

doi: 10.3788/gzxb20144304.0422001

用于扩展光源均匀照明的自由曲面反馈设计

李登高, 殷松峰, 凌永顺, 杨华, 解震, 吴晓迪

(电子工程学院 红外与低温等离子体安徽省重点实验室; 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 合肥 230037)

摘 要: 为克服点光源近似条件下设计得到的自由曲面应用于扩展光源系统时均匀度降低的缺点, 基于偏微分方程法提出了一种反馈优化算法. 建立了扩展光源辐射模型, 在点光源近似条件下求解偏微分方程数值解得到初始曲面结构; 讨论了光线传输方向经过轴线时该初始结构在应用于扩展光源均匀照明系统时的不足. 提出以初始仿真结果中目标面上的照度分布作为反馈, 通过重构目标面划分来实现曲面二次优化设计的方法, 并利用 TracePro 进行了光线追迹仿真实验. 模拟计算了 500 万条光线、直径 3 cm 的扩展光源在距离 30 m、直径 10 m 的照明区域内的照度分布, 发现优化前后目标面上照度均匀度从 60% 提高到 90% 以上, 证明了该反馈算法能够有效提高目标面上照度均匀性, 对提高实际光学系统的照明效果具有一定的指导意义.

关键词: 自由曲面; 均匀照明; 优化设计; 扩展光源; 非成像光学; 均匀度; 偏微分方程; TracePro 仿真

中图分类号: TN94

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)04-0422001-6

A Feedback Design Method of Freeform Reflector for Uniform Illumination with Extended Sources

LI Deng-gao, YIN Song-feng, LING Yong-shun, YANG Hua, XIE Zhen, WU Xiao-di

(Key Laboratory of Infrared and Low Temperature Plasma of Anhui Province, State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: To overcome the disadvantage of the system uniformity reduction when a freeform surface constructed on the point source assumption is applied to the extended sources systems, a new feedback optimization algorithm based on the partial differential equation was proposed. Based on the point approximation, the initial surface structure were obtained through the numerical solution of the partial differential equation under the establishment of the radiation model of the extended light source. Then the shortcoming of the initial surface structure was analyzed when used for uniform illumination with extended sources under the circumstance that the rays transmission direction and the optical axis intersect. Therefore the proposed algorithm re-optimized the reflector to improve the uniformity by renewing the distribution of the target region, with the illuminance distribution in last simulation experiment as feedback. To illustrate the effectiveness of the proposed method, simulation experiments were carried out with TracePro. An extended light source with the size of 3 cm in diameter was used in experiments, in which total five million rays were computed. The light tracing experiments show that the uniformity of the object region increases from 60% to more than 90%, which demonstrates that the feedback design method can improve the illumination uniformity of the target surface effectively and provide some theoretical guidance for the improvement of the realistic lighting systems.

Key words: Freeform surfaces; Uniform illumination; Optimization design; Extended sources; Nonimaging optics; Uniformity; Partial differential equation methods; TracePro simulation

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

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_eei@yeah.net

导师(通讯作者): 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: 2013-07-22; 录用日期: 2013-09-05

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

0 引言

基于非成像光学的自由曲面可以实现对光能的新分配,具有体积小、效率高、光型准确可控、设计自由度高等优点,在汽车前照灯、背光照明、道路及室内照明等诸多领域得到愈来愈广泛的应用^[1-6]. 现有的自由曲面光学方法主要有裁剪法(Tailored)^[7-8]、偏微分方程法(Partial Differential Equation, PDE)^[9-10]和同步曲面法(Simultaneous Multiple Surfaces, SMS)^[11-12]. Tailored和PED算法是建立在点光源近似的基础上,不适用于扩展光源;结合边缘光线理论的SMS法可对扩展源的边缘光线进行有效控制,但对两边缘光线之间的非边缘光线缺少有效控制,同时该算法以波前概念为基础,并依赖于Monte Carlo光线追迹,难度和复杂度较大.

因此,基于点光源设计并用于扩展光源系统的曲面优化方法得到愈来愈多的重视,成为自由曲面设计领域的研究热点. 杨波等^[13]利用阻尼最小二乘法对反射器曲面进行优化,有助于解决按照点光源设计得到的反射器在使用扩展光源时光斑的扩散问题. 但该方法需要根据曲面坐标反算出双三次B样条曲面的控制顶点,增加了设计难度和复杂度;罗晓霞等^[14]提出利用ZEMAX的多重组态,通过自定义优化函数对系统进行自动优化,实现了在序列模式下对准直镜的优化设计,可有效提高准直光学系统的能量利用率,却难以对特定形状及均匀照明提供有效优化. 因此,研究简捷、扩展性好的优化算法对于改善扩展光源系统的光束质量具有重要意义,也将极大地促进自由曲面在实际光学系统中的应用.

本文在建立扩展光源辐射简化模型的基础上,通过求解偏微分方程得到初始曲面结构,并以初次仿真结果中目标面上的照度分布作为反馈进行二次设计,通过重构目标面的划分来实现曲面优化,有效改善了目标面照度的均匀性.

1 目标面反馈优化原理

1.1 坐标系及模型建立

辐射式光学系统由光源、反射面(或折射面)和目标面三部分组成,由于扩展光源上的每一点都有光出射,出射方向及光线所携带能量服从一定概率分布,虽然其远场空间光强分布可视为朗伯型,但只能表征整个光源的集体空间概率分布,仍无法确定每点的出射方向和光线能量. 因此,建立类似点光源设计中光源和目标面之间的映射(Mapping)关系,是基于扩展光源光学设计的关键难题.

设辐射源为单面朗伯圆盘状光源,当目标辐照面为圆形时,整个系统具有旋转对称性,可建立如图1所

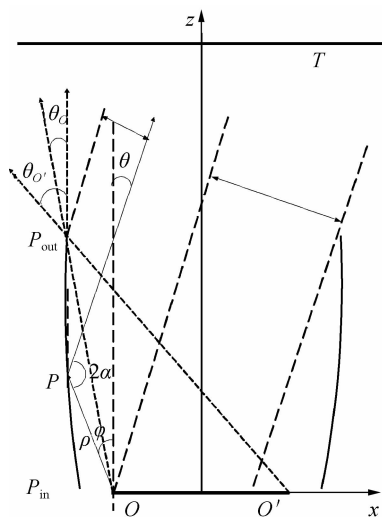


图1 扩展光源反射示意图

Fig. 1 Geometry of reflection for extended sources

示的二维模型,其中 O 和 O' 分别为扩展光源的两个端点, P_{in} 和 P_{out} 分别为反射面入口和出口端点,从 O 点出射的光线经反射面上一点 P 到达目标面 T , O 和 P 两点间的距离为 ρ . φ 和 θ 分别为入射光线和出射光线与轴线的夹角(取顺时针方向为正),入射光线与出射光线的夹角为 2α ,则斯涅耳定律可表示为^[10]

$$2\alpha + \theta = \pi + \varphi \quad (1)$$

当 $\Delta\varphi \rightarrow 0$ 时,得

$$\tan \alpha = d\rho / \rho d\varphi \quad (2)$$

将光源与反射面视为一新“光源”,其在 θ 方向的强度 I_θ 可表示为^[15]

$$I_\theta = \rho \cos^m \varphi \sin(\theta - \varphi) + \rho_0 \cos^m \varphi_0 \sin(\theta - \varphi_0) + s \cos^{m+1} \theta \quad (3)$$

式中 ρ_0 和 φ_0 分别为 OP_{in} 的距离及 OP_{in} 与轴线方向的夹角, s 为光源的长度, m 为光源辐射分布拟合系数,当 $s \rightarrow 0$ 时 $m=0$,模型简化为基于点光源的设计. 以圆形均匀辐射为例,为了使得目标面上照度均匀分布且平均照度为 E_0 ,则

$$E_0 = \frac{I_\theta d\Omega}{dA} = \frac{2\pi I_\theta \sin \theta d\theta}{2\pi l \tan \theta (l / \cos \theta) d\theta} = \frac{I_\theta \cos^2 \theta}{l^2} \quad (4)$$

由式(1)~(4)可建立光线出射角 θ 关于光源辐射方向 φ 与反射角 α 的偏微分方程,当 $m=0$ 时该偏微分方程存在解析解^[15],但由于简化了光源和目标面之间的辐射映射关系,使得应用于朗伯扩展源时无法得到期望光照分布. 当 $m>0$ 时一般可采用差分法方法求得该偏微分方程的数值解.

1.2 光源与目标面初始映射模型

光源辐射与目标面映射可分为两种情况:一是汇聚,即光源的中心辐射对应目标面的中心,边缘辐射对应目标面的边缘;二是发散,光源的中心辐射到达目标面的边缘,而边缘辐射到达目标面的中心. 根据光线是否过系统中心轴,汇聚和发散又分别对应两种情况:1)

光线不经过中心轴,即正、负半轴的光线分别照射到正、负半轴的目标面;2)光线经过中心轴,即正半轴的光线到达负半轴的目标面,负半轴的光线到达正半轴的目标面.图2中(a)、(b)、(c)、(d)分别为汇聚过轴线、发散过轴线、汇聚不过轴线和发散不过轴线四种映射模型示意图.

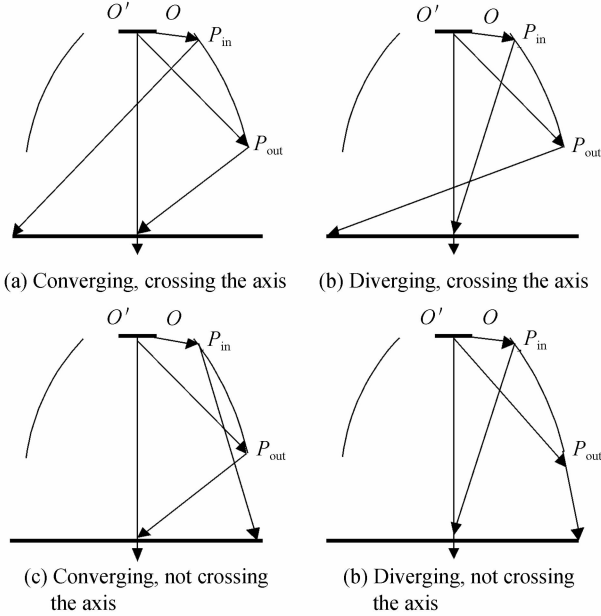


图2 光源辐射与目标面映射模型

Fig. 2 The mapping from source rays to target positions

反射光线经过轴线时,反射面切线与系统中心轴线的夹角相对较小,计算结果显示,图2(a)、(b)情况下反射面的口径及纵向深度相比图2(c)、(d)映射模型最大可减少50%.因此,本文主要分析讨论图2(a)、(b)两种映射模型.

图3和图4为光源辐射与目标面各子区域映射模型.

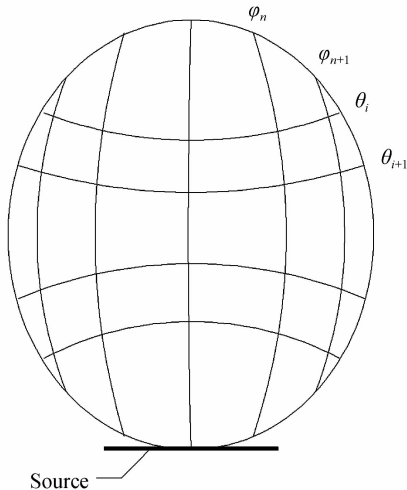


图3 光源辐射空间划分示意图

Fig. 3 The source radiation distribution

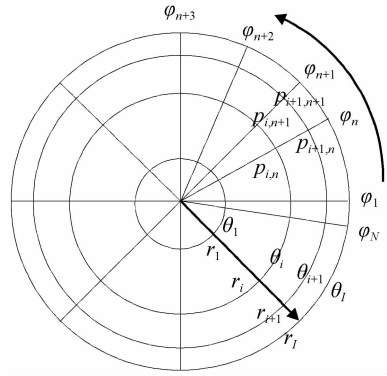


图4 目标面划分示意图

Fig. 4 The target distribution

将光源辐射沿 θ 和 φ 方向各划分为 I 和 N 份,各子立体角内的光通量为直射到达和经反射到达目标面相应区域的辐射量之和.

$$\Phi_k = \int_{\varphi_n}^{\varphi_{n+1}} \int_{\theta_i}^{\theta_{i+1}} I_0 \cos^{m+1} \theta \sin \theta d\theta d\varphi + \int_{\varphi_n}^{\arctan \frac{-r_{i+1}}{l}} \int_{\arctan \frac{-r_i}{l}}^{\arctan \frac{-r_{i+1}}{l}} I_0 \cos^{m+1} \theta \sin \theta d\theta d\varphi = \frac{\int_0^{\theta_i} \int_0^{2\pi} I_0 \cos^{m+1} \theta \sin \theta d\theta d\varphi + \int_0^{\arctan \frac{R}{l}} \int_0^{2\pi} I_0 \cos^{m+1} \theta \sin \theta d\theta d\varphi}{NI} \quad (5)$$

式中, R 为目标面半径, l 为目标面与光源之间的距离,且 $\theta_0 \geq \arctan(R/l)$, $\theta_1 = \pi/2$.

同样,将目标面也划分为相应的 I 和 N 份,且各子区域的面积相等.

$$A_k = \iint_{\Omega'} dA \quad (6)$$

式中, Ω' 表示 $p_{i,n}$ 、 $p_{i+1,n}$ 、 $p_{i+1,n+1}$ 、 $p_{i,n+1}$ 四点所围成的区域.

则在满足式(7)时,即可实现均匀照明设计.

$$E_k = \frac{\Phi_k}{A_k} = E_0 \quad (k=1, 2, \dots, NI) \quad (7)$$

因为整个光学系统具有轴对称性,可设 $\Delta\varphi=C$ (C 为常量),则沿 θ 方向,汇聚和发散两种情况下光源与目标面的映射关系可表示为

$$r_i = - \left\{ \left[\cos^{m+2} \theta_0 - \cos^{m+2} \theta_i + 1 - \cos^{m+2} \left(\arctan \frac{-r_i}{l} \right) \right] / \cos^{m+2} \theta_0 + 1 - \cos^{m+2} \left(\arctan \frac{R}{l} \right) \right\}^{1/2} R \quad (8)$$

$$r_i = - \left\{ 1 - \left[\cos^{m+2} \theta_0 - \cos^{m+2} \theta_i + \cos^{m+2} \left(\arctan \frac{-r_i}{l} \right) - \cos^{m+2} \left(\arctan \frac{R}{l} \right) \right] / \left[\cos^{m+2} \theta_0 + 1 - \cos^{m+2} \left(\arctan \frac{R}{l} \right) \right] \right\}^{1/2} R \quad (9)$$

式(8)和式(9)是 r_i 关于 θ_i 的三角函数方程式,求解即可以得到目标面划分与光源辐射的映射模型.给定初始条件 $P_0(x_0, z_0)$ 及目标面半径 r_i ,建立 ρ 关于光源辐射方向 φ 与目标面径向长度 r_i 的偏微分方程,采

用四阶 Runge-Kutta 方法即可求得反射面各型值点坐标. 图 5 为 $m=0$ 时所求曲面坐标数据导入 Pro/E 建立的实体曲面模型.

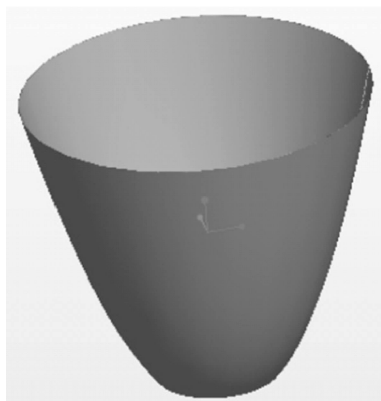


图 5 Pro/E 中建立的实体曲面模型

Fig. 5 The entity reflector constructed in Pro/E

当 $m=0$ 时, 图 2(a) 和图 2(b) 两种映射模型下基于点光源的仿真结果见图 6(a) 和 (b).

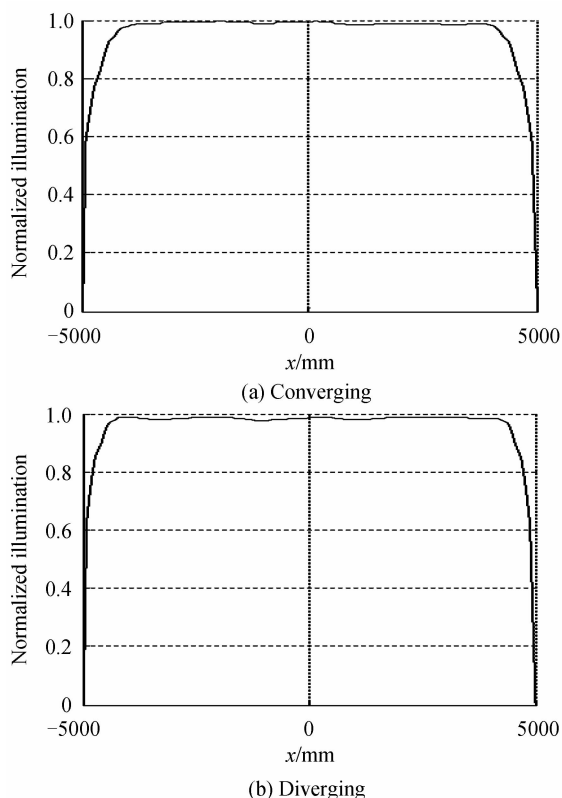


图 6 汇聚、发散映射模型点光源仿真照度剖面图

Fig. 6 The illumination profile of the point light source

仿真中光源采用直径 0.1 mm (可近似视为点光源) 的朗伯体辐射光源, 目标面直径为 10 m, 与光源距离 30 m, 反射面起始点坐标为 (50 mm, 0). 可以看出, 汇聚和发散两种映射模型都可以较好地实现基于点光源的均匀照明.

图 7 是将点光源替换为直径 3 cm 单面圆盘状朗伯体扩展源时仿真得到的目标面上照度分布剖面图,

(a)、(b) 两幅图分别对应汇聚、发散映射模型. 从图 7 中可以看出, 汇聚映射模型下, 目标面上照度分布内部区域明显高于外沿, 且在中心有所下降, 形成一较小尺寸的暗斑; 发散模型下, 中心弱, 边缘强, 目标中心可明显看到一暗斑. 两种模型的均匀度均低于 60%, 产生恶化的主要原因是将光源视为朗伯体辐射点源进行能量的分配. 以扩展源的不同位置为基准建立模型仅改变光学系统的能量利用率及凹陷中心位置, 而不能消除不均匀分布. 当以扩展光源的中心为基准时, 所得系统能量利用率最高, 这也是由圆形区域照明系统的轴对称性所决定的.

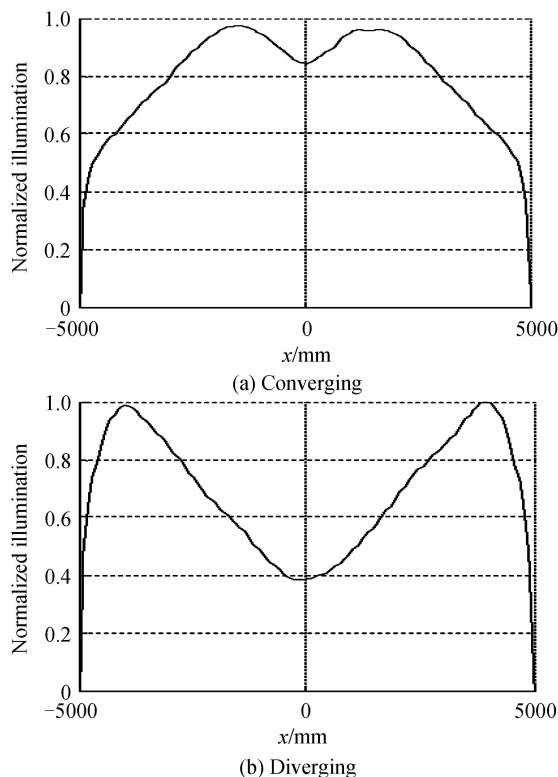


图 7 直径 3 cm 光源仿真照度剖面图

Fig. 7 The illumination profile of the extended source with the size of 3 cm in diameter

1.3 目标面反馈优化

通过 TracePro 仿真可得到光线到达目标面区域的各采样点坐标 (x_j, y_j) 及光线本身所携带的能量 $c_j (j=1, 2, \dots, J)$, J 为追踪光线总数 500 万条. 因此只要将目标面各子区域光线能量权重进行一定数值处理, 即为该子区域面积的反馈系数. 为了消除仿真中误差的影响, 需要对原始反馈数据进行预处理. 首先, 针对圆形区域均匀照明轴对称的优势, 将相同 θ 角对应的子区域进行合并, 即 $r_j = -\sqrt{x_j^2 + y_j^2}$, 由此可得到一组关于 θ 的离散值. 由式 (8) 和式 (9) 反推来确定各采样点与 θ 对应关系为

$$\theta_i < \theta_j = \arccos \left\{ \cos^{m+2} \theta_0 + 1 - \cos^{m+2} \left(\arctan \frac{-r_i}{l} \right) \right\}$$

$$\frac{r_i^2}{r_l^2} \left[\cos^{m+2} \theta_0 + 1 - \cos^{m+2} \left(\arctan \frac{-r_l}{l} \right) \right]^{\frac{1}{m+2}} < \theta_{i+1} \quad (10)$$

$$\theta_i < \theta_j = \arccos \left\{ \cos^{m+2} \theta_0 + \cos^{m+2} \left(\arctan \frac{-r_l}{l} \right) - \cos^{m+2} \left(\arctan \frac{-r_l}{l} \right) - \frac{r_l^2 - r_i^2}{r_l^2} \left[\cos^{m+2} \theta_0 + 1 - \cos^{m+2} \left(\arctan \frac{-r_l}{l} \right) \right]^{\frac{1}{m+2}} \right\} < \theta_{i+1} \quad (11)$$

由于追迹光线总数不可能无限增多,使得部分子区域没有光线到达,若以这些离散值进行面积调整将会导致光斑恶化甚至使得反射面发生畸变.因此,对所得离散值进行拟合,得到关于 θ 的一维反馈函数.确定各样本在目标面上的分布后,即可得到各子区域内的能量权重 C_i ,此时两种映射模型具有统一的重构目标面划分表示式为

$$r'_i = -\sqrt{r_{i-1}'^2 + (r_i^2 - r_{i-1}^2) \times \left(\frac{C_i}{\bar{C}} \right)^g \times \frac{1}{M}} \quad (12)$$

式中, $\bar{C} = \sum_{k=1}^N C_k / N$, g 为反馈调制深度,其取值与光源尺寸、发散角及反射面口径、深度有关. M 为目标面面积扩散调制比,以使得优化前后目标面的总面积保持不变, $M = \sum_{i=1}^N (C_i / \bar{C})^g A_i / \sum_{i=1}^N A_i$.

多次反馈优化的过程与一次优化类似,但相比而言,一次优化中采样点与 θ 对应关系可由式(10)、(11)求出,而不需要遍历搜索来确定,节约大量的运算时间,且一般通过调整反馈调制深度 g 即可实现较好优化效果.因此,本文主要对一次反馈优化进行讨论.

反馈优化后汇聚、发散两种映射模型的目标面照度分布分别如图8,两种映射模型经反馈优化后都可以较好地实现用于扩展光源系统的均匀照明,目标面上整体均匀度达到90%以上,较优化前有明显提高,证明了本算法的可行性和有效性.

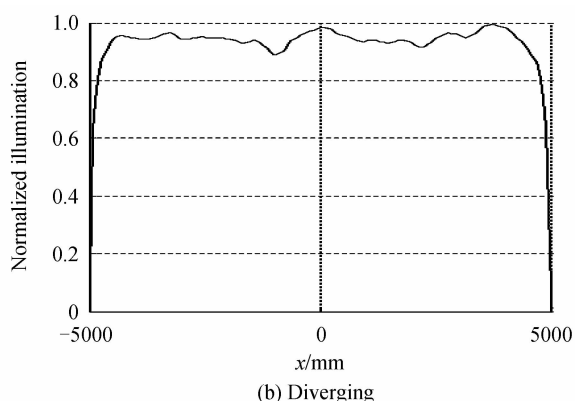
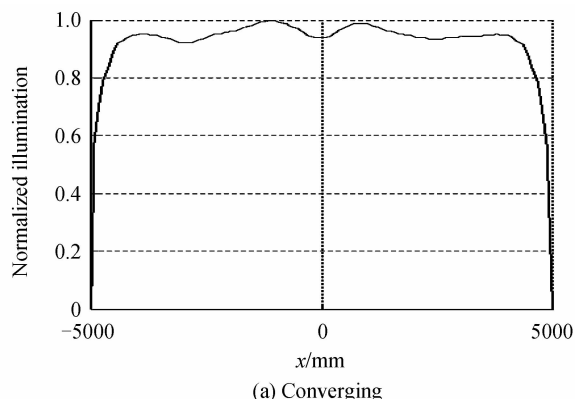


图8 反馈优化后目标面照度剖面图

Fig.8 The illumination profile of the extended light source after feedback optimization

2 结论

在建立扩展光源辐射简化模型的基础上,通过求解偏微分方程得到初始曲面结构,讨论了光线传输方向经过轴线的情况下,汇聚和发散两种映射模型在应用于扩展光源均匀照明系统时存在的问题,并以此提出以初次仿真结果中目标面上的照度分布作为反馈进行二次设计,通过重构目标面的划分来实现曲面优化,有效改善了目标面照度的均匀性.TracePro光线追迹仿真实验表明,优化前后目标面上整体均匀度从不足60%提高到90%,证明了本文反馈优化算法具有较高的可行性和有效性,对于改善实际光学系统照明效果也提供了一定的理论指导和参考依据.

参考文献

- [1] WANG Yong-tian. Design and application of free-curved surface optical system [J]. *Optics and Optoelectronic Technology*, 2012(3): 18-21.
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(3):18-21.
- [2] LAN Ming-qiang, WANG Min, CHEN Xue-mei. High evenness and low glare LED lamp light distribution design and simulation analysis[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(3): 40-44.
兰明强,王敏,陈雪梅.高均匀低眩光LED台灯配光设计及仿真分析[J].*光子学报*,2013,42(3):40-44.
- [3] WANG Hong, ZHANG Xiao-fan, WANG Hai-hong, et al. Design for optical freeform reflector of LED streetlight[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(4): 153-157.
王洪,张小凡,王海宏,等.自由曲面LED路灯反射器设计[J].*红外与激光工程*,2010,39(4):153-157.
- [4] WU Reng-mao, TU Da-wei, HUANG Zhi-hua, et al. A light distribution proposal for dedigning LED dipped headlight[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(11): 2904-2908.
吴仍茂,屠大维,黄志华,等.一种LED汽车前照近光灯配光设计方案[J].*光子学报*,2009, 38(11):2904-2908.

- [5] LIN Yuan, ZHOU Li, SONG Xian-jie. Optical design of auto freeform reflector[J]. *Zhaoming Gongcheng Xuebao*, 2005(1): 30-33.
林渊,周莉,宋贤杰. 汽车自由曲面反射器光学设计[J]. 照明工程学报, 2005(1):30-33.
- [6] LIU Zheng-quan, SUN Yao-jie, LIN Yan-dan. Research on software for freeform reflector design based on LED[J]. *Zhaoming Gongcheng Xuebao*, 2012(4): 64-68.
刘正权,孙耀杰,林燕丹. 基于LED的自由曲面反射器设计软件研究[J]. 照明工程学报, 2012(4):64-68.
- [7] RIES H, MUSCHAWECK J. Tailored freeform optical surfaces[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2002, **19**(3): 590-595.
- [8] JENKINS D, WINSTON R. Tailored reflectors for illumination[J]. *Applied Optics*, 1996, **35**(10): 1669-1672.
- [9] 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(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(10):244-248.
- [10] DING Yi, GU Pei-fu, LU Wei, *et al.* Using numerical solutions of differential equations to form free reflector[J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2007(9): 90-92.
丁毅,顾培夫,陆巍,等. 利用微分方程数值解构造自由曲面反射器[J]. 浙江大学学报(工学版), 2007(9):90-92.
- [11] GRABOVICKIC D, BENITEZ P, MINANO J C. TIR RXI collimator[J]. *Optics Express*, 2012(20): A51-A61.
- [12] GRABOVICKIC D, MINANO J C, BENITEZ P. Free-form V-groove reflector design with the SMS method in three dimensions[J]. *Optics Express*, 2011(19): A747-A756.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] RABL A, GORDON J M. Reflector design for illumination with extended sources: the basic solutions[J]. *Applied Optics*, 1994, **33**(25): 6012-6021.