

# LED自由曲面准直透镜的优化设计方法

郝剑<sup>1,2</sup> 刘华<sup>1\*</sup> 孙强<sup>1</sup> 王尧<sup>1</sup> 荆雷<sup>1</sup>

<sup>1</sup>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 130033

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 提出了一种自由曲面准直透镜的优化设计方法。通过对二次B样条理论、Scheme语言和优化引擎的结合使用,实现了准直透镜的优化设计。采用1 mm×1 mm朗伯体发光的LED作为光源,透镜材料为聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),通过对两款不同结构准直透镜的优化设计,可以实现发散角为 $\pm 5^\circ$ 的准直照明,能量利用率可达90%以上。与现有的优化方法相比较,此方法具有对初始模型依赖较低、设计方法简单和普适性高等特点。

**关键词** 光学器件; 光学设计; 非成像光学; 准直透镜; 优化

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.032302

## Optimization of Freeform Surface Lens for Collimating Illumination of LED

Hao Jian<sup>1,2</sup> Liu Hua<sup>1</sup> Sun Qiang<sup>1</sup> Wang Yao<sup>1</sup> Jing Lei<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** An optimization design method of collimating lens is proposed. The quadratic B-spline theory, Scheme language and optimization engine are used in combination to achieve the optimization of freeform surface lens. The Lambert emission of 1 mm × 1 mm LED is used as light source, and the lens material is polymethyl methacrylate (PMMA). The collimating lenses of different structures are optimized by this way. The energy efficiency can be up to 90%. Compared with the current methods, it has the advantages of less dependence on the initial model, simple design process and high versatility.

**Key words** optical devices; optical design; non-imaging optics; collimating lens; optimization

**OCIS codes** 230.3670; 220.4298; 220.2945

## 1 引言

LED作为第四代新型能源,以其诸多优势而被广泛应用于照明领域。如何实现高效、准直的照明透镜设计已成为研究热点之一。相比于其他的配光方式,自由曲面可自由控制光线角度,较好地实现准直照明的效果。但是传统的设计方法计算过程繁杂<sup>[1-5]</sup>,对小尺寸近场透镜而言,不能将扩展光源视为点光源<sup>[4]</sup>。因此便发展了自由曲面准直透镜的优化设计方法。

目前自由曲面准直透镜的优化设计方法有几种。Chen等<sup>[6]</sup>基于对Matlab编程软件和光学软件的交互式使用和对优化算法的建立,实现了对准直透镜的优化。罗晓霞等<sup>[7-8]</sup>利用Zemax的多重组态,通过建立评价函数和优化函数,实现对准直透镜的优化。该两种设计方法具有以下几个共同的特点:初始结构需设计自由曲线,优化前均需建立优化算法或是反馈函数,模拟时需多种软件协同作用。

收稿日期: 2013-10-22; 收到修改稿日期: 2013-12-04; 网络出版日期: 2014-02-20

基金项目: 国家973计划(2012C13227101)、吉林省科技发展计划(20130206018)

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

本文基于非成像光学理论<sup>[9]</sup>,提出了一种自由曲面准直透镜的优化设计方法。通过对二次B样条理论、Scheme语言、优化引擎的结合使用,实现了对自由曲面准直透镜的控制与优化。初始模型的自由曲线采用规则的线条代替,避免了对自由曲线复杂的计算。采用该种优化设计方法设计了两款不同结构、不同发散半角的准直透镜,其能量利用率均可达90%以上,满足照明要求。

## 2 结构设计与拟合

如图1所示,该系统设计了两款准直透镜,均以X轴为旋转对称轴,图1(a)为结构1,面②和面③为待优化的自由曲面;图1(b)为结构2,面①和面②为待优化的自由曲面。其他面均为已知的二次曲面。由于本设计方法对初始模型要求较低,此处将待优化的自由曲面均设计为规则的二次曲面,避免对自由曲面复杂的计算。

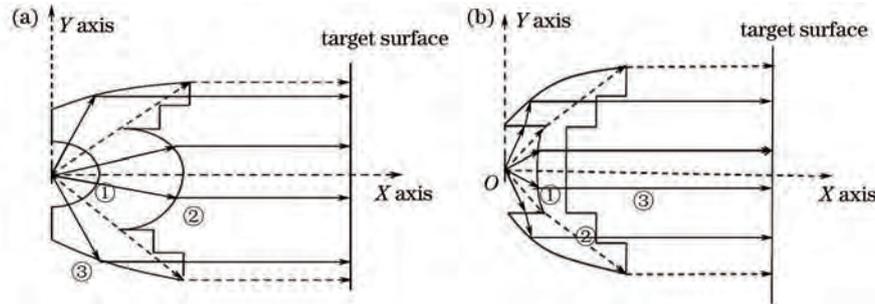


图1 光学结构。(a) 结构1; (b) 结构2

Fig.1 Optical structure. (a) Structure 1; (b) structure 2

## 3 优化设计

### 3.1 二次B样条拟合理论

二次B样条曲线相比于其他的拟合方式,更加逼近于同一特征多边形,较易做局部修改,故此处选用二次B样条曲线的方法对离散点进行拟合并提取控制点,如以下方程所示:

$$P(t) = \begin{cases} p_0(t) = \sum_{i=0}^2 b_{0+i} F_{i,2}(t) = 0.5(b_2 + b_0 - 2b_1)t^2 + (b_1 - b_0)t + 0.5(b_1 + b_0) \\ p_1(t) = \sum_{i=0}^2 b_{1+i} F_{i,2}(t) = 0.5(b_3 + b_1 - 2b_2)t^2 + (b_2 - b_1)t + 0.5(b_2 + b_1) \\ \vdots \\ p_{m-1}(t) = \sum_{i=0}^2 b_{m-1+i} F_{i,2}(t) = 0.5(b_{m+1} + b_{m-1} - 2b_m)t^2 + (b_m - b_{m-1})t + 0.5(b_m + b_{m-1}) \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $t$ 是取值0~1的参数; $P(t)$ 是待优化的二次曲线,由 $m$ 小段曲线组成; $P_{m-1}(t)$ 是 $P(t)$ 上第 $m$ 小段曲线; $b_{m-1}$ ,  $b_m$ ,  $b_{m+1}$ 是 $P_{m-1}(t)$ 上的3个控制点。由(1)式可知,该曲线由 $m$ 段曲线段组成,每一段都是抛物线,且由3个控制顶点控制,相邻曲线有两个共同的控制点。可保证优化时表面的连续性。

### 3.2 临界角分析

为避免能量因被遮挡而产生遗漏或是损失的情况,本设计方法对临界角的精度要求较高。

图2为简单的临界角分析图。如图2(a)所示,临界光线在经过透镜的第一个球面时并未发生变化,当到达全反射面 $B$ 点时,光线经过一次折射,并平行于 $X$ 轴出射。 $A(x_A, y_A)$ 、 $B(x_B, y_B)$ 至原点 $N$ 点的连线与 $X$ 轴的夹角均为 $\theta$ ,并与原点在一条直线上。因此可得 $A$ 、 $B$ 点纵横坐标的关系式为

$$\begin{cases} y_B = x_B \times \tan \theta \\ y_A = x_A \times \tan \theta \end{cases}. \quad (2)$$

同理结构2也有此关系式存在。

### 3.3 优化步骤

图3为具体的优化流程图,首先编写包括LED芯片、透镜、接收屏以及它们的属性在内的Scheme程序

并将所有的控制点设置为变量。Scheme 语言对于规则的线条、二次曲面、方程,都有相对应的命令可以实现。其次设置好优化引擎,编写 After-scheme 语言,使 Scheme 语言中的参量与优化引擎中的变量保持一致,建立起优化的通道。最后对系统进行优化,即对所有的控制点进行优化,直到符合理想的照度分布为止。通过对所有的控制点进行优化,进而改变透镜的形状,实现光线的重新分布。

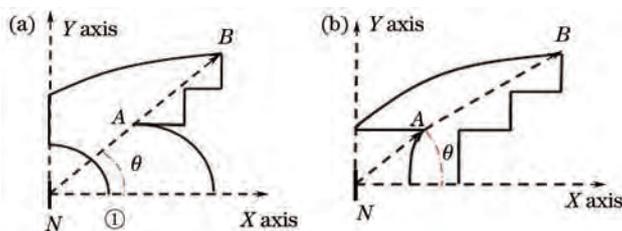


图2 简单的临界角分析图。(a) 结构1;(b) 结构2

Fig.2 Simple analysis chart of critical angle. (a) Structure 1; (b) structure 2

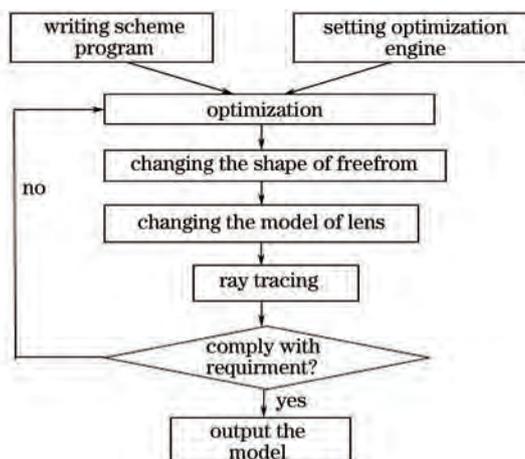


图3 优化过程流程图

Fig.3 Flow chart of the optimization process

## 4 实际与分析

作为射灯几种不同情况下的应用,设计了两款准直透镜。光学设计指标为光源均为  $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$  朗伯体发光的 LED 芯片。透镜的材料为聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),追迹光线为  $10^6$  条。预期在  $1\text{ m}$  处实现目标面上的准直照明。计算过程中考虑了菲涅耳损失。

能量利用率的定义为

$$E_{\text{uniform}} = \frac{E_{\text{min}}}{E_{\text{max}}} \times 100\% . \quad (3)$$

以结构 1 为例,通过对不同  $\theta$  角度下的准直透镜进行优化分析,可知在相同的条件下,当角度  $\theta = 60^\circ$  左右时,能量利用率最高,为 90.519%,如表 1 所示。因此本文设计的两款准直透镜的  $\theta$  角度均为  $60^\circ$ 。

表 1 不同角度下优化的能量利用率对比

Table 1 Energy efficiency of different angles

$\theta$	50	60	70
Energy efficiency /%	84.841	90.519	86.216

### 4.1 准直透镜结构 1 的模拟分析

准直透镜结构 1 在优化前的照度分布如图 4 所示,图 4(b)的横坐标对应接收面上的点,纵坐标为照度大小。经过模拟后,从光斑下方的数据可以看出,其能量利用率可达到 66.4%,虽然全反射部分因光源而存在误差,但是该部分还是起到了一定的作用,而二次曲面的部分则损失严重。针对此情况进行优化,最终的能量分布如图 5 所示,在目标面中心呈现一亮斑,从光斑下方的数据可以看出,能量利用率可达 90.4%,相比于图 4,能量利用率提高了 24%。

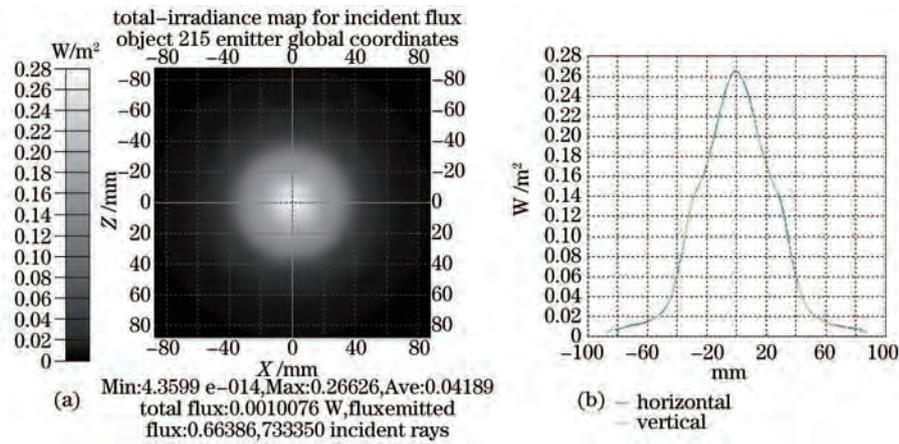


图4 结构1的透镜在优化前的照度分布图

Fig.4 Illuminance distribution for lens of structure 1 before optimization

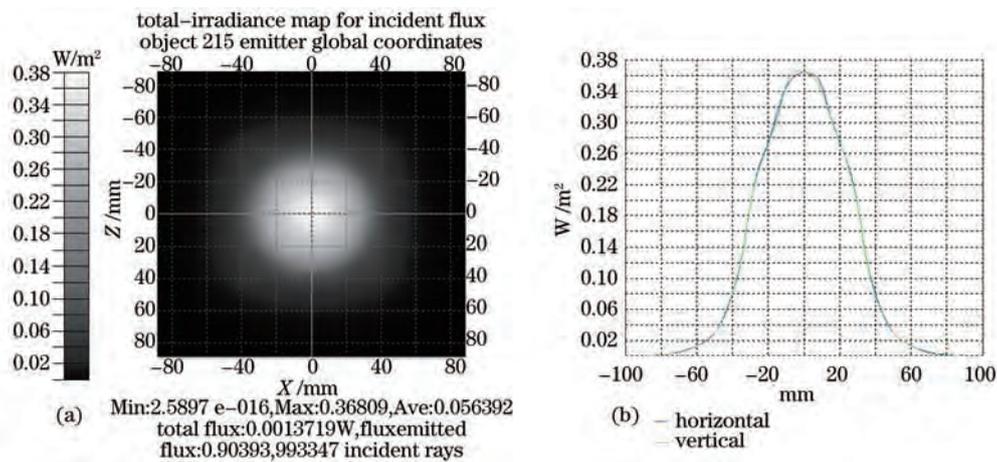


图5 结构1的透镜在优化后的照度分布图

Fig.5 Illuminance distribution for lens of structure 1 after optimization

#### 4.2 准直透镜结构2的模拟分析

对于结构2的模拟过程同结构1,初始模型的模拟结果如图6所示。其能量利用率较低,仅为26.4%,这主要是由于在抛物面之前经过了一次折射,因此,光线并不会准直出射。二次曲面和全反射部分几乎均没有起到任何折射、反射的作用。

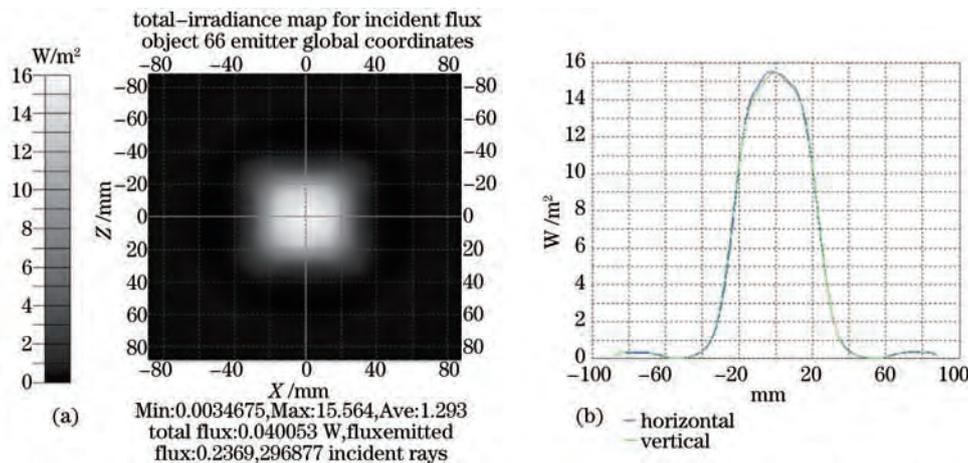


图6 结构2的透镜在优化前的照度分布图

Fig.6 Illuminance distribution for lens of structure 2 before optimization

图7为全局优化之后目标面上的照度分布,如图所示,目标面的正中心有一亮斑,能量利用率为90.7%,相比于图6,提高了64.3%。

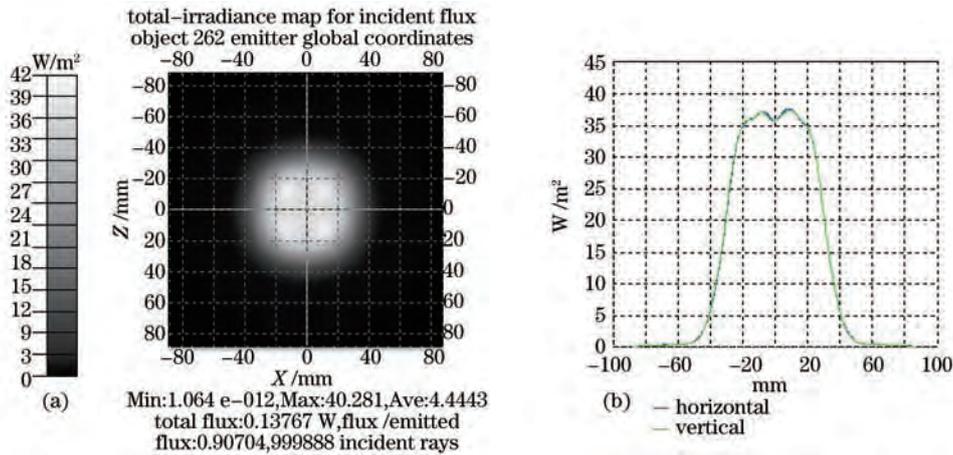


图7 结构2的透镜在优化后的照度分布图

Fig.7 Illuminance distribution for lens of structure 2 after optimization

#### 4.3 优化后的三维模型图和透镜参数

优化后的三维(3D)模型图如图8所示,其中图8(a)为结构1的三维模型图,图8(b)为结构2的三维模型图。

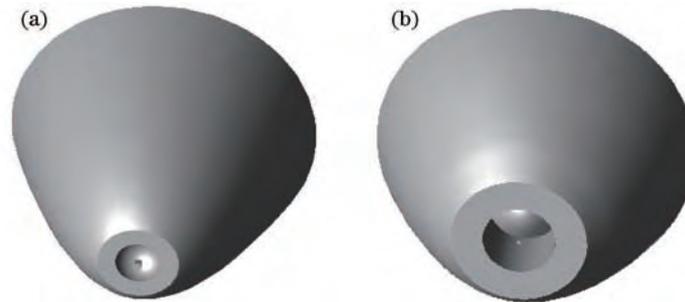


图8 透镜的三维模型图。(a) 结构1; (b) 结构2

Fig.8 Three-dimensional models of the lenses. (a) Structure 1; (b) structure 2

表2为两种结构透镜优化后的具体参数。由表可知,两种结构的准直透镜,口径约为10 mm,厚度均小于10 mm。结果证明,最终均实现了目标面上较好的准直照明效果,能量利用率均高于90%。

表2 优化后透镜参数

Table 2 Parameters of freeform surface after optimization

Lens structure	Diameter /mm	Thickness /mm	Field of view /(°)	Energy efficiency /%
Structure 1	9.6	8.3	±5	90.4
Structure 2	10	5.6	±5	90.7

## 5 结 论

提出了一种自由曲面准直透镜的优化设计方法。通过对二次B样条、Scheme宏语言和优化引擎的结合使用,实现了对自由曲面准直透镜的控制和优化。采用该设计方法,设计了两款不同结构的准直透镜,在半发散角为±5°的范围内,能量利用率均可达到90%以上。该方法与传统的优化方法相比较,具有对初始模型的依赖较低、设计过程简单、准直性高和通用性好等特点。

### 参 考 文 献

- 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.
- Zhang Hang, Liang Xue, Yan Jinhua, *et al.*. Compound parabolic concentrator-simultaneous 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.

- 3 Jin-Jia Chen, Chin-Tang Lin. Freeform surface design for a light-emitting diode based collimating lens[J]. Opt Eng, 2010, 49(9): 093001.
- 4 Su Zhouping, Que Lizhi, Zhu Zhuowei, *et al.*. Optical system design of the compact collimator for LED source[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(2): 022203.  
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(2): 022203.
- 5 Guangzhen Wang, Lili Wang, Fuli Li, *et al.*. Collimating lens for light-emitting-diode light source based on non-imaging optics[J]. Appl Opt, 2012, 51(11): 1654-1659.
- 6 E Chen, F H 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.
- 7 Luo Xiaoxia, Liu Hua, Lu Zhenwu, *et al.*. Automated optimization of free-form surface lens for collimation[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(9): 1351-1355  
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): 1351-1355.
- 8 Yan Qiang, Gao Chunming, Sheng Yanmei, *et al.*. Optimization design of LED collimation lens[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(11): 112203.  
严 强, 高椿明, 生艳梅, 等. LED照明准直透镜结构优化设计[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(11): 112203.
- 9 Wikipedia. Nonimaging Optics[OL]. [http://en.wikipedia.org/wiki/Nonimaging\\_optics](http://en.wikipedia.org/wiki/Nonimaging_optics).