

# 一般 LED 光源均匀配光的自由曲面菲涅耳透镜

万运佳 刘杰 林浩博 熊晖

湖北大学物理与电子科学学院, 湖北 武汉 430062

**摘要** 提出了一种菲涅耳透镜的普适设计方法,可适用于广义朗伯分布的 LED 光源,能够同时实现聚光和均匀配光。该方案能够克服传统透镜均匀配光聚光效果不佳的问题,得到的菲涅耳透镜具有聚光比率高、厚度薄、数值孔径较大、光效利用率较高等优点,有助于充分改善 LED 光源的照明质量,尤其适用于大发光角度的 LED 光源。在理论设计的基础上,利用专业软件对透镜进行 3D 建模和仿真,结果进一步验证了该方案的有效性和可靠性。

**关键词** 光学设计;菲涅耳透镜;自由曲面;均匀配光;LED 光源;广义朗伯分布

**中图分类号** O439 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.062201

## Fresnel Lens of Freeform Surface for Realizing Uniform Light Distribution on General LED Light Sources

Wan Yunjia Liu Jie Lin Haobo Xiong Hui

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

**Abstract** A general design method of Fresnel lens is proposed, which can be applied to LED light sources of general Lambert distribution, and the focusing and uniform light illuminance are realized simultaneously. The proposed method overcomes the imperfect focusing and uniform light illuminance optical effects of traditional lens. And the obtained Fresnel lens has the advantages of high focusing rate, thin thickness, large numerical aperture, and high efficiency of light extraction, which is beneficial to improving the lighting quality of LED sources. The lens is especially suitable for LED sources of large emission angle. Based on the theoretical design, 3D modeling of the lens and simulation are carried out by professional software, and the results verifies the validity and reliability of the proposed method.

**Key words** optical design; Fresnel lens; freeform surface; uniform light distribution; LED light source; general Lambert distribution

**OCIS codes** 220.4298; 230.3670; 220.3620

## 1 引言

发光二极管(LED)是一种节能环保的新型固态半导体发光器件<sup>[1-2]</sup>。由于 LED 光源体积较小,其一次配光仅能满足基本的发光要求。要适应不同环境的照明需求,还需在一次配光的基础上通过加装透射或反射式光学组件,进行二次配光,改变 LED 光源的发光特性。然而受限于透镜的尺寸和材料,传统透镜结构容易导致配光畸变和反射损失的问题,并且不能充分利用光源的出光,影响到整灯的出光效率和质量。

为了实现均匀配光的效果,有学者提出自由曲面透镜的设计方法<sup>[3-5]</sup>。然而,该方案要求光源浸没在透镜材料中,在实际工艺中实现难度较大。并且,由于自由曲面的弯折度较大、透镜整体较厚,不利于光源的小型化,因此,如何改善透镜的形式,在调节 LED 光源照度分布的同时,使其与光源具有良好的匹配度,进一步

**收稿日期:** 2015-12-28; **收到修改稿日期:** 2016-01-20; **网络出版日期:** 2016-05-10

**基金项目:** 湖北大学引进人才科研启动项目(091474)

**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、光学工程方面的研究。

E-mail: xhui\_hbu@163.com(通信联系人)

提高 LED 光源的出光效率,成为提升 LED 照明器件性能所面临的问题,需要寻找不同于传统透镜的新型透镜模型来解决。

基于这一问题,本文提出一种自由曲面菲涅耳透镜的设计方法,用以改良 LED 光源的光强分布特性。菲涅耳透镜曾用于紫外 LED 光源固化系统的聚焦问题<sup>[6]</sup>,然而针对照明系统中的均匀配光要求,需要全新的设计。该方法能够根据光源的配光特性,得到菲涅耳透镜组的结构参数,精确实现均匀聚光效果。值得注意的是,该方法不仅适用于朗伯分布的 LED 光源,也适用于非标准朗伯分布的 LED 光源,具有广泛的适用性。

## 2 数学模型

设光源的发光角为  $\theta$ ,一般地,LED 光源的光强满足广义朗伯分布<sup>[7-8]</sup>,可表示为

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

式中  $I_0$  为正入射方向上的光强, $m$  为大于零的实数,经过透镜界面折射后,光线传播方向发生改变。如图 1 所示,设透镜材料的折射率为  $n_1$ ,光源的像对应的出射角为  $\alpha$ ,则光强分布变为

$$I(\alpha) = n_1^2 I_0 \cos \alpha (1 - n_1^2 \sin^2 \alpha)^{\frac{m-1}{2}}, \quad (2)$$

设光源至透镜下界面的距离为  $h$ ,则光源像点至透镜下界面的距离为  $\alpha$  的函数,用  $d$  表示为

$$d = n_1 h \frac{\cos \alpha}{\sqrt{1 - n_1^2 \sin^2 \alpha}}, \quad (3)$$

将光源的像点等效看作一系列新的光源,发光角度  $\alpha_0$  内的光通量即为  $I(\alpha)$  对立体角元的积分,用  $I_c(\alpha_0)$  表示为

$$I_c(\alpha_0) = \int I(\alpha) d\Omega = \frac{2\pi I_0}{m+1} [1 - (1 - n_1^2 \sin^2 \alpha_0)^{\frac{m+1}{2}}]. \quad (4)$$

为了满足均匀分布,接收平面上任意区域内的照度应正比于其面积。设光斑半径为  $R$ ,对应的光源发光角度上限为  $\alpha_c$ ,则和任意  $\alpha_0$  对应的光斑半径  $r$  和总光斑半径  $R$  之比的平方,应等于光通量  $I_c(\alpha_0)$  和  $I_c(\alpha_c)$  的比值,即

$$r = \sqrt{\frac{I_c(\alpha_0)}{I_c(\alpha_c)}} R = \sqrt{\frac{1 - (1 - n_1^2 \sin^2 \alpha_0)^{\frac{m+1}{2}}}{1 - (1 - n_1^2 \sin^2 \alpha_c)^{\frac{m+1}{2}}}} R. \quad (5)$$

为了得到透镜的曲面形状,可以依据光线经过透镜后的方向变化求出透镜的曲面参数。如图 1 所示,由几何关系,得到  $\cos \phi_1$  和  $\cos \phi_2$  的表达式为

$$\cos \phi_1 = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}, \cos \phi_2 = \frac{r - x}{\sqrt{(r - x)^2 + (H - y)^2}}, \quad (6)$$

式中  $H$  为光源像点至接收平面的距离,随  $\alpha$  变化而变化。设透镜材料的折射率为  $n_1$ ,由光折射定律,可得透镜上任意一点  $(x, y)$  所在的自由曲线的斜率为

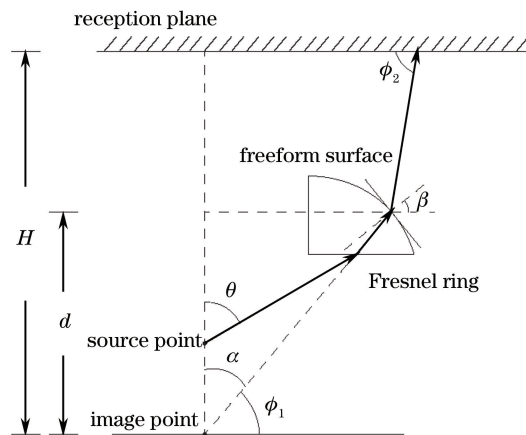


图 1 光线经过菲涅耳透镜的参数示意图

Fig. 1 Parameters diagram of light passing through the Fresnel lens

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{1}{\tan\beta} = \frac{n_1 \cos\varphi_1 - \cos\varphi_2}{\sin\varphi_2 - n_1 \sin\varphi_1} \quad (7)$$

由于  $\alpha$  不同时,光源像点至透镜的距离  $d$  不同,因此只能对透镜曲面分段求解,在局部将  $d$  近似为一个定值。据此,采取菲涅耳透镜的设计方案,对每一个局部  $d$  设计一段透镜曲面。透镜曲面的形状由  $dy/dx$  满足的微分方程决定,可利用 Runge-Kutta 数值方法求解该方程<sup>[9]</sup>。

### 3 计算结果分析

计算过程采用四阶 Runge-Kutta 方法,具有较高的计算精度,局部计算误差为  $O(h^5)$ ,  $h$  为计算步长。计算中采用的各参数如表 1 所示。

表 1 计算参数一览表  
Table 1 Parameters list in calculation

Parameter	Signification	Value
$n_1$	Refractive index of lens material	1.35
$h$	Distance from light source to lens	15 mm
$H_0$	Distance from light source to reception plane	100 mm
$R$	Radius of light spot on reception plane	80 mm
$N$	Number of Fresnel rings on lens	20

为了显示薄型菲涅耳透镜的优势,减小透镜至光源的物距,增大透镜半径和物距之比,使得透镜能够接收的光线发散角超过  $65^\circ$ ,具有广泛的光源适用性。考虑光源发光特性为一般朗伯分布,分别对  $m$  取 1、1.5、2 的情况进行计算,得到透镜横截面曲线结果如图 2 所示。

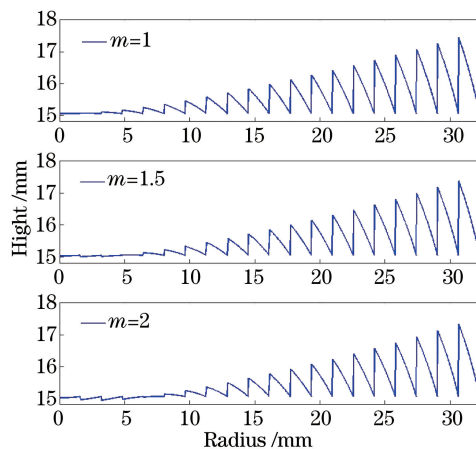


图 2 对应不同朗伯分布光源的菲涅耳透镜横截面曲线

Fig. 2 Cross section curves of Fresnel lens applied to different Lambert distributions

以  $m=1.5$  为例,将数值结果导入 Solidworks 进行三维(3D)建模,得到菲涅耳透镜模型如图 3 所示。其尺寸为半径 32 mm、最大厚度 2.38 mm、菲涅耳环带数为 20。得益于透镜的平面基底设计,相比起传统光学透镜,可以方便地减小透镜至光源的距离,从而增加透镜的数值孔径,提高光源光效利用率。计算中设定的光源物距为 15 mm,对应数值孔径等于 0.91,容许的光源发散角达到  $65^\circ$ 。模拟采用的光源总光通量为 1 lm,中心波长为 550 nm。

进一步地将透镜三维模型导入 Light tools,还原真实应用场景,对配光效果进行仿真,得到接收平面上的光线散射点如图 4(a)所示,光线传播轨迹如图 4(b)所示。可以看出,经过菲涅耳透镜汇聚后的光线,分布在预设光斑半径内,且照度分布较为均匀,达到设计要求。如果仔细观察光线位置,会发现同心圆环排布的特征,和菲涅耳透镜的环带相对应。由于环带分布较为致密,不影响一定区域内照度分布的均匀性。

如果把图 4(a)中光线的位置分布转换为照度,可得到图 5 的结果。可见总光通量为 1 lm 的 LED 光源,经过透镜聚光后,在 100 mm 处的接收平面上平均照度为 30 lx,照度均方差为 1.6 lx,均匀性较好。因而,设

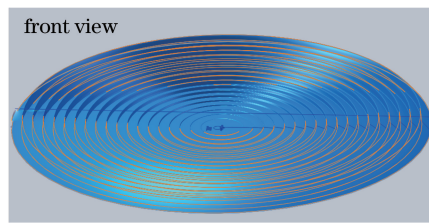


图 3 菲涅耳透镜的 3D 建模示意图

Fig. 3 Schematic diagram of Fresnel lens 3D model

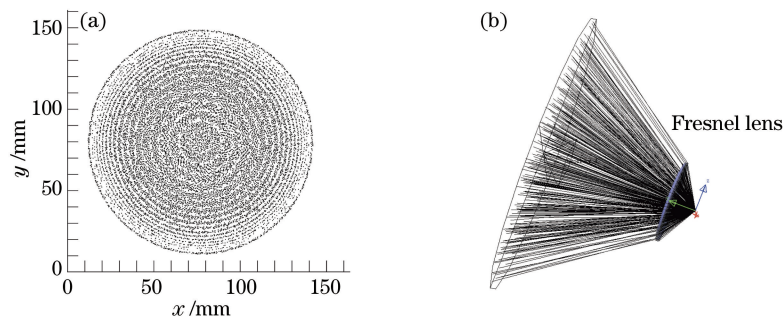


图 4 (a) 接收平面上的光线散射点图; (b) 经过菲涅耳透镜光线传播轨迹示意图

Fig. 4 (a) Scattering light spot on the reception plane; (b) schematic diagram of light trace passing the Fresnel lens

设计的菲涅耳透镜达到了较为理想的均匀聚光效果,具有厚度薄、数值孔径大、光效利用率高等优点。且透镜的平面基底设计便于安装,能够大幅减小光源模块体积。

对图 5 中的照度进行积分,可计算出光源光效利用率为 88.3%,达到较高水平,体现了薄型菲涅耳透镜的优势。总体来看,该方案的优点如下:

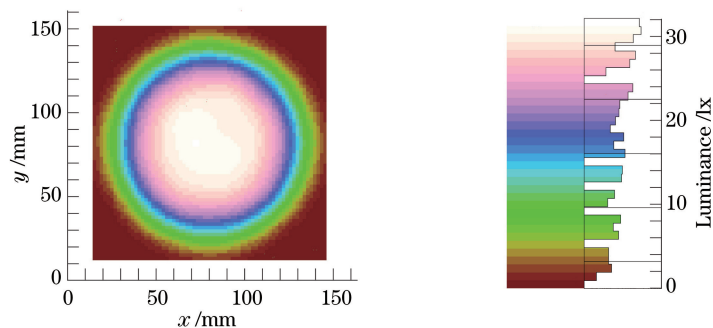


图 5 接收平面上的照度分布示意图

Fig. 5 Schematic diagram of illuminance distribution on the reception plane

1) 菲涅耳透镜是由聚烯烃材料注压而成的薄片,镜片由从小到大的同心圆环构成,具有面积大、厚度薄、成本低廉等优点,制备工艺简单<sup>[10]</sup>。

2) 菲涅耳透镜具有平整的下界面,能够尽可能靠近光源,实现较高的数值孔径,尤其适用于发散角度较大的光源(例如紫外 LED 光源),提升了光源光效利用率,并增强了透镜对不同光源的适用性。

3) 菲涅耳透镜采用分区设计的方式,将其分割为较为致密的菲涅耳环带,不同环带对应不同角度的光线,单独设计每一个透镜环带的曲面,实现精确配光。

4) 菲涅耳透镜的环带个数较多,减小了透镜环带的高度,因而大幅减小了透镜厚度,其半径与厚度之比可达 13.6 以上,有利于减小灯具体积,并降低灯具的装配成本。

## 4 结 论

提出了一种新型自由曲面菲涅耳透镜的设计方法,能够实现广义朗伯分布 LED 光源的均匀聚光,消除

光强因角度分布不均造成的眩光感。该菲涅耳透镜具有厚度薄、成本低的优点,非常适合工业化生产。光学性质方面,该透镜数值孔径较大、光效利用率较高、适用性广泛,且配光效果精确,能充分发挥 LED 光源的光效优势,有利于 LED 照明的二次节能,提供环保、舒适、美观的照明环境。

### 参 考 文 献

- 1 Chen Yu. LED manufacturing technologies and applications[J]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013: 2-28.  
陈宇. LED 制造技术与应用[J]. 北京: 电子工业出版社, 2013: 2-28.
- 2 Liu Zuming, Li Xiaotao. LED lighting design and applications[J]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014: 1-33.  
刘祖明, 黎小桃. LED 照明设计与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014: 1-33.
- 3 Hao Jian, Liu Hua, Sun Qiang, *et al.*. Optimization of freeform surface lens for collimating illumination of LED[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(3): 032302.  
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): 032302.
- 4 Li Denggao, Yin Songfeng, Ling Yongshun, *et al.*. A feedback design method of freeform reflector for uniform illumination with extended sources[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(4): 0422001.  
李登高, 殷松峰, 凌永顺, 等. 用于扩展光源均匀照明的自由曲面反馈设计[J]. 光子学报, 2014, 43(4): 0422001.
- 5 Gui Li, Sun Xiuhui, Yin Shaoyun, *et al.*. Modeling error analysis and compensation design for free-form uniform illumination lens[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(10): 1022008.  
桂立, 孙秀辉, 尹韶云, 等. 自由曲面匀光透镜的建模误差分析及补偿设计[J]. 光学学报, 2015, 35(10): 1022008.
- 6 Kong Xiaohui, Bai Yanzhu, Yang Yali. Optical system design and simulation of LED line source for ultraviolet curing[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0222002.  
孔晓慧, 白延柱, 杨雅丽. 紫外光固化 LED 线光源的光学系统设计及仿真[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0222002.
- 7 Zhang Chengliang. Freeform surface lens design for LED uniform illumination[J]. Electronic Science and Technology, 2014, 27(9): 172-177.  
张成亮. 一种实现 LED 均匀圆斑照明透镜的自由曲面设计[J]. 电子科技, 2014, 27(9): 172-177.
- 8 Ding Yi, Zheng Zhenrong, Gu Peifu. 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.
- 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 Davis A, Kühnlenz F. Optical design using Fresnel lens[J]. Optik & Photonik, 2007, 2(4), 52-55.