

doi:10.3788/gzxb20144311.1122006

基于遗传算法的自由曲面优化设计

李登高^{1,2}, 殷松峰^{1,2}, 凌永顺^{1,2}, 杨华^{1,2}, 解震¹, 陶会锋^{1,2}

(1 电子工程学院 红外与低温等离子体安徽省重点实验室, 合肥, 230037)

(2 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 合肥, 230037)

摘 要: 为解决传统点光源近似设计方法难以满足实际应用需求的问题, 基于遗传算法提出了一种面向扩展光源的自由曲面优化设计方法. 该方法以虚拟点光源的辐射分布函数、原点位置偏移量及目标面尺寸因子等参数作为优化对象, 首先对种群中任意个体根据能量守恒定律及 Snell 定律建立并求解偏微分方程, 得到对应于该组虚拟参数的自由曲面, 然后以实际扩展光源进行光线追迹, 并综合考虑目标面照度均匀度和系统传输效率得到个体适应度, 据此对种群进行选择、交叉和变异, 直至优化结果满足设计要求. 设计了发散半角为 10° 的均匀照明系统, 光源采用直径为 30 mm 的圆盘朗伯源, 在 Trace/pro 环境下与传统设计方法进行对比, 结果表明: 系统均匀度从 58.3% 提高到 93.5%, 辐射传输效率从 61.8% 提高到 72.9%, 且光束质量对目标面距离的变化具有很好的稳定性. 该设计方法能较好地实现对扩展光源辐射在空间分布的调控, 对扩展光源系统设计具有重要指导意义.

关键词: 自由曲面; 遗传算法; 均匀照明; 优化设计; 扩展光源

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)11-1122006-7

Design of Freeform Surface Based on the Genetic Algorithm

LI Deng-gao^{1,2}, YIN Song-feng^{1,2}, LING Yong-shun^{1,2}, YANG Hua^{1,2}, XIE Zhen¹, TAO Hui-feng^{1,2}

(1 Key Laboratory of Infrared and Low Temperature Plasma of Anhui Province, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

(2 State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Hefei 230037, China)

Abstract: To overcome the shortness of traditional algorithms relying on the point source assumption, a freeform surface optimization method for the extended source was proposed based on the genetic algorithm. The optimal objects involve the radiation distribution function, the offset of origin and the size factor of receiver about the virtual point source. For each individual the reflector can be calculated numerically by solving the partial differential equations established according to the energy conservation law and Snell's law corresponding to the set of virtual parameters. The individual fitness concerning the uniformity of the object region and the transmission efficiency was obtained according to the simulation results with an actual extended source. The selection, crossover and mutation operations are implemented until the optimization results can meet the requirements. To verify the effectiveness of the proposed method, a uniform lighting system with cone angle of 10° was designed. The contrast experiments are carried out in Trace/Pro with a disc lambertian source with the size of 30 mm in diameter. The light tracing experiments show that the uniformity of the object region increases from 58.3% to 93.5%, and the transmission efficiency increases from 61.8% to 72.9%. Meanwhile, the optical quality has quite good stability at varying distances. The experimental results demonstrate that the method can achieve the adjustment of the spatial distribution of the extended source radiation which has significant guidance for the design of extended source system.

基金项目: 安徽省优秀青年科技基金(No. 1308085JGD05)和教育部新世纪优秀人才支持计划(No. NCET-09-0322)资助

第一作者: 李登高(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为非成像光学和光学系统设计. Email: lidenggao_wei@yeah.net

导 师: 凌永顺(1937-), 男, 教授, 博导, 中国工程院院士, 主要研究方向为光电工程. Email: lys@126.com

收稿日期: 2014-02-20; 录用日期: 2014-05-20

<http://www.photon.ac.cn>

Key words: Freeform surfaces; Genetic algorithm; Uniform illumination; Optimization design; Extended sources

OCIS Codes: 220.4298; 080.1753; 080.2740; 220.2740; 220.2945

0 引言

随着设计理论及制造工艺、光测技术的提高,自由曲面在光学领域的应用越来越多,如微型投影仪、LCD背光源照明、车灯及路灯照明等^[1-2].传统设计方法是基于点光源近似,光源辐射被视为从光源中心点发出,服从余弦或类余弦分布,设计过程中所有参数保持不变.但随着光学系统不断向一体化、紧凑型发展,光源尺寸逐渐成为设计中的难题^[3-4].

在点光源设计基础上如何通过优化方法得到适用于扩展光源的曲面结构成为自由曲面设计的研究热点.刘振杰^[5]、杨波^[6]等采用点光源近似法求得初始曲面结构并进行参数拟合,然后利用优化算法对反射器曲面进行优化,解决了点光源设计中反射器在使用扩展光源时产生的光斑扩散问题.罗晓霞^[7]、李林等^[3]基于 ZEMAX 软件,通过建立透镜结构并自定义优化函数,实现了对 LED 照明光学系统的自动优化.赖伟^[8]则通过建立目标面照度分布优化模型,结合 Lingo 优化软件实现了照度分布的优化.以上方法大都是通过初始曲面进行参数拟合,然后采用一定的优化策略来实现曲面结构的优化^[9].由于优化算法的收敛速度与搜索空间维度密切相关,并随着维数的增加收敛速度呈指数下降.若以每个控制点作为一个独立变量,寻解空间维数十分庞大.同时由于所需优化参数物理意义不够明晰,难以确定优化范围并易导致曲面结构出现畸变.

本文提出一种基于遗传算法的优化设计方法,该方法通过优化虚拟点光源光强分布函数、原点位置偏移量及目标面尺寸因子等参数实现对曲面的优化.对于一组给定虚拟参数根据能量守恒定律及 Snell 定律建立并求解偏微分方程得到曲面结构,然后光线追迹^[10]得到该曲面应用于实际扩展光源时的照度分布,并求得该组参数的适应度值,最后通过选择、交叉、变异等遗传操作进行参数优化.仿真实验结果表明,该方法可有效提高辐射的空间分布均匀度及系统传输效率.

1 优化设计理论分析

1.1 优化参数选取

反光杯在均匀照明系统设计中被广泛采用,当目标接收面为圆形时,整个系统具有旋转对称性,可建立如图 1 所示的二维模型.

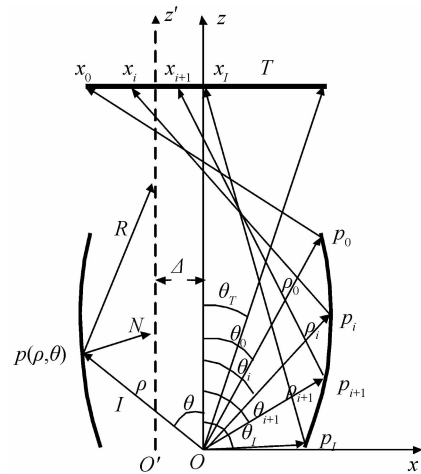


图 1 反光杯系统

Fig. 1 Geometry of reflection system

光源中心位于原点 O , 当视为点光源时, 其在 θ 方向的辐射强度 I_θ 可表示为^[11]

$$I_\theta = I_0 \sum_{i=0}^m a_i \theta^i \quad (1)$$

式(1)可表征各类配光曲线, 其中 I_0 为光源沿法向方向的辐射强度. 只用于表征相对空间分布时, I_0 取 1.

反光杯的收光角范围为 $\theta_0 \sim \theta_l$, (θ_l 一般取 $\pi/2$), p_0 和 p_l 分别为反光杯两端口边缘上一点. 从光源发出在 $0 \sim \theta_l$ 范围内的光线将直接入射到距离光源 l , 半径为 R 的目标接收面, 而 $\theta_0 \sim \theta_N$ 角度范围内的光线则经反光杯反射到目标面上. 其中, 出射角度为 θ_0 的中心光线经 P_0 反射到目标面边缘 x_0 处, 角度为 θ_l 的边缘光线经 p_l 反射到目标面中心 x_l 处, O 和 p 之间的距离为 ρ . 根据能量守恒定律得

$$\gamma \iint_{\Omega_1} I_\theta d\Omega + \iint_{\Omega_2} I_\theta d\Omega = E \int_{|x_l|}^{|x_0|} 2\pi r dr \quad (2)$$

式中, γ 为反光杯表面反射率, Ω_1 、 Ω_2 分别为反光杯和目标面所对应的立体角范围, E 为目标面上预期平均照度值.

1) 虚拟点光源辐射分布拟合函数

将 $\theta_0 \sim \theta_l$ 均匀划分为 I 份, 则 $0 \sim \theta_l$ 角度范围及目标面上 $x_0 \sim x_l$ 也都相应划分为 I 份, 则

$$\frac{2\pi\gamma \int_{\theta_0}^{\theta_l} I_\theta \sin \theta d\theta + 2\pi \int_0^{\theta_l} I_\theta \sin \theta d\theta}{\pi R^2} = \frac{2\pi\gamma \int_{\theta_0}^{\theta_l} I_\theta \sin \theta d\theta + 2\pi \int_{\arctan \frac{x_l}{l}}^{\arctan \frac{x_0}{l}} I_\theta \sin \theta d\theta}{\pi R^2 - \pi x_l^2} \quad (3)$$

对于某一给定光强分布 $I(\theta)$, 求式(3)即得到出射

角度为 θ_i 的光线在目标面上的对应位置 x_i . 根据 Snell 反射定律矢量形式为

$$\sqrt{2[1-(\mathbf{R} \cdot \mathbf{I})]} \cdot \mathbf{N} = \mathbf{R} - \mathbf{I} \quad (4)$$

当给定一初始点如 p_0 时, p_i 点由 θ_i 和 $x_i(\theta_i)$ 确定, 可通过数值求解偏微分方程得到^[12]. 因此, 对于给定器件尺寸特定范围内的点光源均匀照明设计问题, 反射面构型由光源辐射分布函数 $I(\theta)$ 唯一确定.

但是, 在没有能量损耗情况下实现辐射的均匀分布, 只在点光源系统中才是可能的^[13]. 这是由于扩展光源上任一点处均有光线出射, 目标面任一点处接收的辐射为无穷多“点光源”辐射的叠加^[11], 不存在类似于点光源系统中光源辐射与目标面之间的映射关系. 为建立扩展光源系统模型, John Bortz 等^[14] 假设光源上任一点处只有一条光线射出, 出射角度和光线能量均为该点坐标的函数, 且每条光线与目标面只有一个交点, 即目标面上某处的辐射为从扩展光源上某对应点发出的.

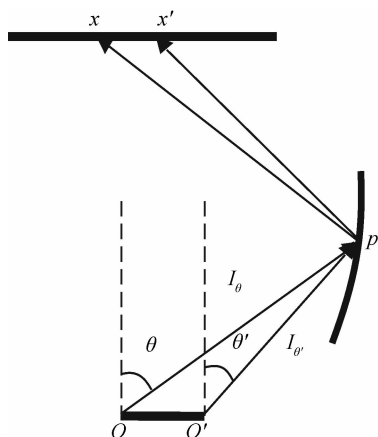


图2 扩展光源

Fig. 2 Geometry of extended sources

如图2所示, 设 O' 和 O 为扩展光源上两点, 则光线 \vec{opx} 和光线 $\vec{o'px'}$ 对 p 点的位置和该点处的斜率具有相同的要求. 因此, 利用光线 \vec{opx} 求得 p 点可保证光线 $\vec{o'p}$ 反射到 x' 点. 假设一理想曲面 P 使得从一扩展光源发出的占比 η 辐射均匀分布在距离光源 l , 尺寸半径为 R 的目标面 T 上, 则曲面 P 上每一点的位置和斜率均可通过虚拟点光源的辐射分布函数 $I(\theta)$ 来确定, 因此, 对于曲面 P 的优化可通过虚拟点的光强分布函数 $I(\theta)$ 来实现.

2) 原点位置偏移量

根据边缘光线理论, 以扩展光源边缘点为中心设计得到的光学器件具有更高的传输效率^[15]. 如图3, O 为扩展光源的中心点, O' 距离 O 点 Δ , $p_0 p_i$ 为反光杯 P 的轮廓曲线, $\theta_0, \theta_T, \rho_0$ 是以 O 为中心设计反光杯所需参数, 若采用相同参数以 O' 为中心进行设计, 反光杯的尺寸、结构将改变很大, 且随着 Δ 的变化而变化. 因

此, 为了使得以 O' 为中心设计得到的反光杯口径及深度与原参数一致, 需要根据 O' 和 O 之间的距离 Δ 对设计参数进行调整.

$$\begin{cases} \theta'_T = \theta_T \\ \theta'_0 = \arctan \frac{\rho_0 \sin \theta_0 + \Delta}{\rho_0 \cos \theta_0} \end{cases} \quad (5)$$

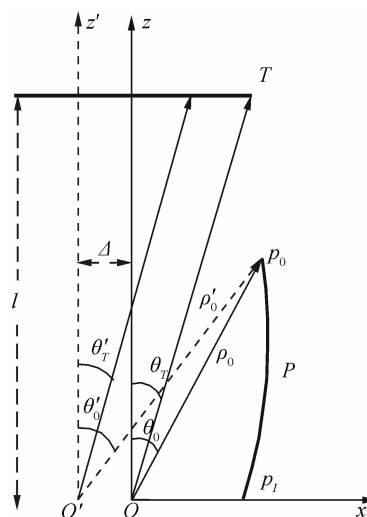


图3 原点偏移

Fig. 3 Schematic diagram of the origin offset

采用偏微分方程求得反光杯轮廓线 $p_0 p_i$, 然后沿 x 轴向右平移 Δ , 即得到对应扩展光源的反光杯, 此方法可在反光杯口径及深度均保持不变的情况下, 有效提高系统传输效率. 但是在均匀照明设计中, 偏移量 Δ 并非越大越好, 其取值与光源、反光杯和目标面三者之间的距离及相对尺寸等参数均有关系, 难以利用理论解析求得具体函数, 因此需要作为一变量进行优化.

3) 目标面尺寸因子

在点光源均匀照明设计中, 对于设计目标在一定距离处形成半径为 1 m 的均匀照明, 则设计中目标面半径即为 1 m, 在理想情况下, 仿真得到的光斑半径也是 1 m. 而对于扩展光源系统, 仿真中得到的光斑发生扩散, 光斑边缘十分模糊, 没有明显的明暗截止线, 系统传输效率及目标面处照度均匀度都将大大降低, 削弱了光学器件对光束的调控能力. 当减小设计参数中目标面尺寸时, 有利于提高系统的传输效率, 但目标面尺寸太小时, 改变光源与目标面之间的映射关系将无法有效对光学器件结构进行调整, 而增大目标面尺寸则有利于在目标面上获得更高的照度均匀度. 因此, 通过适当调整目标面尺寸可以获得更为接近设计需求的设计方案.

1.2 优化设计方法关键技术及流程

曲面优化效果不仅与优化参数的选取有关, 还取决于寻找最优解时采用的搜索策略. 常规的搜索策略是遍历式搜寻, 效率很低, 遗传算法^[16] 采用有指导的非遍历随机搜索机制, 在求解复杂系统优化问题时具

有内在并行性、不依赖于梯度信息,能够在较短时间内找到最优解或近似最优解,具有较强的鲁棒性,适用范围广,在成像光学^[17]和照明光学^[18-19]领域都有广泛的应用。

将遗传算法用于曲面优化问题,主要涉及以下关键技术:

1) 曲面优化问题解的编码

曲面优化设计的最终目的是得到实现预期辐射传输的光学曲面,但本文并不是直接由优化算法得到曲面各离散点或控制点坐标,而是以网格映射法中的各直接或间接输入参数作为优化对象,因此解的编码即是针对上述优化参数进行。

编码是遗传算法应用中首要解决的问题,决定了后续遗传操作的运算方法,对算法的进化效率有很大影响。编码方法一般可以分为二进制编码、实数编码和符号编码三大类,对于多参量优化问题,二进制编码方式会增加大量编码解码时间,影响优化效率,而实数编码方法中个体的每个基因用一定范围的某一实数表示,便于较大空间的遗传搜索,改善了计算复杂性,具有更高的精度和优化效率。

2) 适应度函数

作为优化算法的核心,适应度函数是进行选择、交叉和变异等遗传操作的基础。光学曲面设计的目的是使尽可能多的能量均匀照射到目标区域内,因此适应度函数应综合考虑系统传输效率和照度均匀度。本文适应度函数表示为

$$FV = \omega_1(1-\eta) + \omega_2(1-U) \quad (6)$$

式中, ω_1 、 ω_2 分别为传输效率 η 和均匀度 U 的评价权重,大小取决于设计需求。

当选取常用的最低均匀度或平均均匀度^[20]作为均匀度的评价函数时,对个体的区分度太低,不仅降低了算法的收敛速度,而且对最终的优化结果也有很大影响,为此,选用均匀度的评价函数为

$$U = \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^J \frac{\omega_{n,j} E_k(x_{n,j}, y_{n,j})}{\max(E_k)} \quad (7)$$

$\omega_{n,j}$ 采用如图4所示的门限函数, FV 值越小,表明该个体适应度越高。

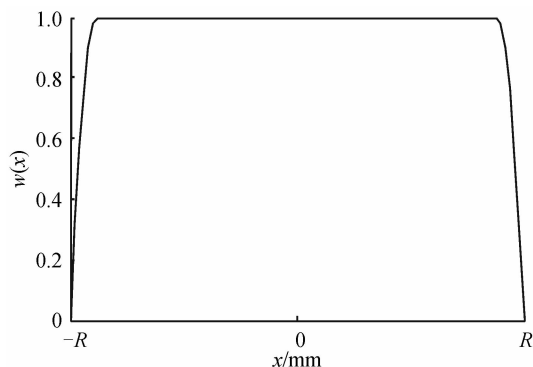


图4 门限函数

Fig. 4 The gate function

3) 遗传操作

i) 选择操作

常用的选择操作中,个体的选取取决于其适应度值,该策略不利于种群多样性,容易陷入局部最优解。首先从大小为 Pop 的种群中产生 Pair 对父代,且 $Pair > Pop$, 其中个体可重复被选中,但不允许同一父代中的两个个体相同,然后以每对父代中两个个体的基因差异及适应度值求得其选取概率,降序排列并选取前 Pop-1 对进行后续操作。另一个体通过精英保存策略获得,即父代中适应度最高的个体不进行任何操作,直接作为子代的一个个体,这样有利于提高种群的基因质量,加快收敛速度。

ii) 交叉和变异操作

交叉和变异操作是获得优良子代的关键,交叉操作作为

$$\begin{cases} Child_1 = \beta_1 \cdot Parent_1 + (1-\beta_1) \cdot Parent_2 \\ Child_2 = \beta_2 \cdot Parent_1 + (1-\beta_2) \cdot Parent_2 \end{cases} \quad (8)$$

式中, $\alpha \in [0, 1]$, $\beta_1, \beta_2 \in [-\alpha, 1+\alpha]$, 通过调整 α 即可使得子代个体有较大概率落于父代个体所在的矩体之外,且之间的距离也比父代大,提高了算法的鲁棒性和全局搜索能力。

变异概率不易选取过大,否则容易破坏优良基因,一般取基因长度的倒数。而变异空间则自适应调整,以使得进化初期群体基因更具多样性,后期则具有较高的局部微调能力,以提高收敛速度。变异空间与进化代数的关系表示为

$$\delta\Omega = \Omega \cdot \Gamma^{[1-g/Gen_{max}]} \quad (9)$$

式中, Ω 为搜索空间, g 、 Gen_{max} 分别为当前进化代数和最大进化代数。

4) 遗传算法的初始化

当种群数和进化代数较少时,初始种群的生成策略对遗传算法的收敛速度和优化结果具有很大影响。初始种群中包含传统点光源近似设计方法采用的参数组,即光强 $I(\theta)$ 为余弦函数,系统原点为扩展光源中心,尺寸因子为 1,其余个体则以随机的方法产生,使得该优化方法的应用更具普遍性。

5) 进化终止条件

遗传算法进化过程的终止条件有两种形式:阈值终止和最大进化代数终止。本文设定当满足以下条件之一时优化结束

- ① 个体适应度最小值小于阈值 FV_{min} ;
- ② 连续 Gen_{equal} 代适应度变化值小于阈值 FV_{equal} ;
- ③ 进化代数等于最大优化代数 Gen_{max} 。

终止条件表示为

$$\begin{cases} FV_{min}^g \leq FV_{min} & \text{或} \\ |FV_{min}^{g'} - FV_{min}^g| \leq FV_{equal} \text{ 且 } g' - g \geq Gen_{equal} & \text{或} \\ g \geq Gen_{max} \end{cases} \quad (10)$$

式中, FV_{\min}^g 、 $FV_{\min}^{g'}$ 表示进化 g 代和 g' 代后个体适应度最小值。

具体优化流程如图 5。

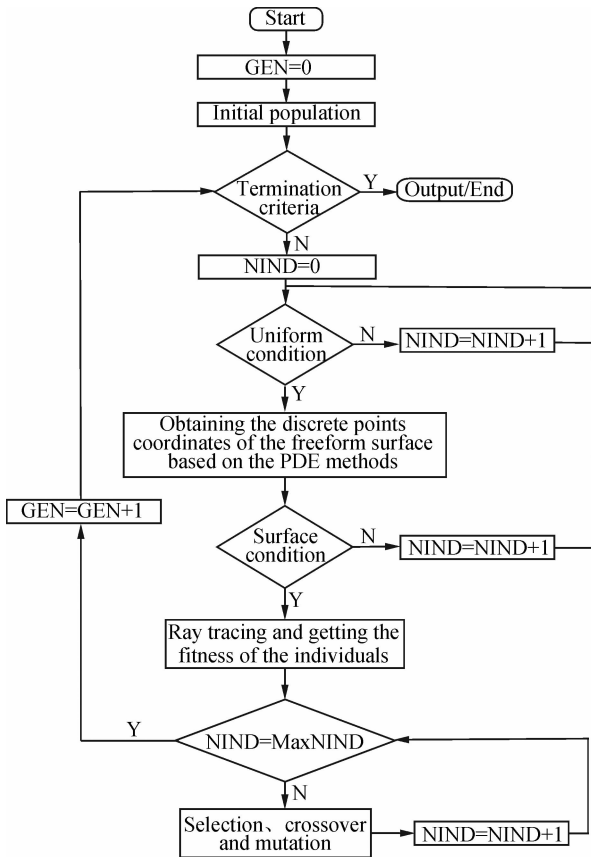


图 5 优化算法流程

Fig. 5 The flow chart of the optimization method

由于种群生成具有很强的随机性,种群中必然存在大量使式(3)具有实际物理意义的个体.无效的曲面结构在光线追迹等后续优化过程中会耗费大量不必要的时间和资源,降低算法的收敛速度和设计效率.为此,本文在传统遗传算法的基础上,提出均匀条件和曲面条件对无效个体进行预淘汰,以提高算法优化效率。

均匀条件:作为式(3)所求解为实数的必要条件,目标面上任一微面由光源直射产生的照度必然不大于平均照度,即

$$\frac{2\pi\gamma \int_{\theta_0}^{\theta_1} I_{\theta} \sin \theta d\theta + 2\pi \int_0^{\arctan |R/l|} I_{\theta} \sin \theta d\theta}{\pi r^2} \geq E \quad (11)$$

曲面条件:所求得的曲面型值点坐标应为实数,且反光杯轮廓线应为凸函数型,即

$$\text{isreal}(x_i, z_i) = 1 \text{ 且 } \frac{z_{i-1} - z_i}{x_{i-1} - x_i} \geq \frac{z_i - z_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} \quad (12)$$

2 仿真实验及分析

系统设计要求为:光源采用直径为 30 mm 的朗伯圆盘状光源,需要在发散半角为 10° 区域内实现均匀照明,且反光杯表面反射率为 97%,口径不大于 300 mm,

收光角范围为 $30^\circ \sim 90^\circ$. 设计该反光杯系统,使得目标面照度均匀度在 85% 以上,系统传输效率为 70% 左右。

根据优化方法,以虚拟点光源辐射分布拟合系数 a_i ($i \in [0, m]$, 本文取 $m=10$)、原点位置偏移量 Δ 和尺寸缩放因子 κ 共 13 个参数作为优化变量进行曲面设计.同时,根据系统设计要求,以传统设计方法,即光强分布函数为 $\cos(\theta)$, 偏移量 Δ 为 0, 尺寸缩放因子 κ 为 1, 设计所需曲面并进行仿真对比实验.种群大小设置为 80, 优化代数为 10。

优化过程共耗时 4.78 h, 完成时得到偏移量 Δ 为 8.94 mm, 尺寸缩放因子 κ 为 1.21, 虚拟点光源辐射分布函数与余弦函数对比结果如图 6。

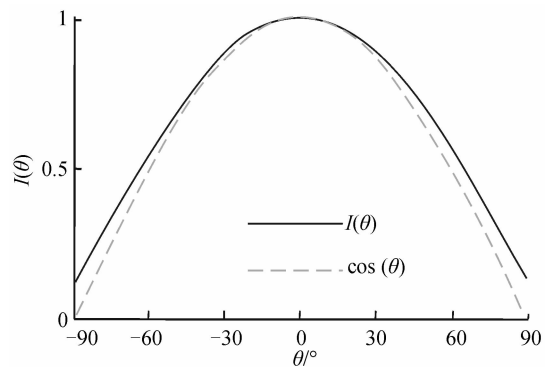


图 6 光源辐射分布函数

Fig. 6 The distribution function of source radiation

从图 6 中可以看出,优化后的虚拟点光源辐射分布不再满足朗伯余弦定律,辐射能在非中心角度区域内的分布有明显提高,且由于光源位置偏移量的存在使得辐射分布函数并不具有类似余弦函数的轴对称性。

图 7(a) 中实线和虚线分别表示采用基于遗传算法的优化设计方法和采用传统点光源近似设计方法得到的反光杯轮廓曲线,图(b)表示两轮廓曲线的差值分布.可以看出,两反光杯的口径及高度均相等,优化方法得到的反光杯轮廓曲线的变化更为剧烈。

为进一步验证设计方法的有效性,将计算所得的两反光杯的曲面型值点坐标数据导入 Pro/E 中构建曲面实体,并在 Trace/Pro 中搭建相应光学系统进行仿真实验,光源采用直径 30 mm 的单面圆盘状朗伯体扩展源,目标接收面直径为 3.5 m, 距离光源 10 m, 共追迹光线 200 万条,仿真结果如图 8。

图 8(a)、(b) 分别对应传统设计方法所得曲面结构和采用优化设计方法所得曲面结构.从图中可以看出,传统设计方法得到的照度分布中心弱,边缘强,系统均匀度及传输效率均与设计需求相差甚远,无法应用于实际系统中;采用优化设计方法后照度分布得到了明显改善,均匀度从 58.3% 提高到 93.5%, 同时,系统传输效率从 61.8% 提高到 72.9%, 均达到了系统设计要 求,较好地实现了对扩展光源辐射空间分布的调控。

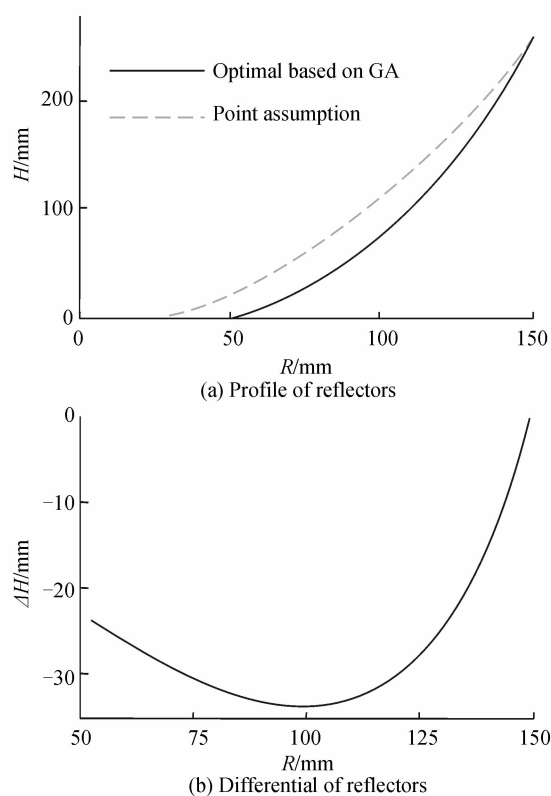


图7 反光杯轮廓曲线及变化量分布

Fig. 7 The profiles of reflector and the differential

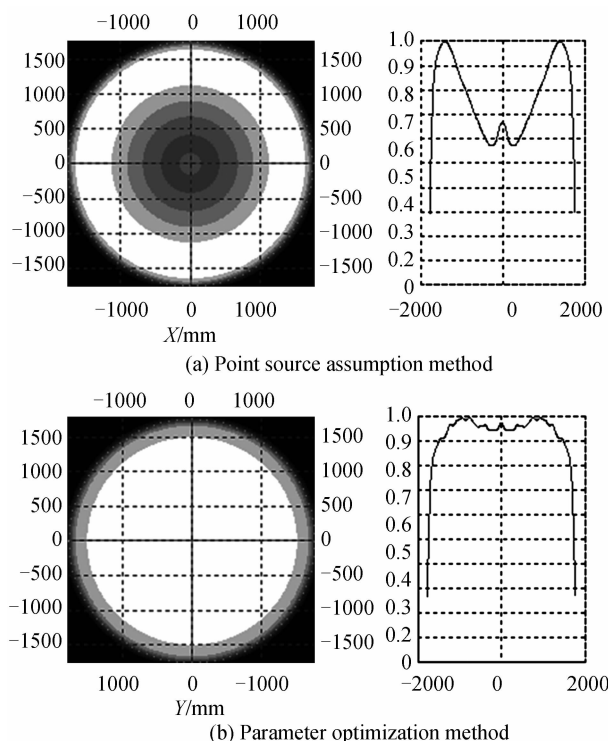


图8 均匀照明系统在距离10 m处仿真结果

Fig. 8 Simulation results at the distance of 10 m

为检验该系统出射光束质量的稳定性,分别对距离5 m和15 m处目标面照度分布进行了仿真实验,结果如图9所示,其目标面照度均匀度分别为90.7%和

92.2%,传输效率分别为73.2%和72.6%。可以看出,当目标面与光源的距离在一定范围内发生变化时,目标面照度均匀度和系统传输效率基本保持稳定,所设计的自由曲面具有很好的实用性。

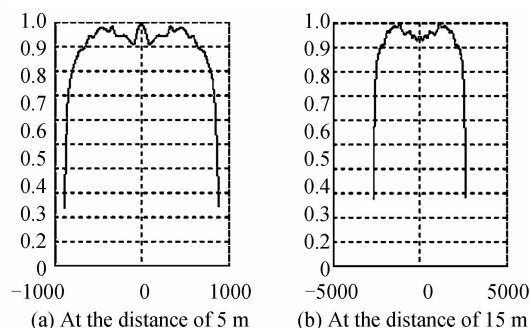


图9 10°均匀照明系统在不同距离处照度分布

Fig. 9 Simulated irradiance distribution at varying distances for cone angle of 10°

3 结论

本文基于遗传算法提出了一种扩展光源自由曲面优化设计方法,该方法引入虚拟点光源的光强分布函数、原点偏移量及尺寸因子等参数作为优化对象,增加了曲面设计自由度,使得以点光源方法求得适用于扩展光源的光学曲面成为可能,并通过仿真实验证明了该设计方法所得曲面的优良性能。同时,在设计过程中由于无需考虑实际光源的分布特性,降低了设计复杂度,也为辐射分布非均匀的特种光源提供了实际应用空间。

参考文献

- [1] FANG F Z, ZHANG X D, WECKENMANN A, *et al.* Manufacturing and measurement of freeform optics[J]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2013, **62**(2): 823-846.
- [2] WANG Yong-tian. Design and application of free-curved surface optical system [J]. *Optics and Optoelectronic Technology*, 2012, **10**(3): 13-26.
王涌天. 自由曲面光学系统设计及其应用[J]. *光学与光电技术*, 2012, **10**(3): 13-26.
- [3] LI Lin, WANG Guang-zhen, LIN Yan-dan. Lens design for uniform illumination with LED[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 248-254.
李林,王光珍,王丽莉,等. 实现均匀照明的LED系统设计方法[J]. *光学学报*, 2012, **32**(2): 248-254.
- [4] LIU Zheng-quan, SUN Yao-jie, LIN Yan-dan. Freeform reflector design for rectangular illuminance distribution based on differential geometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(10): 244-248.
刘正权,孙耀杰,林燕丹. 基于微分几何的矩形照度分布自由曲面反射器设计[J]. *光学学报*, 2012, **32**(10): 244-248.
- [5] LIU Z J, LIU P, YU F H. Parametric optimization method for the design of high-efficiency free-form illumination system with a LED source [J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, **10**(11): 112201.
- [6] YANG Bo, LIU Yi-chao, WANG Yong-tian. Automatic design and optimization of segmented free form reflector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8): 970-973.

- 杨波,刘一超,王涌天.多曲面反射体的计算机辅助设计及优化[J].光子学报,2004,**33**(8):970-973.
- [7] LUO Xiao-xia, LIU Hua, LU Zhen-wu, *et al.* Automated optimization of free-form surface lens for LED collimation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(9):71-75.
罗晓霞,刘华,卢振武,等.实现LED准直照明的优化设计[J].光子学报,2011,**40**(9):71-75.
- [8] LAI Wei, CHEN Wei-min, LIU Xian-ming. Optimization of illuminance distribution of object plane in the freeform optical system design[J]. *Zhaoming Gongcheng Xuebao*, 2011, **22**(6): 87-92.
赖伟,陈伟民,刘显明,等.自由曲面光学系统设计中目标面照度分布的优化[J].照明工程学报,2011,**22**(6):87-92.
- [9] CHEN E G, LIU P, YU F H, Optimization design of single freeform lens based illumination system for CF-LCoS handheld pico-projectors[J/OL]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, **124**(14):1912-1916.
- [10] LI Deng-gao, YIN Song-feng, LING Yong-shun, *et al.* An algorithm for ray tracing based on the sub-surface splicing[J/OL]. *Acta Photonica Sinica*, (2013-12-10)[2014-02-21].
李登高,殷松峰,凌永顺,等.一种基于子面拼接的光线追迹算法[J/OL].光子学报,(2013-12-10)[2014-02-21].
- [11] RABL A, GORDON J M. Reflector design for illumination with extended sources: the basic solutions [J]. *Applied Optics*, 1994, **33**(25):6012-6021.
- [12] DING Yi, ZHENG Zhen-rong, GU Pei-fu. Freeform lens design for LED illumination[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(6):180-184.
- 丁毅,郑臻荣,顾培夫.实现LED照明的自由曲面透镜设计[J].光子学报,2009,**38**(6):180-184.
- [13] GORDON J M, RABL A. Reflectors for uniform far-field irradiance: fundamental limits and example of an axisymmetric solution[J]. *Applied Optics*, 1998, **37**(1): 44-47.
- [14] BORTZ J, SHATZ N. Relationships between the generalized functional method and other methods of nonimaging optical design[J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(10):1488-1500.
- [15] FLORIAN R, FOURNIER, WILLIAM J, CASSARLY, *et al.* Optimization of single reflectors for extended sources [J]. *Illumination Optics*, 2008, **7103**(01):1-10.
- [16] 李敏强,寇纪淞,林丹,等.遗传算法的基本理论与应用[M].北京:科学出版社,2002,163-253.
- [17] TSAI C M, FANG Y C. Advances in optical design and optimization of miniature zoom optics with liquid lens element [C]//Photonics Asia. International Society for Optics and Photonics, 2012: 85570S-85570 S-10.
- [18] KIM Y S, CHOI A S, JEONG J W. Applying micro genetic algorithm to numerical model for luminous intensity distribution of planar prism LED luminaire [J]. *Optics Communications*, 2013, **293**: 22-30.
- [19] CHEN C C, TSAI C M, FANG Y C. Optical design of LCOS optical engine and optimization with genetic algorithm[J]. *Journal of Display Technology*, 2009, **5**(8): 293-305.
- [20] 北京照明学会照明设计专业委员会.照明设计手册(第二版)[M].北京:中国电力出版社,2006,1-34.