

## 基于加权叠加法的扩展 LED 光源自由曲面透镜设计

吴涛<sup>1,2\*\*</sup>, 苏宙平<sup>1,2\*</sup><sup>1</sup>江南大学理学院, 江苏 无锡 214122;<sup>2</sup>江苏省轻工光电工程技术研究中心, 江苏 无锡 214122

**摘要** 提出了一种用于扩展发光二极管(LED)光源配光的自由曲面透镜设计方法。利用加权叠加点光源透镜的母线,设计得到了自由曲面透镜,构建了反映照度均匀性的评价函数,自变量为三个权重因子。利用粒子群算法优化权重因子,使评价函数达到最小值,此时照度的均匀性最高。目标面上的均匀度从初始结构的 78.93% 提高到 90.67%,同时光效保持在 92% 以上。对透镜分别进行加工误差分析和横向公差分析,结果表明,当加工误差在  $-1.0\sim 1.0\ \mu\text{m}$  范围内、横向位移误差在  $0.0\sim 0.2\ \text{mm}$  范围内时,目标面照度均匀度所受影响较小。

**关键词** 光学设计; 照明设计; 扩展光源; 加权叠加法; 粒子群算法; 自由曲面透镜

中图分类号 O435

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.122202

## Design of Free-Form Lens for Extended LED Source Based on Weighted Overlap Algorithm

Wu Tao<sup>1,2\*\*</sup>, Su Zhouping<sup>1,2\*</sup><sup>1</sup> School of Science, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;<sup>2</sup> Jiangsu Provincial Research Center of Light Industrial Optoelectronic Engineering and Technology, Wuxi, Jiangsu 214122, China

**Abstract** An algorithm used to design a free-form lens for the extended light-emitting diode (LED) source is proposed. The design of a free-form lens is realized by the overlap of the weighted lens profiles of several point sources and the evaluation function reflecting the illumination uniformity is constructed, in which the independent variables are three weighting factors. The particle swarm algorithm is used to optimize the weight factors and minimize the evaluation function, and thus the illumination uniformity is the highest. Correspondingly, the illumination uniformity on the target surface increases from 78.93% for the initial structure to 90.67% and simultaneously the light efficiency is kept above 92%. The fabrication error analysis and lateral tolerance analysis of lens show that the influence on the illumination uniformity on the target surface is small when the fabrication error is within the range of  $-1.0\sim 1.0\ \mu\text{m}$  and the lateral displacement error is within the range of  $0.0\sim 0.2\ \text{mm}$ .

**Key words** optical design; lighting design; extended light source; weighted overlap algorithm; particle swarm algorithm; free-form lens

**OCIS codes** 220.2945; 220.3630; 220.2740

## 1 引言

发光二极管(LED)光源具有耗能低、效率高、体积小、寿命长等优势,已逐步取代传统光源,在室内照明、汽车照明、道路照明等各个照明领域得到了广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。LED光源遵循朗伯分布,很多情况下不能满足照明要求。一般情况下,工作平台的理

想光分布为均匀分布,而朗伯分布的光分布为中间光强边缘弱,长时间工作在朗伯分布的光下会加重眼睛的负担,故需要进行二次光学设计对光强分布进行优化设计<sup>[4]</sup>。当照明器件的透镜尺寸与光源直径的比值大于 5 时,在二次配光设计时将其作为点光源,比值不大于 5 的作为扩展光源<sup>[5]</sup>。随着经济的发展,光源需要更大功率和流明,对扩展光源的需

收稿日期: 2018-04-17; 修回日期: 2018-05-09; 录用日期: 2018-07-05

基金项目: 上海市全固态激光器与应用技术重点实验室开放课题(2012ADL03)

\* E-mail: zpsu\_optics@163.com; \*\* E-mail: wt100033@126.com

求越来越迫切。目前,针对扩展光源的配光研究方法主要分为三大类:同步多曲面方法、广义函数法、反馈优化算法。Benítez 等<sup>[6]</sup>提出了同步多曲面方法,该方案虽然可以有效控制了扩展光源的边缘光线,但对中间光线的控制较弱,并且计算过程繁琐。Shatz 等<sup>[7-8]</sup>提出了广义函数法,将扩展光源离散成多个点光源,实现了均匀照明,但是这种光学系统复杂,光效降低。Fournier 等<sup>[9-10]</sup>通过对比预期照度值与实际照度值,引入了相应的反馈修正来实现均匀照明,但优化算法均较为复杂繁琐,不利于编程的实现以及在工程上的应用。Wang 等<sup>[11]</sup>通过重叠法,将多个点光源透镜自由曲面重叠,形成了扩展光源系统,通过建立照度反馈程序寻找最佳组合,此方案操作性较强,但优化后的仿真效果不够理想。研究方法虽然众多,但每种方法均存在局限性,繁琐的设计流程也不利于工程上的设计。

本文在重叠多个点光源透镜母线并取外轮廓方法的基础上,采用加权叠加法得到了扩展光源的初始透镜母线。将每条母线的权重因子作为优化变量,利用粒子群算法<sup>[12]</sup>及动态数据链接(DDE)技术自动寻找到最优的权重比,实现了对扩展光源透镜母线的优化。此方法的优化变量少,操作性强,过程简洁,优化结果较为理想。

## 2 设计与优化原理

根据点光源透镜设计理论<sup>[13-19]</sup>可以得到能实现均匀照明的点光源透镜的自由曲面。设计的自由曲面透镜为旋转对称结构,通过一条母线围绕中心轴旋转得到,因此主要考虑二维平面内母线的设计。在点光源透镜母线的基础上左右平移得到两条新的

母线,采用加权叠加法得到新的基于扩展光源的透镜母线,旋转该母线得到扩展光源透镜的自由曲面。将母线的权重因子作为优化变量,建立相应的评价函数,应用 DDE 技术在粒子群算法的指导下得到各母线叠加的最优权重因子,完成最终的优化设计。

### 2.1 构造扩展光源透镜的初始结构

考虑到设计和透镜制造的方便性,透镜内表面设置为标准球面,外表面是需要通过设计得到的自由曲面。图 1(a)所示为点光源的透镜母线  $S_1$ 。假设扩展光源为半径  $r$  的圆形面光源,将母线分别向  $x$  轴的正负方向平移相同距离  $D$  得到新的母线  $S_2$  和  $S_3$ ,如图 1(b)所示。三条母线分别乘以相应的权重系数  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ ,得到新的三条母线  $S'_1, S'_2$  和  $S'_3$ ,如图 1(c)所示。将第一象限即  $0 \sim \frac{\pi}{2}$  范围平分成分  $k$  份,第  $i$  条直线  $L_i$  与  $x$  轴正方向的夹角为

$$\beta_i = \frac{\pi}{k} \cdot i = \frac{\pi \cdot i}{2k} \quad (1)$$

直线  $L_i$  与母线  $S'_1, S'_2, S'_3$  分别相交于  $P_1, P_2$  和  $P_3$  三点,如图 1(d)所示。计算出直线与曲线的交点坐标  $[x_1(i), 0, z_1(i)]$ 、 $[x_2(i), 0, z_2(i)]$  以及  $[x_3(i), 0, z_3(i)]$ ,加权叠加得到扩展光源的透镜母线  $S$ ,如图 1(e)所示。母线  $S$  上各点坐标可表示为

$$\begin{cases} x(i) = \omega_1 x_1(i) + \omega_2 x_2(i) + \omega_3 x_3(i) \\ z(i) = \omega_1 z_1(i) + \omega_2 z_2(i) + \omega_3 z_3(i) \end{cases}, \quad (2)$$

式中  $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$ 。通过改变权重因子进一步优化母线  $S$ ,将得到的母线  $S$  旋转  $360^\circ$  得到新的基于扩展光源的自由曲面透镜,如图 1(f)所示。

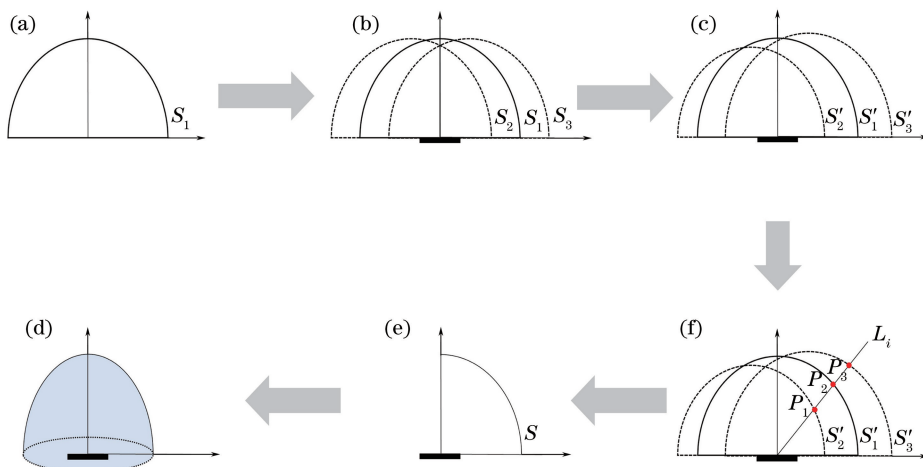


图 1 初始模型建立的流程图

Fig. 1 Flow chart of construction of initial model

## 2.2 粒子群优化算法原理

粒子群优化(PSO)算法<sup>[20]</sup>是一种基于迭代的优化算法。每一个寻找最优值的解被称之为粒子,需要寻找最优解的三个权重因子。所有的粒子在一个三维的空间进行搜索。每一个粒子通过一个适应值来判断目前位置的好坏,并可以记住经历过的最优位置  $p_{\text{best}}$  以及目前粒子群整体发现的最优位置  $g_{\text{best}}$ 。若某个粒子当前的最优位置比粒子群整体的最优位置还要接近最优值,则将此  $p_{\text{best}}$  替换成新的粒子群最优位置  $g_{\text{best}}$ 。具体的优化流程如下。

1) 随机初始化种群中各粒子的位置和速度。

2) 评价每一个粒子的适应度,将当前各粒子的位置和适应值存储在各粒子的  $p_{\text{best}}$  中,将所有  $p_{\text{best}}$  中适应值最优个体的位置和适应值存储于  $g_{\text{best}}$  中。

3) 计算出粒子下一步所处的位置,计算公式为

$$v_{i,j}(t+1) = \omega \cdot v_{i,j}(t) + c_1 \cdot r_1 \cdot [p_{i,j} - x_{i,j}(t)] + c_2 \cdot r_2 \cdot [p_{g,j} - x_{i,j}(t)], x_{i,j}(t+1) = x_{i,j}(t) + v_{i,j}(t+1), j = 1, 2, \dots, d, \quad (3)$$

式中  $\omega$  为惯性权重;  $c_1$  和  $c_2$  为学习因子;  $r_1$  和  $r_2$  为 0 到 1 之间均匀分布的随机数;  $t$  为迭代次数;  $v_{i,j}(t+1)$  为粒子  $i$  在第  $t+1$  次迭代中第  $j$  维的速度;  $x_{i,j}(t+1)$  为粒子  $i$  在第  $t+1$  次迭代中第  $j$  维的当前位置;  $p_{i,j}$  为粒子  $i$  在第  $j$  维的个体极值点的位置;  $p_{g,j}$  为整个粒子群在第  $j$  维的全局极值点的位置。

4) 对每一个粒子,将其适应值与其经历过的最好位置  $p_{\text{best}}$  作比较,更新  $p_{\text{best}}$ 。

5) 比较当前所有  $p_{\text{best}}$  和  $g_{\text{best}}$  的值,更新  $g_{\text{best}}$ 。

6) 若满足停止条件(通常为预设的运算精度或迭代次数),搜索停止,输出结果,否则返回 3)。

粒子群算法基于迭代的方法,通过粒子寻找到相对较优的位置以缩小搜索范围,达到快速有效的搜寻效果。

## 2.3 评价函数的建立

以母线  $S$  上的第  $i$  个点为例,根据(2)式,在粒子群算法的指导下改变权重因子得到新的母线,调整后母线的坐标为

$$x(i) = \omega'_1 x_1(i) + \omega'_2 x_2(i) + \omega'_3 x_3(i), \\ z(i) = \omega'_1 z_1(i) + \omega'_2 z_2(i) + \omega'_3 z_3(i), \quad (4)$$

式中  $\omega'_1$ 、 $\omega'_2$ 、 $\omega'_3$  为改变后的权重因子。在优化过程中,权重因子  $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\omega_3$  是粒子群算法中的优化变量。第一组  $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\omega_3$  随机赋值,在粒子群算法的指导下可以得到使评价函数最小的权重因子。将相应的权重因子代入(4)式计算,得到最优的自由曲面透镜母线。

目标面照度均匀度  $U$  和光效  $\eta$  是衡量照明系统优劣的重要因素,故评价函数是基于  $U$  和  $\eta$  建立的,  $U$  和  $\eta$  的表达式分别为

$$\eta = \frac{\Phi_g}{\Phi_s}, U = \frac{\bar{U}}{U_{\text{max}}}, \quad (5)$$

式中  $\Phi_s$  为光源发出的光通量;  $\Phi_g$  为目标面接收到的光通量;  $\bar{U}$  为目标面平均照度;  $U_{\text{max}}$  为目标面最大照度。改变  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  和  $\omega_3$  时,  $U$  和  $\eta$  均会发生变化,故  $\eta$  和  $U$  是关于  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  和  $\omega_3$  的函数,即

$$\eta = \frac{\Phi_g}{\Phi_s} = F_1(\omega_1, \omega_2, \omega_3), \\ U = \frac{\bar{U}}{U_{\text{max}}} = F_2(\omega_1, \omega_2, \omega_3). \quad (6)$$

在优化的过程中需要均衡光效和均匀度两个方面的影响,故优化函数  $F$  应该是关于  $\eta$  和  $U$  的函数。(6)式证明  $\eta$  和  $U$  是关于  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  和  $\omega_3$  的函数,则优化函数  $F$  同样是关于  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  和  $\omega_3$  的函数,即

$$F(\omega_1, \omega_2, \omega_3) = 1 - (k_1 \cdot \eta + k_2 \cdot U), \quad (7)$$

式中参数  $k_1 \in (0, 1)$ 、 $k_2 \in (0, 1)$  且  $k_1 + k_2 = 1$ 。故在优化的过程中可以将权重因子  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  和  $\omega_3$  作为优化变量,通过改变权重因子得到最优的优化函数结果以实现优化。

由(7)式可知,目标评价函数与优化变量  $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\omega_3$  密切相关,通过寻找最佳权重因子可以兼顾目标面照度均匀性与光效,使照明系统整体达到理想的状态。由此将优化照明系统的问题转化成求解目标函数  $F$  最小值的问题,利用 PSO 算法即可对(7)式进行求最优解。

## 2.4 优化流程设计

在实现对自由曲面透镜的优化过程中,DDE 技术起到了重要的作用。

### 2.4.1 DDE 技术介绍

DDE 是 Windows 支持的几种常用通信机制之一<sup>[21]</sup>,可以建立客户端与服务端应用程序之间的对话,实现 Matlab 与 Tracepro 之间的联用。具体实现过程如图 2 所示。

通过 DDE 可以实现 Matlab 与 Tracepro 交互。使用 ddeinit 语句建立相应的对话通道,由 Matlab 计算出自由曲面透镜母线的离散坐标点,再使用 ddepoke 语句将坐标点数据传输到 Tracepro 上。Tracepro 的宏语言为 Scheme 语言,通过 ddeexec 语句向 Tracepro 发送相应的 Scheme 命令,实现自动建模并仿真,仿真的结果再通过 ddereq 语句从 Tracepro 传输回 Matlab。

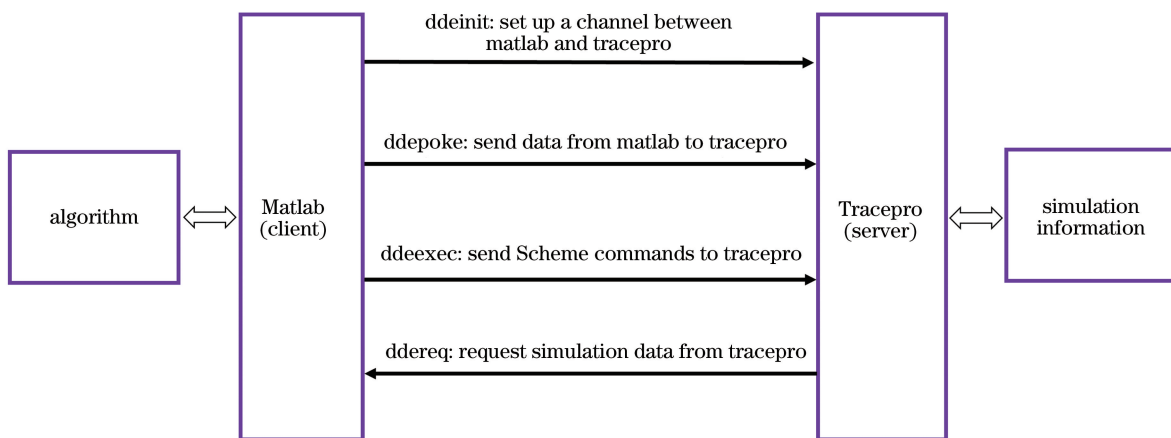


图2 DDE通信框图

Fig. 2 Block diagram of DDE communication

#### 2.4.2 自动优化流程设计

图3所示为在粒子群算法指导下基于DDE技术实现自动优化设计的流程图。

根据点光源透镜设计理论,在Matlab中计算出相应的基于点光源的透镜母线,运用加权叠加法得到基于扩展光源的透镜母线。建立Matlab与Tracepro之间的对话通道,将计算得到的透镜母线

数据传输到Tracepro并使用Scheme语言编写命令,实现在Tracepro上自动建模仿真。从仿真结果中提取出照度均匀度 $U$ 和光效 $\eta$ 等关键数据,并将其代入到Matlab中的评价函数。当评价函数小于预定值时结束循环,否则粒子群算法会根据相应算法改变优化变量(权重因子)并循环此流程直至寻找最优值为止。

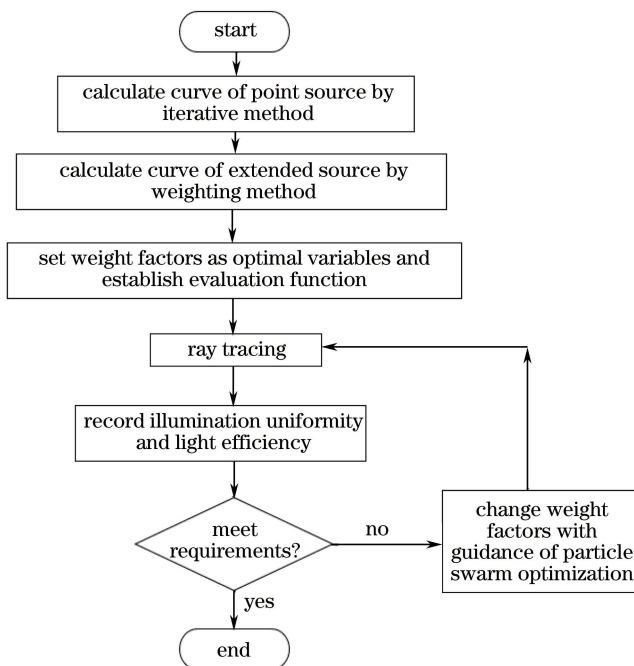


图3 自动优化流程图

Fig. 3 Flow chart of automatic optimization

粒子群算法变量的取值为 $[0,1]$ 中任意实数,为了实现更快收敛,根据实际仿真结果将变量的范围控制在较合理的 $[0.28, 0.42]$ 内。

### 3 实例设计与仿真分析

现设计一个扩展光源直径 $d = 2$  mm的实例来

验证所提方法的可行性。透镜内表面设置为半径  $r_i=4$  mm 的标准球面,外表面为加权叠加法得到的自由曲面。透镜高度  $h=10$  mm,透镜材料选择折

射率  $n=1.49$  的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)。现在距光源距离  $H=1000$  mm,半径为  $R=1000$  mm 圆形目标面上产生均匀光斑,如图 4 所示。

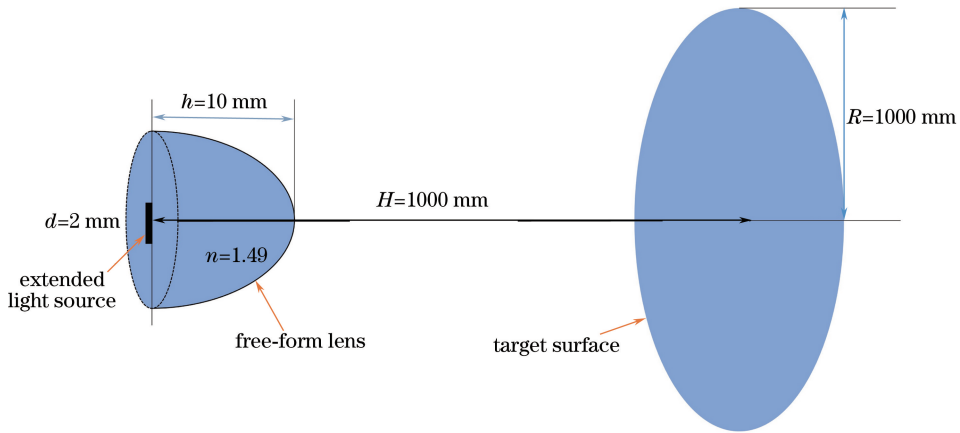


图 4 照明系统参数的示意图

Fig. 4 Schematic of parameters for lighting system

### 3.1 母线位移距离 $D$ 的选择

在加权叠加法中,母线左右平移距离  $D$  的大小会影响最后的优化结果。在母线等权重加权即  $\omega_1:\omega_2:\omega_3=1:1:1$  时加权得到的基于扩展光源的初始结构中, $D$  在  $0.9\sim 2.0$  mm 之间逐渐增大时均匀度、光效的变化示意图如图 5 所示。可以看出,随着距离的增大,均匀度先增大后减小,并在距离为  $1.4$  mm 时出现最大的均匀度。同时,光效随着  $D$  的增大而减小,但总体光效均处于  $90\%$  以上。故以位移距离  $D=1.4$  mm 进行进一步优化。

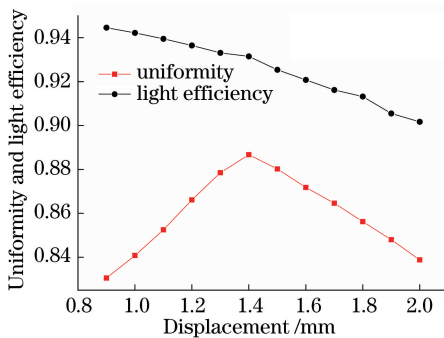


图 5 母线位移与均匀度、光效的关系图

Fig. 5 Relationship of displacement with uniformity and light efficiency

### 3.2 各算法优化对比分析

为了使对比结果更准确,将 PSO 算法的参数保持一致,具体参数如表 1 所示。

考虑到主要优化目标是高均匀性,故评价函数  $f$  中均匀度的权重稍大一些,设置为  $0.6$ ,相应光效的权重为  $0.4$ ,即

$$f = 1 - (0.6 \cdot \eta + 0.4 \cdot U). \quad (8)$$

四种优化算法的结果进行对比,如表 2 所示。其中,初始结构是将基于点光源得到的自由曲面透镜用于扩展光源;PSO 算法是直接基于点光源得到的透镜母线离散点的基础上进行优化的算法;加权叠加法是将得到的基于点光源的透镜母线进行等权重加权得到的相应曲面透镜的算法;基于加权叠加法的 PSO 算法是在第三种算法的基础上,在粒子群算法的指导下寻找最佳权重比实现进一步优化的算法。

表 1 PSO 算法的参数

Table 1 Parameters of PSO

Parameter of PSO	Numerical value
Optimization times $T$	300
Particle number of population $N$	50
Optimal point number of outline $J$	100
Dimensions of problem $D$	3
Learning factor $C_1$	2
Learning factor $C_2$	2
Inertia weight $\omega$	0.6

表 2 优化算法对比

Table 2 Comparison among optimization algorithms

Algorithm	Uniformity / %	Light efficiency / %
Initial structure	78.93	95.41
Weighted overlap algorithm	88.67	93.15
PSO algorithm	88.72	93.04
PSO based on weighted overlap algorithm	90.67	92.51



由表 2 可知, PSO 算法和加权叠加法对初始结构的优化效果明显, 而基于加权叠加法的 PSO 算法在前两者较为理想的优化结果上进一步优化了该照明系统, 系统的均匀度达到了更理想的 90.67%。

算法的收敛性影响优化的速度, 而优化速度的快慢则直接影响优化效率。将对算法收敛性的分析转化为各优化算法优化截止时优化次数的分析。PSO 算法在第 502 次迭代时优化值达到最小值, 基于加权叠加法的 PSO 算法在第 186 次迭代时达到

了最小值。基于加权叠加法的 PSO 算法的初始结构本身更贴近实际基于扩展光源的曲面透镜, 在第 34 次迭代时其优化值便比 PSO 算法得到的优化值更加理想。

应用所提算法, 计算得到最优权重比  $\omega_1:\omega_2:\omega_3=0.34021785:0.33828567:0.32149648$ , 对其进行 500 万条光线的仿真模拟, 并与初始结构的模拟结果进行比较。图 6(a)、(b) 所示分别为优化前与优化后的三维照度分布图。

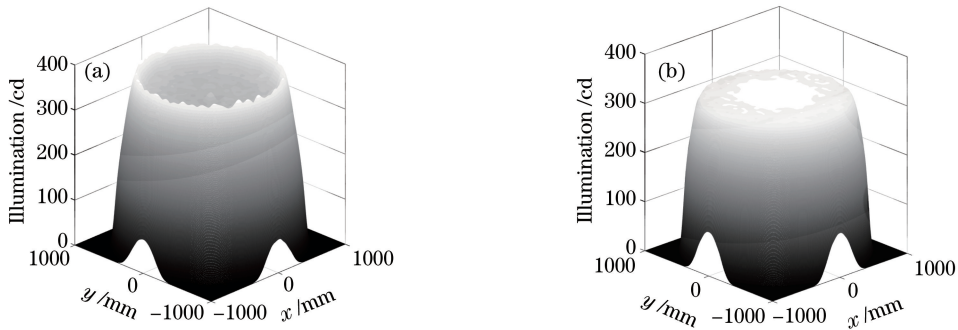


图 6 优化前后的三维照度分布图。(a)前;(b)后

Fig. 6 Three-dimensional illuminance distribution maps before and after optimization. (a) Before; (b) after

优化前后的归一化照度曲线对比图如图 7 所示。可以看出, 优化前的照度分布极不均匀, 边缘部分突出而中间部分塌陷, 与理想中的均匀照明有较大差距。优化后光斑范围基本在  $-1000\sim 1000$  mm 之间, 照度在此范围内分布相当均匀, 基本能满足人们生活中的需求。

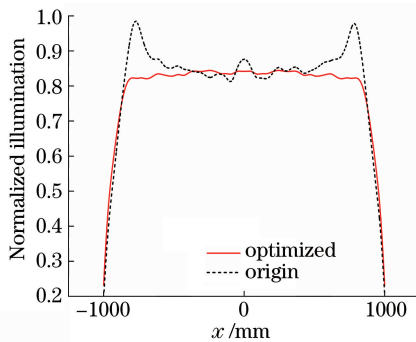


图 7 优化前后照度曲线的对比图

Fig. 7 Comparison of illuminance curves before and after optimization

#### 4 自由曲面透镜的加工误差分析

在透镜的加工过程中难免会产生加工误差, 导致光学系统的性能降低。目前, 自由曲面透镜加工的精度一般为微米级, 部分可达亚微米级别。

随机增大或者减少优化扩展光源透镜母线上的各点的高度值, 模拟时在理想的自由曲面上加入随

机的加工误差, 结果如图 8 所示。在母线 3000 个点的基础上, 选取误差分别为 1, 3, 5, 10  $\mu\text{m}$  四组, 每组进行 5 次面形误差模拟, 结果如图 9 所示。

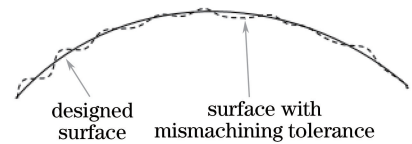


图 8 面型误差的示意图

Fig. 8 Schematic of shape errors

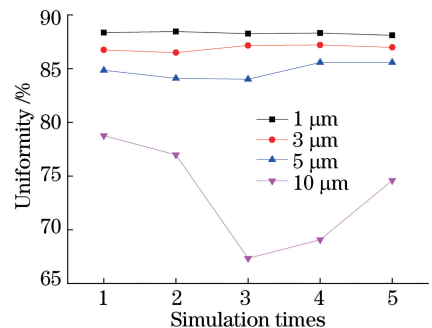


图 9 面型误差分析

Fig. 9 Analysis of shape errors

当误差范围在  $-1.0\sim 1.0$   $\mu\text{m}$  内时, 面型变化对目标面照度均匀度的影响较小, 均匀度保持在 88% 以上, 且波动幅度较小。当误差范围扩大到  $-5.0\sim 5.0$   $\mu\text{m}$  时, 均匀度明显减小。当误差在  $-10.0\sim 10.0$   $\mu\text{m}$  时, 照度均匀度已经减小到 80%

以下,并且伴随大幅度波动。

由上述分析可知,当加工误差控制在 $-1.0\sim 1.0\ \mu\text{m}$ 之间时,目标面的照度均匀度可以保持在理想的水平。随着加工方法的不断进步,加工误差可以控制为越来越小的数量级。目前,超精密金刚石切削等方法可将加工误差控制在此精度范围。

## 5 安装公差分析

在工程安装过程中难免会产生一定的误差,故按照上述方法完成对透镜的设计后需要进行公差分析。设计得到的自由曲面旋转一周成为实体,该实体与 $r_i=4\ \text{mm}$ 的标准球面进行布尔运算中的减法

运算后便可得到满足设计要求的透镜。横向位移误差示意图如图 10 所示。考虑到该透镜为旋转对称结构,横向位移误差  $dx$  仅需要考虑向一侧移动;纵向光源面与透镜底面处于同一平面,安装过程中位移误差极小,忽略不计。

图 11 所示为横向位移误差与光效和均匀度的关系图。可以看出,相比于光效,横向位移误差  $dx$  对均匀度的影响更明显。当横向误差在  $0.0\sim 0.2\ \text{mm}$  的范围内时,均匀度可保持在 88.85% 以上。随着横向误差扩大到  $0.4\ \text{mm}$ ,均匀度明显减小。横向误差的增大对光效的影响较小,光效可保持在 92% 以上。

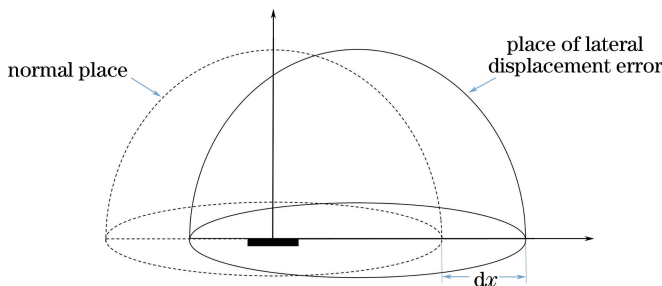


图 10 横向位移误差的示意图

Fig. 10 Schematic of lateral displacement error

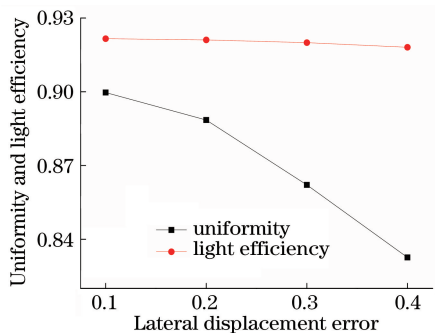


图 11 横向位移误差与均匀度、光效的关系图

Fig. 11 Relationship of lateral displacement error with uniformity and light efficiency

## 6 结 论

提出了一种新的基于 LED 扩展光源自由曲面透镜设计的方案。运用此方法寻找到最优权重为  $0.34021785:0.33828567:0.32149648$ ,目标面照度均匀度从初始的 78.93% 提高到 90.67%,同时光效保持在 92% 以上。当加工误差保持在  $-1.0\sim 1.0\ \mu\text{m}$  且横向位移误差保持在  $0.0\sim 0.2\ \text{mm}$  范围内时,两者对照明结果的影响较小,均匀度可保持在 88% 以上。优化变量的减少使得优化速度有了较大的提升。DDE 技术的使用实现了系统自动优化,在实际

工程中的操作性较强。此方案为在工程中实现对 LED 扩展光源的自由曲面透镜设计提供了一种新的设计思路。

## 参 考 文 献

- [1] Shukla P K, Mamun A A. Introduction to solid state lighting[J]. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2002, 44(3): 395-395.
- [2] Schubert E F, Kim J K. Solid-state light sources getting smart[J]. Science, 2005, 308(5726): 1274-1278.
- [3] Krames M R, Shchekin O B, Mueller-Mach R, et al. Status and future of high-power light-emitting diodes for solid-state lighting[J]. Journal of Display Technology, 2007, 3(2): 160-175.
- [4] Liang X. Simultaneously multiple surface design method for LED collimator based on nonimaging optics[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2012: 4-5.  
梁雪. LED 准直光源的 SMS 非成像光学设计方法[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2012: 4-5.
- [5] Wang H H. Study on optical design methods for high power LED extended sources[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2001: 22-31.

- 王海宏. 大功率 LED 扩展光源的光学设计方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011: 22-31.
- [6] 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.
- [7] Shatz N. Generalized functional method of nonimaging optical design[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6338: 633805.
- [8] Bortz J, Shatz N. Iterative generalized functional method of nonimaging optical design[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6670: 66700A.
- [9] Fournier F R, Cassarly W J, Rolland J P. Optimization of single reflectors for extended sources[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7103: 710301.
- [10] Fournier F R, Cassarly W J, Rolland J P. Fast freeform reflector generation using source-target maps[J]. *Optics Express*, 2010, 18(5): 5295-5304.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Ding Y, Liu X, Zheng Z R, *et al.* Freeform LED lens for uniform illumination [J]. *Optics Express*, 2008, 16(17): 12958.
- [14] Wang K. Free-form surface optics research on high-power LED package and application [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011: 22-36.  
王恺. 大功率 LED 封装与应用的自由曲面光学研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011: 22-36.
- [15] Luo Y, Zhang X P, Wang L, *et al.* Nonimaging optics and its application in solid state lighting [J]. *Chinese Journal of 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.
- [16] Luo Y, Feng Z X, Han Y J, *et al.* Optics in solid state lighting [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900117.  
罗毅, 冯泽心, 韩彦军, 等. 面向半导体照明的光学 [J]. *光学学报*, 2011, 31(9): 0900117.
- [17] Xin D, Liu H, Lu Z W, *et al.* Optical design of the LED illumination system with adjustable view angle [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0522003.  
辛迪, 刘华, 卢振武, 等. 可变视场角 LED 照明光学系统设计 [J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0522003.
- [18] Li M Y, Sun J L, Zhang D W, *et al.* Optical system design for ultraviolet-LED curing based on the structure of freeform surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1222003.  
李梦远, 孙伽略, 张大伟, 等. 基于自由曲面透镜结构的紫外发光二极管固化系统光学设计 [J]. *光学学报*, 2014, 34(12): 1222003.
- [19] Winston R, Miñano J C, Benítez P. Nonimaging optics [M]. Cambridge: Academic Press, 2005.
- [20] Xu J J, Huang Y H, Wang Q, *et al.* Reactive power optimization in distribution network with DG based on natural selection particle swarm optimization [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2014, 51(10): 33-38, 50.  
徐俊俊, 黄永红, 王琪, 等. 基于自然选择粒子群算法的含 DG 接入的配电网无功优化 [J]. *电测与仪表*, 2014, 51(10): 33-38.
- [21] Liu Z J. Matlab application program interface guide [M]. Beijing: Science Press, 2000: 225-230.  
刘志俭. Matlab 应用程序接口用户指南 [M]. 北京: 科学出版社, 2000: 225-230.