

文章编号:1004-4213(2011)09-1351-5

实现 LED 准直照明的优化设计

罗晓霞^{1,2}, 刘华¹, 卢振武¹, 荆雷^{1,2}, 姜洋^{1,2}, 辛迪^{1,2}

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要:为了有效地利用光源能量,满足 LED 远场照明系统要求,提出了一种实现 LED 大视场角准直照明的自由曲面透镜设计方法.运用 ZEMAX 软件序列模式下的多重组态建立透镜结构,在 ZEMAX 的二次开发环境下,采用宏语言编写自定义优化函数,实现对光学系统的自动优化.通过得到的自由曲面面型数据,借助光学仿真软件进行模拟,模拟光源采用圆面发光的 LED 朗伯体,视角为 180° ,透镜材料为 PMMA,点光源模拟得到的发散半角在 $\pm 0.1^\circ$ 以内,能量利用率在 87% 以上,实现了较高的能量利用率.

关键词:非成像光学; 准直镜; LED

中图分类号:TN94

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114009.1351

0 引言

与传统光源相比,LED 具有寿命长、显色性好、光效高、近似点光源、发光方向性强和无污染等优点.LED 作为新一代绿色光源,目前广泛应用于各种室内和室外照明领域,包括背光源、大屏幕显示、汽车和特种照明灯等.由于 LED 光源发出的光近似朗伯型,即光强呈余弦分布,不能直接用于照明.因此,为了提高系统性能,根据不同的应用场合和需求,针对 LED 光源设计不同的光学系统,对 LED 芯片的光能进行合理的分配显得尤为重要.

基于 LED 照明的光学设计主要是通过自由曲面来重新配光^[1-5]以实现所需照明.自由曲面光学器件目前主要有两种设计方法:一种是试错法^[1],通过反复修改光学器件参量并用光学软件来模拟验证相应的照明结果,从而获取理想的自由曲面面型,但较为费时;另一种是数值解法^[2-5],根据能量守恒原理,通过求解微分方程来得到自由曲面的面型数据,但求解过程需要建立折射定律方程、曲率关系方程、积分条件等数个矢量方程组,建模的过程采用了微分几何,方程的求解过程对数学要求很高.

本文结合数值解法和试错法,在 ZEMAX 的序列模式下利用多重组态建立结构.通过实际光线追迹,得到光线在出射面的角度分布,并利用宏命令编写自定义优化函数,对非成像系统进行自动优化,节

约了优化时间,避免了复杂的计算过程.该方法不仅适用于点光源而且对非点光源也是有效的.

1 系统建模

针对 LED 照明的光学准直器主要有两种,菲涅尔透镜^[6]和内部全反射(Total Internal Reflection, TIR)准直器^[7-10].透镜是利用折射原理,改变光源的光束角.由于材料的折射率有限,透镜的孔径角很小,一般在 50° 以下,而反射镜的孔径角可以达到 130° 以上.为实现光源大视场角照明,本文采用透射全反射组合结构以提高光的利用效率.

1.1 系统的基本结构

系统设计采用旋转对称的透射-全反射组合结构,如图 1.

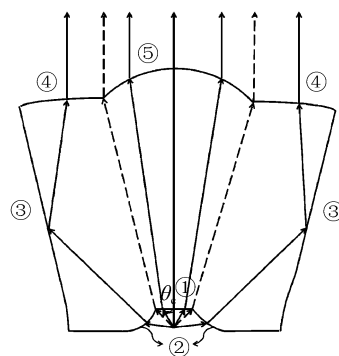


图 1 准直镜基本结构

Fig. 1 Basic collimator scheme

基金项目:国家重点基础研究发展计划(No. 2010CB227101)和中国科学院创新基金资助

第一作者:罗晓霞(1987-),女,硕士研究生,主要研究方向为 LED 照明的自由曲面透镜设计. Email: luoxiaoxia_10@yahoo. cn

导师:卢振武(1955-),男,研究员,博导,主要研究方向为衍射光学、光学系统设计、非成像光学和光学检测.

Email: luzhenwu55@yahoo. com. cn

收稿日期:2011-04-19;修回日期:2011-05-26

图中与光轴夹角为 θ_c , 虚线把透镜分为两部分: 虚线以外为全反射部分, 以内为透射部分. 全反射部分由自由曲面②、③和④组成, 最大可能地提高了光的利用效率. 透射部分包括平面①和自由曲面⑤, 是一平凸非球面透镜. 该部分光线直接通过透镜进行折射, 增加了中心区域的光强度.

目前超精密注塑成型技术和玻璃模压成型技术的飞速发展, 最大限度地降低了非球面加工的成本, 为广泛使用非球面提供了极为有利的条件. 从广义上来讲, 除了球面和平面以外的其他表面都可以称为非球面. 非球面是自由曲面中最简单的形式. 在大多数情况下, 光学系统中应用较多的是高次非球面, 即在球面或者二次曲面的基础上做一些微小变形, 因而一般采用在二次曲面上附加变形的表示方法来表示旋转对称非球面.

在光学设计软件 ZEMAX 中, 旋转对称结构的偶次非球面方程为

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \alpha_1 r^2 + \alpha_2 r^4 + \alpha_3 r^6 + \alpha_4 r^8 + \alpha_5 r^{10} + \dots \quad (1)$$

式中 $z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}}$ 为基准面的二次曲面方程, c 为非球面顶点处的曲率, r 为径向坐标 (即非球面上任一点到光轴的距离), k 为二次曲线常量

$$\Delta z = \alpha_1 r^2 + \alpha_2 r^4 + \alpha_3 r^6 + \alpha_4 r^8 + \alpha_5 r^{10} + \dots$$

为非球面与基准二次曲面的偏移量.

1.2 建模过程

根据上述透镜的基本结构进行建模. 为了使透镜简单化以便降低加工成本, 图 1 中自由曲面都采用非球面进行设计. 选取透镜材料为 PMMA, 可以采用注塑成型技术, 适于大规模量产. 主要技术参数如表 1.

表 1 光学设计参量
Table 1 Optical design parameters

Parameter	Value
Wavelength	550 nm
Object cone angle	180°
Material	PMMA
Thickness of center	13 mm
Entrance pupil distance	1 mm
Critical angle θ_c	45°

由于在 Zemax 软件中不能直接构建图 1 所示的非球面透镜整体, 可以在 Zemax 的非序列模式下^[11], 对 4 个非球面逐一设计并采用布尔运算. 但这样做比较复杂, 而且在 Zemax 非序列模式下进行

优化费时费力, 很难得到理想的结果. 因此, 可尝试在 Zemax 软件的序列模式中使用多重组态来进行建模优化.

在多重组态结构中, 非球面透镜结构可定义为三组态系统. 其中, 透射部分作为一个组态, 全反射部分用关于光轴对称的两个组态模拟. 根据折反射部分的分界角 θ_c 、透镜的中心厚度、材料的折射率等设计参量要求, 根据光线行为, 给出各面的倾斜偏移量与曲率半径使各部分光线均能到达像面, 作为系统的初始结构.

1.2.1 透射部分建模

中间透射部分的设计与一般的非球面透镜的设计类似, 根据技术参量要求在透镜数据编辑表单 (LDE) 中给出初始结构参量. 在透射部分, 从 LED 出射的与光轴夹角 $\pm\theta_c$ 范围内的光, 经过平凸非球面透镜的折射后, 沿与光轴平行的方向出射, 即光线在表面⑤处的出射光线与 Z 轴夹角的理论值为零. 设透射部分的最大光斑为 R , 如图 2.

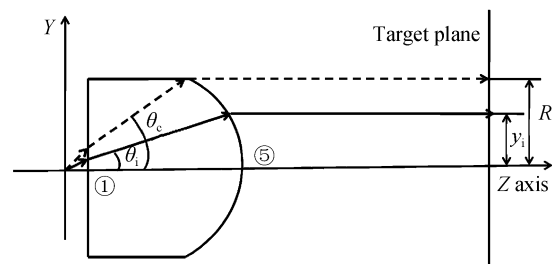


图 2 透射部分光学系统简化模型

Fig. 2 Simple model of the refraction part

1.2.2 全反射部分建模

由多重组态编辑窗口, 在第一组态的基础上建立第二组态, 如图 3. 该部分的光线首先经过透镜后表面的②非球面折射之后, 由侧面的③全反射面进行全反射, 这部分的反射光再经过④非球面折射, 光线同样以与光轴平行的方向出射. 其中设 $\theta = \pi/2$ 的光线反射到距离目标面中心为 R 的位置, $\theta = \theta_c$ 的光线反射到目标面的边缘位置.

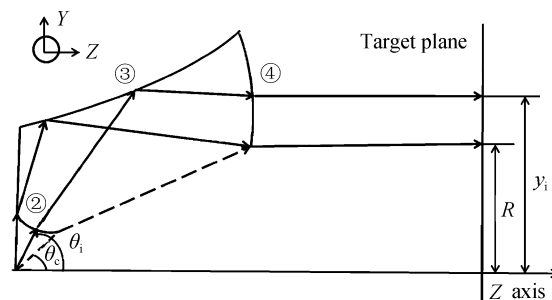


图 3 全反射部分光学系统简化模型

Fig. 3 Simple model of the TIR part

2 非球面透镜的优化设计

2.1 ZEMAX 宏命令

虽然在 ZEMAX 中有内置的操作数可以控制光线的出射角度,但只能对单一光线进行控制.当追迹的光线数增多时,优化函数显得冗长.为了实现任意光线数的优化,利用宏语言编写自定义优化函数.ZEMAX 宏命令的编写依赖结构传递参量:JC 为透射与全反射部分的分界角;Jmax 为光源的发散半角;Dot 为优化的点数(可以设任意值);Ji 为光线的入射角;Py 为单位化的光阑坐标;J1 为光线在出射面的弧度值;D1 为光线在出射面的角度值.

在 ZEMAX 中,光线追迹路由单位化的视场坐标和光瞳坐标决定.对于点光源的优化,视场坐标都为零.因此,二维平面内的光线追迹仅取决于光阑坐标的 p_y 值.考虑到系统建模设计中取物体的圆锥角作为孔径类型,因此单位化的光阑坐标由光线的入射角与光源的圆锥角决定.光线入射角与光阑的示意如图 4.

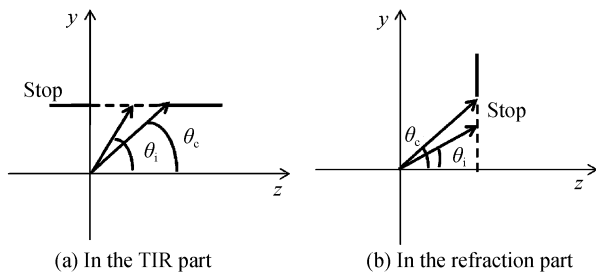


图 4 光线入射角的草图
Fig. 4 Sketch of the incident angle

2.2 自定义优化函数

根据 ZEMAX 宏语言编写自定义优化函数为
 $JC = \text{ATAN}(1)$
 $Jmax = 2 * \text{ATAN}(1)$
 $PI = 4 * \text{ATAN}(1)$

```
dot= 200
DECLARE D1, DOUBLE, 1, dot
DECLARE J1, DOUBLE, 1, dot
FOR i, 1, dot, 1
    Ji=JC+i * (Jmax-JC)/dot//全反射部分入射角
    (Ji=i * JC/dot//折射部分入射角)
    py=Ji/Jmax
    RAYTRACE 0, 0, 0, py, PWAV()
    ray=RAYE()
    J1(i)=RAYN(11)
    D1(i)=180 * ACOS(J1(i))/PI
NEXT i
sum=0
FOR i, 1, dot, 1
    sum=sum+D1(i)
NEXT i
OPTRETURN 0, sum
```

设置非球面的曲率半径、二次曲线常量、非球面系数和面间厚度等参量作为变量,采用最小二乘法进行自动优化,优化后透镜的具体参量如表 2 和 3,相应的二维截面图如图 5.

表 2 折射部分的面型参量
Table 2 Surface parameters of the refraction part

Parameters	Configuration 1	
	Surface ①	Surface⑤
c	0	-2.053 104E-001
k	0	-0.726 827 0
α_4	0	-8.039 160E-004
α_6	0	3.553 840E-005
α_8	0	-1.340 427E-006
α_{10}	0	9.237 862E-009
(Y, Z)	(0, 1)	(0, 14)
X Tilt	0	0

表 3 全反射部分的面型参量
Table 3 Surface parameters of the TIR part

Parameters	Configuration 2		
	Surface ②	Surface ③	Surface ④
c	2.754 846E-01	-1.188 040E-02	2.831 643E+39
k	1.901 065	-1.125 55E+02	-2.738 410E+02
α_4	-8.974 408E-03	4.262 812E-06	3.736 327E-06
α_6	-1.565 181E-03	-1.233 623E-07	4.923 211E-08
α_8	6.965 096E-07	-6.243 344E-10	1.176 709E-09
α_{10}	-1.228 316E-05	5.177 565E-012	2.435 680E-12
(Y, Z)	(1.5, 0.5)	(11.463 2, 12.373 7)	(-0.412 9, 10.161 3)
X Tilt	-40°	-114°	-180°

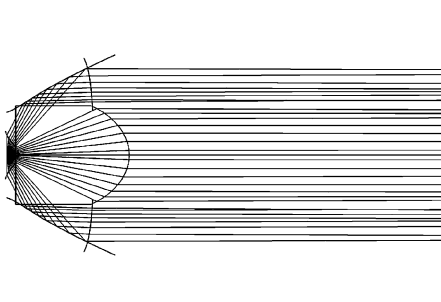


图 5 ZEMAX 中模型结构图
Fig. 5 Layout of the model in ZEMAX

最后在照明设计软件中模拟光学系统,通过分析追迹光线,得到发光强度分布、光能利用率等照明质量的评价指标,进一步检验该方法是可行的.

3 系统仿真模拟

透镜的结构尺寸设计完成后,根据 ZEMAX 序列模式中透镜的基本参量,利用 UG 软件进行 3D 结构建模,并将透镜导入照明设计软件 TracePro 进行光学模拟.通过点光源的模拟仿真,验证优化函数的正确性,模拟结果如图 6.另外,对于该透镜结构采用面光源模拟,观察面光源下的发光强度分布如图 7.模拟过程中分别采用朗伯发光的半径为 0.01 mm 的点光源和 0.5 mm 的面光源来模拟,模

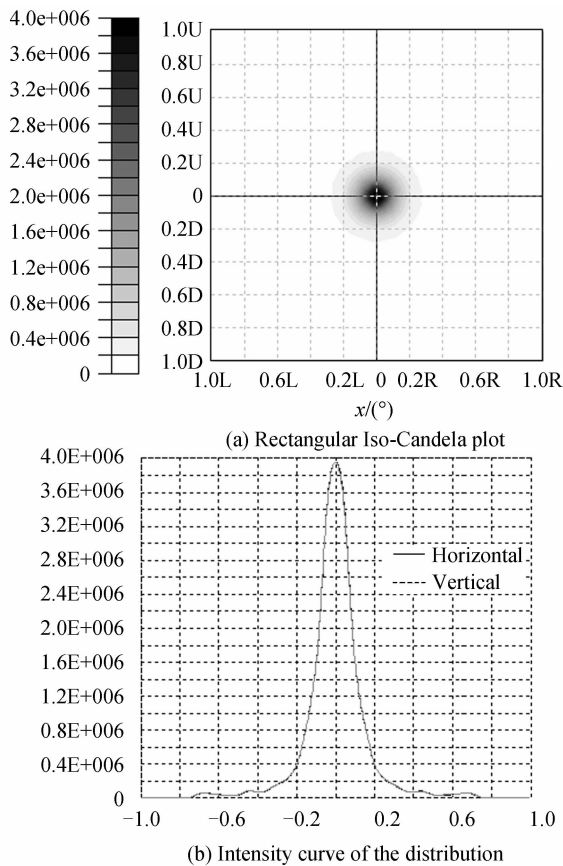


图 6 点光源的发光强度分布
Fig. 6 Luminous intensity distributions of the point source

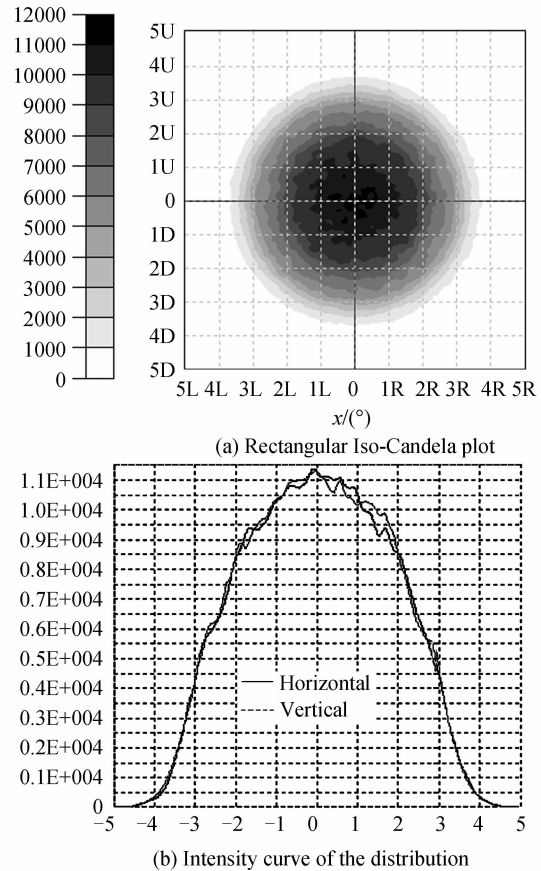


图 7 面光源的发光强度分布
Fig. 7 Luminous intensity distributions of the extended source

拟计算 100 万条光线,接收面在距离光源 1 m 处的位置,计算过程中考虑了菲涅耳损失.

图 6 和图 7 为系统仿真模拟的发光强度图.图中,点光源的光能利用率为 87%,光线准直最大偏角小于 0.1° ;面光源的光能利用率为 79%,准直系统的发散半角小于 2.8° .

根据模拟分析数据可知:在 ZEMAX 的序列模式下,通过宏语言编写的自定义优化函数,对系统进行自动优化后,实现了比较高的光能利用率,得到了比较好的准直性.另外,对点光源优化后的结果在一定准确度范围内也适用于面光源,可以作为面光源的初始结构进一步进行优化.与数值计算方法相比,该方法利用 ZEMAX 自动优化的优势,通过寻找最优的非球面相关参量,可实现更好的准直效果.相比于非序列模式,序列模式的优化速度快、建模简单,更为重要的是设计自由度高、变量多,从而使优化设计结果更准确.

4 结论

本文利用 ZEMAX 的多重组态,实现了在序列模式下对准直镜的优化设计.在 ZEMAX 的二次开

发环境下,编写了实现准直照明的自定义评价函数,对 LED 照明系统进行了自动优化设计,提高了设计效率.通过软件模拟分析给出的仿真结果,比较了点光源与面光源的发光强度分布情况,验证了优化函数的正确性,表明了该设计方法的可行性.

参考文献

- [1] KUDAIEV S, SCHREIBER P. Automated optimization of non-imaging optics for luminaires[C]. *SPIE*, 2005, **5962**: 1-9.
- [2] DING Yi, ZHENG Zhen-rong, GU Pei-fu. Freeform lens design for LED illumination[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(6): 1486-1490.
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): 1486-1490.
- [3] YI D, XU L, ZHEN RONG Z, PEI FU G. Freeform LED lens for uniform illumination[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(17): 12958-12966.
- [4] ZHEN RONG Z, XIANG H, XU L. Freeform surface lens for LED uniform illumination[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(35): 6627-6634.
- [5] DING Yi, GU Pei-fu. 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.
- [6] XU Huan, LI Xiang-ning, ZHOU Guo. Design of Fresnel lens with big grooves and equal thickness based on the software Zemax [J]. *University of Shanghai for Science and Technology*, 2007, **29**(1): 99-102.
徐欢,李湘宁,周果.基于 Zemax 软件的大齿距等厚菲涅尔透镜的设计[J].上海理工大学学报,2007,**29**(1): 99-102.
- [7] SUN Li-wei, JIN Shang-zhong, CEN Song-yuan. Free-form micro-lens design for solid state lighting[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(5): 860-865.
孙理伟,金尚忠,岑松原.用于固态照明的自由曲面微透镜设计[J].光子学报,2010,**39**(5): 860-865.
- [8] CHEN J J, LIN C T. Freeform surface design for a light-emitting diode - based collimating lens [J]. *Optical Engineering*, 2010, **49**(9): 3001-3008.
- [9] DANIEL V M, MARIO G M, ANTONIO A, EUSEBIO B. High-efficiency light-emitting diode collimator [J]. *Optical Engineering*, 2010, **49**(12): 3001-3008.
- [10] HSIEH W C, CHEN Y Y, LEE Y C, *et al.* Design and measurement of TIR Lens of MR16-Compatible LED lamp without aspherical surface for high directivity[C]. *SPIE*, 2010, **7717**: 1-8.
- [11] WANG Cheng-liang, LI Xiang-ning, HE Li-qing. Constructing user defined surface in ZEMAX[J]. *Optical Instruments*, 2001, **23**(3): 23-26.
王成良,李湘宁,贺莉清.应用 ZEMAX 软件构造特殊面型[J].光学仪器,2001,**23**(3): 23-26.

Automated Optimization of Free-form Surface Lens for LED Collimation

LUO Xiao-xia^{1,2}, LIU Hua¹, LU Zhen-wu¹, JING Lei^{1,2}, JIANG Yang^{1,2}, Xin Di^{1,2}

(1 *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

(2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: In order to achieve full light utilization and satisfy the demand for far-field illuminance of LED, automated optimization method in sequential mode of ZEMAX was proposed in the design of collimator with far-field illuminance for LED source. The system was established in ZEMAX's multiple configurations, and the user defined merit function was written out using ZEMAX Programming Language (ZPL) macros language. In the simulation, the material of lens is PMMA and the source is Lambertian-type LED light source, of which divergence angle is 180° . Optimum parameters of collimator were obtained via running an optimization. The optical simulation results show that an efficiency of 87% is achieved under a view angle of $\pm 0.1^\circ$ and for a point LED source.

Key words: Nonimaging optics; Collimator; LED