

# 一种用于书写阅读的LED照明系统设计与仿真

马 骁,陈 丽,雷 亮,林清华,许焕坤

(广东工业大学 物理与光电工程学院,广东 广州 510006)

**摘要:** 概括了LED在照明领域中的应用,根据光度学原理和LED发光特性在CAD软件中建模了三维多圆环LED阵列,实现了均匀发光的球面光源并建模了旋转圆锥反射灯罩模型.导入TracePro中进行光线追迹,得到照度分布图,符合照明要求.该设计结构简单,节省了设计时间与制造成本.

**关键词:** 发光二极管;书写照明;照度;光线追迹

**中图分类号:** TM923.44

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1007-7162(2010)03-0056-04

LED(light emitting diode)发光二极管,是21世纪具有竞争力的新型固体光源,它具有效率高、光色纯、能耗低、寿命长、可靠耐用、无污染、控制灵活等优点.随着LED技术的不断完善,LED的光通量及光效将不断提高.LED技术的发展开辟了照明技术革命的新时代<sup>[1-2]</sup>.

台灯一般用在阅读、书写、设计、批阅等办公或学习照明使用场所.对于从事桌面工作的人来说,保证工作区的良好视觉环境,对提高学习和办公的质量,提高工作效率,保护身体健康有很大好处.桌面照明要有足够的照度,照度太低或太高会使阅读困难,容易造成阅读疲劳,影响阅读和工作效率<sup>[3]</sup>.从保护视力的角度出发,在一定范围内被照射表面的照度均匀度也要达到一定的要求.采用LED照明的优点是无辐射、高效率、寿命长、节约能源而且绿色环保,因此,LED台灯很适合书写阅读照明.

由于一般的反光灯罩设计要考虑LED光源本身的Lambertian分布,设计过程比较复杂,既加大了设计时间,又提高了灯罩的制作难度,无形中增加了制作成本.本文根据光度学原理和LED的发光特性,从光源设计着手,令LED有规律地排列,使LED阵列能够均匀发光,反光灯罩采用传统的旋转圆锥面,大大节约了设计时间与反光灯罩的制作难度.

## 1 基本原理

### 1.1 LED光学特征

LED光输出一般用光度学的光通量、光强、照度

等表征.光通量 $\phi$ 表示单位时间内光源发出的光能,单位流明(lm).光强 $I$ 用于描述LED发出的光沿空间各方向的分布,即单位立体角度内光通量 $I = \phi/\Omega$ ,单位坎德拉(cd).立体角表示为被照射面积与半径平方的比值,即 $\Omega = A/R^2$ ,如图1所示.照度 $E$ 指物体被照亮的程度,用单位面积所接受的光通量来表示,单位为勒克斯(lx),即 $\text{lm}/\text{m}^2$ <sup>[4-5]</sup>.表征LED的光度参数还有光轴、半强度角 $\theta_{1/2}$ 、偏差角 $\Delta\theta$ 、光束扩散角等等.

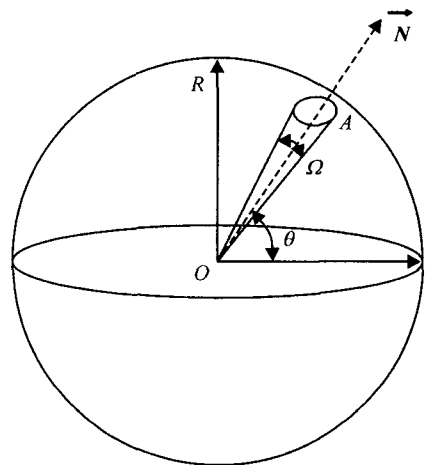


图1 光通量及光强示意图

### 1.2 单颗LED照度

一般当光源尺寸与光源到计算点之间的距离相比小很多时,可将光源视作点光源.点光源在与照射方向垂直的平面上产生的照度与光源至被照面的距离的平方成反比<sup>[6]</sup>,即

收稿日期: 2010-05-26

基金项目: 广东省科技计划资助项目(2009B01090049)

作者简介: 马 骁(1985-),男,硕士研究生,主要研究方向为光学工程.

通讯作者: 陈 丽,教授,主要研究方向为光信息处理、激光光谱、光学检测及设计. E-mail: ggchenli@126.com

$$E_h = I(\theta)/l^2, \quad (1)$$

$l$  是点光源至被照点的距离,单位为 m. 点光源照射在水平面上产生的照度  $E_h$  与光源的光强  $I(\theta)$  及被照面法线与入射光线的夹角  $\theta$  的余弦成正比,与距离  $l$  的平方成反比<sup>[7]</sup>,即

$$E_h = I(\theta)\cos\theta/l^2. \quad (2)$$

LED 光源的光强分布不是理想的 Lambertian 分布<sup>[8]</sup>,可由下式表示:

$$I(\theta) = I_0\cos^m\theta, \quad (3)$$

其中,  $I_0$  为法向光强,  $\theta$  为光束与法向之间的夹角(如图 1 所示). 半强度角  $\theta_{1/2}$  是指光强下降到光强最大值一半时所对应的角度,所以

$$I_0/2 = I_0\cos^m\theta_{1/2}, \quad (4)$$

即

$$m = -\ln 2/\ln(\cos\theta_{1/2}). \quad (5)$$

当 LED 照射到与其光轴方向垂直的平面时,由式(2)可得 LED 在水平面上的光照度分布为

$$E(x, y, z) = E_0(r)\cos^{m+1}\theta, \quad (6)$$

式中  $r$  是 LED 光源与被照点之间的距离,  $E_0$  是 LED 入射光线与其照射表面垂直的照度. 经过坐标转换可得

$$E(x, y, z) = \frac{z^{m+1}I_0}{[(x-X)^2 + (y-Y)^2 + z^2]^{\frac{m+2}{2}}}. \quad (7)$$

式(7)中,  $x, y, z$  是被照点的坐标,  $X, Y$  是光源的坐标.

### 1.3 LED 阵列照度

由于 LED 是一种非相干光源,因此两个 LED 对平面上某一区域的光照度为单个的叠加<sup>[9]</sup>,所以

$$E(x, y, z) = z^{m+1}I_0 \left\{ \left[ \left( x - \frac{d}{2} \right)^2 + y^2 + z^2 \right]^{\frac{-(m+2)}{2}} + \left[ \left( x + \frac{d}{2} \right)^2 + y^2 + z^2 \right]^{\frac{-(m+2)}{2}} \right\}, \quad (8)$$

式中  $d$  是两个 LED 之间的距离.

LED 阵列常采用线形阵列、矩形阵列和圆环排列. 线形阵列是将多颗 LED 按照等距离的直线排列方式来形成发光光源,线形排列方式的光源照射范围与亮度均有限,因此一般用于装饰照明. 矩形阵列的发光面呈现出矩形形状,每颗 LED 等距排列,矩形排列的灯具一般形成的发光面光照均匀、亮度集中、光照度高,矩形阵列的 LED 适用于要求被照射面较小且比较集中但照度要求值较高的照明场所. 圆环形阵列的特点是光照面积较大,光输出分

散<sup>[10]</sup>.

当 LED 排列成阵列形式时,平面上某一点的光照度是阵列中的各点光源照度的叠加. 以矩形  $N \times M$  阵列为例,由式(8)可以得到:

$N, M$  为奇数时

$$E(x, y, z) = z^{m+1}I_0 \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} \sum_{l=-\frac{M-1}{2}}^{\frac{M-1}{2}} \left[ (x-nd)^2 + (y-l d)^2 + z^2 \right]^{\frac{-(m+2)}{2}} \quad (9)$$

$N, M$  为偶数时

$$E(x, y, z) = z^{m+1}I_0 \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} \sum_{l=-\frac{M-1}{2}}^{\frac{M-1}{2}} \left[ \left( x - (2n-1)\frac{d}{2} \right)^2 + \left( y - (2l-1)\frac{d}{2} \right)^2 + z^2 \right]^{\frac{-(m+2)}{2}}. \quad (10)$$

其它形式的阵列所产生的照度计算方式以此类推,其依据即是平面上某一点的光照度由阵列中的各个点光源照度的叠加.

## 2 设计与仿真

### 2.1 照明设计

采用 CREE 公司 (<http://www.cree.com/cn/products/ledlamps>) 出品型号为 LC512TWN1-25P-A1 的白光 LED,其光强分布曲线如图 2 所示. 其半强度角为  $12.5^\circ$ ,最大光强为 7.2 cd,功率约为 0.1 W.

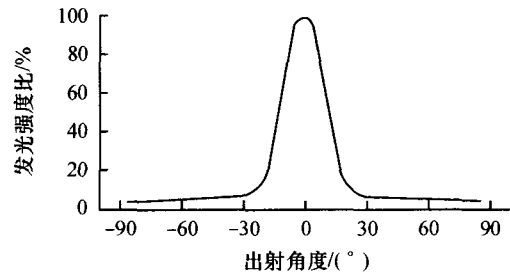


图2 LC512TWN1-25P-A1 LED 光强分布曲线

根据式(5)可得  $m \approx 29$ ,再根据式(8),令

$$\frac{d^2 E}{dx^2} = 0, \text{ 且 } x = 0, y = 0,$$

得

$$d_{\max} = \sqrt{\frac{4}{m+3}} \times z, \quad (11)$$

取  $z = 0.4$  m,得  $d_{\max} = 0.035$  m,因此只要两颗 LED 之间的距离小于  $d_{\max}$ ,即 3.5 cm,就可以在 0.4 m 远处得到较均匀的照度. 经过仿真计算,需要至少 30 颗 LED,考虑到反射灯罩内表面的吸收与传输过程

中能量的损耗,选择 37 颗 LED,排列方式为等角度排布的 3 圆周排列(顶点为单颗 LED),光源底座为一半径为 2 cm 的半球面,每两颗 LED 之间的距离均小于 3.5 cm,因此可以产生较均匀的照度,光源模型如图 3 所示,其中 LED 的半径为 2.5 mm.

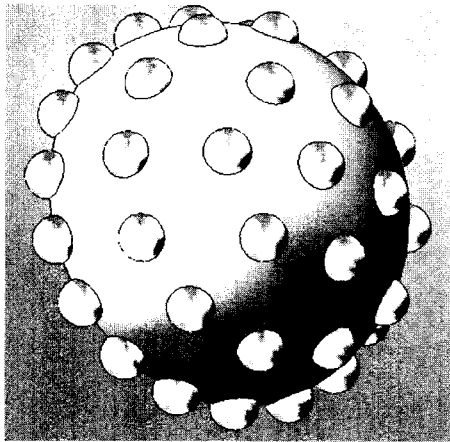


图3 LED光源模型

## 2.2 仿真

本文采用的仿真软件是 TracePro,这是美国 Lambda Research 公司开发的一套用于照明系统、光学分析、辐射度分析及光度分析的光学仿真软件.它是第一套以 ACIS solid modeling kernel 为基础的光学软件,可以直接进行 3D 绘图建模,并且兼容 ProE、Zemax 以及 CodeV 等软件的文件,采用 Non-Sequential 和蒙特卡罗法进行光线模拟,对光线进行有效和准确的分析和追迹<sup>[11]</sup>.运用计算机辅助设计光学系统,降低了设计难度,提高了效率,进而节约了开发成本. TracePro 能够建模较简单的 3D 模型,复杂的 3D 建模通常需要借助 CAD 软件,建模完成后导入 TracePro 中,根据仿真结果调整模型的几何参数,直至达到要求.本文的 LED 光源与灯罩建模均在三维建模软件 SolidWorks 中进行,完成建模后导入 TracePro 中进行光线追迹与照度分析.

可以通过不断调整反射灯罩的参数,使观察表面产生不同的照度分布.调整之后,仿真条件设置如图 4 所示,其中光源是半径为 2.2 cm 的均匀半球面光源,观察平面为距光源 40 cm 的吸收表面,比较出光效果和出于制作成本考虑,较之 CPC 制作工艺较复杂,本文使用的反射灯罩为传统的旋转圆锥形,出口半径为 10 cm,底部半径为 3 cm,其内表面为高反射面.追迹的光线数为 100 万条,如图 5 所示为随机选取的 100 万条光线的追迹图.

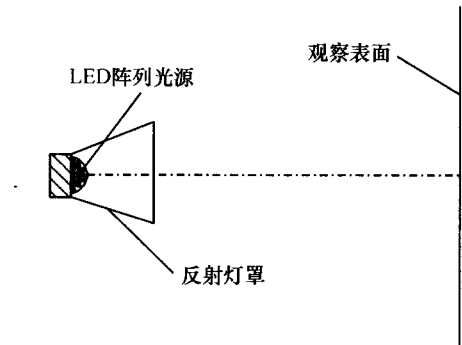


图4 仿真设置图

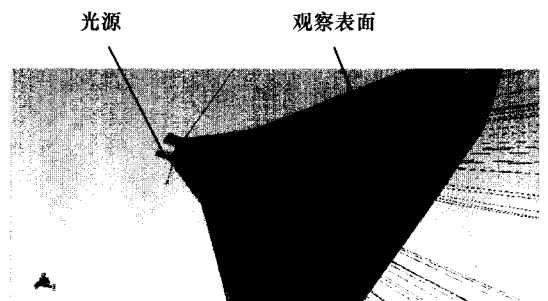


图5 光线追迹图

对于通常的照明器件,其光度数据必须以照度分布的形式在距照明器一定距离的观察平面上体现出来,观察面的光照度图如图 6 所示.

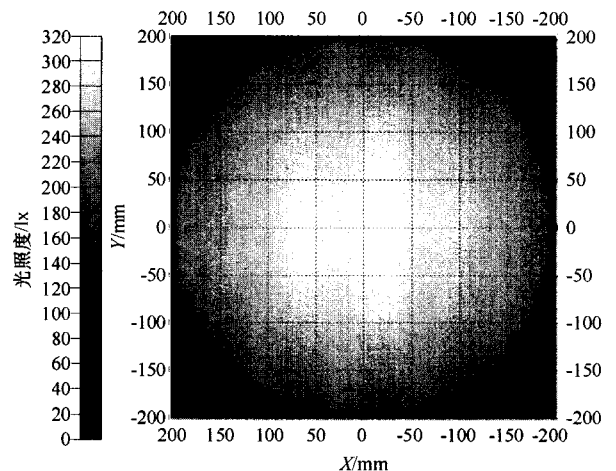


图6 照度图

## 3 结果与分析

从仿真结果可知,在半径为 20 cm 圆域内,照度为 250 ~ 320 lx. 书写阅读的平面照度国际标准为 300 ~ 500 lx<sup>[3]</sup>,通常在图书馆、自习室和书房等场所,背景照度比较低,不能达到阅读书写的照度要求,照度需要局部加强,一般的背景照度约为 100 ~ 150 lx,因此该照明台灯满足照度要求,并且照度变化幅度很小,不会产生明显的眩光现象.从图 6 中可见绝大多数光线都落入了圆域内,光能利用率高.

## 4 结论

LED光源在照明领域的应用日益广泛,本文根据光度学理论、LED的发光特性和实际应用条件,应用CAD软件建模之后导入TracePro中模拟,设计了一套用于书写照明的LED光学系统,经过仿真结果符合照度要求,适合书写阅读照明.本文不仅通过一个实例说明了设计LED照明器件的一般步骤,而且设计结构简单,节约了设计时间,发光效果良好.

### 参考文献:

- [1] 吴仍茂,屠大维,黄志华,等. LED照明系统的光照均匀性设计[J]. 光学技术,2009,35(1):74.
- [2] 蒋金波,杜雪,李荣彬. LED路灯透镜的二次光学设计介绍[J]. 照明工程学报,2008,19(4):59.
- [3] 花醒飞,刘乃涛. 秉文. 大功率LED在书写台灯中的应用[J]. 中国照明,2005(9):32-33.
- [4] 陈波,余彬海. 大功率LED封装结构的仿真设计[J]. 佛山科学技术学院学报:自然科学版,2006,24(1):29.
- [5] 叶嘉雄,常大定,陈汝钧. 光电系统与信号处理[M]. 北京:科学出版社,1997.
- [6] 汪继凡. 半导体照明光源的组装与测试[D]. 武汉:华中科技大学材料科学与工程学院,2006.
- [7] 姚家祯,王劲. 照明设计手册第五章照度计算[M]. 北京:中国电力出版社,1998.
- [8] 郭靖,金尚忠. 远场均匀照明的LED排列设计[J]. 光学仪器,2009,31(1):57.
- [9] Ivan Moreno, Maximino Avendaño-Alejo, Rumen I, et al. Designing light-emitting diode arrays for uniform near-field irradiance[J]. APPLIED OPTICS, 2006, 45(10): 2265-2272.
- [10] 杨光. 照明灯具中白光LED阵列的排列及配光[J]. 灯与照明,2008,32(1):2-3.
- [11] 李奇. 光学仿真技术在LED显示屏设计中的应用[J]. 现代显示,2006(64):49-52.

## Design and Simulation of One LED Illumination System in Reading and Writing

Ma Xiao, Chen Li, Lei Liang, Lin Qing-hua, Xu Huan-kun

(Faculty of Physics and Optoelectronic Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** The application of LED in illumination is generalized. LED array with multiple circles with three-dimensions, based on the photometric principle and the luminous characteristic of LED, is modeled in CAD software. A spherical surface with the characteristic of uniform illumination as a light source is achieved, and the model of the reflection with the figure of revolving cone is obtained, which is imported to TracePro to execute ray tracing to get the chart of illuminance conforming to the standard of illumination. The structure of designing is simple to save the time of design and the cost of manufacture.

**Key words:** LED; writing illumination; illuminance; ray tracing