

基于LED光源的新型准直透镜的设计

白莹¹ 谢国庆² 林文硕¹ 钟勇³

¹福建工程学院数理系, 福建 福州 350108; ²福建师范大学软件学院, 福建 福州 350108;

³福建工程学院机械与汽车工程学院, 福建 福州 350108

摘要 利用复合抛物面与自由曲面相结合的方法,设计出一款体积小、能效高的LED光源准直配光透镜。将LED光源发出的光线分两部分分别进行配光设计。光源发出的一部分发散角为 $0^\circ\sim 20^\circ$ 的光线经过球冠折射收缩发散角后再利用自由曲面准直;光源发出的另一部分发散角为 $20^\circ\sim 80^\circ$ 的光线经过复合抛物面折射收缩发散角后再经自由曲面准直。结果显示,LED光线经此复合型准直透镜后光束发散角小于 4° ,光能利用率达90%,可满足目前对光源远距离准直需求。

关键词 光学设计;准直;复合抛物面;自由曲面

中图分类号 O435.2 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.052204

New Design of Collimating Lens Based on LED Light Source

Bai Ying¹ Xie Guoqing² Lin Wenshuo¹ Zhong Yong³

¹Department of Mathematics and Physics, Fujian University of Technology, Fuzhou, Fujian 350108, China

²Faculty of Software, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350108, China

³College of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou, Fujian 350108, China

Abstract By combining the compound paraboloid with free-form surfaces, a small, energy-efficient collimating lens based on LED light source is designed. The optical design is carried on in two parts separately. One part of the light, whose divergence angle between 0° and 20° , is collimated through a spherical cap contracted the divergence angle and a free-form surface. The other part of light, whose divergence angle between 20° and 80° , is collimated through a compound paraboloid contracted the divergence angle and a free-form surface. The results show that, light angle is less than 4° through this complex collimating lens, and the efficiency of light energy utilization is up to 90%, which could meet requirements for light collimation in current distance.

Key words optical design; collimation; compound paraboloid; free-form surface

OCIS codes 220.3620; 220.4298; 220.4830

1 引言

LED光源因具有体积小、效率高、能耗低、寿命长、无污染等优点,日益得到广泛的应用^[1-7]。然而由于LED芯片封装光源的发散角大多在 80° 左右,在远距离照明时,能量比较分散,照明面上的照度较低,在应用于手电筒、矿灯、港口或码头信号投射灯时,需要对LED输出光进行准直^[8]。由于大部分透光材料的单一表面最大偏折角一般在 $40^\circ\sim 50^\circ$ 之间,对于发散角在 80° 左右的光线无法进行准直,因此,需要对LED光源发出的大角度光束和小角度光束分别利用全内反射曲面与折射曲面结合的方式进行准直处理^[8]。自光源发出的发散角较小的光线通过球面曲面折射准直,发散角较大的光线通过抛物面反射准直。为收集较大角度范围的光线,要求抛物面具有较大深度与口径,造成该准直透镜体积较大,光能损耗高。荆雷等^[9]通过数值求解等光程方程组的方法设计的准直透镜出光口径为 $\Phi 50\text{ mm}$,光束发散角为 5.4° 。为进一步缩小准直透镜体积及其光束发散角,本文提出复合抛物面与自由曲面相结合的新型LED准直光学系统。

收稿日期: 2013-12-31; 收到修改稿日期: 2014-02-21; 网络出版日期: 2014-04-10

基金项目: 福建省闽台合作重点项目(2011 I 0001)、福建省教育厅项目(JA09184)

作者简介: 白莹(1976—),女,硕士,讲师,主要从事光学元件设计方面的研究。E-mail: hz_baiying@163.com

2 新型LED准直透镜母线设计

新型LED准直透镜平面图如图1所示。中间半球面为LED光源罩,AB段为半径为R的圆弧,BC段为与z轴具有一定小夹角δ的直线,CD为水平直线,DE为复合抛物线,FG与GH为自由曲面,该平面图绕z轴旋转,即可得到准直透镜的立体图。下面对准直透镜设计原理按对不同发散角光线准直分两部介绍。

2.1 小角度光线准直部分母线设计

小角度光线准直光路如图2所示。自O点发出的发散角θ∈[0,θ_m]的光线,入射到球冠AB点(x₁,z₁),折射光线自自由曲面点(x₂,z₂)射出,自由曲面在该点的斜率由准直条件给定。

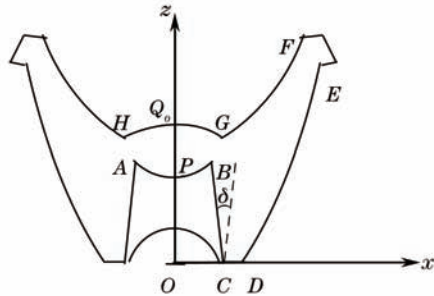


图1 新型LED准直透镜平面图

Fig.1 Planar graph of new collimating lens

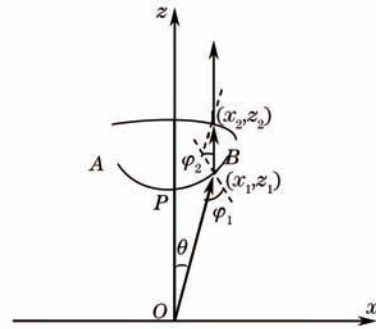


图2 小角度光线准直光路

Fig.2 Collimating light path for small angle

设球冠AB上点(x₁,z₁)距O点距离为h,球冠曲率半径为R,则点(x₁,z₁)的坐标可表示为

$$\begin{cases} x_1 = \frac{(R+h) - \sqrt{R^2 - 2Rh \tan^2 \theta - h^2 \tan^2 \theta}}{\tan \theta + \tan \theta} \\ z_1 = \frac{(R+h) - \sqrt{R^2 - 2Rh \tan^2 \theta - h^2 \tan^2 \theta}}{1 + \tan^2 \theta} \end{cases} \quad (1)$$

当θ=θ_m时点(x₁,z₁)的坐标即为B点的坐标。

$$\varphi_1 = \theta + \arccos \frac{R+h-z_1}{R} \quad (2)$$

由折射定律^[10]可得: φ₂ = arcsin((n_o/n_i) sin φ₁), 点(x₁,z₁)处折射光线斜率为 tan((π/2 - φ₂ + arccos((R+h-z₁)/R)))。

自由曲面Q₀G上点的离散坐标的计算如图3所示。

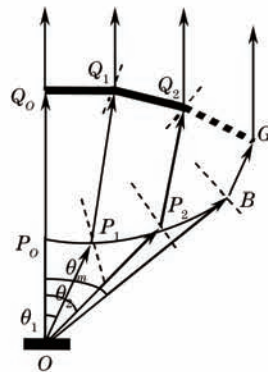


图3 自由曲面Q₀G上点的离散坐标的计算原理图

Fig.3 Calculation principle of discrete coordinates points in the free surface Q₀G

自由曲线起点Q₀点处入射光线、出射光线均沿光轴方向,其法线方向沿光轴方向,切线沿x方向。Q₀点处的切线与来自P₁点的光线相交于点Q₁(X₁,Z₁)处,由点Q₁处入射光线、出射光线斜率可求该点法线斜率,进而求出其切线斜率,点Q₁处的切线与来自P₂点的光线交于点Q₂(X₂,Z₂)处,用这种方法可求出Q₀G上任一点的离散坐标。由光线OB的光束发散角,可求末点G点切线斜率,进而求出G点坐标。

2.2 大角度光线准直部分母线设计

2.2.1 复合抛物反射面母线的方程

如图4所示,抛物线1方程为

$$z = ax^2 + c, \quad (3)$$

其焦点在坐标原点, z 轴为其对称轴。抛物线1及其对称轴绕原点逆时针旋转 ε 角并截掉 x 轴以下部分, 得到抛物线2。

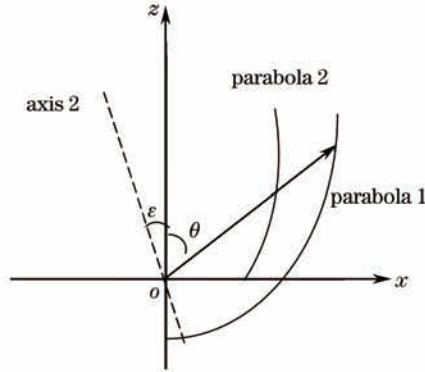


图4 复合型抛物线的建立

Fig.4 Establishment of a compound parabola

则抛物线2的方程为

$$az'^2 \sin^2 \varepsilon + (ax \sin 2\varepsilon - \cos \varepsilon)z' + ax'^2 \cos^2 \varepsilon + x' \sin \varepsilon + c = 0, \quad x > 0, y > 0, \quad (4)$$

式中 a, c 为待定参数。将抛物线2绕 z 轴旋转一周, 可得复合抛物反射面。由图4可知, 要控制自原点 O 附近发出的相同发散角 θ 的光线, 抛物线2占用的空间更小。

2.2.2 大角度光线准直部分母线设计

大角度光线准直光路如图5所示。

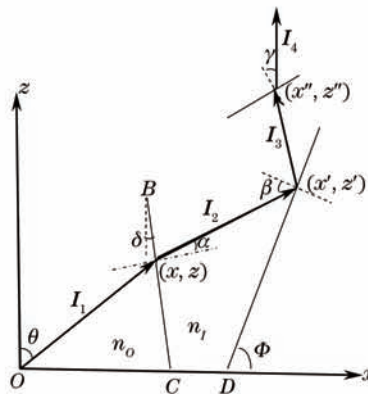


图5 大角度光线准直光路

Fig.5 Collimating light path for big angle

由 B 点坐标及 δ 倾角可求出 C 点 x 方向坐标为 $x_C = x_B + z_B \tan \delta$, D 点 x 方向坐标为 $x_D = x_B + z_B \tan \delta + d$ 。与 z 轴夹角为 $\theta \in [\theta_m, \theta_M]$ 的出射光线 I_1 , 经 BC 面点 (x, z) 折射, 折射光线为 I_2 , I_2 以入射角 β 经复合抛物面点 (x', z') 后发生全反射, 反射光线 I_3 经自由曲面准直射出, 出射光线 I_4 与自由曲面夹角 γ , 要求其 z 轴夹角小于 4° 。

I_1 在 BC 上的入射点坐标 (x, z) 可表示为

$$\begin{cases} x = (x_B + z_B \tan \delta) \tan \theta / (\tan \theta + \tan \delta) \\ z = (x_B + z_B \tan \delta) / (\tan \theta + \tan \delta) \end{cases} \quad (5)$$

I_2 的斜率及折射角 α 可由折射定律计算得出。

$$k_2 = \frac{z' - z}{x' - x} = \tan(\delta + \alpha), \quad (6)$$

$$\alpha = \arcsin[\cos(\delta + \theta)n_o/n_l], \quad (7)$$

对复合抛物线(4)式求导,可得点 (x',z') 处切线斜率:

$$\frac{dz'}{dx'} = \tan \varphi = -\frac{2a \sin^2 \varepsilon z' + a \sin 2\varepsilon x' - \cos \varepsilon}{2a \cos^2 \varepsilon x' + a \sin 2\varepsilon z' + \sin \varepsilon}, \quad x > 0, \quad (8)$$

则该点法线斜率为

$$k_n = \frac{2a \cos^2 \varepsilon x' + a \sin 2\varepsilon z' + \sin \varepsilon}{2a \sin^2 \varepsilon z' + a \sin 2\varepsilon x' - \cos \varepsilon}. \quad (9)$$

为使射到复合抛物面上的光线均发生全反射,令 $\theta = \theta_m$ 时,射到复合抛物线点 (x',z') 的光线刚好发生全反射,由全反射定理,可得:

$$\tan \phi_m = \tan \left[\frac{\pi}{2} + (\alpha_{\max} + \delta) - \arcsin \frac{n_o}{n_l} \right]. \quad (10)$$

设此时反射光线恰好经过 G 点,则可确定(4)式中 a 、 c 的值。

不难看出,复合抛物线最高点 E 点坐标可由 B 点坐标定出。

光线 I_3 于点 (x'',z'') 处的入射角为

$$\varphi = \tau + (\beta + \varphi) - \frac{\pi}{2} - (\alpha + \delta). \quad (11)$$

I_3 经自由曲线出射,出射光线 I_4 , 出射角为 γ 。由折射定律 $\frac{\sin \gamma}{\sin \varphi} = \frac{n_o}{n_l}$ 可求出射角 γ , 设 $\tan \tau$ 为点 (x'',z'') 处曲线的斜率,且要保证 I_4 与 z 轴平行,则 $\tau = \gamma$ 。自由曲线 GF 上离散点的求解方法与 2.1 节中 Q_oG 上离散点的求法相同,在此不再阐述。

表1 透镜部分参数

Table 1 Part parameters of the lens

Symbol	Physical meaning	Value	Symbol	Physical meaning	Value
R	The curvature radius of circular arc AB	5 mm	a	Parameters of compound parabolic	0.116
h	Spherical cap height	5 mm	c	Parameters of compound parabolic	-4.53
d	Lens thickness of bottom	1 mm	ε	Parameters of compound parabolic	15°
θ_m	Light's angle into spherical cap	20°	x_E	x coordinate of highest point compound parabolic	8.00 mm
θ_M	Largest lighting angle	80°	z_E	z coordinate of highest point compound parabolic	10 mm
δ	Draft angle of lens	3°	x_G	Edge's x coordinate of free curve Q_oG	2.5 mm
n_l	Refractive index of lens	1.58	z_G	Edge's z coordinate of free curve Q_oG	7.0 mm
n_o	Refractive index of air	1	x_F	Edge's x coordinate of free curve GF	7.5 mm
x_B	Edge's x coordinate of pherical cap	1.97 mm	z_F	Edge's z coordinate of free curve GF	10.5 mm
z_B	Edge's z coordinate of pherical cap	5.41 mm	z_{Q_o}	Maximum height of free curve Q_oG	7.52 mm

3 准直透镜轮廓构造及系统光学仿真

在三维构造软件 Solidwork 中应用点放样的方法将以上得到的自由曲线 Q_oG 以及 GF 上的离散点各自放样连成自由曲线,再将此自由曲线与复合抛物线结合并旋转 360°,即可生成准直透镜实体。该透镜径向最大宽度为 16.5 mm,高度为 10.5 mm。将 3D 准直透镜模型导入光学仿真软件 tracepro 中,为简化设计过程,选用

光通为 70 lm, 发散角为 80° 的朗伯型 LED 光源, 出射光线设置 100 万条, 显示光线比例 1%, 大小为 $800\text{ mm} \times 800\text{ mm}$ 的目标平面距准直透镜 10 m, 得到如图 6 所示的准直光线。该准直光线光束发散角小于 4° 。

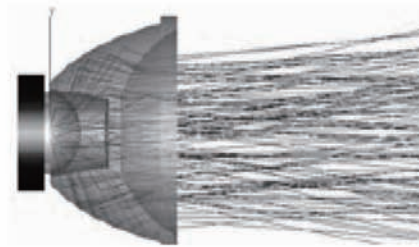


图6 准直光线

Fig.6 Collimating light

目标面上的照度如图 7 所示。光能利用率达 90%, 照度在 $700\text{ mm} \times 700\text{ mm}$ 的区域内分布相对均匀。

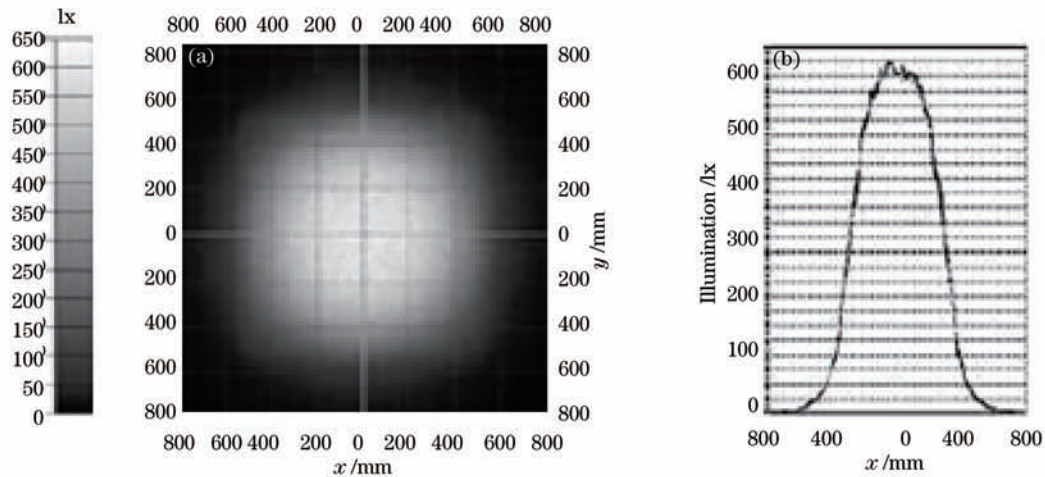


图7 准直透镜配光照度及其剖面图

Fig.7 Illuminance and its profile of TIR lens

4 结 论

设计了一款自由曲面与复合抛物面结合的折反式准直透镜。复合抛物面母线由基本抛物线绕焦点旋转、截断得到。自由曲面母线由根据光路计算得出的离散点放样得到。复合抛物面母线和自由曲面母线绕光轴旋转 360° 得到长度为 16.5 mm 、口径为 10.5 mm 的准直透镜实体, 并将其导入光学仿真软件 tracepro 中, 光线追迹结果显示准直光线光束发散角小于 4° , 光能利用率达 90%, 其在准直效果及体积方面均优于文献[9]提出的透镜模型。为简化设计过程, 采用了单个小功率朗伯型 LED 光源, 若其对大功率 COB 型 LED 光源进行准直配光, 光束发散角与光能利用率基本不变。所建立的准直透镜模型若制成产品, 在模具曲面加工过程可能会产生一定的附加误差, 相应的光束发散角也会受到一定影响。

参考文献

- 1 C C Sun, C Y Chen, H Y He, *et al.*. Precise optical modeling for silicate-based white LEDs [J]. Opt Express, 2008, 16(24): 20060-20066.
- 2 C C Sun, W T Chien, I Moreno, *et al.*. Analysis of the far-field region of LEDs [J]. Opt Express, 2009, 17(16): 13918-13927.
- 3 Luo Yi, Zhang Xianpeng, Wang Lin, *et al.*. Non-imaging optics and its application in solid state lighting [J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(7): 963-971.
罗毅, 张贤鹏, 王霖, 等. 半导体照明中的非成像光学及其应用[J]. 中国激光, 2008, 35(7): 963-971.
- 4 Deng Yuanding. Design Uniform Illumination Systems by Surface-Tailored Lens and Configurations of LED Arrays [D]. Taipei: Taiwan University of Science and Technology, 2006.

- 邓元鼎. 运用ST透镜与LED阵列的配置设计均匀照明系统[D]. 台北: 台湾科技大学, 2006.
- 5 C C Sun, T X Lee, S H Ma, *et al.*. Precise optical modeling for LED lighting verified by cross correlation in the midfield region [J]. *Opt Lett*, 2006, 31(14): 2193-2195.
- 6 Zongyuan Liu, Kai Wang, Xiaobing Luo, *et al.*. Precise optical modeling of blue light-emitting diodes by Monte Carlo raytracing [J]. *Opt Express*, 2010, 18(9): 9398-9412.
- 7 Zexin Feng, Yi Luo, Yanjun Han. Design of LED freeform optical system for toad lighting with high luminance/illuminance ratio [J]. *Opt Express*, 2010, 18(21): 22020-22031.
- 8 Fan Luqing, Li Xiangning, Wang Yu, *et al.*. TIR collimating lens design based on freeform surface [J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(2): 325-329.
- 樊露青, 李湘宁, 王 瑜, 等. 基于自由曲面的LED全反射准直透镜的设计[J]. *应用光学*, 2013, 34(2): 325-329.
- 9 Jing Lei, Liu Hua, Zhao Huifu, *et al.*. Compact collimator design for high-brightness light-emitting diode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(12): 1222001.
- 荆 雷, 刘 华, 赵会富, 等. 紧凑型高亮度发光二极管准直镜设计[J]. *光学学报*, 2011, 31(12): 1222001.
- 10 Ding Yi, Gu Peifu. 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.