

超高光效小聚光角度的均匀配光 LED 透镜设计

万运佳 林浩博 刘杰 熊晖

湖北大学物理与电子科学学院, 湖北 武汉 430062

摘要 提出了一种适用于 LED 光源均匀配光的超高光效、小聚光角度自由曲面透镜的设计方法。基于光通过透镜的折射现象构建了曲面微分方程,运用高精度算法得到透镜曲面参数,实现了传统透镜难以实现的聚光角度小、光效高的均匀配光效果。运用专业软件进行三维建模,在透镜模型内侧进行球面切削以减小透镜厚度。通过实际应用仿真,验证了该方案的有效性和可靠性。

关键词 光学设计; LED 光源; 聚光透镜; 均匀配光; 自由曲面

中图分类号 O439 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.122202

Design of LED Lens with Ultra-High Light Efficiency and Small Light-Gathering Angle for Realizing Uniform Light Distribution

Wan Yunjia Lin Haobo Liu Jie Xiong Hui

Faculty of Physics and Electronic Technology, Hubei University, Wuhan, Hubei 430062, China

Abstract A design for freeform surface lens with ultra-high light efficiency and small light-gathering angle is proposed to realize uniform light distribution for LED light source. A freeform surface differential equation is constructed based on the refraction phenomenon when light is passing through the lens. High accuracy algorithm is applied to obtaining parameters of the lens surface. The light distribution effect achieved from the proposed method is with smaller light gathering angle and higher light efficiency than those obtained from the traditional lens. A three-dimensional model is established by the professional software. The thickness of the lens can be reduced by cutting a sphere inside the lens model. The simulation in real application environment verifies the validity and the reliability of the scheme.

Key words optical design; LED light source; light-gathering lens; uniform light distribution; freeform surface

OCIS codes 220.3620; 220.4298; 230.3670

1 引言

近年来,常用的发光二极管(LED)光源透镜的自由曲面设计方法有数值优化法和直接法。数值优化法比较依赖设计者丰富的设计经验,具有很大的局限性,需要多次反复优化才能得到最终的结果,设计复杂系统时需要花费较多时间^[1]。直接法主要基于剪裁法的思想,运用光学曲面上相应点处的斜率和曲率来构建光学曲面的一阶和二阶微分方程^[2],但是大多数运用直接法设计的匀光透镜并不能同时实现高光效利用率高和高聚光的效果^[3-6]。

针对一般类型的 LED 光源,采用高精度数值方法设计了自由曲面透镜,该透镜可实现均匀配光且兼顾高光效利用率高和高聚光效果,具有优异的性能指标。运用专业软件进行仿真,进一步验证所设计透镜的配光效果。

收稿日期: 2016-07-15; **收到修改稿日期:** 2016-08-11; **网络出版日期:** 2016-11-24

基金项目: 湖北省教育厅科学技术研究计划青年人才项目

作者简介: 万运佳(1989—),男,硕士研究生,主要从事光学工程方面的研究。E-mail: wanyj_hubu@163.com

导师简介: 熊晖(1982—),男,博士,教授,主要从事半导体光学、光电器件、光学工程等方面的研究。

E-mail: xhui_hbu@163.com(通信联系人)

2 数学模型

朗伯提出的光度学照度分布(呈余弦幂函数的形式)为

$$I(\theta) = I_0 \cos^m \theta, \quad (1)$$

式中 I_0 为正入射方向上的光强, m 为大于零的实数, θ 为光束角。

一般类型的 LED 光源都满足(1)式, 光线经过透镜前后的各个参数如图 1 所示, 当发散角的半角为 β 时, 形成的光锥内出射的光强 φ_β 可表示为^[7]

$$\varphi_\beta = \iint I(\theta) d\Omega = \frac{2\pi I_0}{m+1} (1 - \cos^{m+1} \beta). \quad (2)$$

当出射角 β 取值为最大值 β_{\max} (通常为光源发光发散角) 时, 满足

$$\frac{\varphi_\beta}{\varphi_{\beta_{\max}}} = \frac{1 - \cos^{m+1} \beta}{1 - \cos^{m+1} \beta_{\max}}, \quad (3)$$

式中 $\varphi_{\beta_{\max}}$ 为光束角度取上限时的出射光强。

接收光屏上一定范围内的光强分配均匀, 可以理解为照明面积 S_i 和该区域的总光强 φ_i 成正比。由能量守恒定律可知, 接收平面上的光斑半径 x_i 和出射光发散角 β 的函数关系为

$$x_i = R \sqrt{\frac{1 - \cos^{m+1} \beta}{1 - \cos^{m+1} \beta_{\max}}}, \quad \sin \beta = \frac{x}{\sqrt{x^2 + z^2}}, \quad (4)$$

式中 R 为光斑半径。

图 1 为光线经过自由曲面的传播轨迹示意图, 由光源 O 发出光线, 经过曲面上点 $A(x, z)$ 发生折射, 接收点为 $B(x_i, H)$, 由斯涅尔定律可得

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2, \quad (5)$$

式中 n_1 和 n_2 分别为入射光和出射光的介质折射率, 由于出射光的介质为空气, 因此 $n_2 = 1$; θ_1 和 θ_2 分别为入射角和出射角。

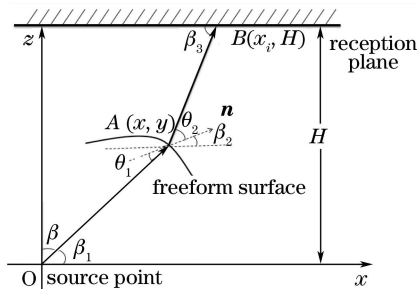


图 1 光线经过自由曲面的传播轨迹示意图

Fig. 1 Propagation path diagram of light passing through freeform surface

将(5)式进行变形, 可得

$$\frac{\sin \beta_1 - \cos \beta_1 \tan \beta_2}{\sin \beta_3 - \cos \beta_3 \tan \beta_2} = \frac{1}{n_1}, \quad (6)$$

式中 β_1 为光束角余角, β_2 为自由曲面法向量角, β_3 为出射光线与接收屏的夹角。

曲线在点 A 处的切线斜率为^[8]

$$\frac{dz}{dx} = -\cot \beta_2 = \frac{n \cos \beta_1 - \cos \beta_3}{\sin \beta_3 - n \sin \beta_1}, \quad (7)$$

式中 n 为透镜的折射率。 x 和 z 满足的关系式为

$$x = z \tan \beta. \quad (8)$$

将(8)式对 β 求导, 可得

$$\frac{dx}{d\beta} = \frac{dz}{d\beta} \tan \beta + \frac{z}{\cos^2 \beta}. \quad (9)$$

联立(7)、(8)式可得

$$\frac{dz}{d\beta} = z \left/ \left[\cos^2 \beta \left(\frac{n \cos \beta - \sin \beta_3}{\cos \beta_3 - n \sin \beta} - \tan \beta \right) \right] \right. \quad (10)$$

透镜曲面曲线可由 $dx/d\beta$ 满足的微分方程[(9)式]和 $dz/d\beta$ 满足的微分方程[(10)式]确定,利用 Runge-Kutta 高精度数值算法求解方程即可得到曲面曲线的数值解^[9-10]。计算可得截断误差为 $O(h^5)$, h 为计算步长。为体现该匀光透镜的小聚光角度特点,选取较小的光斑半径 R ,使得光束的发散角度较小,计算中选用的参数为:透镜材料折射率 $n = 1.5$,光源与透镜的距离 $z = 3$ mm,光源与接收平面的距离 $H_0 = 50$ mm,接收平面上的光斑半径 $R = 30$ mm。计算得到的透镜曲面曲线如图 2 所示。

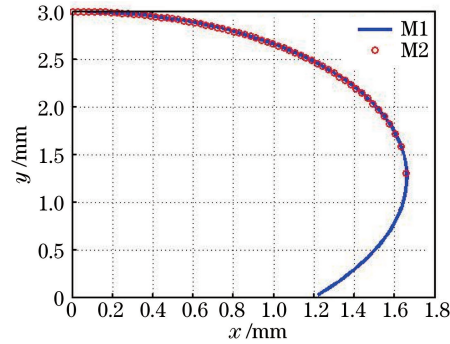


图 2 计算得到的透镜曲面曲线

Fig. 2 Curves of lens surface obtained from calculation

图 2 中, M1 为本文方法求得的透镜曲面曲线, M2 为直接对一阶微分方程 dz/dx 求解得到的曲面曲线,后者也是目前设计透镜最常用的数值算法。从图中可以看出, M2 对应的方法在计算至拐点处时无法继续,限制了透镜曲面面积^[11]; M1 对应的本文方法不受此限制,可接收到更多的光源光线,使得本文方法相较于传统方法在光效利用率上具有显著提高。由于 β 可达 $\pi/2$,对透镜表面进行减反处理后,理论估计的光效利用率接近 100%,该结果将在下文的仿真部分得到验证。

当光斑半径较小时, M2 曲线对应的方法所适用的半角值越来越小,光效利用率越来越低,从而失去了实际应用的价值。本文方法解决了这一问题,在不牺牲光效利用率的同时,得到的光斑半径较小,等效发散角度为 30° ,从而实现了高聚光、高亮度的匀光照明。

3 透镜轻量化处理

在透镜的设计方案中,光源浸没在透镜里不利于实际应用。一方面,该设计在实际结构中难以实现;另一方面,该设计采用了能够通过拐点的曲面形状,使得透镜较厚,材料成本较高,且不利于透镜的安装。为了解决这些问题,在透镜反面进行球面切削,将球面中心设为光源所在的位置^[12],如图 3 所示。该方案在不改变光路、保持原有均匀配光效果的前提下,大幅减小了透镜的体积和材料成本,同时便于透镜的安装,增强了该方案的可行性。半球曲面的倒模容易实现,有利于后期的透镜制备。

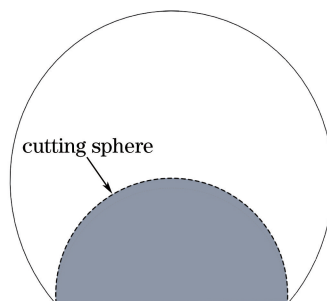


图 3 透镜纵切面视图

Fig. 3 Longitudinal section view of lens

4 透镜建模和应用场景仿真

根据计算的透镜曲面坐标,运用 SolidWorks 进行三维建模,结合 Light Tools 对光线进行追踪仿真^[13],仿真结果如图 4 所示。可以看出,光线均匀分布在接收平面上的光斑范围内,无杂散光点,符合设计预期。

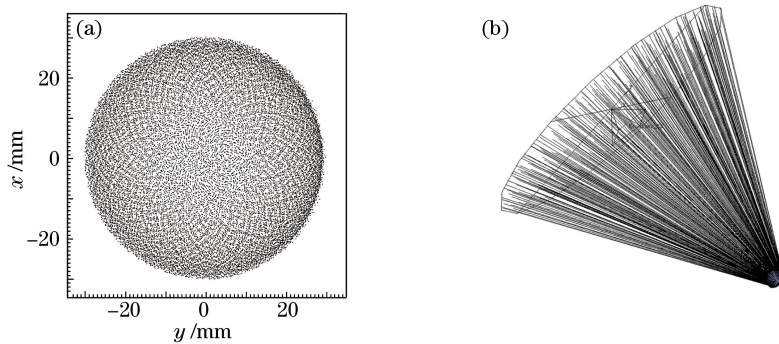


图 4 (a) 接收平面上的散射点图; (b) 光线传播轨迹示意图

Fig. 4 (a) Scattering spots in reception plane; (b) diagram of light propagation path

图 5 为使用 Light Tools 仿真得到的照度图。总光通量为 1 lm 的 LED 光源经过透镜聚光后,在 50 mm 处的接收平面上形成了半径为 30 mm 的光斑,平均照度为 262.67 lux,平均均方偏差仅为 0.43 lux,接收器的入射光通量为 0.993 lm,光效利用率高达 99%,说明所设计的透镜曲面可实现较为理想的光强均匀分布,且具有较高的光效利用率和高聚光效果。

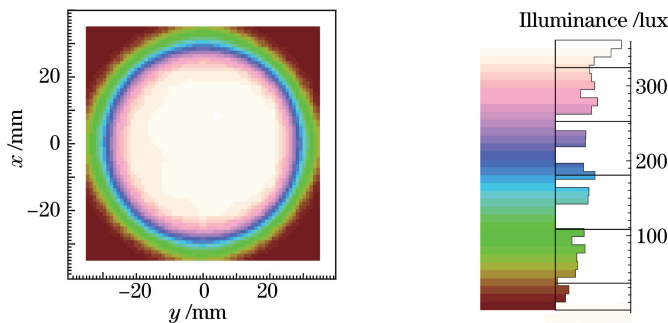


图 5 接收面上照度分布示意图

Fig. 5 Diagram of illuminance distribution in reception plane

目前常见的用于实现高聚光的透镜有菲涅耳透镜和反射式复合透镜。由于菲涅耳透镜具有菲涅耳环带结构以及反射式复合透镜具有反射面结构,因此这两种透镜的体积一般较大,不适合构建阵列光源。基于本文方法所设计的透镜,直径仅为 3.7 mm,适合构建高密度阵列光源,在实际应用中更具优势。

5 结 论

提出了一种超高光效利用率且高聚光的均匀配光透镜设计方法,该方法适用于 LED 光源的均匀配光,尤其适用于小聚光角度、高亮度、高功率密度的照明设计。在光路分析的基础上,推导了曲面满足的微分方程,构建了不受拐点限制的自由曲面,增大了透镜接收的光源光线角度。通过切削半球面的方法,减小了透镜厚度,为工业生产节省耗材。利用行业标准软件对透镜进行三维建模和光学仿真,并在真实应用的场景中得到了均匀配光效果的量化指标,从而验证了该设计方法的可行性。

参 考 文 献

- Guo Bingtao, Wang Xiaorui, Jing Weiguo, *et al.* Feature quantitative model and performance analysis of infrared imaging under strong radiation source disturbance[J]. Journal of Xidian University (Natural Science), 2014, 41(1): 64-68.
郭冰涛, 王晓蕊, 荆卫国, 等. 强光辐射源干扰红外成像特征量化模型与分析[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2014, 41(1): 64-68.

- 2 Li Xiaotong, Cen Zhaofeng. Geometrical optics, aberrations and optical design[M]. Zhejiang: Zhejiang University Press, 2014.
李晓彤, 岑兆丰. 几何光学·像差·光学设计[M]. 浙江: 浙江大学出版社, 2014.
- 3 Hao Xiang. Study on the design of LED illumination system based on freeform surface [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2008: 17-19.
郝翔. 基于自由曲面的LED照明系统研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2008: 17-19.
- 4 Chen J J, Wang T Y, Huang K L, *et al.* Freeform lens design for LED collimating illumination[J]. Optics Express, 2012, 20(10): 10984-10995.
- 5 Anh N D Q, Lai M F, Ma H Y, *et al.* Design of a free-form lens for LED light with high efficiency and uniform illumination[J]. Applied Optics, 2014, 53(29): 140-145.
- 6 Wu Jian, Liu Wencao, Yu Kuanxin, *et al.* Light-gathering ability of optic micro-lens molded on needing position[J]. Journal of Applied Optics, 2013, 1(1): 10-14.
吴坚, 刘文操, 俞宽新, 等. 原位成形光学微透镜的聚光性能研究[J]. 应用光学, 2013, 1(1): 10-14.
- 7 Xia Xunli, Yu Binhai, Mai Zhenqiang. Design on approximate Lambertian LED opto lens configuration[J]. Electro-Optic Technology Application, 2010, 25(1): 22-25, 37.
夏勋力, 余彬海, 麦镇强. 近朗伯光型LED透镜的光学设计[J]. 光电技术应用, 2010, 25(1): 22-25, 37.
- 8 Chen E, Liu P, Yu F H. Optimization design of single freeform lens based illumination system for CF-LCoS handheld pico-projectors[J]. Optik, 2013, 124(14): 1912-1916.
- 9 Gu Changxin, Computation physics[M]. Shanghai: Fudan University Press, 2010: 152-158.
顾昌鑫. 计算物理学[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2010: 152-158.
- 10 Wan Yunjia, Liu Jie, Lin Haobo, *et al.* Fresnel lens of freeform surface for realizing uniform light distribution on general LED light sources[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(6): 062201.
万运佳, 刘杰, 林浩博, 等. 一般LED光源均匀配光的自由曲面菲涅耳透镜[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(6): 062201.
- 11 Ding Yi, Zheng Zhenrong, Gu Peifu. Freeform lens design for LED illumination[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(6): 1486-1489.
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): 1486-1489.
- 12 Wu H, Zhang X M, Ge P. Double freeform surfaces lens design for LED uniform illumination with high distance-height ratio[J]. Optics & Laser Technology, 2015, 73: 166-172.
- 13 Wang Le. Computer simulation and the luminaire design of LED illumination[J]. Zhaoming Gongcheng Xuebao, 2007, 18(1): 25-30.
王乐. LED应用于照明的计算和仿真[J]. 照明工程学报, 2007, 18(1): 25-30.