文章编号:1002-2082(2016)04-0595-07

基于 SelPSO 算法的紧凑型照明器件优化方法

李 潇,黄逸峰,谭叶青,钱维莹,苏宙平,刘 诚,高淑梅
(江南大学 理学院 江苏省轻工光电工程技术研究中心,江苏 无锡 214122)

摘 要:提出一种基于自然选择的粒子群算法(SelPSO)的扩展光源匀透镜设计方法。该方法通过 DDE 技术,将 TracePro 的光线追迹功能与 Matlab 的信息处理功能有机结合,建立以点光源透镜轮廓为对象的优化模型,进而利用加入平滑度约束的 SelPSO 算法对模型进行全局优化。以 $h/d=2.5:1$ 的紧凑型匀光透镜为例,结果表明:SelPSO 算法与 PSO 算法在相同参数下进行优化,SelPSO 算法具有更强且更快的全局收敛能力,优化后透镜表面光滑易加工,且均匀度、光效分别达到 87.566%、89.536%;对透镜安装公差进行分析后,将横向、纵向位移误差分别控制在[0 mm,2 mm]内,对照明效果产生的影响较小;此方法还具有较强普适性,可针对不同照明范围的照明系统进行优化,且整体照明效果良好。

关键词:照明设计;扩展光源;DDE 技术;SelPSO 算法;优化设计;均匀照明
中图分类号:TN312.8;O439 **文献标志码**:A **doi**:10.5768/JAO201637.0405001

Optimization method for compact lighting system based on SelPSO algorithm

Li Xiao, Huang Yifeng, Tan Yeqing, Qian Weiying, Su Zhouping, Liu Cheng, Gao Shumei
(Jiangsu Provincial Research Center of Light Industrial Optoelectronic Engineering and Technology, School of Science, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: A method for designing the lens for uniform illumination with extended source based on natural selection particle swarm optimization (SelPSO) algorithm was proposed. The point light source lens profile was treated as the optimized object by this method. Firstly, we established a mechanism of exchanging information between Matlab and TracePro based on dynamic data exchange (DDE) technology. The characteristic advantages of both Matlab and TracePro were combined by the mechanism, so that we could construst the optimzation model easily. Then, we used the SelPSO algorithm to optimize system globally until the optimization results met the illumination requirements. In order to verify the feasibility of the system, we designed a compact uniform lens whose h/d was equal to 2.5:1. The results show that when the SelPSO and PSO are used to optimize system under the same parameters, it is found that SelPSO has faster and better global convergence capability, and its uniformity and efficiency can reach 87.566% and 89.536%, respectively. After lens installation tolerance analysis, the transverse and longitudinal displacement errors should be controlled between 0 mm and 2 mm so as to get

收稿日期:2016-03-18; **修回日期**:2016-04-29
基金项目:国家自然科学基金(61178032);江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(SJLX15_0562);中央高校基本科研业务费专项资金资助(JUSRP51517)
作者简介:李潇(1992—),男,江苏江阴人,硕士研究生,主要从事照明与成像设计方面的研究。
E-mail:leexmr@163.com
导师简介:高淑梅(1961—),女,吉林大安人,博士,教授,主要从事光学设计与光谱检测方面的研究。
E-mail:gaosm@jiangnan.edu.cn

a better lighting effect. Additionally, the method can be used for optimizing lens systems in different illuminance ranges with good illuminance effect.

Key words: lighting design; extended light source; DDE technology; SelPSO algorithm; optimization design; uniform illumination

引言

近年来,由于 LED 扩展光源在照明领域被广泛应用[1-3],基于点光源的设计方法已不适用于扩展光源照明系统[2],进行紧凑型照明系统[3]设计方法的研究,也逐渐成为这一领域新的热点。紧凑型照明系统的设计方法大体可分为直接设计法与优化设计法两大类。直接设计法包括同步多曲面法[4]等,通过构建扩展光源与目标面的对应关系,计算出系统表面的数据点,但此类设计方法较为复杂,且其适用性也有一定的局限。而优化设计法一般基于点光源模型进行迭代优化,如 Kun Wang 等[5]通过重叠法将多个点光源透镜自由曲面重叠形成扩展光源系统,并建立照度反馈程序寻找最佳组合,虽然优化后仿真效果一般,但此方法具有较强操作性;如普遍的照度反馈优化法[6-8]一般基于目标面的照度信息进行优化,在有限次优化后,虽然目标值可以得到快速提升,但在此基础上再进行优化时就很难有大幅度的提升了,将会陷入局部最优解,且建立反馈信息需要大量的手动计算,较为复杂。由此可知,研究方法虽然众多,但仍存在较多问题,我们需要找到一种简单有效的设计方法,以弥补当前欠缺。人工智能算法是一种根据自然规律进行类比性模拟的程序,当运用在一些复杂问题时,往往可以简化问题。如结合了自然选择规律和鸟群捕食特点的 SelPSO 算法[9](natural selection particle swarm optimization),在解决多参量全局优化及局部最优解的问题上,就具有较强的运算收敛能力。因此,本文通过引入人工智能算法来提高照明优化效率及突破局部最优解。

本文首先通过 DDE (dynamic data exchange) 技术将 Matlab 与 TracePro[10]实现对接以构建物理优化模型,拟解决模型的自动计算、传输数据问题。然后,将 SelPSO 算法运用于紧凑型照明系统的自动优化中,拟解决局部最优解的问题。最后,通过改良 SelPSO 算法,使输出模型具有表面光滑易加工的特性。

1　Matlab 与 TracePro 的自动联用优化

动态数据链接(DDE)是 Windows 支持的几种常用通信机制之一[11],容易建立客户端与服务端应用程序间的对话,实现多软件的联用,如图 1 所示。Matlab 控制优化算法,提供初始及优化参数;再将参数信息通过 DDE 通信传输至 TracePro 中进行仿真,循环多次后得出最优解。

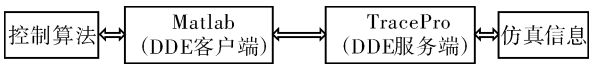


图 1　DDE 通信框图

Fig. 1　Block diagram of DDE communication

1.1　DDE 对话机制的建立

DDE 通信接口是 Matlab 应用程序提供的一个重要组件,通过该接口,可以便捷地完成 Matlab 与外部环境的交互。如图 2 所示,Matlab 客户端通过 DDE 函数[11]对服务器进行相应控制。而 TracePro 作为服务器,通过客户机调用 TracePro 宏语言(Scheme)对其本身进行相应控制。本文以 Matlab 与 Scheme 的程序混编为通讯基础,实现信息传递自动化,以提高设计开发的效率。

图 2　Matlab 与 TracePro 的通信过程示意图

Fig. 2　Schematic of communication process between Matlab and TracePro

1.2　优化模型的建立

如图 3 是利用反馈优化法建立的匀透镜轮廓对比图。可以发现,扩展光源匀透镜的轮廓比点光源

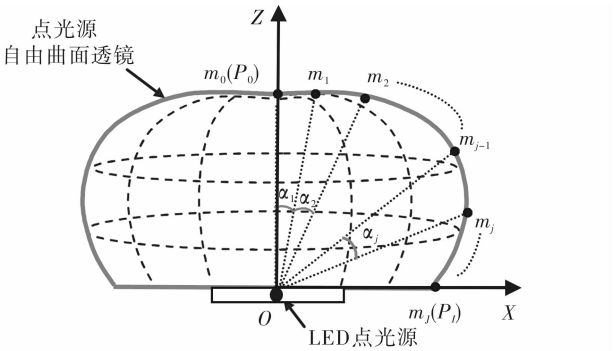
的稍大,且轮廓改变量相对透镜整体较小。因此,本文提出直接对点源轮廓进行微调,使其适用于扩展光源系统,将设计流程大大简化。

图 3　匀透镜轮廓对比图[12]

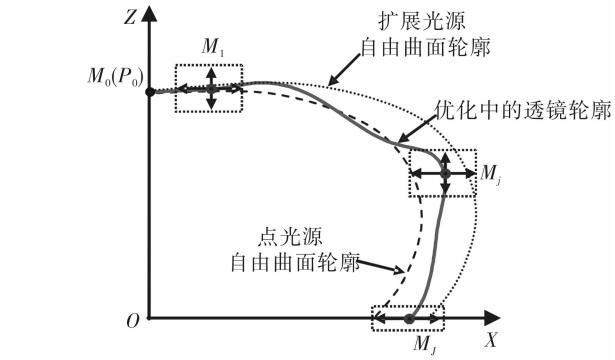
Fig. 3　Comparison chart of uniform lens profile[12]

微分几何法[13]是一种常用的点光源照明系统设计方法,通过简易编程就可获得透镜轮廓点 P_i,其中 $i=0,1,\cdots,I$。根据上述对图 3 的分析,假设对全部 P_i 进行坐标调整,由于优化变量过多(I 一般大于 500),优化时间将呈指数上升。因此,需少量选取合适的优化轮廓点。

LED 属于近朗伯光源[14],具有中心区域能量高,两侧区域能量低的特性。为提高优化效率,能量聚集区需设定较多优化点。如图 4(a)是按照等能量角选取优化轮廓点 $m_j(x_j,\ z_j)$,其中 $j=0,1,\cdots,J$;α_1 区域的能量与 α_j 的相同,且 $\alpha_1<\alpha_j$。因此,靠近中心光强区域的轮廓点较为密集,满足所需设定。



(a) 等能角选取优化点示意图



(b) 坐标调整示意图

图 4　透镜轮廓图

Fig. 4　Maps of lens profile

如图 4(b)是初始透镜经坐标调整逐步收敛至扩展光源系统的示意图。首先,将所选轮廓点 m_j 的横纵坐标分别加入优化参量 δ 进行调整,设调整后的轮廓坐标为 $M_j(x_j+\Delta X_j,\ z_j+\Delta Z_j)$。特别注意:为保证紧凑型透镜高度不变,$M_0$ 应为定点;并且,M_J 是透镜底部轮廓点,不需要调整 Z 轴方向的参量,则调整后坐标为 $M_J(x_J+\Delta X_J,\ z_J)$。因此,优化参量 δ 可表示为

$$\delta=[\Delta X_1,\Delta Z_1,\cdots,\Delta X_j,\Delta Z_j,\cdots,\Delta X_J] \tag{1}$$

进而,将调整坐标 M_j 通过 ddepoke()传输至 TracePro 中,利用 TracePro 宏语言(Scheme)对 M_j 进行放样、旋转形成透镜实体模型。

对模型进行光线追迹后,再通过 ddereq()将 TracePro 中目标面的均匀度 U、光效 η 传输至 Matlab 中,建立目标评价函数 fitness:

$$\text{fitness}=2-(\omega_1\cdot U+\omega_2\cdot\eta) \tag{2}$$

式中,权重因子 $\omega_1,\omega_2\in[0,2]$ 且 $\omega_1+\omega_2=2$。

可以看出目标函数的大小与优化参量 δ 有关,通过寻找到最佳的参量,可同时使目标面上照度均匀性及光效达到较优状态。因此,求解扩展光源匀透镜轮廓的问题就转化为寻找目标函数最小值的问题,利用粒子群改良算法可对(3)式进行快速全局求解:

$$\text{fitness}=f(\Delta X_1,\Delta Z_1,\cdots,\Delta X_j,\Delta Z_j,\cdots,\Delta X_J) \tag{3}$$

1.3　基于自然选择的粒子群优化算法的设计

1) 基本 PSO 算法

首先,根据基本 PSO 算法[15],在 D 维搜索域中,初始化一组随机解(初始粒子群 $\boldsymbol{X}_M$),并设第 m 个随机解(粒子 $\boldsymbol{X}_m$)的位置及速度分别为 $\boldsymbol{X}_{m,d}$ 和 $\boldsymbol{V}_{m,d}$,其中 $m\in[1,M]$,$d\in[1,D]$ 且 m, d 属于整数 $\boldsymbol{Z}$。

当粒子群进行下一次求解时,由个体极值 Pbest, $\boldsymbol{P}_{m,d}$ 及全局最优解 Gbest, $\boldsymbol{P}_{g,m}$ 来更新其当前位置与速度,更新公式如下:

$$\boldsymbol{V}_{m,d}^{T+1}=w\cdot\boldsymbol{V}_{m,d}^{T}+c_1\cdot r_1[\boldsymbol{P}_{m,d}^{T}-\boldsymbol{X}_{m,d}^{T}]+c_2\cdot r_2[\boldsymbol{P}_{g,m}^{T}-\boldsymbol{X}_{g,m}^{T}] \tag{4}$$

$$\boldsymbol{X}_{m,d}^{T+1}=\boldsymbol{X}_{m,d}^{T}+\boldsymbol{V}_{m,d}^{T+1} \tag{5}$$

式中:T 为优化次数;w 为速度惯性因子;c_1 与 c_2 为学习因子;r_1 和 r_2 是 0 至 1 间的随机数。

由此可看出,基本 PSO 算法是追随当前最优

粒子来寻找收敛解的[16],有很大可能会陷入局部最优点,导致输出结果有较大偏差。

2) 自然选择算法的加入

为避免陷入局部解的问题,所有粒子经(4)、(5)式更新后,需加入自然选择操作[17],以提升粒子群的平均适应度,增强算法的整体收敛性。自然选择操作:依据适应值(fitness)将粒子群进行排序,将最优粒子的速度与位置替换较差粒子的速度与位置,使所有粒子一直以全局较优值更新本身,快速得到最佳收敛解。

3) 平滑度约束的加入

上述算法生成的数据点具有随机成分,而优化时并未对其进行平滑度约束,这可能会导致优化后输出的系统表面凹凸不平,给开模加工带来困难。因此,有必要进行平滑度束。

如图 5,以数据点 $M_0 \sim M_3$ 为例,各点间由直线相连,其延伸线与水平轴形成不同的夹角 θ。为保证适当平滑度,可规定相邻直线的倾斜改变量控制在一定范围内。而倾斜量可由水平夹角差 $\Delta\theta$ 确定,所控范围则可设定一个固定的角度值 φ(由经验设定),表述如下:

根据(4)、(5)式更新粒子群的位置及速度后,需加入平滑度判定。当 $\Delta\theta_1 = |\theta_1 - \theta_2| < \varphi$、$\Delta\theta_2 = |\theta_2 - \theta_3| < \varphi$ 都成立时,可说明平滑度达到所需标准,否则重新设定。

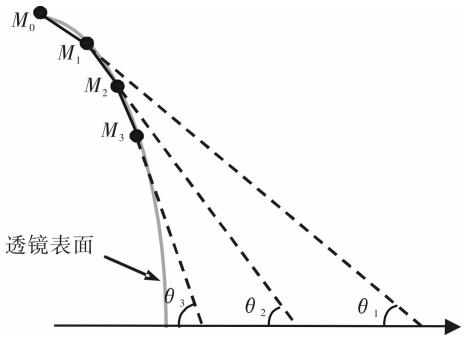


图 5　平滑度约束示意图

Fig. 5　Schematic of smoothness constraint

综上,扩展光源匀透镜的优化设计流程,如图 6 所示。

2　仿真与结果分析

现设计 $h/d = 2.5:1$ 的紧凑型匀透镜,以验证此方法的可行性。令透镜高度 h 为 2.5 cm,现使用直径 d 为 1 cm 的 LED 扩展光源在指定圆形目标面上产生均匀照度,如图 7 所示。设透镜材料的折射率 n 为 1.49,分别使用 PSO 与 SelPSO 算法对照明系统进行优化,并对各结果进行分析。

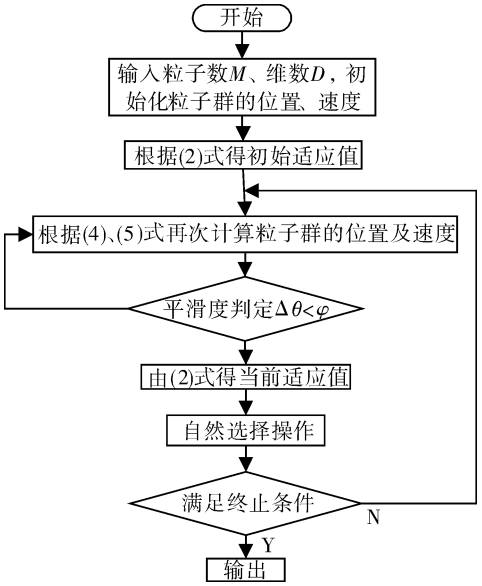


图 6　基于 SelPSO 算法的透镜优化流程图

Fig. 6　Flow chart of lens optimization based on SelPSO

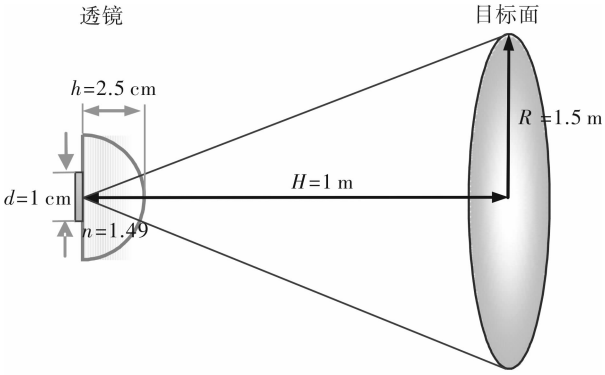


图 7　照明系统各参数示意图

Fig. 7　Schematic of parameters of illumination system

当迭代优化时,需要运用基于蒙特卡洛算法的非序列光线进行追迹,并通过大量的光线数对目标面照度进行仿真。本文为考虑优化速率及优化质量两方面的问题,设 TracePro 的光线追迹数为 30 万,照度平滑度为 50,并将特征优化点两方向的变化范围控制在[−1.25 mm,1.25 mm]之间,进而开始优化。

PSO 算法与 SelPSO 算法参数设置相同,如表 1 所示。并且,设适应值(fitness)的均匀度权重 ω_1 为 1.1(侧重照度均匀性),光效权重 ω_2 为 0.9,如(6)式:

$$\text{fitness} = 2 - (1.1 \cdot U + 0.9 \cdot \eta) \tag{6}$$

表 1　基本参数设置

Table 1　Parameters setting of basic design

参数名称	参数值
优化次数 T	500
种群粒子数 M	15
优化轮廓点数 J	10
问题维数 D	17
学习因子 c_1、c_2	2
速度惯性权重 w	0.6

表 2 为经 PSO 与 SelPSO 优化后的仿真效果对比,由表 2 可知,经两种算法优化后,照明效果都有明显改善,且经 SelPSO 算法优化所得的仿真结果更好。图 8 所示为两种算法的收敛性比较,可以看出虽然 PSO 算法的初始目标函数较低,但其总体收敛性却差于 SelPSO 算法。SelPSO 算法在第 261 次迭代时,获得目标函数值 0.230 95,而 PSO 算法在第 326 次迭代时,获得目函数值 0.254 46,且总体优化时间多出 0.6 h。

表 2　经两种算法优化后的仿真效果对比

Table 2　Comparison of simulation results after optimization by 2 algorithms

算法	初始值 (fitness)	优化值 (fitness)	均匀度 U/%	光效 η/%	运行时间/h
PSO	0.320 21	0.254 46	85.987	88.853	2.8
SelPSO	0.324 95	0.230 95	87.566	89.536	2.2

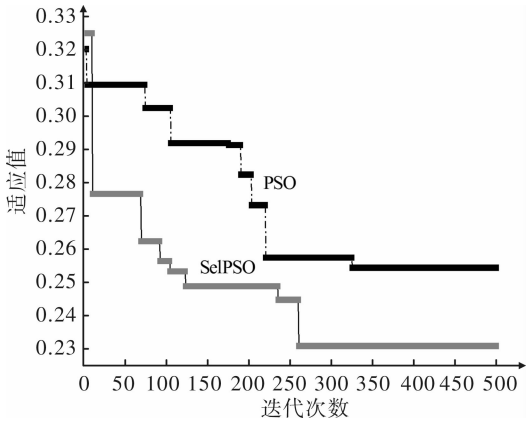
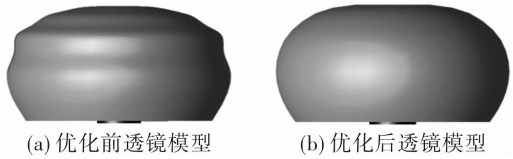


图 8　PSO 与 SelPSO 的收敛性比较

Fig. 8　Convergence comparison between PSO and SelPSO

图 9 是经 SelPSO 算法优化前后的透镜模型示意图,优化前透镜轮廓凹凸不平,而优化后透镜轮廓较为光滑,开模相对容易。其照明效果分别如图 10(a)、10(b),前者光照分布极不均匀,后者光能主要集中在有效半径内,照度较为均匀,基本达到匀化效果。

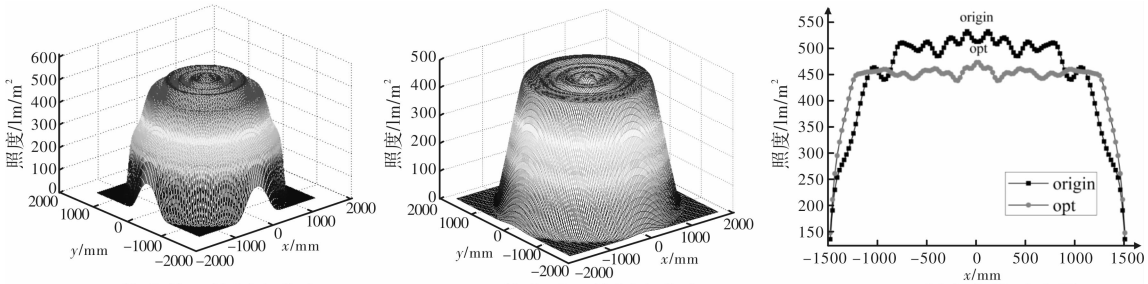


(a) 优化前透镜模型　(b) 优化后透镜模型

图 9　透镜模型图

Fig. 9　Models of lenses

如图 10(c)是初始(origin)、优化后(opt)的照度曲线对比图。由初始曲线可以看出,光斑中部区域照度较高达到 525 lm/m^2,而两侧照度递减较快,导致均匀度相对较差。经优化后,光斑范围确定在−1 500 nm～+1 500 mm 间,照度值基本处于 450 lm/m^{2}左右;与初始曲线相比,中部区域的能量向两侧偏移,致使照度达到较均匀状态。



(a) 优化前三维照度分布　(b) 优化后三维照度分布　(c) 照度曲线对比图

图 10　照度分布图

Fig. 10　Iluminance distributions

表 3 是针对 h/d=2.5:1 情况下,照明范围对照明效果所产生的影响。由表可看出,照明范围(出射半角)的不同对均匀度、光效都有影响,且对均匀度的影响稍大,变化幅度将近 10%,从 89.325%变化至 78.350%;光效变化幅度虽然不大,但总体也随出射半角的减小而降低。

表 3 中出射半角为 45°的照明效果基本与文献[2]中所得的结果相似,可论证此方法对不同照明范围具有良好的普适性。

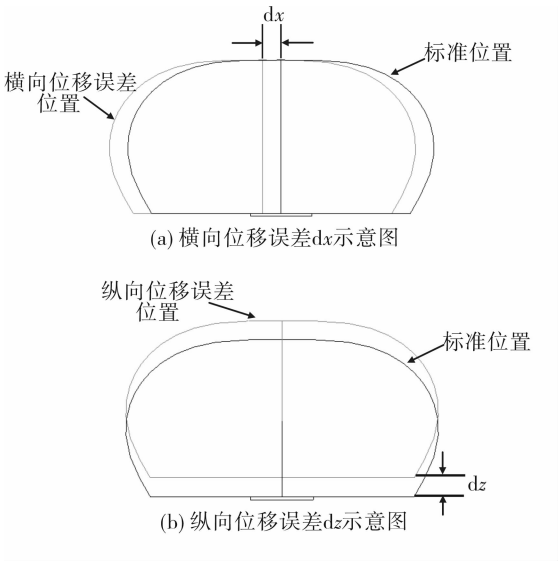
表 3　不同照明范围对照明效果的影响

Table 3　Influence on result by different lighting ranges

照明范围/mm	发光半角/(°)	均匀度 U/%	光效 η/%
1 750	60.26	89.325	90.250
1 500	56.31	87.566	89.536
1 250	51.34	83.845	86.632
1 000	45.00	78.350	84.336

3　公差分析

按照上述方法完成紧凑型透镜设计后,需要考虑其工程安装问题。因此,如图 11 所示,引入横向位移误差 dx、纵向位移误差 dz 作为安装误差,将照度均匀度及光效作为公差分析中的评估值。现设计的透镜属于旋转对称结构,因此横向位移误差 dx 只需考虑向一侧移动的情况;而透镜一般安装在光源上方,纵向位移误差只需考虑向上移动的情况。



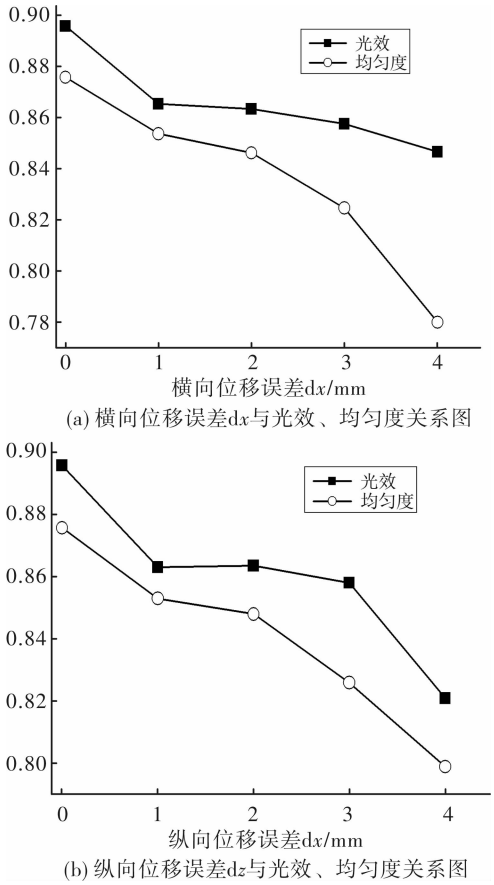
(a) 横向位移误差dx示意图

(b) 纵向位移误差dz示意图

图 11　装配误差示意图

Fig. 11　Schematic of assembly errors

图 12 是横向、纵向位移误差分别与光效及均匀度的关系图。我们可以发现横向位移误差 dx 对光效的影响相对较小,而对照度均匀度的影响较大;当横向误差在[0 mm,2 mm]的范围内,可使光效、均匀度分别控制在 86.0%、84.0%以上。当装配透镜产生纵向位移误差时,随着 dz 的变大,光效的损失也逐渐变大,当 dz 为 4 mm 时,光效已经下降到 82%左右;通过分析数据,当纵向误差在[0 mm,2 mm]的范围内,同样可使光效、均匀度分别控制在 86.0%、84.0%以上。



(a) 横向位移误差dx与光效、均匀度关系图

(b) 纵向位移误差dz与光效、均匀度关系图

图 12　透镜装配公差分析

Fig. 12　Tolerance analysis

4　结论

本文设计了一种运用 SelPSO 算法对点源匀透镜进行优化的方法。该方法以 TracePro 与 Matlab 间的 DDE 通信为基础,利用各软件的特色功能进行的联用优化,有效解决了软件间数据传输繁琐的问题。同时,SelPSO 算法、平滑度约束与优化模型的结合,实现了系统全局解的最优智能搜寻,节省了设计开发时间。经仿真案例分析,所设计针对不同照明范围(出射半角在 45°～60°)的透镜系统,仿真照明效果都比较好,均匀度约在 80%、光效达到 85%左右,具有良好的普适性。经对透镜安装公差进行分析后,发现将横向、纵向位移误差分别控制在[0 mm,2 mm]内,对照明效果产生的影响相对较小。同时,基于点光源的照明系统一般都可利用此方法实现自动匀化,在工程照明中具有较强的实用性。

参考文献

[1] Lin Cheng. Optical stimulation and application of multi-chip COB LED packaging with minitype lens array[J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(6): 1063-1068.
林丞. 阵列式微型透镜封装多芯片 COB LED 的光学仿真设计及应用[J]. 应用光学, 2014, 35(6): 1063-1068.

[2] Mao X, Li H, Han Y, et al. A two-step design method for high compact rotationally symmetric optical system for LED surface light source[J]. Optics Express, 2014, 22(102): A233-A247.

[3] Xue Tao, Su Chengyue, Zhang Kang, et al. Design for LED free surface lens with small angle based on extended source[J]. Optical Technique, 2014, 40(1): 45-49.
薛涛, 苏成悦, 张康, 等. 基于扩展光源的 LED 小角度自由曲面透镜设计[J]. 光学技术, 2014, 40(1): 45-49.

[4] Zhang Hang, Liang Xue, Yan Jinhua, et al. Compound parabolic concentrator-simultaneors 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.

[5] Wang K, Han Y, Li H, et al. Overlapping-based optical freeform surface construction for extended lighting source[J]. Optics Express, 2013, 21(17): 19750-19761.

[6] Parkyn B, Pelka D. Free-form illumination lenses designed by a pseudo-rectangular lawnmower algorithm [J]. SPIE, 2006, 6338: 633808-633808-7.

[7] Mao X, Li H, Han Y, et al. Two-step design method for highly compact three-dimensional freeform optical system for LED surface light source[J]. Optics Express, 2014, 22(106): A1491-A1506.

[8] Wang K, Han Y, Li H, et al. Overlapping-based optical freeform surface construction for extended lighting source[J]. Optics Express, 2013, 21(17): 19750-19761.

[9] Gong Chun, Wang Zhenglin. Proficient in MATLAB optimization calculation [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009: 113-121.
龚纯, 王正林. 精通 MATLAB 最优化计算[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 113-121.

[10] Sun Chengming, Zhao Fei, Zhang Ze. Modeling and simulation of space object optical scattering characteristics using TracePro[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 43(11): 1122003
孙成明, 赵飞, 张泽. 基于 TracePro 的空间目标光学散射特性建模与仿真[J]. 光子学报, 2014, 43(11): 1122003.

[11] Liu Zhijian. 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.

[12] Wu D, Wang K, Liu S. Freeform lens design for uniform illumination with extended source[C]. USA: IEEE, 2011: 1-5.

[13] Xu Chao, Gao Shumei, Qian Weiying, et al. A optimization design of compact uniform lens for large-size LED[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(4): 042201.
徐超, 高淑梅, 钱维莹, 等. 大面型 LED 紧凑型匀透镜优化设计[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(4): 042201.

[14] Li Peng, Zheng Yi, Fan Jiangbing, et al. Design of squared uniform illumination based on high power LED extended objects[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 44(2): 0222001.
李鹏, 郑毅, 范江兵, 等. 基于大功率 LED 扩展光源的均匀光斑光辐射模拟器设计[J]. 光子学报, 2015, 44(2): 0222001.

[15] Li Zhenkun, Chen Xingying, Yu Kun, et al. Hybrid particle swarm optimization fordistribution network reconfiguration[J]. Proceedings of CSEE, 2008, 28(31): 35-41.
李振坤, 陈星莺, 余昆, 等. 配电网重构的混合粒子群算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 35-41.

[16] Zhao Zhipu, Ji Lingyan, Shen Yanxia, et al. Research of illumination uniformity for LED arrays based on PSO algorithm [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2013, 34(12): 1677-1682.
赵芝璞, 季凌燕, 沈艳霞, 等. 基于 PSO 粒子群算法的 LED 照明系统光照均匀性研究[J]. 发光学报, 2013, 34(12): 1677-1682.

[17] Xu Junjun, Huang Yonghong, Wang Qi, 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.
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.