

LED 照明的光学器件设计与仿真

曾 丹, 彭冬生, 蒋 月

(深圳大学 光电子器件与系统(教育部、广东省)重点实验室, 广东 深圳 518060)

摘 要: 大功率 LED 集成光源在实际照明工程应用很多, 但是集成光源的照明效果不是很理想。为了解决大功率 LED 集成光源难以直接应用于照明的问题, 根据非成像光学理论, 设定合适的初始参数, 利用能量守恒建立 LED 光源与目标照明面之间的映射, 设计了筒灯反射器和透镜。并用 Tracepro 软件对这两类光学器件进行模拟仿真, 均得到了良好的均匀圆形照明光斑。仿真结果表明, 设计出的反射器和透镜, 随着发光光源面积增大, 照度均匀性都降低, 当光源尺寸均设置为 1 mm×1 mm 时, 照明面上照度均匀性都达到 95% 以上, 当光源尺寸增大 10 mm×10 mm 时, 照明面的照度均匀性下降到 85%, 符合对均匀性很高的室内照明设计标准。

关键词: LED; 非成像光学; 筒灯反射器; 透镜; 照度均匀性

中图分类号: O434.19 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1220001

Optical devices design and simulation of LED illumination

Zeng Dan, Peng Dongsheng, Jiang Yue

(Key Lab of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province,
Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: Integrated high-power LED light source have been applied in many practical lighting engineering, but the illumination of the integrated light source is not very satisfactory. In order to solve the problem that integrated high-power LED light source cannot be applied directly in the field of illumination, a downlight reflector and a lens was designed by using the source-target map based on the energy conservation law in non-imaging optics. These two types of optical devices were simulated in Tracepro software, which obtained a good uniform round lighting spot. The simulation results show that the illumination uniformity is reduced with light emitting area increase. The illumination uniformity of the round lighting surface is above 95% when the source size is 1 mm×1 mm. The illumination uniformity is decreased to 85% when the source size is increased to 10 mm×10 mm. This research is conformed with the higher uniformity standards of indoor lighting design.

Key words: LED; non-imaging optics; downlight reflector; lens; illumination uniformity

收稿日期: 2016-04-12; 修订日期: 2016-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(60806017, 61136001); 深圳市科技计划项目(JCYJ20140418095735627)

作者简介: 曾丹(1989-), 男, 硕士, 主要从事光学设计方面的研究。

通讯作者: 彭冬生(1978-), 男, 副教授, 博士, 主要从事光电子材料与器件的研究。Email: pengdongsheng@163.com

0 引言

LED 光源就是以发光二极管(LED)为发光体的光源,它具有发光效率高、耗电量少、使用寿命长、安全可靠性强、有利于环保等优点,使得其应用领域非常广泛^[1-2]。但是,由于其空间光强近似朗伯型分布,如果将其直接应用于照明,大多数情况下都很难满足照明要求。因此,对于 LED 照明的应用,需要设计出相应的光学器件来改变照明效果^[3-5]。

非成像光学理论从光源的发光特性与最终所需的光学器件出发,考虑能量传递的问题,来进行二次光学设计,可以有效提高照明均匀性。目前常用的二次光学设计是根据非成像光学中的能量守恒理论,通过对自由曲面进行设计来达到设计目标。自由曲面设计方法主要有多参数优化法、微分方程法^[6]、同步多表明设计法(SMS)^[7]以及划分网格法^[8]。多参数优化法是在已有的光学面下,通过多次优化得到光学面,该方法设计耗时,效率低。微分方程法是通过数值求解偏微分方程得到自由曲面数据,但偏微分可解性很低,并且对数学知识及编程能力要求很高,从而限制了该方法使用。SMS 法是针对扩展光源设计,设计模型复杂,而且还有一定难度。划分网格法根据能量守恒原理定义光源与目标照明面之间的映射,利用这种映射来设计光学系统,并且可以通过细化网格来提高精度。当前,用划分网格法的研究者较多,如通过折反射定律及能量关系建立映射,通过划分网格,求得自由曲面透镜和反射器^[9-10],虽然能够得到较好的照明效果,但是对大功率、大尺寸 LED 配光效果不是很理想,这方面技术相对比较欠缺。

文中以非成像光学理论为基础,用划分网格法分别介绍了反射器和透镜设计,该设计方法简便,所得数据不复杂,方便应用于实际照明。通过对这两类器件进行仿真,结果表明,对于大尺寸光源,都能够实现较高的照度均匀度。

1 模型的建立

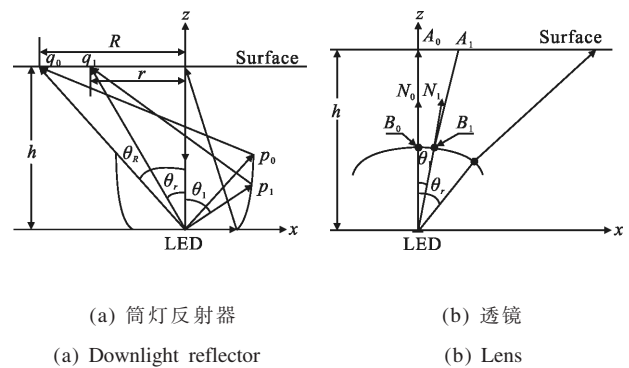
在自由曲面筒灯反射器和自由曲面透镜设计过程中,都遵循能量守恒定律,只是在设计筒灯时,需要考虑直接照射和反射^[11]。当光源经过透镜或反射器时,会发生折射或者反射,该过程遵循相应的折射

定律或反射定律。由于目标照明面具有圆对称性,因此设计光学器件时,只需设计光学器件在一个平面上的曲线并将其绕轴旋转一周即可。文中所选的光源为 LED 朗伯光源,理想的朗伯光源发光强度 I 与空间方向之间的关系如下:

$$I=I_0\cos(\theta) \quad (1)$$

式中: I_0 为 LED 法向光强; θ 为光源出射光与 LED 法向夹角。

建立如图 1 所示坐标系,LED 光源位于坐标原点, h 为光源到目标照明面距离。



(a) 筒灯反射器 (b) 透镜
(a) Downlight reflector (b) Lens

图 1 原理图

Fig.1 Principle diagram

观察图 1(a),由光通量守恒和三角关系可以得到如下表达式:

$$\int_r^R 2\pi r E_0 dr = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{\theta_i}^{\pi/4} I \sin\theta d\theta + \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{\pi/4}^{\theta_1} I \sin\theta d\theta \quad (2)$$

$$\sin\theta_r = r / \sqrt{r^2 + h^2} \quad (3)$$

式中: E_0 为照明面上的均匀照度值; R 为照明面范围的半径,直接出射部分的光线取值范围为 $0 \sim \theta_R$,这里 θ_R 最大值取 $\pi/4$,由公式(2)、(3)可以得到,反射器边缘离散点与照明面上的点有一一对应关系,再加上边界关系,可得到 $E_0 = I_0/R^2$ 。

同样,对于图 1(b),可以得到如下关系:

$$\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\theta_i} I \sin\theta d\theta = \int_0^r E_1 2\pi r dr \quad (4)$$

式中: E_1 为照明面均匀照度值,透镜照明范围最大半径为 R_1 ,根据边界关系可得到 $E_1 = I_0/R_1^2$ 。

根据图 1,设置反射器的初始点坐标和透镜的高度,求出初始的入射光线、出射光线、自由曲面法向量。三者之间的矢量关系式为^[12]:

$$[1+n^2-2\cdot n(\vec{Out}\cdot\vec{In})]^{\frac{1}{2}}\cdot\vec{N}=\vec{Out}-n\cdot\vec{In} \quad (5)$$

式中： \vec{In} 为入射光线的单位向量； \vec{Out} 为出射光线的单位向量， \vec{N} 为自由曲面单位法向量。在折射的情况下(如图 1(b))，公式中 n 为折射材料的折射率；在反射的情况下(如图 1(a))，公式中 n 值等于 1。运用迭代算法，可求出反射器和透镜在 $x-z$ 平面内的曲线的离散点坐标，如图 2 所示。然后将图 2 中离散点坐标分别导入 Solidworks 中，拟合成实体模型，如图 3 所示。

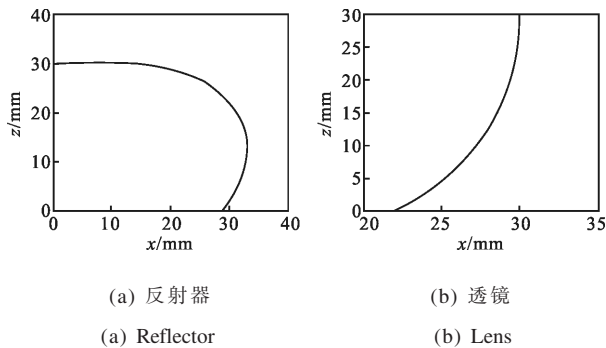


图 2 离散点坐标

Fig.2 Discrete point coordinates

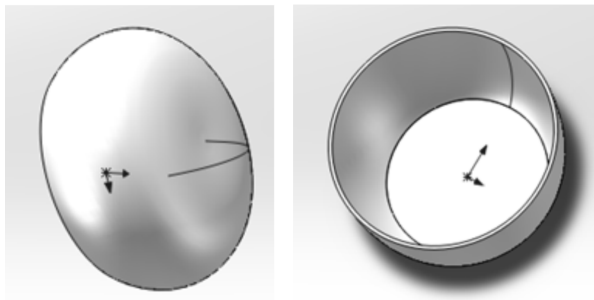


图 3 实体模型

Fig.3 Entity model

2 仿真结果与分析

将所建的透镜和反射器分别导入到 Tracepro 中进行仿真，总的光通量大小固定为 100 lm，光线追迹总数为 999 681 条。在仿真的过程中，其他参数不变，仅改变光源尺寸，其变化范围为 1 mm×1 mm~10 mm×10 mm (光源尺寸与光学器件高度尺寸之比是在 1:3 以内)。仿真结果表明，照度均匀性随光源尺寸增大而减小，因此，选用光源尺寸为 1 mm×1 mm、5 mm×

5 mm、10 mm×10 mm 作为参考，自由曲面筒灯反射器在不同尺寸下得到的照度分布图如图 4 所示。

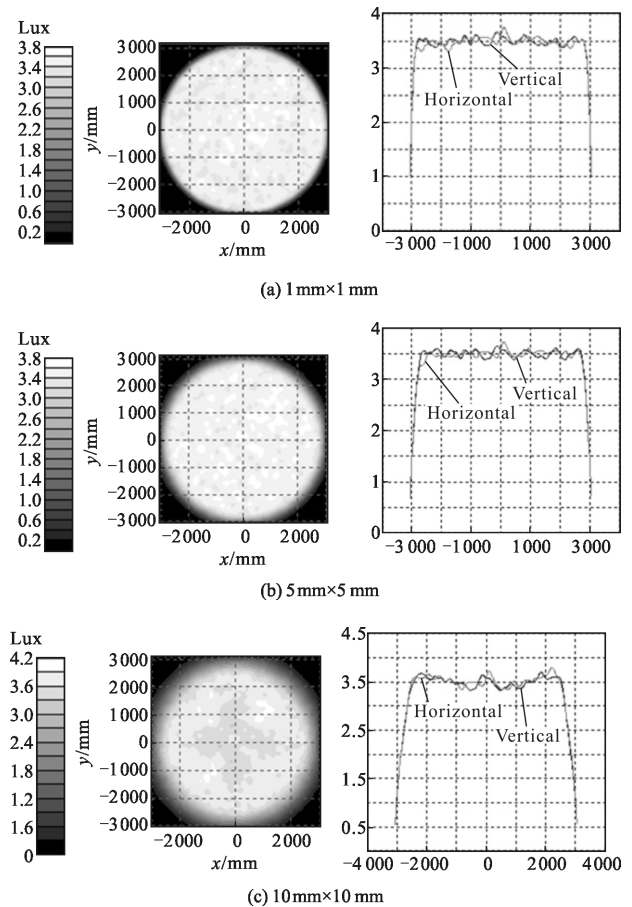


图 4 自由曲面筒灯反射器在不同尺寸光源下得到的照度分布图

Fig.4 Illuminance map of free-form surface downlight reflector at different light source sizes

从图 4(a)可以得到，对于尺寸为 1 mm×1 mm 的近似点光源，照明面上照度均匀性优于 95%，光能利用率为 99.663%。图 4 显示随着发光光源的面积增大，照明面上均匀面内的照度均匀性基本不变，但均匀面积和光能利用率在逐渐减小。产生这一现象是由于光源边缘光线不是按最初的设计出射，直射到照明面的面积增大，反射光线也会有一部分偏移了原有的路径，向外发生了偏移。从照度分布图中右边的剖面曲线可观察到，随着光源尺寸的变化，曲线两边的斜坡长度在增大，意味着在照明面上边缘部分的照度均匀性在减小。尽管这样，照明面上的照度均匀性都还很高。当光源大小增大到 10 mm×10 mm 时，照明面上照度均匀性高达 85%，光能利用率为 97.472%，达到了室内照明设计要求。自由曲面透镜

在不同尺寸光源下得到的照度分布如图 5 所示。

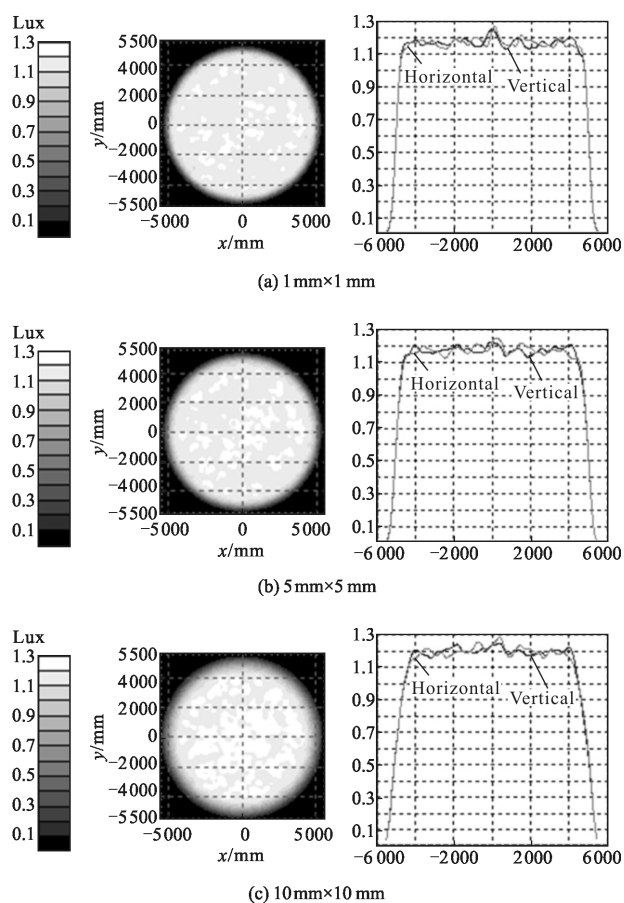


图 5 自由曲面透镜在不同尺寸光源下得到的照度分布
Fig.5 Illuminance map of free-form surface lens at different light source sizes

从图 5(a)可观察到,当光源大小为 $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ 时,照度均匀性优于 95%,光能利用率为 92.187%。图 5 显示了随着光源发光面积不断增大,光能利用率基本不变,照明面上均匀面内的照度均匀性基本不变,但是均匀面积逐渐减小,这是由于扩展光源的边缘光线在折射时偏移了原有的路径,从图 5 中的光斑图可观察到,有一部分光线向内发生了偏移,因此光能利用率基本保持不变。通过剖面曲线可知,随着光源尺寸变大,两边的斜坡长度也在逐渐增大,表面照明面边缘的照度均匀性在减小。当光源大小增大到 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 时,照明面上的照度均匀性还能高达 85%,满足室内照明要求。

3 结 论

文中采用非成像光学理论,从点光源设计出发,

通过设置合理的参数,编程、计算、画图,分别设计了自由曲面筒灯反射器和自由曲面透镜,仿真结果显示能够产生圆形均匀光斑。随着光源的发光面积不断增大,照明面上均匀面内的照度均匀性基本不变,但是均匀面积都逐渐减小,反射器的光能利用率逐渐减小,透镜的光能利用率基本不变,因此,照明面上的整体照度均匀性均减弱。不管是透镜还是反射器,当光源尺寸为 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 时,照明面的照度均匀性都能达到 85%,光能利用率在 90% 以上。但是考虑到透镜会发生折射,会有能量的损失。所以,一般情况下,反射器的光能利用率比透镜的高,并且在实际的设计过程中,透镜的结构比发射器复杂。因此,基于反射器的这些优势,在很多照明场合,可以优先考虑反射器的设计。不过,此方法设计中,光源尺寸与器件高度尺寸之比是在 1:3 以内,才能得到如此高的照明均匀性,对于更大的光源尺寸,可以考虑通过增大器件尺寸或阵列去实现。该方法设计出来的两类光学器件,所得到的照度均匀性满足室内照明的要求,文中涉及的方案可运用到大功率 LED 集成光源照明中去。

参 考 文 献 :

- [1] Tan Qian, Rao Feng, Zhang Yonglin, et al. LED spectral model characterized by several Gaussian functions [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(5): 493-498. (in Chinese)
谈茜, 饶丰, 张永林, 等. 由多个高斯函数表征的发光二极管光谱模型[J]. *中国光学*, 2012, 5(5): 493-498.
- [2] Jin Peng, Yu Chunyu, Zhou Qifeng, et al. Superior application of LED to street lighting [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(1): 51-55. (in Chinese)
金鹏, 喻春雨, 周奇峰, 等. LED 在道路照明中的光效优势[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(1): 51-55.
- [3] Liu Xiaodong, Li Xiangning, Sun Hui. Optical design for an LED traffic signal light [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3): 867-870. (in Chinese)
刘晓东, 李湘宁, 孙惠. LED 交通信号灯光学设计 [J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(3): 867-870.
- [4] Qin Hua, Feng Dongtai, Ge Shuoshuo, et al. Optical design of build-up aspherical solar concentrating mirror[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(5): 844-854. (in Chinese)
秦华, 冯东太, 葛硕硕, 等. 组合非球面太阳能聚光镜的光学设计[J]. *中国光学*, 2014, 7(5): 844-854.

- [5] Chen Yingcong, Wen Shangsheng, Luo Wanxia, et al. Design of LED optical system based on the substrata with freeform surface [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 2947–2953. (in Chinese)
陈颖聪, 文尚盛, 罗婉霞, 等. 自由曲面底板的 LED 光学设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(9): 2947–2953.
- [6] Liu Zhengquan, Sun Yaojie, Lin Yandan. Freeform reflector design for rectangular illuminance distribution based differential geometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 10220061–10220065. (in Chinese)
刘正权, 孙耀杰, 林燕丹. 基于微分几何的矩形照度分布自由曲面反射器设计 [J]. 光学学报, 2012, 32(10): 10220061.
- [7] Dejan Grabovickic, Pablo Benitez, Juan C Minano. Free-form V-groove reflector design with the SMS method in three dimensions [J]. *Optics Express*, 2011, 19(S4): A747–A756.
- [8] Wang Hong, Chen Zanji, Wu Heng, et al. Design method of LED headlamp freeform optical lens [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1529–1534. (in Chinese)
王洪, 陈赞吉, 吴衡, 等. 自由曲面 LED 汽车前照灯光学透镜设计方法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(5): 1529–1534.
- [9] Fournier F R, Cassarly W J, Rolland J P. Fast freeform reflector generation using source-target maps [J]. *Opt Express*, 2010, 18(5): 5295–5304.
- [10] Zhang Kang, Su Chengyue, Fu Qian, et al. Research into Optical Devices Based on Uniform Illumination [J]. *Journal of Guangdong University of Technology*, 2013, 30(1): 87–91. (in Chinese)
张康, 苏成悦, 付倩, 等. 基于均匀照明的光学器件研究 [J]. 广东工业大学学报, 2013, 30(1): 87–91.
- [11] Zhou Yiyi. Study on optical design for high-power LED lighting [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012. (in Chinese)
周壹义. 大功率 LED 照明系统的二次光学设计研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [12] Chen Zanji, Study on LED automobile headlamps optical system based on micro-lens array [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014. (in Chinese)
陈赞吉. 基于微透镜阵列的 LED 汽车前照灯光学系统研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.