

文章编号: 0258-7025(2010)03-0680-05

基于非成像光学的 LED 高收光率的抛物反射器研究

金 骥 余桂英 林 敏

(中国计量学院计量与测试工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要 根据非成像光学理论,从能量传递的角度分析了发光二极管(LED)抛物反射器几何参数与 LED 绕垂直于光线传播方向轴旋转角度对能量收集率的影响,建立了统一的抛物反射器的光能利用率与几何参数及 LED 旋转角度的解析表达式。分析结果表明,利用光学扩展量来评价 LED 抛物反射器的能量收集率是合理的;通过旋转 LED 光源,可进一步提高光能收集率,抛物反射器的几何参数不同,其最佳的旋转角度也不同。仿真模拟结果与理论分析结论基本一致。

关键词 非成像光学;高效收光率;光学扩展量;发光二极管;抛物反射器

中图分类号 U463.65⁺1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103703.0680

Research of High Light Collection Efficiency of LED Parabolic Reflector Based on Non-Imaging Optics

Jin Ji Yu Guiying Lin Min

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

Abstract Based on the theory of non-imaging optics, the geometric parameters of light-emitting diode (LED) parabolic reflector and the impact of rotation angle of LED around the axis which is perpendicular to propagation direction on the efficiency of light collection are analysed in energy transfer aspect, and eventually unified closed relationships between efficiency of light collection of a parabolic reflector with the geometric parameters and the rotation angle are established. The results show that using étendue to evaluate the efficiency of energy collection of LED parabolic reflector is reasonable, and rotating the LED can further improve the efficiency, and for each different sets of geometric parameters, the best rotation angle is different. The simulation results are according with the theoretical analysis.

Key words non-imaging optics; high light collection; étendue; light-emitting diode; parabolic reflector

1 引 言

节能、环保是未来社会工业发展的主流,发光二极管(LED)照明在节能、环保方面极具发展潜力。LED 光源属“一次光源”,其耗电量只是同等亮度白炽灯的十分之一,同时还将减少二氧化碳的排放量和荧光灯的汞污染。此外,LED 照明还具有无频闪、无红外和紫外辐射、光色度纯等优点,是当之无愧的绿色光源。因此 LED 光源已逐步替代其他光源成为备受瞩目的下一代照明光源^[1~4]。LED 发

光管外的二次光学设计主要是根据不同的实际应用需求使 LED 出光后的空间光强分布发生改变,即光能量的分布发生变化,从而更有效、更合理地利用有限的光能量^[5~8]。光能的收集与分配是 LED 应用需要解决的两大问题,高的光能利用率是 LED 真正实现绿色照明的关键。

非成像光学理论起源于 20 世纪 60 年代中期,70 年代中期以后,Welford 等^[9,10]提出非成像光学概念。在非成像光学中,成像光学中的像差理论和成像

收稿日期: 2009-04-16; 收到修改稿日期: 2009-07-06

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: 金 骥(1983—),男,硕士研究生,主要从事 LED 照明设计方面的研究。E-mail: jinji1005@gmail.com

导师简介: 余桂英(1965—),女,硕士,副教授,主要从事照明和测量等方面的研究。

E-mail: yuguiying11@163.com(通信联系人)

质量不再适用于评判系统性能的优劣,光能利用率成为系统的评价标准,如何提高光能利用率也是 LED 照明系统的关键问题。非成像光学理论在 LED 照明设计方面的研究还处于起步阶段^[11~15],有许多问题值得进一步深入研究。

本文根据非成像中的光学扩展量理论,定量地研究了 LED 抛物反射器的几何收光率与抛物反射器几何尺寸和 LED 旋转角度之间的关系,建立了朗伯型 LED 光源经过抛物反射器后的能量利用率与反射器的收光角及 LED 光源旋转角度的统一表达式,利用光学软件仿真模拟证明了该理论的正确性。

2 高效反射器的设计

2.1 几何收光率

光学扩展量是非成像光学理论中一个重要的概念,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率,从而确定结构参数。光学扩展量的定义^[16]为

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

式中 n 为折射率, θ 是微元面积 dA 的法线与微元立体角 $d\Omega$ 的中心轴的夹角。

反射器的几何收光率 ξ 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。一般地,几何收光率 ξ 越大,反射器的光能利用率也越高。

假设 LED 光源的发光半角为 θ , 发光面积为 dA_s , 并近似看作点光源。由(1)式可知,对朗伯型的 LED,其发光半角为 90° ,其光源的扩展量为

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

图 1 所示抛物反射器是由抛物线绕其主轴旋转而成的,采用半杯抛物面,朗伯型 LED 光源水平朝下置于焦点处,反射器对于 LED 光源的收集角度为 θ 到 180° , 设 $\epsilon = \pi - \theta$ 为反射器对光源的收光角。图 2 为反射器扩展量的求解示意图,由图计算得到

$$E_p = dA_s \int_0^{\theta} \int_{\arccos \frac{\cos \theta}{\cos \beta}}^{2\pi - \arccos \frac{\cos \theta}{\cos \beta}} \sin \beta \cos \beta d\alpha d\beta + dA_s \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \sin \beta \cos \beta d\alpha d\beta. \quad (3)$$

式中 β 为 $\angle AOB$, 定义反射器的几何收光率为

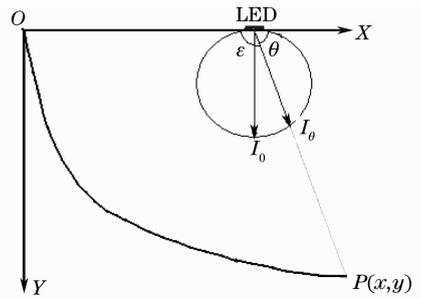


图 1 反射器张角与 LED 光源辐射模型图
Fig. 1 Reflector angle and LED radiation model

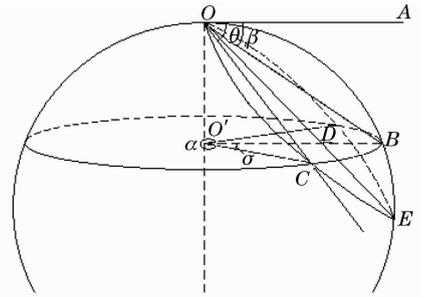


图 2 LED 光源被反射部分对应的立体角求解示意图
Fig. 2 Solve schematic of solid angle of reflected part of LED

$\xi = E_p/E_0$, 由(2), (3)式可得

$$\xi = \left(\epsilon - \frac{\sin 2\epsilon}{2} \right) / \pi. \quad (4)$$

图 3 为几何收光率 ξ 与收光角 ϵ 的关系曲线,由图可以看出,收光角越大,几何收光率越大。设抛物线方程为 $y^2 = 4fx$, 其中 f 为抛物反射杯的焦距。对于抛物线端点 P , 有

$$\tan \epsilon = \frac{4fy}{4f^2 - y^2}. \quad (5)$$

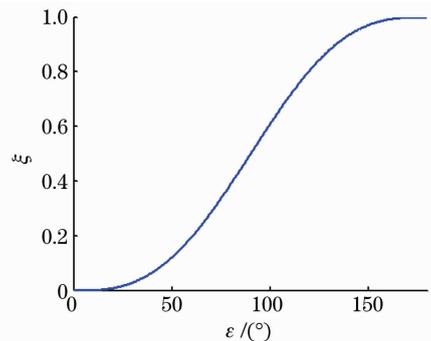
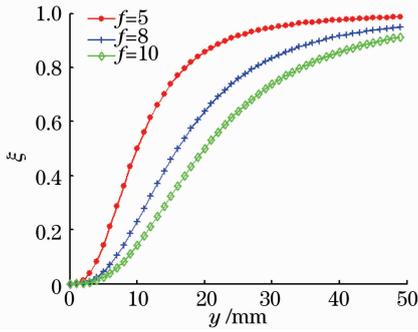


图 3 几何收光率 ξ 与收光角 ϵ 的关系曲线
Fig. 3 Relative curve of geometric collection rate ξ and collection angle ϵ

反射器的几何收光率 ξ 与口径 y 的关系如图 4 所示,显然几何收光率 ξ 为口径 y 的单调递增函数;对一定的口径,抛物反射杯的焦距 f 越小,几何收光率 ξ 越高。

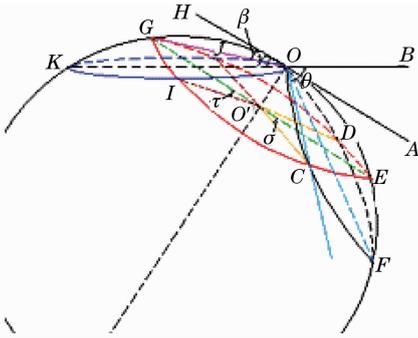
图4 几何收光率 ξ 与口径 y 的关系Fig. 4 Relative curve of geometric collection rate ξ and aperture y

2.2 LED 抛物反射器的光能利用率

反射器的光能利用率 η 为经反射器后出射的光通量与光源总光通量之比。设朗伯型 LED 光源发光面法线方向光强最大为 I_0 , 则其总光通量

$$\Phi_0 = \pi I_0. \quad (6)$$

图5为抛物反射镜的收光角仍为 ϵ , LED 光源发光面法线相对垂轴的旋转角为 γ (即 $\angle BOA = \gamma$) 时光被反射杯反射的立体角求解示意图, 可以看到上部和右侧都有一部分光遗漏。

图5 LED 光源相对垂轴旋转 γ 后被反射杯反射的立体角求解示意图Fig. 5 Solve schematic of solid angle of reflected part of LED that rotates γ relative vertical axis

由抛物镜出射的光通量为

$$\Phi = I_0 \left[\pi - \int_0^\gamma \arccos\left(\frac{\tan \beta_1}{\tan \gamma}\right) \sin 2\beta_1 d\beta_1 - \int_0^{\theta-\gamma} \arccos\left(\frac{\cos \theta}{\cos \beta_2 \cos \gamma} + \frac{\tan \beta_2}{\cot \gamma}\right) \sin 2\beta_2 d\beta_2 \right] \quad (7)$$

则反射器的光能利用率 η 为

$$\eta = 1 - \frac{1}{\pi} \int_0^\gamma \arccos\left(\frac{\tan \beta_1}{\tan \gamma}\right) \sin 2\beta_1 d\beta_1 - \frac{1}{\pi} \int_0^{\theta-\gamma} \arccos\left(\frac{\cos \theta}{\cos \beta_2 \cos \gamma} + \frac{\tan \beta_2}{\cot \gamma}\right) \sin 2\beta_2 d\beta_2. \quad (8)$$

式中 β_1 为 $\angle HOG$, β_2 $\angle AOF$ 。由(8)式可知, 反射器的光能利用率不仅与反射器的收光角 ϵ 有关, 还与光源相对反射器的角度 γ 有关。当 $\gamma=0$ 时由(8)式可得

$$\eta|_{\gamma=0} = \frac{1}{\pi} \left(\pi - \theta + \frac{\sin 2\theta}{2} \right). \quad (9)$$

比较(4)式和(9)式可知, 当光源水平放置时, 对抛物反射器光能利用率与几何收光率相等。图6为光源发光面与反射器轴线的夹角 γ ($\gamma=0, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$) 不同时光能利用率 η 与收光角 ϵ 的关系曲线。由图可见, 对一定的反射器通过旋转光源可以提高光能利用率; 对不同的收光角 ϵ , 反射镜获得最大的能量利用率时的 LED 光源旋转角度不同。

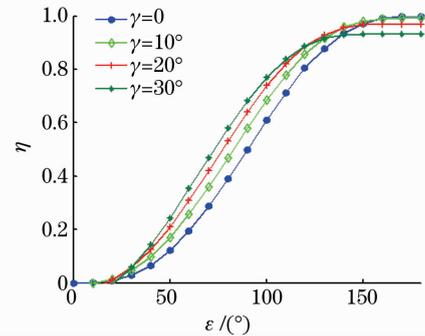
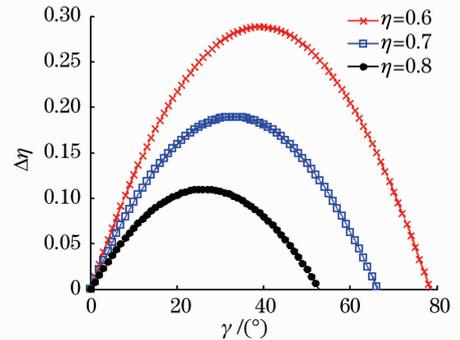
图6 当光源发光面与反射器轴线的夹角 γ 不同时光能利用率 η 与收光角 ϵ 的关系Fig. 6 Relation between light energy utilization η and collection angle ϵ with different rotation angle γ

图7所示为不同利用率时, 旋转角 γ 与利用率增量 $\Delta\eta$ 的关系。由图可见随着利用率的增加, 通过旋转角度而提高利用率的增幅逐渐减小, 同时, 需要旋转的角度也不断减小。

图7 利用率不同时旋转角 γ 与利用率增量 $\Delta\eta$ 的关系
Fig. 7 Relation between γ and $\Delta\eta$ with different utilizations

3 模拟仿真与分析

由第2节分析可知, 根据选定的光能利用率, 可以

确定反射杯的收光角,结合反射器口径要求,求得反射器焦距,从而确定抛物反射器的外形尺寸。如选择光能的利用率为 0.6,根据(9)式可以得到此时的收光角为 99.08° ,假设抛物反射器口径要求在 50 mm 以内,于是 $f < 10.66$ 。取 $f = 10$ mm,则 $y = 23.45$ mm。由图 7 可见,利用率为 0.6 时,其利用率增量最大值为 0.289,此时的旋转角度为 39.1° 。设反射器的反射率为 1,LED 光源的发光面直径为 2.5 mm,光通量为 100 lm。将观测屏放置在 1 m 处,大小为 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 。利用 TracePro 软件仿真模拟结果,如图 8 所示。可以看到落在观测屏上的光通量为 59.476 lm,收光效率为 59.476%,与理论分析的 60% 结果相符。模拟结果略低于理论结果是因为模拟中存在传输损耗,部分反射光线未能落在观测屏上。图 8 光斑低于水平线是因为 LED 并非点光源,从焦点朝向开口方向的发光面的光线经过反射器反射在水平线下方形成光斑。

将 LED 旋转 39.1° 后的仿真模拟结果如图 9 所示。在测试屏上的光通量为 75.417 lm,能量利用率提高了 26.8%,比理论值小是由于传输损耗和模

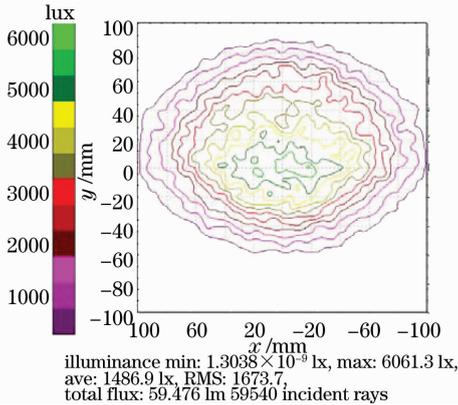


图 8 光源水平放置时($\gamma=0$)的仿真模拟结果

Fig. 8 Simulation result when rotation angle $\gamma=0$

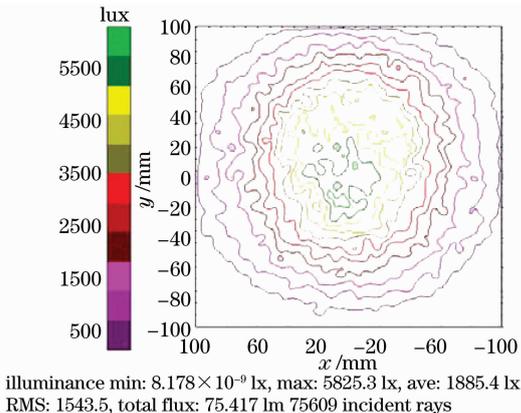


图 9 旋转角 $\gamma=39.1^\circ$ 时的仿真模拟结果

Fig. 9 Simulation result when rotation angle $\gamma=39.1^\circ$

型的累积误差。

图 10 显示了旋转不同角度 γ 时在软件中实际模拟的能量利用率增量的变化趋势,可以看到测试屏幕上增量的最大值是旋转角度为 39° ,与理论分析的结果一致。

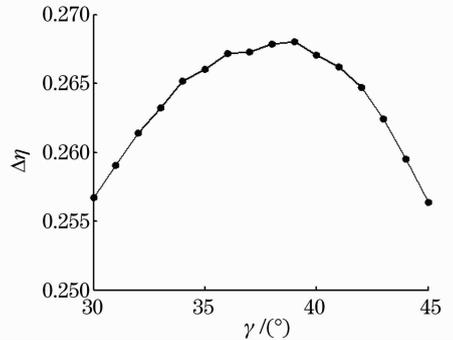


图 10 旋转角度 γ 与能量利用率增量 $\Delta\eta$ 的仿真结果

Fig. 10 Simulation result of rotation angle γ and incremental of utilization $\Delta\eta$

4 结 论

围绕着光能利用率,采用非成像光学理论,分析了影响抛物反射器能量利用率的几何参数,建立了统一的抛物反射器的光能利用率与几何参数和 LED 旋转角度的解析表达式。理论分析与仿真结果表明,利用光学扩展量来评价 LED 抛物反射器的能量收集率是合理的;对一定光学扩展量的抛物反射器,通过旋转 LED 光源,可以进一步提高光能利用率;抛物反射器的收光角不同,即几何参数不同,其最佳的旋转角度也不同。将非成像光学应用到 LED 照明系统的设计,不但丰富了非成像光学理论,也为 LED 照明系统的设计提供了新的理论方法。

参 考 文 献

- 1 F. M. Steranka, J. Bhat, D. Collins *et al.*. High power LEDs-technology status and market applications[J]. *Physical Status Solid (A) Applied Research*, 2002, **194**(2): 380~388
- 2 Daniel A. Steigerwald, Jerome C. Bhat, Dave Collins *et al.*. Illumination with solid state lighting technology [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum. Electron.*, 2002, **8**(2): 310~320
- 3 Regina Mueller-Mach, Gerd O. Mueller. White light emitting diodes for illumination [C]. *SPIE*, 2000, **3938**: 30~41
- 4 Karsten Eichhorn. LEDs in automotive lighting [C]. *SPIE*, 2006, **6134**: 613405
- 5 Tu Dawei, Wu Rengmao, Yang Hengliang *et al.*. Effect of optical structure on out light intensity distribution in LED package[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, **16**(5): 832~838
- 6 屠大维, 吴仍茂, 杨恒亮等. NBA 封装光学结构对光强分布的影响[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(5): 832~838
- 7 Lu Shenglin, Zhang Xianmin. Analysis and optimal design of illuminator for leadless tin solder joint inspection [J]. *Opt.*

- Precision Eng.*, 2008, **16**(8): 1377~1383
- 卢盛林, 张宪民. 无铅焊点检测光源的分析与优化设计[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(8): 1377~1383
- 7 Xu Wenhai, Zhao Huan, Lu Yongjun. Design of an optical system for UV curing source with LED array[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, **15**(7): 1032~1037
- 许文海, 赵欢, 芦永军. LED阵列式紫外固化光源光学系统设计[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(7): 1032~1037
- 8 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
- 9 W. T. Welford, R. Winston. High Collection Nonimaging Optics [M]. New York: Academic Press, 1989
- 10 L. M. Bassett, W. T. Welford, R. Winston. Nonimaging optics for flux concentration [C]. in *Progress in Optics*, E. Wolfete, 1989, **27**: 161~226
- 11 Yang Yi, Qian Keyuan, Luo Yi. A novel LED illuminance system based on nonimaging optics[J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(1): 110~115
- 杨毅, 钱可元, 罗毅. 一种新型的基于非成像光学的LED均匀照明系统[J]. *光学技术*, 2007, **33**(1): 110~115
- 12 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
- 13 F. R. Fournier, J. P. Rolland. Optimization of freeform non-imaging components for LED-based projector light engines[C]. in *Frontiers in Optics*, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2007), Paper FME4
- 14 Jianghong Jiao, Ben Wang. Etendue concerns for automotive headlamps using white LEDs[C]. *SPIE*, 2004, **5187**: 234~242
- 15 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
- 16 R. Winston, J. C. Minano, P. Benitez. *Nonimaging Optics*[M]. New York: Elsevier-Academic Press, 2005

《光学学报》“发光材料”专题 征 稿 启 事

近年来,发光材料以其独特的优越性,已成为我国光学材料研究领域的的主流方向之一,被广泛应用在显示、通信、卫星、生物、光学计算机等高科技领域。发光材料作为一门发展十分迅速的新兴技术科学,所提出的新原理、新方法和新技术已取得多项重大研究成果。《光学学报》计划于2010年7月正刊(EI核心收录)上推出“发光材料”专题栏目,现特向国内外广大专家学者征集“发光材料”方面原创性的研究论文,旨在集中反映该方面最新的研究成果及研究进展。

征稿范围包括:

- 光致发光材料: 灯用材料、长余辉材料、紫外发光材料、红外线发光材料、荧光染料、颜料材料等;
- 电致发光材料: 高场发光材料(直流粉末 DCEL, 交流粉末 ACEL, 薄膜发光, 厚膜发光, 有机发光)、低场发光材料(发光二极管(LED), 有机发光(OEL-OLED), 硅基发光, 半导体激光)等;
- 阴极射线发光材料: 彩色电视发光材料、黑白电视发光材料、像素管材料、低压荧光材料、超短余辉材料等;
- 辐射发光材料: α 射线发光材料、 β 射线发光材料、 γ 射线发光材料、 μ 放射发光材料、闪烁晶体材料、X射线发光材料、X射线存储发光材料、X射线增感发光材料、CT扫描发光材料等;
- 摩擦发光材料: 单晶发光材料、微晶发光材料等;
- 化学发光材料: 有机化合物发光材料(荧光染料)、液体发光材料、有机稀土发光材料等;
- 生物发光材料: 酶发光材料, 有机发光材料等;
- 反射发光(几何光学)材料: 光学镀膜反射材料、玻璃微珠反射材料等;
- 其他

特邀组稿专家: 郭太良 教授 福州大学

截稿日期: 2010年4月20日

投稿方式以及格式: 可通过中国光学期刊网网上投稿系统直接上传稿件(主题标明“发光材料”投稿), 详情请参见 <http://www.opticsjournal.net/gxxb.htm>。本专题投稿文体为中文, 其电子版请使用MS-word格式, 有任何问题请咨询马沂编辑, E-mail: CJL@siom.ac.cn; 电话: 021-69918427。

《光学学报》编辑部