

辐射照度 文章编号: 0253-2239(2010)10-3039-05

基于近场均匀照明的 LED 二次曲线阵列的研究

黄启禄 吴逢铁

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要 基于几何光学与辐射照度理论,对满足均匀近场照明的半导体发光二极管(LED)二次曲线阵列进行分析,推导了光源照射到屏上的总辐射照度表达式。依据斯派罗法则,利用 Matlab 数值优化工具包对表达式计算,并结合 TracePro 软件对所设计的阵列进行光线追迹仿真。结果表明,与平面阵列相比,二次曲线阵列可以得到更大角度的光场分布。对两种特殊二次曲线的二维和三维阵列进行分析和模拟,使照明面上的均匀度得到优化。该方法为 LED 照明模组的设计提供了重要参考。

关键词 发光二极管;发光二极管阵列;照明均匀性;数值优化

中图分类号 O435.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103010.3039

Investigation of Uniform Illumination of Near-Field Targets Using a Conic Light-Emitting Diode Array

Huang Qilu Wu Fengtie

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Quanzhou, Fujian 362021, China)

Abstract Based on geometrical optics and irradiance theory, a conic light-emitting diode array with uniform near-field lighting was analyzed. Formulas for calculating total irradiance from source to collecting screen was deduced. According to Sparrow's criterion, the expression was calculated by using Matlab optimization toolbox. Furthermore, the software TracePro was used to simulate the designed array. The ray-tracing simulations showed that an array of light-emitting diodes assembled upon a conic surface can produce a wider angle distribution of light field than a flat array. The analysis and simulation of two-dimensional and three-dimensional of conic are carried out, and the uniformity of the illumination of the target is optimize. This method provided valuable reference to the LED lighting modules design.

Key words LED; LED arrays; illumination uniformity; numerical optimization

1 引 言

半导体发光二极管(LED)被称为第四代照明光源,是一种新型的绿色光源,具有节能、环保、寿命长、响应时间快和高显色性等优点,LED产品已广泛应用于生活、生产的各个领域^[1~3]。据报道,实验室已经达到单颗 100 lm/W 以上的光效水平^[4,5],但仍未能满足普通照明的要求,因此为了达到更高亮度的照明效果,必须将多个 LED 加以配置成一个阵列来满足大面积、高亮度的照明要求。

LED阵列大致可分为平面阵列和曲面阵列。平面阵列,可分为线型、环型、方型及三角型等排列,曲面阵列可分为规则曲面和不规则曲面。由于平面阵列的空间排列的一致性,很容易满足均匀照明的条件^[6,7],而曲面阵列却相对复杂得多。近年来 Ivan Moreno 等^[8]提出了用 LED 球面阵列实现均匀照明,并给出了满足均匀辐射照度的近场和远场的解析解,但是随着条件的变化,解析解却并不能完全达到照明的均匀性。

收稿日期: 2009-12-30; 收到修改稿日期: 2010-03-26

基金项目: 国家自然科学基金(60977068)和泉州市科技重点项目(2009G4)资助课题。

作者简介: 黄启禄(1985—),男,硕士研究生,主要从事 LED 光源照明系统方面的研究。E-mail: huangqilu@hqu.edu.cn

导师简介: 吴逢铁(1958—),男,博士,教授,主要从事光束传输、变换与设计、短脉冲技术及非线性光学等方面的研究。

E-mail: ftwu@public.qz.fj.cn(通信联系人)

本文提出利用二次曲线阵列实现均匀照明,对二次曲线排列的 LED 阵列分布进行了理论分析,并对特殊的二次曲线阵列进行了数值求解和模拟仿真,仿真结果表明,观察屏上的辐射照度值均匀分布,为 LED 灯具设计提供了精确的参考依据。

2 光学模型的建立和理论分析

理想的 LED 光源是一个朗伯体,光强分布由发光角度的余弦方程决定^[9],并主要依赖于半导体的封装材料和几何形状。一个较为近似的辐射照度分布方程为^[10]

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

式中 θ 为发光角度, $E_0(r)$ 为 LED 沿光轴 ($\theta=0$) 时距离光源 r 处的辐射照度 (W/m^2), m 值取决于 LED 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,则 $m \approx 1$,光源可看成是一个理想的朗伯体。对于普通的 LED, $m > 30$,并且强度随着发光角度的增大而下降明显。 m 值由发光半角度 $\theta_{1/2}$ ($\theta_{1/2}$ 定义为当辐射照度在零时一半的角度) 决定:

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

因此 LED 照射到与光轴垂直方向的平面上时,该平面上辐射照度可以表达为

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

式中 r 为 LED 与该平面之间的距离。假设被照面为一个平面,如图 1 所示,将(3)式的辐射照度分布转换成柱坐标(LED 位置坐标为 $x_0 = R \sin \theta \cos \phi$, $y_0 = R \sin \theta \sin \phi$, $z_0 = R \cos \theta$)。

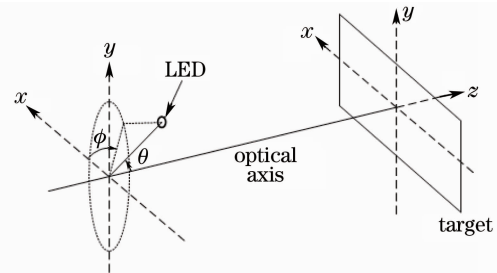


图 1 LED 三维几何图示及照明面

Fig. 1 Geometry of a LED displaced to the illuminated target

到面上任一点的平面辐射照度可表达为

$$E(x, y, z; R, \theta, \phi) = A_{\text{LED}} L_{\text{LED}} \frac{[(x - R \sin \theta \cos \phi) \sin \theta \cos \phi + (y - R \sin \theta \sin \phi) \sin \theta \sin \phi + (z - R \cos \theta) \cos \theta]^m}{[(x - R \sin \theta \cos \phi)^2 + (y - R \sin \theta \sin \phi)^2 + (z - R \cos \theta)^2]^{(m+2)/2}}, \quad (4)$$

式中 L_{LED} 是 LED 法线上的辐射亮度 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$], A_{LED} 是 LED 芯片的发光面积 (m^2)。

3 二次曲线阵列

采用斯派罗法则^[11,12]对照明均匀度进行分析,将被照明面坐标的位置看作是光斑的中心位置,即将 LED 的光斑作为计算考虑的对象来验证其分布,要使被照明中心实现平坦且最大的辐射照度分布,在总照明公式上可以表示为总辐射照度大小与位置坐标所形成二维曲线的斜率为零,即曲线方程二阶导为零。为使照明度最大化均匀,令接收面 $x=0$, $y=0$ 处的总辐射照度的二阶导为零,得到一个关于 m, R, z, θ, ϕ 的表达式,若考虑远场照明 ($z \gg R$), R 的影响可忽略,则得到一些简单的近似解析解。而本文主要采用数值解法较精确地对近场照明^[13] ($z,$

R 相当) 进行分析,由于二次曲线不同角度 R 的变化,因此 R 对照明面上的辐射照度有较大的影响。下面主要研究两种特殊的二次曲线阵列,圆阵列和抛物线阵列。

3.1 圆阵列

3.1.1 二维圆阵列

在考察 LED 阵列前,先研究两个 LED 的辐射辐射照度分布情况。如图 2(a) 所示,两个相同的 LED 分别对称地分布在 z 轴的两边, R 为 LED 所在圆的半径。

总辐射照度 E 由两个 LED 分别在屏上的叠加, $E(x, y, z) = E(x, y, z; R, \theta, 0) + E(x, y, z; R, -\theta, 0)$, 对 E 求二次导并令在 $x=0, y=0$ 处 $(\partial^2 E)/(\partial x^2) = 0$, 得

$$m(m-1)(m+2)^{-1} [R^2 \sin^2 \theta + (z - R \cos \theta)^2]^2 \times [z \cos \theta - R]^{-2} + 2mR [R^2 \sin^2 \theta + (z - R \cos \theta)^2] \times [z \cos \theta - R]^{-1} - \sin^2 \theta [R^2 \sin^2 \theta + (z - R \cos \theta)^2] + (m+4)R^2 = 0. \quad (5)$$

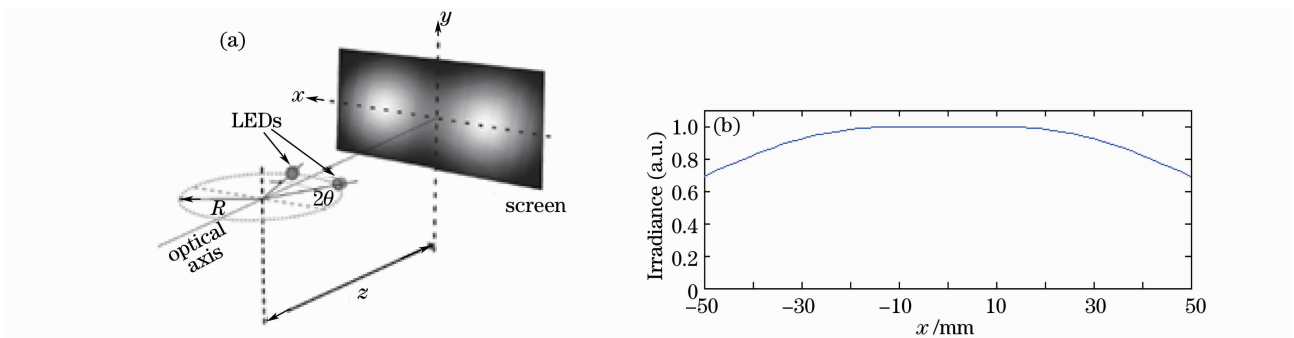


图 2 (a) 阵列中心距屏为 z 的几何图示, (b) $y=0$ 处, 沿 x 轴的统一辐射辐射照度分布
Fig. 2 (a) Diagram of the array with a screen at a distance of z , (b) uniform irradiance distribution along the x direction at $y=0$

为了得到精确的解, 利用 Matlab 数值优化工具包对上式方程进行求解。图 2(b) 为沿 x 轴的辐射照度分布, 所选的参数值为 $m=4$, $z=100$ mm, $R=30$ mm, $\theta=21.00^\circ$, 由图可知, 观察屏的辐射辐射照度得到均匀的分布。

3.1.2 环型阵列

环型阵列是关于光轴旋转对称的阵列, 如图 3(a) 所示。对于此阵列, 总的辐射辐射照度 E 为各个 LED 叠加的总和, 即

$$E(x, y, z) = \sum_{n=1}^N E\left(x, y, z, R, \theta, \frac{2\pi n}{N}\right), \quad (6)$$

式中 N 为总的 LED 个数, θ 为每个 LED 与光轴之间的夹角。对 E 求二次导并令在 $x=0, y=0$ 处 $(\partial^2 E)/$

$(\partial x^2) = 0$, 选取参数 $N=4, m=4, z=100$ mm, $R=30$ mm, 阵列立体图如图 3(a) 所示, 然后对其进行求解, 得到 $\theta=28.4989^\circ$ 。

图 3(b) 为 $y=0$ 时, 沿 x 轴的二维辐射辐射照度分布图, 图 3(c) 为三维辐射辐射照度模拟分布图, 由图可知, 从屏上 $-18 \sim 18$ mm 范围内辐射辐射照度比较均匀, 而随着距离的变化, 由于 LED 本身并不是一个均匀的发光体, 而是随着发光角度的增大而衰减, 因此屏上的总辐射辐射照度也会相应的下降, 但是经过配置后的 LED 阵列在 $-50 \sim 50$ mm 范围内依然有中心辐射辐射照度的 80%。

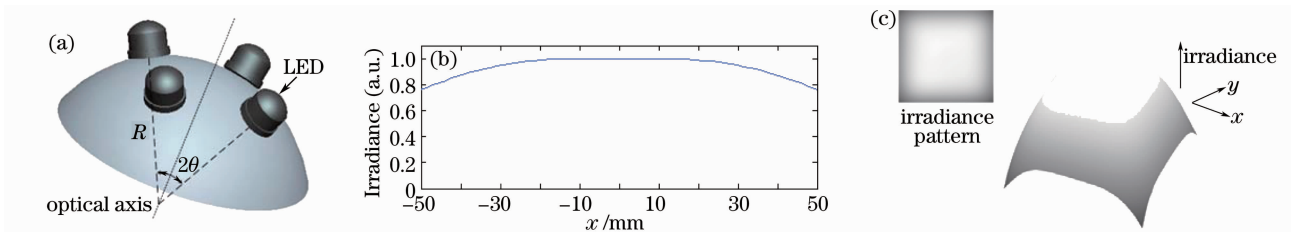


图 3 (a) $N=4$ 时的环形阵列立体图, (b) $y=0$ 处, 沿 x 轴的二维辐射辐射照度分布图, (c) 此阵列的三维辐射辐射照度分布图
Fig. 3 (a) Schematic diagram of a spherical array with $N=4$, (b) resulting two-dimensional distribution along the x direction at $y=0$, (c) three-dimensional irradiance distribution of this array

3.2 抛物线阵列

3.2.1 二维抛物线阵列

在大多数情况下, 阵列曲面并不完全符合一个标准的圆方程, 而是一个二次曲线。对于此种情况, 依然从最简单的一维曲线来分析。假设此曲线为一条抛物线, 对于此阵列, 令抛物线方程为

$$R \cos \theta = a(R \sin \theta)^2 + b, \quad (7)$$

式中 a, b 为方程极坐标下的两个参数, R 为 LED 中心到原点的距离, θ 为其与光轴的夹角。为了得到均匀的辐射照度分布, 令 LED 排布关于光轴对称, 若 LED 个数 $N=6$ [如图 4(a) 所示], 每个 LED 发光角

度及所给曲线给定, 即 m, a, b 为给定常数, 则辐射辐射照度方程化为一个关于 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 的等式。(4) 和 (7) 式联立, 依据斯派罗法则, 对总辐射辐射照度场 E 求二次导并令在 $x=0, y=0$ 处 $(\partial^2 E)/(\partial x^2) = 0$, 结果得到一个包含三个未知数的等式, 因此要得到一组解析解是困难的。采用 Matlab 优化工具包, 得到一系列数值解。对于解的取舍用三方面的考虑: 1) 选取的角度不能使两相邻的 LED 重叠; 2) LED 排布不能因被其他 LED 遮挡而损失光线; 3) 通过光学分析软件 Tracepro 所模拟的效果图最终选定所要的解。图 4(b) 为当 $m=6, a=-0.01$,

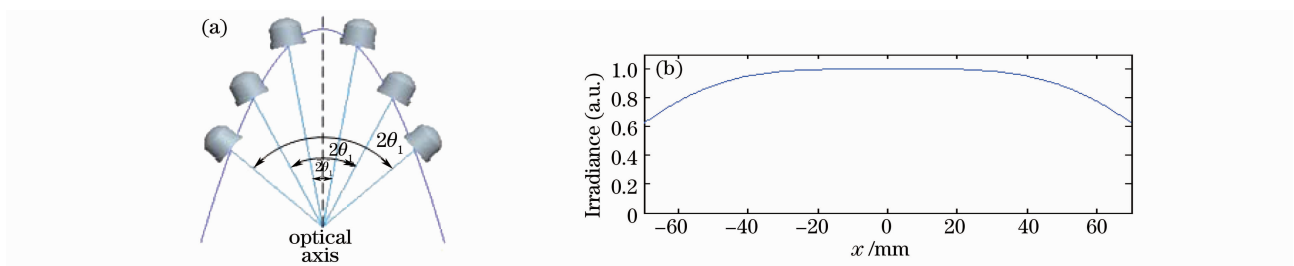


图 4 (a) $N=6$ 时的抛物线阵列结构示意图, (b) $y=0$ 处, 沿 x 轴的二维辐射辐射照度分布图

Fig. 4 (a) Schematic illustration of a parabolic array with $N=6$, (b) uniform irradiance distribution of this array along the x direction

$b=50, z=100$ mm, $\theta_1=10.4800^\circ, \theta_2=27.7820^\circ, \theta_3=49.2917^\circ$ 时的沿 x 轴的二维辐射辐射照度分布图。

3.2.2 旋转抛物线阵列

LED 旋转抛物线阵列的结构示意图如图 5(a) 所示, 其总辐射辐射照度由 M 环, 每环有 N_i 个 LED 组成的阵列的辐射辐射照度总和 (其中 $i=1, \dots, M, N_i \geq 3$) 构成:

$$E(x, y, z) = \sum_{i=1}^M \sum_{n=1}^{N_i} E\left(x, y, z, R, \theta_i, \frac{2\pi n}{N_i}\right). \quad (8)$$

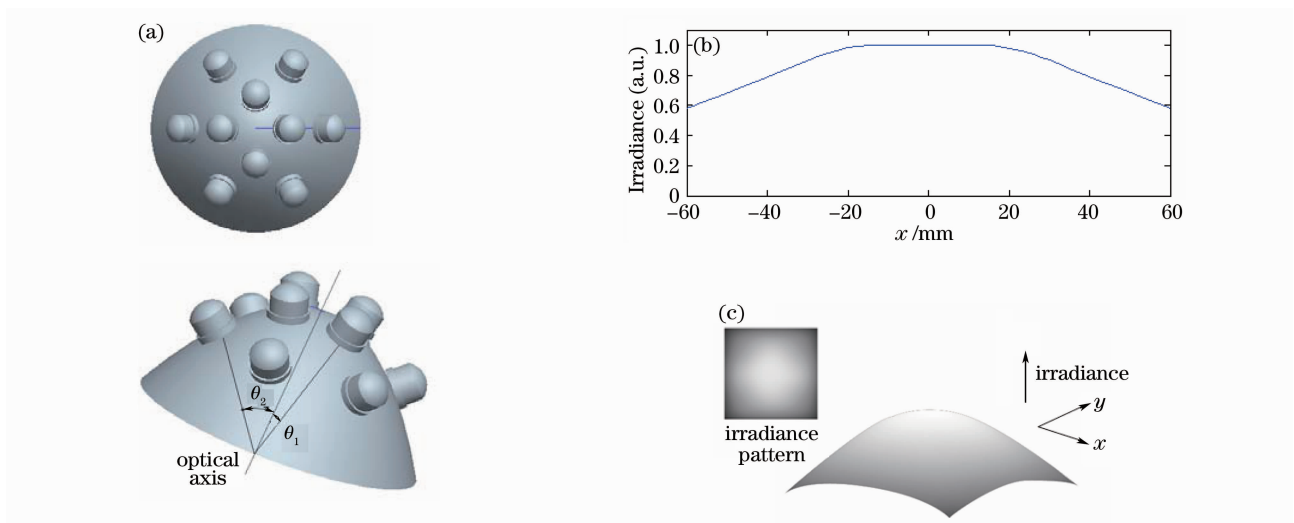


图 5 (a) 当 $M=2, N_1=4, N_2=6$ 时的抛物面阵列结构示意图, (b) $y=0$ 处, 沿 x 轴的二维辐射辐射照度分布图,

(c) 此阵列的三维辐射辐射照度分布图

Fig. 5 (a) Schematic illustration of a paraboloid array with $M=2, N_1=4, N_2=6$, (b) resulting two-dimensional irradiance distribution along the x direction at $y=0$, (c) three-dimensional irradiance distribution of this array

4 结 论

通过分析可知, 被照面上的总辐射辐射照度场由模组曲面形状, 单颗 LED 的发光角度, 两 LED 之间的距离与及阵列中心到被照明面上的距离等因素决定, 由于两 LED 之间的夹角对总照明场影响较大且具有很大的调整灵活性, 因此通常通过求解此夹角来达到均匀照明的设计要求, 但也可以通过实际

由于只考虑极坐标下 θ 与 R 之间的关系, 因此两参数仍可由 (7) 式来表示。令 $M=2, N_1=4, N_2=6, m=6, a=-0.01, b=50, z=100$ mm, 求得 $\theta_1=20.6266^\circ, \theta_2=33.2316^\circ$ 。如图 5(b) 为在 $y=0$ 处, 沿 x 轴的二维辐射辐射照度分布图。图 5(c) 为此阵列的三维辐射辐射照度分布图。如图 5 可知中心辐射辐射照度得到最优化的平坦分布。

情况对其它参数进行求解。通过分析与模拟, 可以发现被照面上的辐射辐射照度分布得到最大范围的优化。鉴于数值解法对参数要求比较高, 也具有相当大的精确度, 所以此方法不仅适用于近场照明同样可以应用于远场照明。

参 考 文 献

- 1 Y. Narukawa. White-light LEDs[J]. *Opt. Photon. News*, 2004,

- 15: 24~29
- 2 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
- 3 Zhou Taiming, Song Xianjie, Zhou Wei. LED-21st century's new light source for lighting[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2001, **12**(4): 37~40
周大明, 宋贤杰, 周伟. LED-21 世纪照明新光源[J]. *照明工程学报*, 2001, **12**(4): 37~40
- 4 Zhou Yinhua, Tang Yingwen, Rao Jianpin *et al.*. Improvement for extraction efficiency of vertical GaN-based LED on Si substrate by photo-enhanced wet etching[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 252~255
周印华, 汤英文, 饶建平等. 光增强湿法刻蚀提高 Si 衬底垂直结构 GaN 基 LED 的出光效率[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 252~255
- 5 Kuang Hai, Liu Junlin, Cheng Haiying *et al.*. Effect of transferred submount materials on properties of GaN-based LED chips grown on Si substrate [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 143~145
邝海, 刘军林, 程海英等. 转移基板材质对 Si 衬底 GaN 基 LED 芯片性能的影响[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 143~145
- 6 I. Moreno, M. Avendaño-Alejo, R. I. Tzonchev. Designing light-emitting diode arrays for uniform near-field irradiance[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(10): 2265~2272
- 7 Hu Hailei, Lai Aiguang, Xie Shusen. Studies of illuminance distribution of LED arrays for road illumination [J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2009, **20**(1): 77~80
胡海蕾, 赖爱光, 谢树森. 基于道路照明的 LED 阵列光照度分布研究[J]. *照明工程学报*, 2009, **20**(1): 77~80
- 8 Ivan Moreno. Uniform illumination of distant targets using a spherical light-emitting diode array [J]. *Opt. Engng*, 2007, **46**(3): 033001(1~7)
- 9 Yu Guiyin, Jin Ji, Ni Xiaowu *et al.*. Design for LED uniform illumination reflector based on etendue[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2297~2301
余桂英, 金骥, 倪晓武等. 基于光学扩展量的 LED 均匀照明反射器的设计[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2297~2301
- 10 D. Wood. *Optoelectronic Semiconductor Devices* [M]. London: Prentice Hall, 1994
- 11 M. A. Gennert, N. Wittels, G. L. Leatherman. Uniform frontal illumination of planar surfaces; where to place the lamps [J]. *Opt. Engng*, 1993, **32**: 1261~1271
- 12 G. O. Reynolds, J. B. DeVelis, G. B. Parrent *et al.*. *The New Physical Optics Notebook* [M]. Ebsllingham; SPIE Press, 1989. 38~45
- 13 Ivan Moreno, Ching-Cherng Sun, Rumen Ivanov. Far-field condition for light-emitting diode arrays[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**: 1190~1197