

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0112-05

# 反射式发光二极管汽车前照灯的优化设计

余桂英 金 骥 朱旭平 林 敏

(中国计量学院计量测试工程学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要** 针对当前发光二极管(LED)灯具的高效率要求和汽车前照灯出射光束特点,根据非成像光学理论建立了新型LED抛物反射器优化设计的理论模型,实现了反射杯光能利用率的最大化和前灯出射光束的不对称光强分布,进而依据该模型设计了新型反射式LED汽车前照灯光学系统。利用 TracePro 软件对所设计的系统进行光线追迹仿真,结果表明不考虑反射率损失时的反射器光能利用率可达 96%以上,在 25 m 测试屏上近光出射光型具有鲜明的截止线,左右视野宽度大于 15 m;远、近光分布符合国标要求,且整灯外形结构尺寸仅为 160 mm×80 mm×30 mm。

**关键词** 光学设计;汽车前照灯;发光二极管;反射器;优化设计

中图分类号 O439;TM923.34 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s2.0112

## Optimal Design of Reflective Light Emitting Diode Automotive Headlamps

Yu Guiying Jin Ji Zhu Xuping Lin Min

(College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University,  
Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

**Abstract** For the requirement of high efficiency light emitting diode (LED) luminaries and the characteristics of automotive headlamp exit beam, based on non-imaging optical theory, a theory model for new type LED parabolic reflector optimal design is established to maximize the utilization of light energy of the reflection cup and to realize the asymmetric light intensity distribution of the headlamp exit beam. An optical system of new type reflective LED automotive headlamp is designed. By TracePro simulation it shows that the geometry collection rate of reflector reaches up to 96% without considering the loss. In the screen that places at 25 m the width of the field of view is greater than 10 m. The emitting light distribution of low-beam has a distinct cut-off line and the light distribution of high and low beam are both satisfying the national standard, with the structure size of entire lamp only 160 mm×80 mm×25 mm.

**Key words** optical design; headlamp; light emitting diode; reflector; optimal design

### 1 引 言

发光二极管(LED)光源被称为第四代汽车光源,与传统的汽车光源相比,具有可靠性高、寿命长、响应快、环保节能、抗冲击性好等优点,目前已广泛应用于车辆内照明和刹车灯、方向灯等车辆外部照明中。随着LED技术的快速发展,汽车前灯的光源也逐渐被LED取代<sup>[1~3]</sup>。

传统光源的汽车前灯有两种主流的设计方式:反射式前灯(FFR)和投射式前灯(PS)。投射式前灯<sup>[4]</sup>主要由光源、椭球反射器、挡板和球面透镜组成,结构紧凑,明暗截止线清晰,但光能利用率低,有色差。反射式前灯由光源、反射器(抛物反射镜、多

重反射镜或自由曲面反射镜)加配光镜构成。反射器为多重反射镜或自由曲面反射镜<sup>[5]</sup>时,能独立完成配光的任务,则不需另加配光镜。它具有无色差、光能利用率高、车灯高度低和空气动力学性能好等优点<sup>[6,7]</sup>。反射式车灯的光能利用率主要由反射器的反射率和收光率决定,一般反射器的口径越大,能量利用率就越高。

目前,LED前灯的设计方法也分投射式和反射式两种<sup>[8,9]</sup>,所设计灯具的光能利用率仅在50%左右。反射式LED前灯模块通常由半球抛物反射器加柱面配光镜构成<sup>[10]</sup>,每个LED都有自己独立的光学系统,整灯尺寸较大。现代汽车前部低而呈流线型,

基金项目:浙江省自然科学基金(Y104436)和浙江省科技计划(2008C21158)资助课题。

作者简介:余桂英(1965—),女,副教授,硕士,主要从事照明和测量方面的研究。E-mail: yuguiying11@163.com

留给汽车前照灯的口径越来越小,因此如何设计小口径、高光效的LED前灯反射器是急需解决的问题。

本文依据非成像光学理论,采用抛物柱面反射镜加平面反射镜的组合结构,多颗LED光源共用一个反射杯,实现了反射杯光能利用率最大化的目的,且结构简单、尺寸小。

## 2 非成像光学理论

### 2.1 光学扩展量与几何收光率

光学扩展量是非成像光学理论<sup>[11]</sup>中一个重要的概念,描述光束所通过的面积和光束所占有的立体角的积分,用于权衡所要求的面积和立体角,确定系统的能量收集比率,从而确定结构参数。光学扩展量定义<sup>[12]</sup>为

$$E = n^2 \iint \cos \theta dA d\Omega, \quad (1)$$

式中  $n$  为折射率,  $\theta$  是微元面积  $dA$  的法线与微元立体角  $d\Omega$  中心轴的夹角。光学扩展量既可用于评价光学元件对整个系统的能量利用率的影响,也可以描述光束本身。非成像光学理论因此越来越多地应用于照明领域的设计<sup>[13]</sup>。

反射器的光能利用率为经反射器后出射的光通量与光源总光通量之比。反射器的几何收光率定义为投射到反射器部分的光源扩展量与光源的总扩展量之比,是光源具有均匀空间光强分布时在给定的扩展量下反射器所能达到的能量利用率。几何收光率越大,反射器的光能利用率也越高。

### 2.2 LED 抛物反射器的几何收光率

设LED光源的发散角为  $\theta_0$ , 发光面积为  $dA_s$ 。根据(1)式,可以得到光源的扩展量为

$$E_0 = dA_s \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_0} \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi = \pi dA_s \sin^2 \theta_0. \quad (2)$$

根据(2)式可得朗伯型的LED光源的总扩展量为

$$E_0 = \pi dA_s. \quad (3)$$

图1所示为半杯旋转抛物面,朗伯型LED光源水平朝下置于焦点处,设  $\epsilon = \pi - \alpha$  为反射器对光源的收光角,其中  $\alpha$  为LED光源半锥角。由(1)式可得投射到反射器部分的光源扩展量为

$$E_\epsilon = dA_s \left( \epsilon - \frac{\sin 2\epsilon}{2} \right). \quad (4)$$

由(3),(4)式可求得抛物反射器的几何收光率为

$$\xi = \frac{1}{\pi} \left( \epsilon - \frac{\sin 2\epsilon}{2} \right). \quad (5)$$

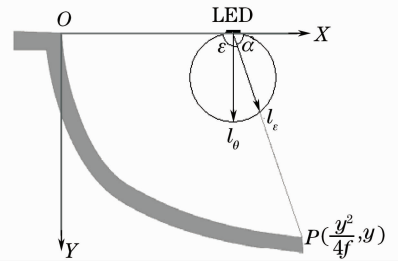


图1 反射器张角与LED光源辐射模型图  
Fig. 1 Reflector angle and LED light source radiation model

## 3 优化设计数学模型的建立

### 3.1 新型反射器的几何收光率

由图1可见,LED光源半锥角  $\alpha$  部分的光直射出被损失,这部分的光源扩展量为

$$E_\alpha = dA_s \left( \alpha - \frac{\sin 2\alpha}{2} \right). \quad (6)$$

在光源右边距离  $d$  加一平面镜  $M$ , 如图2,光源成镜像  $LED'$ , 使平面镜高度  $H$  等于

$$H = d \tan \alpha. \quad (7)$$

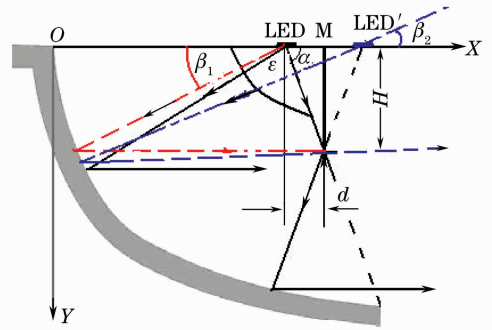


图2 新型反射器收光图

Fig. 2 Light collection map of the new type reflector

半锥角  $\alpha$  部分的光经平面镜反射投射到抛物镜后再出射,相当于  $LED'$  发出的光被收光角  $\epsilon$  的抛物镜反射。由于平面镜的影响,角度  $\beta_1$  和  $\beta_2$  部分的光被遮挡,它们的扩展量为

$$E_\beta = dA_s \left( \beta_1 + \beta_2 - \frac{\sin 2\beta_1 + \sin 2\beta_2}{2} \right). \quad (8)$$

则加平面镜后由反射系统反射出的光源扩展量为

$$E = E_\epsilon + E_\alpha - E_\beta. \quad (9)$$

由(3),(6),(8)和(9)式可求得新型反射器的几何收光率  $\xi'$  为

$$\xi' = \frac{1}{\pi} \left[ \pi - (\beta_1 + \beta_2) + \frac{\sin 2\beta_1 + \sin 2\beta_2}{2} \right]. \quad (10)$$

当距离  $d$  远小于焦距  $f$  时,  $\beta_2 \approx \beta_1$ , 则

$$\xi' \approx \frac{1}{\pi} [\pi - 2\beta_1 + \sin 2\beta_1]. \quad (11)$$

与抛物反射器不同,新型反射系统的几何收光率并不取决于抛物镜的口径,而是与  $\beta_1, \beta_2$  有关。当  $\beta_2 \approx \beta_1$  时,  $\xi'$  与  $\beta_1$  关系曲线如图 3 所示。当  $\beta_1$  小于  $36^\circ$  时,反射镜的挡光影响较小,反射器的几何收光率  $\xi'$  大于 0.9。

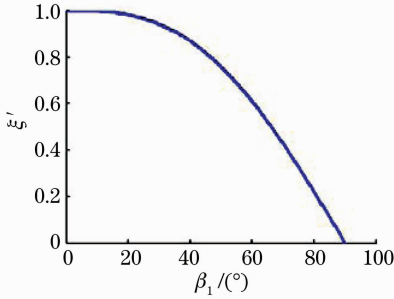


图 3 新型反射器几何收光率图

Fig. 3 Geometric light collection rate of the new type reflector

### 3.2 光源位置对出射光的影响

设半抛物镜在  $x-y$  平面上的方程为  $y^2 = 4fx$ , 光源  $A(x_0, y_0)$  发出的光在抛物面上任一点  $P(x, y)$  反射后与水平线成  $\beta$  角出射, 如图 4 所示。显然

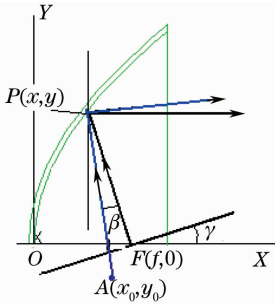
$$\cos \beta = \frac{\overrightarrow{PA} \times \overrightarrow{PB}}{(|\overrightarrow{PA}| |\overrightarrow{PB}|)}. \quad (12)$$


图 4 光源离焦影响分析图

Fig. 4 Analysis of the effect of the light source defocus

令  $x = kf, y = 2mf, x_0 = k_0f, y_0 = 2m_0f$ , 则有

$$\cos \beta = \frac{(m^2 - k_0)(m^2 - 1) + 4m(m - m_0)}{(m^2 + 1)\sqrt{(m^2 - k_0)^2 + 4(m - m_0)^2}}. \quad (13)$$

当光源沿光轴水平离焦, 即  $m_0 = 0$  时, 有

$$\cos \beta|_{m_0=0} = \frac{(m^2 - k_0)(m^2 - 1) + 4m^2}{\sqrt{(m^2 - 1)^2 + 4m^2}\sqrt{(m^2 - k_0)^2 + 4m^2}}. \quad (14)$$

由  $\frac{\partial \beta}{\partial m} = 0$ , 可得  $m = \sqrt{\frac{k_0}{3}}$ , 即在  $x = \frac{k_0}{3}f, y = 2\sqrt{\frac{k_0}{3}}f$  点处, 发散角  $\beta$  有最大值, 且

$$\beta_{\max}|_{m_0=0} = \arccos \left[ \frac{k_0(9 - k_0)}{(k_0 + 3)\sqrt{k_0^2 + 3k_0}} \right]. \quad (15)$$

令光源水平离焦系数  $\Delta k = k_0 - 1$ , 出射光最大发散角  $\beta_{\max}$  和水平离焦系数  $\Delta k$  的关系曲线如图 5 所示。图 5 表明, 随着水平离焦系数  $\Delta k$  由  $-1$  变到  $0$ , 最大发散角  $\beta_{\max}$  呈单调下降, 且在  $-0.4 \sim 0$  之间变化关系近似为线性关系; 而离焦系数  $\Delta k$  由  $0$  变到  $+1$  时, 最大发散角  $\beta_{\max}$  以近似线性的关系单调上升, 且变化率较负离焦小。

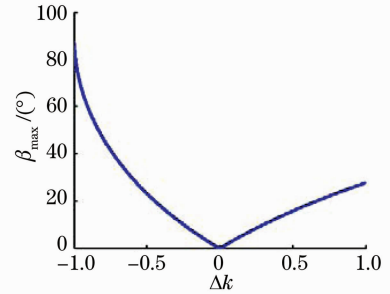


图 5 水平离焦系数  $\Delta k$  与最大发散角  $\beta_{\max}$  的关系

Fig. 5 Relation between the horizontal defocus coefficients and the largest divergence angle  $\beta_{\max}$

当  $k_0 = 1$ , 光源沿垂直光轴方向离焦, 由 (13) 式可得

$$\cos \beta|_{k_0=1} = \frac{(m^2 - 1)^2 + 4m(m - m_0)}{(m^2 + 1)\sqrt{(m^2 - 1)^2 + 4(m - m_0)^2}}. \quad (16)$$

令  $\frac{\partial \beta}{\partial m} = 0$ , 可得

$$m = [\sqrt{m_0^2 - 1} - m_0]^{1/3} + [\sqrt{m_0^2 - 1} - m_0]^{-1/3}. \quad (17)$$

此时对应点的发散角  $\beta$  最大。由光源垂直离焦系数  $m_0$  与最大发散角  $\beta_{\max}$  的关系曲线图 6 可见, 当垂直离焦系数  $m_0$  在  $-1 \sim 0$  之间变化时, 最大发散

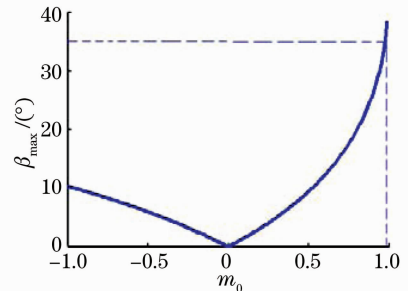


图 6 垂直离焦系数  $m_0$  与最大发散角  $\beta_{\max}$  的关系

Fig. 6 Relation between the vertical defocus coefficient and the largest divergence angle  $\beta_{\max}$

角  $\beta_{\max}$  近似线性地单调下降; 而  $m_0$  由 0 变到 1 时, 最大发散角  $\beta_{\max}$  单调上升, 且变化率较负离焦大。

### 4 反射式前照灯的优化设计与仿真分析

现代前灯的设计理念是大视野, 垂直方向达扩光  $10^\circ$ , 水平方向  $\pm 35^\circ$ , 远高于国标要求, 且路左边光束宽度要求大于路右边宽度。由公式 (14), 当  $\beta_{\max}$  为  $10^\circ$  时, 对应的  $k$  值约为 0.75, 考虑平面镜的镜像效果, 则 LED 光源尺寸取  $0.125 f$  左右, 即可满足出射光在垂直方向的扩散角要求。光源沿垂直光轴方向离焦, 由图 6 知采用抛物镜难于实现水平方向的  $35^\circ$  扩光, 通常还需加柱面配光镜, 但这不适合现代汽车前部低而呈流线型的特点。

灯具效率低于 90% 已不适应当前 LED 灯具设计的要求, 而要达到 90% 以上的几何收光率, 由公式 (5) 可知抛物反射器的收光角  $\epsilon$  要大于  $140^\circ$ , 口径要大于  $9.4 f$ , 如此大尺寸的反射器显然不适用于汽车前灯系统。

为实现 LED 汽车前照灯高效率和小尺寸的目的, 依据前述优化设计理论, 提出新型的抛物柱面反射器加平面镜的方案, 设计得到整灯尺寸仅  $160 \text{ mm} \times 80 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$  的新型反射式 LED 汽车前照灯, 其模型如图 7 所示。近光由图中上面 2 个

反射杯产生, 远光由全部 4 个反射杯模块构成。单个反射杯尺寸为  $70 \text{ mm} \times 35 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ , 反射杯为焦距  $10 \text{ mm}$  的抛物柱面镜和尺寸为  $2 \text{ mm} \times 16 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$  的平面镜。内置光通量  $70 \text{ lm}$ , 发光面尺寸  $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  的 LED 光源 4 颗, 前灯的总光通量为  $1120 \text{ lm}$ 。

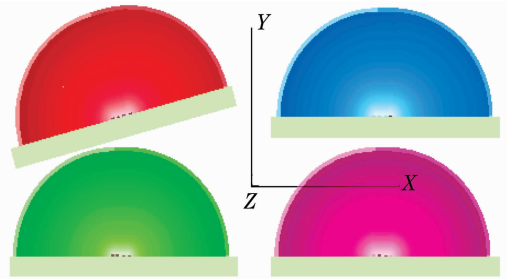


图 7 反射式 LED 汽车前照灯模型

Fig. 7 Reflective LED headlamp model

利用 TracePro 软件对新型前照灯模型进行仿真计算, 假设反射镜反射率为 1, 模拟测试屏的近光、远光比较结果如图 8, 图 9 所示, 可以看出落在观测屏上的远、近光光通量分别为  $1083.4 \text{ lm}$  和  $544.6 \text{ lm}$ , 对应的光能利用率分别为  $96.7\%$  和  $97.2\%$ , 如取反射器反射率 0.95, 灯具的效率也大于 90%。近光出射光型具有鲜明的截止线。表 1 是 25 m 测试屏上近光和远光的照度值表, 由表可见, 远、近光出射光型都符合国标要求。

表 1 测试屏幕要求限值与模拟结果

Table 1 Requirement limit of the test screen and the simulation result

Low beam			High beam		
Test point	Requirement limit /lx	Simulation result /lx	Test point	Requirement limit /lx	Simulation result /lx
B50L	<0.3	0.21	$E_{\max}$	>48&<240	70.1
75R	>12	16.45	HV	>0.8 $E_{\max}$	60.3
75L	<12	6.83	1125L	>24	37.8
50R	>12	21.83	1125R	>24	45.6
50L	<15	8.54	2250L	>6	16.1
50V	>6	16.05	2250R	>6	18.4
25L	>2	4.74	$I_{\max}/\text{cd}$	>18000	31520
25R	>2	11.03			
	Any point of the third district			<0.7	<0.7
	Any point of the second district			>3	>3
	Any point of the first district			<2 $E_{50R}$	<43.66

### 5 结 论

分析了影响抛物反射器几何收光率的因素, 利用平面反射器有效地提高了反射杯的光能利用率; 建立了抛物反射器离焦量与出射光发散角的解析关系式, 并从水平和垂直两个方向分析了离焦量对最

大发散角的影响。依据所建立的优化设计理论设计了新型的反射式 LED 汽车前照灯, 该反射器的光能利用率可达 96.7% 以上, 在 25 m 测试屏上左右视野宽度大于 15 m, 近光出射光型具有鲜明的截止线, 远、近光分布符合国标要求。整灯外形结构简

单,尺寸小,且符合现代汽车前灯的大视野要求。

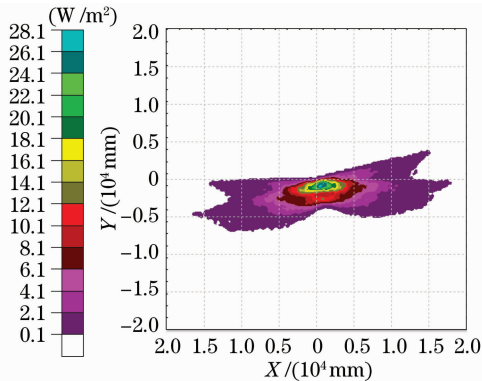


图 8 近光照度图

Fig. 8 Low beam illumination map

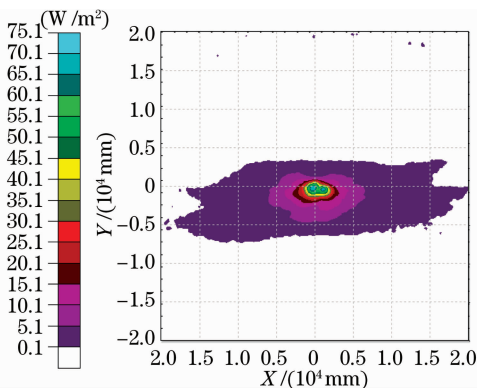


图 9 远光照度图

Fig. 9 High beam illumination map

### 参 考 文 献

- 1 Michael Hamm, Wolfgang Huhn. Design claims and technical solution steps generating the world first full LED headlamp[J]. SAE, 2008, (1): 337
- 2 Jih-Tao Hsu, Wen-Liang Wang. Automotive forward lighting with use of high flux white light-emitting-diodes[J]. SAE, 2006, (1): 104

- 3 Karsten Eichhorn. LEDs in automotive lighting [C]. SPIE, 2006, **6134**: 613405
- 4 V. Prasanna Kumar, R. Lakkumanan, K. Prakasan. Computer aided optical design of reflectors in automotive headlights [C]. Proc. Institution of Mechanical Engineers, 2006, **220** (4): 415~424
- 5 Wang Xiao, Liu Huixia, Yi Yong *et al.*. Computer simulation design and illuminating simulation of automobile freeform headlamp reflector [J]. J. System Simulation, 2006, **18** (2): 496~499  
王 霄,刘会霞,易 勇 等. 汽车自由曲面前照灯反射器仿真设计及照明模拟[J]. 系统仿真学报, 2006, **18**(2): 496~499
- 6 Jiang Jinbo, Du Xue, Li Rongbin. Design and fabrication of freeform reflector for automotive lighting system [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2008, **19**(3): 46~56  
蒋金波,杜 雪,李荣彬. 汽车前照灯系统的设计及超精密自由曲面加工技术[J]. 照明工程学报, 2008, **19**(3): 46~56
- 7 Jianghong Jiao, Ben Wang. Etendue concerns for automotive headlamps using white LEDs [J]. SPIE, 2004, **5187**: 234~242
- 8 Su Shengjun, Chen Xiangxi, Shi Weibin *et al.*. Design of automobile ellipsoid headlight based on high power LED [J]. Semiconductor Technology, 2007, **32**(8): 673~676  
苏胜君,陈祥熙,施伟斌 等. 基于大功率 LED 的汽车多椭圆前照灯设计[J]. 半导体技术, 2007, **32**(8): 673~676
- 9 Tetsuaki Inaba, Shinya Watanabe, Yuji Yamada. LED headlamp development for mass production [J]. SAE, 2008, (1): 339
- 10 Jianghong Jiao, Ben Wang. High efficiency reflector optics for LED automotive forward lighting [C]. SPIE, 2007, **6670**: 66700M
- 11 Luo Yi, Zhang Xianpeng, Wang Lin *et al.*. Non-imaging optics and its application in solid 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
- 12 W. Cassarly. Nonimaging Optics: Concentration and Illumination [M]. New York: McGraw-Hill, 2001. MOSA Handbook of Optics, 2nd edition, Vol 3. Chap 2
- 13 Zhao Xing, Fang Zhiliang, Cui Jicheng *et al.*. Study on the optical engine of the mini-projector [J]. Acta Optica Sinica, 2007, **27**(5): 913~918  
赵 星,方志良,崔继承 等. 微型投影机光学引擎的研究 [J]. 光学学报, 2007, **27**(5): 913~918