

LED 自由曲面匀光透镜的局部优化设计方法

郝剑^{1,2} 刘华^{1*} 王尧¹ 孙强¹ 荆雷¹ 王鹤¹¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光电技术研发中心, 吉林 长春 130033² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 从非成像光学理论出发,提出了一种新的实现自由曲面透镜的局部优化设计方法。初始模型采用规则的二次曲线代替自由曲线,通过对 TracePro 软件中的 Scheme 编程语言和优化引擎的结合使用,对匀光透镜进行局部优化设计,最终实现了 LED 均匀照明。结果表明:当光源为 1 mm×1 mm 朗伯体发光的 LED 时,可以在 1 m 处实现发散角为±15°内的均匀照明,光能利用率达到 80.89%,均匀性达到 95%以上。与目前通用的全局优化方法相比较,在视场角和均匀性方面有明显的改善。此方法还有过程简单、对初始模型要求较低和通用性好等特点。

关键词 光学设计; 匀光照明; 非成像光学; 局部优化

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP50.072202

Local Optimization of Freeform Surface Lens for Uniform Illumination of LED

Hao Jian^{1,2} Liu Hua¹ Wang Yao¹ Sun Qiang¹ Jing Lei¹ Wang He¹

¹ Opto-Electronics Technology Center, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A local optimization method in the design of freeform surface lens based on non-imaging optics to achieve uniform illumination for LED source is proposed. In this design, the regular quadratic curve is adopted to replace the freeform curve of initial model, and the Scheme programming language and the optimization engine in the TracePro software are used in combination. In this way, a uniform illumination of LED is achieved. A Lambert emission of 1 mm×1 mm LED is used as simulation source. It is shown that the illumination efficiency of 80.89% and the uniformity of 95% within a field of view of ±15° are achieved at the target surface 1 m away from the source. Compared with the current global optimization method, the field-of-view and the illumination uniformity are improved significantly by this technique. It also possesses advantages of simplicity in process, less reliability requirement on initial model, and good versatility.

Key words optical design; uniform illumination; non-imaging optics; local optimization

OCIS codes 220.4298; 230.3670; 220.2945

1 引言

随着 LED 在照明领域应用的快速发展,LED 均匀照明的透镜设计已成为研究热点之一。自由曲面透镜可自由分配光强,可较好地实现均匀照明的效果,但是传统的将扩展光源视为点光源的设计方法不满足小尺寸透镜的设计情形^[1-3],因此发展了自由曲面匀光透镜的优化设计方法。目前自由曲面的优化方法有三

收稿日期: 2013-04-02; 收到修改稿日期: 2013-04-06; 网络出版日期: 2013-05-31

基金项目: 国家 973 计划(2012C13227101)和中国科学院三期创新工程

作者简介: 郝剑(1988—),女,硕士研究生,主要从事非成像光学设计方面的研究。

E-mail: haojianjeneciome8@163.com

导师简介: 孙强(1971—),男,博士,研究员,主要从事衍射光学、红外光学、光学系统设计、非成像光学和光学检测等方面的研究。E-mail: sunq@ciomp.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: liuhua_rain@yahoo.com.cn

种:Luo等^[4]基于反馈函数的建立及多次修改,实现对模型的优化;Chen等^[5]基于对Matlab软件和光学软件的交互式使用,实现对透镜的优化;Luo等^[6-7]在Zemax软件中通过建立反馈函数和优化函数,实现对模型的优化。这三种方法共同的特点是:初始模型均需计算自由曲面、优化前均需建立反馈函数或是优化算法、模拟时至少需要两种软件协同作用。更重要的一点是:三种方法均是全局优化的方法,对优化效果有一定的局限性。例如文献[6]设计的一款匀光透镜,达到90%匀光比率的半发散角仅为 $\pm 12^\circ$ 。

本文在TracePro环境下提出一种LED自由曲面匀光透镜的局部优化设计方法,初始模型采用规则的二次曲线,避免了系统对自由曲线的计算^[8-11];结合二次B样条理论和Scheme语言,实现透镜的局部优化设计,避免了多次的全局优化对均匀性的负面影响。最终设计了一款直径为9mm的匀光透镜,半发散角为 $\pm 15^\circ$,在距光源1m处的目标面上其均匀性可达95%以上,满足匀光照明要求。

2 结构与拟合

2.1 光学结构设计

系统设计采用旋转对称式的透镜结构,如图1所示。模型以Z轴为旋转对称轴,并包含两个折射面:面1和面3。面1是已知的二次曲面,面3是待优化的自由曲面。由于本方法对初始模型要求不高,此处将面3也设计为规则的二次曲面,避免了自由曲面的复杂计算。

2.2 局部优化的二次B样条拟合理论

B样条曲线相比于其他的拟合方法具有很好的光滑性、灵活性和紧凑性,它不仅可以准确预测曲线的形状,而且与特征多边形非常接近,便于做局部修改。因此,选用二次B样条的方法对需要优化的二次曲线进行拟合。

拟合过程分两步,首先利用二次B样条的方法,提取出控制点;其次将控制点拟合成二次B样条曲线的形式 $p(t)$,即

$$p_{n-1}(t) = 0.5 \times (b_{n-1} + b_{n+1} - 2 \times b_n) t^2 + (b_n - b_{n-1}) t + 0.5 \times (b_{n-1} + b_n), \quad (1)$$

式中 $0 \leq t \leq 1$; $p(t)$ 是待优化的二次曲线; $p_{n-1}(t)$ 是 $p(t)$ 上第 n 小段二次B样条曲线, $1 \leq n \leq l$, l 是二次B样条曲线的个数,为任意大于等于1的整数; b_{n-1}, b_n, b_{n+1} 是曲线 $p_{n-1}(t)$ 上的3个控制点。由(1)式可知,曲线 $p(t)$ 由 l 段曲线 $p_0(t), p_1(t), \dots, p_{l-1}(t)$ 组成,相邻曲线有两个共同的控制点。

3 优化设计

3.1 局部优化设计方法

首先编写包括LED芯片、透镜、接受屏以及各部分属性在内的Scheme程序。在局部优化之前,先对系统进行一轮全局优化,此时需在Scheme程序中将曲线上所有控制点设置为参量,并对曲线进行整体的优化,选择较好的结果保存并作为局部优化的初始值。

其次针对目标面上照度值较低的部分,考虑到可能影响其均匀性的个别控制点,对模型进行多轮的局部优化,这样不仅便于控制曲线,而且也避免了全局优化对已优化好的曲线的负面影响。

图2为局部优化模型分析图,第 i 条光线经过一次折射后与X轴的夹角为 θ_i ,与第二个折射曲线的交点为 P ,对应照度面的半径为 R_i , θ 为光线经一次折射后与X轴的最大夹角,整个光斑的半径为 R 。则有

$$\theta_i = \frac{\theta}{R} R_i.$$

(2) Fig. 2 Model analysis diagram for the local optimization

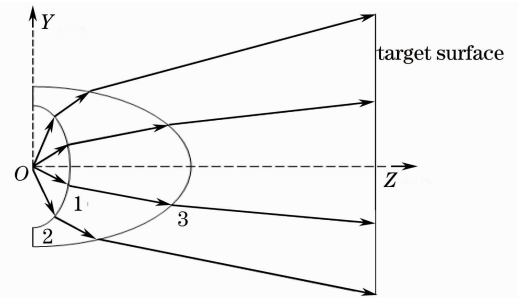


图1 光学结构

Fig. 1 Optica structure

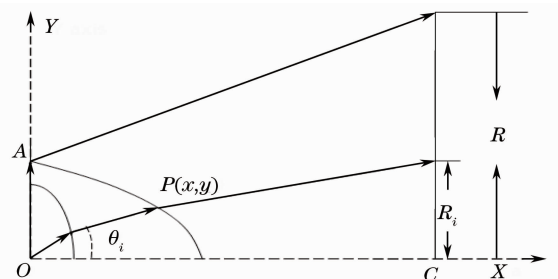


图2 局部优化模型分析图

若半径为 R_i 附近的均匀性较低,则点 P 附近的曲线即是需要重点优化的部分。由 TracePro 软件的界面特性和斜率公式,可大致得出点 P 的位置,倘若点 $P(x, y)$ 在二次 B 样条曲线 $p_{n-1}(t)$ 上,为便于控制曲线,只将曲线 $p_{n-1}(t)$ 的中间控制点 $b_n(x_n, y_n)$ 设置为优化变量。由(1)式可得,与控制点 $b_n(x_n, y_n)$ 相关的二次 B 样条曲线有三条,方程如下

$$\begin{cases} p_{n-2}(t) = 0.5 \times (b_{n-2} + b_n - 2 \times b_{n-1})t^2 + (b_{n-1} - b_{n-2})t + 0.5 \times (b_{n-1} + b_{n-2}) \\ p_{n-1}(t) = 0.5 \times (b_{n-1} + b_{n+1} - 2 \times b_n)t^2 + (b_n - b_{n-1})t + 0.5 \times (b_n + b_{n+1}) \\ p_n(t) = 0.5 \times (b_n + b_{n+2} - 2 \times b_{n+1})t^2 + (b_{n+1} - b_n)t + 0.5 \times (b_{n+1} + b_n) \end{cases}, \quad (3)$$

式中 $b_{n-2}, b_{n-1}, b_n, b_{n+1}, b_{n+2}$ 分别为各曲线对应的控制点。由(3)式可知,若控制点 b_n 发生变化,会引起相关三条曲线面型的变化,进而改变透镜的局部面型,实现局部光线的重新分布,最终达到目标面上均匀照明的效果。

图 3 为具体的优化过程,首先需设置 Scheme 程序和优化引擎,其次进行全局优化,并提取出较好的结果作为全局优化的初始值,最后进行多次的局部优化,直到符合理想的照度分布。

3.2 局部优化的连续性和光滑性

全局优化时,需对所有的控制点进行优化。由于二次 B 样条本身所具有的特点,可确保整体曲线在重新优化拟合的过程中继续保持很好的光滑性和紧凑性。

局部优化时,仅需对局部控制点进行优化。则由(3)式可得

$$\begin{cases} \Delta p_{n-2}(t) = p'_{n-2}(t) - p_{n-2}(t) = 0.5 \times t^2 \times \Delta b_n \\ \Delta p_{n-1}(t) = p'_{n-1}(t) - p_{n-1}(t) = \\ \quad - [(t - 0.5)^2 - 0.75] \times \Delta b_n \\ \Delta p_n(t) = p'_n(t) - p_n(t) = 0.5(t - 1)^2 \times \Delta b_n \end{cases}, \quad (4)$$

式是 $p'_{n-2}(t), p'_{n-1}(t), p'_n(t)$ 分别为优化后的 3 条曲线, $\Delta p_{n-2}(t), \Delta p_{n-1}(t), \Delta p_n(t)$ 分别为各曲线对应点间距离的变化量。 Δb_n 是控制点 b_n 的变化量, Δx_n 是 x_n 的变化量, Δy_n 是 y_n 的变化量,有 $\Delta b_n = \sqrt{\Delta x_n^2 + \Delta y_n^2}$ 。

为避免优化时表面出现凹凸不平的现象,通常设定变量的范围为 $-0.1 \sim 0.1$ 。当 $\Delta x_n, \Delta y_n$ 均取最大正值 0.1 时, $\Delta b_n = \sqrt{0.02}$,各曲线对应点间距离的变化范围为

$$\begin{cases} 0 \leq \Delta p_{n-2}(t) \leq 0.5 \times \sqrt{0.02} \\ 0.5 \times \sqrt{2} \times \sqrt{0.02} \leq \Delta p_{n-1}(t) \leq 0.75 \times \sqrt{0.02} \\ 0 \leq \Delta p_n(t) \leq 0.5 \times \sqrt{0.02} \end{cases} \quad (5)$$

图 4 所示出了曲线对应点间距离的变化。 OA, AC, CD 分别对应初始的 3 条曲线 $p_{n-2}(t), p_{n-1}(t), p_n(t)$; $O'A', A'C', C'D'$ 分别对应优化后的 3 条曲线 $p'_{n-2}(t), p'_{n-1}(t), p'_n(t)$; OO', DD' 为曲线边缘距离的变化量, AA', CC' 为中间曲线与相邻两条曲线连接处距离的变化量, BB' 为中间曲线距离的最大变化量。如图 4(b) 所示, $OO' = DD' = 0, AA' = CC' = 70 \mu\text{m}$,保证了曲线很好的连续性; $BB' \approx 100 \mu\text{m}$,保证了曲线上很好的光滑性。

4 实际应用与结果分析

作为射灯的一种应用,设计了一个匀光透镜,结构参数如表 1 所示。光源为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的 LED 芯片,朗伯发光体。透镜的材料为聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),口径约为 9 mm ,要求在 1 m 处实现 $\pm 15^\circ$ 范围

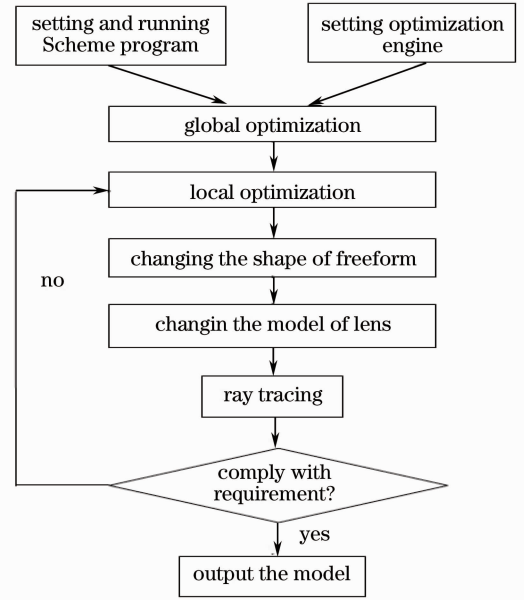


图 3 优化过程流程图

Fig. 3 Flow chart of the optimization process

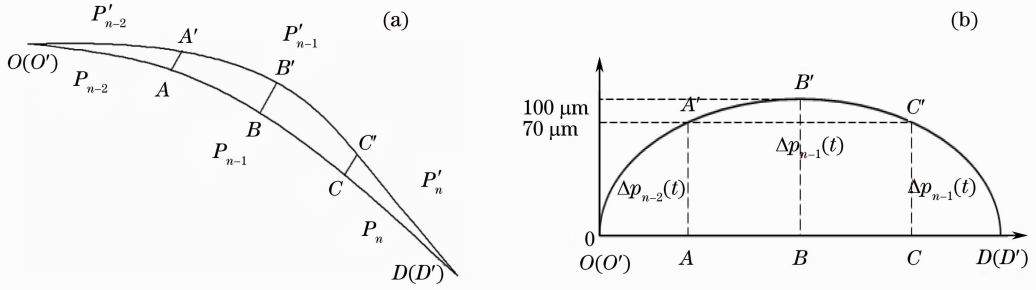


图4 曲线变化前后相对距离变化示意图

Fig. 4 Diagram of relative distance before and after change of the curve

内的均匀照明。照明均匀性的定义为

$$E_{\text{uniform}} = \frac{E_{\text{min}}}{E_{\text{max}}} \times 100\%. \quad (6)$$

表1 光学设计指标

Table 1 Optical design parameters

Parameter	Value
Light source	1 mm×1 mm LED chip
Radiation	Lambertian
Lens aperture /mm	9
Lens height /mm	7
Lens material	PMMA
Long axis of elliptical surface /mm	4
Short axis of elliptical surface /mm	1.4
Field-of-view /($^{\circ}$)	± 15

图5为初始模型的照度分布,追迹光线为 1×10^6 。可以看出,在半径为0.6 m的目标面中央呈现一亮斑,系统的均匀性仅为17%左右,能量利用率仅为75.328%。

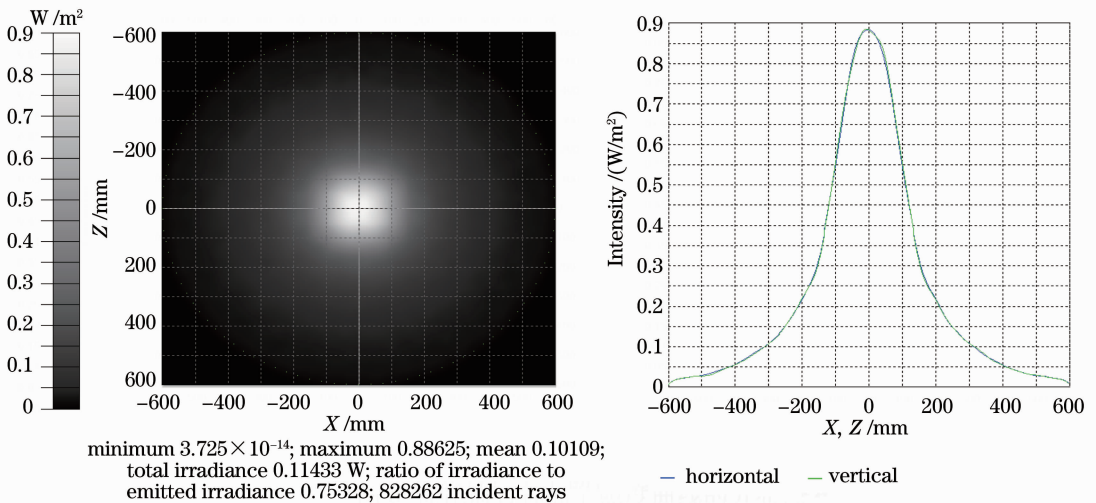


图5 优化前目标面上照度曲线的分布图

Fig. 5 Simulated results before optimization

首先对模型进行全局优化,图6为一轮全局优化后目标面上的照度分布。可以看出,系统的均匀性为72%左右,能量利用率为78.40%。虽然相比于图5目标面的照度分布有所改善,但在半径为0.1 m附近的照度仍较低,边缘部分存在明显的暗环。

为保证已优化好的部分不做大的改变,对照度较低的0.1 m处和较暗的边缘部分进行多轮局部优化,

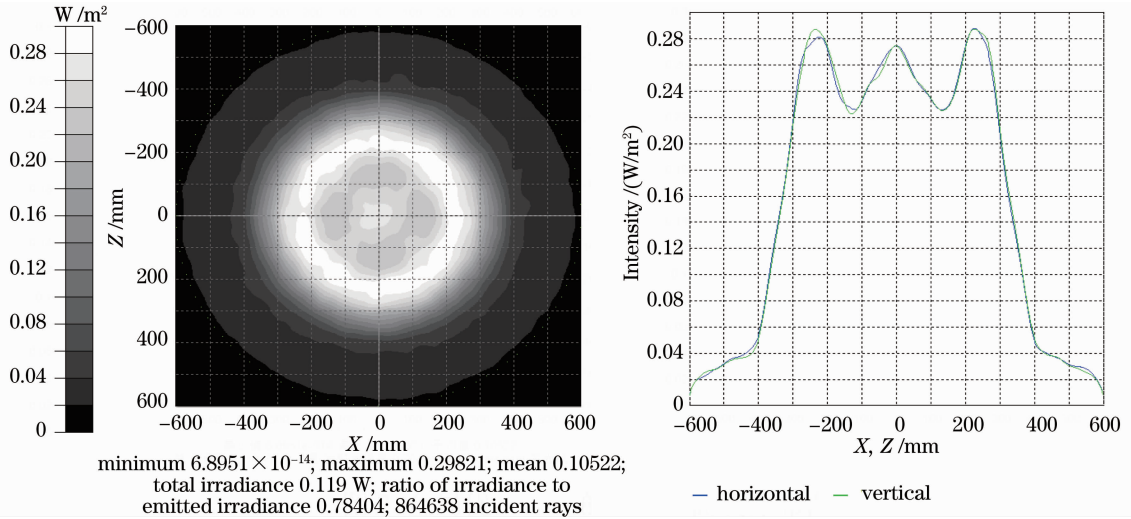


图6 全局优化之后的照度曲线分布图

Fig. 6 Simulated result after a round of global optimization

逐步提升系统的均匀性,直到均匀性达到90%以上。图7为最终的优化结果,可以看出,经多轮局部优化后能量利用率提高到80.89%,在 $\pm 15^\circ$ 视场范围内均匀性达到95%以上。

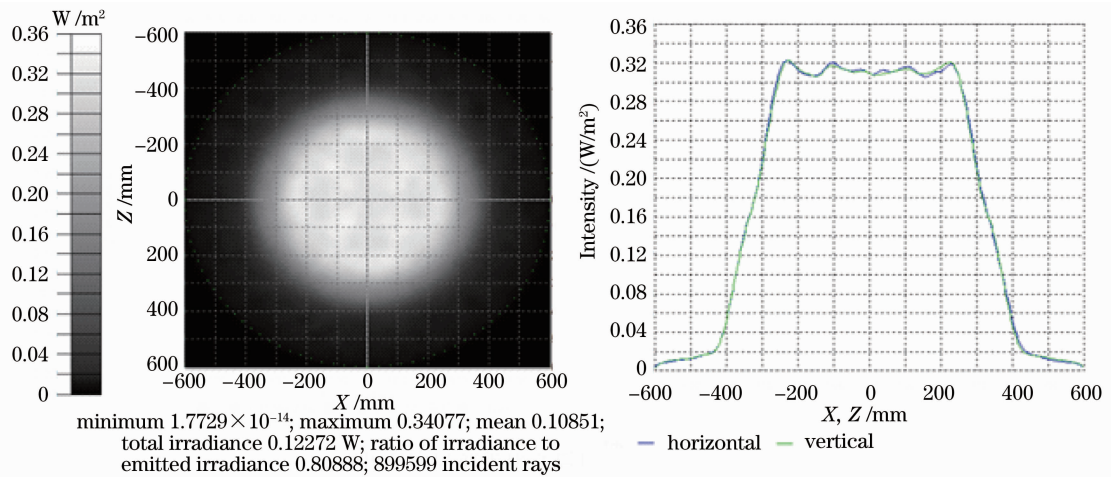


图7 多次局部优化之后目标面上的照度分布

Fig. 7 Simulated result after several rounds of local optimization

作为对比,在图6优化结果的基础上,对模型进行了多轮的全局优化。通过多次更改优化引擎中的目标值,逐渐提升系统的均匀性。图8为多轮全局优化后的照度曲线分布,可以看出,中间相对两边照度值略低,能量利用率为80.61%,在 $\pm 15^\circ$ 视场范围内均匀性为91%左右。对比图7和图8可以看出,本文提出的匀光照明透镜的局部优化设计更具优势。

文献[6]给出了一款LED匀光透镜设计,采用全局优化的方法,在半发散角为 $\pm 12^\circ$ 的范围内均匀照度比率为90%。而本文所设计的匀光透镜,在半发散角为 $\pm 15^\circ$ 的范围内均匀照明比率可达到95%以上,有了很大的改善。

5 结论

基于非成像光学理论提出了一种新的自由曲面透镜的局部优化设计方法。在TracePro环境下通过对二次B样条、Scheme语言和和优化引擎的结合使用,对自由曲面透镜进行优化设计。最终在距光源1 m处,实现了半发散角为 $\pm 15^\circ$ 内的均匀照明,均匀性和光能利用率分别达到95%以上和80%以上。在LED匀光透镜的设计中,该方法与现行的全局优化方法相比较,具有明显的优势,并且设计中对初始模型的要求较低。

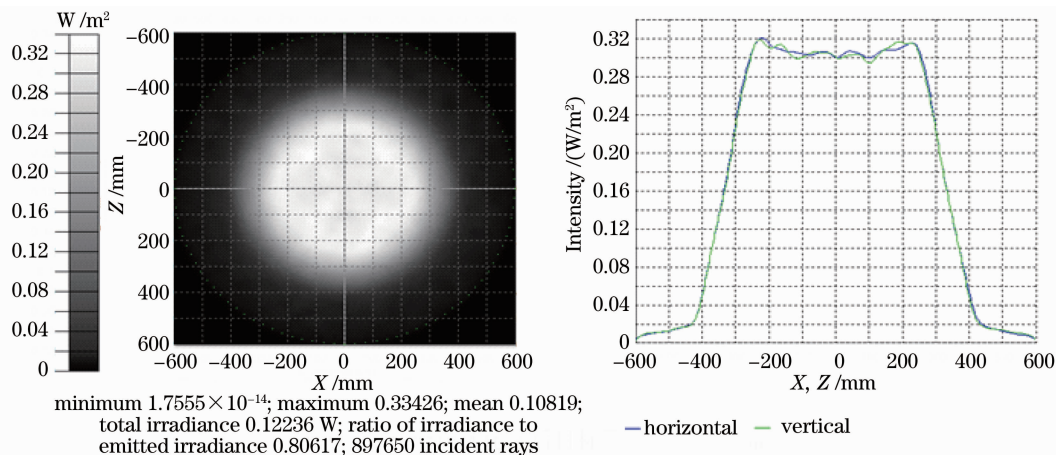


图 8 多次全局优化之后目标面上的照度分布

Fig. 8 Simulated result after several rounds of global optimization

参 考 文 献

- 1 Yi Ding, Xu, Liu, Zhen-Rong Zheng, *et al.*. Freeform LED lens for uniform illumination[J]. Opt Express, 2008, 16(17): 12958–12966.
- 2 Li Lin, Wang Guangzhen, Wang Lili, *et al.*. Lens design for uniform illumination with LED[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0222002.
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): 0222002.
- 3 Florian R Fournier, William J Cassarly, Jannick P Rolland. Fast freeform reflector generation using source-target maps[J]. Opt Express, 2010, 18(5): 5295–5304.
- 4 Yi Luo, Ze-Xin Feng, Yan-Jun Han, *et al.*. Design of compact and smooth free-form optical system with uniform illuminance for LED source[J]. Opt Express, 2010, 18(9): 9055–9063.
- 5 Enguo Chen, Fei-Hong Yu. Design of an elliptic spot illumination system in LED-based color filter-liquid-crystal-on-silicon pico projectors for mobile embedded projection[J]. Appl Opt, 2012, 51(16): 3162–3170.
- 6 Xiao-Xia Luo, Hua Liu, Zhen-Wu Lu, *et al.*. Automated optimization of an aspheric light-emitting diode lens for uniform illumination[J]. Appl Opt, 2011, 50(20): 3412–3418.
- 7 Nicola Coluccelli. Modeling of laser diode stacks using Zemax: simulation, optimization, and experimental validation[J]. Appl Opt, 2010, 49(22): 4237–4245.
- 8 Zexin Feng, Yi Luo, Yanjun Han. Design of LED freeform optical system for road lighting with high luminance ratio[J]. Opt Express, 2010, 18(21): 22020–22031.
- 9 Kuang-Lung Huang, Jin-Jia Chen, Te-Yuan Wang, *et al.*. Free-form lens design for LED indoor illumination[C]. SPIE, 2010, 7852: 78521D.
- 10 Luo Yi, Feng Zexin, Han Yanjun, *et al.*. Optics in solid state lighting[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 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, 2012, 31(9): 0900117.
- 11 Ding Yi, Gy Peifu. Freeform reflector for uniform illumination[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(3): 540–544.
丁毅, 顾培夫. 实现均匀照明的自由曲面反射器[J]. 光学学报, 2007, 27(3): 540–544.