

文章编号: 1000-5013(2012)01-0013-04

# 均匀照明的发光二极管阵列仿真与对比分析

黄启禄, 吴逢铁, 范丹丹

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 通过设定发光二极管所在平面与探测面之间的距离、所设计阵列的发光二极管个数及发光角度等参数, 依据斯派罗法则, 利用 Matlab 对表达式进行计算. 结合 TracePro 软件, 对方形阵列、三角形阵列及环形阵列等 3 个常见的发光二极管平面阵列进行模拟仿真及对比分析. 结果表明: 由于排列方式不同, 所得到的均匀照明的范围及所占面板空间也各不相同; 三角形阵列可得到较大范围的平坦度和占用较小的面板空间.

**关键词:** 发光二极管; 均匀照明; 环形阵列; 方形阵列; 三角形阵列; 发光角度

**中图分类号:** O 436

**文献标志码:** A

发光二极管(LED)因其节能、环保、寿命长、体积小、控制灵活、响应速度快等特点, 成为照明市场的主导, 使照明技术面临一场新的革命<sup>[1-4]</sup>. 通常情况下, 为照明应用的发光二极管光源是由若干个单独的发光二极管, 放置在一个面板上而组成. 发光二极管阵列越密集, 发光二极管与探测面越远, 获得的均匀性就越高; 然而, 发光二极管阵列密度受到有限的成本和可用空间, 特别是散热等问题的限制. 因此, Moreno 提出一种在有限空间内, 实现均匀照明的一些限制条件<sup>[5]</sup>. 通过这种方法, 可以对不同排列的发光二极管阵列实现均匀照明设计. 发光二极管平面阵列可分线形、环形. 在以往的报道<sup>[6-8]</sup>中, 对不同形式的阵列研究中, 都采用不同的发光二极管个数和发光角度, 虽然仍可以获得理想的均匀照明排布, 但在相同条件下, 各阵列的彼此差异却未能体现出来. 本文通过确定发光二极管个数及其发光角度两个先决条件, 对环形、方形及三角形阵列进行分析与模拟.

## 1 光学模型的建立和理论分析

理想情况下, 单个发光二极管光源是一个朗伯体, 光强分布由发光角度的余弦方程决定, 并主要依赖于半导体的封装材料和几何形状. 一个较为近似的光照度分布方程<sup>[9]</sup>为

$$E(r, \theta) = E_0(r) \cos^m \theta. \quad (1)$$

式(1)中:  $\theta$  为发光角度;  $E_0(r)$  为发光二极管沿光轴( $\theta=0^\circ$ )时距离光源  $r$  处的光照度 ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ );  $m$  值取决于发光二极管发光区域与球面密封材料的曲率中心的相对位置. 如果曲率中心刚好在芯片位置上,  $m \approx 1$ , 光源可看成是一个理想的朗伯体; 对于普通的发光二极管,  $m > 30$ , 并且强度随着发光角度的增大而下降明显.

$m$  值的大小由发光半角度  $\theta_{1/2}$  ( $\theta_{1/2}$  定义为当照度在  $0^\circ$  时一半的角度) 决定, 即

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

当发光二极管照射到与光轴垂直方向的平面上时, 该平面上照度可以表达为

$$E(r, \theta) = \frac{I(\theta)}{r^2} = \frac{I_0 \cos^m \theta}{r^2}. \quad (3)$$

收稿日期: 2011-02-25

通信作者: 吴逢铁(1958-), 男, 教授, 主要从事光束传输、变换与设计, 短光脉冲技术及非线性光学的研究. E-mail: ft-wu@public.qz.fj.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60977068); 福建省泉州市科技计划重点项目(2011G9)

式(3)中: $r$ 为发光二极管与该平面之间的距离。

假设被照面为一个平面(图1),将式(3)的照度分布在笛卡尔坐标系( $x, y, z$ )中表示,设探测面与光源的距离为 $z$ ,则到面上任一点的辐射照度可表达为

$$E(x, y, z) = \frac{z^m L_{\text{LED}} A_{\text{LED}}}{[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2]^{(m+2)/2}} \quad (4)$$

式(4)中: $L_{\text{LED}}$ 是发光二极管法线上的辐射亮度( $\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{sr})^{-1}$ ); $A_{\text{LED}}$ 是发光二极管芯片的发光面积( $\text{m}^2$ )。

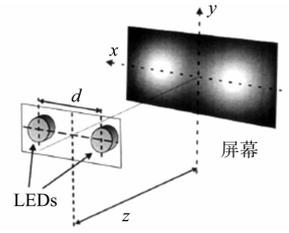


图1 LED三维几何图示及照明面

Fig.1 3D geometry diagram of LED and illuminating surface

## 2 典型发光二极管排布阵列的光辐照度分析

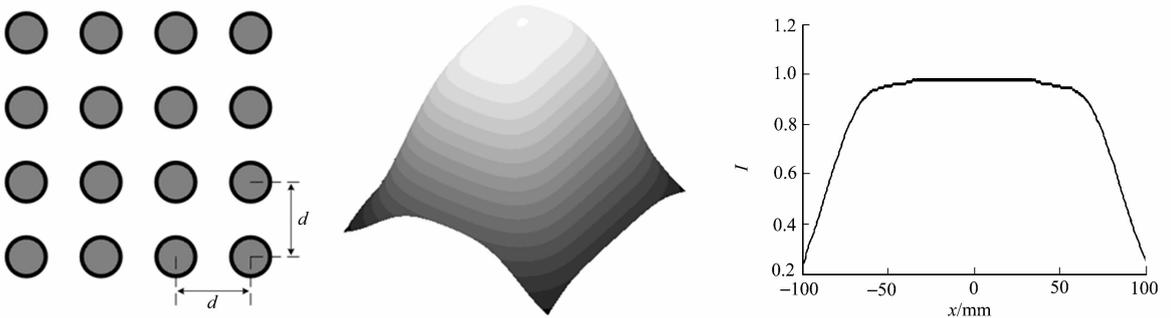
为了便于各阵列之间的对比,先设定以下几个参数:发光二极管所在平面与探测面之间的距离( $z$ )为200 mm;所设计阵列的发光二极管个数( $n$ )为16;发光二极管发光角度相关的 $m$ 值为81;3个典型的发光二极管阵列分别为方形阵列、三角形阵列及环形阵列。

### 2.1 发光二极管方形阵列

发光二极管方形阵列的排列结构,如图2(a)所示.方形结构排列中,假定相邻发光二极管之间的距离为 $d$ ,则 $N \times M$ 个发光二极管组成的方形发光二极管结构的光辐照度 $E$ 为

$$E(x, y, z) = z^m L_{\text{LED}} A_{\text{LED}} \times \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \{ [x - (N+1-2i)(d/2)]^2 + [y - (M+1-2j)(d/2)]^2 + z^2 \}^{-(m+2)/2} \quad (5)$$

根据斯派罗法则,对上式求二次导,并令 $\partial^2 E / \partial x^2 = 0$ ,且 $x=0, y=0$ ,并把已设计好的参数 $z=200$  mm,  $N=4, M=4, m=81$ 代入,通过Matlab编程计算可得: $d=44$  mm.模拟出的三维和二维辐射照度分布图,分别如图2(b), (c)所示。



(a) 立体图

(b) 三维辐射照度

(c) 二维辐射照度

图2 沿 $x$ 轴的方形阵列辐射照度分布图

Fig.2 Irradiance distribution of square array along the  $x$  direction

由图2可知,从屏上 $-50 \sim 50$  mm范围内辐射照度非常均匀,而且随着辐射距离的变大,总辐射照度值也会相应的下降;但经过配置后的发光二极管阵列在 $-75 \sim 75$  mm范围内依然有中心光辐射照度的80%。结果表明:经过合理配置的发光二极管单元分布及辐照距离可以达到较好的均匀度和辐照效果,可用于一般照明设计。

### 2.2 发光二极管三角形阵列

三角形阵列也称为六边形阵列,其阵列行间交错,同行发光二极管间距为 $d$ ,每个正三角形的边为 $d$ ,排列结构如图3(a)所示.在三角形阵列中,由 $\{(N \times M) - 0.25[2M + (-1)^M - 1]\}$ 个发光二极管叠加的总辐射照度 $E$ 为

$$E(x, y, z) = z^m L_{\text{LED}} A_{\text{LED}} \times \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{N-} \{ [x - (N_+ - 2i)(d/2)]^2 + [y - (M+1-2j)(\sqrt{3}d/4)]^2 + z^2 \}^{-(m+2)/2} \quad (6)$$

式(6)中:  $N_{\pm} = N + [(-1)^j \pm 1]/2$ . 对式(6)求二次导, 并令  $\partial^2 E/\partial x^2 = 0$ , 且  $x=0, y=0$ , 解方程求得  $d=38$  mm. 模拟出的三维和二维辐射照度分布图, 分别如图 3(b), (c) 所示.

由图 3(c) 可知, 三角形阵列所产生的辐射照度分布图具有不对称性, 但是仍有大约 120 mm 宽度在中心辐射照度值的 80% 以上, 而且相比方形阵列, 两发光二极管间距变小了. 这意味着放置发光二极管所需的面板面积大大减小了.

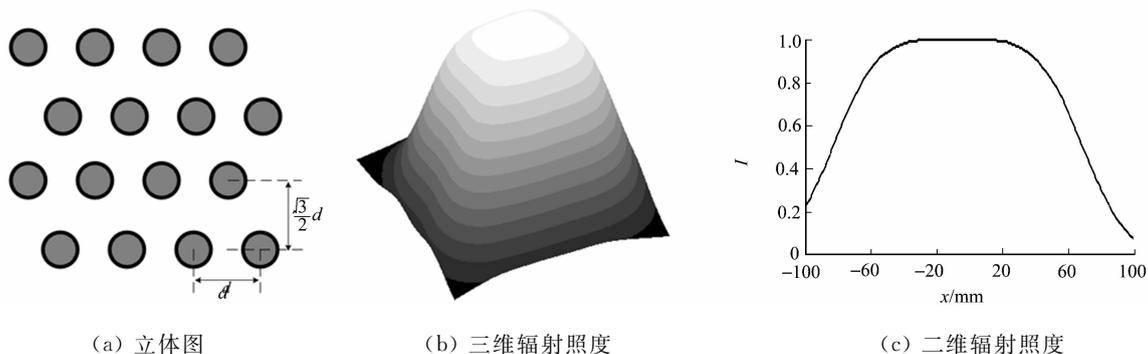


图 3 沿  $x$  轴的三角形阵列辐射照度分布图

Fig. 3 Irradiance distribution of triangular array along the  $x$  direction

### 2.3 发光二极管环形阵列

发光二极管环形阵列也是一种较为常见的形式, 把 16 个发光二极管分为两环, 内环半径为  $r_1$ , 外环半径为  $r_2$ , 其排列结构如图 4(a) 所示. 总辐射照度  $E$  可表示为

$$E(x, y, z) = z^m L_{LED} A_{LED} \left( \sum_{m=1}^M \{ [x - r_1 \cos(\frac{2\pi m}{M})]^2 + [y - r_1 \sin(\frac{2\pi m}{M})]^2 + z^2 \}^{-(m+2)/2} + \sum_{n=1}^N \{ [x - r_2 \cos(\frac{2\pi n}{N})]^2 + [y - r_2 \sin(\frac{2\pi n}{N})]^2 + z^2 \}^{-(m+2)/2} \right). \quad (7)$$

由斯派罗法则, 可求得  $r_1=29.8$  mm,  $r_2=66.3$  mm. 模拟出的三维和二维辐射照度分布图, 分别如图 4(b), 4(c) 所示.

由图 4 可知, 环形阵列产生的均匀辐射照度分布范围较小, 只有  $-30 \sim 30$  mm. 但从图 4(b) 可以看出, 其中心有较强的光分布, 辐射照度值大, 有一定的聚光效果.

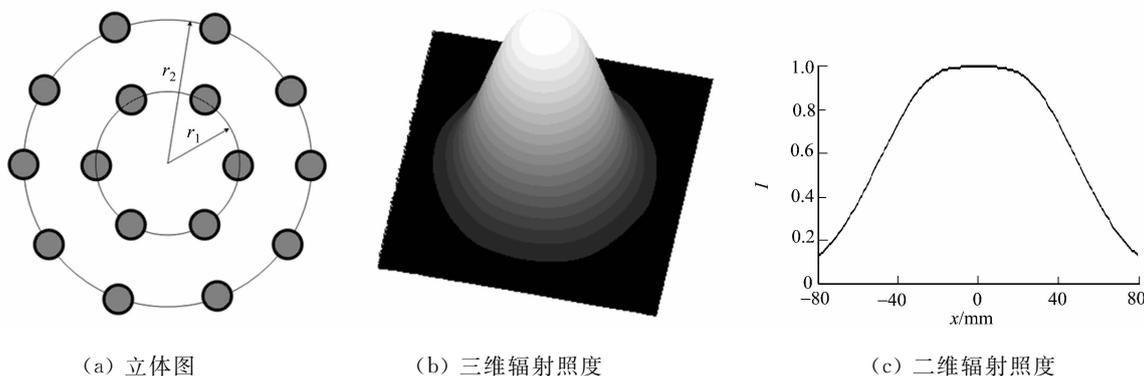


图 4 沿  $x$  轴的环形阵列辐射照度分布图

Fig. 4 Irradiance distribution of ring array along the  $x$  direction

### 3 结论

对 16 个发光二极管所组成的 3 种阵列进行了设计和模拟, 由二维和三维的辐射照度分布图可知, 中心区域都得到了最大化的平坦.

研究表明: 方形阵列中心  $-50 \sim 50$  mm 之间具有很好的照明均匀性, 且随着距离的增大, 屏上的总照度也会相应下降; 但在  $-75 \sim 75$  mm 范围内依然有中心光照度的 80%, 故可应用在手术照明或者一般通用照明中<sup>[10]</sup>; 对于三角形阵列, 其平面能量分布虽然较小, 但光能量集中度得到提高, 可应用

于光源体积有限制的照明中;环形阵列平坦范围较小,能量集中分布在一个圆形范围内,有良好的集光效果,可应用于机器视觉及普通照明中<sup>[11-12]</sup>.

随着发光二极管技术的不断进步,发光二极管阵列也将被大量应用于交通信号照明、汽车照明、仪器仪表和发光二极管显示屏等领域,并逐步取代荧光灯、白炽灯,成为新一代绿色照明光源.

### 参考文献:

- [1] SAKUMA K, HIROSAKI N, KIMURA N, et al. White light-emitting diode lamps using oxynitride and nitride phosphor materials[J]. *IEEE Trans Electron*, 2005, E88-C(11):2057-2064.
- [2] DAVID A, BENISTY H, WEISBUCH C. Optimization of light-diffracting photonic-crystals for high extraction efficiency LEDs[J]. *J Display Technol*, 2007, 3(2):133-148.
- [3] TZU Fu-ming, CHOU, Jung-hua. Optical density measurement of thin-film transistor liquid crystal display by a monochrome light-emitting diode[J]. *Appl Opt*, 2009, 48(17):3165-3169.
- [4] 杨特宁, 郭享群. 提高有机发光二极管性能的互掺过渡层[J]. *华侨大学学报:自然科学版*, 2001, 22(3):253-256.
- [5] MORENO I, AVENDAÑO-ALEJO M, TZONCHEV R I. Designing light-emitting diode arrays for uniform near-field irradiance[J]. *Appl Opt*, 2006, 45(10):2265-2272.
- [6] MORENO I. Uniform illumination of distant targets using a spherical light-emitting diode array[J]. *Opt Eng*, 2007, 46(3):033001-033007.
- [7] WHANG A J W, CHEN Yi-yung, TENG Yuan-ting. Designing uniform illumination systems by surface-tailored lens and configurations of LED arrays[J]. *J Display Technol*, 2009, 5(3):94-103.
- [8] 黄启禄, 吴逢铁. 基于近场均匀照明的LED二次曲线阵列的研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(10):3039-3043.
- [9] WOOD D. *Optoelectronic semiconductor devices*[M]. London: Prentice Hall, 1994.
- [10] TAGUCHI T, UCHIDA Y, KOBASHI K. Efficient white LED lighting and its application to medical fields[J]. *Physica Status Solidi*, 2004, 201(12):2730-2735.
- [11] DUBOVNIKOV A L, REPIN S S, NATAROVSKII S N. Features of the use of LEDs in artificial-vision systems[J]. *J Opt Technol*, 2005, 72(1):40-42.
- [12] DOMJAN L, KOCSANYI L, RICHTER P, et al. Stripe illuminator based on LED array and parabolic mirror for active triangulation sensors used on mobile robots[J]. *Opt Eng*, 2000, 39(11):2867-2875.

## Comparative Analysis and Simulation of LED Arrays in Uniform Illumination

HUANG Qi-lü, WU Feng-tie, FAN Dan-dan

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** According to Sparrow's criterion and using Matlab and optical software TracePro, we simulate and comparative analysis the three common LED planar array that is square, triangular and circular array by setting the three parameters: the distance between LED array and the detective screen, the number of LED array and the viewing angle of LED. As the LEDs are arranged in different ways, there have different range of uniform illumination distribution and space occupation. By comparison, the results show that the triangular array can produce a wider range of flatness and occupy little space

**Keywords:** light-emitting diodes; uniform illumination; circular array; square array; triangular array; view angle

(责任编辑: 黄晓楠      英文审校: 吴逢铁)