研究与试制

基于非成像光学的高亮度光源设计**

郝 剑[1,2]，孙 强[1**]，王 尧[1,2]，荆 雷[1]，刘 英[1]

（1.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，长春 130033；
2.中国科学院大学，北京 100049）

摘 要：基于非成像光学理论，提出了一种阵列型 LED 光学系统的优化设计方法。通过对二次 B 样条理论、Scheme 语言和优化引擎的结合使用，实现了对准直透镜和柱面镜的优化设计。通过对两款透镜的灵活使用，实现了光能量的传输和重新分配，进而达到高效、高均匀性的照明要求。采用 48 颗，1.2 mm×1.2 mm 朗伯体发光的线性阵列 LED 芯片作为光源，透镜材料均为 PMMA。采用该设计方法设计的系统，其能量利用率可达到 62.6%以上，非均匀性小于 5%。

关键词：非成像光学设计；阵列线性发光二极管；配光透镜；优化
中图分类号：O439 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-488X(2016)01-0033-04

Design of High Brightness Light Source Based on Non-imaging Optics

HAO Jian[1,2], SUN Qiang[1], WANG Yao[1,2], JING Lei[1], LIU Ying[1]
(1. *Opto-electonics Technology Center, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun*, 130033, *CHN*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing*, 100049, *CHN*)

Abstract: An optimization design method of array LED based on non-imaging optics theory was proposed. The quadratic B-spline theory, Scheme language and optimization engine were used in combination to achieve the optimization of lens. The transferring and redistribution of light energy were achieved through the flexible using of two lenses, and thereby the high efficiency and uniformity could meet the illumination requirements. In this paper, the size and number of linear array LED chip are 1.2 mm×1.2 mm and 48, respectively. The materials of lens are PMMA. Using this design method, energy efficiency of the system can reach higher than 62.6% and non-uniformity less than 5%.

Key words: non-imaging optical design; linear array LED; optical lens; optimization

收稿日期：2015-07-11
* **基金项目**：国家高技术研究发展计划（批准号：2013AA03A116），国家重大科学仪器设备开发专项（批准号：2013YQ140517）和中科院璀璨计划（批准号：KZCC-EW-102）资助的课题
作者简介：郝 剑（1988—），女，博士，主要从事非成像光学设计方面的研究；（E-mail：haojianjenieciome8@163.com）
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方面的研究；（E-mail：sunq@ciomp.ac.cn）
王 尧（1984—），女，助理研究员，主要从事非成像光学和 LED 照明方面的研究。（E-mail：minwooyoyo@yahoo.cn）
** **通讯联系人**

引 言

LED 作为新型能源，以其长寿命、高效、节能等优势，愈发受到相关领域人员的重视。但是 LED 集成芯片的发光角度比较大，往往需要通过二次配光透镜将光能集聚起来照射到线形目标面上，进而实现高照度的要求。目前对配光透镜的设计方法可概括为两种，分别为计算所获得的透镜和通过优化获得的透镜。计算的方法主要是通过对几何光学知识的灵活运用实现的[1-7]，但该方法对于点光源的系统可以实现很好的照明效果；优化的方法主要是通过对光学软件的灵活运用实现的[8-14]，该种方法对于点光源和非点光源均可以实现较好的照明效果，但均未涉及到复杂的光学系统。

因此，基于非成像光学理论[15]，文章提出了一种阵列型 LED 光学系统的优化设计方法。该方法着重于光能量的传输和分配，进而形成高效、高均匀性的条形聚光光学元件，以使集成芯片的光在线性方向高密度会聚。该方法主要是基于 Scheme 宏语言和优化引擎等工具，结合二次 B 样条、几何光学知识，实现了对准直透镜和柱面镜的灵活运用，最终实现接受面上高亮度的均匀照明。采用该设计方法设计的系统，其能量利用率均可达到 62.6% 以上，非均匀性小于 5%。

1 结构设计

光学系统结构如图 1 所示，该系统是由基板、阵列线性光源、准直透镜、柱面镜和照度面 5 部分组成，其中线性光源共由 48 颗 LED 光源组成。图 1 中的准直透镜的面①、面②和柱面镜的面③为待优化的自由曲面；其它面均为已知的平面。从光源发出的光经准直镜，柱面镜成像到目标面上，最终要求实现照度面上的高亮度的匀光照明。

2 初始模型计算及优化

该光学系统相比单芯片，单透镜的系统稍显复杂，因此首先需计算出透镜自由曲面的初始模型。

2.1 初始模型的计算

图 2 为简单的计算说明图，如图所示，n_1 为空气中的折射率，n_2 为透镜的折射率，θ_1 和 θ_3 分别为入射到两个面上的入射角，θ_2 和 θ_4 分别为经两个面折射后的折射角。根据上图的几何关系，并结合菲涅耳定律可得如下关系式，其中 a,b,c,d 均为已知的线段长度，进而可计算透镜自由曲面的初始面型。

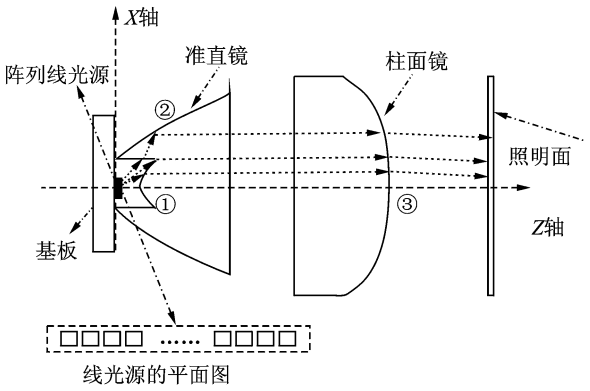


图 1 光学结构

Fig. 1 Schematic of the optical structure

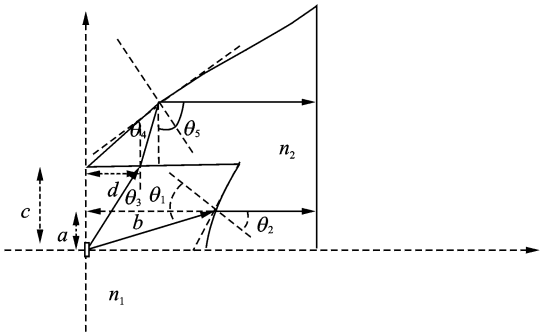


图 2 简单说明图

Fig. 2 The figure of brief description

$$\begin{aligned} n_1\sin\theta_1 &= n_2\sin\theta_2 \\ \tan(\theta_1-\theta_2) &= a/b \\ n_1\sin\theta_3 &= n_2\sin\theta_4 \\ \tan\theta_3 &= d/c \end{aligned} \tag{1}$$

2.2 优化拟合

二次 B 样条曲线被选用对初始模型的离散点进行拟合同时提取待优化曲线的控制点。如方程(2)所示：

$$P_{m-1}(t)=\sum_{i=0}^{2}b_{m-1+i}F_{i,2}(t)=0.5*(b_{m+1}+b_{m-1}-2b_m)t^2+(b_m-b_{m-1})t+0.5*(b_m+b_{m-1}) \tag{2}$$

式中 t 为 0 到 1 之间的参数；$P_{m-1}(t)$ 是待优化曲线上的第 m 小段曲线；b_{m-1}，b_m，b_{m+1} 是 $P_{m-1}(t)$ 上的三个控制点。

图 3 为具体的优化流程图，首先编写包括整个光学系统的 Scheme 程序并将待优化曲线的控制点设置为参量，对三个面型逐一优化，即，第二步和第

三步重复第一步。其次设置好优化引擎，编写 After-scheme 语言，建立起优化的通道。最后对较好的光学系统进行保存。通过对控制点的优化，来实现光线的重新分布。

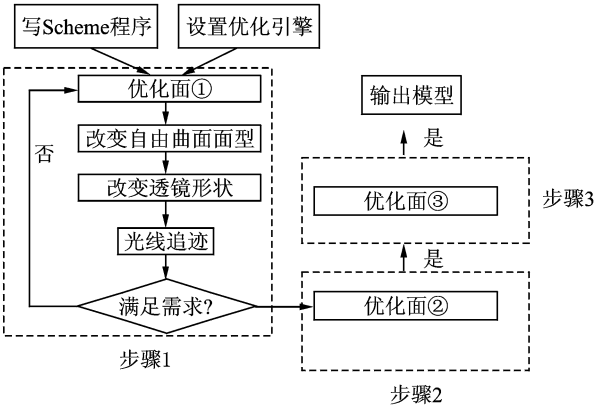


图 3　优化过程流程图

Fig. 3　Flow chart of the optimization process

3　实际与分析

该光学系统的设计指标如表一所示，光源为 1.2 mm×1.2 mm 朗伯体发光的 LED 芯片，共 48 颗，以线性阵列的方式排列，并被放在宽×长×高＝5 cm×20 cm×2 mm 的基板上。透镜的材料为 PMMA，准直镜和柱面镜的口径均为 10 mm，其中柱面镜距离光源 14 mm 处；追迹光线为 48,000。预期在 40 mm 处实现接受面上的高亮度匀光照明。计算过程中考虑了菲涅尔损失。

非均匀性定义见式(3)。

$$E_{\text{non-uniform}}=\frac{E_{\max}-E_{\min}}{E_{\max}+E_{\min}}\times 100\% \tag{3}$$

表 1　光学设计指标

Tab. 1　The parameters of optical design

参数	值
光源/mm²	1.2×1.2 LED
光源个数	48
辐射方式	朗伯发光
透镜直径/mm	10
追迹光线	48,000
材料	PMMA

该光学系统经 Tracepro 软件形成的三维图如图 4 所示，由图可知，该系统的 48 颗芯片线性排列在基板上，经过准直镜和柱面镜，成像于目标面上。

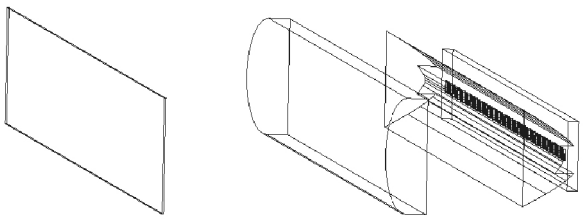


图 4　三维模型图

Fig. 4　Diagram of three-dimensional model

对上述的光学系统进行光线追迹模拟后的照度分布如图 5 所示。由图可知，该光学系统的能量利用率为 35.6%。由公式(3)可计算，非均匀性为 7.1%。结合 Scheme 宏语言和优化引擎对其进行优化后，在 Tracepro 中追迹模拟后的照度分布如图 6 所示。由图可知，该光学系统的能量利用率为 62.6%，非均匀性小于 5%，满足使用要求。

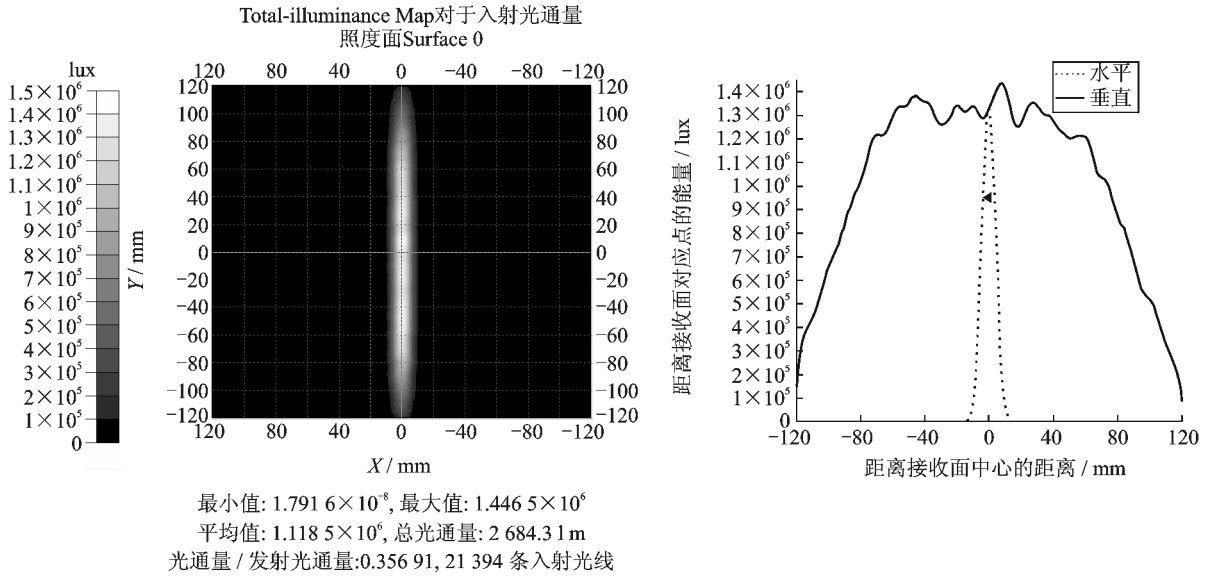


图 5　优化前照度分布图

Fig. 5　The figure of illuminance distribution before optimization

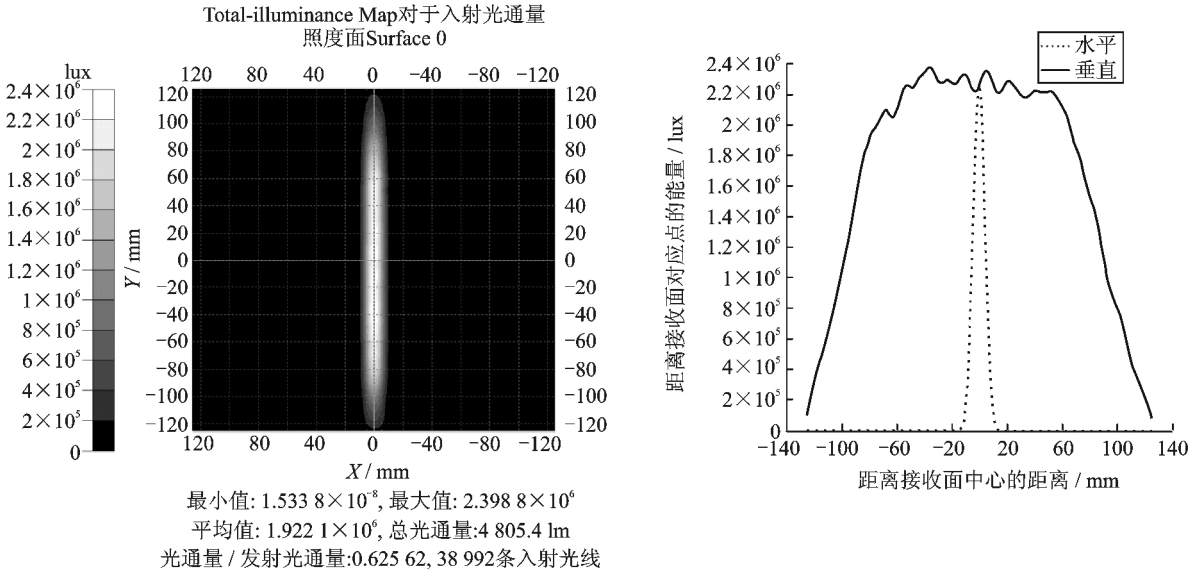


图 6 优化后照度分布图

Fig. 6 The figure of illuminance distribution after optimization

4 结 论

提出了一种阵列型 LED 光学系统的优化设计方法。基于 Scheme 宏语言和优化引擎等工具，结合二次 B 样条、几何光学知识，实现了对准直透镜和柱面镜的灵活运用，最终实现接受面上高亮度的均匀照明。采用该设计方法设计的系统，其能量利用率均可达到 62.6%以上，非均匀性小于 5%。该方法对于非点光源具有一定的优势。

参 考 文 献

[1] Chen Jinjia, Lin Chintang. Freeform surface design for a light-emitting diode-based collimating lens[J]. Optical Engineering, 2010,49(9),093001:1-8.

[2] Daniel V M, Mario G M, Antonio A, et al. High-efficiency light-emitting diode collimator [J]. Optical Engineering, 2010,49(12),123001:01-08.

[3] 苏宙平,阙立志,朱焯炜,等. 用于 LED 光源准直的紧凑型光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49: 022203-1-022203-7.

[4] Wang Guangzhen, Wang Lili, Li Fuli, et al. Collimating lens for light-emitting-diode light source based on non-imaging optics[J]. APPLIED OPTICS, 2012,51(11):1654-1659.

[5] Ding Yi, Liu Xu, Zheng Zhenrong, et al. Freeform LED lens for uniform illumination[J]. Opt. Express, 2008, 16(17): 12958-12966.

[6] 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):0222002-1-0222022-7.

[7] 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.

[8] Chen E, Yu F H. 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, 51,3162-3170 .

[9] 罗晓霞,刘 华,卢振武. 实现 LED 准直照明的优化设计[J]. 光子学报,2011,40(9):1351-1355.

[10] Luo Yi, Feng Zexin, Han Yanjun, 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.

[11] 郝 剑,刘 华,孙 强,等. LED 自由曲面准直透镜的优化设计方法[J]. 激光与光电子学进展,2014,51(3):175-180.

[12] Luo Xiaoxia, Liu Hua, Lu Zhenwu, et al. Automated optimization of an aspheric light-emitting diode lens for uniform illumination[J]. Appl. Opt,2011,50(20):3412-3148.

[13] Nicola Coluccelli. Modeling of laser diode stacks using Zemax: simulation, optimization, and experimental validation[J]. Appl. Opt. 2015,49(22):4237-4245.

[14] 郝 剑,刘 华,王 尧,等. LED 自由曲面匀光透镜的局部优化设计方法[J]. 激光与光电子学进展,2013,50(7):102-107.

[15] Roland Winston. Nonimaging optics [EB/OL]. http://en.wikipedia.org/wiki/Nonimaging_optics 2015-07-01.