161.
- [10] Godi G, Sauleau R, Coq L L, *et al.* Design and optimization of three-dimensional integrated lens antennas with genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007, 55(3): 770-775.
- [11] Hsu W F, Shen Y T, Chu I L. Asymmetric and symmetric light couplers of daylighting systems for direct indoor lighting[J]. Journal of Optics, 2012, 14(12): 125703.
- [12] Ma D L, Feng Z X, Liang R G. Freeform illumination lens design using composite ray mapping [J]. Applied Optics, 2015, 54(3): 498-503.
- [13] Ma D L, Pacheco S, Wang C L, *et al.* Freeform optics construction with nonuniformly sampled grids in modified double-pole coordinate system[J]. Optical Engineering, 2015, 54(12): 125102.
- [14] Zhu M, Lou J, Pan Y J, *et al.* Design of freeform surface with uniform illumination based on new LED collimation system[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(4): 0422002.

朱民, 楼俊, 潘玉珏, 等. 基于新型 LED 准直系统的

- 自由曲面均匀照明设计[J]. 光学学报, 2018, 38(4): 0422002.
- [15] Hu Z W, Peng R L, Qin H, *et al.* The application of LightTools software in uniform light distribution of the lighting system design[J]. Optical Instruments, 2012, 34(4): 49-53.
- 胡志威, 彭润玲, 秦汉, 等. LightTools 软件在均匀光分布的照明系统设计中的应用[J]. 光学仪器, 2012, 34(4): 49-53.
- [16] Zhao H, Li C G, Chen Z T, *et al.* Design of collimating lens with uniform illumination for LED based on double freeform surface[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(4): 0422001.
- 赵欢, 李长庚, 陈志涛, 等. 基于双自由曲面的 LED 均匀照明准直透镜设计[J]. 光学学报, 2017, 37(4): 0422001.